ATZ/MTZ-Fachbuch



Heinz Burg
Andreas Moser *Hrsg.*

Handbuch Verkehrsunfall-rekonstruktion

Unfallaufnahme · Fahrdynamik · Simulation

3. Auflage

DEKRA
Alles im grünen Bereich.

Springer Vieweg

ATZ / MTZ-Fachbuch

Unfallanalytiker (m/w) gesucht

für die technische Rekonstruktion von Verkehrsunfällen



Wegen der guten Auftragslage suchen wir weitere Ingenieure mit gesundem Urteilsvermögen, Diskussionsbereitschaft und Argumentationsfreude. Solide Kenntnisse in Mechanik und Fahrzeugtechnik setzen wir voraus.
Sollten Sie Ihr Studium noch nicht beendet haben, können Sie sich als studentische Hilfskraft bei uns bewerben. Seit Jahren betreuen wir zudem Bachelor- und Masterarbeiten sowie Studenten im Praxissemester.

Einen Einblick in unsere Arbeit erhalten Sie unter www.unfallrekonstruktion.de.
Über das abwechslungsreiche Berufsbild des Unfallanalytikers informiert z. B. www.colliseum.net.

Bewerbungsunterlagen bitte als PDF an:

Ingenieurbüro
Morawski + Hugemann
Hemmelrather Weg 201
51377 Leverkusen
buero@unfallrekonstruktion.de

Heinz Burg · Andreas Moser *(Hrsg.)*

Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion

Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation

3. aktualisierte Auflage

Springer Vieweg

Herausgeber
Heinz Burg
Burgen, Deutschland

Andreas Moser
Leonding, Österreich

Das Buch erschien in einer Vorauflage unter dem Titel „Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion“ unter der Herausgeberschaft von Heinz Burg und Hartmut Rau im Verlag INFORMATION Ambs GmbH.

ATZ / MTZ-Fachbuch

ISBN 978-3-658-16142-2 ISBN 978-3-658-16143-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Springer Vieweg
© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2007, 2009, 2017
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Straße 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Das vorliegende Buch tritt die Nachfolge des Handbuchs der Verkehrsunfallrekonstruktion unter der Herausgeberschaft Burg/Rau an. Dieses Buch erschien im Jahr 1981. In der Zwischenzeit hat sich die Verkehrsunfallrekonstruktion fast schon zu einer eigenen wissenschaftlichen Disziplin entwickelt. Immer mehr Personen forschen auf diesem Gebiet, machen Versuche oder entwickeln Berechnungsverfahren und -programme.

Obwohl die Verkehrsunfälle mit getöteten und schwer verletzten Personen ständig abnehmen, ist die Unfallrekonstruktion immer wichtiger geworden. Die Unfälle mit nicht ganz so schwerwiegenden Personenschäden oder mit Sachschäden nehmen zu und der Streit um insbesondere die zivilrechtliche Haftungsverteilung ist heftiger geworden. Man kann dafür verschiedenste Gründe aufführen, ohne dass konkrete Belege für deren Bedeutung oder Einfluss genannt werden können.

In der dritten, jetzt vorliegenden Auflage des Handbuchs der Verkehrsunfallrekonstruktion wurde der oben erwähnten Entwicklung Rechnung getragen. Die Unterteilung in die Hauptkapitel A bis D wurde beibehalten, Daten wurden aktualisiert, zwischenzeitlich erschienene Veröffentlichungen und Bücher wurden berücksichtigt. Erweiterungen betreffen die Simulationsprogramme und die Unfallforschung. In der jetzt vorliegenden, aktualisierten Auflage sind einige Kapitel hinzugekommen, in anderen Kapiteln wurden Ergänzungen vorgenommen.

Für das Handbuch konnten Autoren gewonnen werden, die sich durch besondere Leistungen bei der Forschung, der Grundlagenentwicklung und der praktischen Arbeit hervorgetan haben. Ihnen gilt unser besonderer Dank. Die Erfahrungen der Herausgeber als Gutachter in gerichtlichen Verfahren sowie bei der Entwicklung von Rechenprogrammen haben ebenfalls Eingang gefunden.

Dieses Buch soll mehr ein Nachschlagewerk für die Praxis sein als ein Grundlagenbuch. Als Nachschlagewerk soll es den Sachverständigen und allen an den forensischen Wissenschaften interessierten Personen als Nachschlagewerk für die bei der Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen und der Unfallanalyse angewandten Methoden dienen.

Die Entwicklung der Computer und deren wachsende Verbreitung haben auch im Sachverständigenwesen dazu geführt, dass eine gestiegene Anzahl an Methoden und Modellen für die Rekonstruktion und Bearbeitung von Gutachten zur Verfügung steht. Für die korrekte Anwendung der Programme ist es unablässig, die Theorie, die Modellansätze und die Einschränkungen der Modelle zu kennen. Auch hierfür soll dieses Handbuch als Leitfaden dienen.

Im Teil A werden die unterschiedlichen Arbeitsgebiete eines Verkehrsunfallsachverständigen beschrieben, die bei den Methoden der Unfallrekonstruktion verwendeten Modelle und die dahinter stehende Theorie wird dargestellt. Im Teil B werden anhand realer Unfälle die einzelnen Verfahrensschritte bei der Bearbeitung besprochen. Die Anwendung der Theorie und der verschiedenen Modelle wird erläutert. Im Teil C werden Sonderthemen der Tätigkeit des Verkehrsunfallsachverständigen besprochen. Der Teil D dient der Begriffserläuterung.

Die einzelnen Artikel in den verschiedenen Kapiteln sind so verfasst, dass ein Überblick über die Themengebiete gewonnen werden kann. Um dann noch weiter in die Tiefe einsteigen zu können, werden wichtige Literaturverweise angegeben.

Es ist zu wünschen, dass das Buch den Sachverständigen eine Hilfe und eine Richtschnur sein kann, so wie es das erste Buch über etwa 25 Jahre gewesen ist. Den Studenten an Universitäten und Hochschulen dürfte das Buch bei ihrer Ausbildung eine Hilfe und Informationsquelle sein. Den Juristen erlaubt das Buch tiefere Einblicke in das Fachgebiet und es zeigt, welche Rekonstruktionsmöglichkeiten derzeit existieren.

Schließlich hoffen wir, dass es gelungen ist, in der angestrebten homogenen, übersichtlichen und umfassenden Weise die Aspekte anzusprechen, die bei der gutachterlichen Beurteilung von Straßenverkehrsunfällen wichtig sind.

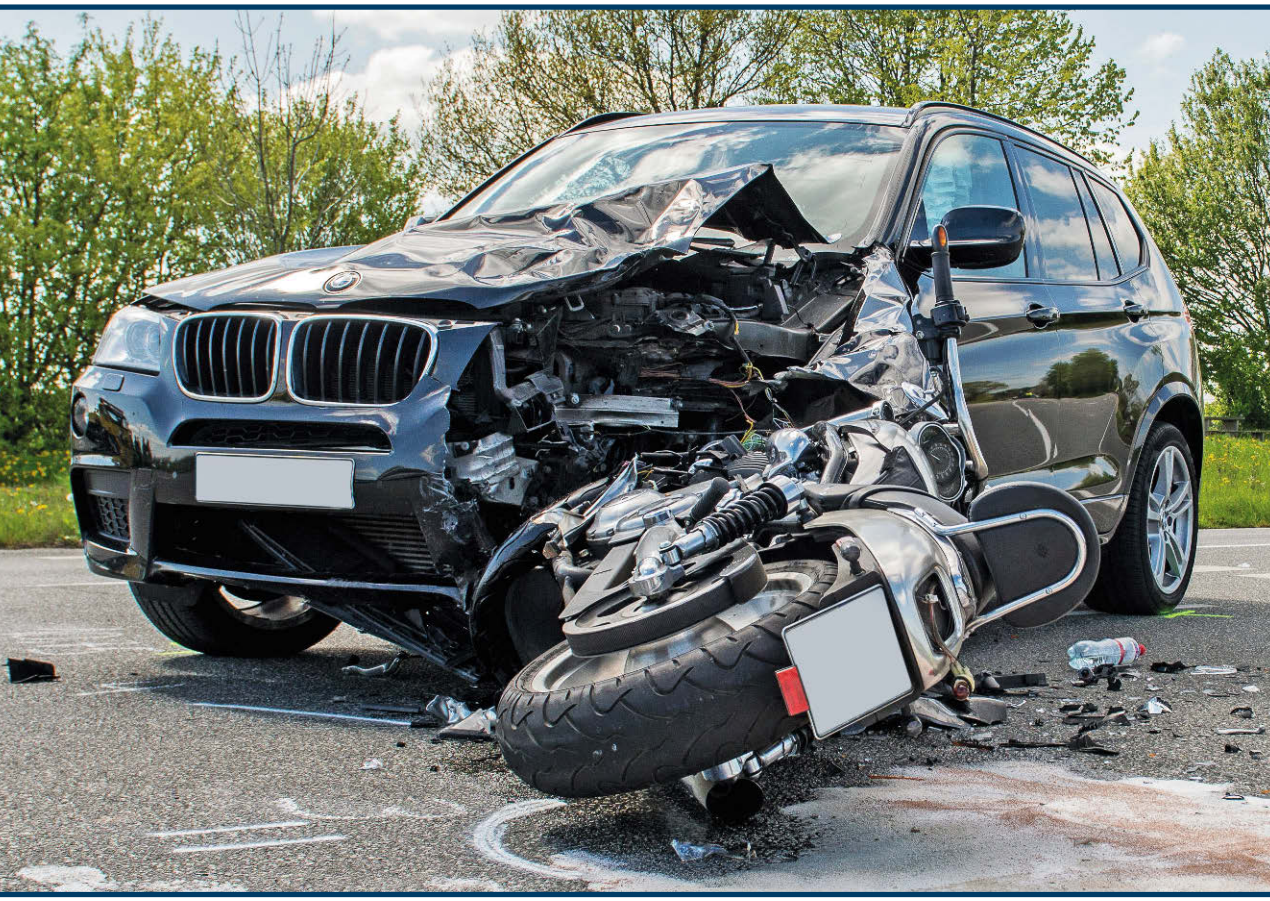
Während der Vorbereitung dieses Buchs wurden wir von vielen Kollegen und anderen fachkundigen Personen, deren Namen im Buch hoffentlich vollständig erwähnt sind, sehr gut unterstützt, wofür wir an dieser Stelle danke sagen möchten. Dies gilt auch für die Assistentin Katrien Vandewalle, die mit unermüdlicher Unterstützung bei der Organisation und bei einer noch folgenden englischsprachigen Ausgabe sehr geholfen hat und hilft.

Dem Springer Vieweg Verlag danken wir für die Anregung zur Neubearbeitung des Handbuchs und für die hervorragende Zusammenarbeit.

Heinz Burg
Andreas Moser

Burgen/Linz im März 2017

FARO



3D-Scanning-Lösungen für die Dokumentation und Rekonstruktion von Unfällen

99% mehr 3D-Daten – in der halben Arbeitszeit!

Mit unseren 3D-Scannern können Sie Unfälle schnell und präzise dokumentieren. Im Anschluss können Sie den Unfall mit unserer Software nicht nur rekonstruieren und auswerten, sondern auch Animationen und Simulationen zu Präsentationszwecken, z.B. vor Gericht, erstellen.

Komplette Scanning-Lösungen von FARO für die **Polizei**, **Sachverständige**, **Gutachter**, **forensische Ingenieure**.



Erfahren Sie mehr:
public-safety.faro.com/de

Zu diesem Buch

25 Jahre nach der Erstauflage dieses Werkes haben sich die Methoden und die verwendeten Hilfsmittel in der Unfallrekonstruktion so stark gewandelt, dass eine grundlegende Überarbeitung dieses Standardwerkes erforderlich war.

Die fachliche Qualifikation von Unfallsachverständigen ist neben den persönlichen Merkmalen die wichtigste Voraussetzung für eine sachgerechte Aufklärung von Unfallabläufen. Hierzu trägt die aktuelle Sammlung des Fachwissens und die Darstellung der Anwendung von Rekonstruktionsverfahren einen ganz wesentlichen Anteil bei. Gleichzeitig ist dieses Werk besonders geeignet für die tägliche Arbeit des Sachverständigen, der zu speziellen Fragestellungen dieses Nachschlagewerk zur Hand nimmt.

Als gelungen kann die enge Zusammenarbeit von Herausgebern und Autoren mit dem Fachverlag bezeichnet werden, bei dem die einzige deutschsprachige Fachzeitschrift für Unfallrekonstruktion und Fahrzeugtechnik verlegt wird. Dies ist auch Garant für eine durchgängige Vermittlung und Aktualisierung des jeweils verfügbaren Wissensstandes in der Verkehrsunfallrekonstruktion.

Die Liste der mitwirkenden Autoren belegt den Grundsatz „aus der Praxis – für die Praxis“. Freiberuflich tätige Unfallexperten, Ersteller von Rechenprogrammen, in der Durchführung und Auswertung von Crashversuchen erfahrene Experten und Fachleute aus der Automobilwirtschaft haben sich der Mühe unterzogen, den aktuellen Kenntnisstand zusammen zu tragen und alle wesentlichen Aspekte konzentriert aufzubereiten.

Hiermit bietet sich dieses Werk nicht nur für Unfallsachverständige sondern auch für Richter, Staatsanwälte, Rechtsanwälte und Versicherungsexperten als Handreichung für ein interdisziplinäres Verständnis bei der Bearbeitung von Verkehrsunfallsachen an.

Dipl.-Ing. Jörg Ahlgrimm, DEKRA Stuttgart

Ziel und Aufgabe dieses Handbuches ist es, Sachverständigen, Richtern und Anwälten ein Nachschlagewerk zum Thema Unfallrekonstruktion zu präsentieren.

Bereits vor mehr als zehn Jahren haben sich Dr. Burg und Dr. Gratzer daran gemacht, das Handbuch Burg/Rau zu erneuern. Es entstand ein Grundlagenhandbuch (IbB-Handbuch), welches bereits seit Jahren als A4-Ordner angeboten wird und viele Leser gefunden hat.

Nun haben sich eine Reihe von erfahrenen Unfallanalytikern und vor allem auch die Entwickler der drei Unfallrekonstruktionsprogramme, nämlich Dr. Burg (CARAT), Dr. Gratzer (ANALYZER PRO) und Dr. Moser (PC-CRASH), zusammen gefunden und beschlossen ein umfassendes Werk zum Thema Unfallrekonstruktion zu schaffen.

Vor allem der unermüdlichen Arbeit des Mentors des Buches Dr. Burg ist es zu verdanken, dass dies gelang.

So konnten das Wissen und die Erfahrung der auf diesem Gebiet tätigen Techniker und Wissenschaftler in dieses Buch Eingang finden.

Dr. Werner Gratzer, DWG Nussdorf

Sehr geehrte Leser, in Ihren Händen liegt ein Buch, das bei Ihrer Arbeit täglich benutzt werden wird. Verkehrsunfälle in der ganzen Welt haben viele Verletzte und Tote zur Folge. Wenn man diese Menge von Unfällen senken will, muss man eine sorgfältige technische Analyse ausführen. Kenntnis von Ablauf und Ursachen der Entstehung von Verkehrsunfällen erfordert nicht nur Wissen, sondern auch professionelle Erfahrungen. Sachverständige aus dem Fach der technischen Analyse von Verkehrsunfällen müssen Kenntnisse auf dem Gebiet der Mathematik, Physik, Mechanik, Automobilbau und Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen aufweisen. Man muss auch Wissen über die Psychologie des Fahrers und über die Gerichtsmedizin erwerben. Die an den Sachverständigen als Analytiker von Verkehrsunfällen gesetzten Ansprüche sind sehr hoch. Aus diesem Grunde darf in vielen EU-Ländern diese Tätigkeit nur von speziell ausgebildeten und nachgeprüften Fachleuten ausgeübt werden. Ziel dieses Buches ist es daher, einen schnellen Überblick über Informationen, die der Sachverständige bei der Bearbeitung von Fachgutachten braucht, anzubieten.

Prof. Dr.-Ing. Gustav Kasanicky, University of Zilina

In den EU-Mitgliedstaaten durchgeführte Analysen über die Sicherheit im Straßenverkehr für das Jahr 2005 haben gezeigt, dass es bei Verkehrsunfällen trotz aller Maßnahmen auf dem Gebiet der Entwicklung von aktiver und passiver Fahrzeugsicherheit, der Entwicklung von intelligenten Transportsystemen, der Modernisierung des Straßennetzes sowie der Anpassung der Gesetze noch immer etwa 40.000 Verkehrstote und 1.000.000 Verletzte mit dauerhaften Folgeschäden gibt. Neben erfolgreichen technischen Maßnahmen zur Senkung der Anzahl von Verkehrsunfällen können intensive interdisziplinäre Kenntnisse auf dem Gebiet der Entwicklung von Fahrzeugausstattung und -handhabung sowie der Fahrbahnentwicklung zusätzlich zur Minderung der Ursachen und Folgen von Verkehrsunfällen beitragen. Ein erfolgreiches Beherrschen des notwendigen und erforderlichen Wissens ist verbunden mit einer großen Auswahl an einzelnen Forschungsdisziplinen auf dem Gebiet der Erforschung und Analyse von Verkehrsunfällen, von Konzepten und Entwürfen für Schutzsysteme zur Verbesserung der Sicherheit für Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuginsassen, der Erforschung und Analyse der Deformationsstruktur von Fahrzeuggehäusen und Straßeninfrastrukturobjekten auf der Fahrbahn, der experimentellen und computergestützten Simulation von Ereignissen und Erscheinungen sowie mit deren Auswertung.

Die Erkenntnis, dass für eine hochwertige Analyse von Verkehrsunfällen spezifische Kenntnisse erforderlich sind, die nur von Experten mit akademischen Qualifikationen technischer Studienrichtung erbracht werden können, hat sich im Rahmen der EU schon durchgesetzt. An Universitäten in der EU werden daher Universitäts- und postgraduale Studienprogramme zusätzlich ergänzt und neue Studienprogramme zur Förderung des Fachgebiets der Straßenverkehrssicherheit konzipiert. Die Analyseergebnisse über den Verlauf von Verkehrsunfällen müssen vor allem die Unfallursache beinhalten. Dies kann die Folge von technischen Fahrzeugmängeln, ungeeigneten Fahrbahnverhältnissen oder einer unsachgemäßen Handhabung des Fahrzeugs sein. Die Analyseergebnisse über die auftretenden Ereignisse während eines Verkehrsunfalls müssen Experten in den Entwicklungsabteilungen der Fahrzeugindustrie und der Straßeninfrastruktur, in der Planung der Verkehrstechnologie, der Logistik usw. als Richtlinien dienen.

Experten auf dem Gebiet der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen müssen neben den schon erwähnten Fachgebieten auch Kenntnisse über die Aufprallmechanik von Fahrzeugen, technische Aspekte der Biomechanik und Verletzungsmechanik, über Verkehrspsychologie, Techno-

logien in der Herstellung und Wartung von Fahrzeugen, über die Simulation der Fahrdynamik und des Aufpralls von Fahrzeugen sowie über die Straßeninfrastruktur aufweisen können. Außerdem müssen sie Grundlagen der Kriminalistik und der Interpretation von Beweismaterial beherrschen sowie notwendige Kenntnisse zur Rekonstruktion des Unfallorts besitzen. Die erforderlichen Grundkenntnisse für die verlangten interdisziplinären Fachgebiete wurden von den Autoren in den Kapiteln A, B und C dargelegt. Die theoretischen Grundlagen der einzelnen dargestellten Fachgebiete sind sinngemäß verbunden und zur Lösung von typischen bei Verkehrsunfällen auftretenden Fällen und Situationen ausgerichtet.

Der Inhalt dieses Buches soll sowohl Studenten von Universitäts- und postgradualen Studienprogrammen als auch allen anderen Kandidaten dienen, die sich mit der Analyse von Verkehrsunfällen befassen möchten. Außerdem ist es ein unentbehrliches Studienmaterial und Handbuch für schon erfahrene Gutachter und Sachverständige, die die vorgestellte Thematik größtenteils schon kennen und ihr Wissen auf dem Gebiet der Entwicklung der einzelnen Fachgebiete auffrischen möchten.

Prof. Dr.-Ing. Ivan Prebil, University of Ljubljana

Schenkt man den Aussagen vieler Automobilhersteller und Sicherheitsexperten Glauben, wird die Unfallrekonstruktion in naher Zukunft unnötig, da durch die neu entwickelten, aktiven Sicherheitssysteme Unfälle weitestgehend verhindert werden. Betrachtet man demgegenüber die Unfallstatistiken, so ist dieser Trend nicht nachvollziehbar. So hat sich in den letzten Jahren zwar durch die Verbesserungen im Bereich der passiven Sicherheit die Unfallschwere deutlich verringert, die Anzahl der Unfälle hat sich aber trotz der zahllosen zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen kaum verändert. Betrachtet man aber im Zuge der Unfallrekonstruktion die detaillierten Unfallursachen, so wird schnell klar, dass solange das Fahrzeug von Menschen in verschiedensten Szenarien gelenkt wird, eine signifikante Reduktion der Unfälle nicht zu erwarten ist.

Um effektive, aktive Sicherheitssysteme zu entwickeln kommt aber der detaillierten Rekonstruktion der Unfälle eine ebenso große Bedeutung zu, wie für forensische Zwecke. Gerade moderne aktive Sicherheitssysteme wie ABS und ESP tragen aber wesentlich dazu bei, die Arbeit des Rekonstrukteurs zu erschweren, da Reifenspuren, die in der Vergangenheit eine wesentliche Grundlage für die Unfallrekonstruktion bildeten, nur mehr selten zur Verfügung stehen. So werden an den modernen Rekonstrukteur wesentlich höhere Anforderungen gestellt. Neben der Anwendung neuer, computergestützter Rekonstruktionsverfahren, der Auswertung elektronischer Komponenten im Fahrzeug, müssen vom Sachverständigen aber auch neue Fragestellungen, beispielsweise zu Verletzungsmechanismen der Insassen oder zur Funktion elektronischer Komponenten im Fahrzeug, beantwortet werden.

Genau aus diesem Grund kommt der Ausbildung und laufenden Weiterbildung des Unfallrekonstrukteurs große Bedeutung zu. Dieses Buch, das alle relevanten Aspekte der Unfallrekonstruktion beinhaltet, wird ein Fundament für diese Aus- und Weiterbildung sein. Neben den Grundlagen der Rekonstruktion, beginnend bei der Sicherung der Spuren bis zur vollständigen Rekonstruktion unterschiedlicher Unfallszenarien, beinhaltet das Buch auch alle relevanten modernen Verfahren der Unfallrekonstruktion. So bietet es sowohl für den Neueinsteiger einen wertvollen Lernbehelf, aber auch für den Experten ein hilfreiches Nachschlagwerk sowie eine Basis für Literaturzitate.

Prof. Dr. techn. Hermann Steffan, TU Graz

Obwohl ich selbst Sprachen studiert habe, bin ich im Laufe der langen Zeit, die ich mit Herrn Dr. Burg zusammen bin, mit der Unfallrekonstruktion schon ziemlich vertraut geworden. Aus dieser Sicht kommt mir das Handbuch wie eine Art GPS vor, das den Leser durch die verschiedenen Gebiete der Unfallanalyse und -rekonstruktion führt.

Jedes Kapitel ermöglicht ein vollständiges und genaues Verständnis von bestimmten Unfalltypen, wie die Rekonstruktion von Fußgängerunfällen oder die Untersuchung des Überschlags von Fahrzeugen und der Bewegung der Insassen. Um die verschiedenen Themen leicht aufzufinden, ist es gut, einen Blick auf das Inhaltsverzeichnis zu werfen.

Inzwischen habe ich gelernt, dass die Durchführung einer professionellen Unfallrekonstruktion ein sehr zeitintensiver Prozess sein kann, der auf den ersten Blick vielleicht gar nicht erkennbar wird. Es müssen wichtige Daten von der Unfallstelle gesammelt, beschädigte Fahrzeuge untersucht oder die Fotos davon analysiert, die Akteninhalte sorgfältig geprüft und die ganzen Daten auf eine verwendbare Form reduziert werden.

Eine möglichst genaue, maßstäbliche Zeichnung von der Unfallstelle ist erforderlich, meist muss diese von dem Sachverständigen selbst erzeugt werden. Die am besten geeigneten physikalischen Berechnungsmodelle müssen identifiziert werden. Eingabedaten sind festzulegen, die Berechnungen sind durchzuführen, um dann die Analyse fein abzustimmen durch Wiederholen der Berechnungen, um verschiedene Szenarien zu studieren.

Meine Beobachtungen bei den Sachverständigen während der Entstehung dieses Buches haben mir gezeigt, dass eine genaue Rekonstruktion nur mit einer genauen Datenerfassung erfolgreich und richtig sein kann. Man braucht dazu an erster Stelle auch beträchtliches Hintergrundwissen. Das ist genau das, was dieses Buch anbietet. Es ist auch ein Methodenbuch, das die Anwendung von Prinzipien der Physik, der Mathematik und der Technik zeigt, sodass gewährleistet ist, dass eine Rekonstruktion auf den Naturgesetzen basiert.

Dieses Buch liefert Nutzen für die Experten, die letztendlich bedeutsame Berater in Rechtsangelegenheiten für Rechtsanwälte, Staatsanwälte, Richter, Versicherungssachbearbeiter und Privatpersonen sind.

Meine ganz besondere Wertschätzung ist gerichtet an Herrn Dr. Burg und an seine engeren Freunde für ihre Arbeit, mit der teilweisen Erstellung und Verwaltung der Manuskripte des Buchs und die dazu gehörende außergewöhnliche Ausdauer, um die besten Beispiele und Lösungen für das Buch zu finden.

Dipl.-Päd. Katrien Vandewalle, IbB Forensic

Beiträge und Mitarbeiter

Teil A: Grundlagen

A01	Allgemeine Anmerkungen zum Sachverständigenwesen	Dr.-Ing. Heinz Burg Dr. jur. Juerg Boll
A02	Unfallaufnahme und Datenerhebung	Dipl.-Ing. (FH) Alois Bredl Dr. Klaus-Dieter Brösdorf Dipl.-Ing. Jürgen Burg Dr. techn. Andreas Moser
A03	Messtechnik	Dr.-Ing. Heinz Burg Dr. techn. Andreas Moser Prof. Dr. techn. Hermann Steffan
A04	Systematik der Fahrzeugtechnik	Dr.-Ing. Heinz Burg Dr. Andreas Moser
A05	Kinematik	Dr. Manfred Becke Dr.-Ing. Heinz Burg Dr. techn. Andreas Moser Dr. Klaus-Dieter Brösdorf
A06	Kinetik	Dr.-Ing. Heinz Burg Dr. techn. Andreas Moser Prof. Dr. techn. Hermann Steffan Dr. Klaus-Dieter Brösdorf Dipl.-Ing. (FH), M.Eng. Marco Görtz
A07	Informationsaufnahme beim Kraftfahrer	Prof. em. Dr. Amos S. Cohen
A08	Vermeidbarkeitsbetrachtungen	Dr.-Ing. Heinz Burg
A09	Kollisionsmechanik	Dr.-Ing. Heinz Burg Dr. phil. Werner Gratzer Dr. techn. Andreas Moser Prof. Dr. techn. Hermann Steffan
A10	Fußgängerunfälle	Dipl.-Ing. Jörg Ahlgrimm Dr.-Ing. Heinz Burg Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Dettinger Dr. techn. Andreas Moser
A11	Unfälle mit Zweirädern	Prof. Dr.-Ing. Gustav Kasanicky Dr. Johannes Priester
A12	Pkw/Pkw-Unfälle	Dr. Klaus-Dieter Brösdorf Dr.-Ing. Heinz Burg Dr. techn. Andreas Moser Kfz-Mstr. Matthias Martinsohn
A13	Unfälle mit Nutzfahrzeugen	Dr.-Ing. Heinz Burg

A14	Unfälle mit land- oder forst-wirtschaftlichen Fahrzeugen	Dr.-Ing. Heinz Burg
A15	Überschlagsunfälle	Dr.-Ing. Heinz Burg Dr.-Ing. Jürgen Gugler Dr. techn. Andreas Moser Prof. Dr. techn. Hermann Steffan
A16	Schienenfahrzeuge/Straßenbahnen	Dr.-Ing. Heinz Burg Dipl. phys. ETHZ Jörg Arnold
A17	Schadenaufklärung	Dr. Klaus-Dieter Brösdorf Klaus Depré Dipl.-Ing. (FH) Jörg Göritz
A18	Insassensimulation	Dr. techn. Andreas Moser Prof. Dr. techn. Hermann Steffan
A19	Biomechanik	Dr.-Ing. Heinz Burg Dr. techn. Betram C. Geigl Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer Dr. techn. Andreas Moser Prof. Dr. techn. Hermann Steffan
A20	Simulation und Animation	Dr.-Ing. Heinz Burg Dr. techn. Andreas Moser Prof. Dr. techn. Hermann Steffan

Teil B: Fallbeispiele

B01	Unfälle mit Tieren	Dr.-Ing. Heinz Burg Julia Caselitz
B02	Unfälle mit Fußgängern	Dr.-Ing. Heinz Burg
B03	Unfälle mit Zweiradfahrzeugen	Dipl.-Ing. Christian Tschirschwitz
B04	Unfälle mit motorisierten Zweirädern	Dipl.-Ing. Christian Tschirschwitz
B05	Unfälle mit Pkw	Dr.-Ing. Heinz Burg
B06	Unfälle mit Kleintransportern	Dipl.-Ing. Christian Tschirschwitz
B07	Unfälle mit Nutzfahrzeugen	Dr.-Ing. Heinz Burg Dipl.-Ing. Dirk Christiaens Dipl.-Ing. Christian Tschirschwitz
B08	Unfälle mit land- und forst-wirtschaftlichen Fahrzeugen	Dr.-Ing. Heinz Burg
B09	Unfälle mit Schienenfahrzeugen	Dr.-Ing. Heinz Burg
B10	Alleinunfälle	Dipl. phys. ETHZ Jörg Arnold
B11	Überschlagunfälle	Dipl.-Ing. Dirk Christiaens
B12	Beispiele zur Insassenverletzung	Prof. Dr. med. Jan Dreßler Dipl.-Ing. Christian Tschirschwitz

Teil C: Sonderthemen

C01	Aktive und Passive Sicherheit	Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer
C02	Sicherheitsgurte	Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer Dipl. phys. ETHZ Jörg Arnold
C03	Airbagsysteme	Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer
C04	Schutzhelme	Dipl. phys. ETHZ Jörg Arnold
C05	Reifen und Räder	Dipl. phys. ETHZ Jörg Arnold
C06	Glühlampen	Dipl. phys. ETHZ Jörg Arnold
C07	Fahrzeugschlüssel	Dipl.-Ing. Jürgen Garbe Kfz-Mstr. Matthias Martinsohn
C08	Mikrospuren, Mikrospurensicherung, Mikrospurenauswertung	Dipl. phys. ETHZ Jörg Arnold Jochen Lehmkuhl, Dr.-Ing. Heinz Burg
C09	Elektronik im Kraftfahrzeug	Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Gallus Dr.-Ing. Heinz Burg
C10	Zukünftige Methoden bei der Spurensicherung	Dipl. phys. ETHZ Jörg Arnold Marcel Braun, Vermessungstechniker
C11	Biomechanische Daten	Prof. Dr.-Ing. Ivan Prebil
C12	Bemerkbarkeit von Kleinkollisionen	Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Gallus Dipl.-Ing. (FH) Bernd Wolfer
C13	Dunkelheitsunfälle **Teil 1:** Sichtbarkeit aus lichttechnischer Sicht, der Dunkelheitsunfall, Rekonstruktion durch Berechnung	Dr.-Ing. Ulrich Carraro
	Teil 2: Übersicht und allgemeine Hinweise zur Bearbeitung von Dunkelheitsunfällen	Dr. Klaus Nitsche Prof. Dr. med. habil. Dr. rer. nat. Bernhard J. Lachenmayr
	Teil 3: Physiologisch-optische Grundlagen und visueller Wahrnehmungsprozess	Prof. Dr.-Ing. Michael Gebhardt Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. (FH) Hans-Jürgen Grein Dr. Klaus Nitsche
C14	Stahlleitplanken	Prof. Dr.-Ing. Ivan Prebil Doc. Dr.-Ing. Robert Kunc

Teil D: Begriffe, Tabellen

D01 Fachbegriffe nach DIN 75204 Straßenfahrzeuge

D02 Begriffe und Abkürzungen

D03 Medizinische Fachausdrücke



TU Graz

Universitätslehrgang Master of Engineering

TRAFFIC ACCIDENT RESEARCH

International anerkannte Expertinnen und Experten vermitteln Know-how aus ihrem Fachbereich mit aktuellen Beispielen und Fallstudien aus der Praxis.

Durch den modularen Aufbau des Lehrgangs und Blocklehrveranstaltungen sowie Fernlehrelemente ist der Lehrgang optimal auf die Bedürfnisse berufsbegleitender Studierender zugeschnitten.

Schwerpunkte:

Unfalldokumentation, Unfallmechanik, Fahrzeugtechnik, Fahrzeugsicherheit, Straßentechnik, Biomechanik, rechtliche Grundlagen, verkehrspolitische Grundlagen, psychologische Grundlagen

Einsatzbereiche für Absolventen und Absolventinnen:

Unfallrekonstruktion (bei Gerichten und Versicherungen), Unfallforschung, Fahrzeugentwicklung, Fahrzeugsicherheit, Straßenplanung

© Miredi – Fotolia.com

Studiendauer: 4 Semester berufsbegleitend plus Master Thesis
Abschluss: Master of Engineering in Traffic Accident Research (MEng)
Studienort: TU Graz
Nächster Lehrgangsstart: auf Anfrage
Bewerbungsfrist: auf Anfrage
Weitere Infos (Kosten, Anmeldung):
Institut für Fahrzeugsicherheit
Inffeldgasse 23/I, 8010 Graz

office.vsi@tugraz.at **www.vsi.tugraz.at**

LIFE LONG LEARNING

vsi

Autorenverzeichnis

Ahlgrimm, Jörg, Dipl.-Ing.	DEKRA GmbH, Hauptverwaltung, D-70565 Stuttgart
Arnold, Jörg, dipl. phys. ETHZ	Wissenschaftlicher Dienst der Stadtpolizei Zürich, Zeughausstraße 11, CH-8021 Zürich
Becke, Manfred, Dr.	Schimmelpfennig + Becke GbR, Münsterstraße 101, 48155 Münster
Boll, Juerg, Dr. jur.	Staatsanwaltschaft Zürich-Limmat, Stauffacher-strasse 55, Postfach, CH-8026 Zürich
Braun, Marcel	Wissenschaftlicher Dienst der Stadtpolizei Zürich, Zeughausstraße 11, CH-8021 Zürich
Burg, Heinz, Dr.-Ing.	Ingenieurbüro Dr. Burg, Brauneberger Straße 3, D-54472 Burgen und Zürcherstraße 2, CH-8142 Uitikon
Burg, Jürgen, Dipl.-Ing. (FH)	Ingenieurbüro Burg, Köpfchenweg 23, D-65191 Wiesbaden
Brösdorf, Klaus-Dieter, Dr.	Ingenieurbüro Brösdorf & Göritz GmbH, Höhen-weg 13, CH-9630 Wattwil SG
Carraro, Ulrich, Dr.-Ing.	Technische Universität Dresden, Institut für Verkehrspsychologie, Abteilung Lichttechnik Hettnerstraße 1, D-01069 Dresden
Caselitz, Julia	Ingenieurbüro Caselitz, Unterdüssel 23, D-42489 Wülfrath
Christiaens, Dirk, Dipl.-Ing.	Ingenieurbüro Christiaens, Vredelaan 38, B-8500 Kortrijk
Cohen, Amos S. Prof. em. Dr.	Obere Heslibachstrasse 20 CH-8700 Küsnacht
Depré, Klaus	Büro Depré, Ringstraße 42-48, D-50996 Köln
Dettinger, Jürgen, Dipl.-Ing. (FH)	DEKRA GmbH, Hauptverwaltung, D-70565 Stuttgart
Dreßler, Jan, Prof. Dr. med.	Technische Universität Dresden Medizinische Fakultät Carl Gustav Carus Institut für Rechtsmedizin Fetscherstraße 74, D-01307 Dresden
Gallus, Jürgen, Dipl.-Ing. (FH)	Ingenieurbüro Wolfer, Metzinger Straße 12, D-72622 Nürtingen
Garbe, Jürgen, Dipl.-Ing.	Ingenieurbüro Martinsohn, Seeheimer Straße 16, D-64297 Darmstadt

Gebhardt, Michael, Prof. Dr.-Ing.	Fachhochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, D-07745 Jena
Geigl, Betram C., Dr. techn.	HTL Wels, Fischergasse 30, A-4600 Wels
Göritz, Jörg, Dipl.-Ing. (FH)	Ingenieurbüro Brösdorf & Göritz GmbH, Mainzer Straße 44, D-55270 Essenheim
Görtz, Marco, Dipl.-Ing. (FH), M.Eng.	Sachverständigenbüro Dr. Möhler + Görtz, Zunftweg 10, D-50354 Hürth (Köln)
Gratzer, Werner, Dr. phil.	DWG, Weitwörth 10, A-5151 Nussdorf
Grein, Hans-Jürgen, Dr. med. Dipl.-Ing. (FH)	Fachhochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, D-07745 Jena
Gugler, Jürgen, Dr. techn.	TU Graz, Institut für Fahrzeugsicherheit, Inffeldgasse 11/2, A-8010 Graz
Kasanicky, Gustav, Prof. Dr.-Ing.	University of Zilina, Faculty of Civil Engineering, Komenskeho 52, SK-01026 Zilina
Kramer, Florian, Prof. Dr.-Ing.	HTW Dresden Friedrich-List-Platz 1, D-01069 Dresden
Lachenmayr, Bernhard J., Prof. Dr. med. Dr. med. habil. Dr. rer. nat.	Augenarztpraxis Prof. Dr. Dr. Lachenmayr, Neuhauserstraße 23, D-80331 München
Martinsohn, Matthias, Kfz-Meister	Ingenieurbüro Martinsohn, Seeheimer Straße 16, D-64297 Darmstadt
Moser, Andreas, Dr. techn.	DSD Dr. Steffan Datentechnik GmbH, Salzburger Straße 34, A-4020 Linz
Nitsche, Klaus, Dr.	Ingenieurbüro Nitsche, Friedrich-Ebert-Straße 19, D-07607 Eisenberg
Plöchinger, Franz, Dipl.-Ing. (FH)	Ingenieurbüro Plöchinger, D-94113 Passau
Prebil, Ivan, Prof. Dr.-Ing.	University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Askerceva 6, SI-1000 Ljubljana
Priester, Johannes, Dr.	Ingenieurbüro Dr. Priester, Angela-Braun-Straße 16, D-66115 Saarbrücken
Seifert, Julia, Dr. med. habil.	Unfallkrankenhaus Berlin, Warener Straße 7, D-12683 Berlin
Steffan, Hermann, Prof. Dr. techn.	TU Graz, Institut für Fahrzeugsicherheit, Inffeldgasse 11/2, A-8010 Graz
Tschirschwitz, Christian, Dipl.-Ing.	Ingenieurbüro Schellenberg-Himbert, Doktor-Schmincke-Allee 9, D-01445 Radebeul
Wolfer, Bernd, Dipl.-Ing. (FH)	Ingenieurbüro Wolfer, Metzinger Straße 12, D-72622 Nürtingen

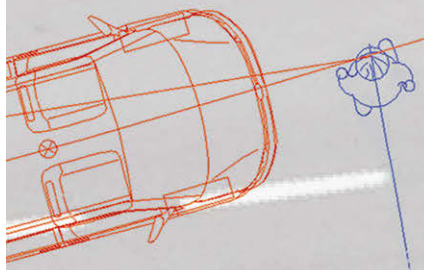
Verzeichnis der Firmen und Organisationen

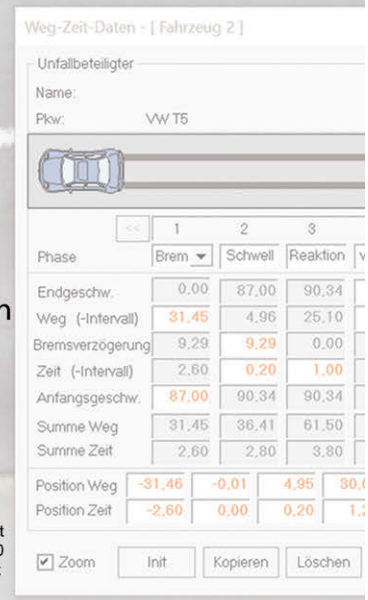
DEKRA GmbH Hauptverwaltung D-70565 Stuttgart	Dipl.-Ing. Jörg Ahlgrimm Dipl.-Ing. Jürgen Dettinger Dipl.-Ing. Thomas Gut
DSD Dr. Steffan Datentechnik Ges.m.b.H. Salzburger Straße 34 A-4020 Linz	Dr. techn. Andreas Moser Prof. Dr. techn. Herrmann Steffan
DWG-Software Weitwörth 10 A-5151 Nussdorf	Dr. phil. Werner Gratzer
IbB-Forensic Engineering Association Suracherstrasse 34 CH-8142 Uitikon www.ibb-forensic.com	Dr.-Ing. Heinz Burg Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Burg Dipl.-Ing. Dirk Christiaens Dipl.-Ing. Jürgen Garbe Kfz-Mstr. Matthias Martinsohn Dr. Klaus Nitsche
Technische Universität Graz Institut für Fahrzeugsicherheit Inffeldgasse 11/2 A-8010 Graz	Prof. Dr. techn. Hermann Steffan Dr. techn. Jürgen Gugler
University of Zilina Faculty of Civil Engineering Komenskeho 52 SK-01026 Zilina	Prof. Dr.-Ing. Gustav Kasanicky
University of Ljubljana Faculty of Mechanical Engineering Askerceva 6 SI-1000 Ljubljana	Prof. Dr.-Ing. Ivan Prebil
HTW Dresden Friedrich-List-Platz 1 D-01069 Dresden	Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer

Pro Analyzer

Unfall
Rekonstruktions
Software

DIE Unfallrekonstruktionssoftware,
die so professionell arbeitet
wie Sie selbst





- ✓ Weg-Zeit Analyse in über 30 Modulen
- ✓ Kollisionsanalyse
- ✓ Fahrdynamik
- ✓ Darstellung in 2D & 3D

www.analyzer.at
Tel:+43 664 4800930
ms@analyzer.at

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V
Zu diesem Buch VII
Beiträge und Mitarbeiter XI
Autorenverzeichnis XV
Verzeichnis der Firmen und Organisationen XVII

Teil A: Grundlagen 1

A1 Allgemeine Anmerkungen zum Sachverständigenwesen 3

1 Einleitung 3
2 Arten von Sachverständigen 4
2.1 Sachverständige bei Gericht (Europa) 7
2.1.1 Strafprozess 7
2.1.2 Zivilprozess 7
2.2 Arten von Gutachten 8
2.2.1 Mündliche Gutachten 8
2.2.2 Schriftliche Gutachten 8
2.3 Detaillierte Hinweise und Grundlagen 9
2.3.1 Auftragsannahme 9
2.3.2 Grundlagen zur Gutachtenerstellung 10
2.4 Nachvollziehbarkeit 12
3 Naturwissenschaftliche Grundlagen 13
3.1 Naturgesetz 14
3.2 Theorie 15
3.3 Modell 15
3.4 Hypothese 16
3.5 Paradigma 16
3.6 Spekulation 16
3.7 Verifikation 16
3.8 Fiktion 17
3.9 Induktionsschluss 17
4 Aussagesicherheit 17
Literatur 19

Die Bedeutung der Unfallgutachten in der Strafuntersuchung 20

1 Aufgabe der Staatsanwaltschaft 20
2 Vorgehen der Strafuntersuchungsbehörden 20
2.1 Unfallhergang 20
2.1.1 Bewegungsablauf der beteiligten Fahrzeuge und Fussgänger 20

2.1.2 Geschwindigkeit 21
2.1.3 Synchronisation der Bewegungsabläufe der beteiligten Fahrzeuge und Fussgänger 21
2.2 Unfallursache 21
2.3 Vermeidbarkeit Unfall (Kausalität) 22
2.3.1 Rechtslage 22
2.3.2 Beispiele aus der Praxis 22
3 Bedeutung Unfallgutachten in der Strafuntersuchung 23
4 Erwartungen an ein Unfallgutachten 23
4.1 Formelle Anforderungen an ein Unfallgutachten 23
4.2 Rekonstruktion Unfallablauf 24
4.3 Beurteilung von widersprechenden Darstellungen der Parteien zum Unfallhergang 25
4.4 Falsche Behauptungen als Erklärungen für den Unfall 25
4.4.1 Misslungenes Brems- oder Ausweichmanöver wegen eines Tieres .. 25
4.4.2 Unkorrektes Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer 25

A2 Unfallaufnahme und Datenerhebung 27

1 Einleitung 27
2 Arten von Unfalldaten 28
3 Dokumentation von objektiven Merkmalen 29
3.1 Zeitpunkt der Datenerhebung 29
3.2 Dokumentation von Unfalldaten 29
3.3 Fotografische Dokumentation 30
3.4 Geräte zur Sicherung von objektiven Merkmalen 35
3.5 Vermessen von Unfallstelle und Spurenlagen 36
3.5.1 Geräte und Verfahren zur Vermessung von Unfallstellen 36
3.5.2 Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren 36
3.5.3 Dreieck-Messverfahren 37
3.5.4 Vermessung von Kurven und Bögen 37
3.5.5 Messtischverfahren 39
3.5.6 Totalstation 39
4 Photogrammetrie 40
4.1 Einleitung 40
4.2 Anwendung 41
4.3 Luftbild-Photogrammetrie 41
4.4 Nahbereichs-Photogrammetrie 41
4.5 Innere Orientierung 42
4.6 Äußere Orientierung 42
4.7 Die Perspektivische Projektion – Zentralprojektion 42
4.8 Kollineare Abbildung 43
4.9 Photogrammetrische Auswertung 44
4.9.1 Transformation eines Punktes 45
4.9.2 Erklärung der verwendeten Koordinatensysteme 45
4.9.3 Transformation eines Bildpunktes in einen Straßenpunkt 46

4.10 Streifenprojektion ... 47
4.10.1 Prinzip ... 47
4.10.2 Ablauf einer Messung ... 48
4.10.3 Berechnung der Oberflächenkoordinaten ... 48
4.11 Beispiele ... 50
4.12 Luftbilder/Orthofotos ... 51
5 Fotografische Verfahren (Bildüberlagerung) ... 52
6 Sonnenstand ... 59
7 Daten und Informationen ... 61
7.1 Auswertung der Unterlagen ... 61
7.2 Untersuchung und Dokumentation der beteiligten Fahrzeuge/ Kollisionsobjekte ... 62
7.2.1 Übersichtsaufnahmen ... 65
7.2.2 Abbildungen zur Identifizierung und Individualisierung ... 65
7.2.3 Abbildungen zum technischen Zustand, zu technischen Details und zur Ausstattung ... 66
7.2.4 Abschnittsaufnahmen ... 68
7.2.5 Detailaufnahmen ... 69
7.2.6 Abbildungen mit Maßstab ... 72
7.3 Besichtigung, Dokumentation und Vermessung der Unfallstelle/Schadenörtlichkeit ... 79
7.3.1 Fahrzeugzusammenstellung/Ortstermin ... 79
8 Experimentelle Untersuchungen ... 81
8.1 Prinzipielle Untersuchungen ... 81
8.2 Spezielle Untersuchungen ... 84
Literatur ... 89

A3 Messtechnik ... 91

1 Einleitung ... 91
1.1 Verwendung von Messgeräten vor Gericht ... 91
2 Grundlagen der Messtechnik ... 91
2.1 Direkte Messung ... 91
2.2 Indirekte Messung ... 91
2.3 Eichung ... 92
2.4 Kalibrierung ... 92
2.5 Messbereich ... 93
2.6 Genauigkeit/Fehler ... 93
2.7 Abtastrate ... 93
2.8 Linearität ... 93
2.9 Offsetfehler ... 94
2.10 Aufzeichnungszeit ... 94
2.11 Auflösung ... 94
2.12 Speichertiefe ... 94
2.13 Effektivwert – RMS ... 94
3 Statistische Kenngrößen ... 95
3.1 Arithmetischer Mittelwert ... 95
3.2 Median ... 95

3.3 Standardabweichung ... 95
3.4 Quantil ... 96
3.5 Verteilungsfunktion ... 96
4 Arten von Messgeräten ... 96
4.1 Wegmessung ... 96
4.2 Geschwindigkeitsmessung ... 96
4.3 Beschleunigungs-/Verzögerungsmessung ... 97
5 Messgeräteübersicht ... 97
5.1 XLMeter ... 97
5.2 PocketDAQ ... 98
5.3 PICDaq, PICDaq-GPS ... 98
5.4 Racelogic ... 99
5.5 Corrsys/Datron ... 99
5.6 Unfalldatenspeicher UDS ... 99
5.7 Motometer ... 100
5.8 VZM100 ... 100
5.9 VC2000/VC3000 ... 101
5.10 GPS ... 101
5.10.1 Methoden des DGPS ... 102
5.10.2 Galileo ... 103
5.11 OBD ... 103
5.12 Lackdickenmessung ... 104
Literatur ... 105

A4 Systematik der Fahrzeugtechnik ... 107

1 Systematik der Kraftfahrzeuge ... 107
2 Klasseneinteilung nach Vorschriften ... 109
3 Klasseneinteilung nach Marktgegebenheiten ... 110
3.1 Zweiradfahrzeuge ... 110
3.2 Vierradfahrzeuge ... 111
Literatur ... 112
4 Begriffe aus der Fahrdynamik nach DIN 70 000 ... 113

A5 Kinematik ... 117

1 Weg-Zeit-Analyse ... 117
1.1 Weg-Zeit-Funktionen ... 117
1.1.1 Gleichförmige Bewegung ... 117
1.1.2 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung ... 118
1.1.3 Gleichmäßige Änderung der Beschleunigung ... 118
1.1.4 Translatorische Bewegung ... 118
1.1.5 Rotatorische Bewegung ... 119
2 Weg-Zeit-Diagramm ... 120
2.1 Einleitung ... 120
2.2 Einführung in die Thematik – Das Weg-Zeit-Diagramm ... 120
2.3 Grundlagen zur Verwendung des Weg-Zeit-Diagramms ... 121
2.4 Die Weg-Zeit-Analyse in der praktischen Anwendung ... 124

2.5 Zuordnung von Fahrbewegungen im Weg-Zeit-Diagramm 125
2.6 Vermeidbarkeitsbetrachtungen 127
2.7 Rechtliche Grundlagen der Vermeidbarkeitsbetrachtung 127
2.8 Räumliche Vermeidbarkeit 128
2.9 Zeitliche Vermeidbarkeit 129
2.9.1 Sichtbegrenzungslinien oder Sichtgrenzen 131
2.9.2 Sichtbegrenzungslinien bei Blick in einen Rückspiegel 132
3 Bremsvorgänge 133
3.1 Der Unterschied zwischen Theorie und Praxis 133
3.2 Verzögerung über der Zeit und über dem Weg 136
3.3 Bestimmung der mittleren Vollverzögerung von Kraftfahrzeugen bei der Zulassungsprüfung 139
3.4 Definitionen 140
Literatur 140
4 Schleudervorgang 141
4.1 Einleitung 141
4.2 Fallbeispiele 141
4.3 Berechnungsverfahren 143
4.4 Anwendung von Näherungsformeln 145
4.4.1 Anwendung des mittleren Schwimmwinkels und Teilbremsfaktors . 145
4.4.2 Formeln von Marquardt und McHenry 149
4.5 Spurverfolgung 150
4.5.1 Sehnenmodell 150
4.5.2 Lineares Modell 152
5 Fahrvorgänge 153
5.1 Zeitlicher Ablauf eines Bremsvorgangs als zusammengesetzte Bewegung . 153
5.2 Berechnung des Gesamtweges aus der Anfangsgeschwindigkeit und Endgeschwindigkeit 155
5.3 Berechnung der Anfangsgeschwindigkeit aus Gesamtweg und Endgeschwindigkeit (Fahren auf Sicht oder halbe Sicht) 155
5.4 Berechnung der Reaktionszeit bei gegebener Anfangs- und Endgeschwindigkeit und gegebenem Gesamtweg 156
5.5 Berechnung der Bremsverzögerung bei gegebener Anfangsgeschwindigkeit und Gesamtweg 157
5.6 Berechnung der Anfangsgeschwindigkeit aus Gesamtzeit und Endgeschwindigkeit 157
5.7 Berechnung der Anfangsgeschwindigkeit aus Gesamtweg und Gesamtzeit 158
5.8 Losfahren-Umsetzen-Abbremsen 158
5.9 Die Kurvenfahrt von Fahrzeugen 160
5.9.1 Die Dynamik der Kurvenfahrt 160
5.9.2 Die fühlbare Querbeschleunigung 162
5.9.3 Der ausgenutzte Seitenreibwert 162
5.10 Der Spurwechselvorgang bzw. Ausweichvorgang 163
5.10.1 Gerade Straße 163
5.10.2 Gekrümmte Straße 166
5.11 Der Abbiegevorgang 168

6 Überholvorgang 171
6.1 Einleitende Erklärungen 171
6.2 Berechnungsverfahren 171
6.3 Einfache Abschätzungen 171
6.4 Formeln für geschlossene Lösungen 173
6.4.1 Überholen mit konstanter Geschwindigkeit 175
6.4.2 Überholen mit konstanter Beschleunigung aus gleicher Anfangsgeschwindigkeit wie der Überholte 176
6.4.3 Überholen mit konstanter Beschleunigung ab Überholbeginn mit einer Anfangsgeschwindigkeiten, die ungleich der des Überholten ist 178
6.4.4 Überholen mit konstanter Beschleunigung ab Überholbeginn mit einer Anfangsgeschwindigkeit, die ungleich der des Überholten ist. Überholter beschleunigt oder verzögert während des Überholvorgangs 178
6.5 Abbruch des Überholvorgangs 179
6.6 Mindestsichtweite für den Überholvorgang 181
Literatur 184
7 Ampelphasen 184
8 Radkontaktspuren 187
8.1 Allgemein 187
8.2 Einfaches Berechnungsmodell 191
8.3 Erweitertes Berechnungsmodell 194
8.4 Beispiele zu Radkontaktspuren 196
Literatur 207

A6 Kinetik 209

1 Einleitung 209
2 Kinetische Berechnung der Bewegungen von Fahrzeugen/Gespannen 209
3 Fahrmodell 211
3.1 Koordinatensysteme 211
3.2 Die Berechnung der Radaufstandspunkte 213
3.3 Die Kräfte am freigeschnittenen Fahrzeug 214
3.4 Die Radkräfte 214
3.5 Feder- und Dämpferkräfte 215
3.6 Federanschläge 216
3.7 Radaufstandskräfte 216
3.8 Reifeneigenschaften 217
3.9 Das gebremste Rad 219
3.10 Fahrzeuge mit Anti-Blockier-System (ABS) 220
3.11 Das angetriebene Rad 220
3.12 Die Transformation der Reifenkräfte ins Inertialsystem 220
3.13 Der Luftwiderstand 221
3.14 Die Anhängerkupplungskräfte 221
3.15 Die Bewegungsgleichungen für das Fahrzeug 221
3.16 Die Integration der Bewegungsgleichungen 222

4 Das Anhängermodell 225
4.1 Der ungelenkte Anhänger 225
4.2 Sattelkraftfahrzeuge 227
4.3 Der gelenkte Anhänger 228
4.4 Die Vorgabe von Anfangsbedingungen bei Hängergespannen 230
4.4.1 Anfangsbedingungen für den ungelenkten Anhänger 231
4.4.2 Anfangsbedingungen für den gelenkten Anhänger 232
5 Zur Berechnung der Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahn 234
5.1 Einführung 234
5.2 Messtechnische Erfassung der Reifeneigenschaften 235
5.3 Mathematische Ersatzmodelle für Reifen 235
5.4 Modellbildung 236
Literatur 237
6 Grobe Einteilung der Reifenmodelle 238
6.1 Linearisierte Beschreibung 238
6.2 Nichtlineare Approximation gemessener Kennfelder 238
6.3 Einfache Deformationsmodelle 238
6.4 Strukturmodelle 238
6.5 Realisierte und angewandte Modelle nach Autoren 238
Literatur 239
7 Dynamik von Kraftfahrzeugen 240
7.1 Gemessene Luftwiderstandsbeiwerte von Einspurfahrzeugen und anderen Fahrzeugen 240
7.2 Bremskraftverteilung Grundlagen 241
7.2.1 Berechnung des Bremsvorgangs eines Personenwagen 241
7.2.2 Grundlagen 241
7.2.3 Achskraftverteilungsdiagramm 241
7.2.4 Bremskraftverteilungsdiagramm 245
7.2.5 Bremskräfte im Bremskraftverteilungsdiagramm bei Steigerung der Bremswirkung 249
7.2.6 Einfluss der Beladung auf das Bremskraftverteilungsdiagramm 250
7.2.7 Bremskraft-Steuereinrichtungen 250
7.2.8 Einfluss der Motorbremswirkung auf das Bremskraftverteilungsdiagramm 251
7.2.9 Hinterradantrieb 251
7.2.10 Vorderradantrieb 251
7.2.11 Einfluss der Luftkräfte auf das Bremskraftverteilungsdiagramm 252
7.3 Zusammenhang zwischen Bremskraftverteilung und Fahrzeugtyp 252
7.3.1 Mittelmotor-Sportwagen 252
7.3.2 Oberklasse-Limousine 253
7.3.3 Mittelklassefahrzeug mit Vorderradantrieb 254
7.3.4 Allradgetriebenes Geländefahrzeug mit kurzem Radstand 255
7.3.5 Motorrad 256
Literatur 257

8 Gefahren oder gestanden? ... 259
8.1 Einführung ... 259
8.2 Anknüpfungsinformationen ... 259
8.3 Bewertungsgrundlagen ... 260
8.4 Theoretische Überlegungen ... 261
8.5 Repräsentative Versuchsergebnisse und Bewertungen ... 261
8.6 Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung ... 267
Literatur ... 267

A7 Informationsaufnahme beim Kraftfahrer ... 269

Wahrnehmung und Sicherheitsverhalten ... 269
1 Einleitung ... 269
2 Sensomotorik ... 270
3 Kognition ... 271
4 Sensorik und Alterungsvorgang ... 274
5 Blickverhalten ... 277
6 Nutzbarer Sehfeldumfang ... 278
7 Folgerungen ... 280
Literaturhinweise ... 283

A8 Vermeidbarkeitsbetrachtungen ... 287

1 Einleitung ... 287
2 Festlegung des Reaktionspunktes ... 288
3 Grundsätzliche Überlegungen zu den Vermeidbarkeitsmöglichkeiten ... 292
4 Berechnungsmöglichkeiten ... 292
Literatur ... 296

A9 Kollisionsmechanik ... 297

1 Einleitung ... 297
Literatur ... 299
2 Grundlagen ... 300
2.1 Newton'sche Axiome ... 300
2.1.1 Lex Prima: Trägheitsprinzip ... 300
2.1.2 Lex Seconda: Aktionsprinzip; Grundgesetz der Dynamik ... 300
2.1.3 Lex Tertia: (Reaktionsprinzip; Wechselwirkungsprinzip) ... 301
2.2 Kollisionsphasen ... 301
2.3 Erhaltungssätze ... 303
2.3.1 Impulserhaltung – Impulserhaltungssatz ... 303
2.3.2 Drallerhaltung – Drallerhaltungssatz ... 303
2.3.3 Energieerhaltungssatz ... 304
2.4 Stoßtheorien ... 305
2.4.1 Stoßtheorie nach Hertz und Saint Venant ... 305
2.4.2 Stoßtheorie nach Galilei, Huygens und Newton (klassische Stoßtheorie) ... 305

2.5 Ergänzungshypothesen zur klassischen Stoßtheorie ... 305
2.5.1 Stoßzahlhypothese nach Newton ... 305
2.5.2 Stosszahlhypothese nach Poisson ... 305
2.5.3 Richtungshypothese nach Marquard ... 305
2.5.4 Hypothese nach Slibar für Kollisionen ohne Abgleiten ... 306
2.5.5 Gleithypothese von Kudlich und später Böhm und Hörz ... 306
Literatur ... 306
3 Gerader zentraler Stoß ... 307
3.1 Realer Ablauf eines geraden zentralen Stoßes ... 311
3.2 Berechnung nach EDCrash bzw. Crash3 ... 314
Literatur ... 315
4 Grafische Verfahren ... 316
4.1 Antriebs-Balance-Verfahren ... 318
4.2 Rhomboid-Schnittverfahren ... 321
4.3 Gegenverkehrsunfall ... 324
Literatur ... 328
5 Rechnerische Verfahren ... 328
5.1 Zweidimensionaler exzentrischer Stoß ... 328
5.2 Dreidimensionaler exzentrischer Stoß ... 330
5.3 Vorwärtsrechnung ... 330
5.3.1 Physikalische Grundlagen ... 330
5.3.2 Stoßrechnung nach der Impuls- und Drallerhaltung ... 332
5.3.3 Impulserhaltung ... 332
5.3.4 Drallerhaltung ... 332
5.3.5 Kontaktpunktgeschwindigkeiten ... 332
5.3.6 Zusatzgleichungen, Stoßhypothesen ... 333
5.3.7 Restitution, Stoßziffer ... 333
5.3.8 Kollision ohne Abgleiten ... 333
5.3.9 Abgleitkollision ... 333
5.3.10 Reibungstheorie ... 334
5.3.11 Festlegung der Berührtangente bzw. -ebene, des Reibungsfaktors und der Stoßziffer in der Praxis ... 334
5.3.12 Zerreißung von Strukturen ... 337
5.3.13 Schlussfolgerung ... 341
5.4 Kontrollgrößen ... 341
5.4.1 Geschwindigkeitsänderung ... 341
5.4.2 Gierwinkel ... 341
5.4.3 Berührpunktsgeschwindigkeit ... 342
5.4.4 Differenz der Berührpunktsgeschwindigkeiten nach der Kollision ... 343
5.4.5 Der k-Faktor ... 343
5.4.6 Der Stoßantrieb ... 343
5.4.7 Die induzierten Giergeschwindigkeiten ... 344
5.4.8 Die Differenz der Giergeschwindigkeiten ... 344
5.4.9 Der Reibwert ... 344
5.4.10 Die Deformationsenergie ... 344
5.4.11 EES-Werte nach Massen- und Eindringtiefenverhältnis ... 345
5.4.12 Das „Verhältnis von Geschwindigkeitsänderung zu EES“ GEV ... 345
Literatur ... 346

6 Berechnung der Deformationsenergie aus Versuchen 347
6.1 EBS (Equivalent barrier speed) 348
6.2 EES (Energy equivalent speed) 349
6.3 Beispiel AREC 2003 – WH0327 349
6.4 Deformationsprofil 350
Literatur 354
7 Kraftrechnung – Steifigkeitsbasierte Stoßmodelle 355
7.1 Ellipsoid Modell 355
7.1.1 Kompression – Restitution 355
7.1.2 Ellipsoid-Ellipsoid-Kontakt (Fahrzeug-Fahrzeug) 356
7.1.3 Ellipsoid-Ebenen-Kontakt (Fahrzeug-Untergrund) 357
7.1.4 Grundmodelle für Kontaktberechnungen 358
7.2 Mesh-Modell 359
7.2.1 Knoteneigenschaften 360
7.2.2 Kontakte zwischen Netz und Untergrund 360
7.2.3 Fahrzeug-Fahrzeug-Kontakte 361
8 Finite-Elemente-Berechnung 362
8.1 Einleitung 362
8.2 FE-Modell-Beschreibung 364
8.3 Finite-Elemente-Berechnung 365
8.4 Knoten 366
8.5 Randbedingungen/Zwangsbedingungen 367
8.6 Externe Lasten 367
8.7 Kontaktberechnung 367
8.8 Diskretisierungsprozess – Netzgenerierung 367
8.9 Material Modelle 368
8.10 Ergebnisse 369
8.11 Berechnungszeit 370
Literatur 370
9 Zusammenhang zwischen EES, bleibender Deformation, Kollisionsdauer und Struktursteifigkeit 371
9.1 Einleitung 371
9.2 EES-Wert-Berechnung 371
9.3 Berechnung der Kollisionsdauer 374
9.4 Strukturformeln 376
9.4.1 Massenproportionale Rückverformung 378
9.4.2 Nicht massenproportionale Rückverformung 378
9.4.3 Definition einer Struktur mit nichtlinearer Kennlinie 380
9.5 Berechnung des EES-Wertes aus Unfallversuchen 383
9.6 Crash-Tests 385
9.6.1 Aus ams 385
9.6.2 Eigene Versuche zur HWS-Problematik 386
9.6.3 Dekra-Versuche 386
9.6.4 Schlussbemerkung 389

A10 Fußgängerunfälle 391

1 Einleitung 391
1.1 Unfallarten 391
1.2 Definitionen 394
2 Kinematik 396
2.1 Kontaktphase 397
2.2 Primärkontakt/Erstkontakt 397
2.3 Unterzieheffekt 398
2.4 Rotationsbewegungen 398
2.5 Aufschöpfen oder Aufladen 399
2.6 Flugphase 400
2.7 Rutschphase 401
2.8 Wurfweite 402
2.9 Längswurfweite beim vollen Frontalzusammenstoß 402
2.10 Längswurfweite bei hinein- oder herauslaufendem Fußgänger 406
2.11 Querwurfweite 409
2.12 Überfahren/Überrollen 410
2.13 Beispiel eines Unfalls durch Überfahren 410
2.14 Unfälle mit Überrollen 412
2.15 Geschwindigkeitsverlust des Kraftfahrzeugs 413
3 Bestimmung des Kollisionspunkts 414
3.1 Schrankenverfahren 415
Literatur 418
4 Daten für Berechnungen 419
4.1 Gehen 419
4.2 Schnell Gehen 420
4.3 Laufen 420
4.4 Rennen 421
Literatur 426

A11 Unfälle mit Zweirädern 427

1 Einleitung 427
2 Einteilung der Zweiräder 428
3 Statistik/Unfallforschung 429
4 Einlaufphase 432
4.1 Grundlagen zur Dynamik 432
4.2 Kurvenfahrt 432
4.3 Beschleunigung 433
4.4 Höchstgeschwindigkeit 435
4.5 Bremsen 436
4.6 Kippen 440
4.7 Ausweichen 441
5 Kollisionsphase 443
5.1 Crash-Versuche 443
5.2 Impulserhaltungssatz 447
5.3 Energieerhaltungssatz 447

6 Auslauf 450
Literatur 453

A12 Pkw-Pkw-Unfälle 455

1 Zum Straßenverkehr in Deutschland und in Europa 455
2 Qualitätssicherung durch Ringtests 460
3 Validierung/Verifikation von Rekonstruktionsprogrammen 463
4 Daten für Berechnungen 464
4.1 Anfahren und Beschleunigen 464
4.2 Bremsverzögerung 471
4.3 Ausrollen von Pkw 477
4.4 Reibungskoeffizienten 478
Literatur 481

A13 Unfälle mit Nutzfahrzeugen 483

1 Allgemeines 483
2 Tachographen 483
Literatur 486

A14 Unfälle mit land- oder forstwirtschaftlichen Fahrzeugen 487

1 Unfallursachen 487
2 Allgemeine Bemerkungen zur Technik von lof-Fahrzeugen 488
2.1 Allgemeine Tendenzen 488
2.2 Traktorenkonzepte 488
2.3 Ausblick 490
3 Rekonstruktionsgrundlagen 490
3.1 Sicherheitsvorschriften 492
3.2 Crash-Tests 492
Literatur 494

A15 Überschlagsunfälle 495

1 Einleitung 495
2 Allgemein 495
3 Überschlagsphasen 495
4 Arten von Überschlägen 497
4.1 Rollover mit Zusammenstoß 497
4.2 Rampen-Rollover 497
4.3 Verhakter Rollover (Trip over) 498
4.4 Fahrzeugdynamischer Rollover 498
4.5 Absturz 499
4.6 Überschlag nach vorne 499
5 Experimentelle Test- und Evaluierungsmethoden 500
5.1 SAE J2114 Dolly test (FMVSS 208) 500
5.2 FMVSS 216 Roofcrush (Dacheindrückung) 500
5.3 FMVSS 201 Occupant protection in interior impact (Insassenschutz) 501

5.4 Inverted Drop Test (Inverser Dachfalltest) ... 501
5.5 ADAC-Korkenzieher-(Corkscrew-)Test ... 502
5.6 Alternative Testprozeduren ... 502
5.7 Schlussbemerkung ... 504
Literatur ... 504

A16 Schienenfahrzeuge/Straßenbahnen ... 505

1 Geschichte der Straßenbahnen ... 505
2 Straßenbahntypen ... 505
2.1 Fahrerhaus ... 505
2.2 Bremsanlagen ... 507
2.3 Fahrdatenerfassung ... 509
3 Reaktion bei Notbremsvorgängen ... 512
Literatur ... 513

A17 Schadenaufklärung ... 515

1 Einführung ... 515
2 Begehensformen ... 517
2.1 Das abgesprochene Schadenereignis ... 517
2.2 Das fingierte Schadenereignis ... 517
2.3 Das fiktive Schadenereignis ... 517
2.4 Der provozierte Verkehrsunfall ... 517
2.5 Der ausgenutzte Verkehrsunfall ... 517
3 Kollisionsanordnungen und wirtschaftliches Interesse ... 518
3.1 Das abgesprochene Schadenereignis ... 518
3.2 Das fingierte Schadenereignis ... 525
3.3 Das fiktive Schadenereignis ... 528
3.4 Der provozierte Verkehrsunfall ... 530
3.5 Der ausgenutzte Verkehrsunfall ... 532
4 Daten und Informationen ... 537
4.1 Auswertung der Unterlagen ... 537
4.2 Weitere Informationen zum Geschehensablauf ... 537
5 Bewertung der Daten und Anknüpfungsinformationen ... 540
6 Methoden zur Schadenaufklärung aus technischer Sicht ... 540
6.1 Theoretische Untersuchungen ... 540
6.2 Experimentelle Untersuchungen ... 540
7 Gutachtenerstellung ... 541
Literatur ... 543

A18 Insassensimulation ... 545

1 Einleitung ... 545
2 Fragestellungen ... 545
3 Simulationsmodelle ... 546

4 Simulation 547
4.1 Gelenke 548
4.2 Kontakte 549
4.3 Crash-Puls 550
4.4 Rückhaltesysteme 550
4.5 Verfahrensschritte 551
4.6 Innenraummodellierung 552
5 Ergebnisse 553
Literatur 554

A19 Biomechanik 555

1 Einleitung 555
2 Grundlagen der Anatomie 555
3 Belastungsgrößen – Klassifizierung der Verletzungsschwere 556
3.1 Abbreviated Injury Scale (AIS) 556
3.2 Die Verletzungsbeeinträchtigungsskala IIS (Injury Impairment Scale) 558
3.3 Der 3-ms-Wert 559
3.4 Das Kopf-Verletzungskriterium HIC (Head Injury Criterion) 559
3.5 Das Viskosekriterium VC (Viscous Criterion) 560
3.6 Das Hals-Verletzungskriterium NIC (Neck Injury Criterion) 560
4 Biomechanische Belastungsgrenzen 560
5 Beurteilung von Halswirbelsäulenverletzungen aus technischer Sicht 562
5.1 Allgemeine Ausführungen 562
5.2 Aufprallarten 563
5.2.1 Heckkollision 563
5.2.2 Frontalkollision 565
5.2.3 Seitenkollision 565
5.3 Belastungsgrenzen 567
5.4 Schweregrad der HWS-Verletzung und statistische Ergebnisse 568
Literatur 569

A20 Simulation und Animation 571

1 Einleitung 571
2 Simulation 572
2.1 Grenzen der Simulation 573
2.2 Verifikation 573
2.3 Ringversuche 574
2.4 Simulationsmodelle 574
2.4.1 Kinematische Simulation 574
2.4.2 Kinetische Simulation 575
3 Animation 575
4 Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von Simulationsprogrammen 577
5 Nachvollziehbarkeit 577
Literatur 578

Teil B: Fallbeispiele 579

B1 Unfälle mit Tieren 581

1 Allgemeines 581
2 Daten für Berechnungen – Tiere 581
3 Pferde 582
3.1 Grundlagen 582
3.2 Die Gangarten der Pferde 583
3.2.1 Der Schritt 584
3.2.2 Der Trab 585
3.2.3 Der Galopp (Canter) 586
3.2.4 Der Pass und der Tölt 587
3.2.5 Rückwärtsrichten 587
3.3 Pferderassen 588
3.4 Wert 591
3.5 Ausbildung 591
3.6 Ausrüstung 591
4 Falldarstellungen 594
5 Versuche 597
Literatur 597

B2 Unfälle mit Fußgängern 599

1 Sachverhalt 599
2 Auftrag 599
3 Objektive Merkmale 600
4 Unfallrekonstruktion 602
4.1 Vermeidbarkeit für den Pkw-Fahrer 604
5 Zusammenfassung 606

B3 Unfälle mit Zweiradfahrzeugen 607

1 Sachverhalt 607
2 Durchgeführte Maßnahmen/Aufgabenstellung/Lösungsweg 607
3 Objektive Merkmale 608
4 Analyse 612
4.1 Bewegungsabläufe/Kollision 612
4.2 Geschwindigkeitsberechnungen 613
4.3 Vermeidbarkeit für den Pkw-Fahrer 614

B4 Unfälle mit motorisierten Zweirädern 615

1 Pkw kollidiert mit vorfahrtsberechtigtem Krad 615
1.1 Sachverhalt 615
1.2 Durchgeführte Maßnahmen/Aufgabenstellung/Lösungsweg 615
1.3 Objektive Merkmale 616
1.3.1 Beschädigungen/technische Zustände 616
1.3.2 Unfallstelle/Endstände/Spuren 618

1.4 Analyse ... 621
1.4.1 Rekonstruktion der Bewegungsabläufe ... 621
1.4.2 Geschwindigkeiten ... 622
1.4.3 Weg-Zeit-Betrachtungen und Vermeidbarkeit ... 627

B5 Unfälle mit Pkw ... 631

1 Sachverhalt ... 631
2 Auftrag ... 631
3 Objektive Merkmale ... 631
4 Unfallrekonstruktion ... 633
5 Zusammenfassung ... 637

B6 Unfälle mit Kleintransportern ... 639

1 Sachverhalt ... 639
2 Durchgeführte Maßnahmen/Aufgabenstellung/Lösungsweg ... 639
3 Objektive Merkmale und sonstige Informationen ... 640
3.1 Beschädigungen ... 640
3.2 Unfallstelle/Endstände/Spuren ... 641
4 Analyse ... 643
4.1 Rekonstruktion der Bewegungsabläufe ... 643
4.2 Geschwindigkeiten ... 644
4.2.1 Kollisionsgeschwindigkeiten ... 644
4.2.2 Ausgangsgeschwindigkeiten ... 647
4.3 Weg-Zeit-Betrachtungen ... 649
4.4 Unfallursache ... 649

B7 Unfälle mit Nutzfahrzeugen ... 651

Reisebus kippt beim Abbiegen auf linke Seite ... 651

1 Sachverhalt ... 651
2 Durchgeführte Maßnahmen/Aufgabenstellung/Lösungsweg ... 651
3 Objektive Merkmale ... 652
3.1 Unfallstelle/Endpositionen/Spuren ... 652
3.2 Fahrzeugkenndaten/Beschädigungen ... 656
4 Technischer Zustand ... 657
5 Rekonstruktion des Bewegungsablaufes ... 661
5.1 Geschwindigkeit des Busses ... 662
5.2 Weg-Zeit-Verhalten und Vermeidbarkeit ... 664

Schwerlasttransporter schwenkt bei Kurvenfahrt aus und kollidiert mit einem entgegen kommenden Pkw ... 666

1 Sachverhalt ... 666
2 Auftrag ... 666
3 Objektive Merkmale ... 666
3.1 Merkmale am Sattelzug ... 668
3.2 Sichtverhältnisse für den Fahrer des Sattelzugs ... 669

4 Unfallrekonstruktion 671
5 Unfallvermeidung 672

Unfall Bus/Radfahrer 673

6 Bremsversuch auf dem Bus mit PocketDAQ 674
7 Spuren an den Fahrzeugen 675
8 Spuren auf der Fahrbahn 675
9 Geschwindigkeit des Busses 676

Auffahrkollision von Nutzfahrzeugen 677

B8 Unfälle mit land- oder forstwirtschaftlichen Fahrzeugen 681

Überholender Pkw kollidiert mit nach links abbiegendem Traktor 681

1 Sachverhalt 681
2 Auftrag 681
3 Objektive Merkmale 681
3.1 Besichtigung des Traktors 685
4 Unfallrekonstruktion 686
5 Unfallvermeidung 689
6 Zusammenfassung 689

B9 Unfälle mit Schienenfahrzeugen 691

1 Sachverhalt 691
2 Parteivorträge und sonstige Informationen 692
2.1 Klagevortrag 692
2.2 Beklagtenvortrag 693
2.3 Beweisaufnahme 693
3 Sachverständige Feststellungen und Ausführungen 693
3.1 Fahrdatenerfassung der Straßenbahn 693
3.2 Ortsbesichtigung und Erkennbarkeit des Blaulichts 694
3.3 Vergleich der Fahrdatenerfassung mit dem XLMeter 695
3.4 Kollision zwischen Straßenbahn und Polizeifahrzeug 696
3.5 Weg-Zeit-Berechnungen 697
4 Zusammenfassung 700

B10 Alleinunfälle 701

1 Einleitung 701
2 Fallbeispiel 1: Überschreiten der Kurvengrenzgeschwindigkeit 701
2.1 Ablauf 702
2.2 Augenschein, Rekonstruktion (alle Fahrzeuge sind Vergleichsfahrzeuge) 704
2.3 Unfalldynamische Grundlagen 705
2.4 Unfallanalyse (Hergang) 707
2.5 Sicherheitsgurte 710
2.6 Anhaltestrecken 711

2.7 Beurteilung der Fahrweise des BMW-Fahrers 711
2.8 Die Person des BMW-Fahrers 711
3 Fallbeispiel 2: „Flugunfall“ 712
3.1 Unfalluntersuchung 712
4 Zusammenfassung 715

B11 Überschlagunfälle 717

Pkw kollidiert mit einem Geländewagen 717

1 Sachverhalt 717
2 Durchgeführte Maßnahmen/Aufgabenstellung/Lösungsweg 717
3 Objektive Merkmale 718
4 Analyse 724
4.1 Bewegungsabläufe/Kollision 724
4.2 Geschwindigkeitsberechnungen 725
4.3 Vermeidbarkeit 726

B12 Beispiele zu Insassenverletzungen 727

Beweissicherung und Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen mit unklarer Sitzposition 727

1 Einleitung 727
2 Fallbeispiel 1 728
2.1 Ausgangssituation 728
2.2 Ablauf der Beweissicherung 728
3 Fallbeispiel 2 731
3.1 Ausgangssituation 731
3.2 Ablauf der Beweissicherung 731
4 Fallbeispiel 3 734
4.1 Ausgangssituation 734
4.2 Ablauf der Beweissicherung 734
5 Aufgaben der Sachverständigen bei der Konfrontation mit unklaren Fahrereigenschaften 736
5.1 Technischer Sachverständiger 736
5.1.1 Arbeit am Unfallort 736
5.1.2 Spurensicherung am Fahrzeug 737
5.1.3 Teilnahme an medizinischen Untersuchungen 738
5.1.4 Rekonstruktion der Bewegungsabläufe 738
5.2 Medizinischer Sachverständiger 738
6 Fazit 740
Literatur 740

Teil C: Sonderthemen 741

C1 Aktive und passive Sicherheit 743

1 Die Fahrzeugsicherheit und das Risiko 743
2 Die aktive Sicherheit 743
3 Die passive Sicherheit 744
4 Nutzung von Daten und Informationen aus der aktiven für die passive Sicherheit 744
Literatur 745

C2 Sicherheitsgurte 747

A – Technik der Gurtsysteme 747

1 Bedeutung der Gurtanlege-Quote 747
2 Komponenten und Funktionsweise des Sicherheitsgurts 747
3 Sensierung und Auslösekriterien 749
4 Fragestellung aus der Sicht des Gutachters 749
Literatur 750

B – Spurenkundliche Überprüfung der Gurtsysteme 751

1 Einleitung 751
2 Sicherstellung von Sicherheitsgurten 751
3 Bewertung von Spuren als Tragspuren 751
4 Untersuchung von Sicherheitsgurten (Dreipunkt-Sicherheitsgurte ohne Straffer) 752
4.1 Vor-Untersuchungen 752
4.2 Mikroskopische Untersuchungen 752
5 Gurtstraffer/Gurtstrammer 755
6 Zusammenfassung 755
Literatur 756
7 Spurenkundliche Überprüfung der Gurtsysteme: Ein Fallbeispiel 756
7.1 Einleitung 756
7.2 Spurensicherung am Unfallort und am Fahrzeug – Sicherheitsgurten? 756
7.3 Bewertung von Spuren als Tragspuren 760
7.4 Zusammenfassung 760
Literatur 760

C3 Airbag-Systeme 761

1 Der Airbag als Sicherheitsbestandteil heutiger Automobile 761
2 Komponenten und Funktionsweise von Airbag-Systemen 762
3 Sensierung und Auslösekriterien 763
4 Fragestellung aus der Sicht des Gutachters 764
Literatur 765

C4 Schutzhelme 767

1 Einleitung 767
2 Erste Untersuchungen am Helm 767
3 ECE-Typenprüfung von Helmen 767
4 Beschädigungen am Helm 768
5 Untersuchungen am Kinnriemen und am Helmschloss 769
6 Literatur zu Helmverlusten bei Motorradunfällen 770
7 Zusammenfassung 770
8 Begriffsbestimmungen (Schutzhelme und Visiere ECE-R 22) 771
Literatur 772

C5 Reifen und Räder 773

1 Einleitung 773
2 Sicherstellung von Rädern und Reifen 773
3 Reifenschäden als Unfallfolgen 774
4 Untersuchung von Rädern/Reifen 774
5 Walkspuren an Rädern/Reifen 775
6 Zusammenfassung 777
Literatur 778

C6 Glühlampen 779

1 Einleitung 779
2 Sicherung von Glühlampen 779
3 Untersuchungen von Glühlampen 780
3.1 Visuelle und elektrische Untersuchung 780
3.2 Beurteilungskriterien bei Glühlampenuntersuchungen 780
3.3 Oxidationsspuren an Glühlampen 782
3.4 Untersuchung von blauen Aufdampfungen an Glühwendeln 783
4 Bewertung von Spuren an Glühlampen 783
5 Fallversuche mit Glühlampen 783
6 Blinkerlampen und Blinkfrequenz 784
7 Xenon-Lampensysteme 784
8 LED-Lampensysteme 785
9 Zusammenfassung 786
Literatur 786

C7 Fahrzeugschlüssel 787

1 Fragestellung 787
2 Schlüssel und elektronische Sicherungssysteme 787
2.1 Mechanischer Schlüsselteil 787
2.2 Elektronischer Schlüsselteil 790
3 Schlüsseluntersuchung 791
3.1 Zugehörigkeit zum Fahrzeug 793
3.2 Duplizierspuren 794
3.3 Spuren durch Manipulationen an einem Transponder 796
Literatur 796

C8 Mikrospuren 797

A – Mikrospuren, Mikrospurensicherung, Mikrospurenauswertung 797

1 Einleitung 797
2 Sicherung von Mikrospuren 797
3 Auswertung von Mikrospuren 798
4 Bewertung von Mikrospuren 798
5 Arten von Mikrospuren 799
6 Einsatz des Spurensicherungsklebebands 799
7 Stereomikroskopische Vor-Untersuchungen 800
8 Beeinflussung des Spurenmaterials durch die Klebebänder respektive den Klebstoff 800
9 Mikroskopische Untersuchungen 800
9.1 UV/VIS-Spektroskopie (Lackspuren, textile Fasern) 801
9.2 FourierTransformierte-InfraRot-(FT-IR-)Spektroskopie (Lackspuren, Kunststoffe) 801
9.3 Pyrolyse-GC-MS (Pyrolyse-Gas-Chromatografie-Massenspektroskopie) (Lackspuren, Kunststoffe) 802
9.4 Biologische Spuren (Pflanzenfasern, Moose, Holz etc.) 803
9.5 Anorganische Spuren (Straßenschmutz, Steinchen, Mauerabrieb, metallische Spuren etc.) 803
9.6 Menschliche und tierische Haare 803
9.7 Blut, Speichel, Sperma und Gewebespuren (inklusive DNA-Material) 805
9.8 Glas (Splitter, Scherben) 805
10 Lackspuren/Lackdatenbank 806
11 Zusammenfassung 806
Literatur 807

B – Spurensicherung mit der Spurfix-Folie 808

1 Einleitung 808
2 Anwendungsfälle der SpurFix-Methode 810
3 Spurensicherung mit der Spurfix-Folie 811
4 Besonderheiten der Spurfix-Folie 811
5 Typische Spuren 812
6 Weiterführende Untersuchungen 813
7 Zusammenfassung 814
Literatur 814

C9 Elektronik im Kraftfahrzeug 815

A – Übersicht 815

1 Einführung 815
2 Anwendungsgebiete 815
3 Vernetzung und Bussysteme 816
4 Steuergeräte 817

5 Sensoren ... 819
5.1 Temperatursensoren ... 819
5.2 Positionssensoren ... 819
5.3 Optische Sensoren ... 820
5.4 Induktive Drehzahlsensoren ... 820
5.5 Beschleunigungssensoren ... 820
5.6 Ultraschallsensoren ... 820
5.7 Weitere Sensoren ... 820
5.8 Schalter und Taster ... 821
6 Diagnose und Prüfmöglichkeiten ... 821
7 Optische Lichtleitersysteme ... 823
8 Lichttechnik ... 824
9 Vorgehensweise bei Fehlersuche ... 824
10 Zusammenfassung/Ausblick ... 825
Literatur ... 826

B – Event Data Recorder (EDR) und Datenauslesung mit dem BOSCH CDR Tool ... 827

1 Einleitung ... 827
2 Auslesung von elektronischen Daten ... 829
3 Datenauslesung über den OBD-Stecker ... 830
4 Datenauslesung direkt vom Airbagsteuergerät (ACM) ... 831
5 Allgemeine Hinweise ... 832
6 US Regulations (Verordnungen) ... 833
7 Beispiele aus Gutachten ... 835
7.1 Auffahrunfall ... 835
7.2 Komplexer Unfall ... 835
8 Aus- und Weiterbildung ... 836
8.1 Operator Training ... 836
8.2 Fünf-Tage Grundausbildung für Polizeibeamte und Sachverständige für Unfallrekonstruktion. ... 836
9 Datenrechte/Privacy ... 838
Literatur ... 839

C10 Zukünftige Methoden bei der Spurensicherung ... 841

1 Einleitung ... 841
2 Geschichte und Grundlagen ... 841
3 3D-Photogrammetrie ... 842
4 Neue Möglichkeiten und Bedürfnisse ... 842
5 3D-Scanner-Technologien ... 843
6 Anwendungsmöglichkeiten und Fallbeispiele ... 844
Literatur/www-Adressen ... 852

C11 Biomechanische Daten 853

1 Einleitung 853
2 Modellierung des menschlichen Körpers 856
2.1 Körpersegmente 857
2.1.1 Charakteristika von Körpersegmenten 857
2.2 Methoden zur Ermittlung der Charakteristika von Körpersegmenten 858
2.2.1 Die Schwingungsmethode 858
2.2.2 Anthropometrie und anthropometrische Datenbanken 861
2.2.3 Medizinische Bildgebung und Gewebesegmentierung 862
2.2.4 Eigenschaften der Masse und Trägheit von Körpersegmenten 867
Literatur 869

C12 Bemerkbarkeit von Kleinkollisionen 871

1 Einführung 871
2 Feststellen des Verursachers 871
3 Möglichkeiten der Bemerkbarkeit von Kleinkollisionen 872
3.1 Optische Bemerkbarkeit 872
3.2 Akustische Bemerkbarkeit 873
3.3 Taktile bzw. kinästhetische Bemerkbarkeit 874
4 Beschädigungsmerkmale 874
5 Verformungswiderstand 875
6 Kollisionsversuche 875
7 Zusammenfassung 877
Literatur 877

C13 Dunkelheitsunfälle 879

Teil 1: Sichtbarkeit aus lichttechnischer Sicht, der Dunkelheitsunfall, Rekonstruktion durch Berechnung 879

1 Abgrenzung, Zielstellung 879
2 Lichttechnische Größen 879
2.1 Raumwinkel 880
2.2 Lichtstrom Φ 881
2.3 Beleuchtungsstärke E 881
2.4 Lichtstärke I 881
2.5 Leuchtdichte L 881
3 Wahrnehmungsphysiologische Grundlagen, Wahrnehmungsmodell 882
4 Wahrnehmung und Wahrnehmungsmodelle 883
4.1 Arten der Wahrnehmungsmodelle 883
4.2 Wahrnehmungsmodell bei stationärer Beleuchtung 884
4.3 Wahrnehmungsmodell bei Kfz-Scheinwerferbeleuchtung 884
5 Berechnung der Wahrnehmung nach dem Kontrastwahrnehmungsmodell 884
5.1 Berechnung ohne Blendung 884
5.2 Berechnung mit Blendung 886
6 Die lichttechnische Unfallrekonstruktion (prinzipielle Vorgehensweise) 888

7 Messung lichttechnisch relevanter Größen 889
7.1 Messung der Leuchtdichte 889
7.1.1 Messung der Leuchtdichte mit direkt messenden Leuchtdichtemessern 890
7.1.2 Messung der Leuchtdichte mit bildauflösenden Verfahren 890
7.2 Messung der Beleuchtungsstärke 891
7.3 Folgen ungenügender V(λ)-Anpassung bei Leuchtdichte- und Beleuchtungsstärkemessgeräten 892
Literatur 893

Teil 2: Übersicht und allgemeine Hinweise zur Bearbeitung von Dunkelheitsunfällen 894

1 Rekonstruktionsmethoden und Einflussgrößen für die lichttechnische Rekonstruktion 894
2 Blickzuwendungszeit 898
Literatur 900
3 Physiologisch-optische Grundlagen und visueller Wahrnehmungsprozess 901
Literatur 904

C14 Stahlleitplanken 905

1 Einleitung 905
2 Übersicht der Normen der EN 1317 und der technischen Spezifikation für öffentliche Straßen 905
2.1 Empfehlungen der Norm EN 1317-1 906
2.2 Index für die Schwere der Beschleunigung (ASI – accelaration severety index) 907
2.3 Normzusatz EN 1317-2: 1999/A:2006 907
2.4 Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV – theoretical head impact velocity) 908
2.5 Kopfverzögerung nach dem Anprall (PHD – post-impact head deceleration) 909
2.6 Index der Fahrzeugkabinenverformung (VCDI – vehicle cockpit deformation index) 909
2.7 Kinetische Energie und theoretische durchschnittliche Anprallkraft 909
2.8 Stufen der Fahrzeugrückhaltung 910
3 Übersicht der Norm EN 1317-2 911
3.1 Tragfähigkeitskriterien für Leitplanken und Testkriterien 911
3.2 Wirkungsbereich der Leitplanke 912
3.3 Parameter von Leitplanken 913
3.4 Fahrzeugparameter 913
3.5 Testgelände 914
4 Empfehlungen der Norm EN 1317-3 914
4.1 Anprallstufen 915
4.2 Verformungsklassen von Leitplanken nach dem Anprall 916
5 Empfehlungen der Norm EN 1317-4 917
5.1 Aufprall des Fahrzeugs in die Endkonstruktion 918
5.2 Verformungen der Endkonstruktion 919

5.3 Testparameter von Endkonstruktionen und Fahrzeugen ... 920
6 Technische Spezifikation für öffentliche Straßen TSC 02.210: 2008; Leit-Planken, Bedingungen und Montagearten ... 921
7 Verlauf der numerischen Testsimulation der Leitplanke ... 925
7.1 Numerische Modelle der Testfahrzeuge ... 925
7.2 Der Lastkraftwagen Ford F800 ... 925
7.2.1 Der Personenkraftwagen Dodge Neon ... 926
7.3 Modellierung von Stahlleitplanken ... 927
7.3.1 Geometrische Modelle von Leitplankenelementen ... 927
7.3.2 Numerisches Modell einer Stahlleitplanke ... 927
7.3.3 Materialmodell ... 928
7.3.4 Modell von Linienelementen ... 928
7.3.5 Modellierung des Erdreichs ... 929
7.4 Rand- und Anfangsbedingungen ... 930
7.4.1 Anprall des Lastkraftwagens Ford F800 ... 930
7.4.2 Anprall des Personenkraftwagens Dodge Neon ... 931
7.4.3 Anprall des Personenkraftwagens Dodge Neon in einer Kurve ... 931
8 Dynamische Analyse ... 932
8.1 Analyseergebnisse ... 932
8.1.1 Prüfung der Stahlleitplanken nach dem Testkriterium TB 42 ... 932
8.1.2 Prüfung der Leitplanke nach dem Testkriterium TB 22 ... 934
8.1.3 Anprall des Personenkraftwagens Dodge Neon in einer Kurve in einem Winkel von 20° ... 935
9 Schlussfolgerungen ... 936
Literatur ... 937

Teil D: Begriffe, Tabellen ... 935

D1 Fachbegriffe nach DIN 75204 Straßenfahrzeuge ... 941
1 Teil 1 – Bewegungsvorgang, Weg-Zeit-Betrachtung, Kollisionsvorgang ... 941
2 Teil 2 – Spuren ... 958
3 Teil 3 – Unfallumstände, Fahrzeug, Person ... 962
4 In Befund und Gutachten zu verwendende Benennungen (ÖNorm 5050 – Anhang B) ... 965

D2 Begriffe und Abkürzungen ... 971
1 Wichtige Abkürzungen in der Fahrzeugsicherheit ... 971
2 Firmen und Institutionen ... 972

D3 Medizinische Fachausdrücke ... 975

Anhang 1 ... 1015
Anhang 2 ... 1018
Literatur ... 1020

Sachwortverzeichnis ... 1021

Teil A:
Grundlagen

A1 Allgemeine Anmerkungen zum Sachverständigenwesen

Dr. Heinz Burg

1 Einleitung

In dem Buch „Ein Bild des Sachverständigen in Geschichte und Gegenwart“ von Sanner [1] ist der folgende Satz zu finden:

„Die Gerechtigkeit ist die Mutter des Staates und der Sachverständige ist die Wurzel der Gerechtigkeit.“

Dieser Autor hat sich detailliert mit der Geschichte der Sachverständigen auseinander gesetzt. Danach haben wahrscheinlich schon in der Antike die Sachverständigen eine wichtige Rolle im gesellschaftlichen Leben gespielt.

Was mag wohl geschehen sein, wenn in der Antike zwei Wagen zusammenstießen? Sicher wurden noch keine Berechnungen angestellt, aber es dürfte schon Sachkundige gegeben haben, die von den Rechtskundigen befragt wurden, ob eventuell einer der Wagenlenker einen Fehler gemacht haben könnte, oder ob ein Wagen handwerkliche Mängel oder übermäßigen Verschleiß aufwies usw.

Wenn bedeutsame Personen in einem der Wagen waren und zu Schaden kamen, dann könnte ein Orakel befragt worden sein, göttlicher Wille oder das Schicksal könnten eine Rolle gespielt haben. Dieses Verfahren hat sich bis ins Mittelalter bewährt, in dem zitierten Buch [1] gibt es dazu ein Kapitel „Sachverständige auf höchster Ebene – die Gottesurteile“ und ein Untertitel „Der Sachverständige zur Zeit der Folter“. Die Stellung des Sachverständigen soll zur Zeit der Inquisition einen ethischen Tiefpunkt gehabt haben.

Mit dem Aufkommen der Naturwissenschaften wurde alles anders (um 1700 Leibnitz, Newton). Plötzlich schien alles berechenbar, erklärbar, der göttliche Wille, der Zufall schienen ausgedient zu haben, die Welt wurde mechanistisch. In den folgenden 150 Jahren entstand aber gleich eine starke Opposition und daraus resultierend schließlich die Trennung der Wissenschaften in Natur- und Geisteswissenschaften. Schließlich wurde sogar das Vorhandensein von zwei Kulturen postuliert [8]. Heute aktuell drückt sich das in den unterschiedlichen Auffassungen über die Schöpfung aus: Darwinismus gegen Intelligent Design.

Die Naturwissenschaft stand und steht bis in die heutige Zeit mit dem nicht naturwissenschaftlich geschulten menschlichen Verstand im Kampf, der zu einer linearen Betrachtungsweise neigt. Das ist nicht nur bei einfachen Beispielen so, nein, auch bei komplexeren mathematischen Zusammenhängen mit mehreren Einflussgrößen wird diese Linearisierung versucht. Das drückt sich in Regeln aus, wie z. B. der Anhalteweg sei gleich dem „halben Tachowert“, oder die Geschwindigkeit bei Nebel solle nicht größer als die halbe Sichtweite sein.

Tatsächlich sind meistens nicht lineare Zusammenhänge vorhanden oder Schwellenwerte: Zunächst passiert nichts, bei Erreichen eines bestimmten Wertes bricht ein Teil. Als einfaches Beispiel mag die in USA geforderte Stoßfängerkonstruktion dienen: Bis 8 km/h dürfen keine bleibenden Schäden auftreten, danach deformieren sich die tragenden Strukturen sehr rasch.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_1

Die modernen Rechner machen es möglich, Nichtlinearitäten und Sprünge zu berücksichtigen. Konnten früher Festigkeitsberechnungen nur im linearen Bereich durchgeführt werden, so ist heute alles bis zum Bruch des Materials rechenbar. Die mathematischen Modelle für Fahrzeugvorbauten sind in der Industrie schon so weit, dass manche Fachleute bei den Herstellern meinen, man könne bald auf Crash-Tests mit Vorserienmodellen verzichten. Der Aufwand für die mathematischen Modelle ist allerdings enorm und man braucht sehr leistungsstarke Rechner, um zuverlässige Ergebnisse zu erarbeiten.

Die menschliche Erkenntnis schreitet heute sehr rasch voran, nicht linear, sondern exponentiell. Schätzungen sagen, dass sich das Wissen der Menschheit alle drei Jahre verdoppelt. Die Berücksichtigung dieser neuen Erkenntnisse erfordert ständige Anpassung der Berechnungsmodelle und ständig steigenden Weiterbildungsaufwand. Verbunden damit ist aber auch eine weitere Entfernung von unserem „normalen“ Denken. Das bedeutet für den Sachverständigen, der sich fortschrittlicher Verfahren bedient, dass er bei Laien, und das sind in vielen Fällen auch oder gerade die Juristen, auf Verständnisschwierigkeiten, Unglauben oder Ablehnung von komplizierten Gedankengängen stößt. Der Sachverständige wird also gut daran tun, prinzipielle Sachverhalte einfach und verständlich zu erklären. Dass die Berechnung wesentlich komplizierter ist, muss offenbar mehr nebenbei erwähnt werden. In letzter Zeit ist zunehmend zu beobachten, dass komplizierte Berechnungsergebnisse durch computergenerierte Filme anschaulich gemacht werden. Dieses Verfahren läuft unter der Bezeichnung Animation. Leider können mit den Mitteln der Animation auch falsche oder unmögliche Dinge so realistisch dargestellt werden, dass man geneigt ist, den bewegten Bildern zu glauben. Unsere Welt wird also immer komplizierter, und wir müssen aufpassen, nicht den Boden der Realität unter den Füssen zu verlieren.

Die bisherigen Ausführungen zeigen die besonderen Anforderungen an die Sachverständigen, die sich mit der Rekonstruktion von Unfällen befassen, insbesondere dann, wenn sie forensisch tätig sind. Die Anforderungen sind fachlich und persönlich sehr hoch und sind mit keinem anderen Ingenieurberuf vergleichbar. Will ein Sachverständiger den Anforderungen gerecht werden, dann entsteht ein sehr hoher finanzieller Aufwand, der sich notwendigerweise in der Honorierung niederschlagen muss. Dabei ist zu bedenken, dass sich die Wissensbildung auf dem Fachgebiet Unfallanalyse/Unfallrekonstruktion als eigen und sehr speziell erwiesen hat. Die Erkenntnisse beim Bau von Automobilen, die in der Industrie gewonnen werden, lassen sich nur zu einem sehr geringen Teil anwenden. Deshalb sind sehr aufwändige eigene Untersuchungen und Forschungen notwendig. Auch ist zu beobachten, dass die Herstellerfirmen immer weniger Informationen herausgeben, vermutlich aus Vorsicht wegen eventueller Produkthaftungsprozesse.

2 Arten von Sachverständigen

Derzeit gibt es keine einheitlichen Regeln dafür, wie man Sachverständiger (SV) wird und was ein Sachverständiger ist. Grundsätzlich wird gefordert, dass der Sachverständige weit über seinen Beruf als Diplom-Ingenieur hinausgehende Kenntnisse hat und diese unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen der Öffentlichkeit zur Verfügung stellt. Gute fachliche Kenntnisse alleine machen noch keinen guten Sachverständigen aus. Eine Person kann ihre besonderen fachlichen Kenntnisse auch für die Begehung strafbarer Handlungen einsetzen. Es ist also insbesondere die Frage der charakterlichen Eignung bedeutsam, und das ist ein schwieriges Feld. Wie auch immer man diese Problematik sehen mag, wird auf einige offenkundige Schwachstellen in den unterschiedlichen Systemen hingewiesen.

Tabelle A1.1 Arten von Sachverständigen

Arten von Sachverständigen		
Sachverständige ohne Anerkennung durch ein Gremium	Sachverständige mit Anerkennung durch: – Industrie- und Handelskammern – Ingenieurkammern – Gerichte – Regierungsstellen – Berufsverbände	Sachverständige, die bei Organisationen angestellt sind (z. B. Versicherungen, DEKRA, TÜV, Institute für Gerichtsingenieurwesen)

In manchen Ländern in Westeuropa hat sich das System der öffentlichen Bestellung und Vereidigung oder parallel dazu das System der Zertifizierung nach den einschlägigen Europanormen als bewährtes Instrument durchgesetzt. Es gibt aber auch Sachverständige, die keine öffentliche Ernennung vorweisen können und trotzdem erfolgreich tätig sind. Es gibt auch Länder, in denen gar keine Qualitätskontrolle erfolgt und bei denen auch keine Zugangskriterien formuliert sind.

Die derzeit veröffentlichen Zugangsvoraussetzungen, Prüfungsvorschriften usw. sind in der **Tabelle A1.1** zusammengestellt.

Nach Meinung des Verfassers sollte der Zugang zu der Tätigkeit als Sachverständiger eher relativ offen gehandhabt werden. Das gibt Neueinsteigern ausreichend gute Chancen und auch die Förderung des Wettbewerbs ist damit positiv geregelt.

Beispielsweise fragt in Deutschland kaum einmal ein Richter nach der Qualifikation des Sachverständigen, der vor Gericht auftaucht oder nach dessen Lebenslauf. Manchmal reicht es aus, wenn sich eine Person einen ansprechenden und aussagekräftigen Briefbogen und Visitenkarten anfertigt und dann eine Werbetour zu den Richterinnen und Richtern macht, um an Aufträge zu kommen. Noch leichter ist das dann, wenn versteckt die Aussage gegenüber privaten Auftraggebern erfolgt, man werde ein Gutachten im Sinne des Mandanten machen. Vor Gericht zählt in vielen Fällen, wie bestimmt und wortgewandt ein SV seine Meinung vorträgt. Ein hochkarätiger Experte mit überlegenem Sachverstand kann durchaus gegen einen virtuos auftretenden Scharlatan verlieren.

Als Nachteil kann es sich auch auswirken, wenn ein Sachverständiger in einem Gerichtsbezirk alleiniger „Herrscher“ über viele Jahre war. Er und sein Fachwissen werden dann „gerichtsbekannt“ und damit weitgehend unangreifbar. Ein fremder Sachverständiger wird gegen so einen Kollegen nur äußerst schwer ankommen, auch wenn er einen Fehler des gerichtsbekannten SV bemerkt hat und aufdecken kann.

In den osteuropäischen, früher kommunistisch regierten Ländern, ist es üblich, nach dem Studium zum Diplomingenieur ein postgraduales Studium zu besuchen, das dann zur Tätigkeit als Sachverständiger befähigt. In diesen Ländern gibt es staatliche Institute für Gerichtsingenieurwesen, in denen diese Experten arbeiten. Die Gerichte sind angewiesen, sich dieser Fachleute zu bedienen. Bei diesem System ist zwar die Grundausbildung der SV gut geregelt und qualitativ meist hochwertig und auch die Weiterbildung ist meist geregelt. Anlass zu Bedenken gibt die systembedingt unzureichende Qualitätskontrolle der Gutachten. Diese Sachverständigen haben eine erstaunliche Machtfülle vor Gericht, denn ihre Fach- und Sachkunde kann kaum erfolgreich angezweifelt werden. Es gibt auch Berichte darüber, dass politisch motivierte Falschgutachten erstellt worden sein sollen. Auch der Zugang zu der Tätigkeit soll nicht nur von der fachlichen Qualifikation abhängig sein. Insbesondere wird auch die Bedarfsfrage in

den Vordergrund gestellt. Somit ist das schon vom Ansatz her ein wettbewerbsfeindliches System. Solche wettbewerbsfeindlichen Systeme finden sich aber auch in Westeuropa, wenn die Zugangsvoraussetzungen auch der Sicherung von „Erbhöfen“ dienen.

Das amerikanische System ist wegen des angelsächsischen Rechtssystems deutlich anders. Dort gibt es keine bindenden Zulassungsregeln, also keine Wettbewerbsbeschränkungen, jedoch verschiedene Formen von Selbstkontrollen. Für die Qualität von Sachverständigen und deren Gutachten sorgt bereits das allgemeine Rechtssystem in äußerst scharfer Weise. Es gibt in den Straf- und Zivilverfahren immer mindestens einen SV auf der einen Seite und mindestens einen SV auf der anderen Seite. Ferner gibt es ein Urteil vom obersten Gericht, wonach ein SV, der wegen eines Falschgutachtens von einem Gericht als unbrauchbar aus dem Prozess geworfen wurde, nicht wieder als gerichtlicher SV tätig werden darf. Diese Instrumente wirken wie Fallbeile. Kehrseite der Medaille sind äußerst aufwändige und für europäische Verhältnisse extrem teure Gutachten.

In Europa treffen das hiesige und das amerikanische System in Bezug auf die SV manchmal aufeinander. Wenn amerikanische Soldaten Unfälle verursachen und der amerikanische Staat einen Soldaten anklagt, dann wird unter Umständen von der einen Seite (Staatsanwalt, prosecutor) ein europäischer SV beauftragt, von der anderen Seite (Verteidiger, defense attorney) ein amerikanischer SV, oder umgekehrt. Für europäische SV ist die Umstellung schwierig. Nicht nur, dass man vor der endgültigen Beauftragung umfangreiche Informationen über sich selbst und seine Fachkunde einreichen muss, wird man auch vor Gericht vor den fachlichen Ausführungen lange und umfangreich dazu befragt, wieso man glaubt, besonders sachkundig in diesem konkreten Fall zu sein. Danach erfolgt die direkte Auseinandersetzung mit dem anderen, gegnerischen SV. Man geht davon aus, dass der Kampf der beiden Parteien vor Gericht die Wahrheit an den Tag bringt. Die Sachverständigen müssen bei ihrer Auseinandersetzung streng darauf achten, dass sie nicht Dinge behaupten, die sich nachweislich als falsch herausstellen könnten, denn das wäre unter Umständen das Ende ihrer beruflichen Laufbahn. Die Aussagen der SV werden peinlich genau mitgeschrieben. Die SV müssen am Ende ihrer Ausführungen die verwendeten Grundlagen und ihre Ergebnisse, insbesondere auch Dateien von verwendeten Computerprogrammen dem Gericht abliefern.

Doch zurück nach Europa. Hier mag zwar grundsätzlich klar sein, was ein Sachverständiger ist, trotzdem wird im Detail sehr heftig diskutiert. Beispielsweise ist in der Straf- und Zivilprozessordnung in Deutschland zu diesem Thema nichts direkt ausgesagt. Es findet sich die Aufforderung, dass nach Möglichkeit öffentlich bestellte SV zugezogen werden sollen (§ 73, 2 StPO und § 404, 1 ZPO). Man unterstellt, dass diese SV, weil von einer unabhängigen Stelle geprüft, ausreichend sachkundig sind. Gegenüber dieser Gruppe gewinnt die Zertifizierung nach den einschlägigen Europanormen an Bedeutung. Auch gibt es erste Bestrebungen für gemeinsame europäische Richtlinien mit entsprechenden Qualitätsmerkmalen. Warum angestellte SV, die in großen Organisationen arbeiten und oft über sehr gute Ausbildung und auf großes Fachwissen zurückgreifen können, weniger geeignet sein sollen, ist noch nicht ausdiskutiert. Beauftragt werden solche SV aber in großem Maße: Praxis und Theorie stehen hier noch nicht im Einklang.

Für wen und auf welchen Fachgebieten Sachverständige arbeiten können, ist in **Tabelle A1.2** und **Tabelle A1.3** zusammengestellt:

Tabelle A1.2 Potenzielle Auftraggeber für SV-Gutachten

Staatliche Stellen	Private Stellen/Firmen	Öffentliche Stellen
– Polizeidienststellen – Staatsanwaltschaften – Gerichte	– Autohändler – Fuhrparkhalter – Banken – Versicherungen – Privatpersonen	– Rechtsanwälte – Kommunen – Landes- und Bundesbehörden – Verwaltungen

Tabelle A1.3 Dienstleistungsgebiete

Fahrzeugführer	Fahrzeuge	System Fahrer-Fahrzeug-Straße
– Erteilung der Fahrerlaubnis Messung physiologischer Leistungsmerkmale	– Erteilung von Betriebserlaubnissen von Fahrzeugen und Teilen (ABE, BE) – Periodische Untersuchungen hinsichtlich Verkehrssicherheit, Umweltverträglichkeit – Prüfung und Feststellung von Schäden nach Unfällen, Reparaturempfehlungen – Prüfung ordnungsgemäßer Reparatur – Prüfung von Schadensgutachten, z. B. Entwendung, Brand, gestellte Verkehrsunfälle – Wertfeststellungen	– Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen und Prüfung, warum es zu einem Versagen in Form eines Unfalls kam – Unterscheidung in menschliches oder fahrzeugtechnisches Versagen, Fehler im Straßenbau oder bei verkehrsregelnden Anlagen, umweltbedingtes Versagen

2.1 Sachverständige bei Gericht (Europa)

Der forensisch tätige Sachverständige darf sich nicht darauf beschränken, in seinem Fachgebiet ein hervorragender Fachmann zu sein. Er muss auch möglichst gut in den angrenzenden Fachgebieten Bescheid wissen, insbesondere aber sollte er sich mit Gesetzen, Verordnungen und den juristischen Regularien auskennen, jedenfalls soweit es sein eigenes Gebiet angeht. Auf ausführliche Darstellungen in [2] wird verwiesen.

2.1.1 Strafprozess

Im Strafprozess ist der Grundsatz „in dubio pro reo“ (Im Zweifel für den Angeklagten) zu beachten. Es ist für einen Sachverständigen immer wieder schwierig, diesen Grundsatz richtig und in angemessener Weise zu beachten. Bedeutsam ist unter anderem, dass der Sachverständige in Abstimmung mit seinem Auftraggeber eigene Ermittlungen anstellen kann (z. B. Fahrzeuge, Unfallstellen besichtigen).

Bei der Wahl von Prämissen sind die für den Beschuldigten günstigsten zu wählen und es soll auch darauf hingewiesen werden.

2.1.2 Zivilprozess

Hier gilt die so genannte Parteienmaxime: nicht der Richter, sondern die Parteien bestimmen Fortgang und Umfang des Verfahrens. Der Sachverständige ist an den vorgegebenen Arbeitsumfang (Beweisbeschluss) gebunden. Besichtigungen sollen nur in Abstimmung mit allen Verfahrensbeteiligten erfolgen.

Bei der Wahl von Prämissen ist die mögliche Bandbreite darzustellen. Die Unfallschilderungen der Klägerpartei und der Beklagtenpartei müssen jeweils für sich daraufhin untersucht werden, ob sie mit den vorhandenen objektiven Merkmalen (Unfallörtlichkeit, Spuren, Schäden etc.) zusammen passen und ob sie in sich plausibel sind.

2.2 Arten von Gutachten

2.2.1 Mündliche Gutachten

Im Strafprozess darf nur das berücksichtigt werden, was in der Hauptverhandlung vorgebracht und erörtert wird. Das ist vom Sachverständigen besonders zu beachten. Er muss darum besorgt sein, dass alle Grundlagen, die er braucht, während der Hauptverhandlung „eingeführt" werden.

Sein Gutachten muss der Sachverständige so erstatten, dass es für die am Prozess beteiligten Personen transparent und nachvollziehbar wird. Zu bedenken ist, dass der Angeklagte (Betroffene, Beschuldigte), um den es ja geht, auch verstehen soll, was von dem Sachverständigen ausgeführt wird. Bei dem Gutachten ist auf den Kenntnisstand der Anwesenden Rücksicht zu nehmen. Es ist wenig wünschenswert, sich hinter Fachausdrücken oder hinter Computerprogrammen zu verstecken.

Im Zivilprozess kommen mündliche Gutachten in manchen Ländern seltener vor. Gründe dafür sind, dass bereits die Auseinandersetzung mit den schriftsätzlich vorgetragenen Argumenten der Parteien viel Zeit und sehr große Sorgfalt des Sachverständigen erfordert. Wenn damit in Einzelfällen nicht alle relevanten Fragen beantwortet werden konnten, kann eine mündliche Erläuterung von den Parteien beantragt werden. Dieses mündliche Ergänzungsgutachten ist meist eine Beantwortung von Zusatzfragen.

2.2.2 Schriftliche Gutachten

Bei der Vergabe von Gutachtenaufträgen kommt über das Auftragsschreiben und die Annahme des Auftrags durch den Sachverständigen ein Werkvertrag zustande. Einzelheiten zu der Auftragserfüllung und Haftung folgen aus den jeweils geltenden Gesetzen. Grundsätzlich sind die gestellten Fragen zu beantworten, nicht mehr und nicht weniger. Die Praxis sieht jedoch in vielen Fällen etwas anders aus. Der Auftragsumfang wird teilweise pauschal beschrieben, man verlässt sich darauf, dass der Sachverständige genug Rechtskenntnis hat, um das Richtige zu machen. Falls man als Sachverständiger unsicher ist, empfiehlt es sich, den Auftraggeber genauer über den Auftragsumfang zu befragen.

Im Bereich des öffentlichen Interesses, also im OWi-Verfahren oder im Strafprozess, ist es primär von Bedeutung, was einem Betroffenen oder Angeklagten nachgewiesen werden kann. Somit wird es oft als ausreichend angesehen, nur den Aspekten nachzugehen, die zugunsten des Angeklagten sprechen. Sollte es ohne großen zusätzlichen Aufwand möglich sein, auch die Situation zuungunsten des Betroffenen oder Angeklagten zu beleuchten, dann sollte dies getan werden. Man kann sich dadurch allerdings den Vorwurf einhandeln, das Gutachten unnötigerweise verteuert zu haben, andererseits erspart das vielleicht sich anschließende Zivilprozesse.

Im Zivilprozess sind grundsätzlich die gesamten Spannweiten der Ergebnisse darzulegen. Auf die einzelnen Argumente der Parteien ist detailliert einzugehen. Wird im vorprozessualen Stadium ein Gutachten für eine Partei erstattet, dann ist es wichtig, darauf zu achten, vollständige Informationen zu erhalten und die Informationsquellen, die zur Verfügung standen im Gutach-

ten aufzuführen. Es ist manchmal festzustellen, dass die beauftragende Partei verständlicherweise versucht, dem Sachverständigen nur ihre subjektiv gefärbte Version eines Vorgangs darzustellen. In den meisten Fällen ist aber auch die Partei an einem fundierten Gutachten als verlässliche Arbeitsgrundlage interessiert.

Nachstehend werden zwei häufig anzutreffende Möglichkeiten des Aufbaus von schriftlichen Gutachten beispielhaft angegeben:

Tabelle A1.4 Möglichkeiten des Aufbaus schriftlicher Gutachten

Schriftliches Gutachten	
Auf der ersten Seite empfiehlt sich die Angabe des Gutachtenergebnisses in Kurzform.	
Variante 1	**Variante 2**
Inhaltsverzeichnis 1. Auftrag 2. Unfallort und -hergang 3. Parteivorträge und sonstige Informationen (nur im Zivilprozess) 4. Sachverständige Feststellungen und Ausführungen 5. Zusammenfassung 6. Schlusswort	1. Auftragscharakteristik 2. Material 3. Falldarstellung 4. Ausarbeitung 5. Beantwortung der Beweisfragen

2.3 Detaillierte Hinweise und Grundlagen

2.3.1 Auftragsannahme

Tabelle A1.5 Auftragsannahme

Ziele	**Erläuterungen**
Nach Entgegennahme des Gutachtenauftrages sofort die Vollständigkeit der Unterlagen zu dem Auftrag erkennen. Abschätzen, wann eine Vorabinformation an den Auftraggeber zu leiten ist.	Fehlende Unterlagen, wie Aktenteile, Fotos, Schadengutachten usw. anfordern. Auftraggeber, Kfz-Kennzeichen, Beteiligte, Besichtigungsort, Unfallschilderung. Falls erforderlich Termine für erforderliche Besichtigungen ankündigen. Auftragsweitergabe, Besichtigungsobjekt nicht auffindbar, Besichtigung wird verweigert, Erweiterung des Auftragsumfangs usw.
Bei vollständig vorliegendem Auftrag entscheiden, ob gegebenenfalls die Mitarbeit eines spezialisierten Kollegen erforderlich ist.	Übergreifen auf Spezialgebiete wie z. B. Sondergutachten, lichttechnisches Gutachten, Tachoscheibenauswertungen.
Abschätzen, in welchen Fällen eine zusätzliche Auftragsbestätigung erforderlich wird.	z. B. erheblicher Gutachtenumfang, Sonderuntersuchungen, hohe, nicht abschätzbare Fremdkosten

Begründen, warum die Anmeldung in der Werkstatt (beim Kunden) erforderlich ist. Die Zuständigkeiten im Werkstattbereich in Erfahrung bringen. Anknüpfungsgespräche führen.	Unbefugtes Betreten, Verärgerung usw. Betriebshierarchie beachten. Schaffung einer Vertrauensbasis, Höflichkeit, Äußeres, Auftreten usw.
In Abhängigkeit vom Besichtigungsort entscheiden, inwieweit eine Besichtigungsmöglichkeit gegeben ist. Entscheiden, inwieweit von Werkstatteinrichtungen selbst Gebrauch zu machen ist.	Bei erheblichem Schaden Grube bzw. Hebebühne notwendig. Kein unerlaubter Gebrauch von Werkstatteinrichtungen, Unfallgefahr, Gefahr von Bedienungsfehlern sowie Beschädigungen von Werkstatteinrichtungen bzw. des Fahrzeugs usw.
Entscheiden. wann eine Fahrzeugbesichtigung alleine durchgeführt werden kann, bzw. wann die Hilfe von Spezialisten benötigt wird. Mögliche auftraggebende Institutionen bzw. Personen angeben.	z. B. Spezialgutachten über Haar, Schloss, Lampen, Lack, Reifen mit Hilfe anderer Spezialisten. Versicherungen, Rechtsanwälte, Privatpersonen, Werkstätten, Ermittlungsbehörden, Gerichte.

2.3.2 Grundlagen zur Gutachtenerstellung

Tabelle A1.6 Gutachtenerstellung

Vorgang	Erläuterungen
Akteneinsicht:	
Den Akten alle für die Bearbeitung wichtigen Informationen entnehmen.	Unterscheidung zwischen relevanten und irrelevanten Informationen.
Den Akten die, der juristischen Bedeutung des Falles zugehörige mögliche Fragestellung entnehmen.	z. B.: Fragen zur eingehaltenen Geschwindigkeit, Kollisionsposition, Fahrzeugbewegung vor der Kollision und Vermeidbarkeitsbetrachtungen.
Den, der juristischen Bedeutung des Falles angemessenen Aufwand abschätzen und festlegen.	z. B.: geringerer Arbeitsaufwand bei einfachen Ordnungswidrigkeiten als bei Unfällen mit Schwerverletzten bzw. Getöteten.
Überprüfen und Vervollständigen der Anknüpfungstatsachen:	
Gegebenenfalls durch Augenscheinnahme am Unfallort, in den Akten nicht enthaltene Anknüpfmöglichkeiten feststellen und dokumentieren.	Überprüfen und gegebenenfalls Richtigstellen bzw. Vervollständigen bereits festgestellter Spuren, Fahrbahnverläufe usw.
Den Unfallablauf anschaulich darlegen. Dabei aber beachten, dass Gutachtenergebnisse nicht schon in die Darstellung des Unfallablaufs einfließen.	Prüfung auf Widerspruch, Verwertung von Randinformationen usw.
Aufnahme/Überprüfung der technischen Daten:	
Das Fahrzeug mittels Fahrzeugpapieren identifizieren. Notwendige Daten zur Identifizierung des Fahrzeugs beschaffen.	Übereinstimmung von Positionen auf Kraftfahrzeugpapieren und Fahrzeug (Typenschild, VIN, Motornummer, KBA-Schlüssel, Sonderausstattung, Zusatzausstattung).
Fahrzeugart und -typ genau beschreiben, am besten ein Formblatt verwenden.	z. B. aus Werkstattunterlagen, Kundendienstcheckheft, Schadenkalkulationssystem, Abfrage beim Hersteller usw.
Zustand von Reifen, Aggregaten, Lackierung und Ausstattung beschreiben.	Den Zustand und die Vorschriftsmäßigkeit von Rädern, Reifen und Felgen beurteilen, einschließlich Ersatzrad.

Laufleistung festhalten, auch Tageskilometerzähler oder Uhrzeit, wenn die Batterie infolge Unfall ausgefallen ist.	
Fehlerspeicher auslesen.	
Bauartveränderungen gegebenenfalls festhalten.	Art und Umfang von Fahrzeugveränderungen feststellen und beurteilen. Rechtmäßigkeit von Bauartveränderungen feststellen. Bedeutung der Erstzulassung/Baujahr erklären.
Fahrzeugabmessungen, insbesondere bei solchen Fahrzeugen feststellen, die nicht in großen Stückzahlen gebaut wurden /werden.	Nutzfahrzeuge sind oft nicht so einfach im Nachhinein bezügl. ihrer Abmessungen (z. B. Radstand, Kupplungspunkt, Breite usw.) zu beurteilen. Deshalb ist es besser, diese Maße bei einer Besichtigung zu ermitteln.

Tabelle A1.7 Gutachtenaufbau und -inhalte

Abschnitt	Erläuterungen
Allgemein	
Die wesentlichen Gründe für die Gutachtenerstellung erläutern.	z. B. Gutachten zur Unfallanalyse mit Vermeidbarkeitsbetrachtung für rechtliche Entscheidungen.
Erkennen, ob Unfallschilderung und Schäden zusammenpassen.	Plausibilitätsbetrachtung, Unfallschilderung, Schäden.
Vorhandene Unterlagen nutzen und eventuell fehlende beschaffen. Sprachlicher Ausdruck, logische Argumentation. Berücksichtigung von Normen, z. B. 75204. Angabe der verwendeten Grundlagen: Literatur, PC-Programme, Versuchsergebnisse usw.	Sachliche Richtigkeit, Objektivität, Verständlichkeit für den Gutachtenempfänger, das sind in erster Linie die Betroffenen, Angeklagten oder Parteien, in zweiter Linie die Juristen. Keine Behauptung ohne Begründung. Ausführlichkeit, Vollständigkeit, Bearbeitungsdauer usw.
Art und Umfang	
Die unterschiedlichen Gutachtenanforderungen für verschiedene Auftraggeber (Gericht, Privataufträge) richtig erkennen.	Unterschiedliche Aufgabenstellung im Zivilrecht/Strafrecht.
Sondergutachtenmöglichkeiten erläutern.	Haar-, Schloss-, Lampen-, Lackgutachten, Bruchuntersuchungen, weitere Spezialuntersuchungen, Tachoscheiben, UDS-Auswertung.
Gutachtenaufbau	
Informationen und Daten, die im Vorwort enthalten sein müssen.	Auftrag wann, wie, durch wen erteilt, welcher Auftrag (Gebührensicherung).
Auftrag/Vorwort richtig formulieren.	Formulieren/Wiedergabe des Gutachtenauftrags, Angabe der zum Gutachtenverständnis erforderlichen Fakten oder Vorbemerkungen. Eindeutigkeit, Umfangspräzisierung, Vollständigkeit, Verständlichkeit usw. Angabe von Besichtigungsterminen, wann, wo, wer war anwesend, wer wurde wie geladen.

Begründen, in welchem Umfang technische Daten anzuführen sind.	Daten, die zur Identifikation des Fahrzeugs notwendig sind, Daten, die für den speziellen Auftrag erforderlich sind.
Fehlende notwendige technische Daten beschaffen.	Rücksprache mit Auftraggeber bzw. Fahrzeughalter, Zulassungsstelle, technische Unterlagen vom Fahrzeughersteller.
Vorgangsbeschreibung neutral und sachlich vornehmen.	z. B. Aussagen von Beteiligten und Zeugen als Aussagen und nicht als Fakten aufnehmen und so auch kenntlich machen.
Gutachtenformulierung so wählen, dass größtmögliche Aussagesicherheit bei minimaler Angreifbarkeit erreicht wird.	Beschreibung des sicher Nachvollziehbaren bzw. Ausschließbaren, z. B. Vermeiden von Aussagen, die nicht sicher belegt sind.

2.4 Nachvollziehbarkeit

Gutachten sollen nachvollziehbar sein. Diese Anforderung richtet sich darauf, dass ein anderer Sachverständiger genauso wie ein Nichtfachmann nachvollziehen können soll, wie es zu bestimmten Ergebnissen in einem Gutachten gekommen ist. In der einschlägigen Literatur gibt es dazu verschiedene allgemeine Hinweise, die im Wesentlichen darauf hinauslaufen, dass Fachwissen allgemein verständlich vermittelt werden soll. Das ist ein ideales Einsatzgebiet für die Animation. Ein bestimmter Ablauf kann damit hervorragend allgemein verständlich dargestellt werden.

Dabei muss aber stets bedacht werden, dass nicht nur einem Laien verdeutlicht werden soll, was man als Gutachter als richtig erachtet, sondern auch und insbesondere ein anderer Sachverständiger muss das erarbeitete Ergebnis nachvollziehen und nachprüfen können. Das erfordert umfangreiche technische Dokumentationen von Eingabedaten und Ergebnissen. Es sollte sogar gefordert werden, dass solchen Gutachten, bei denen Simulation und Animation angewandt worden sind, die Berechnungsdateien und Videos auf einem elektronischen Datenträger beigefügt sein müssen.

Eine angemessene Verfahrensweise beim Einsatz von Simulationsprogrammen ist folgende:

- Auflistung der vorliegenden objektiven Anhaltspunkte wie Endstellungen/Endlagen von Unfallbeteiligten und Gegenständen, Spuren auf der Fahrbahn, an Gegenständen und Fahrzeugen, Schäden.
- Zusammenstellung der Ergebnisse, die mit Sicherheit aus den objektiven Anhaltspunkten gewonnen werden können. Dies sind beispielsweise die relative und die fahrbahnbezogene Kollisionsposition, die Einstufung von Schäden durch EES-Werte, die Ermittlung von Strecken, die vor oder nach einem Unfallereignis zurückgelegt wurden usw.
- Auflistung von Zusatzinformationen, die nicht durch objektive Anhaltspunkte belegbar sind: Beispiele dafür sind: Ein Fahrzeuglenker behauptet, er habe vor der Kollision noch einen Ausweichversuch gemacht; oder er habe an der Haltelinie angehalten, bevor er losfuhr und es zum Unfall kam. Besonders wichtig ist auch die Angabe der Verzögerung oder des Lenkverhaltens während des Auslaufvorgangs.
- Entwicklung einer ersten Hypothese über einen wahrscheinlichen Unfallablauf.
- Verifikation mittels Simulationsprogramm.

- Gegebenenfalls Entwicklung einer neuen Hypothese mit erneuter Prüfung.
- Verfeinerung einer schließlich gefundenen Lösung unter Verwendung von Kontrollwerten oder Schranken innerhalb derer die signifikanten physikalischen Größen liegen müssen. Angabe von Toleranzen.

Aus einem Gutachten sollte die Vorgehensweise bei der Bearbeitung erkennbar werden. Die Anknüpfungspunkte und die verwendeten Analysemethoden sollten ausführlich dargestellt werden. Nur so ist ein Gutachten nachvollziehbar und überprüfbar.

3 Naturwissenschaftliche Grundlagen

Charles Percy Snow war ein englischer Wissenschaftler und Schriftsteller. Snow studierte Physik in Leiceister und Cambridge. Er war Inhaber von mehr als 20 Ehrendoktorwürden. Berühmt wurde Snow durch seine 1959 in der Rede-Lecture aufgestellte These von den Zwei Kulturen. In dieser These wird die große Kluft zwischen den Kulturen der Geisteswissenschaft und Literatur einerseits und der Naturwissenschaft und Technik andererseits beschrieben. Er merkte an, dass die Qualität der Bildung weltweit im Niedergang sei. Der Zusammenbruch der Kommunikation zwischen den zwei Kulturen sei eines der Haupthindernisse, die Probleme der Welt zu lösen. Die literarisch Gebildeten, so Snow, und diejenigen, die sich in den Naturwissenschaften auskennen, sind einander fremd und überbieten einander in Halbbildung. Die einen können nicht sagen, worum es im Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik geht, oder was „Beschleunigung“ ist. Die anderen zucken bei Dickens mit den Schultern, können sich nicht vorstellen, warum man Shakespeare lesen sollte, oder wissen nicht, was es mit der Sonate auf sich hat. Worum es ihm eigentlich ging, das waren die Eliten seiner Zeit und die Sorge über ihre wechselseitige Ignoranz.

Heute muss man sich immer noch fragen: Worin kennen sich die gegenwärtigen Eliten aus, womit sind sie vertraut, was ist für sie ein Argument, was haben sie gelesen? Oder noch anspruchsloser gefragt: Spielt das, was sie gegebenenfalls gelesen und studiert haben, eine Rolle für ihr Handeln? Die Sachverständigen gehören zwar der Wissenschaftskultur an, es gibt aber eine sehr intensive Schnittstelle zu mindestens einer Geisteswissenschaft.

Bei der Begutachtung von Unfallabläufen verwenden die Sachverständigen Naturgesetze für Berechnungen. Sie müssen aber auch Hypothesen aufstellen und verifizieren oder falsifizieren. Manchmal sind auch Spekulationen erforderlich, oder es wird auf Erfahrungssätze reflektiert. Was genau getan wird, sollte der Wahrhaftigkeit von Gutachten zu Liebe genau ausgedrückt werden. Dazu muss man sich aber erst einmal über die oben erwähnten Begriffe klar werden.

Die Naturwissenschaften haben sich die Aufgabe gestellt, die uns umgebende Welt zu beobachten und ihre Gesetzmäßigkeiten herauszufinden. Experimentieren und Beobachten (z. B. durch Messen und Wiegen) sind darum die grundlegenden Arbeitsprinzipien. Das Beobachtungsmaterial wird systematisch geordnet und die daraus gewonnenen Prinzipien in Form möglichst allgemeiner Sätze ausgesprochen. Was die Naturwissenschaft auf ihrem Gebiet aussagen kann, ist in Formen unterschiedlichen Vertrauens formulierbar. Die Gewissheit oder auch Ungewissheit der Erkenntnisse drückt sich in den folgenden Kategorien unterschiedlich aus:

3.1 Naturgesetz

Lässt sich die allgemeine Gültigkeit von formulierten Gesetzmäßigkeiten in reproduzierbarer Weise immer wieder bestätigen, so spricht man von einem Naturgesetz. Durch Naturgesetze können wesentliche Strukturen und Phänomene der Wirklichkeit in Form allgemein gültiger Prinzipien beschrieben werden. Sie lassen sich für materielle (z. B. Fragestellungen der Physik und Chemie) und nicht-materielle Vorgänge formulieren (z. B. Fragestellungen der Informationsverarbeitung). Naturgesetze genießen hinsichtlich ihrer Aussagekraft in der Wissenschaft den höchsten Vertrauensgrad. Abstufungen mit geringerem Vertrauensgrad sind Theorie, Modell, Hypothese, Paradigma, Spekulation, Fiktion.

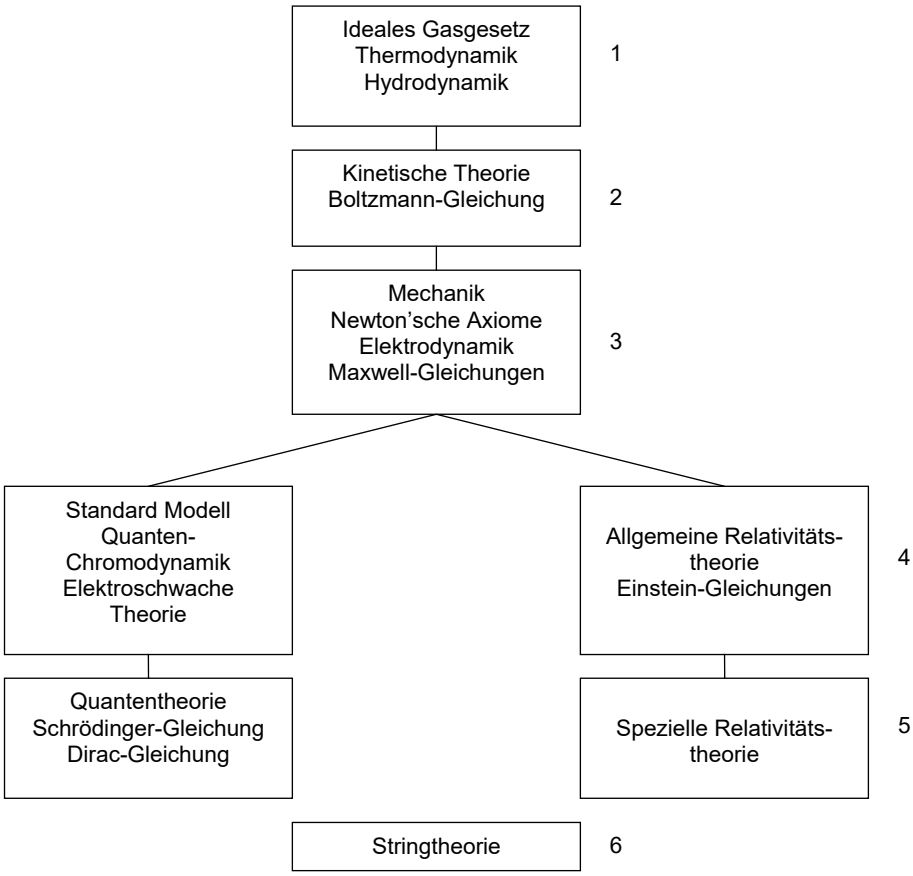


Bild A1-1 Naturgesetze

Den unzweifelhaften Rang der Naturgesetze haben nur die in den ersten vier Kästen in **Bild A1-1** aufgeführten Gesetze, wobei inzwischen auch die Einstein-Gleichungen als Naturgesetze angesehen werden, obwohl immer noch das Wort Theorie dabeisteht. Für die Sachverständigen sind im Allgemeinen nur die Newton-Gleichungen, und davon die ersten drei, von Interesse.

Die vier Newton'schen Axiome lauten:

$$p = m \cdot v \tag{A1-1}$$

$$F = m \cdot a \tag{A1-2}$$

$$F_{1\to 2} = -F_{2\to 1} \tag{A1-3}$$

$$F_G = G_N \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \tag{A1-4}$$

Newtons Gravitationskonstante	$G = 6{,}67 \cdot 10\ \mathrm{m/kgs}$
Boltzmann-Konstante (Umrechnung Temperatur und thermische Energie)	$k = 1{,}381 \cdot 10\ \mathrm{J/K}$
Avogadro-Konstante (Zahl der Teilchen in einem mol)	$N = 6{,}022 \cdot 10 \cdot 1/\mathrm{mol}$
Lichtgeschwindigkeit	$c = 299\,792\,458\ \mathrm{m/s}$

3.2 Theorie (griech. theoria = anschauen, Betrachtung, Untersuchung)

Hier sind zwei Unterscheidungen vorzunehmen:

a) Theorien allgemein: Die Theorie ist in der Naturwissenschaft eine Folgerung aus beobachteten Tatsachen. Mit ihrer Hilfe wird dann versucht, auch andere beobachtete Phänomene zu erklären, die zu dem gleichen Problemkreis gehören. Befinden sich Erklärungen noch im Stadium der Vermutung, so handelt es sich um eine Hypothese, die zu testen ist. Sie kann sich umso besser bewähren, je gründlicher sie nachgeprüft wird. Dazu müssen Experimente oder Vorgänge beschrieben werden, die geeignet sein könnten, die Theorie zu Fall zu bringen (Falsifizierbarkeit). Kann die Theorie nach allen Versuchen nicht zu Fall gebracht werden, dann kann sie zum Naturgesetz werden.

b) Theorien, die zu Naturgesetzen wurden: Bei manchen Naturgesetzen war es zum Zeitpunkt ihrer Aufstellung noch nicht sicher, ob es sich wirklich um ein Naturgesetz handelt. So stellte z. B. *Einstein* 1905 seine Gedanken zur Relativität von Raum und Zeit zunächst als Theorie auf, weil es noch keine Möglichkeit des messtechnischen Nachweises gab. Erst 1919 konnte beispielsweise das quantitativ vorausgesagte Phänomen der Periheldrehung beim Planeten Merkur durch Messung nachgeprüft werden. Heute ist die Relativitätstheorie so gut bestätigt, dass von einem Naturgesetz gesprochen werden kann. Der Name „Relativitätstheorie" blieb aber erhalten.

3.3 Modell

Modelle sind ein eingeschränktes Abbild der Realität, bei dem die für wesentlich erachteten Eigenschaften nachgebildet werden; als nebensächlich angesehene oder nicht erkannte Aspekte bleiben unberücksichtigt. Modelle sind zweckbestimmte Abbilder der Wirklichkeit, das reale Untersuchungsobjekt wird vereinfacht und damit besser überschaubar und begreifbar. Somit kann es für ein und denselben Sachverhalt verschiedene Modelle geben, die wegen des vereinfachenden und vorläufigen Charakters prinzipiell verbesserbar sind.

3.4 Hypothese (griech. hypóthesis = Annahme, Vermutung, Unterstellung)

Die Hypothese ist eine wissenschaftlich noch unbestätigte Annahme mit spekulativer Komponente, die eine lückenhafte empirische Erkenntnis ergänzt oder als Vermutung die vorläufige Erklärung einer Tatsache darstellt. Eine neue Hypothese soll auf Tatsachen beruhen und darf nicht den bekannten Naturgesetzen widersprechen. Dient die Hypothese in der Startphase einer Untersuchung als methodischer Leitfaden, so spricht man von einer Arbeitshypothese. Eine Hypothese erhält einen zunehmenden Wahrscheinlichkeitsgrad durch Erfahrungstatsachen, die ihr entsprechen; eine ihr entgegenstehende Tatsache genügt jedoch, um sie zu verwerfen (Falsifikation). Blaise Pascal (1623–1662): „Von der Falschheit einer Hypothese sind wir hinreichend überzeugt, wenn sich ein einziger Sachverhalt aus ihr ergibt, der einem der Phänomene eindeutig widerspricht."

3.5 Paradigma (griech. parádeigma = Beispiel, Muster)

Prägt ein theoretisches Muster (Theorie, Hypothesensystem, weltanschaulicher Ansatz) ganze Forschungsrichtungen oder eine Ära der Wissenschaft, so spricht man von einem Paradigma. Solche Lehrmuster stecken als übergeordnete Leitidee den Rahmen ab, innerhalb dessen sich Einzelforschung bewegt und unter deren Voraussetzungen Einzelphänomene zu deuten sind. Die aus ihren weltanschaulichen Voraussetzungen abgeleiteten Hypothesensysteme sind nicht mit dem Faktenmaterial harmonisierbar. (Beispiel: Evolutionsparadigma).

3.6 Spekulation

Die Spekulation ist eine Aussage, die aus Überlegung, Meditation, Erfindung und Fantasie hervorgegangen ist und mit der Wirklichkeit keine Übereinstimmung zu haben braucht. Sie ist also ein bloßes Gedankenspiel. Hier können leicht Fehler gemacht werden, die mangels einer Prüfung durch ein wirkliches Experiment unbemerkt bleiben. Im Gedankenexperiment können Schwierigkeiten leicht umgangen, unerwünschte Punkte verschwiegen und Widersprüche geschickt verborgen werden. Ein Gedankenexperiment kann vielleicht eine Frage aufwerfen, aber es kann sie nicht beantworten. Das kann nur das wirkliche Experiment. Bloße Spekulation ohne Experiment und Beobachtung, bloße Deduktion aus willkürlichen Voraussetzungen oder einseitige Auswahl von Beobachtungen ist nicht Naturwissenschaft. Auch die abstrakteste Theorie darf die Beziehung zur Realität und zum Experiment nicht verlieren; sie muss experimentell verifizierbar sein. Gedankenexperimente sind nur Spekulation, ebenso Ableitungen aus philosophischen Postulaten, die nicht in der Erfahrung wurzeln.

3.7 Verifikation (lat. verificare, veritas = Wahrheit und facere = machen)

Als Verifikation bezeichnet man die expermentelle Überprüfung einer Aussage. Das Ergebnis solcher Verifikation ist jedoch nicht allgemeingültig, sondern es ist streng genommen nur für die durch Kontrolle bestätigten Fälle nachgewiesen. Es ist nicht auszuschließen, dass es bisher noch nicht bekannte Gegenbeispiele gibt. Wird ein solches gefunden, dann wäre die Aussage zu Fall gebracht.

3.8 Fiktion (lat. fictio = Gestaltung, Erdichtung)

Eine Fiktion ist die absichtliche oder unabsichtliche Erfindung eines nicht der Wirklichkeit entsprechenden Sachverhaltes. In den Naturwissenschaften versteht man hierunter die absichtliche Einführung einer falschen Annahme zur methodischen Erklärung eines Problems.

3.9 Induktionsschluss (lat. inductio = das Hineinführen)

Auch: induktiver Schluss (Beweisführung durch Anführen ähnlicher Beispiele oder Fälle) bezeichnet die wichtigste Form der reduktiven Schlussweise, mit deren Hilfe Aussagen bzw. Aussagengefüge (d. h. Theorien) gewonnen werden können.

Die wichtigsten Formen des echten Induktionsschlusses sind:

- Die induktive Verallgemeinerung: Es wird von einer Teilklasse auf die Gesamtklasse geschlossen. Die Prämissen dieses Schlusses bestehen darin, dass einerseits eine bestimmte Klasse in einer anderen enthalten ist und andererseits alle Elemente der ersten Klasse eine bestimmte Eigenschaft besitzen. Es wird geschlossen, dass auch alle Elemente der zweiten Klasse diese Eigenschaft besitzen. Beispiel: Jemand beobachtet sehr viele Schwäne an einem Fluss und diese sind alle weiß. Induktive Schlussfolgerung: Alle Schwäne sind weiß. Hier ist die präzise Beschreibung der Beobachtung wichtig: Wie viele weiße Schwäne waren an dem Fluss beobachtet worden?
- Der induktive Teilschluss: Ein wichtiger Fall des Induktionsschlusses besteht darin, dass von einem Teil einer Klasse auf einen anderen Teil dieser Klasse geschlossen wird.
- Der Induktionsschluss als *statistisches* Gesetz: Diese Form des Induktionsschlusses liegt dann vor, wenn sich als Resultat der Induktion ein statistisches Gesetz ergibt. Es wird hier von der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Eigenschaft bei den Elementen einer Teilklasse auf die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Eigenschaft bei den Elementen der Gesamtklasse geschlossen.

4 Aussagesicherheit

Manchmal hört man von Sachverständigen, sie würden sich der Wahrheit verpflichtet sehen oder sie möchten die Wahrheit herausfinden. Wahrheit ist aber nichts, was man in der Naturwissenschaft finden kann. Wahrheit ist ein philosophischer Begriff, wie einschlägige Formulierungen recht gut zeigen (Russel, James, …):

1. Absolute Wahrheit ist absolutes Wissen über die Wirklichkeit insgesamt, d. h. über die ganze Welt.
2. Absolute Wahrheit ist jener Teil der relativen Wahrheiten, die erhalten bleiben und im Prozess der Erkenntnisentwicklung anwächst.
3. Absolutes Wissen ist endgültiges Wissen über einige bestimmte Aspekte der Wirklichkeit.
4. Die absolute Wahrheit umfasst gewisse unwiderlegbare Resultate der Erkenntnis über einzelne Seiten untersuchter Objekte oder Klassen von Objekten in Form von Konstatierungen und Beschreibungen.

Russell stellt drei Forderungen auf, denen seiner Meinung nach jede Theorie der Wahrheit genügen muss:

1. Es muss Falschheit geben können.
2. Wahrheit und Falschheit sind Eigenschaften von Glaubensüberzeugungen oder Aussagen.
3. Die Wahrheit oder Falschheit hängt immer von etwas ab, das jenseits des Glaubens liegt.

In den Naturwissenschaften gibt es dagegen nur Wahrscheinlichkeiten, die zwischen 0 (beliebig unwahrscheinlich, aber nicht ausgeschlossen) und 1 (beliebig wahrscheinlich, aber nicht gewiss) liegen können. (In der Philosophie wird der Wahrscheinlichkeitsbegriff allerdings auch verwendet, wenn auch mit ganz anderer Bedeutung.)

Eine wichtige Frage ist die: Wie bestimmt ein Sachverständiger die Wahrscheinlichkeit eines von ihm erzielten Ergebnisses? Was kann er auf die Frage eines Juristen sagen, der ihn fragt, wie wahrscheinlich ein bestimmtes Ergebnis sei, insbesondere, wenn man in dem Gutachten lesen kann, es sei sehr wahrscheinlich, dass sich der Unfall in einer bestimmten Art und Weise ereignet habe? Eine überzeugende Antwort darauf gibt es bisher nicht, denn die Wahrscheinlichkeitsaussage ist eine statistische Zahl. Bevor man eine Statistik erstellen kann, sollte man mindestens 50 Fälle haben, die miteinander vergleichbare Eigenschaften aufweisen. Dann kann eine Verteilungsfunktion (z. B. Gauss oder Weibull) erstellt werden. Diese liefert dann für einen singulären Wert eine mathematisch definierbare Wahrscheinlichkeit, beispielsweise kann das eine Prozentzahl sein.

Für die Juristen ist diese technisch definierte Wahrscheinlichkeit durchaus problematisch. In den Prozessen geht es um Behauptungen, die aus technischer Sicht zu prüfen sind. Auf die Frage: – Kann diese Behauptung zutreffen? – erwartet der Juristen die Antworten „Ja“, „Nein“ oder „Man kann es nicht sagen“. Wenn sich die Sachverständigen entsprechend ihrer Wissenschaftsrichtung korrekt verhalten, dann können sie weder „Nein“ noch „Ja“ sagen.

Ein anderes Problem ist noch anzusprechen. Es ist das der allgemeine Sprachgebrauch. Dieser hat weder etwas mit den Geisteswissenschaften noch mit den Naturwissenschaften zu tun. Der allgemeine Sprachgebrauch folgt teilweise momentanen Strömungen, neue Wörter werden erfunden, andere in ihrem Sinn vertauscht usw. Sogar gibt es in den verschiedenen Sprachen unterschiedliche viele Wörter, die unterschiedliche Abstufungen von „Wahrscheinlichkeiten“ erlauben. Einige Beispiele, die aus der Befragung von Schülern stammen, sind der folgenden **Tabelle A1.8** zu entnehmen:

Tabelle A1.8 Wörter zur „Wahrscheinlichkeit in %“ in den Alltagssprachen nach Böer (http://www.mued.de/html/lehrer/ue/stochastik/wwk.htm)

Englisch	Deutsch	%	Französisch	Deutsch	%
certain	gewiss	100	sûr	sicher	100
sure	sicher	100	certain	sicherlich	100
pretty sure	ziemlich sicher	95	probable	wahrscheinlich	70
probably	wahrscheinlich	70	bien possible	gut möglich	60
possibly	möglich	50	peut-être	kann sein	50
maybe	kann sein	50	possible	möglich	40
perhaps	vielleicht	35	éventuellement	möglicherweise	30

not possible	nicht möglich	10	jamais	nie	0
never	niemals	0			
not	nicht	0			
Spanisch	**Deutsch**	**%**	**Italienisch**	**Deutsch**	**%**
seguramente	sicher	100	sicuro	sicher	100
sin duda	ohne Zweifel	100	certo	sicher	100
probablemente	wahrscheinlich möglicherweise	50 bis 49	probabile	wahrscheinlich	60
a lo mejor			possibile	möglich	40
puede ser que			forse	vielleicht	20
tal vez	vielleicht	25	non	nicht	0
quizás		25			
acaso		20			
no, nunca	nicht, nie	0			
Türkisch	**Deutsch**	**%**	**Serbokroatisch**	**Deutsch**	**%**
yüzde yüz, ke sinlikle	ganz sicher	100	u svakom, slueaju	auf jeden Fall	100
			sigurno	sicher	100
büyük bir ihtimalle	sehr wahrschein-lich	90	naivierovantniie	sehr wahrscheinlich	95
her halürkrda	höchst wahrschein-lich	95	sa sigurno séu	mit Sicherheit	90
sanirim, bence	ich nehme an	25	vjeravatno	wahrscheinlich	60
herhalde	wahrscheinlich	50	moguce	wahrscheinlich	50
belki, tahminen galiba öyle	vielleicht	30	mozda	möglich	40
			maze biti	kann sein	25
olase, olabilir	könnte sein	25	moglo bi biti	könnte sein	25

Literatur

[1] Ein Bild des Sachverständigen in der Geschichte und Gegenwart, Sanner, Verlag Information Ambs
[2] Praxishandbuch Sachverständigenrecht, W. Bayerlein, Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München
[3] Fachliches Anforderungsprofil für Sachverständige für Verkehrsunfälle, ZfS, Heft 1/99
[4] Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion, Burg/Rau, Verlag Ambs, 1981
[5] Am Anfang war die Information, Werner Gitt, Hänssler Verlag
[6] Wikipedia
[7] Betrachtungen zum technischen Sachverständigenwesen, Lebrecht et al.VDI Verlag Berlin, 1974
[8] Charles Percy Snow (* 15. Oktober 1905 in Leicester (England); † 1. Juli 1980 in London), The two Cultures

Die Bedeutung der Unfallgutachten in der Strafuntersuchung

Dr. Juerg Boll

1 Aufgabe der Staatsanwaltschaft

Bei einem Verkehrsunfall haben die Strafverfolgungsbehörden zu untersuchen, ob einer der beteiligten Verkehrsteilnehmer eine Verkehrsregel verletzt hat und ob dies schuldhaft erfolgt ist. Eine Verurteilung wegen fahrlässiger Tötung oder fahrlässiger Körperverletzung setzt zudem voraus, dass der Tod oder die Körperverletzung bei Beachtung der Verkehrsregeln vermeidbar gewesen wäre.

2 Vorgehen der Strafuntersuchungsbehörden

2.1 Unfallhergang

In der ersten Phase wird der sogenannte objektive Sachverhalt abgeklärt. Bei einem Verkehrsunfall interessieren insbesondere die folgenden Punkte:

2.1.1 Bewegungsablauf der beteiligten Fahrzeuge und Fussgänger

- Fahrtrichtung
- In Anspruch genommene Fahrbahnfläche
  - Einer Frontalkollision können verschiedenartige Abläufe vorangegangen sein, z. B.:
    - Ein Fahrzeuglenker hat überholt.
    - Ein Fahrzeuglenker ist plötzlich auf die Gegenfahrbahn geraten (Herrschaft über das Fahrzeug verloren, Unaufmerksamkeit wegen Benützen Mobiltelefon).
    - Bei einer Frontalkollision mit geringer Überdeckung könnten beide Lenker zu stark links gefahren sein.
  - Bei einer Streifkollision stellte sich die Frage, ob einer der beteiligten Fahrzeuglenker die Sicherheits- oder Leitlinie überfahren hat oder beide Lenker an der Mittelinie geklebt sind.
  - Kollision beim Überholen eines Radfahrers:
    - Wenn sich die Position des Radfahrers beim Anprall zwar nicht nachweisen lässt, aber rekonstruiert werden kann, dass der Abstand des Motorfahrzeuglenkers zum rechten Straßenrand gering war, lässt dies unter Umständen die Schlussfolgerung zu, dass sein Abstand selbst dann zu gering gewesen wäre, selbst wenn der Radfahrer nahe am rechten Fahrbahnrand gefahren wäre.
    - Je grösser der Abstand des Motorfahrzeuglenkers vom rechten Fahrbahnrand war, umso glaubwürdiger ist grundsätzlich seine Behauptung, der Radfahrer habe plötzlich einen Schwenker nach links gemacht.

- Anprallstellen gegen feste Hindernisse, mit welchem Fahrzeugteil und in welchem Winkel zur Bewegungsrichtung des Fahrzeuges
- Kollisionen mit Fahrzeugen, herausgeschleuderten Insassen und Fussgängern: Eingrenzung der Kollisionsörtlichkeiten und Bestimmung der Konfigurationen beim Anprall

2.1.2 Geschwindigkeit

Die Einlauf- und die Kollisionsgeschwindigkeiten sind zentrale Fragen jeder Untersuchung von Verkehrsunfällen. Diese Daten sind die Basis für die Beurteilung der Schwere des Verschuldens und die Vermeidbarkeit des Unfalls bzw. der Schwere der Unfallfolgen.

2.1.3 Synchronisation der Bewegungsabläufe der beteiligten Fahrzeuge und Fussgänger

Bei der Kollision zwischen einem Fahrzeug und einem Fussgänger auf einem Fussgängerstreifen ist die zeitliche Rekonstruktion der parallel verlaufenden Bewegungsabläufe sehr wichtig, aber auch besonders schwierig, weil vom Fussgänger vor der Kollision keine Spuren vorhanden sind.

2.2 Unfallursache

In der zweiten Phase der Strafuntersuchung wird der subjektive Sachverhalt abgeklärt. Es geht um die Frage, ob den Fahrzeuglenker ein Verschulden am Unfall trifft und wie schwer dieses wiegt. Bei Fahrlässigkeit liegt dieses Verschulden in der Verletzung einer Sorgfaltspflicht. Im Vordergrund steht die Missachtung einer Verkehrsregel (z. B. Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit an sich, Fahrfehler, Unaufmerksamkeit, zu knapper Abstand, Überholen bei ungenügender Sichtweite). Bei einer technischen Unfallursache (z. B. einseitig ziehende Bremsen) kann die Sorgfaltswidrigkeit des Lenkers oder Fahrzeughalters in der Unterlassung der Fahrzeugwartung gemäss den Empfehlungen des Fahrzeugherstellers sein.

Nebst der oben bereits diskutierten Geschwindigkeit interessiert die Bedienung des Fahrzeuges durch den Lenker: Lenkmanöver, Betätigung von Gas-, Brems- und Kupplungspedal sowie Gangschaltung.

Bei der Kollision mit einem anderen Verkehrsteilnehmer liefern Details zu einem allfälligen Brems- oder Ausweichmanöver die Grundlagen für die Beurteilung, ob der Lenker auf die Gefahrensituation adäquat reagiert habe.

Beim Verlust der Herrschaft über das Fahrzeug beim Befahren einer Kurve nahe der Grenzgeschwindigkeit wird vom Sachverständigen erwartet, dass er

- die vom Lenker verursachte Gefahr für das Gericht verständlich macht durch
  - Gegenüberstellung von Kurvengrenzgeschwindigkeit und Geschwindigkeit bei Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug
  - Darlegung, dass die Haftung der Reifen nicht sowohl in Längs- und Querrichtung zur Verfügung steht (Kamm'scher Kreis)
  - Aufzeigen der Konsequenz, dass der Spielraum für Brems- und Ausweichmanöver sehr gering ist

- angibt, wie schnell der durchschnittliche Lenker eine Kurve mit dem fraglichen Radius befährt (Literaturangaben), damit das Gericht die für das Verschulden relevante Abweichung der Geschwindigkeit des Angeschuldigten vom Durchschnittslenker kennt.

2.3 Vermeidbarkeit Unfall (Kausalität)

2.3.1 Rechtslage

Die Tatbestände der fahrlässigen Tötung und der fahrlässigen Körperverletzung setzen weiter voraus, dass der Tod bzw. die Körperverletzung bei sorgfaltsgemässem Verhalten vermeidbar gewesen wäre. Bei Unfällen mit Personenschaden ist deshalb in einer dritten Phase hypothetisch zu untersuchen, ob der Körperschaden auch eingetreten wäre, wenn sich der Lenker korrekt verhalten hätte.

Mit der Einführung von Geschwindigkeitslimiten wollte der Gesetzgeber das Unfallrisiko senken, einerseits die Wahrscheinlichkeit, dass es überhaupt zu einer Kollision kommt, und andererseits, dass bei einer Kollision die Folgen geringer sind. Wenn ein Fahrzeuglenker sich an sich korrekt verhalten hat, aber zu schnell gefahren ist, stellt sich die Frage der Kausalität der Geschwindigkeitsüberschreitung. Es ist eine Hypothese aufzustellen, welches die Unfallfolgen bei Einhaltung der zulässigen Geschwindigkeit gewesen wären. Diese hypothetischen Folgen sind den tatsächlich eingetreten Folgen gegenüber zu stellen. Für die Differenz hat der Lenker als Folge seiner Geschwindigkeitsüberschreitung einzustehen. Wenn der Unfallsachverständige zum Schluss kommt, der Unfall wäre auch bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nicht vermeidbar gewesen, interessiert, inwiefern der Unfall mutmaßlich anders abgelaufen wäre (Kollisionsgeschwindigkeit, Änderung von Geschwindigkeit und Richtung des Fahrzeuges, in welchem sich der Getötete oder Verletzte befand).

2.3.2 Beispiele aus der Praxis

2.3.2.1 Unfall mit Todesfolge

Eine Personenwagenlenkerin wurde bei einem Stau auf der Autobahn zwischen zwei Lastwagen eingeklemmt und dabei tödlich verletzt. Wenn sie zuerst auf den vor ihr befindlichen Lastwagen aufgefahren wäre und sich dabei tödliche Verletzungen zugezogen hätte, hätte sich der nachfolgende Lastwagenlenker, welche nicht mehr rechtzeitig anzuhalten vermochte und auf den Personenwagen auffuhr, sich bloß der Verletzung einer Verkehrsregel schuldig gemacht. Wenn hingegen die Personwagenlenkerin ihr Auto noch hinter dem Lastwagen zum Stillstand gebracht hätte und ihre tödlichen Verletzungen auf den wuchtigen Aufprall durch den nachfolgenden Lastwagen zurückzuführen wären, hätte der Lastwagenlenker den Tatbestand der fahrlässigen Tötung erfüllt.

2.3.2.2 Unfall mit Körperverletzung

Nach der Rechtsprechung des Schweizerischen Bundesgerichts gilt jede Steigerung einer Körperverletzung als selbständige weitere Verletzung (Urteil 6S.107/2007 vom 11. Juni 2007, Erwägung 2.2.5). Im konkret zu beurteilenden Fall fuhr ein Personenwagenlenker gemäß Unfallgutachten mit einer Geschwindigkeit von 53 km/h durch eine Quartierstraße. Er kollidierte mit einem 8-jährigen Kind, welches die Straße – aus seiner Sicht – von rechts nach links überquerte. Er konnte dieses Kind nicht rechtzeitig erkennen, weil ihm die Sicht nach rechts einge-

schränkt war. Das Gericht entschied, dass in dieser Quartierstraße (Einfamilienhausquartier) eine Geschwindigkeit von höchstens 30 km/h den Umständen angemessen gewesen wäre.

Der Unfallsachverständige kam zum Schluss, dass bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 30 km/h anstatt 53 km/h die Kollisionsgeschwindigkeit 9,3 km/h anstatt 49 km/h betragen hätte. Der biomechanische Sachverständige führte in seinem Gutachten aus, dass bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von knapp 10 km/h anstatt 49 km/h die Verletzungen des Kindes „ganz klar geringer“ gewesen wären.

Gestützt auf diese beiden Gutachten wurde der Autolenker wegen fahrlässiger Körperverletzung schuldig gesprochen.

2.3.2.3 Unfall mit Sachschaden

Bei Unfällen mit Sachschäden werden von den Strafverfolgungsbehörden nur in Ausnahmefällen Gutachtensaufträge mit umfassender Fragestellung erteilt. Die Überschreitung der allgemeinen Höchstgeschwindigkeiten innerorts, ausserorts, auf Autostraßen oder Autobahnen, der signalisierten oder den Umständen angepassten Höchstgeschwindigkeiten ist an sich als Verletzung einer Verkehrsregel strafbar. Ob es in der Folge zu einem Unfall gekommen ist oder nicht, ändert – sofern keine Körperverletzung oder gar Todesfolge resultierte - nichts an der rechtlichen Qualifikation.

3 Bedeutung Unfallgutachten in der Strafuntersuchung

Die Erfahrung zeigt, dass Zeugenaussagen zum Unfallhergang mit einem erheblichen Unsicherheitsfaktor belastet sind. Ich habe schon erlebt, dass bei einem Unfall auf einer Hauptstraße (Verlust der Herrschaft über das Auto wegen übersetzter Geschwindigkeit und Kollision mit einer Mauer der Fahrbahnbegrenzung) ausserhalb des Bereichs von Einmündungen die Zeugen, welche behaupteten, den Unfallhergang beobachtet zu haben, sich nicht einig waren, aus welcher Richtung das Unfallauto gekommen war. Naturwissenschaftliche Gutachten basieren auf objektiven Fakten und sind ein sehr wichtiges Beweismittel bei der Wahrheitsfindung.

Bei Verkehrsunfällen kann bei einer guten Tatbestandesaufnahme ein Unfallsachverständiger aufgrund des Spurenbildes (Pneuabriebspuren bis zur Kollision [Einlauf], Kollisionsort und Kollisionskonfiguration, Deformationen an Fahrzeugen, Pneuabriebspuren nach der Kollision [Auslauf], Unfallendlage der beteiligten Fahrzeuge, Lage der Trümmer etc.) den Unfallablauf und die Geschwindigkeiten in engen Grenzen berechnen.

4 Erwartungen an ein Unfallgutachten

4.1 Formelle Anforderungen an ein Unfallgutachten

Wie bei jedem forensischen Gutachten hat der Sachverständige festzuhalten, auf welchen Akten sein Gutachten basiert.

Eine Simulation des Unfallherganges mit den bekannten Computerprogrammen zur Unfallrekonstruktion visualisiert den Unfallablauf für die Strafuntersuchungsbehörden und das Gericht in optimaler Form. Die Eingabedaten sind offen zu legen, damit die Berechnungsgrundlagen überprüfbar und die Simulation reproduzierbar ist. Dennoch genügen solche Animationen für

sich allein nicht für ein forensisches Gutachten. Die diesen Computerprogrammen zu Grunde liegenden mathematischen Modelle sind zumindest in den Details nicht offen gelegt. Die bei der Berechnung im Einzelfall bestehenden Fehlerquellen sind nur schwer abzuschätzen. Dieses zumindest subjektiv bestehende Unsicherheitsgefühl, ob ein anderer Unfallablauf, als der Computer lieferte, auch möglich wäre, führt dazu, dass die Verteidigung Gegengutachten einreicht. In einem forensischen Gutachten sind die einzelnen Phasen des Unfallablaufs nach den Gesetzen der Physik zu erläutern, zu berechnen und die verwendeten Formeln und die eingesetzten Werte offen zu legen. Dies ermöglicht dem Auftraggeber und den Parteien mit einem anderen Sachverständigen kritisch zu diskutieren, ob das Gutachten nachvollziehbar ist. Bei einem derartig begründeten Gutachten hilft es den Parteien nichts, wenn sie ein Gegengutachten mit anderen Schlussfolgerungen einreichen. Vielmehr müssen sich die Parteien bei Einwendungen kritisch mit dem amtlich eingeholten Gutachten auseinandersetzen und konkret vorbringen, was im Gutachten nicht stimmen soll. In der Praxis erfolgen am häufigsten Einwendungen gegen den angenommenen Haftreibungskoeffizienten der Reifen. Anschließend erhält der Gutachter Gelegenheit, zu den gemachten Einwendungen Stellung zu nehmen. Dann entscheidet die Staatsanwaltschaft, ob sie auf das Gutachten abstellt, beim gleichen Gutachter eine Ergänzung der technischen Untersuchung veranlasst (z. B. Bestimmung des Haftreibungskoeffizienten durch einen Versuch und Einsetzen des Resultats an Stelle des aufgrund der Literatur theoretisch angenommen Wertes) oder ein Obergutachten in Auftrag gibt.

4.2 Rekonstruktion Unfallablauf

Optimal ist die Beweislage, wenn der Sachverständige allein aufgrund des Spurenbildes mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit den Unfallablauf rekonstruieren kann. Wenn sehr qualifizierte Sachverständige eingesetzt werden, besteht kaum eine Chance, dass das Gericht in seinem Urteil von den Schlussfolgerungen im Gutachten abweicht. Schon mancher Verteidiger musste die Erfahrung machen, dass Einwendungen gegen ein Gutachten kontraproduktiv sein können. Dazu ein Beispiel aus meiner Praxis: Ein Personenwagenlenker überholte in einer Kurve mehrere Fahrzeuge und verlor dabei die Herrschaft über das Fahrzeug. Zeugen schätzten seine Geschwindigkeit auf bis zu 160 km/h. Der Sachverständige nahm in seinem Gutachten aufgrund der Literatur einen Haftreibungskoeffizienten von 6,5 m/s2 an. Der Verteidiger reichte ein Gegengutachten ein, wonach die Geschwindigkeit auch 4 km/h tiefer gewesen könnte. Zur Begründung wurde ausgeführt, die Querbeschleunigung müsse nicht zwingend mindestens 6,5 m/s2 betragen haben. In der Folge wurde ein anderer Sachverständiger ersucht, den Haftreibungskoeffizienten in einem Versuch zu bestimmen und aufgrund dieses Wertes in einem Obergutachten die Ausgangsgeschwindigkeit neu zu berechnen. Das Unfallfahrzeug war beschlagnahmt. Weil es nicht mehr fahrbar war, wurden die Reifen auf ein typengleiches Fahrzeug ummontiert und der Haftreibungswert am Unfallort unter möglichst gleichen Witterungsbedingungen wie im Unfallzeitpunkt statisch und dynamisch bestimmt. Der Versuch ergab eine Verzögerung in Längsrichtung von 10,4 m/s2 und in Querrichtung von 8,6 m/s2. Nun resultierte eine Ausgangsgeschwindigkeit von mindestens 135 km/h. Dieser Wert wurde vom Verteidiger anerkannt. Er investierte also für seinen Klienten viel Geld für einen aufwändigen Versuch und ein zweites Gutachten, um ein schlechteres Ergebnis zu erhalten, als ihm ursprünglich mit dem ersten Gutachten angeboten worden war. Dieser Fall zeigt, wie wichtig es ist, dass die Unfallfahrzeuge beschlagnahmt bleiben bis zur Anerkennung des Sachverhaltes durch den Angeschuldigten oder die rechtskräftige Feststellung des Sachverhaltes durch das Gericht.

4.3 Beurteilung von widersprechenden Darstellungen der Parteien zum Unfallhergang

Wenn keine oder zu wenig Spuren vorhanden sind, um den Unfallablauf auf naturwissenschaftlicher Basis rekonstruieren können, kann der Sachverständige dem Gericht bei der Wahrheitsfindung schon weiter helfen, wenn er sagen kann, die Darstellung der einen Partei könne aufgrund des Spurenbildes ausgeschlossen werden, die Version der anderen Partei sei aber mit dem Spurenbild vereinbar.

4.4 Falsche Behauptungen als Erklärungen für den Unfall

4.4.1 Misslungenes Brems- oder Ausweichmanöver wegen eines Tieres

Fahrzeuglenker behaupten bei auf den ersten Blick unerklärlichen Unfällen oft, es sei ihnen ein Tier, meist eine Katze oder ein Fuchs, vor das Auto gerannt. Sie hätten versucht brüsk zu bremsen oder auszuweichen und hätten dabei die Kontrolle über das Auto verloren. Da Zeugen meist fehlen, kann diese Darstellung in der Regel nicht widerlegt werden. Ausweichmanöver stellen schon bei der in der Schweiz außerorts zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h hohe Anforderungen an das Fahrkönnen. Fahrkurse, um solch heikle Manöver zu üben, haben die wenigsten Automobilisten absolviert. Bei einem misslungenen Ausweichmanöver, welches der Lenker nicht verschuldet hatte, stufen die Gerichte deshalb das Verschulden als gering ein. Dieser Verschuldensbonus kommt aber nur zum Zug, wenn der Lenker die zulässige Höchstgeschwindigkeit eingehalten hat. Wer nur über das zum Erwerb des Führerausweises erforderliche minimale Fahrkönnen verfügt, sollte eher langsamer fahren, als die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Bei der Untersuchung von derartigen Unfällen wird der Einhaltung der zulässigen Geschwindigkeit besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Beim Verlust der Herrschaft in einer Kurve interessiert auch die Kurvengrenzgeschwindigkeit. Das Befahren einer Kurve nahe der Grenzgeschwindigkeit wird rechtlich als Nichtanpassen der Geschwindigkeit an die Verhältnisse qualifiziert. Ein Motorfahrzeuglenker muss jederzeit damit rechnen, dass er wegen eines plötzlichen auftretenden Hindernisses oder einer Gefahrensituation gezwungen ist, brüsk zu bremsen.

4.4.2 Unkorrektes Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer

Dazu ein Beispiel aus der Praxis. Ein Personenwagenlenker fuhr durch eine vierspurige Straße (je zwei Fahrstreifen in beiden Richtungen) mit einer signalisierten Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h. Er überquerte die Gegenfahrbahn und kollidierte auf dem gegenüberliegenden Bürgersteig heftig mit einem Kandelaber. Er behauptete, er sei im linken Fahrstreifen mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit gefahren. Rechts neben ihm sei ein Auto gewesen. Dessen Lenker habe das Fahrzeug plötzlich nach links gezogen. Er habe angenommen, dieser Lenker wolle den Fahrstreifen wechseln und habe ihn dabei übersehen. Um einen Unfall zu vermeiden, habe er das Steuer abrupt nach links gezogen und dabei die Kontrolle über sein Auto verloren. Die Pneuabriebspuren begannen zwar im linken Fahrstreifen. Der Unfallsachverständige kam zum Schluss, dass der Personenwagen bei Beginn des Schleudervorganges sich mit der gesamten Breite im rechten Fahrstreifen befunden hatte. Er berechnete weiter, dass die Geschwindigkeit bei Verlust der Herrschaft über das Fahrzeug 100 bis 115 km/h betrug. Eine physikalische Erklärung für den Unfall fand er nicht, weil die Strecke gerade. Somit war der Beweis für einen klassischen Raserunfall erbracht: Krass übersetzte Geschwindigkeit.

A2 Unfallaufnahme und Datenerhebung

Klaus-Dieter Brösdorf, Dr. Andreas Moser, Jürgen Burg

1 Einleitung

Unfälle ereignen sich in unterschiedlichen Schweregraden. Man unterscheidet zwischen Unfälle mit nur Sachschaden und in Unfälle mit Personenschaden. Gemäß Statistik [1] machten in Deutschland im Jahr 2013 Unfälle mit Personenschaden (291.105) etwa 12 % der Gesamtanzahl der polizeilich erfassten Unfälle (2.414.011) aus. In den amtlichen Statistiken sind nur polizeilich erfasste Unfälle enthalten. Eine größere Zahl von Unfällen, insbesondere leichtere Unfälle, wird offensichtlich polizeilich nicht gemeldet. Mit den Daten der Versicherungswirtschaft wird die Anzahl der Kfz-Schäden pro Jahr in Deutschland mit 9.247.000 angegeben [2].

Die Unfallaufnahme erfolgt in erster Linie durch die Polizei. In deutlich geringerem Umfang werden bei schweren Unfällen Sachverständige für Unfallrekonstruktion schon zur Beweissicherung hinzugezogen. Wenn Unfälle der Polizei nicht gemeldet werden, dann können sich die Beteiligten oder beauftragte Personen um die Unfallaufnahme kümmern. Unfallaufnahme wird in diesem Zusammenhang primär als Sicherung objektiver Merkmale (Beweissicherung) verstanden.

Zweck der Unfallaufnahme durch die Polizei ist die Schaffung von Grundlagen für die Prüfung, ob sich Beteiligte strafbar gemacht haben. Die dabei erhobenen Daten können aber auch zur Durchsetzung zivilrechtlicher Ansprüche der Unfallbeteiligten Verwendung finden. Ist der Unfallhergang für die Staatsanwaltschaft, für Richter oder Schadenregulierer bei Versicherungen nicht ausreichend gut zu beurteilen, so kann ein Sachverständiger mit der Rekonstruktion des Unfalls beauftragt werden. Mit der Beauftragung ist eine Erwartungshaltung auf weitere gesicherte Erkenntnisse verbunden. Die Gutachten der Sachverständigen sind dann bedeutsame Grundlagen für Gerichtsverfahren und Schadenregulierung. Die Gutachten haben deshalb unmittelbare Auswirkungen auf die Rechtssicherheit (**Tabelle A2.1**).

Tabelle A2.1 Unfalldaten und Begutachtung

Erhebungsziel von Unfalldaten	Strafverfolgung, Schadenregulierung
Datenerhebung	– Art und Qualifikation der Datenerheber – Technische Ausstattung zur Datenerhebung – Umfang und Güte der erhobenen Daten
Datenauswertung und Begutachtung	– Qualifikation und technische Ausstattung des Unfallrekonstrukteurs – Aussagegenauigkeit der Unfallrekonstruktion – Zielgerichtete Formulierung des Gutachtens
Verwendung der Begutachtung	– Qualifikation des Ergebnisverwenders

Die Gutachten der Sachverständigen basieren auf objektiven Merkmalen und auf Angaben von Beteiligten und Zeugen. Die objektiven Merkmale werden meist direkt am Unfallort erhoben. In geringem Umfang ist auch eine spätere Feststellung von objektiven Merkmalen möglich. Aussagen können zu jedem späteren Zeitpunkt in die Begutachtung einfließen. Ist das Gutach-

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_2

ten fertig und beim Auftraggeber eingetroffen, so müssen dieser und die durch das Gutachten Betroffenen das Gutachten genau überprüfen oder überprüfen lassen, insbesondere darauf, ob der Gutachter von den richtigen Anknüpfungspunkten ausgegangen ist.

2 Arten von Unfalldaten

Bei der Aufnahme von Verkehrsunfällen vor Ort stehen dem Sachverständigen viele Informationen zur Verfügung, die bei der Analyse des Unfalls verwendet werden können. Zu diesen Daten gehören zunächst die allgemeinen Unfalldaten, die meist der polizeilichen Unfallaufnahme entnommen werden können. Sofern es keine Unfallaufnahme gibt, können diese Daten durch den Sachverständigen ermittelt und festgehalten werden (**Tabelle A2.2**).

Tabelle A2.2 Daten zur Unfallrekonstruktion

Allgemeine Unfalldaten	Daten vom Unfallort	Daten vom Unfallfahrzeug	Daten von Unfallbeteiligten	Sonstige Unfalldaten
Unfalldaten, -zeit, -ort, Dienststelle Angaben zu: – Beteiligten – Zeugen – Fahrzeughalter Technische Daten der Fahrzeuge und bildliche Darstellungen Unfallart: Charakteristika und Besonderheiten der Unfallstelle Verkehrsregelung Lichtverhältnisse Straßenbefestigung Straßenzustand Witterung	Reifenspuren Fahrspuren Walkspuren Bremsspuren Driftspuren Schleuderspuren Reifenabdrücke Unstetigkeit in Reifenspuren Spuren von Fahrzeugteilen Schleifspuren Kratzspuren Lage von Fahrzeugteilen: – Glassplitter – Lacksplitter – abgerissene Teile Flüssigkeiten Schmutzablagerungen Endlage von Personen Lage von Körperteilen Blut-/Gewebespuren Gegenstände Abriebspuren Endstellungen von Fahrzeugen	Spuren am Fahrzeug Wischspuren Abdrücke Auf-/Abriebspuren Beschädigungen Deformationen Einriss, Abriss, Bruch Spuren im Fahrzeug Wischspuren Abdrücke Beschädigungen – Deformationen Einriss, Abriss, Bruch Spuren an den Rückhaltesystemen: – Gurtmarke – Umlenkbeschlag – Kraftbegrenzer – Gurtrolle – Gurtschloss – Sensoren Passive Systeme: Airbag-Sensoren Sitzbelegungserkennung Airbagdeaktivierung	Persönliche Daten: Alter Geschlecht Gewicht Körpermaße Vorerkrankungen Verletzungen – äußere – innere Frakturen Alkohol Drogen Spuren an der Bekleidung	Fahrtschreiberdiagramm Unfalldatenschreiber Lichttechnische Daten Meteorologische Daten Auslesung von elektronischen Datenspeichern Mikrospuren

3 Dokumentation von objektiven Merkmalen

3.1 Zeitpunkt der Datenerhebung

Die meisten Unfallspuren unterliegen mit zunehmendem zeitlichem Abstand zum Unfall Veränderungen, so dass sie möglichst zeitnah nach dem Verkehrsunfall zu sichern und zu erheben sind. Für die Arbeiten am Unfallort ergibt sich daraus folgende Reihenfolge:

1. Sicherung der Unfallstelle
2. Maßnahmen zur Versorgung/Abtransport von Verletzten
3. Feststellung von Zeugen und Beteiligten
4. Verkehrslenkung wenn erforderlich
5. Sicherung von schnell veränderlichen Spuren
6. Vernehmung von Zeugen und Beteiligten
7. Sicherung weiterer Spuren und Dokumentation aller Spuren

Da in der Regel mehrere Personen (Rettungsorganisation, Feuerwehr, Polizei) an der Unfallstelle anwesend sind, können durch Arbeitsteilung auch mehrere der obigen Positionen gleichzeitig ausgeführt werden. Unter Sicherung von schnell veränderlichen Spuren ist die Markierung der Endlagen von verletzten Fußgängern/Zweiradfahrern, der Endstellung von Fahrzeugen, die Lage von Gegenständen/Fahrzeugteilen (z. B. vom Fußgänger verlorene Gegenstände, Glassplitter, abgefallener Schmutz) und leicht verwisch-/entfernbarer Spuren wie Wisch-, Schleif- oder Blutspuren zu verstehen. Die Markierung von weniger schnell veränderbaren Spuren (Reifenspuren, Beschädigungen) und die Dokumentation der Spuren (Vermessung, Fotografie) kann danach erfolgen. Die bei der Bergung von Personen oder Fahrzeugen eventuell entstandenen weiteren Beschädigungen oder Veränderungen von Spuren sollten ebenfalls dokumentiert werden, um sie von den Unfallspuren trennen zu können. Bei nachträglicher Spurensicherung und Dokumentation wird die Aussagekraft der Daten mit zunehmendem zeitlichem Abstand zum Unfall geringer. Hinzu kommt, dass wesentliche Daten (Endstellung, Lage von Personen/Teilen) schon nach kurzer Zeit nicht mehr erhoben werden können.

3.2 Dokumentation von Unfalldaten

Je nach angewandtem Verfahren sind Sicherung und Dokumentation von Spuren/Unfalldaten getrennt oder fallen zusammen. Bei den meisten Daten ist eine sinnvolle Reihenfolge:

» fotografieren → abkreiden → fotografieren → vermessen «

Diese Reihenfolge hat sich aus der Praxis der Unfallaufnahme ergeben. Sofortiges Fotografieren verhindert die zufällige Veränderung von Spuren. Kreidestriche dürfen die Spuren nicht verdecken. Beim anschließenden Fotografieren sind vor allem die Belange einer eventuellen späteren photogrammetrischen Auswertung zu berücksichtigen. Die abschließende Vermessung ersetzt nicht die Fotografie. Vermessene und beschriebene Spuren sowie Fotos, aus denen gegebenenfalls die Vermessung geprüft werden kann, sind Datenmaterial mit sehr hoher Aussagekraft. Es ist zu beachten, dass bei nasser Fahrbahn manche Spuren nicht sichtbar sind, jedoch dann, wenn die Fahrbahn abgetrocknet ist. Ferner kann es sein, dass bei Dunkelheit manche Spuren aufgrund mangelnder Ausleuchtung bzw. mangelnden Kontrasts nicht erkannt werden können, weshalb eine Nachschau am folgenden Tag bei Tageslicht unerlässlich ist. Teil-

weise kann der Einsatz von Blitzlicht bei Nacht eine Verbesserung bei der Spurenerkennung mit sich bringen. Für die Unfallrekonstruktion auf Basis der polizeilichen Dokumentationen sind folgende Anmerkungen zu machen:

Ortsbesichtigung durchführen, gegebenenfalls in der Dokumentation fehlende Informationen ergänzen, wie z. B. Verkehrsregelung, Fahrspurmarkierungen, Beleuchtung und Bauten. Häufige Fehler/Mängel in Unfallskizzen sind fehlender Festpunkt, fehlende Maße zur Festlegung eines Objekts und fehlende Maßstabsangaben.

Bei Eintragung der Kollisionsstelle in die Unfallskizze ist zu prüfen, ob die Lage vermutet wurde bzw. durch welche Daten ihre Lage als sicher anzusehen ist (Spuren auf der Fahrbahn, Zeugenaussage). Zu der Einzeichnung von Schleuderspuren ist zu prüfen, ob sie frei Hand eingezeichnet oder vermessen wurden.

3.3 Fotografische Dokumentation

Unfallstellenvermessung und Fotografie sind die wichtigsten Mittel zur Beweissicherung. Je komplizierter der Unfall, desto mehr Lichtbilder sind erforderlich. Diese sollten unmittelbar nach dem Eintreffen an der Unfallstelle gefertigt werden, da schon nach kurzer Zeit Spuren beseitigt, Personen, Fahrzeugteile und Fahrzeuge in ihrer Lage wesentlich verändert sein können (z. B. durch Rettungs- und Umweltschutzmaßnahmen).



Bild A2-1 Übersichtsaufnahme



Bild A2-2 Endlagen der Fahrzeuge

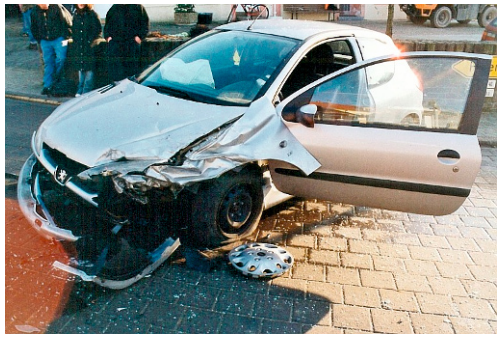


Bild A2-3 Beschädigungen an einem Fahrzeug

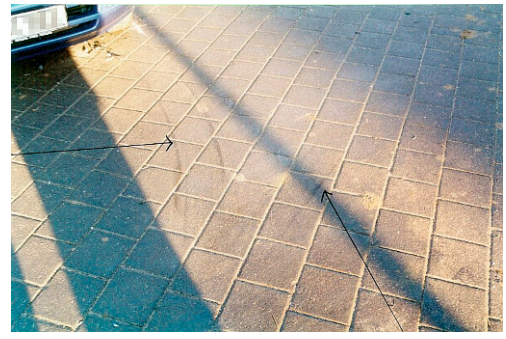


Bild A2-4 Detailaufnahme von Spuren auf der Fahrbahn

Folgende Hinweise sind zu beachten:

1. Fotografieren der Spuren und der Endlagen in und entgegen der jeweiligen Fahrtrichtungen sowie aus verschiedenen Entfernungen und zwar so, dass auch Objekte am Fahrbahnrand (z. B. Leitpfosten, Verkehrszeichen, Häuser) sowie der Horizont sichtbar sind (**Bild A2-1**).
2. Fotografieren der Fahrzeugendlagen quer zum Straßenverlauf dergestalt, dass die Vorderräder, Bremsspuren, abgefallene Fahrzeugteile und der Straßenrand zu erkennen sind (**Bild A2-2**).
3. Fotografieren der Beschädigungen an den Fahrzeugen von vorn bzw. hinten, senkrecht und unter einem schrägen Winkel von der Seite (siehe hierzu auch Kapitel A18). Auch Beschädigungen fotografisch festhalten, die dem ersten Anschein nach nicht zu dem Unfall gehören (**Bild A2-3**).
4. Fotografieren der Spuren (**Bild A2-4**). Gegebenenfalls Dokumentation von unter den Fahrzeugen befindlichen Spuren, nachdem die Fahrzeuge aus der Endlage entfernt wurden.

Was die Fotoausrüstung anbelangt, so kann prinzipiell gesagt werden, dass Fotos mit jedem funktionsfähigen Fotoapparat besser sind als keine Bilddokumentation. Für die technische Beweissicherung sollte jedoch eine Fotoausrüstung verwendet werden, mit der auch unter wenig günstigen Witterungs- und Lichtverhältnissen qualitativ hochwertiges Bildmaterial hergestellt werden kann. Stand der Technik sind derzeit digitale Spiegelreflexkameras mit einer möglichst hohen Auflösung. Bezüglich der Objektive sollte ein Brennweitenbereich von etwa 16 mm bis etwa 200 mm (Kleinbildformat) abgedeckt werden. Auch bei Tageslicht ist oftmals der Einsatz eines Blitzgerätes sinnvoll. Die Leitzahl des Blitzgerätes sollte nicht unter 50 liegen. Für besondere Fälle empfiehlt sich ein Ringblitz. Fotos aus dem Fahrzeuginnenraum sind erforderlich, wenn Sichtabschattungen, Dunkelheitsunfälle, verkratzte/verschmutzte Windschutzscheiben zu berücksichten sind (**Bild A2-5** und **Bild A2-6**). Sind Kontaktstellen von Insassen im Fahrzeuginnenraum vorhanden, muss der Fahrzeuginnenraum selbst auch fotografiert werden.



Bild A2-5 Foto aus dem Fahrzeuginnenraum



Bild A2-6 Feststellungen zur Sichtabschattung

Die Grundlage für die Unfallrekonstruktion ist die Aufnahme von Daten und Fakten an der Unfallstelle. Diese Dokumentation muss so geschehen, dass sie später von anderen Personen nachvollzogen werden kann. Dies geschieht am besten durch Foto- und Videodokumentation. Vermessungsdaten müssen in ordentlichen, gut lesbaren Dokumenten festgehalten werden, sofern keine elektronische Dokumentation erfolgt (z. B. Totalstation, Scanner u. a.). Ob Fotos analog oder digital angefertigt werden, ist aus Sicht der Verfasser gleichwertig. Bei analogen

Fotos müssen die Negative archiviert werden, bei digitalen Fotos die Originalbilddateien. Von Interesse ist letztendlich nur, dass die Fotos als Dokument geeignet sind und nicht etwa aufgrund einer zu geringen Auflösung wichtige Details verloren gehen. Die Fotoinhalte sind so zu wählen, dass daraus die gewünschten Informationen gewonnen werden können. Zur Dokumentation einer Unfallstelle werden nachfolgend einige Hinweise gegeben.

1. Übersicht
2. Details
3. Information für die Unfallrekonstruktion

Die Übersichtsaufnahmen sollten den Blick oder die Sicht der Beteiligten und der Zeugen auf die Unfallstelle wiedergeben. Durchaus sinnvoll ist es, allgemeine Übersichtsaufnahmen anzufertigen, die eine Gesamtschau auf die Unfallörtlichkeit ermöglichen. Insbesondere Digitalfotos erlauben die Anfertigung von Serienbildern und das leichte Zusammensetzen mit Programmen zur Erzeugung von Panoramabildern. Bei solchen Fotos kann auch die Kamera um 90 Grad geschwenkt werden, so dass Hochformatfotos entstehen (**Bild A2-7** bis **Bild A2-10**). Nach deren Zusammensetzung entstehen Abbildungen, die in guter Näherung einen Eindruck vermitteln, wie das menschliche Auge sieht (**Bild A2-11**). Abbildungen zu den Sichtverhältnissen sollten deshalb mit einer Brennweite von 50 mm angefertigt werden.



Bild A2-7 Rohbild

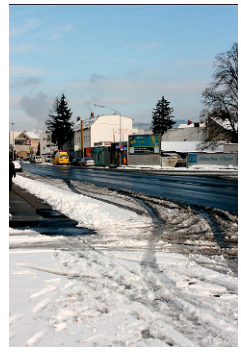


Bild A2-8 Rohbild

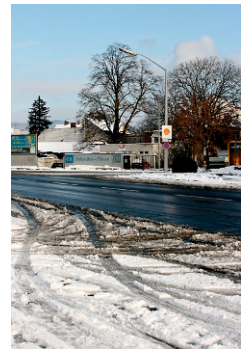


Bild A2-9 Rohbild

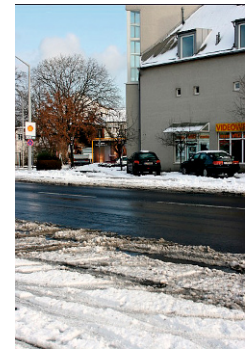


Bild A2-10 Rohbild



Bild A2-11 Panoramaabbildung zu den Sichtverhältnissen



How we build reality

Zoller+Fröhlich

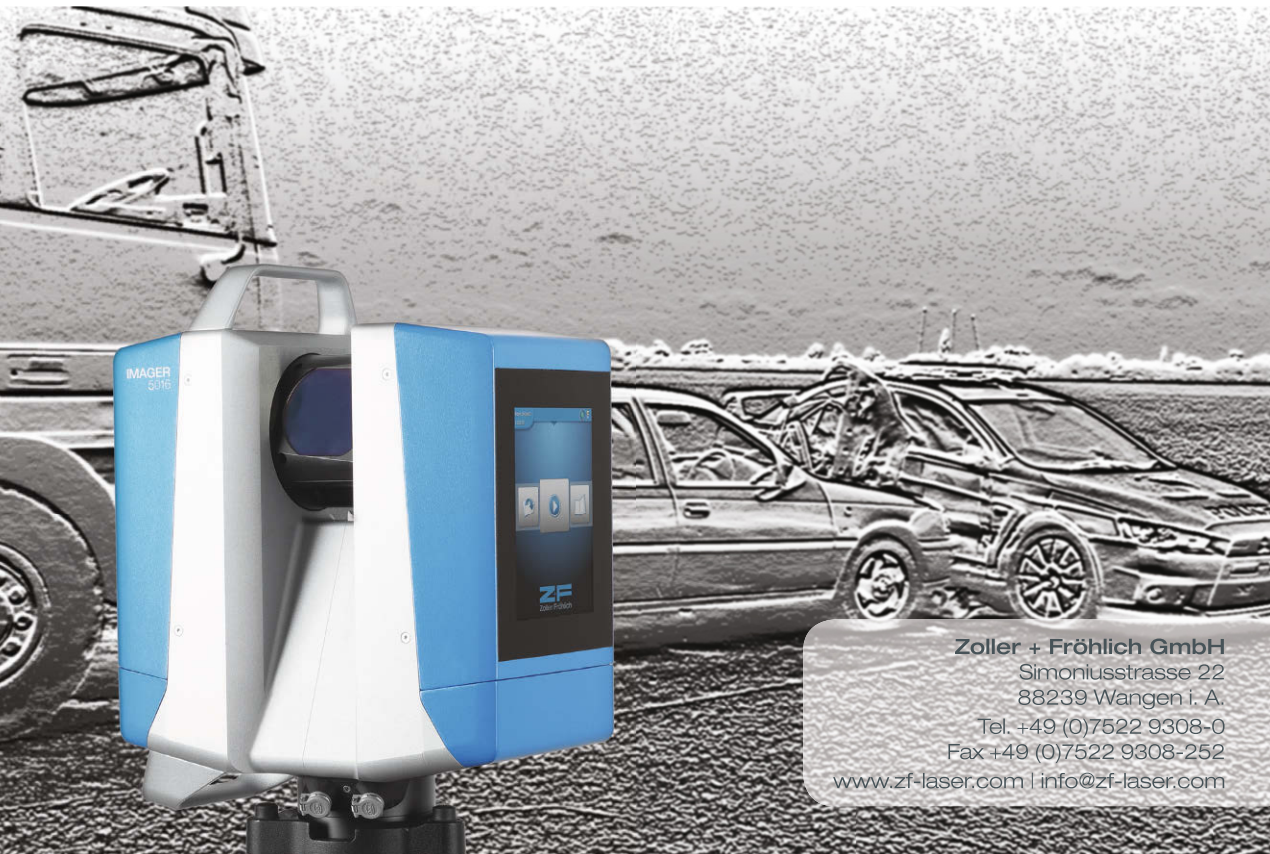
Reaching new levels

Unfalldokumentation mit dem Z+F IMAGER® 5016

Laserklasse 1
Hohe Genauigkeit
Reichweite: 360 m

Kompaktes Design
Integrierte HDR-Kamera und LEDs

Targetlose Registrierung in Echtzeit
Positionierungssystem für Innen- und Außenbereiche



Zoller + Fröhlich GmbH
Simoniusstrasse 22
88239 Wangen i. A.
Tel. +49 (0)7522 9308-0
Fax +49 (0)7522 9308-252
www.zf-laser.com | info@zf-laser.com

Panoramaabbildungen sind auch sehr gut geeignet, einen prinzipiellen Überblick zu einer Örtlichkeit zu geben. Ein fertiges Panoramabild stellt meist die ebene Darstellung einer zylindrischen oder sphärischen Projektion dar [3], die bei der Darstellung auf einer ebenen Fläche im Vergleich zu einer Fotografie mehr oder weniger verzerrt erscheinen, da Geraden in der zylindrischen und sphärischen Projektion gekrümmt dargestellt werden (**Bild A2-12**).



Bild A2-12 Panoramabild (Normalansicht)



Bild A2-13 Panoramabild (perspektivische Korrektur)



Bild A2-14 Ansteigende Fahrbahn



Bild A2-15 Abfallende Fahrbahn

Verschiedene Programme bieten mittels perspektivischer Korrektur die Möglichkeit, einzelne Bildausschnitte aus einem Panoramabild in einer Perspektive abzubilden, wie sie eine Fotokamera in etwa erfassen würde (**Bild A2-13**). Hinzuweisen ist jedoch darauf, dass die mittels Programmen erzeugten Panoramabilder für eine photogrammetrische Auswertung im Sinne der weiter unten beschriebenen Bildentzerrung nicht geeignet sind.

Fotos sollten auch so aufgenommen werden, dass erkennbar ist, ob die Fahrbahn ansteigt (**Bild A2-14**) oder abfällt (**Bild A2-15**). Dazu ist die Kamera waagerecht/horizontal zu halten. Bei Gefällestrecken sollte die Kamera in geringer Höhe über der Fahrbahn (etwa 0,5 m) positioniert werden. Diese bildliche Darstellung ersetzt jedoch nicht die Messungen von Längs- und Quergefälle. Zu beachten ist, dass zum Unfallzeitpunkt (**Bild A2-16**) oft andere Verhältnisse vorlagen als zum Zeitpunkt der Gutachtenbearbeitung (**Bild A2-17**). Das kann der Randbewuchs sein, der sich auf die gegenseitigen Sichtmöglichkeiten der Beteiligten ausgewirkt haben kann oder geänderte Fahrbahnmarkierungen, Erneuerungen der Fahrbahndecken usw. Wenn die Fahrbahn zwischenzeitlich umgebaut worden ist, so kann nach Fotos bei den Straßenbauämtern oder bei der Polizei geforscht werden, die die Straße noch vor dem Umbau zeigen. Oft sind auch bei den Landesvermessungsämtern Luftbilder vorhanden, die den Zustand vor und nach dem Umbau zeigen. Die Beschilderung kann zwischenzeitlich geändert worden sein, was der SV selbst bei seiner Besichtigung vielleicht gar nicht erkennen kann. Deshalb empfiehlt es

sich, die Strecken, welche die an dem Verkehrsunfall Beteiligten zurückgelegt haben, abzufahren und dies videotechnisch zu dokumentieren. Ampelstandpunkte, Bushaltestellen oder sonstige Bebauungen können ebenfalls verlegt worden sein.



Bild A2-16 Situation an der Unfallstelle unmittelbar nach dem Verkehrsunfall



Bild A2-17 Situation an der Unfallstelle zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung

Bei Detailaufnahmen, zu denen Spuren auf und neben der Fahrbahn sowie auf den Fahrzeugen zählen, sollte von großen Ausschnitten auf kleine Ausschnitte gleitend auf wichtige Details eingegangen werden. Dies ist für die Nachvollziehbarkeit der Dokumentation wichtig.

» Übersichtsaufnahmen → Abschnittsaufnahmen → Detailaufnahmen «

Bei der Dokumentation ist darauf zu achten, dass Beginn und Ende von Spuren und Splitterfeldern, der Verlauf von Spuren und die Ausdehnung von sonstigen Merkmalen abgebildet sind.



Bild A2-18 Spuren an einer Unfallstelle



Bild A2-19 Fahrzeugendlagen und Splitter

Bild A2-18 zeigt Reifen- und Flüssigkeitsspuren, Splitter und die Markierungen für die Endpositionen der Unfallfahrzeuge. **Bild A2-19** lässt die Endlagen von Fahrzeugen, ein Splitterfeld und weitere Merkmale erkennen, mit denen die Fahrzeuge auf einer maßstabsgerechten Zeichnung der Unfallstelle orientiert werden können.

Die Dokumentation von Fahrzeugen und Beschädigungen ist so auszuführen, dass Deformationsrichtung, Eindringtiefe, Lage von Spuren und deren Dimension zu erkennen sind (**Bild A2-20**).

Das Mitfotografieren von Maßstäben macht die Fotos erst für maßliche Zuordnungen verwendbar (**Bild A2-21**). Weiterführende Ausführungen hierzu finden sich im Gliederungspunkt A27.2 Untersuchung und Dokumentation der beteiligten Fahrzeuge/Kollisionsobjekte.

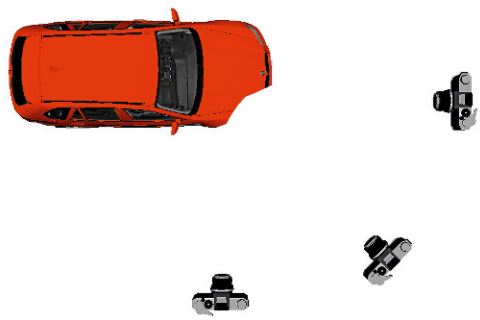


Bild A2-20 Sinnvolle Kamerapositionen



Bild A2-21 Maßstab mitfotografiert

3.4 Geräte zur Sicherung von objektiven Merkmalen

Von der Vielzahl der Geräte, die zur Unfallaufnahme geeignet sind, sollen hier nur die angesprochen werden, die zur Standardausrüstung gehören oder empfehlenswerte Zusatzausrüstung (**Tabelle A2.3**) sind.

Tabelle A2.3 Geräte zur Sicherung von objektiven Merkmalen

Geräte	Standard	empfohlen	Geräte	Standard	empfohlen
Klemmbrett	X		Handlampe	X	
Fotoapparat	X		Blitzlicht	X	
Kreide	X		Pylonen		X
Sprühkreide	X		Diktiergerät	X	
Ölkreide	X		Feuerlöscher		X
Klebeband	X		Magnetpfeile	X	
Bandmaß, Zollstock, Messrad	X		Bremsverzögerungsmessgerät		X
Permanentmarker	X		Warnbekleidung	X	
Reifenmanometer	X		Reifenprofiltiefenmesser	X	
Messlatten	X		Einrichtung für Überkopfaufnahmen		X

Sehr teure Geräte (3D-Laserscanner) und solche, die relativ selten benötigt werden (z. B. lichttechnische Geräte) werden nicht aufgeführt, weil sie als Standardausrüstung unwirtschaftlich sind. Ist eine kriminalistische Spurensicherung erforderlich, so ist es vernünftiger, die entsprechenden Spezialisten und deren Ausrüstung anzufordern.

3.5 Vermessen von Unfallstelle und Spurenlagen

3.5.1 Geräte und Verfahren zur Vermessung von Unfallstellen

Die Vermessung von Unfallstellen und der darin enthaltenden Spurenlagen kann mit unterschiedlichem Aufwand betrieben werden. Wichtig ist, dass für eine Unfallrekonstruktion eine maßstabsgerechte Abbildung von der Unfallstelle mit allen wichtigen objektiven Merkmalen vorhanden sein muss. Für die Vermessung von Unfallstellen und Spurenlagen können verschiedenste Geräte verwendet werden. Wichtige Geräte zur Vermessung von Unfallstellen sind in **Tabelle A2.4** aufgelistet.

Tabelle A2.4 Geräte und Verfahren zur Vermessung von Unfallstellen

Standardausstattung	Spezialausstattung
Maßband	Messkamera (3D-Photogrammetrie)
Messrad	Total-Station
Laser-Entfernungsmesser	3D-Laserscanner
2D-Photogrammetrieausstattung	

In Zukunft könnten für die Vermessung von Unfallstellen auch satellitengestützte Geräte (z. B. GPS, Galileo) an Bedeutung gewinnen, wenn die Genauigkeit dieser Geräte verbessert wird.

3.5.2 Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren

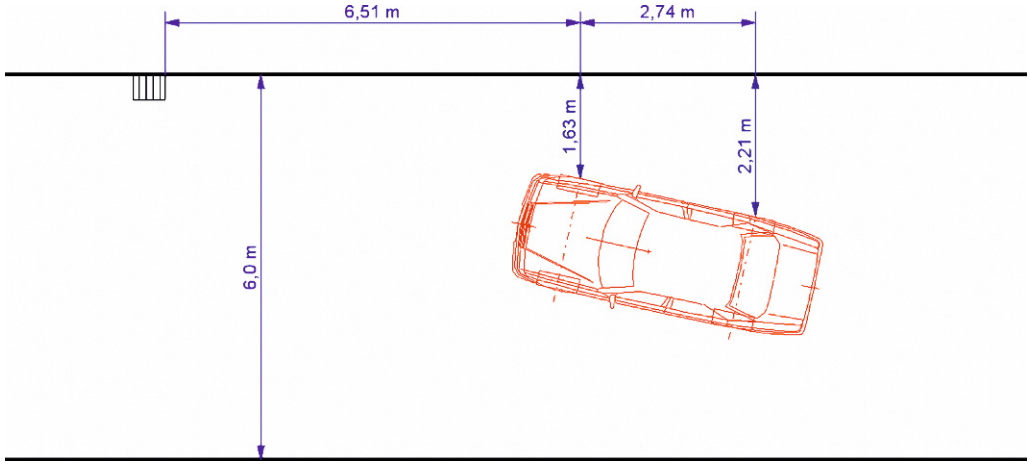


Bild A2-22 Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren

Das Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren (**Bild A2-22**) sollte sinnvollerweise nur dort angewandt werden, wo der Bezug zu einer geraden Kante gegeben ist, beispielsweise zu einer

gerade verlaufenden Fahrbahnrandmarkierung. Bedeutsame Fehler können dann entstehen, wenn der Winkel zwischen der Bezugslinie (Grundlinie) und der Messlinie vom rechten Winkel abweicht. Das Vermessen der Radaufstandspunkte am Fahrzeug (außen) ist der Vermessung der Fahrzeugecken vorzuziehen, dies aus Gründen der Genauigkeit der Vermessung.



Bild A2-23 Markierung der Radpositionen

Bei der Markierung der Endlagen von Fahrzeugen auf der Fahrbahn gilt sowohl für reale Verkehrsunfälle als auch für Versuche, dass die Fahrzeugecken durchaus gekennzeichnet werden können. Einfacher und genauer ist jedoch die Markierung der Radpositionen wie mit **Bild A2-23** gezeigt. Bei einer solchen Markierung wird die Stellung der Räder relativ zum Fahrzeug korrekt mit erfasst.

3.5.3 Dreieck-Messverfahren

Ausgehend von einer Grundlinie wird bei dem Dreieck-Messverfahren (**Bild A2-24**) ein Punkt durch zwei Strecken definiert, so dass ein Dreieck entsteht. An dieses Dreieck können beliebig viele weitere Dreiecke angefügt werden. Bei sinnvoller Wahl der Punkte können Fahrbahnrandmarkierungen oder Spuren detailliert vermessen werden, was im Wesentlichen von der Anzahl der (sinnvoll gewählten) Punkte abhängig ist.

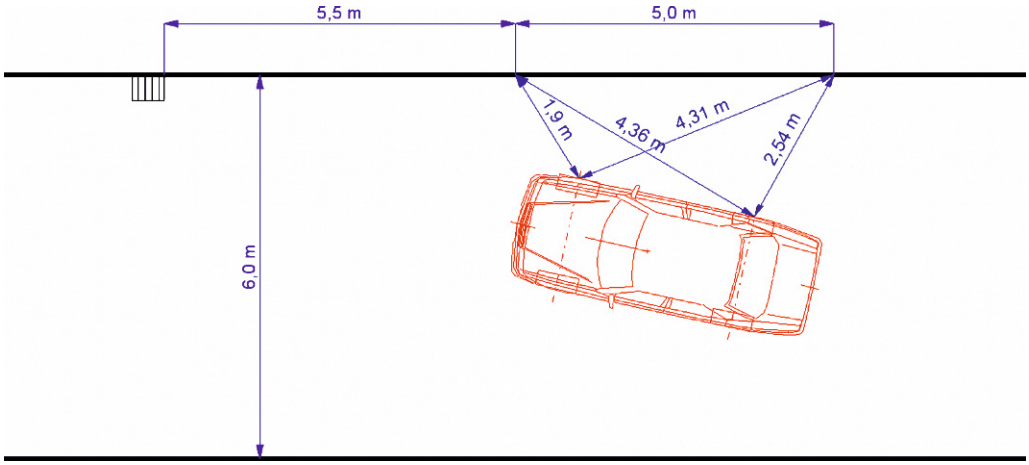


Bild A2-24 Dreieck-Messverfahren

3.5.4 Vermessung von Kurven und Bögen

Für die Vermessung von Kurven oder Bögen ist das Dreieck-Messverfahren (**Bild A2-25** zu empfehlen, jedoch kann auch das Sehnen-Höhen-Messverfahren (**Bild A2-26**) verwendet werden.

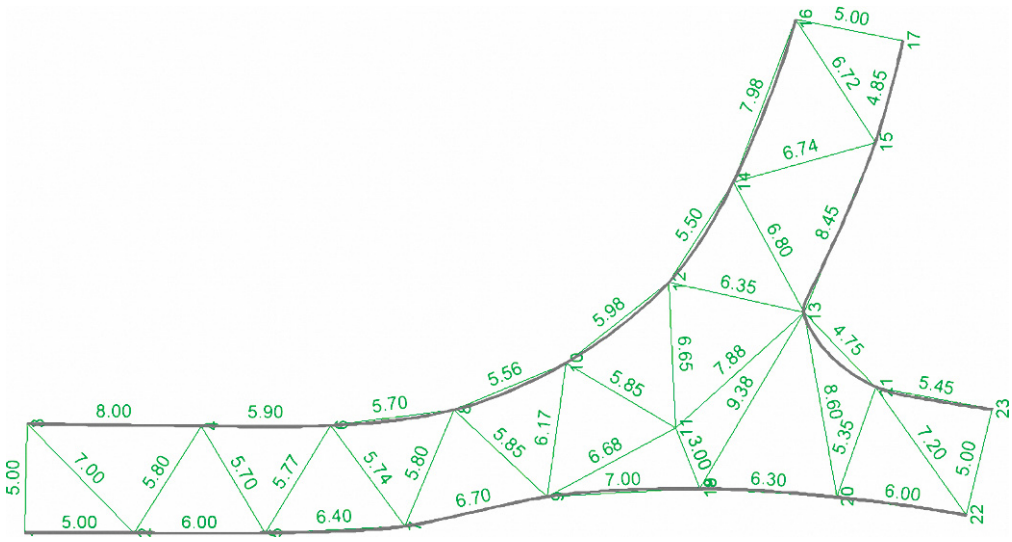


Bild A2-25 Dreieck-Messverfahren

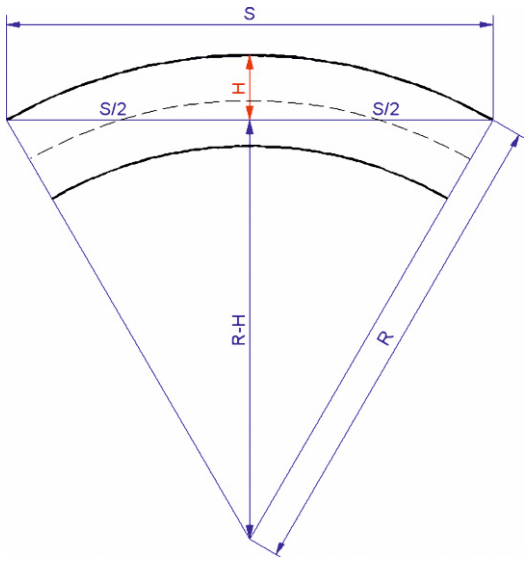


Bild A2-26 Sehnen-Höhen-Messverfahren

Bei dem Sehnen-Höhen-Messverfahren kann mit einfachen Hilfsmitteln (z. B. Maßband) der Kurvenradius näherungsweise bestimmt werden. Gemessen werden dazu nach (**Bild A2-26**) die Sehne eines Kreisbogens und die Höhe des Bogens in der Mitte der Sehne. Damit kann der Radius berechnet werden. Es gilt:

$$R^2 = (R - H)^2 + \left(\frac{S}{2}\right)^2 \qquad \textbf{(A2-1)}$$

und nach entsprechender Umformung:

$$R = \frac{S^2 + 4 \cdot H^2}{8 \cdot H} \qquad \textbf{(A2-2)}$$

oder

$$R = \frac{S^2}{8 \cdot H} + \frac{H}{2} \qquad \textbf{(A2-3)}$$

Bei Kurven mit veränderlichem Radius kann das Verfahren mehrfach angewandt werden (**Bild A2-27**). Um Fehler zu vermeiden, sollte die erste Sehne auf der Geraden vor der Kurve angetragen werden ($H = 0$). Weitere Sehnen werden dann in der Mitte der jeweils vorausgegangenen Sehne angetragen. In der Mitte aller Sehnen werden die zugehörigen Höhen gemessen. Danach können die Messwerte genauso aufgezeichnet werden, wie sie gemessen wurden. An den Anfangspunkten der Sehnen können die Abstände bis zur Fahrbahnmittellinie und zum anderen Fahrbahnrand gemessen werden. Es ist zu bedenken, dass in Kurven die Mittellinie oft nicht der Mitte der Fahrbahn entspricht.

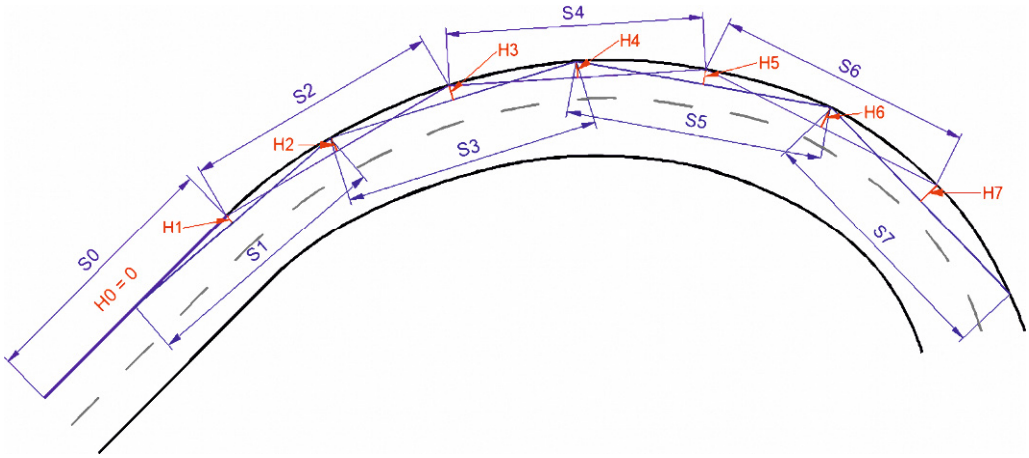


Bild A2-27 Sehnen-Höhen-Messverfahren

3.5.5 Messtischverfahren

Bei dem Messtischverfahren wird an einem beliebigen Fixpunkt auf der Fahrbahn ein Messtisch aufgebaut, an dem ein Maßband befestigt ist. Dieses Maßband wird zu einem bestimmten Ort gezogen, und an diesem Ort wird eine Messlatte errichtet. Eine an dem Messtisch befindliche Person peilt über ein Lineal die Messlatte an und trägt die Entfernung zur Messlatte in dem gewählten Maßstab auf einem auf dem Messtisch liegenden Papier ab. So entsteht Punkt für Punkt eine Darstellung der Unfallsituation. Durch Verbindung der Punkte entsteht die Unfallskizze. Ein ähnliches Verfahren existiert, bei dem das Maßband durch ein elektronisches Abstandsmessgerät ersetzt wurde. Sofern Hilfsmittel nicht vorhanden sind, muss man sich auf Verfahren, die geometrische Hilfspunkte und Beziehungen benutzen, beschränken. Bei sorgfältiger Vermessung lassen sich mit diesen Verfahren sehr genaue Unfallskizzen erstellen.

3.5.6 Totalstation



Bild A2-28 Totalstation



Bild A2-29 Reflektor

Totalstationen (Tachymeter) werden in der Landvermessung und von Architekten aber auch zur Unfallrekonstruktion, eingesetzt (**Bild A2-28** bis **Bild A2-31**). Da der Aufwand bis zur Erzeugung einer 3D-Skizze hoch ist, ist die Verbreitung eher gering. Die mit der Totalstation gewonnenen 3D-Daten können in Simulations- oder CAD-Programme importiert und verarbeitet werden.



Bild A2-30 Arbeit an der Totalstation



Bild A2-31 Hilfsperson am Reflektor

4 Photogrammetrie

4.1 Einleitung

Photogrammetrie (auch Fotogrammetrie oder Bildmessung) ist eine Gruppe von Messmethoden und Auswerteverfahren, um aus Fotos und genauen Messbildern eines Objekts seine räumliche Lage bzw. dreidimensionale Form zu bestimmen. Vielfach aber nicht notwendigerweise werden die Bilder mit speziellen Messkameras aufgenommen. Nach der verwendeten Methode der Bildmessung und der anschließenden Auswertung teilt man die Photogrammetrie auch in:

- analoge Photogrammetrie mit optisch-mechanischer Fotografie und Auswertung,
- analytische Photogrammetrie mit optisch-mechanischer Fotografie und rechnergestützter Auswertung,
- digitale Photogrammetrie mit digitaler Fotografie und rechnergestützter Offline-Auswertung sowie
- digitale Online-Photogrammetrie mit digitaler Fotografie und Online-Bildmessung ein.

Von Bedeutung ist die Photogrammetrie sowohl bei der Kriminologie als auch der Verkehrsunfallrekonstruktion. Die Photogrammetrie in der Unfallrekonstruktion wird unterteilt zum einen in Messverfahren, welche die Vermessungsarbeiten an der Unfallstelle ganz oder teilweise ersetzen können und zum anderen in Verfahren zur Auswertung beliebiger Fotografien, die nicht nach den Gesichtspunkten photogrammetrischer Messverfahren angefertigt wurden.

Bei den einzelnen Messverfahren ist zu unterscheiden einerseits zwischen den Methoden der Stereo-Photogrammetrie (binokulare Methoden) und denen der einfachen Photogrammetrie (monokulare Methoden) und andererseits zwischen Aufnahmen mit handelsüblichen Fotoapparaten und photogrammetrischen Aufnahmen mit speziellen monokularen oder binokularen Messkammern. Kennzeichen der Messverfahren mit handelsüblichen Kameras sind die relativ niedrigen Kosten bei Anschaffung und Gebrauch und die unkomplizierte Handhabung von Aufnahme- und Auswertegerät.

Gegenüber handelsüblichen Kameras besitzen Messkammern den Vorteil exakt und unveränderbar festgelegter mechanisch-optischer Kenngrößen (innere Orientierung). Bei der Anwendung monokularer Verfahren (Fotoapparat, einäugige Messkamera) muss der Informationsgehalt einer Fotografie aufgrund der fehlenden Räumlichkeit noch durch einige an der Unfall-

stelle zusätzlich ermittelter Daten ergänzt werden. Diesbezüglich stellt das binokulare Verfahren der Stereo-Photogrammetrie eine Optimierung dar. Durch die im Auswertegerät erzeugte Raumwirkung eines Bildpaares kann eine bildlich erfasste Situation eindeutig und auf jede der drei orthogonalen Projektionsebenen räumlicher Darstellungen umgesetzt werden. Die Anwendung der Stereo-Photogrammetrie allerdings erfordert für Aufnahme und Auswertung den Einsatz teurer Präzisionsgeräte, deren fehlerfreie Handhabung nur von speziell ausgebildetem Personal gewährleistet werden kann [4]. Die Stereo-Photogrammetrie wurde zwischenzeitlich durch andere Methoden ersetzt.

4.2 Anwendung

Die Photogrammetrie lässt sich in die zwei Hauptanwendungsgebiete Luftbildphotogrammetrie und terrestrische bzw. Nahbereichs-Photogrammetrie einteilen [4].

4.3 Luftbild-Photogrammetrie

Bei der Luftbildphotogrammetrie werden die Fotografien mit flugzeuggetragenen, digitalen oder analogen Messbildkameras aufgenommen. Es entstehen meist regelmäßige, streifenweise angeordnete Bildverbände, in denen sich benachbarte Bilder deutlich überlappen. Die Bildverbände werden orientiert, also in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert. Die Orientierung der Bildverbände erfolgt anhand von Pass- und Verknüpfungspunkten im Rahmen einer Bündelblockausgleichung. Aus den orientierten Bildern können Folgeprodukte wie 3D-Punkte, digitale Geländemodelle (DGM), Orthophotos etc., abgeleitet werden.

Die Ergebnisse der Luftbild-Photogrammetrie dienen der Erstellung und Fortführung topographischer Karten und Orthophotos, der großmaßstäblichen Punktbestimmung in Liegenschaftskatastern und zur Flurbereinigung. Es können auch digitale Geländemodelle (DGM) aus den Daten abgeleitet werden. Die Landnutzungserhebung sowie Umwelt- und Leitungskataster profitieren ebenfalls von den Resultaten der Luftbild-Photogrammetrie [4].

4.4 Nahbereichs-Photogrammetrie

Die Nahbereichs-Photogrammetrie befasst sich mit Objekten in einem Größenbereich von wenigen Zentimetern bis zu rund 100 m. In der Nahbereichs-Photogrammetrie gibt es, anders als in der Luftbildphotogrammetrie, keine Einschränkungen bei der Aufnahmeanordnung. Es können beliebige Aufnahmepositionen verwendet werden, wie sie entstehen, wenn man ein Objekt mit einer Handkamera von mehreren Richtungen fotografiert. In der Regel benutzt man dazu heute hochauflösende Digitalkameras.

Die häufigsten Anwendungsfelder der Nahbereichs-Photogrammetrie sind die industrielle Messtechnik (siehe Streifenprojektion), Medizin und Biomechanik und die Unfallaufnahme. In der Architektur und Archäologie nutzt man die Nahbereichs-Photogrammetrie zur Bauaufnahme, also zur Dokumentation als Grundlage von Umbauten und denkmalpflegerischen Maßnahmen.

Ein wichtiges Nebenprodukt der Nahbereichs-Photogrammetrie sind entzerrte Fotografien. Das sind Fotografien von nahezu ebenen Objekten wie Gebäudefassaden aber auch Unfallspuren auf einer Fahrbahnoberfläche die so auf eine Fläche projiziert werden, dass die Abstände im Bild über einen einfachen Maßstab in metrische Längen und Abstände umgerechnet werden können [4].

4.5 Innere Orientierung

Die drei Größen der inneren Orientierung beschreiben die geometrischen Verhältnisse in einer Kamera. Sie geben Auskunft über die Position der Bildebene (die einen analogen (Film) oder digitalen (z. B. CCD) Sensor trägt) zum bildseitigen Projektionszentrum des Objektivs. Die Größen sind:

- x'_H : die waagerechte Abweichung des Bildhauptpunktes zum Bildmittelpunkt,
- y'_H : die senkrechte Abweichung des Bildhauptpunktes zum Bildmittelpunkt,
- c: die Kamerakonstante (alt: Kammerkonstante), der Abstand vom Bildhauptpunkt, senkrecht zur Bildebene, zum Aufnahmestrahl eines Bildpunktes (Brennweite).

Die innere Orientierung ergibt sich aus der Konstruktion der Kamera und kann vom Anwender nicht beeinflusst werden. Der Beträge von x'_H und y'_H sollten möglichst klein sein, der Bildhauptpunkt also mit dem Bildmittelpunkt zusammenfallen [5].

4.6 Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung beschreibt die Position und Lage einer Kamera bzw. Messbildkamera, gegeben durch ein kamerafestes Koordinatensystem, im Raum. Der Nullpunkt dieses Koordinatensystems ist definiert durch das Projektionszentrum. Die Orientierung wird in Bezug zum Bildkoordinatensystem gesetzt. Die Herstellung dieser Abbildung wird die innere Kalibrierung genannt [6].

4.7 Die Perspektivische Projektion – Zentralprojektion

Die Zentralprojektion ist ein Verfahren zur perspektivischen Abbildung dreidimensionaler Objekte auf eine zweidimensionale Bildebene. Die Projektionsstrahlen gehen von einem gemeinsamen Projektionszentrum aus. Geraden werden als Geraden abgebildet. Parallele Geraden des Raums schneiden sich im Bild in einem gemeinsamen Fluchtpunkt. Die Zentralprojektion entspricht der Abbildung durch das menschliche Auge und ergibt somit einen natürlichen Bildeindruck.

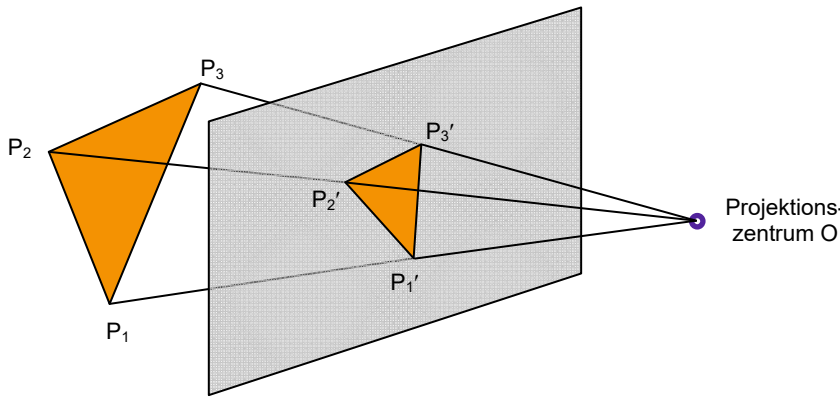


Bild A2-32 Zentralprojektion

Unser einäugiges Sehen arbeitet ebenso nach dem Prinzip der Zentralprojektion, wie die einfache Lochkamera. Das abzubildende Objekt, im **Bild A2-32** das Dreieck, wird von einem in endlicher Entfernung liegenden Projektionszentrum, wie der Irisblende des menschlichen Auges oder der Lochblende der Kamera durch die Projektionsstrahlen (Lichtstrahlen) auf eine Bildebene wie die Netzhaut oder einen fotografischen Film projiziert. In der Prinzipskizze liegt die Bildebene zwischen Objekt und Projektionszentrum. Beim Auge und der Kamera liegt sie dahinter: Die Projektionsstrahlen werden dazu über das Projektionszentrum hinaus verlängert. Wenn das Projektionszentrum unendlich weit entfernt ist, dann verlaufen die Projektionsstrahlen parallel. Diese Sonderform der Zentralprojektion wird Parallelprojektion genannt.

4.8 Kollineare Abbildung

Eine kollineare Abbildung (oder: projektive Abbildung, projektive Transformation) ist eine Abbildung zwischen Vektorräumen, die alle Geraden wieder auf Geraden abbildet. Dabei werden Quadrate auf allgemeine Vierecke abgebildet. Spezialfälle der kollinearen Abbildung sind die affinen Abbildungen. Eine Kollineation einer affinen Inzidenzebene ist eine bijektive Abbildung, bei der Punkte auf Punkte und Geraden auf Geraden (usw.) bei Inzidenzerhalt abgebildet werden und bei der die Parallelität von Geraden (usw.) invariant ist, d. h. erhalten, bleibt. Quadrate werden also auf Parallelogramme abgebildet. Ein weiterer Spezialfall ist die geometrische Bewegung bei der Quadrate auf Quadrate abgebildet werden. Eine kollineare Abbildung kann unter Verwendung homogener Koordinaten als Matrix-Vektor-Produkt geschrieben werden.

$$q = A \cdot p \tag{A2-4}$$

oder in den einzelnen Koordinaten:

$$\begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} \tag{A2-5}$$

dabei sind p und q Elemente eines projektiven Raums und p_0, p_1, p_2 oder q_0, q_1, q_2 die homogenen Koordinaten (oder projektive Koordinaten) eines Punktes in der Ebene. Die zugehörigen kartesischen Koordinaten sind über

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{p_1}{p_0} \\ \frac{p_2}{p_0} \end{pmatrix} \tag{A2-6}$$

und

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{q_1}{q_0} \\ \frac{q_2}{q_0} \end{pmatrix} \tag{A2-7}$$

gegeben. Ein typisches Beispiel für eine kollineare Abbildung ist die Zentralprojektion.

4.9 Photogrammetrische Auswertung

Der erste Schritt der photogrammetrischen Auswertung ist die Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung der Kamera.

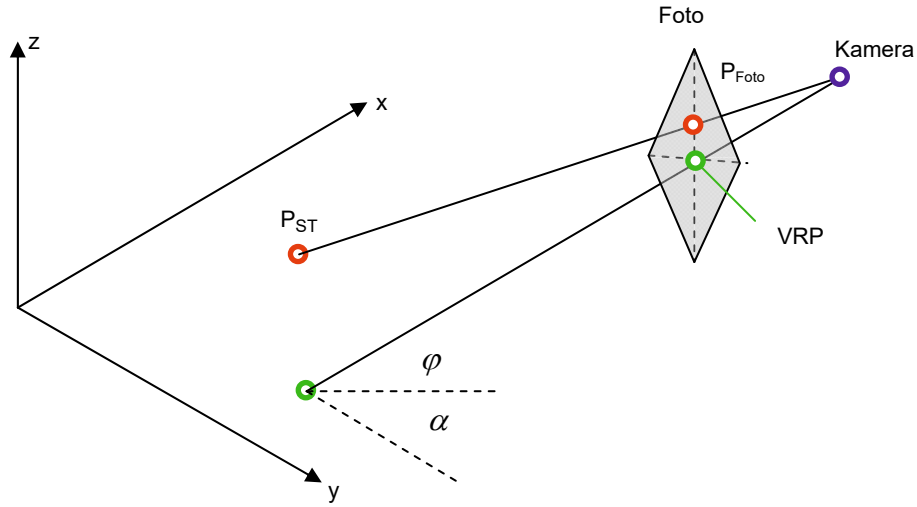


Bild A2-33 Darstellung der perspektivischen Projektion auf eine Ebene

Diese können in 2D-Photogrammetrieprogrammen, wie PC-Rect, über die Vorgabe von Referenzlängen bestimmt werden. Bei der photogrammetrischen Auswertung (Entzerrung) von Spuren auf der Fahrbahn wird meist die Einzelbildentzerrung verwendet. Hierbei werden die Bildpunkte des Fotos auf die Fahrbahnoberfläche umgerechnet. Das Ergebnis der Entzerrung ist ein Bild in Parallelprojektion, das der Oberfläche der Fahrbahn entspricht. Um von einem Foto einer Ebene zur Darstellung dieser Ebene zu gelangen, muss der optische Vorgang der Fotografie umgekehrt werden. Das entspricht der perspektivischen Projektion des Fotos auf die Ebene (vergleichbar mit der Projektion eines Dias auf eine schräg liegende Leinwand). Dieses Szenario wird im **Bild A2-33** veranschaulicht [7]:

Man sucht den Punkt P_{ST} in der *x*-*y*-Ebene (Straße), der dem Punkt P_{Foto} entspricht. Man erhält eine Transformation mit 7 Freiheitsgraden:

- der Position der Kamera (*x, y, z*),
- der Winkel φ,
- der Winkel α,
- das Verhältnis zwischen Bildgröße und Abstand des Bildes zur Kamera,
- dem Drehwinkel des Fotos gegenüber der Ebene.

Das Finden der Transformationsparameter entspricht also dem Lösen eines – wie später gezeigt wird – nichtlinearen Gleichungssystems mit sieben Unbekannten. Um die Lösung zu vereinfachen (bzw. überhaupt zu ermöglichen), werden, ohne die Transformation in ihrer Allgemeinheit zu beschränken, einige Definitionen vorgenommen:

- Die x-Koordinate der Kamera ist 0.
- Der Winkel α ist 0. Damit ist auch die x-Koordinate des VRP (View Reference Point) 0.
- Auch die y-Koordinate der Kamera ist 0.
- Der Bildmittelpunkt liegt im VRP. → Daraus folgt, dass nur komplette Fotos oder zentrierte Ausschnitte von Fotos entzerrt werden können.

Diese Annahmen sind deshalb zulässig, da nicht die absolute Position eines Punktes auf der Straße, sondern nur die relative Position gegenüber der Kamera interessant ist. Deshalb ist auch die Voraussetzung, dass sich die Straße in der x-y-Ebene befindet, zulässig.

Nach diesen Vereinfachungen bleiben vier Unbekannte, die in möglichst aussagekräftige Parameter gepackt werden sollen.

- die Höhe der Kamera über der Straße (entspricht der Augenhöhe des Fotografen),
- der Winkel PHI (Neigungswinkel der Kamera),
- der Drehwinkel der Kamera gegenüber der Straßenebene (Verdrehung zum Horizont),
- Brennweite: dem Abstand der Kamera vom VRP (von der Bildfläche). Ferner muss die Größe des Bildes (des Negatives bzw. Chipgröße bei digitalen Kameras) bekannt sein.

4.9.1 Transformation eines Punktes

In diesem Kapitel wird die mathematische Abhängigkeit zwischen einem Punkt am Bild und einem Punkt auf der Straße (x-y-Ebene) abgeleitet. Vorausgesetzt wird dabei, dass die Transformationsparameter bereits bekannt sind.

4.9.2 Erklärung der verwendeten Koordinatensysteme

Der Straßenpunkt $P = (P_x, P_y)$ wird durch die Projektion ausgehend vom Augpunkt (Projektionszentrum) durch den Bildpunkt am Foto auf die Projektionsebene (x-y-Ebene) berechnet. Der Bildpunkt wird durch seine Position in der Bildebene (B_u, B_v) angegeben (**Bild A2-34**).

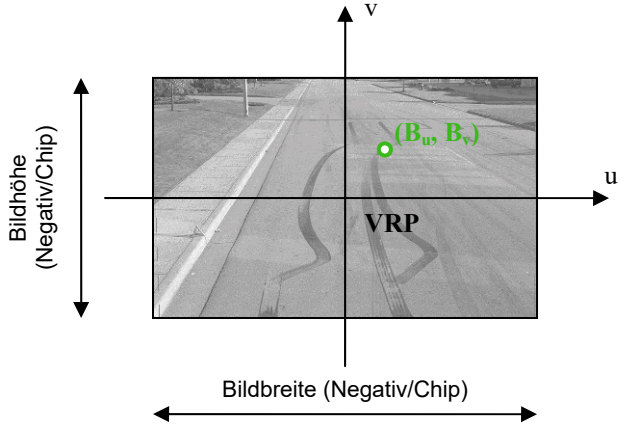


Bild A2-34 Darstellung des Koordinatensystems der Bildebene (Fotonegativ, Chip)

4.9.3 Transformation eines Bildpunktes in einen Straßenpunkt

In **Bild A2-35** wird gezeigt, wie ein Punkt, der im Bild gegeben ist (im *u*-*v*-Koordinatensystem), in den entsprechenden Straßenpunkt umgerechnet werden kann.

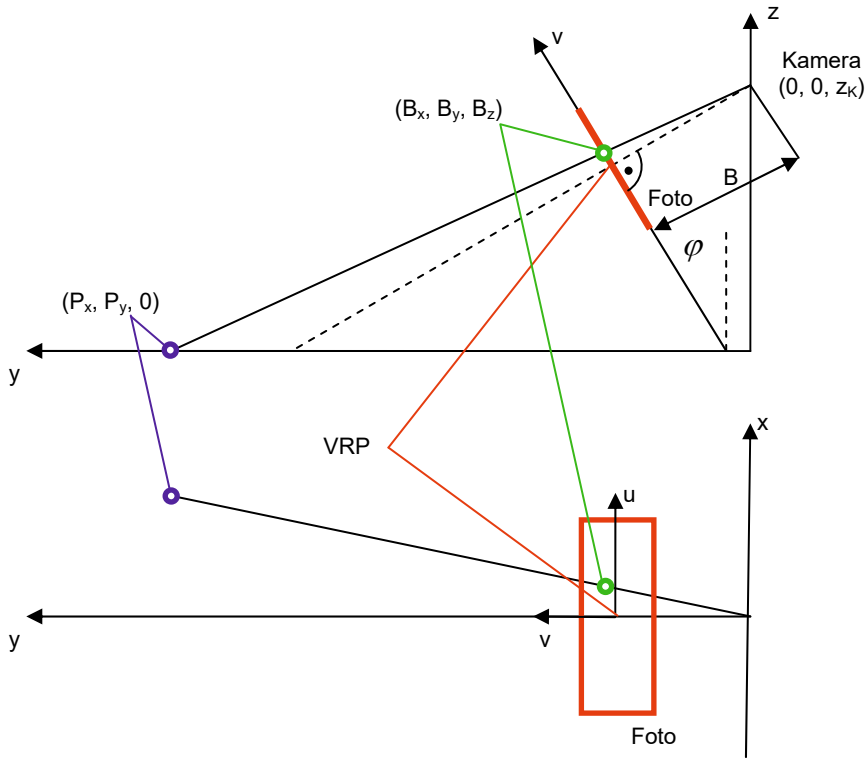


Bild A2-35 Koordinatensysteme für die Transformation

Zur Vereinfachung wird zunächst von einer Kameraposition ausgegangen, bei der die Kamera relativ zum Horizont nicht verdreht ist.

Gegeben: φ , z_K, B (Abstand von VRP zu der Kamera), (B_u, B_v)

Gesucht: (P_x, P_y) (Punkt auf der Straße)

$$\mathrm{VRP} = \begin{pmatrix} 0 \\ -B \cdot \cos(\varphi) \\ z_K - B \cdot \sin(\varphi) \end{pmatrix} \qquad \text{(A2-8)}$$

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \text{(A2-9)}$$

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{pmatrix} \tag{A2-10}$$

$$B_{xyz} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_u \\ VRP_y - B_v \cdot \sin(\varphi) \\ VRP_z + B_v \cdot \cos(\varphi) \end{pmatrix} \tag{A2-11}$$

Mittels ähnlicher Dreiecke kann anschließend der Punkt auf der Straße berechnet werden.

$$\frac{P_x}{P_y} = \frac{B_x}{B_y} \tag{A2-12}$$

$$\frac{P_y}{z_K} = \frac{B_y}{z_K - B_z} \tag{A2-13}$$

$$P_y = z_K \cdot \frac{B_y}{z_K - B_z} \tag{A2-14}$$

$$P_x = P_y \cdot \frac{B_x}{B_y} \tag{A2-15}$$

Die Drehung der Kamera um einen Winkel ψ erfolgt vor der oben beschriebenen Transformation dadurch, dass der Punkt bereits auf der Bildebene um ψ gedreht wird:

$$\begin{pmatrix} B_u^* \\ B_v^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_u \\ B_v \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{pmatrix} \tag{A2-16}$$

beschreibt eine Drehung um den Winkel ψ im Gegenuhrzeigersinn.

4.10 Streifenprojektion

Das Streifenprojektionsverfahren, das manchmal auch als Streifenlichttopometrie bezeichnet wird, fasst eine Gruppe optischer Messmethoden zusammen, bei der Bildsequenzen zur dreidimensionalen Erfassung von Oberflächen verwendet werden.

4.10.1 Prinzip

Ein Streifenprojektionssensor (**Bild A2-36**) besteht aus mindestens einem Musterprojektor, der vom Prinzip einem Diaprojektor ähnelt, sowie aus mindestens einer digitalen oder analogen Videokamera. Bei kommerziellen Systemen haben sich mittlerweile Aufbauten mit einem Projektor und ein oder zwei Kameras etabliert.

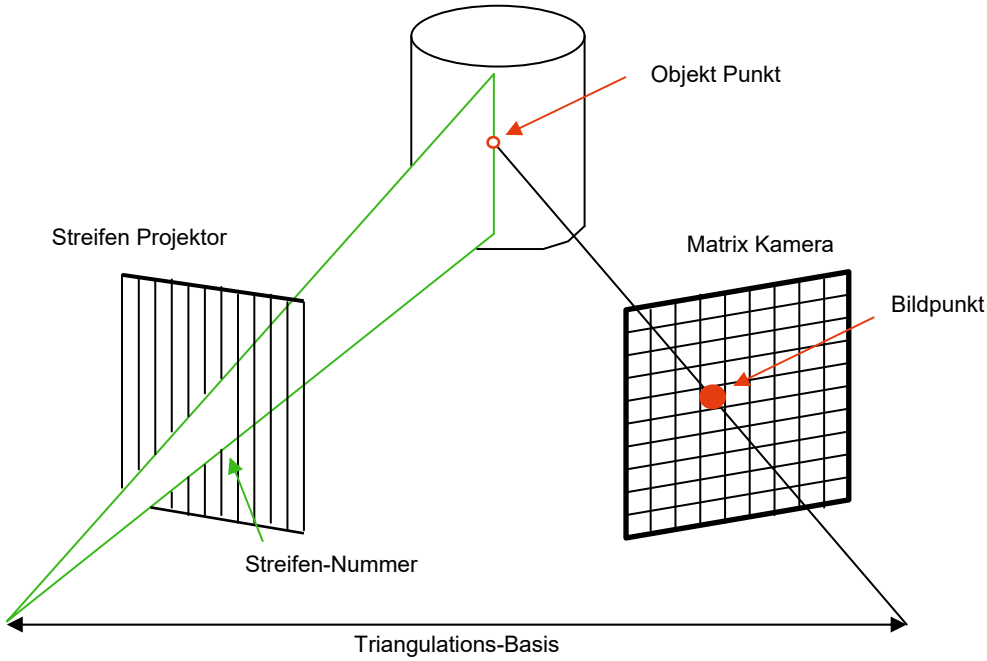


Bild A2-36 Aufbau eines Sensors, Prinzip eines Streifenprojektionssensors

4.10.2 Ablauf einer Messung

Der Projektor beleuchtet das Messobjekt zeitlich sequentiell mit Mustern von parallelen hellen und dunklen Streifen unterschiedlicher Breite. Die Kamera(s) registrieren das projizierte Streifenmuster unter einem bekannten Blickwinkel zur Projektion. Für jedes Projektionsmuster wird mit jeder Kamera ein Bild aufgenommen. Für jeden Bildpunkt aller Kameras entsteht so eine zeitliche Folge von unterschiedlichen Helligkeitswerten.

4.10.3 Berechnung der Oberflächenkoordinaten

Die gesuchten dreidimensionalen Koordinaten der Oberfläche werden in zwei Schritten berechnet.

1. Bestimmung der Projektorkoordinate

Zu einem gegebenen Objektpunkt sind die Bildkoordinaten im Kamerabild bekannt. Der Projektor entspricht einer umgekehrten Kamera. Aus der Folge von Helligkeitswerten, die aus der Bildsequenz für jeden Kamerabildpunkt gemessen wurden, kann die Nummer des Streifens berechnet werden. Im einfachsten Fall erfolgt das über einen Binärkode (z. B. einen Gray Code), der die Nummer des Streifens als diskrete Koordinate im Projektor kennzeichnet. Eine höhere Genauigkeit ist mit dem so genannten Phasenschiebeverfahren zu erreichen, da es eine nicht diskrete Koordinate bestimmen kann. Es kann entweder als Ergänzung eines Gray Codes oder als absolut messendes Heterodynverfahren eingesetzt werden.

2. Vorwärtseinschnitt

Die Streifennummer im Projektor entspricht der Bildkoordinate in der Kamera. Die Streifennummer spezifiziert eine Lichtebene im Raum, die Bildkoordinate einen Lichtstrahl. Bei bekannter Kamera- und Projektorposition kann der Schnittpunkt der Ebene und der Gerade berechnet werden. Das ist die gesuchte dreidimensionale Koordinate des Objektpunktes im Koordinatensystem des Sensors. Die geometrische Lage aller Bildstrahlen muss genau bekannt sein. Die exakte Berechnung der Strahlen erfolgt mit dem aus der Photogrammetrie bekannten Vorwärtsschnitt.

3. Kalibrierung – Strahlgeometrie einer Lochkamera

Wichtig für die Berechnung der Koordinaten und die garantierte Genauigkeit der Ergebnisse ist eine präzise Kalibrierung der Abbildungseigenschaften. Alle Abbildungseigenschaften von Projektoren und Kameras werden mit Hilfe eines mathematischen Modells beschrieben. Als Basis dient eine einfache Lochkamera, bei der alle Bildstrahlen vom Objektpunkt im dreidimensionalen Raum durch einen gemeinsamen Punkt, das Projektionszentrum, laufen und in den zugehörigen Bildpunkt auf dem Sensor oder Film abgebildet werden. Zusätzlich müssen die in diesem Modell nicht idealen Eigenschaften von realen Linsensystemen, die in Verzerrungen des Bildes resultieren, durch eine Verzeichnungskorrektur angepasst werden. Die genannten Parameter der Lochkamera sowie ihre Lage und Orientierung im Raum werden aus einer Serie von Kalibrieraufnahmen mit photogrammetrischen Methoden insbesondere mit einer Bündelausgleichsrechnung bestimmt.

4. Navigation

Eine einzelne Messung mit dem Streifenprojektionssensor ist in ihrer Vollständigkeit durch die Sichtbarkeit der Objektoberfläche eingeschränkt. Damit ein Punkt der Oberfläche erfasst werden kann, muss er vom Projektor beleuchtet und von den Kameras beobachtet werden. Punkte, die beispielsweise auf der Rückseite des Objekts liegen, müssen in einer separaten Messung unter einem anderen Blickwinkel des Sensors erfasst werden. Für ein komplexes Objekt können sehr viele (einige hundert) Einzelmessungen für die komplette Erfassung notwendig sein. Damit man die Ergebnisse aller Messungen in ein gemeinsames Koordinatensystem zusammenführen kann, sind folgende Methoden gebräuchlich: das Anbringen von punktförmigen Markern auf dem Objekt, das Matching von Objektmerkmalen, oder die genaue Messung der Sensorposition mit einem zusätzlichen Messsystem. Dieser Prozess wird als Navigation bezeichnet.

5. Genauigkeit

Die erreichbare Messgenauigkeit ist proportional zur dritten Wurzel aus dem Messvolumen. Kommerzielle Systeme erreichen Genauigkeiten von 0,005 mm bis 0,3 mm je nach technischem Aufwand und Messvolumen.

4.11 Beispiele

Bei dem dargestellten Fallbeispiel wurde eine großräumig angelegte Kreuzung photogrammetrisch vermessen. Hierzu wurden mittels Sprühkreide die Eckpunkte der einzelnen Netzmaschen markiert. **Bild A2-37** und **Bild A2-38** zeigen repräsentativ eine Netzmasche, zum einen in Richtung des Sonnenlichts (**Bild A2-37**) sowie zum anderen entgegen der Richtung des Sonnenlichts (**Bild A2-38**) fotografiert. Deutlich wird hierbei, dass in der Abbildung, welche entgegen der Richtung des Sonnenlichts aufgenommen wurde, die hinteren Punktmarkierungen auf der Fahrbahn (**Bild A2-38** – blaue Kreismarkierungen) deutlich schlechter erkennbar sind als in der in Richtung des Sonnenlichts aufgenommen Abbildung (**Bild A2-37**). In diesem Zusammenhang hat es sich weiterhin als hilfreich erwiesen, das Netzmaschensystem vollständig aus mindestens zwei entgegen gesetzten Richtungen zu fotografieren.



Bild A2-37 Netzmasche in Richtung des Sonnenlichts fotografiert

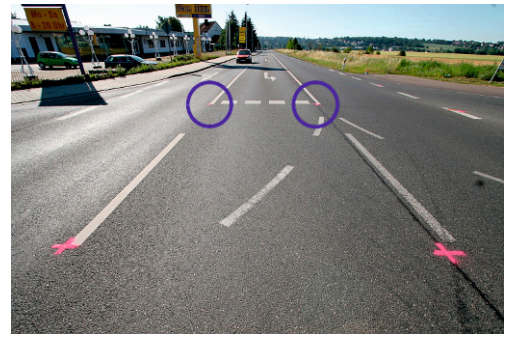


Bild A2-38 Netzmasche entgegen der Richtung des Sonnenlichts fotografiert

Mit **Bild A2-39** wird nun die photogrammetrische Auswertung in Form einer maßstabsgerechten Orthogonalansicht dargestellt. Eingeblendet ist zur Kontrolle eine Dreiecksvermessung, die als Nebenprodukt abfällt, da die einzelnen Netzmaschen nach dem Prinzip der Dreiecksvermessung zu vermessen sind. Hierbei hat es sich als hilfreich erwiesen, beide Diagonalen der einzelnen Netzmaschen zu vermessen, da hierdurch die Einzelvermessungen überprüft werden können (eine Diagonale wäre prinzipiell ausreichend).

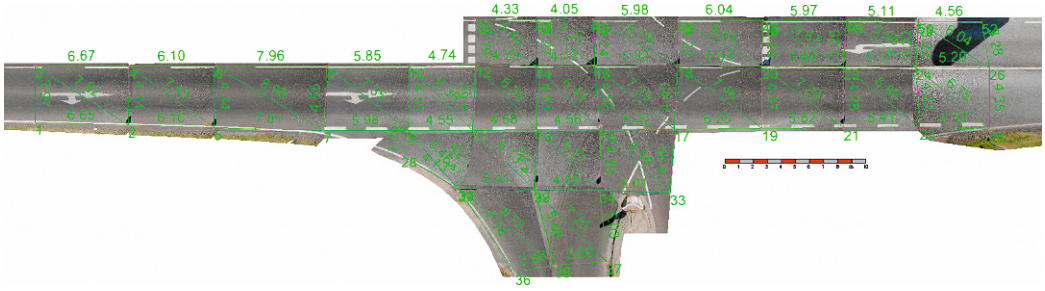


Bild A2-39 Photogrammetrische Auswertung

In dem Fall lagen Fotos von der Situation an der Unfallstelle nach dem Verkehrsunfall im Zeitraum nach dem Abtransport der beteiligten Fahrzeuge vor. Eines der Fotos zeigte die markierte Endlage des Pkw (**Bild A2-40**), das photogrammetrisch ausgewertet wurde (**Bild A2-41**).

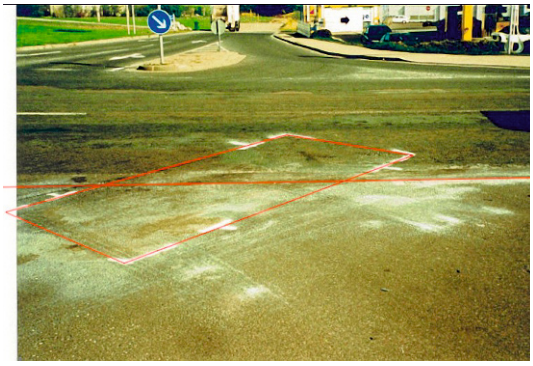


Bild A2-40 Foto von der Situation an der Unfallstelle mit Endlage des Pkw

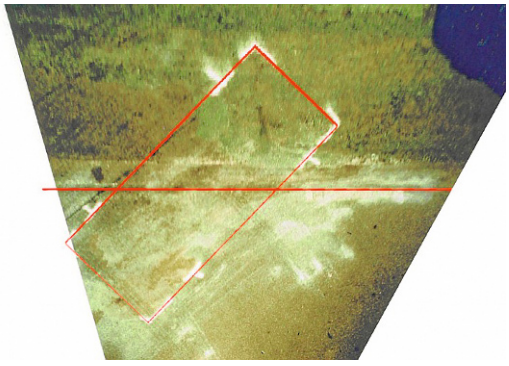


Bild A2-41 entzerrtes Foto von der Situation an der Unfallstelle mit Endlage des Pkw

Mit dieser Auswertung war die Endlage des Pkw relativ zum Fahrbahnrand deutlich besser einzugrenzen (**Bild A2-42**), da zwischen dem Verkehrsunfall und der Vermessung der Unfallstelle die Fahrbahnoberfläche und die Fahrbahnmarkierungen erneuert worden waren. Zur Anwendung der 3D-Vermessung von Unfallstellen wird auf das Kapitel C14 verwiesen.

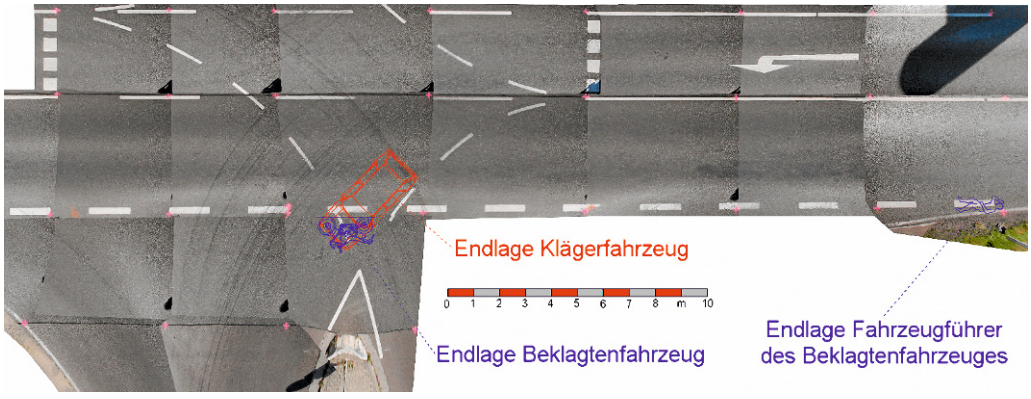


Bild A2-42 mittels beschriebener Auswertung eingegrenzte Endlage des Klägerfahrzeugs (Pkw), das Zweirad (Beklagtenfahrzeug) lag in seiner Endlage auf der Motorhaube des Pkw

4.12 Luftbilder/Orthofotos

Weiterhin an Bedeutung gewinnen werden neben den Orthofotos und Luftbildern der Landesvermessungsämter auch frei zugängliche Quellen für Orthogonalansichten. Mit **Bild A2-43** wird ein Luftbild in einer Gesamtansicht gezeigt [8].

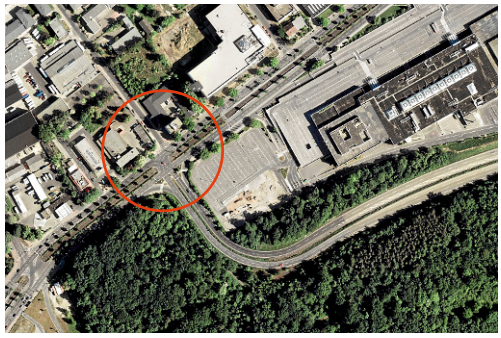


Bild A2-43 Luftbild



Bild A2-44 Ausschnitt aus **Bild A2-43**



Bild A2-45 Orthogonalansicht aus Google Earth



Bild A2-46 Ausschnitt aus **Bild A2-45**

Mit **Bild A2-44** wird ein Ausschnitt aus **Bild A2-43** zur Verdeutlichung der hohen Auflösung dargestellt. **Bild A2-45** und **Bild A2-46** zeigen eine Örtlichkeit in Google Earth [9]. Die Qualität der Orthogonalansichten in Google Earth variiert teilweise sehr stark (regional abhängig).

5 Fotografische Verfahren (Bildüberlagerung)

Für technische Betrachtungen aber auch zur Eingrenzung der Anstoßkonfiguration haben sich photographische Verfahren als wichtiges Arbeitsmittel entwickelt. Wenn hierbei entsprechende Qualitätskriterien berücksichtigt werden, sind sehr gute Ergebnisse möglich. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Betrachtungen zur Fertigung von Bildmaterial mit angelegtem Maßstab verwiesen (siehe hierzu Gliederungspunkt A27.2.6 Abbildungen mit Maßstab), da dies eine wesentliche Grundlage für die Anwendung photographischer Verfahren ist.

Fahrzeugpiktogramme, -skizzen oder auch DXF-Dateien (Vektorbilder) sind für detaillierte Spurenzuordnungen ungeeignet. Verdeutlicht wird dies mit **Bild A2-47**. Hier wurden DXF-Dateien zu einem Opel Omega B Caravan von drei verschiedenen Anbietern von Datenbanken [10] überlagert und skaliert. Deutlich werden in dieser Abbildung sowohl signifikante Differenzen in den Abmessungen als auch in den Karosseriekonturen zu den einzelnen Fahrzeugen.

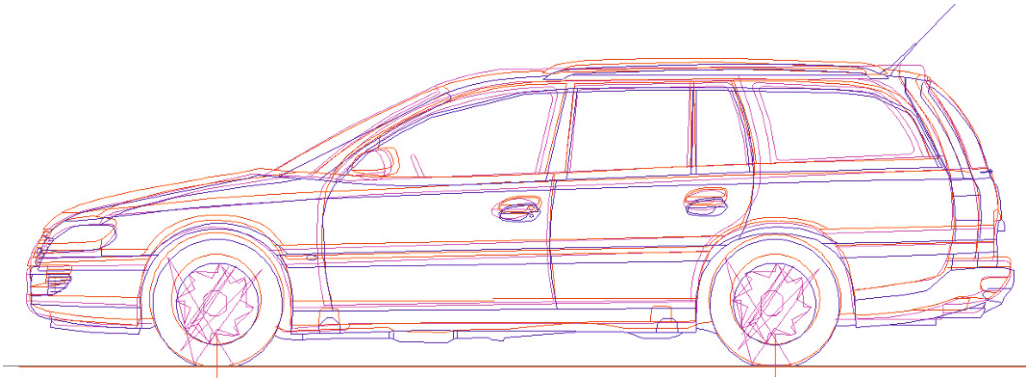


Bild A2-47 Überlagerung von DXF-Zeichnungen zu einem Opel Omega B Caravan von drei verschiedenen Datenbankanbietern [10]

Im Gliederungspunkt A27.2.6 Abbildungen mit Maßstab sind verschiedene Qualitätskriterien dargestellt, welche bei der Anfertigung von Abbildungen mit angelegtem Maßstab berücksichtigt werden sollten. Um aus dem Bildrohmaterial Bilder zu erzeugen, die für die Bildüberlagerung verwendet werden können, sollten die Abbildungen mit Bildbearbeitungsprogrammen nachbearbeitet werden (z. B. Horizontieren, Helligkeit, Kontrast, Gammakorrektur). **Bild A2-48** zeigt das Rohmaterial und **Bild A2-49** die nachbearbeitete Abbildung.



Bild A2-48 Rohbild



Bild A2-49 Optimiertes Bild

Nachfolgend wird die Vorgehensweise bei der Bildüberlagerung beschrieben [11, 12]. Die Bilddateien werden in ein handelsübliches Bildbearbeitungsprogramm eingeladen. Dieses Bildbearbeitungsprogramm muss die Maskierung, ein Übereinanderlegen einzelner Bilder bzw. Masken, eine fein abstufbare Transparenz sowie eine stufenlose Veränderung der Maskengröße ermöglichen (z. B. PhotoImpact [14]).

Je nach Anstoßanordnung muss entschieden werden, welche Abbildung als Hintergrund benutzt wird. So sollte z. B. bei einem Heckanstoß das gestoßene Fahrzeugheck als Hintergrund und die stoßende Fahrzeugfront als darüber liegende, gespiegelte Maske definiert werden. In einem Beispielfall war sowohl zur Schadenzuordnung als auch zum Geschehensablauf Stellung zu nehmen. **Bild A2-50** zeigt die Front eines vollkaskoversicherten Pkw BMW der Baureihe E39, der bei diesem Schadenfall gegen die rechte Fahrzeugseite eines Pkw Mercedes-Benz der



Bild A2-50 Beschädigungsbereich an der Fahrzeugfront des BMW



Bild A2-51 Beschädigungsbereich an der rechten Fahrzeugseite des Mercedes-Benz

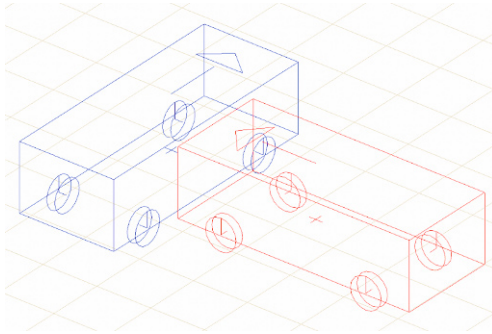


Bild A2-52 Idealisierte Kollisionsobjekte und Kollisionsanordnung

Baureihe W203 gestoßen sei (**Bild A2-51**). Beide Fahrzeuge konnten aufgrund zeitnaher Besichtigungen nach dem Schadenfall noch in beschädigtem Zustand besichtigt werden. Beim Verfahren der Bildüberlagerung ist zu beachten, dass der Zusammenstoß zweier Kollisionsobjekte, der ein dreidimensional-räumliches Problem darstellt, auf eine zweidimensional-ebene Betrachtung reduziert wird. Ideal wären quaderförmige Kollisionsobjekte, die längsachsenparallel bzw. quer kollidieren sowie Kontaktzonen mit sehr hoher/gleicher Struktursteifigkeit (**Bild A2-52**).

Da es sich bei realen Kollisionsobjekten um Körper mit mehr oder weniger stark variierenden räumlich-geometrischen Strukturen und Struktursteifigkeiten handelt, ist aber dieser Fall wenig praxisnah. Demzufolge müssen bei der Anwendung des Verfahrens der Bildüberlagerung verfahrensbedingte Vereinfachungen berücksichtigt werden. In einem weiteren Bearbeitungsschritt wird nach dem horizontalen Ausrichten der Abbildungen die Fahrzeugkontur freigestellt, um Einflüsse durch die mit fotografierte Umgebung zu vermeiden. Hiervon ausgenommen ist der Vertikalmaßstab, der zur Höhenzuordnung immer vollständig mit abzubilden ist. **Bild A2-53** zeigt die freigestellte Front des BMW und **Bild A2-54** die freigestellte rechte Seite des Mercedes-Benz.

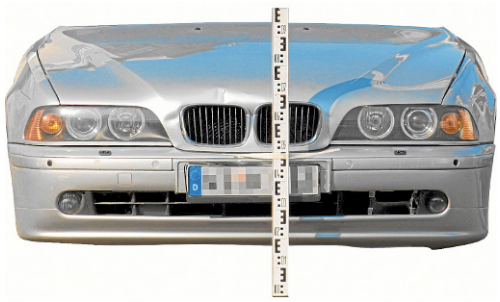


Bild A2-53 Freigestellte Fahrzeugfront des BMW



Bild A2-54 Freigestellte rechte Fahrzeugseite des Mercedes-Benz

Im Anschluss wird die freigestellte Maske von der Fahrzeugfront des BMW (**Bild A2-53**) um die Hochachse gedreht (gespiegelt), kopiert und in das Bild von der rechten Fahrzeugseite des Mercedes-Benz, welches das Hintergrundbild ist, eingefügt (**Bild A2-54**). Das horizontale Spiegeln ist notwendig, um die Seitenkompatibilität der beteiligten Kollisionsobjekte zu gewährleisten. Danach muss das eingefügte Bildobjekt skaliert werden. Dabei werden die mit fotografierten Maßstäbe nebeneinander gesetzt. Das eingefügte Bildobjekt wird verändert, bis Übereinstimmung zwischen den Maßstäben vorliegt. Das Höhen-Breiten-Verhältnis (Seitenverhältnis) des Bildes muss hierbei erhalten bleiben. In diesem Zusammenhang ist eine teiltransparente Darstellung des eingefügten Bildes sinnvoll. Der Transparenzgrad sollte solange variiert werden, bis beide Fahrzeuge hinreichend erkennbar sind. Mit **Bild A2-55** bis **Bild A2-57** werden Bildüberlagerungen für die Anordnung der Fahrzeuge bei Kollision in verschiedenen Transparenzstufen gezeigt (**Bild A2-55** – 25 %, **Bild A2-56** – 50 %, **Bild A2-57** – 75 %).



Bild A2-55 Bildüberlagerung zur Spurenzuordnung mit einer Transparenzstufe von 25 %



Bild A2-56 Bildüberlagerung zur Spurenzuordnung mit einer Transparenzstufe von 50 %



Bild A2-57 Bildüberlagerung zur Spurenzuordnung mit einer Transparenzstufe von 75 %

Mit einer detaillierten Auswertung der Beschädigungen und Spurenlagen – ob nun am Fahrzeug oder auf dem vorliegenden Bildmaterial – können nun technische Betrachtungen angestellt werden. Insbesondere für die Bewertungen zum Fahrverhalten wie Wank- und Nickbewegungen (z. B. gebremst, ungebremst, beschleunigt, Kurvenfahrt), sind jedoch in Abhängigkeit von der Anstoßanordnung nur die Spuren aus **ersten Kontakten** heranzuziehen, da die beteiligten Kollisionsobjekte bereits unmittelbar nach dem Erstkontakt, d. h. im Zeitraum kollisionärer Kontakte, erhebliche Wank- und Nickbewegungen ausführen können. Die Auswertung von Kontakten zwischen Fahrzeugzonen, die deutlich nach dem Erstkontakt erfolgten, kann somit zu erheblichen Fehlern führen. Dies wird mit dem mit **Bild A2-58** und **Bild A2-59** dargestellten Versuch deutlich, bei dem ein Mercedes-Benz W124 mit seiner Fahrzeugfront mit einer Geschwindigkeit von 16,7 km/h ungebremst mit einer Überdeckung von 100 % gegen das Fahrzeugheck eines Renault Espace 2.2 gestoßen ist [15]. **Bild A2-58** zeigt die Fahrzeuganordnung bei Erstkontakt. **Bild A2-59** stellt die Fahrzeuganordnung etwa 105 ms nach Erstkontakt dar, dem Zeitpunkt der maximalen Eindringung. Insbesondere mit **Bild A2-60**, welches eine Bildüberlagerung von **Bild A2-58** und **Bild A2-59** darstellt, wird deutlich, welche erheblichen Vertikalbewegungen in der Kontaktzone während der Kollision möglich sind, hier dargestellt zwischen dem Erstkontakt und der größten Eindringung.



Bild A2-58 Fahrzeuganordnung bei Erstkontakt



Bild A2-59 Fahrzeuganordnung etwa 105 ms nach Erstkontakt (maximalen Eindringung)

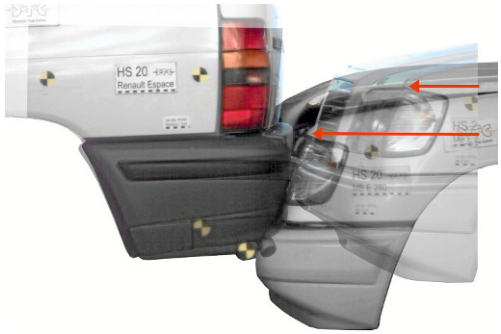


Bild A2-60 Bildüberlagerung von **Bild A2-58** und **Bild A2-59** mit Höhendifferenz

Besonders bei gleich- oder ähnlich farbigen Fahrzeugen kann der Kontrast zwischen den Bildern sehr gering sein. Zur Kontrasterhöhung hat sich die invertierte Darstellung (Negativfarbe) eines Bildes sowie auch das Nachzeichnen von wesentlichen Konturen bewährt. Nach dem Einbinden des eingefügten Bildobjekts kann das Ergebnisbild unter einem neuen Namen gespeichert werden und steht für weitere Anwendungen zur Verfügung. Verschiedene Bildbearbeitungsprogramme bieten die Möglichkeit, die Abbildungen in einem Datenformat zu speichern, bei denen die verschieb- und skalierbaren Masken erhalten bleiben. Bei Fahrzeuganordnungen, die deutlich von der Fahrzeuglängsachsenparallelität bzw. vom rechten Winkel zwischen den Fahrzeuglängsachsen abweichen, sollten Zuordnungen nur bezüglich der Höhenlagen vorgenommen werden. Die durch Spurenzuordnung und Bildüberlagerung erzeugte Abbildung kann im Weiteren in einem Simulationsprogramm zur korrekten Positionierung der Fahrzeuge bzw. Kollisionsobjekte bei Kollision verwendet werden. Gerade die Ermittlung der korrekten Position der Fahrzeuge bzw. Kollisionsobjekte bei Kollision ist von eminenter Bedeutung für die hierauf basierenden rechnerischen Betrachtungen zum Unfallablauf, mithin die Verwendung von Simulationsprogrammen. **Bild A2-61** zeigt die Ermittlung der Fahrzeuganordnung bei Kollision unter Verwendung der Bildüberlagerung in **Bild A2-55**. Aufgrund der zweidimensionalen Betrachtungsweise kann mit dem Verfahren der Bildüberlagerung jedoch der Winkel zwischen den Fahrzeuglängsachsen nicht ermittelt werden. Die Schrägstellung der Fahrzeuge bei Kollision relativ zueinander kann, wenn weitere Anknüpfungsinformationen nicht vorliegen, nur anhand der Beschädigungen und Spurzeichnungen abgeschätzt werden. Diese Vorgehensweise hat jedoch keine sehr hohe Genauigkeit.

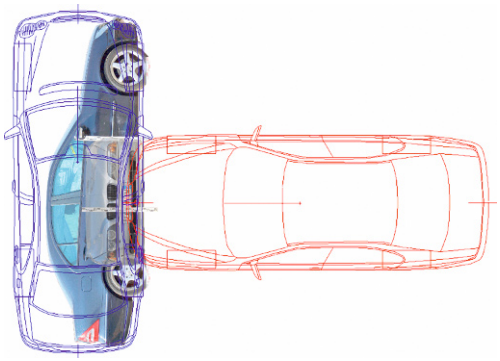


Bild A2-61 Bestimmung der Anstoßkonfiguration unter Zuhilfenahme von **Bild A2-55**



Bild A2-62 Bildüberlagerung für die Fahrzeuganordnung bei Kollision ohne Berücksichtigung des Winkels zwischen den Fahrzeuglängsachsen

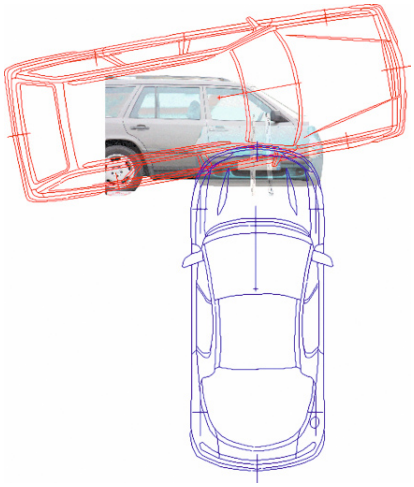


Bild A2-63 Anstoßkonfiguration mit **Bild A2-62** sowie Abschätzung des Winkels zwischen den Fahrzeuglängsachsen anhand der Spurenlagen

Zum Beispiel zeigt hierzu **Bild A2-62** die Bildüberlagerung zur Ermittlung der Anstoßanordnung, wobei hierbei der Winkel zwischen den Fahrzeuglängsachsen noch nicht abschließend berücksichtigt wurde. Mit **Bild A2-63** wird die unter Berücksichtigung der mit **Bild A2-62** eingegrenzten prinzipiellen Fahrzeuganordnung sowie unter Berücksichtigung der Beschädigungen und Spurzeichnungen an beiden beteiligten Fahrzeugen ermittelte Anordnung bei Kollision relativ zueinander dargestellt. Zu qualitativ besseren Ergebnissen würde die Verwendung von hinreichend genauen 3D-Modellen führen, was jedoch derzeit noch mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Mit dem Verfahren der Bildüberlagerung können neben Kollisionen zwischen Fahrzeugen auch Kollisionen zwischen Fahrzeugen und anderen Kollisionsobjekten untersucht werden.

Hierzu zeigt **Bild A2-64** die Bildüberlagerung zu einer Streifkollision zwischen einem Pkw und einer Mauer, **Bild A2-65** die Bildüberlagerung zu einer Kollision zwischen der Front eines Pkw und einem Baum sowie **Bild A2-66** die Bildüberlagerung zu einer Streifkollision zwischen einem Roller mit Aufsassen und einem Pkw. Insbesondere dann, wenn das Bildmaterial zu den Spurenlagen an den Kollisionsobjekten von hinreichender Qualität ist, kann dieses Bildmaterial bei der Bildüberlagerung verwendet werden. Hinreichend heißt hierbei, dass das Bildmaterial zumindest ansatzweise quer zum Fahrzeug aufgenommen wurde und eine hinreichende Anzahl von Punkten bzw. Bereichen abgebildet ist, um das Fremdbild in eine Abbildung mit Maßstab einzubetten. Insbesondere dann, wenn die Blickrichtung von der Senkrechten auf die Fahrzeugkarosserie abweicht, ist diese Vorgehensweise nur mit nahezu ebenen Bereichen zulässig. Bei räumlich gekrümmten Bereichen kann es bei der Anpassung der eingebetteten Abbildung in die Abbildung mit Maßstab zu unzulässigen Verzerrungen kommen.



Bild A2-64 Bildüberlagerung (Mauerkollision)



Bild A2-65 Bildüberlagerung (Baumkollision)



Bild A2-66 Bildüberlagerung zur Kollision zwischen einem Pkw und einem Zweirad

Bild A2-67 zeigt eine Bildüberlagerung zu einem Schadenfall, bei dem ein Volkswagen Caddy nahezu die komplette linke Seite eines BMW E38 streifend kontaktiert haben soll. Bei dieser Bildüberlagerung wurde Bildmaterial vom beschädigten Volkswagen Caddy sowie von einem Vergleichsfahrzeug zum BMW verwendet. Ergänzend wurde eine Abbildung von der Beschädigungszone an den beiden linken Türen des BMW (Bildmaterial zum Schadengutachten) in das Vergleichsfahrzeug zum BMW mit guter Übereinstimmung eingebettet. Die Anpassung erfolgte hierbei unter anderem über Spaltmaße und Sicken. Weiterhin sind beispielsweise die mit **Bild A2-52** gezeigten idealisierten Verhältnisse bei der Kollision von Fahrzeugen/Kollisionsobjekten in der Realität in der Regel nicht anzutreffen. Dies wird repräsentativ mit **Bild A2-68** deutlich.



Bild A2-67 Bildüberlagerung mit eingebettetem Bildmaterial vom Schadenumfang



Bild A2-68 Infolge stark unebener Fahrbahn um die Längsachse geneigtes Fahrzeug

Die zweidimensionale Untersuchung mit horizontal ausgerichteten Fahrzeugen kann hier zu erheblichen Fehlern bei der Schadenzuordnung führen. Gerade auf unebenen Fahrbahnen kann es in den unteren Fahrzeugbereichen zu intensiven Kontakten kommen, ohne dass in den oberen Abschnitten vergleichbar intensive Schäden zu finden sind. Dies kann auch dazu führen, dass bei Streifkollisionen auf nahezu ebenen Fahrbahnen häufig anzutreffende Außenspiegelkontakte auf unebenen Fahrbahnen nicht vorhanden sind. In diesem Zusammenhang sei auch auf einseitig auf einem erhöhten Bürgersteig abgestellte Fahrzeuge hingewiesen. Die zwischen den beteiligten Kollisionsobjekten und innerhalb der Kontaktzonen stark variierenden Strukturseifigkeiten müssen bei der Anwendung des Verfahrens in die Überlegungen einfließen.

Vorgeschlagen wird, dass einer Bildüberlagerung Angaben zu den Daten der verwendeten Kamera, hier insbesondere zur Brennweite, beigefügt werden. Exif-Daten (Exchangeable Image File Format [16]) können mit geeigneten Computerprogrammen [17] in einfacher Weise aus dem mit einer Digitalkamera generierten Bildmaterial ausgelesen werden. Im Zusammenhang mit der Dokumentation, Vermessung sowie Analyse von Schäden und Spurzeichnungen an Fahrzeugen/Kollisionsobjekten werden 3D-Verfahren zunehmend an Bedeutung gewinnen.

6 Sonnenstand

Häufig wird von Fahrzeugführern, hier vorzugsweise den Fahrzeugführern der verursachenden Fahrzeuge, als ursächliche Erklärung für ein entsprechendes Fahrverhalten eine Sonnenblendung angegeben. Hier kann, sofern zum Schadenzeitpunkt tatsächlich die Sonne schien, vergleichsweise einfach geprüft werden, welche Richtung die Sonne relativ zum Fahrzeug hatte.



Bild A2-69 Schadenbild am Fiat Ducato



Bild A2-70 Schadenbild am Honda Accord

In dem hierzu als Beispiel dargestellten Schadenfall hatte der Fahrzeugführer eines Fiat Ducato (**Bild A2-69**) angegeben, infolge Sonnenblendung die Blinkleuchte eines vor ihm abbremsenden Honda Accord (**Bild A2-70**) nicht gesehen zu haben. In einem ersten Schritt werden die Geo-Koordinaten [18] der Unfallörtlichkeit ermittelt. Dies kann in einfacher Art und Weise beispielsweise mit Hilfe diverser Programme oder Internettools erfolgen, z. B. [19]. Im Weiteren können die Geo-Koordinaten bei einer Ortsbesichtigung auch mit mobilen oder in Fahrzeugen fest installierten Navigationssystemen festgestellt werden. In einem weiteren Schritt ist der Zeitpunkt des Kollisionsereignisses zu ermitteln.Hierbei ist die Differenz zur GMT (Greenwich Mean Time [20]) sowie die Zeitumstellung (Sommer-/Winterzeit) zu beachten [21]. Für den zu betrachtenden Schadenfall wurden die Geo-Koordinaten mit Hilfe eines Routenplaners mit der

Länge 07°34′24′′ Ost und der Breite 50°21′26′′ Nord ermittelt. Im Jahr 2002 war vom 31.03.2002 bis zum 27.10.2002 Sommerzeit. Demzufolge war zum angegebenen Schadenzeitpunkt, dem 04.07.2002, Sommerzeit [21]. Damit ergibt sich eine Zeitverschiebung von zwei Stunden zur GMT. Mit diesen Werten können nun unter Verwendung geeigneter Anwendungen [22, 23] der Sonnenstand (Azimut- und Höhenwinkel) sowie der Sonnenaufgang und -untergang berechnet werden. **Bild A2-71** zeigt die Berechnungen zum Stand der Sonne für die angegebene Schadenörtlichkeit sowie für den angegebenen Schadenzeitpunkt am 04.07.2002 um 20:50 Uhr. Demzufolge hatte die Sonne zu diesem Zeitpunkt einen Höhenwinkel von 6,28° und einen Azimutwinkel von 298,63°.

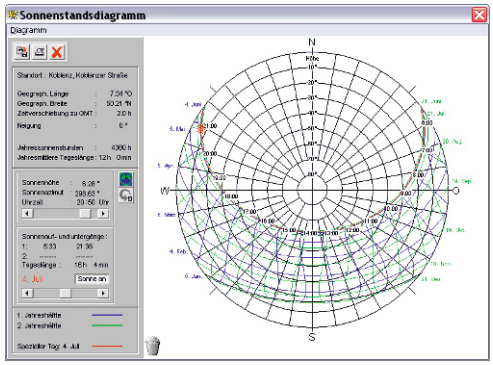


Bild A2-71 Sonnenstandberechnung

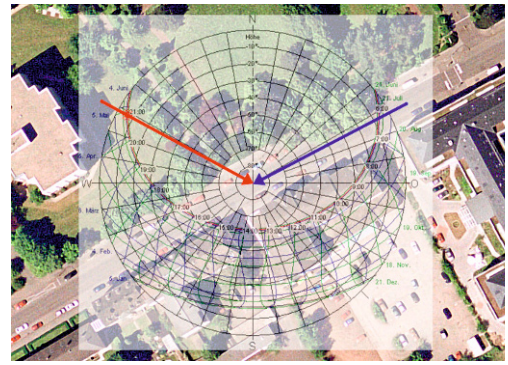


Bild A2-72 Bildliche Verknüpfung von Sonnenstandberechnung und Orthophoto



Bild A2-73 Korrektes Zeitfenster

Zur visuellen Darstellung der Berechnungsergebnisse kann nun das Sonnenstandsdiagramm mit einer maßstabsgerechten Orthogonalansicht vom angegebenen Schadenort mittels Bildüberlagerung verknüpft werden (**Bild A2-72**). In vorliegendem Fall wurde ein Orthophoto [24] verwendet. Wesentlich ist, dass sowohl die Sonnenstandberechnung als auch das Orthophoto übereinstimmend ausgerichtet sind, beispielsweise nach Norden. In **Bild A2-72** markiert der rote Pfeil die Position der Sonne (Azimut), mithin die Richtung, aus der die Sonne auf den Kollisionsort scheint. Der blaue Pfeil kennzeichnet die Fahrtrichtung beider Fahrzeuge. Insbesondere mit dem zum angegebenen Schadenzeitpunkt kleinen Höhenwinkel von etwas mehr als 6° können sowohl Bewuchs als auch Bebauung am angegebenen Schadenort in Richtung der Sonne von Bedeutung sein. Dies kann allein mit einer Draufsicht, wie in **Bild A2-72** zu sehen, nicht geklärt werden. Somit ist die diesbezügliche Untersuchung des angegebenen Schadenortes notwendig. In vorliegendem Fall wurden ein Jahr nach dem angegebenen Schadenfall (Datum) zur angegebenen Uhrzeit (**Bild A2-73**) am angegebenen Schadenort Sichtversuche durchgeführt. **Bild A2-74** zeigt hierzu die Sichtverhältnisse in Fahrtrichtung der beiden beteiligten Fahrzeuge. Mit **Bild A2-75** werden die Sichtverhältnisse für den Fahrer des Fiat Ducato in Richtung der Sonne verdeutlicht.



Bild A2-74 Sichtverhältnisse in Fahrtrichtung



Bild A2-75 Sichtverhältnisse für den Fahrer des Fiat Ducato entgegen der Sonne

7 Daten und Informationen

7.1 Auswertung der Unterlagen

Digitalbilder haben sich zur Dokumentation von technischen Sachverhalten nahezu vollständig durchgesetzt. Erfreulicherweise ist zwischenzeitlich auch die recht schädliche Diskussion insbesondere um die „Möglichkeiten“ einer Bildmanipulation abgeebbt, die teilweise doch schon recht skurrile Auswüchse annahm [25]. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auf die klärenden Worte in [26] zu verweisen.



Bild A2-76 Bildausdruck auf Normalpapier



Bild A2-77 Originaldatei



Bild A2-78 Versuch einer Optimierung zu **Bild A2-76**



Bild A2-79 Versuch einer Optimierung zu **Bild A2-77**

Allerdings werden derzeit Digitalbilder (noch) überwiegend mit Tintenstrahl- oder Laserdruckern auf Normalpapier ausgedruckt. Die Qualität dieser Unterlagen steht hinter konventionellen Fotos bzw. Ausdrucken von Digitalbildern auf hochwertigem Fotopapier deutlich zurück. **Bild A2-76** zeigt repräsentativ ein auf Normalpapier ausgedrucktes Digitalbild aus einem Schadengutachten zu einem Streifschaden. Mit **Bild A2-77** wird die entsprechende digitale Bilddatei gezeigt, die zwar mit einer Auflösung von etwa 1,6 MPx noch Potenzial für eine Qualitätssteigerung hat, aber selbst in unbearbeitetem Zustand bereits deutlich mehr Details als der Ausdruck erkennen lässt. Der Versuch einer Bildoptimierung scheitert bei dem Ausdruck systembedingt (**Bild A2-78**). Wo keine Informationen vorhanden sind, können auch keine Informationen generiert werden. Dementgegen hat die qualitativ mäßige Bilddatei (**Bild A2-77**) durchaus noch Optimierungspotenzial (**Bild A2-79**).

Aus genannten Gründen ist es erforderlich, von ausgedruckten Digitalbildern die Originalbilddateien anzufordern. Moderne Computertechnik ermöglicht die problemlose Bereitstellung von Bilddateien per E-Mail, über einen Server oder auch auf einem geeigneten Datenträger.

7.2 Untersuchung und Dokumentation der beteiligten Fahrzeuge/Kollisionsobjekte

Technische Untersuchungen erfordern eine qualitativ hochwertige Bilddokumentation. Ideal wäre eine Besichtigung der Fahrzeuge/Kollisionsobjekte sowohl in ereignisursächlich beschädigtem Zustand, als auch nach der Reparaturdurchführung. Zum einen sind die ereignisursächlichen Beschädigungen wichtig für die technischen Betrachtungen, z. B. für die Spurenzuordnung. Zum anderen liefert die Fahrzeuguntersuchung nach der Reparatur Hinweise auf die Qualität und Quantität der Reparaturdurchführung. Leider ist festzustellen, dass die Möglichkeiten der modernen Digitalfotografie häufig ausschließlich dazu genutzt werden, die Kosten für die Bildfertigung zu reduzieren. Hierbei bleibt dann die Qualität des Bildmaterials häufig dramatisch auf der Strecke. Konnte bei der klassischen Fotografie die qualitätsbestimmende Auflösung des Negativs vom Anwender nicht beeinflusst werden, so besteht diese Möglichkeit bei Digitalkameras durchaus, in dem die Auflösung auf niedrige Werte eingestellt wird.

Wird bei der Weiterverarbeitung zusätzlich noch ein hoher Kompressionsfaktor gewählt, sind Details nicht mehr erkennbar und eine Rekonstruktion des Bildmaterials ist nahezu ausgeschlossen. Vielfach werden immer noch Bilder einer Größe von 640 x 480 Px (Pixel) geliefert. Dies entspricht einer Auflösung von etwa 0,3 MPx (Megapixel). Zur Beweissicherung eignen sich Digitalkameras mit einer Auflösung von mindestens 10 MPx oder mehr. Digitale SLR-Kameras mit 10 MPx werden bereits für deutlich unter 1.000 Euro angeboten. Die Kompression beim Speichern in der Kamera sowie bei der Weiterverarbeitung muss auf ein Minimum reduziert werden. Der Verlust an Qualität durch Kompression eines JPEG-Bildes kann beispielsweise gut daran dargestellt werden, wie die Anzahl der Farben bei der Kompression reduziert wird. Die ursprüngliche Bilddatei, so wie diese aus der Kamera geladen wurde, hat eine Größe von 2.304 kB und 274.790 Farben (**Bild A2-80** und **Bild A2-81**). Beim Abspeichern des Bildes ohne Veränderung der Auflösung aber mit einem Kompressionsfaktor von 50 % reduziert sich zwar die Dateigröße auf 285 kB, allerdings auch die Anzahl der Farben auf 176.843. Hierbei ist bereits die Ausbildung von Artefakten (Bildfehler, die durch eine verlustbehaftete Kompression entstehen) deutlich erkennbar (**Bild A2-82** und **Bild A2-83**). Wird nun das Ursprungsbild ohne Veränderung der Auflösung mit einem Kompressionsfaktor von 90 % gespeichert, reduziert sich die Dateigröße nur noch unwesentlich auf 207 kB, die Anzahl der Farben im Bild jedoch

signifikant von ursprünglich 274.790 auf 50.892. Die Ausbildung von Artefakten hat sich nochmals deutlich verstärkt (**Bild A2-84** und **Bild A2-85**).



Bild A2-80 274.790 Farben; Größe 2.304 kB



Bild A2-81 Ausschnitt aus **Bild A2-80**



Bild A2-82 176.843 Farben; Größe 285 kB

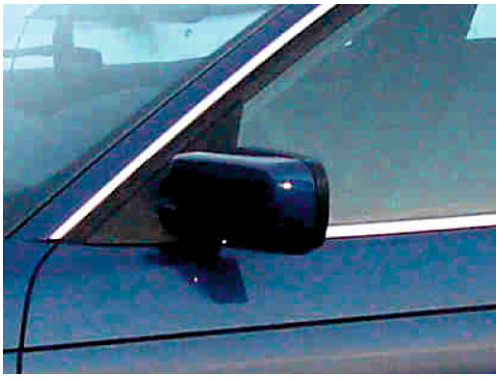


Bild A2-83 Ausschnitt aus **Bild A2-82**



Bild A2-84 50.892 Farben; Größe 207 kB



Bild A2-85 Ausschnitt aus **Bild A2-84**

Bild A2-86 zeigt den prinzipiellen Zusammenhang zwischen Kompressionsfaktor und Dateigröße bzw. Anzahl der Farben. Erkennbar ist, dass sich ab einem Kompressionsfaktor von etwa 40 % die Dateigröße durch Vergrößerung der Kompression nicht mehr wesentlich verkleinern lässt, sich aber die Bildqualität bereits ab einem Kompressionsfaktor von 20 % signifikant verschlechtert. Muss die Dateigröße von Digitalbildern verkleinert werden, ist es günstiger, die Auflösung mittels eines geeigneten Programms zu reduzieren und hierbei den Kompressionsfaktor niedrig zu halten. Bei Bedarf kann das in der Auflösung reduzierte Bildmaterial dann mittels ebenfalls geeigneter Software (z. B. [27]) – in Grenzen – wieder vergrößert werden.

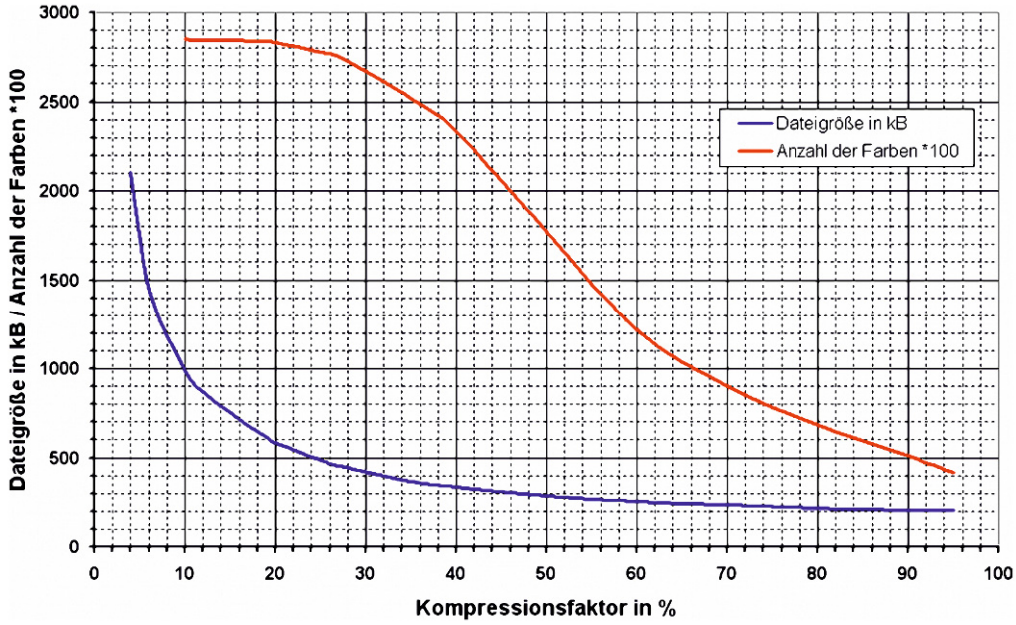


Bild A2-86 Dateigröße und Anzahl der Farben als Funktion des Kompressionsfaktors

Mit einer derartigen Vorgehensweise kann zwar die ursprüngliche Qualität des Bildes nicht wieder hergestellt werden, jedoch können insgesamt durchaus gute Ergebnisse erzielt werden. Bei der Bearbeitung eines Digitalbildes sollte das Original unangetastet bleiben, d. h., es wird mit einer qualitativ identischen Kopie gearbeitet. Es muss auch davor gewarnt werden, ganz auf das Speichern der digitalen Bilddateien zu verzichten und das Bildmaterial nur noch in Form von PDF-Dateien abzulegen. Technische Bewertungen erfordern eine umfängliche bildliche Dokumentation der Spurenlagen an den beteiligten Fahrzeugen bzw. Kollisionsobjekten. Hierzu hat sich die nachfolgende Vorgehensweise bewährt:

- diagonale Übersichtsaufnahmen, um das Fahrzeug vollständig und allseitig abzubilden,
- Aufnahmen zur Identifizierung und Individualisierung,
- Aufnahmen zur Ausstattung, zum technischen Zustand und zu technischen Details,
- Abschnittsaufnahmen vom Beschädigungsbereich mit großzügigen Überlappungen zu unbeschädigten Bereichen und benachbarten Schadenbereichen,
- Detailaufnahmen, um wesentliche Einzelspurenlagen zu zeigen sowie
- Aufnahmen mit angelegtem Maßstab für geometrische Untersuchungen.

7.2.1 Übersichtsaufnahmen

Übersichtsaufnahmen dienen zur allseitigen Dokumentation des Objekts. Der Fokus wird noch nicht speziell auf die Beschädigungen gerichtet. Diagonale Übersichtsaufnahmen über die vier Fahrzeugecken (**Bild A2-87** bis **Bild A2-90**) sollten grundsätzlich angefertigt werden.



Bild A2-87 Übersichtsaufnahme vorn rechts



Bild A2-88 Übersichtsaufnahme vorn links



Bild A2-89 Übersichtsaufnahme hinten rechts



Bild A2-90 Übersichtsaufnahme hinten links

7.2.2 Abbildungen zur Identifizierung und Individualisierung

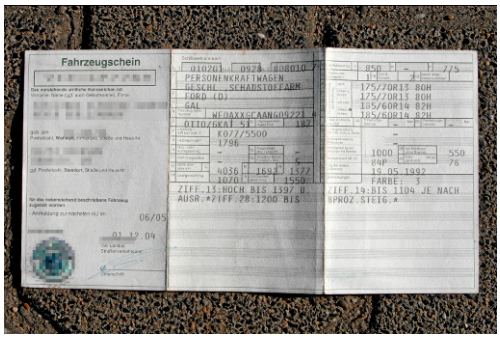


Bild A2-91 Fahrzeugschein

Aussagefähige Abbildungen zur Identifizierung und Individualisierung eines Fahrzeugs sollten schon aus Gründen der eigenen Absicherung angefertigt werden. Dies betrifft insbesondere Abbildungen vom Fahrzeugbrief und/oder Fahrzeugschein (**Bild A2-91**) bzw. den Zulassungsbescheinigungen Teil II und/oder Teil I, von der eingeprägten Fahrzeug-Ident-Nummer (**Bild A2-92**) und vom Typenschild (**Bild A2-93**).

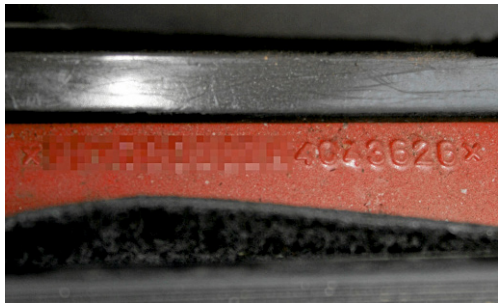


Bild A2-92 Fahrzeug-Ident-Nummer (FIN)

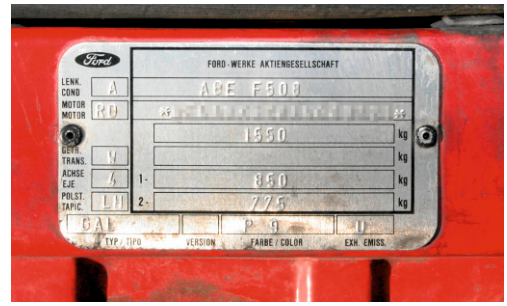


Bild A2-93 Typenschild

7.2.3 Abbildungen zum technischen Zustand, zu technischen Details und zur Ausstattung

Zur Dokumentation des technischen Zustands, der technischen Details und der Ausstattung eines Fahrzeugs sind aussagefähige Abbildungen zu fertigen. **Bild A2-94** bis **Bild A2-97** zeigen die am Tachometer angezeigte Laufleistung, den Zustand des Motorraums, den Zustand des Innenraums sowie die Reifendimension. Um störende Reflexionen durch das Blitzlicht zu vermeiden, kann bei der Dokumentation des am Tachometer angezeigten km-Standes die Kamera auf hohe ISO-Werte (z. B. ISO 1600 oder höher) bzw. auf ISO-Automatik eingestellt und der Blitz ausgeschaltet werden (**Bild A2-94**). Hohe ISO-Werte haben bei modernen Digitalkameras nicht mehr den negativen Einfluss wie noch bei der klassischen Fotografie mit Negativfilmen.



Bild A2-94 Abgelesener km-Stand



Bild A2-95 Zustand des Motorraums



Bild A2-96 Zustand des Fahrzeuginnenraums



Bild A2-97 Reifendimension

Weiterhin sollten Reparaturspuren, z. B. Lackabklebekanten (**Bild A2-98**), Hinweise auf Vorschäden, z. B. Aufplatzungen von dickschichtig aufgetragenem Spachtelmaterial (**Bild A2-99**), und auch Messungen der Schichtdicken (**Bild A2-100**) bildlich dokumentiert werden. Während für die Bildfertigung gut ausgestattete digitale Spiegelreflexkameras den Stand der Technik markieren, haben auch kleinere Digitalkameras durchaus ihre Berechtigung. Da die Besichtigung eines Fahrzeugs gelegentlich nicht auf einer Hebebühne oder unter Verwendung eines sonstigen geeigneten Hebezeugs erfolgen (kann), haben sich insbesondere zur Dokumentation des Zustands des Unterbodens kleine Digitalkameras mit hoher Auflösung bewährt. Die Kamera wird auf den Boden aufgesetzt und leicht schräg nach oben gehalten. Durch Variation des Blickwinkels nach oben sowie großzügige Überdeckung der abgebildeten Bereiche kann mit Einsatz des Blitzlichts eine gute Dokumentation des Unterbodens erfolgen (**Bild A2-101**). Im Zusammenhang mit der Dokumentation des technischen Zustands aber auch der Beschädigungen kann nach einer Reparaturdurchführung das Aufsuchen der Altteile einen wesentlichen



Bild A2-98 Lackabklebekante



Bild A2-99 Aufbruch von dickschichtig aufgetragenem Spachtelmaterial (Vorschaden)

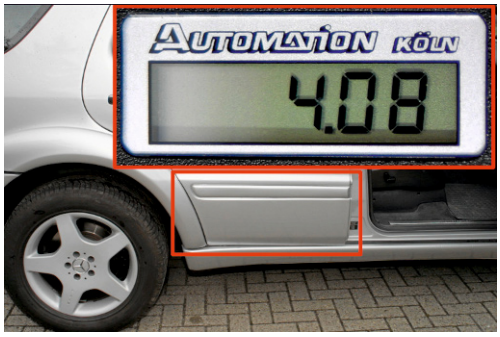


Bild A2-100 Dokumentation der Schichtdickenmessung



Bild A2-101 Dokumentation des Unterbodens

Informationsgewinn darstellen. **Bild A2-102** zeigt zum einen die bei einem Ortstermin aus einem Schrottcontainer geborgenen Altteile in einer Übersichtsaufnahme. Mit **Bild A2-103** wird zum anderen repräsentativ das Seitenteil rechts hinten gezeigt. Insbesondere mit der mäßigen Qualität des Bildmaterials zum Schadengutachten war eine Spurendokumentation bedeutsam.



Bild A2-102 aus einem Schrottcontainer entnommene Altteile



Bild A2-103 aus einem Schrottcontainer entnommenes Altteil (Seitenteil)

7.2.4 Abschnittsaufnahmen

Abschnittsaufnahmen vom Schadenbereich sollten in großzügiger Überlappung so gefertigt werden, dass der Beschädigungsbereich sowie angrenzende, unbeschädigte Zonen formatfüllend dargestellt werden. Hierbei wird aus verschiedenen Winkeln, jedoch im Wesentlichen näherungsweise quer zur Karosseriekontur fotografiert. Der Versuch, durch Schrägansichten ein Maximum des Fahrzeugs abzubilden, ist bezüglich der Abbildungsqualität kontraproduktiv. **Bild A2-104** bis **Bild A2-112** zeigen beispielsweise die linke Fahrzeugseite eines Ford Focus in Abschnittsaufnahmen, welcher im Rahmen einer Streifkollision beschädigt wurde.



Bild A2-104 Abschnitt 1



Bild A2-105 Abschnitt 2



Bild A2-106 Abschnitt 3



Bild A2-107 Abschnitt 4



Bild A2-108 Abschnitt 5



Bild A2-109 Abschnitt 6



Bild A2-110 Abschnitt 7



Bild A2-111 Abschnitt 8



Bild A2-112 Abschnitt 9

Sonnenlicht sollte bei der Ausleuchtung des Beschädigungsbereichs ausgenutzt werden. **Bild A2-113** und **Bild A2-114** zeigen Fotos zu einem Schadengutachten, bei denen gleich mehrere Möglichkeiten bestanden hätten, ein besseres Abbildungsergebnis zu erzielen. In der Übersichtsaufnahme (**Bild A2-113**) wird viel Landschaft und wenig Fahrzeug gezeigt. Auch ist das Fahrzeug unvollständig abgebildet. Der Anstoßbereich am Fahrzeug befindet sich an der rechten Fahrzeugseite, die Sonne scheint jedoch von links auf das Fahrzeug, was mit dem Schattenschlag deutlich wird. Da das Fahrzeug fahrfähig und der Fahrer bei der Besichtigung anwesend war, hätte das Fahrzeug leicht so abgestellt werden können, dass die Sonne auf den Schadenbereich scheint. Letztendlich wurde insbesondere bei der Fertigung der Abschnittsaufnahmen auf die Verwendung eines leistungsfähigen Blitzlichts verzichtet. Diese Faktoren führen dazu, dass informationsarme Abbildungen zu den Beschädigungen und Spurzeichnungen an dem Fahrzeug vorliegen, so dass wichtige Einzel- und Feinspurzeichnungen nicht erkennbar sind.



Bild A2-113 Foto zu einem Schadengutachten



Bild A2-114 Foto zu einem Schadengutachten (Abschnitt von der rechten Fahrzeugseite)

7.2.5 Detailaufnahmen

Nur Detailaufnahmen von den Spurenlagen liefern oftmals Informationen für abschließende technische Bewertungen. Die moderne Digitalkameratechnik erlaubt es, eine Vielzahl von Abbildungen zu fertigen, ohne dass dies einen wesentlichen Kostenfaktor darstellt. Eine vollständige Dokumentation eines Fahrzeugs kann durchaus 120 Abbildungen oder mehr umfassen.

Oftmals helfen bei der Darstellung von Spurendetails Variationen des Betrachtungswinkels sowie Aufnahmen mit und ohne Blitzlicht. Der Einsatz von Blitzlicht kann auch bei Tageslicht und Sonnenschein zu einem deutlichen Informationsgewinn führen. **Bild A2-115** zeigt eine oberflächliche Spurzeichnung aus streifenden Kontakten mit einem Fußball, aufgenommen mit dem Sonnenlicht sowie zur Karosserie schräg von hinten links. Der Beschädigungsbereich wird

insgesamt gut abgebildet. **Bild A2-116** zeigt nun den selben Beschädigungsbereich, jedoch in einer nahezu senkrechten Draufsicht sowie mit Blitzlicht fotografiert. Deutlich wird, dass in der Draufsicht zwar noch die dunklen Fremdmaterialantragungen sichtbar sind, die Abbildung ansonsten aber wesentlich weniger Informationsgehalt aufweist. **Bild A2-117** und **Bild A2-118** stellen zum einen eine Übersichtsaufnahme mit einem gekennzeichneten Beschädigungsbereich (**Bild A2-117**) sowie zum anderen die markierte Einzelspur (**Bild A2-118**) dar.



Bild A2-115 oberflächliche Spurenlage schräg und ohne Blitzlicht aufgenommen

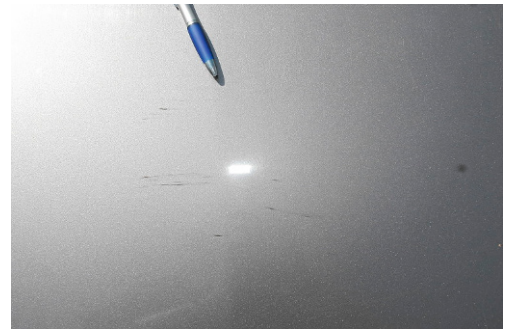


Bild A2-116 oberflächliche Spurenlage senkrecht und mit Blitzlicht aufgenommen



Bild A2-117 Übersichtsaufnahme zur Spurenlage

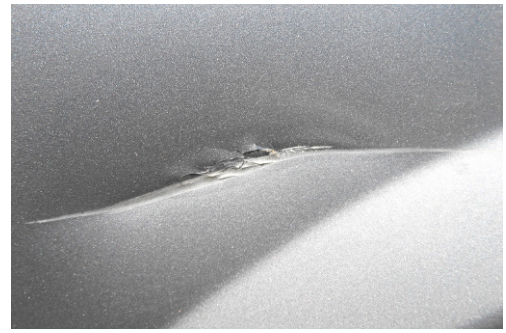


Bild A2-118 Detailaufnahme vor den Spurenlage

Auch Spurenlagen außerhalb des eigentlichen Schadenbereiches können bei der Aufklärung des tatsächlichen Geschehens hilfreich sein. So zeigten sich bei einer tatsächlich stattgefundenen Auffahrkollision zwischen dem auffahrenden Fahrzeug (**Bild A2-119**) und dem Fahrzeug, auf welches aufgefahren wurde (**Bild A2-120**) an den vorderen Radhausschalen des auffahrenden Fahrzeugs Schmelzspuren und Ausfransungen (**Bild A2-121** bis **Bild A2-123**), die auf längere Kontakte mit den sich in Drehbewegung befindlichen sowie in beide Richtungen eingeschlagenen Vorderrädern hinwiesen. Nach der polizeilichen Verkehrsunfallaufnahme wurde das nicht mehr fahrbereite auffahrende Fahrzeug mittels Abschleppfahrzeug vom Schadenort zum Abstellplatz transportiert und hiernach nicht mehr nennenswert bewegt. Die Ausfransungen und Schmelzspuren an den vorderen Radhausschalen (**Bild A2-121** bis **Bild A2-123**) standen dazu im Widerspruch und wiesen auf eine nicht unerhebliche Fahrbewegung mit Lenkbewegungen hin, als die Fahrzeugfront des auffahrenden Fahrzeugs bereits beschädigt war.



Bild A2-119 Anstoßbereich am Miet-Pkw



Bild A2-120 Anstoßbereich am AST-Fahrzeug



Bild A2-121 Ausfransungen und Schmelzspuren an der Radhausschale vorn rechts des Miet-Pkw (rechtes Vorderrad in Geradeausstellung).



Bild A2-122 Ausfransungen und Schmelzspuren an der Radhausschale vorn rechts des Miet-Pkw (das rechte Vorderrad ist nach links gelenkt).



Bild A2-123 Ausfransungen und Schmelzspuren an der Radhausschale vorn links



Bild A2-124 Sicherheitsbatterieklemme an der Fahrzeugbatterie im Kofferraum

Hieraus resultierte der Verdacht, dass tatsächlicher Kollisionsort und angegebener Schadenort nicht identisch waren. Da zudem die Sprengkapsel am Pluspol der Fahrzeugbatterie ausgelöst hatte, wobei Manipulationsspuren bildlich dokumentiert wurden (**Bild A2-124**), und die Polizeibeamten am angegebenen Schadenort keine Splitter oder sonstige Fahrzeugteile aufgefunden hatten, erhärtete sich der anfängliche im Raum stehende Manipulationsverdacht.

Insbesondere bei wenig intensiven bzw. oberflächlichen Beschädigungen haben sich zur Verdeutlichung der Einzelspuren kleine Magnetpfeile bewährt. Es sollte bei der Fahrzeugbesichtigung unbedingt darauf verzichtet werden, Schäden mittels Kreide oder ähnlicher Hilfsmittel zu „markieren“. Bereiten häufig schon Spiegelungen in den Abbildungen oder ungünstige Lichtverhältnisse bei der Bildfertigung Probleme bei der Erkennbarkeit von Spuren auf dem Bildmaterial, muss diese Situation nicht noch durch derartige Maßnahmen verschlimmert werden.

7.2.6 Abbildungen mit Maßstab

Für technische Betrachtungen werden die an einem Kollisionsereignis beteiligten Fahrzeuge bzw. Kollisionsobjekte mit angelegtem Maßstab fotografiert. Bei dem Maßstab sollte es sich um einen Nivellierstab mit konstanter Breite von etwa 5 cm sowie einer kontrastreichen Zentimetereinteilung handeln (**Bild A2-125**). Diese Nivellierstäbe eignen sich für die Anlage an Fahrzeuge sowohl für Vertikal- als auch für Horizontalmaße. Teleskopnivellierstäbe (**Bild A2-126**) eignen sich dementgegen aufgrund der variierenden Breite der Teilstücke nur für Vertikalmaße. Die Verwendung von Maßstäben mit Millimetereinteilung ist ungünstig, da diese meist auflösungsbedingt nicht mehr abgelesen werden können.



Bild A2-125 aus vier Teilen von je 1 m bestehender Nivellierstab mit konstanter Breite (Länge 4 m)



Bild A2-126 aus vier Teilen von je 1 m bestehender Teleskopnivellierstab (Länge 4 m)

Bei der Fertigung des Bildmaterials sind bestimmte Qualitätsanforderungen einzuhalten [11, 12, 13]. Wesentliche Anforderungen an die Fertigung von Bildern mit Maßstab sind:

- hochauflösende Digitalkamera mit hochwertigen Objektiven verwenden,
- an der Kamera die maximale Auflösung und die minimale Kompression einstellen,
- Positionierung des Fahrzeugs auf einer weitgehend ebenen Fläche,
- Kamera quer bzw. parallel zur Längsachse sowie horizontal ausrichten,
- die Kamera etwa in Höhe des primär interessierenden Bereichs positionieren,
- die Verwendung eines Stativs gewährleistet eine stabile Position der Kamera,
- der Vertikalmaßstab sollte etwa in Bildmitte sowie senkrecht stehen und kann mittels Klebeband, Magneten, Saugklemmen, Messlattenfuß o. ä. fixiert werden,
- Vertikal- und Horizontalmaßstab sollten sich in einer senkrechten Ebene befinden,
- sowohl der Vertikal- als auch der Horizontalmaßstab sollten in der Horizontalen gesehen so nah wie möglich am Beschädigungsbereich positioniert werden,
- bei der Verwendung von Zoom-Objektiven an digitalen SLR-Kameras sind für große Horizontalstrecken in der Abbildung Brennweiten ab etwa 100 mm (Objektivwert) anzustreben,

- Abschnittsaufnahmen werden notwendig, wenn die räumlichen Verhältnisse am Besichtigungsort große Abstände zum Fahrzeug nicht zulassen,
- einen Horizontalmaßstab insbesondere bei Abschnittsaufnahmen unbedingt verwenden,
- bei Überschneidungen der Brennweiten verschiedener Zoom-Objektive sollte die obere Brennweite des Objektivs mit dem niedrigeren Brennweitenbereich verwendet werden,
- optimale, nicht maximale Ausnutzung der Bildbreite und -höhe,
- Objektive mit einer großen Festbrennweite sind Zoom-Objektiven vorzuziehen.

Die Notwendigkeit des Einsatzes von hochauflösenden Digitalkameras sowie Einstellen der maximalen Auflösung und minimalen Kompression beim Abspeichern wurde bereits erläutert. Es muss jedoch noch darauf hingewiesen werden, dass nur die Kombination aus hoher Auflösung und hochwertigen Objektiven eine sinnvolle Lösung darstellt. Der Einsatz konventioneller Kameras mit Negativfilm bietet derzeit noch eine sehr hohe Informationsdichte, hat jedoch gegenüber digitalen SLR-Kameras einige Nachteile bei der Informationsverarbeitung.

Die Positionierung des Fahrzeugs auf einer weitgehend ebenen Fläche soll neigungsbedingte Radlaständerungen und damit Änderungen der Höhenlagen vermeiden. Bei der Nachstellung von Fahrzeugpositionen an einem bestimmten Schadenort kann die Berücksichtigung von Bodenunebenheiten aber durchaus notwendig sein. Zur Fertigung der Abbildungen mit Maßstab ist die Kamera quer bzw. parallel zur Längsachse und horizontal auszurichten (**Bild A2-127**) sowie etwa in Höhe des zu betrachtenden Bereichs (Anstoßbereich/Schadenbereich) zu positionieren. Die Verwendung eines Stativs gewährleistet hierbei eine stabile Position der Kamera.

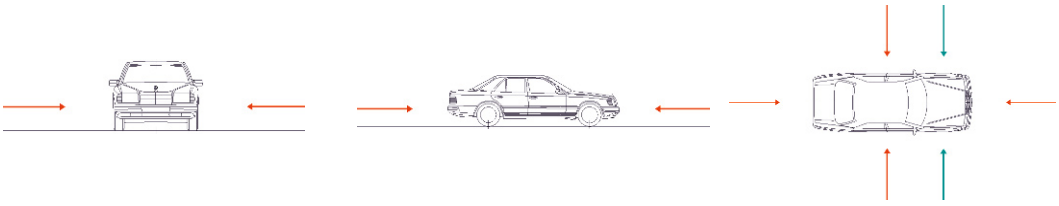


Bild A2-127 Blickrichtungen der Kamera auf das Fahrzeug

Der Vertikalmaßstab sollte in etwa in Bildmitte sowie so nah wie möglich am betreffenden Bereich positioniert werden, ohne aber dabei wesentliche Details zu verdecken. Mittels Klebeband oder Magnet kann der Maßstab am Fahrzeug fixiert werden. Auch hat sich die Verwendung geeigneter Fußkonstruktionen zum Aufstellen des Vertikalmaßstabs bewährt. Vertikal- und Horizontalmaßstab sollten sich im Weiteren in einer gemeinsamen, senkrecht zum Boden gerichteten Ebene sowie direkt am Fahrzeug befinden. Bei Ansichten der Fahrzeugfront (**Bild A2-128**) und auch vom Fahrzeugheck (**Bild A2-129**) sollte bei einem symmetrischen Aufbau des Fahrzeugs auf die Verwendung eines Horizontalmaßstabes verzichtet werden. Hier kann das horizontale Ausrichten des Bildmaterials anhand von symmetrisch vorhandenen Fahrzeugteilen und -bereichen erfolgen. Bei Seitenansichten der abgebildeten Fahrzeuge könnte prinzipiell auch auf den Horizontalmaßstab verzichtet werden, da ein horizontales Ausrichten über die Radaufstandsbereiche an Vorder- und Hinterachse möglich wäre. Dies ist jedoch nicht empfehlenswert, da aufgrund des geringen Kontrastes zwischen den Reifen und den häufig dunklen Fahrbahnen eine eindeutige Bestimmung des Radaufstandsbereichs nicht immer gegeben ist. Mit angelegtem Horizontalmaßstab wird der Kontrast zwischen dem hellen Maßstab und dem dunklen Boden deutlich verbessert (**Bild A2-130** und **Bild A2-131**).

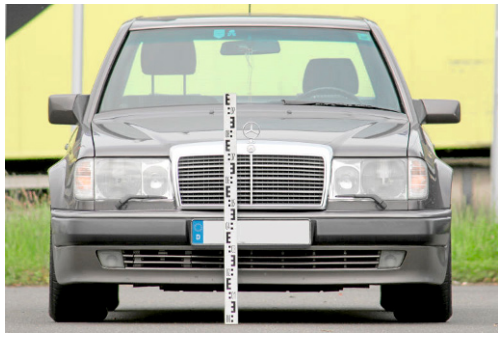


Bild A2-128 Fahrzeugfront mit angelegtem Vertikalmaßstab (Brennweite 300 mm)



Bild A2-129 Fahrzeugheck mit angelegtem Vertikalmaßstab (Brennweite 300 mm)



Bild A2-130 Rechte Seite mit Vertikal- und Horizontalmaßstab (Brennweite 300 mm)



Bild A2-131 Linke Seite mit Vertikal- und Horizontalmaßstab (Brennweite 300 mm)

Bei Abschnittsaufnahmen, die angefertigt werden müssen, wenn die räumlichen Verhältnisse bei Besichtigung größere Abstände zwischen Fahrzeug und Kamera nicht zulassen, ist die Verwendung eines Horizontalmaßstabes zwingend. Dies deshalb, da mit nur einem (**Bild A2-132**) oder keinem abgebildeten Rad (**Bild A2-133**) das korrekte horizontale Ausrichten des Bildmaterials nicht möglich ist. Eine Horizontalausrichtung der Abbildung mittels Bildbearbeitungsprogramm ist nur mit einem mitfotografierten Horizontalmaßstab gegeben (**Bild A2-133**).



Bild A2-132 Seitenansicht (Abschnitt) ohne Horizontalmaßstab (Brennweite 35 mm)



Bild A2-133 Seitenansicht (Abschnitt) mit Horizontalmaßstab (Brennweite 135 mm)

Untersuchungen mit einer digitalen SLR-Kamera (Canon EOS 20D) in Kombination mit verschiedenen Zoom-Objektiven zeigten unter anderem die geringsten Abweichungen für große Horizontalstrecken in einer Abbildung (rote Pfeilmarkierung in **Bild A2-134**) für die untersuchte Kombination bei Brennweiten im Bereich zwischen etwa 100 und 150 mm [13] (**Bild**

A2-135). Weiterhin ist mit **Bild A2-135** erkennbar, dass bei Überschneidungen der Brennweiten verschiedener Zoom-Objektive die obere Brennweite des Objektivs mit dem kleineren Brennweitenbereich verwendet werden sollte (siehe z. B. in **Bild A2-135** Brennweite 75 mm).



Bild A2-134 Abmessung zur Untersuchung des Einflusses der Brennweite

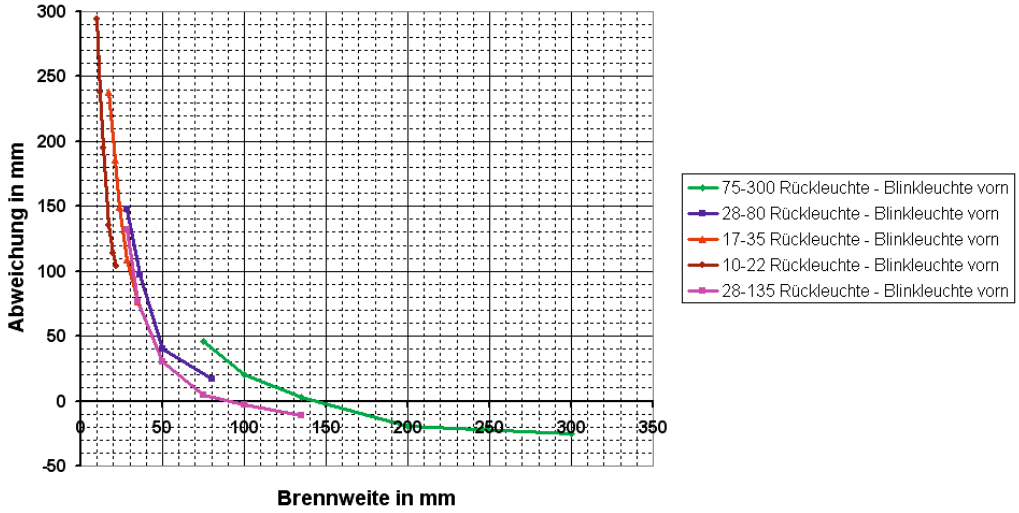


Bild A2-135 Absolute Abweichungen für alle Objektive zu den tatsächlichen Messwerten für den Abstand zwischen der Rückleuchte und der Blinkleuchte vorn gemäß **Bild A2-134**

Hier hat das 28-135 mm-Objektiv (**Bild A2-135** – violette Linie) gegenüber dem 28-80 mm-Objektiv (**Bild A2-135** – blaue Linie) deutliche Vorteile. Schlechter schneidet nur noch das 75-300 mm-Objektiv (**Bild A2-135** – dunkelgrüne Linie) ab. Auch wird ersichtlich, dass das hochwertige 28-135 mm-Objektiv (**Bild A2-135** – violette Linie) gegenüber dem weniger wertigen 28-80 mm-Objektiv (**Bild A2-135** – blaue Linie) über dem gesamten Brennweitenbereich insgesamt besser abschneidet. Bildbreite und -höhe sollten optimal ausgenutzt werden, wobei zu beachten ist, dass die Objektivverzeichnung zu den Bildrändern hin zunimmt. Eine Bildausnutzung von 80 bis 90 % stellt einen guten Kompromiss dar.

Qualitativ hochwertige Objektive mit großer Festbrennweite sind Zoom-Objektiven vorzuziehen, da diese auch bezüglich der Verzeichnung auf eine Brennweite hin optimiert sind. Der Einfluss der Brennweite auf die Qualität wird mit der Bildüberlagerung in **Bild A2-136** gezeigt. Hier wurde die mit einer Brennweite von 17 mm gefertigte Abbildung vom Fahrzeugheck eines Opel Omega der Abbildung des selben Fahrzeugs überlagert, die mit einer Brennweite von 300 mm aufgenommen wurde. Die mit einer Brennweite von 17 mm gefertigte Abbildung ist scheinbar deutlich kleiner als die Abbildung, die mit einer Brennweite von 300 mm hergestellt wurde.



Bild A2-136 Überlagerung einer Abbildung (Brennweite von 17 mm) und einer Abbildung (Brennweite 300 mm)

Es wird deutlich, dass bereits bei der Bildfertigung die Basis für die Vermeidung von Fehlbewertungen gelegt wird. Bei Seitenansichten kann der Fehler noch deutlich größer ausfallen. **Bild A2-137** zeigt einen Opel Vectra mit an der Front angelegten Vertikal- und Horizontalmaßstäben. Während der Vertikalmaßstab am vorderen Stoßfänger steht, liegt der Horizontalmaßstab an den Vorderrädern. Da mit der Fertigung der Abbildungen zum Zweck der Bildüberlagerung ein dreidimensionaler Sachverhalt auf eine zweidimensionale Betrachtungsweise reduziert wird, sollten sich alle eingelegten Maßstäbe in der selben senkrechten Ebene befinden. Minimale Abweichungen können toleriert werden. In diesem Fall ist aber der Tiefenabstand der Maßstäbe deutlich zu groß. **Bild A2-138** zeigt ebenfalls einen Opel Vectra mit an der Fahrzeugfront angelegten Maßstäben. Mit dem Gedanken einer reduzierten Verzeichnung hätte die Abbildung mit dem Fahrzeug im mittleren Bildbereich sicherlich auch einen positiven Aspekt. Allerdings ist die Bildausnutzung mit unter 40 % in Querrichtung deutlich zu niedrig.

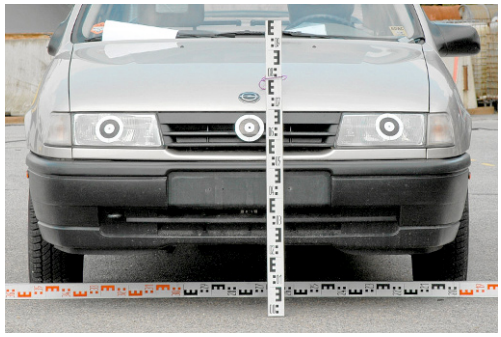


Bild A2-137 Vertikal- und Horizontalmaßstab in verschiedenen Ebenen



Bild A2-138 Zu geringe Bildausnutzung

Die linke Fahrzeugseite eines Volkswagen Passat wurde bei einer Streifkollision nahezu vollständig beschädigt. Insbesondere die intensiv gezeichneten Radkontaktspuren über wesentliche Abschnitte der linken Seite waren Anlass, das Kollisionsereignis zu untersuchen. **Bild A2-139** bis **Bild A2-142** zeigt nun das Bildmaterial, welches bei der Nachbesichtigung gefertigt wurde. Wesentliche Fehler sind die Blickrichtung schräg von oben, damit deutlich abweichend von der Horizontalen, sowie auch schräg zur Fahrzeuglängsachse. Damit ist das Bildmaterial für eine Weiterverarbeitung (Bildüberlagerung) ungeeignet. Auch fehlt ein Horizontalmaßstab, mit dem

die Bilder horizontal ausgerichtet werden könnten. Diese zur Beweissicherung angefertigten Abbildungen haben eine Größe von 800 Px x 533 Px, was einer Auflösung von etwas mehr als 0,4 MPx entspricht, sowie eine Dateigröße von jeweils etwa 55 kB. Da wesentliche Kriterien zur Bildfertigung mit Maßstab nicht erfüllt und die Beschädigungen und Spurenlagen nur ansatzweise erkennbar sind, ist dieses Bildmaterial für detaillierte Bewertungen nicht verwertbar.



Bild A2-139 Linke Fahrzeugseite des Volkswagen Passat mit angelegtem Maßstab



Bild A2-140 Linke Fahrzeugseite des Volkswagen Passat mit angelegtem Maßstab



Bild A2-141 Linke Fahrzeugseite des Volkswagen Passat mit angelegtem Maßstab



Bild A2-142 Linke Fahrzeugseite des Volkswagen Passat mit angelegtem Maßstab

Bild A2-143 zeigt eine für die Besichtigungsbedingungen in einem recht beengten Hof schon durchaus verwertbare Abbildung von der Fahrzeugfront eines Mitsubishi Lancer mit angelegtem Vertikalmaßstab. Der Vertikalmaßstab ist aber so ungünstig an der Front platziert, dass eine wichtige Spurenlage an der Motorhaubenvorderkante (**Bild A2-144**) verdeckt wird. Hier wäre es günstiger gewesen, das Vertikalmaß etwas weiter links oder rechts zu positionieren.

Bild A2-145 zeigt den Schadenbereich im vorderen Abschnitt der rechten Seite eines Fiat Tipo. Da das Fahrzeug nicht mehr fahrfähig war (massiver Achsschaden vorn rechts) und auf dem Gelände eines Fahrzeugverwerters eingeengt stand, musste das Fahrzeug in dieser Position auch fotografiert werden. Hierdurch waren die Lichtverhältnisse beim Fotografieren der Schäden an der rechten Seite ungünstig (Gegenlicht). Im Weiteren lagen aufgrund des Achsschadens vorn rechts erhebliche Veränderungen der Höhenlagen vor. Demzufolge wurde die unbeschädigte linke Seite ebenfalls mit Maßstäben fotografiert (**Bild A2-146**), um zumindest näherungsweise die Höhenlagen im vorderen Abschnitt der Fahrzeugseite vor der Kollision ermitteln zu können. Auch waren die Lichtverhältnisse an der linken Fahrzeugseite deutlich besser.



Bild A2-143 Fahrzeugfront eines Mitsubishi Lancer; der angelegte Vertikalmaßstab verdeckt wichtige Spurenlage (siehe auch **Bild A2-144**)



Bild A2-144 Wichtige Spurenlage an der Motorhaubenvorderkante eines Mitsubishi Lancer, die in **Bild A2-143** durch den Maßstab verdeckt wurde



Bild A2-145 Beschädigungsbereich an der rechten Fahrzeugseite des Fiat Tipo



Bild A2-146 Unbeschädigter Abschnitt an der linken Fahrzeugseite des Fiat Tipo



Bild A2-147 Rechte Transporterseite (verdeckte Radaufstandspunkte und kleine Brennweite)



Bild A2-148 Rechte Seite eines Transporters vollständig und mit großer Brennweite aufgenommen

Zu einem weiteren Schadenfall konnte die beschädigte rechte Fahrzeugseite eines Transporters nicht in hinreichender Qualität abgebildet werden. **Bild A2-147** zeigt diese Fahrzeugseite des Transporters, die aufgrund der Besichtigungsbedingungen am Abstellort des Fahrzeugs nicht vollständig sowie auch nur mit kleiner Brennweite fotografiert werden konnte. In diesem Fall wurde ein typgleiches Vergleichsfahrzeug besichtigt und die rechte Fahrzeugseite vollständig sowie mit großer Brennweite aufgenommen (**Bild A2-148**). Im Weiteren kann auch Bildmaterial mit Maßstab aus diversen Datenbanken (z. B. [28]) Verwendung finden.

7.3 Besichtigung, Dokumentation und Vermessung der Unfallstelle/Schadenörtlichkeit

Eingangs der weiteren Betrachtungen wird auf die Ausführungen im Gliederungspunkt A23 Dokumentation von objektiven Merkmalen mit besonderem Fokus auf die Dokumentation und Vermessung von Unfallstellen hingewiesen. Nur eine maßstabsgerechte Orthogonalansicht vom angegebenen Schadenort kann eine hinreichende Grundlage für Betrachtungen zum Geschehensablauf sein, vornehmlich zu den Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Verhältnissen.

7.3.1 Fahrzeugzusammenstellung/Ortstermin

Im Einzelfall kann auch eine aufwändige Fahrzeugzusammenstellung (Fahrzeuggegenüberstellung) am angegebenen Schadenort eine notwendige Maßnahme darstellen, in der eine zutreffende und allen Beteiligten, auch anwesenden Mandatsträgern, nachvollziehbare Entscheidungsfindung möglich ist. In dem nachfolgend dargestellten Fall soll der zurücksetzende Lkw den parkenden BMW an der linken Tür sowie am Seitenteil links hinten beschädigt haben (**Bild A2-149**). Vorgelegt wurden neben dem Bildmaterial zu dem Schadengutachten zu dem



Bild A2-149 Schadenbereich am BMW



Bild A2-150 Kontaktbereich am Miet-Lkw

BMW auch einige Fotos zu dem Lkw (**Bild A2-150**). Gerade der dreidimensional stark konturierte Kontaktbereich am Fahrzeugheck des Lkw erschwert eine exakte zweidimensionale computergrafische Gegenüberstellung der beteiligten Fahrzeugzonen (**Bild A2-151**), insbesondere auch hinsichtlich der Besonderheiten an der angegebenen Schadenörtlichkeit.

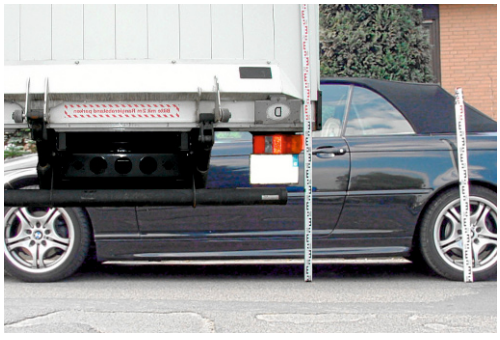


Bild A2-151 Bildüberlagerung



Bild A2-152 Angegebener Schadenort



Bild A2-153 Fahrzeugzusammenstellung

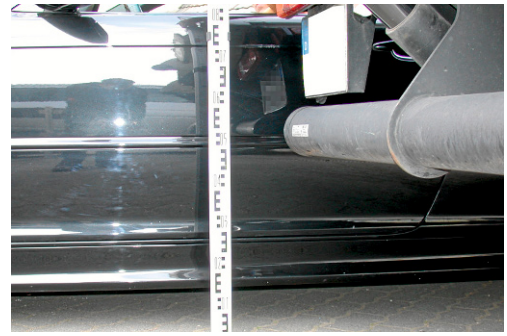


Bild A2-154 Fahrzeugzusammenstellung



Bild A2-155 Erhebliche Schichtdicken (BMW)

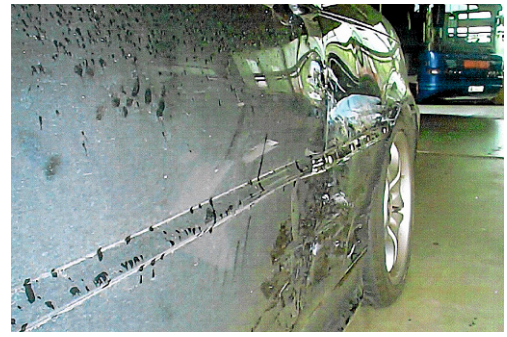


Bild A2-156 Vorschaden am BMW

Ein Ortstermin mit den an dem angegebenen Schadenfall beteiligten Fahrzeugen kann die praktikabelste Lösung aller sich aufzeigenden Probleme sein. Bei der Zusammenstellung am angegebenen Schadenort (**Bild A2-152**) mit der von den Beteiligten geschilderten Kollisionsanordnung (**Bild A2-153** und **Bild A2-154**) ergibt sich, dass der mögliche Kontaktbereich an dem Lkw nicht den gesamten Schadenbereich am BMW abdecken kann (siehe hierzu Vergleich von **Bild A2-149** und **Bild A2-154**). Die Schichtdicken (**Bild A2-155**) geben einen Hinweis auf die Qualität und Quantität der Reparaturarbeiten, in diesem Fall anstatt der Erneuerung des Seitenteils eine Instandsetzung mit erheblichen Schichtdicken von mehreren Millimetern (Messwert: 4,46 mm = 4460 µm). Bei weiteren Recherchen wurde im Anstoßbereich am BMW noch ein Vorschaden bekannt (**Bild A2-156**). Fahrzeugzusammenstellungen gehören zu speziellen Untersuchungen, da diese in der Regel für den konkreten Einzelfall durchgeführt werden. Insbesondere bei räumlich stark strukturierten Kollisionsobjekten kann eine Fahrzeugzusammenstellung sehr gute Ergebnisse liefern. Allerdings ist die bildliche Dokumentation schwierig, da eine dreidimensionale Szene auf eine zweidimensionale Darstellung reduziert wird. Dies führt häufig dazu, dass der räumliche Eindruck, welchen der Betrachter bei der Fahrzeugzusammenstellung gewonnen hat, mit dem Bildmaterial nicht adäquat reproduziert werden kann.

8 Experimentelle Untersuchungen

Experimentelle Untersuchungen im Rahmen der Verkehrsunfallrekonstruktion bzw. Schadenaufklärung können in **prinzipielle** und **spezielle** Untersuchungen unterteilt werden.

8.1 Prinzipielle Untersuchungen

Prinzipielle Untersuchungen werden durchgeführt, um allgemeine Erkenntnisse zu erlangen, die nicht zwingend mit einem speziellen Einzelfall im Zusammenhang stehen müssen. Dies sind beispielsweise Untersuchungen zu Radkontaktspuren (siehe hierzu auch das Kapitel A5). Diese werden durchgeführt, um die komplexe Problematik der Radkontaktspuren zunehmend besser zu verstehen. Da bei prinzipiellen Versuchen nicht zwangsläufig ein zu untersuchender Einzelfall abzubilden ist, sind die Anforderungen an die Fahrzeuge bzw. Kollisionsobjekte sowie das Testgelände nicht so bedeutsam wie bei speziellen Versuchen. Damit geht aber auch einher, dass die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen in ihrer Gesamtheit auf einen speziellen Einzelfall häufig nur bedingt bzw. überhaupt nicht möglich ist. Prinzipielle Untersuchungen werden auch durchgeführt, um Werte für Berechnungen, beispielsweise Verzögerungen auf verschiedenen Fahrbahnen zu bestimmen. Im Weiteren wäre für statistisch gesicherte Ergebnisse eine größere Anzahl gleichartiger Versuche notwendig.

Bei prinzipiellen Versuchen erzeugte und gut dokumentierte Spurenbilder können bei der Bestimmung der Schadeneintragrichtung sehr hilfreich sein. Für die Bestimmung der Schadeneintragrichtung sind geometrische Unstetigkeiten und Bereiche sich ändernder Struktursteifigkeiten, wie beispielsweise konturierte Radlaufbögen (**Bild A2-157**), Übergänge zwischen Türen und Karosseriesäulen (**Bild A2-158**) und aus der Fahrzeugkontur hervorstehende Anbauteile (**Bild A2-159** bis **Bild A2-162**) regelmäßig gut geeignet. **Bild A2-158** zeigt hierzu ergänzend eine bezüglich der Schadeneintragrichtung typische Taschenbildung. Dagegen sind Spurenlagen in homogenen Bereichen, wie beispielsweise nahezu ebene und nur wenig deformierte Karosserieflächen (**Bild A2-163** und **Bild A2-164**), für die Bestimmung der Schadeneintragrichtung nur sehr bedingt bzw. gar nicht geeignet. Die Schadeneintragrichtung aus Spurenlagen, wie beispielsweise mit **Bild A2-163** und **Bild A2-164** gezeigt, mit Gewissheit ableiten zu wollen, grenzt regelmäßig an „Kaffeesatzleserei“. Es gibt in homogenen Bereichen nicht das „typische“ Strukturbild, mit dem gesicherte Ableitungen der Schadeneintragrichtung möglich sind.



Bild A2-157 Schadenbild an einem Radlaufbogen mit Schadeneintragrichtung

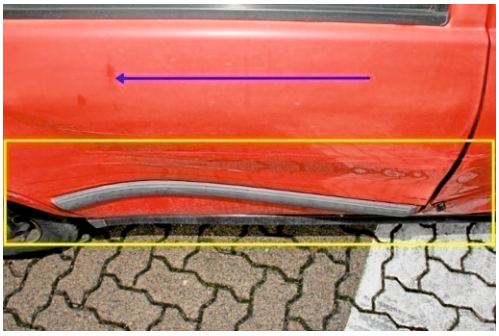


Bild A2-158 Spuren an einer Tür mit Übergängen zu B- und C-Säule mit Schadeneintragrichtung

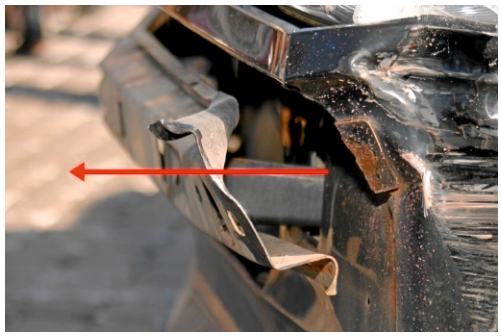


Bild A2-159 Schäden an einem vorderen Stoßfängerträger mit Schadeneintragrichtung



Bild A2-160 Schadenbild an einem linken Außenspiegel mit Schadeneintragrichtung

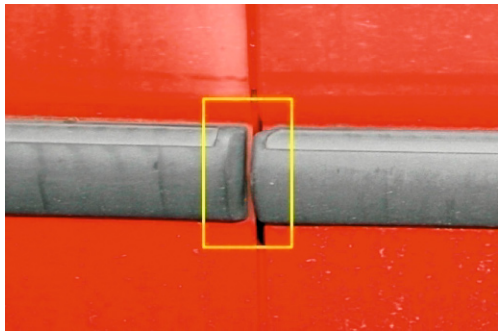


Bild A2-161 Anordnung der Stoßleiste vor der Streifkollision (Kollisionsversuch)

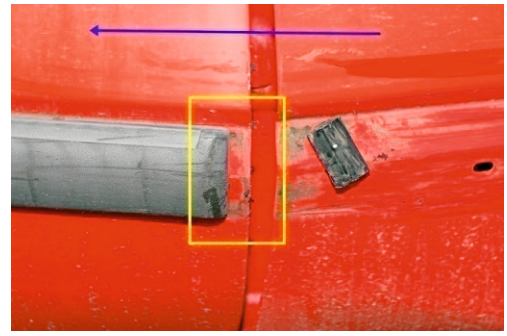


Bild A2-162 Kollisionsursächlich verschobene Stoßleiste nach der Streifkollision (Kollisionsversuch); Schadeneintragrichtung eingezeichnet

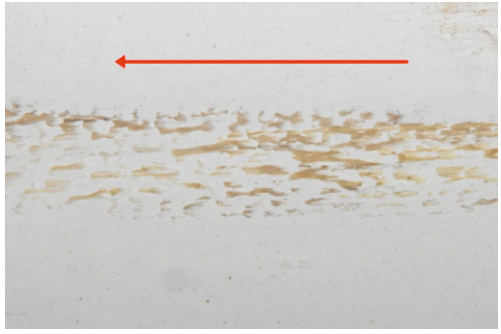


Bild A2-163 Spurenlage an einer homogenen Karosseriefläche mit eingezeichneter Schadeneintragrichtung

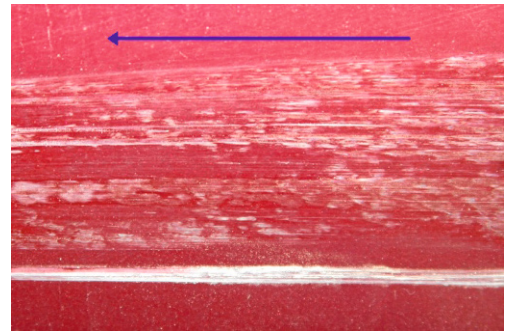


Bild A2-164 Spurenlage an einer homogenen Karosseriefläche mit eingezeichneter Schadeneintragrichtung

Ergänzend dazu können Materialablagerungen an Kanten- und Übergangsbereichen auf die Richtung des Schadeneintrags hinweisen, sofern die Ablagerungen in Eigen- (**Bild A2-165**) und Fremdmaterial (**Bild A2-166**) unterschieden werden können.

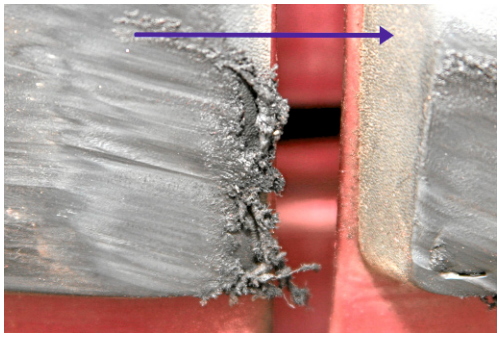


Bild A2-165 Ablagerung von vertragenem Eigenmaterial in einem Türspalt mit eingezeichneter Schadeneintragrichtung (Versuch)

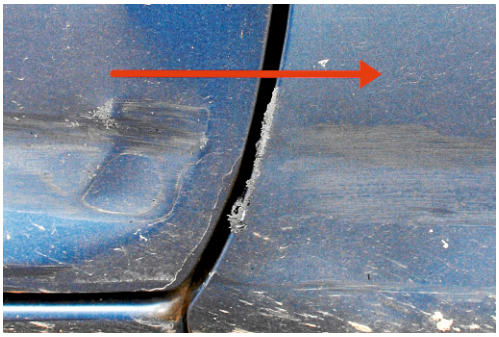


Bild A2-166 Ablagerung von Fremdmaterial vom Kollisionspartner in einem Türspalt mit eingezeichneter Schadeneintragrichtung (Versuch)

Im Einzelfall kann die mikroskopische Untersuchung der Feinspurlagen Aufschluss über die Schadeneintragrichtung liefern. Dies erfordert jedoch auch eine entsprechend intensive Untersuchung des Kollisionsobjektes, was allein anhand von Bildmaterial nicht möglich ist. **Bild A2-167** stellt Zusammenhänge zur Schadeneintragrichtung tabellarisch dar. In Richtung der Pfeilmarkierung steigt die Qualität zur Bestimmung der Schadeneintragrichtung in Abhängigkeit von Kollisionen mit und ohne Abgleiten sowie mit und ohne bleibender Deformation.

	Kollision ohne Abgleiten	Kollision mit Abgleiten
ohne bleibende Deformation		-Materialverschiebung, -Materialantragung, -Materialabtragung, -Verschiebung von Teilen, -Ablösung von Teilen.
mit bleibender Deformation	- geometrische Form und Ausprägung der Deformation.	-Materialverschiebung, -Materialantragung, -Materialabtragung, -Verschiebung von Anbauteilen, -Ablösung von Anbauteilen, -geometrische Form und Ausprägung der Deformation.

Bild A2-167 Einflussfaktoren auf die Bestimmung der Schadeneintragrichtung

Generell zeigt sich also, dass eine Bestimmung der Schadeneintragrichtung häufig nicht eindeutig erfolgen kann. In diesem Zusammenhang ist auch bedeutsam, dass bei Streifkollisionen aus wenig intensiven Streifkontaktspuren (nicht Radkontaktspuren) die Geschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge regelmäßig nicht abgeleitet werden können.

8.2 Spezielle Untersuchungen

Spezielle Untersuchungen werden durchgeführt, um Betrachtungen zu einem speziellen Einzelfall anzustellen. Hierbei ist es für ein qualitativ hochwertiges Ergebnis von eminenter Bedeutung, dass das zu untersuchende Ereignis in seiner Spezifik weitgehend nachgebildet wird. Anzustreben ist die Verwendung von hinreichend baugleichen Fahrzeugen bzw. Kollisionsobjekten sowie die Versuchsdurchführung am angegebenen Schadenort unter ereignisnahen Bedingungen. Sobald – und dies häufig auch aus wirtschaftlichen Erwägungen – von der Spezifik des zu untersuchenden Einzelfalls mehr oder weniger deutlich abgewichen wird, hat dies auch signifikanten Einfluss auf das Versuchsergebnis bzw. die Übertragbarkeit auf den zu untersuchenden Einzelfall. Dies kann durchaus dazu führen, dass ein Versuch durchgeführt wird, der für allgemeine Erkenntnisse möglicherweise eine gewisse Aussage liefert, aber für den speziellen Einzelfall, für den der Versuch vornehmlich konzipiert wurde, nicht verwendbar ist.

Im Rahmen eines angegebenen Schadenereignisses sei ein Lkw bei Rückwärtsfahrt auf einem rechts neben der Durchfahrtsfahrbahn befindlichen sowie fahrbahnparallel angeordneten Parkplatz gegen ein hinter dem Lkw abgestelltes Zweirad gestoßen und habe dieses umgestoßen sowie überrollt [29]. **Bild A2-168** bis **Bild A2-173** zeigen die als ereignisursächlich deklarierten Beschädigungen und Spurenlagen am Zweirad in einer repräsentativen Auswahl. Im Zuge der Auftragsbearbeitung wurde sowohl mit dem Fahrzeugführer des Lkw als auch mit einem Zeugen, welcher das angegebene Schadenereignis in seinem Fahrzeug sitzend direkt vor sich beobachtet habe, der Schadenhergang am angegebenen Schadenort ausführlich besprochen.



Bild A2-168 Schadenbild an dem Zweirad links

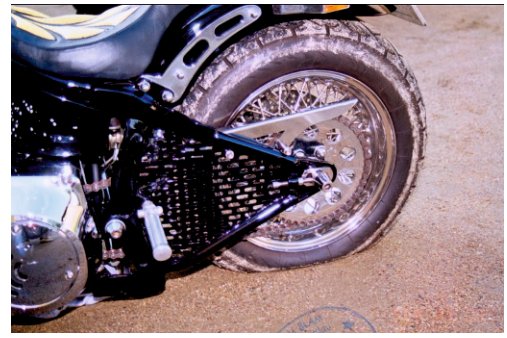


Bild A2-169 Schadenbild an dem Zweirad links



Bild A2-170 Schadenbild an dem Zweirad rechts



Bild A2-171 Schadenbild an dem Zweirad rechts



Bild A2-172 Schadenbild an dem Zweirad rechts



Bild A2-173 Schadenbild an dem Zweirad rechts



Bild A2-174 Rückwärts fahrender Lkw stößt gegen abgestelltes Zweirad (Versuchsdurchführung)



Bild A2-174 Fortsetzung

Mit dem Fahrzeugführer des Zweirades konnte kein derartiges Gespräch geführt werden. Der anwaltliche Vertreter des Zweiradfahrers hatte dies aufgrund des vergleichsweise langen Zeitraums zwischen dem Schadenereignis und der Beauftragung des Sachverständigen von etwa einem halben Jahr abgelehnt. Da eine theoretische Bewertung der Beschädigungen und Spurzeichnungen an dem Zweirad kein zufriedenstellendes Ergebnis geliefert hätte, wurde ein Kollisionsversuch durchgeführt. Hierbei wurden die Angaben des Fahrzeugführers des Lkw zum Schadenzeitpunkt sowie die eines Zeugen zugrunde gelegt. Der Versuch wurde an der angegebenen Schadenörtlichkeit mit dem als Schadenverursacher deklarierten Lkw unter ereignisnahen Bedingungen (Fahrbahnverhältnisse) realisiert. Da es sich bei dem Zweirad um ein Custom Bike, d. h. ein auf Basis einer Harley-Davidson aufgebautes Unikat, gehandelt hat, wurde auch aus wirtschaftlichen Gründen bei dem Versuch auf eine Yamaha XV 250 Virago zurückgegriffen. Hierbei handelte es sich zumindest ebenfalls um einen Chopper.

Allerdings kann schon mit dieser Einschränkung der durchgeführte Versuch das angegebene Schadenereignis nicht vollumfänglich reproduzieren. Das Zweirad wurde gemäß den Angaben des Zeugen in einem Abstand von etwa 0,5 m hinter dem Lkw auf dem Seitenständer positioniert. Bei dem Versuch wurde der Lkw über eine Wegstrecke von etwa 2,5 m rückwärts gefahren. Hierdurch wurde das Zweirad umgestoßen und geringfügig auf der Fahrbahn rutschend verschoben. Im Weiteren war das rechte Hinterrad des Lkw kurzzeitig auf das Zweirad aufgefahren (Bildserie in **Bild**). Ausgehend von den ursprünglichen Standorten hat der Radaufstandspunkt am Vorderrad des Zweirades eine Wegstrecke von etwa 0,4 m, der Radaufstandspunkt am Hinterrad des Zweirades eine Wegstrecke von etwa 0,8 m zurückgelegt. Erwartungsgemäß entstanden am Lkw nur minimale Schäden. Dementgegen zeigte das Zweirad nach dem Versuch erhebliche Beschädigungen. Ein Vergleich der Beschädigungen und Spurzeichnungen an dem Zweirad des Anspruchstellers und denen an dem Versuchsfahrzeug zeigte jedoch signifikante Differenzen bezüglich der Lage, Form und Ausprägung sowie der Charakteristika.

Mit **Bild A2-175** bis **Bild A2-186** werden repräsentative Bereiche an dem beschädigten Zweirad und denen am Versuchsfahrzeug (rechts) gegenübergestellt.



Bild A2-175 geltend gemachter Schadenumfang am Zweirad



Bild A2-176 Spurenlage am Versuchsfahrzeug



Bild A2-177 geltend gemachter Schadenumfang am Zweirad



Bild A2-178 Spurenlage am Versuchsfahrzeug



Bild A2-179 geltend gemachter Schadenumfang am Zweirad



Bild A2-180 Spurenlage am Versuchsfahrzeug



Bild A2-181 geltend gemachter Schadenumfang am Zweirad



Bild A2-182 Spurenlage am Versuchsfahrzeug



Bild A2-183 geltend gemachter Schadenumfang am Zweirad



Bild A2-184 Spurenlage am Versuchsfahrzeug



Bild A2-185 geltend gemachter Schadenumfang am Zweirad

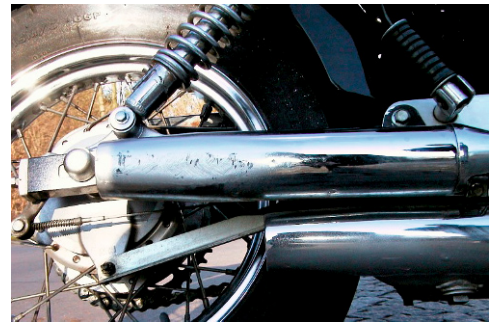


Bild A2-186 Spurenlage am Versuchsfahrzeug

Literatur

[1] Statistisches Bundesamt: Verkehr: Verkehrsunfälle: Fachserie 8 Reihe 7: 2013 (www.destatis.de)
[2] GDV (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.): Statistisches Taschenbuch der Versicherungswirtschaft: 2013 (www.gdv.de)
[3] PanoramaStudio (www.tshsoft.de)
[4] Wikipedia – Photogrammetrie, 01.09.2014
[5] Wikipedia – Innere Orientierung, 01.09.2014
[6] Wikipedia – Äußere Orientierung, 01.09.2014
[7] Hohl, Louis: Entzerrung von Straßenfotos – Das Programm PC-Rect 2.0: Diplomarbeit TU Graz: 1993
[8] Luftbildarchiv der Stadt Frankfurt am Main (www.frankfurt.de)
[9] Google Earth (http://earth.google.de/)
[10] ReconData (www.dsd.at): Venus-Datenbank: AutoView
[11] Burg, Heinz, Brösdorf, Klaus-Dieter: Anwendung von Computerprogrammen bei der Schadenzuordnung, Verkehrsunfall + Fahrzeugtechnik, Heft 5/2000 (www.ibb-forensic.de)
[12] Brösdorf, Klaus-Dieter: Einsatz von Computerprogrammen für Schadenzuordnung und Ermittlung der Kollisionsposition, Nachschlagewerk für Sachverständige: Herausgeber: Prof. Dr. oec. habil. Dipl.-Ing. Kurt Jakubasch (www.ibb-forensic.de) (www.professor-jakubasch.de)
[13] Suttner, Thomas: Untersuchungen zur Erarbeitung von Qualitätskriterien für die Schadenaufklärung und -zuordnung bei Fahrzeugkollisionen, Diplomarbeit an der WHZ Westsächsische Hochschule Zwickau, Fachbereich Maschinenbau und Kraftfahrzeugtechnik, 2006
[14] PhotoImpact (www.ulead.de)
[15] Versuch HS 20 (www.agu.ch)
[16] Das Exchangeable Image File Format (offizielle Abkürzung ist Exif, nicht EXIF) ist ein Standardformat der Japan Electronic and Information Technology Industries Association (JEITA) für das Abspeichern von Metadaten in digitalen Bildern. Die letzte Version des Standards (2.3, April 2010, letzte Revision im Mai 2013) wurde von einer Kooperation der JEITA mit der ebenfalls japanischen Organisation CIPA (Nachfolge-Organisation der JCIA – Japan Camera Industry Association) formuliert (https://de.wikipedia.org/wiki/Exchangeable_Image_File_Format, 01.09.2014)
[17] Picture Information Extractor (www.picmeta.com/de/produkte/picture-information-extractor.htm)
[18] https://de.wikipedia.org/wiki/Geographische_Koordinaten, 01.09.2014
[19] Google Earth Pro (www.google.de/intx/de/enterprise/mapsearth/products/earthpro.html)
[20] wwp.greenwichmeantime.com
[21] www.zeitumstellung.de
[22] SunOrb, Baresch/Skiba/Unger, Ruhr-Universität Bochum: Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme (Prof. Dr.-Ing. H. Unger)
[23] Modul Sonnenstand im Simulationsprogramm PC-Crash (www.dsd.at)
[24] Quelle: Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation (LVermGeo) des Landes Rheinland-Pfalz in Koblenz (www.lvermgeo.rlp.de)
[25] Mühlhausen, Peter, Prell, Gerhart: Verwendung digitalisierter Fotos in technischen Gutachten, NJW 2002: Heft 2
[26] Uschold, Anders: Einstufung und Bewertung der digitalen Fotografie für die gutachterliche Tätigkeit, 28.05.2002 (www.uschold-digitaltechnik.de)
[27] PhotoZoom Pro (www.benvista.com)
[28] ReconData (www.dsd.at)
[29] Burg, Heinz, Brösdorf, Klaus, Göritz, Jörg: Versuch zur Problematik rückwärts fahrender Lkw gegen abgestelltes Zweirad, Verkehrsunfall + Fahrzeugtechnik, Heft 5/2002 (www.ibb-forensic.de)

A3 Messtechnik

Dr. Heinz Burg, Dr. Andreas Moser, Dr. Hermann Steffan

1 Einleitung

Mit der allgemeinen Verringerung der Kosten elektronischer Bauteile sind auch Messgeräte in Preiskategorien gerutscht, die es dem Sachverständigen ermöglichen, sich solche Messgeräte anzuschaffen. Das bringt viele Vorteile mit sich, denn es ist jetzt leicht möglich geworden, auch komplizierte Fahrmanöver nachzufahren und messtechnisch zu erfassen.

Die Bestimmung bzw. Messung von Parametern, die für die Rekonstruktion eines Unfalls erforderlich sind, ist eine wichtige Voraussetzung für die korrekte Rekonstruktion eines Unfalls. Einige Parameter können nur direkt an der Unfallstelle vermessen werden (Spurlängen etc.), oftmals ist es sogar möglich mit dem Unfallfahrzeug an der Unfallstelle Messungen durchzuführen (Reibwertbestimmung durch Bremsversuch), meist müssen jedoch Vergleichsmessungen herangezogen werden (z. B.: Crash-Versuche oder Fahrversuche).

1.1 Verwendung von Messgeräten vor Gericht

Voraussetzung für die Verwendung der Messgeräte und Messergebnisse bei einem Gerichtsverfahren ist, dass die beteiligten Parteien die Prüfgeräte akzeptieren.

2 Grundlagen der Messtechnik

Im Folgenden werden einige Grundbegriffe der Messtechnik erklärt, die für den Vergleich der verschiedenen Messgeräte, die durch den Sachverständigen eingesetzt werden, erforderlich sind.

2.1 Direkte Messung

Bei der direkten Messung wird die Messgröße direkt mit einem Maßstab oder Normal verglichen. Einfache Beispiele einer direkten Messung sind das Anlegen eines Maßstabes an die zu bestimmende Länge oder der direkte Vergleich eines Massenormals mit der Testmasse auf einer Balkenwaage.

2.2 Indirekte Messung

Messsysteme und indirekte Messmethoden machen Größen messbar, die auf direktem Wege nicht zugänglich wären. Der Abstand von Erde und Mond wäre durch direkten Vergleich mit einem Maßstab kaum zu bestimmen, da es keinen Maßstab mit geeigneter Länge gibt.

Eine sehr alte Methode der indirekten Entfernungsmessung, mit der auch der Abstand Erde Mond bestimmt werden kann ist die Triangulation. Von zwei Standpunkten mit bekanntem

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_3

Abstand bestimmt man den Winkel unter dem ein dritter Punkt zu sehen ist. Aus den beiden Winkeln und der bekannten Distanz kann der Abstand des dritten Punktes berechnet werden. So kann auch der Abstand des Mondes durch indirekten Vergleich mit einem relativ kurzen Maßstab bestimmt werden.

Die Mehrzahl der im Alltag eingesetzten Messtechniken sind indirekte Verfahren. Das unterstreicht auch die Bedeutung des Verständnisses von Messfehlern und ihrer Fortpflanzung durch komplexe Messsysteme.

Bei indirekten Messverfahren werden physikalische Größen gemessen mit Hilfe derer die gesuchte physikalische Größe berechnet werden kann.

2.3 Eichung

Eichung ist die Prüfung eines Messgerätes auf Einhaltung der zugrunde liegenden eichrechtlichen Vorschriften, insbesondere der Eichfehlergrenzen. Als Messgerät kann dabei auch ein einfaches Gefäß, etwa ein Bierglas oder ein Eimer mit Eichstrichen gelten. Mit einem Stempel wird die Einhaltung für die Gültigkeitsdauer der Eichung bestätigt. Eichungen werden in der Bundesrepublik Deutschland von den Landeseichämtern unter fachlicher Aufsicht durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt durchgeführt.

Eine interne Kontrolle von Messgeräten stellt eine Kalibrierung dar. Sie ist im Gegensatz zur Eichung keine hoheitliche Aufgabe und kann von jeder Person durchgeführt werden.

Das Eichgesetz dient allgemein dem Verbraucherschutz. Messgeräte, an deren Messsicherheit ein öffentliches Interesse besteht, unterliegen der Eichpflicht. Ein öffentliches Interesse besteht bei allen Messungen im Handel, aber auch im Bereich des Arbeits- und Umweltschutzes und in der Medizin.

2.4 Kalibrierung

Das Kalibrieren (die Kalibration) ist in der Metrologie ein Messprozess zur Feststellung und Dokumentation der Abweichung eines Messgerätes oder einer Maßverkörperung mit einem Normal höherer Ordnung.

Zu einer Kalibrierung gehören:

- die Definition des Messprozesses (Umgebungsbedingungen, erforderliche Normale, Vorgehensweise),
- Erstellung eines mathematischen Modells zur Auswertung der Kalibrierung unter Berücksichtigung aller bekannten systematischen Einflüsse,
- eine Unsicherheitsanalyse mit Hilfe des mathematischen Modells,
- Angabe eines vollständigen Ergebnisses, d. h. Kalibrierwert und Kalibrierunsicherheit,
- Ausstellung eines Kalibrierscheines.

Der Kalibrierwert für den Kalibriergegenstand wird zur Messwertkorrektur verwendet. In Verbindung mit einer Normalhistorie lassen sich Aussagen über die Zuverlässigkeit des Kalibriergegenstandes treffen.

Im Gegensatz zur Justierung wird die Abweichung zwischen Kalibriergegenstand und Referenznormal nicht beseitigt. Der Begriff Kalibrierung umfasst keine Aussagen zur Einhaltung vorgegebener Spezifikationen (Messtoleranzen), dies ist Gegenstand einer Prüfung.

Ein bekanntes Beispiel ist das Kalibrieren einer Waage durch Auflegen einer Normalmasse. Unter Berücksichtigung systematischer Einflüsse (Messabweichung der Normalmasse, Luftdruck, Temperatur, Auftrieb) und zufälliger Einflüsse wird die Anzeige des Kalibriergegenstandes Waage mit der Maßverkörperung Normalmasse verglichen. Um eine Aussage über den Einfluss zufälliger Einflüsse treffen zu können, wird die Messung hinreichend häufig durchgeführt und statistisch bewertet.

2.5 Messbereich

Der Messbereich gibt den maximalen Wertebereich der physikalischen Größe an, der mit dem Messgerät gemessen werden kann.

2.6 Genauigkeit/Fehler

Die Genauigkeit des Messgerätes wird entweder als Prozentsatz des Skalenendwertes (FS – „full scale“) oder absolut angegeben. Die Genauigkeit gibt Rückschlüsse über die Unsicherheit der Messung.

2.7 Abtastrate

Die Abtastrate gibt die Anzahl der Messungen pro Sekunde an (Samples per second, Sampling rate), die bei einer kontinuierlichen Messung aufgezeichnet werden können.

2.8 Linearität

Der Linearitätsfehler eines Messgerätes wird entweder als Prozentsatz oder als Absolutwert angegeben und gibt den Steigungsfehler zwischen Eingangswert und Messwert an.

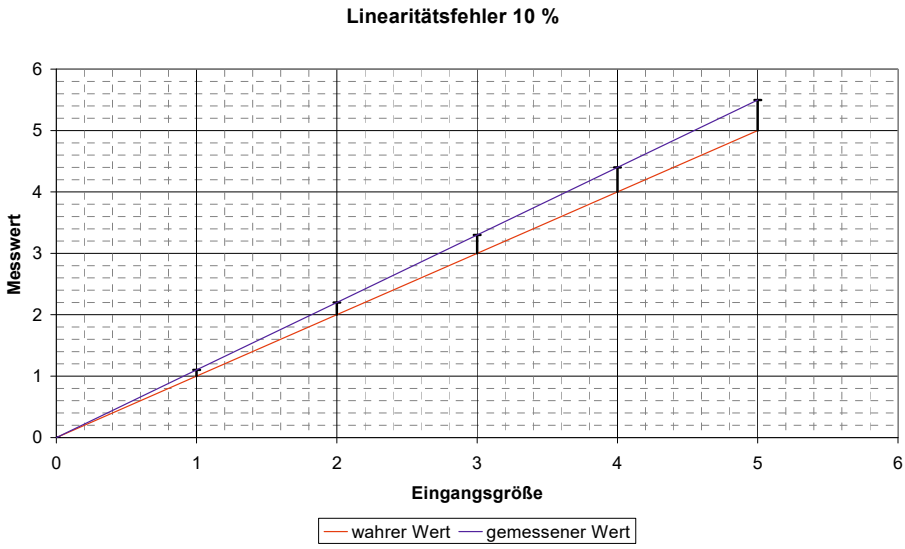


Bild A3-1 Linearitätsfehler

2.9 Offsetfehler

Der Offsetfehler gibt den Nullpunktfehler bei der Messung von 0 an, der Offsetfehler bewirkt eine Verschiebung der Messgröße.

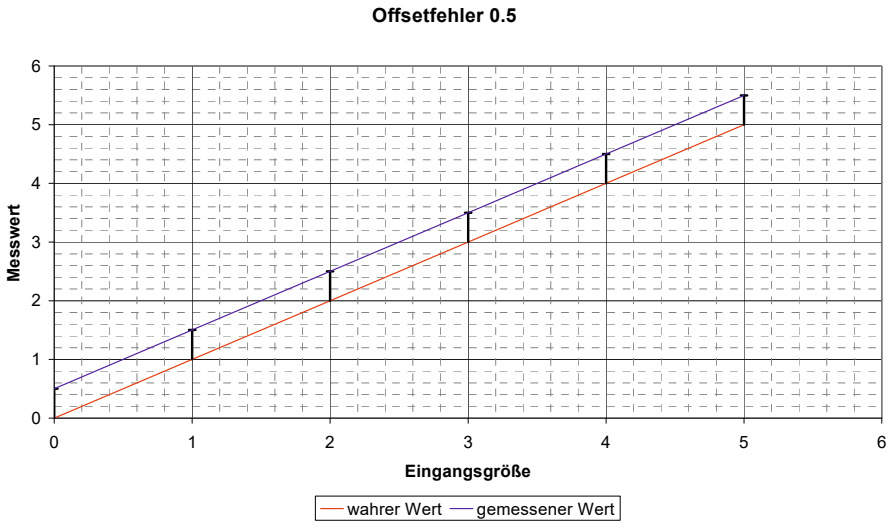


Bild A3-2 Offsetfehler

2.10 Aufzeichnungszeit

Die Aufzeichnungszeit gibt die maximale Dauer der Aufzeichnung einer kontinuierlichen Reihe von Messungen an.

2.11 Auflösung

Die Auflösung eines Messgerätes gibt die minimale Änderung der Messgröße an, die das Messgerät darstellen kann.

2.12 Speichertiefe

Die Speichertiefe ist die Anzahl der Messungen (Samples), die das Messgerät in einer kontinuierlichen Messung speichern kann.

2.13 Effektivwert – RMS

Unter dem Effektivwert versteht man in der Messtechnik den quadratischen Mittelwert (engl. root mean square, kurz: RMS) eines periodischen Signals.

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T s^2(t)dt} \qquad \text{(A3-1)}$$

3 Statistische Kenngrößen

In der Auswertung von Versuchen sind statistische Kenngrößen hilfreich, um eine Aussage über die Gesamtheit der Ergebnisse bzw. Daten treffen zu können. Die folgenden Kenngrößen geben eine Übersicht über wichtige statistische Größen.

3.1 Arithmetischer Mittelwert

Der arithmetische Mittelwert (auch als Durchschnittswert bezeichnet) wird nach folgender Formel berechnet.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \qquad \text{(A3-2)}$$

Somit gibt der arithmetische Mittelwert den Durchschnittswert der gemessenen Werte (z. B.: Reaktionszeiten) an.

3.2 Median

Der Median teilt eine Liste von Werten in zwei Hälften und kann für eine aufsteigend sortierte Reihe von Messwerten nach folgender Formel berechnet werden. Im Gegensatz zum arithmetischen Mittelwert ist der Median wesentlich robuster gegenüber Ausreißern (ein fehlerhafter Messwert verändert den arithmetischen Mittelwert direkt, die Auswirkung auf den Median ist wesentlich geringer).

$$\tilde{x} = \begin{cases} x_{\frac{n+1}{2}} & \text{n ungerade} \\ \frac{1}{2} \cdot \left(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1} \right) & \text{n gerade} \end{cases} \qquad \text{(A3-3)}$$

Der Median gehört zur Gruppe der Quantile und kann auch als 1/2-Quantil betrachtet werden.

3.3 Standardabweichung

Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung von Messwerten um einen Erwartungswert *E* und kann nach folgender Formel berechnet werden.

$$\sigma_X = \sqrt{Var(X)}$$
$$Var(X) = E((X - E(X))^2) = E(X^2) - (E(X))^2 \qquad \text{(A3-4)}$$

Sind die n Zufallsvariablen x_i unabhängig und gleichverteilt, dann kann die Standardabweichung wiefolgt abgeschätzt werden.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \qquad \text{(A3-5)}$$

3.4 Quantil

Ein Quantil ist ein Lagemaß in der Statistik und gibt eine Schwellwert an für den gilt dass ein bestimmter Anteil der Werte kleiner ist als der Schwellwert und der Rest der Werte größer. Das 25%-Quantil ist dementsprechend der Wert für den 25% der Messdaten kleiner sind als der Schwellwert und der Rest größer. Quantile werden auch bei der Bezeichnung von Dummies verwendet, der 95% Dummy-Mann hat daher ein Gewicht und eine Größe für die gelten dass 95% der Bevölkerung nicht größer oder schwerer sind.

3.5 Verteilungsfunktion

Eine (kumulative) Verteilungsfunktion beschreibt in der Statistik die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer reellen Zufallsvariablen. Über die Verteilungsfunktion können alle die Zufallsvariable betreffenden Wahrscheinlichkeiten und Kenngrößen berechnet werden. [11]

Bei der Untersuchung von Messdaten bzw. Experimenten ist es daher auch wichtig sich Gedanken über die Verteilungsfunktion der Messwerte zu machen, da die statistischen Kenngrößen von der Verteilungsfunktion abhängig sind.

4 Arten von Messgeräten

Im Folgenden werden typische Messgeräte für die wichtigsten Messgrößen bei der Unfallaufnahme und Unfalldokumentation vorgestellt.

4.1 Wegmessung

Zur Dokumentation von Spurlängen, Fahrzeugpositionen etc. werden Messräder, Maßbänder und Maßstäbe zur direkten und kostengünstigen Messung des Weges eingesetzt. Theodoliten und Laserentfernungsmesser werden bei der Vermessung von großräumigen Unfallstellen verwendet, weisen jedoch wesentlich höhere Anschaffungskosten auf.

4.2 Geschwindigkeitsmessung

Zur Geschwindigkeitsmessung werden Radimpulsgeber, Lichtschranken, Radargeräte, Laser Geschwindigkeitsmessgeräte, Korrelationsverfahren und in zunehmendem Maße GPS verwendet. Hierbei handelt es sich um indirekte Messverfahren.

Mit Hilfe des Radimpulsgebers kann über eine Frequenzmessung die Raddrehzahl bestimmt werden und die Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet werden (Radschlupf verfälscht die Messung).

Mit Hilfe einer Lichtschranke wird die Zeit zum Durchqueren einer definierten Wegstrecke gemessen, die mittlere Geschwindigkeit über diese Wegstrecke kann aus

$$v = \frac{s}{t} \tag{A3-6}$$

berechnet werden.

Radar und GPS bestimmen durch eine Messung der Dopplerfrequenz (Frequenzverschiebung wenn elektromagnetische Wellen oder Schallwellen auf einen bewegten Körper treffen und re-

flektiert werden) die Relativgeschwindigkeit des Objekts. Beim Radarverfahren wird ein Radarsignal auf das zu messende Fahrzeug gerichtet, beim GPS-Verfahren muss das zu messende Fahrzeug mit einem GPS-Empfänger ausgestattet sein. Beide Verfahren weisen eine sehr hohe Genauigkeit von etwa 0,1 km/h auf, wobei das GPS-Verfahren eine sehr kostengünstige Möglichkeit darstellt.

Lasergeschwindigkeitssensoren messen in einer Reihe von Einzelmessungen die Distanz zum Messobjekt, über die Wegänderung kann die Geschwindigkeit berechnet werden.

Bei Korrelationsverfahren wird über ein optisches Verfahren die Relativbewegung zum Untergrund gemessen und daraus die Geschwindigkeit berechnet.

4.3 Beschleunigungs-/Verzögerungsmessung

Zur Messung von Beschleunigungen/Verzögerungen werden heute hauptsächlich mikromechanische oder piezoelektrische Sensoren verwendet. Diese Sensoren weisen eine sehr geringe seismische Masse auf wodurch sehr kleine und leichte Sensoren realisierbar sind, die hochdynamische Messungen bis einige kHz durchführen können. Durch die Verwendung derartiger Sensoren im Automobilbau für die Fahrstabilitätskontrolle und zur Auslösung von Airbags und Gurtstraffern sind diese Sensoren kostengünstig erhältlich.

5 Messgeräteübersicht

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über verbreitete Messgeräte, die in der Sachverständigentätigkeit entweder zur Unfalldokumentation oder zur Dokumentation von Vergleichsversuchen verwendet werden.

5.1 XLMeter



Bild A3-3 XLMeter

Das XLMeter-Messgerät ist ein batteriebetriebenes Messgerät zur Messung von Beschleunigungen und Verzögerungen bis 12,7 m/s². Das Gerät ist mit einem LCD Display ausgestattet, über eine serielle Schnittstelle können drei Messungen mit einer Aufzeichnungsrate von bis zu 200 Hz ausgelesen und am PC weiterverarbeitet werden. Das Gerät wird über eine Saugnapfhalterung an der Windschutzscheibe des zu messenden Fahrzeugs montiert, zur Überprüfung der Betriebsbremse des Fahrzeugs verfügt das Gerät über eine Software zur automatischen Auslösung, die gemessenen Durchschnittswerte werden direkt im Display angezeigt. [1]

5.2 PocketDAQ

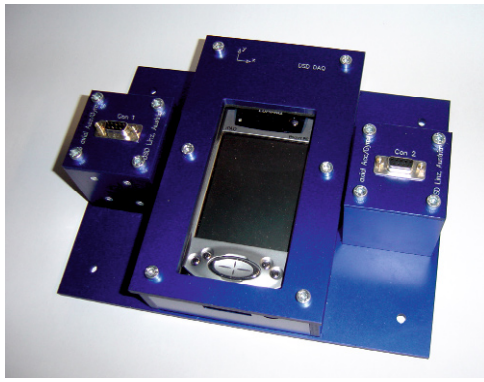


Bild A3-4 PocketDAQ-Messsystem

Das PocketDAQ ist ein 16-Kanal-Messsystem zur Erfassung von analogen Spannungssignalen mit einer Abtastrate von bis zu 10 kHz pro Kanal. Das System wird über einen Pocket PC gesteuert, der mit einer Datenerfassungskarte (12-Bit-Auflösung), Speicherkarte zur Speicherung der Messungen sowie einer Batterie zur Versorgung des Pocket PC und der Sensoren ausgerüstet ist. Das Messsystem ist auf einer Aluminiumplattform aufgebaut, auf der auch die drei axialen Beschleunigungssensoren (± 5 g für Bremsversuche und ± 50 g für Crash-Versuche) und ein 3 axialer Winkelgeschwindigkeitssensor (± 300 Grad/s) angebracht sind. Die Sensorwürfel können auch demontiert werden und beispielsweise bei Fahrdynamikversuchen über eine Saugnapfhalterung an der Windschutzscheibe angebracht werden.

Über eine PC-Auswertesoftware können aus den gemessenen Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten, Schwerpunktswege und Geschwindigkeiten sowie die Gier-, Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugs berechnet werden. Über die Winkelgeschwindigkeitssensoren ist eine Nickwinkelkorrektur beim Bremsversuch möglich. Zusätzliche Sensoren für Geschwindigkeitssignal, Bremspedalkraft etc. können an das Gerät angeschlossen werden. [9]

5.3 PICDaq, PICDaq-GPS



Bild A3-5 PocketDAQ-Messsystem

Das PICDaq ist ein 8-Kanal-Messsystem zur Erfassung von analogen Spannungssignalen mit einer Abtastrate von bis zu 1 kHz pro Kanal. Das System wird über einen Controller gesteuert, der über einen Analog/Digital Wandler (10-Bit-Auflösung) die Messwerte auf einer Speicherkarte (SD-Karte) speichert, weiters verfügt das Gerät über eine Batterie zur Versorgung des Controllers und der Sensoren. Das Messsystem ist auf einer Aluminiumplattform aufgebaut, auf der auch die 3-axialen Beschleunigungssensoren (± 5 g für Bremsversuche und ± 50 g für Crash-Versuche) und ein 3-axialer Winkelgeschwindigkeitssensor (± 300 Grad/s) angebracht sind. Die Sensorwürfel können auch demontiert werden und beispielsweise bei Fahrdynamikversuchen über eine Saugnapfhalterung an der Windschutzscheibe angebracht werden.

Alternativ kann auch ein GPS Empfänger an das Gerät anschlossen werden, die Signale des GPS insbesondere Geschwindigkeit, Kurs und Position werden dann auf der Speicherkarte gespeichert. Bei Verwendung eines 5 Hz GPS Empfängers kann somit eine sehr zuverlässige Geschwindigkeitsmessung durchgeführt werden.

Über eine PC-Auswertesoftware können aus den gemessenen Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten, Schwerpunktswege und Geschwindigkeiten sowie die Gier-, Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugs berechnet werden. Über die Winkelgeschwindigkeitssensoren ist eine Nickwinkelkorrektur beim Bremsversuch möglich. Zusätzliche Sensoren für Geschwindigkeitssignal, Bremspedalkraft etc. können an das Gerät angeschlossen werden. [9]

5.4 Racelogic



Racelogic erzeugt Datenlogger zur Aufzeichnung von Geschwindigkeit, Beschleunigungen, GPS Signalen mit CAN Schnittstelle in erster Linie für Performancemessungen (geringer Beschleunigungsmessbereich bis max. 20 g). Diese Geräte können daher für Brems- und Beschleunigungsversuche eingesetzt werden. Die Abtastrate beträgt 100 Hz [10].

Bild A3-6 VBOX Gerät [10]

5.5 Corrsys/Datron



Über optische Korrelation werden Strecken als Funktion der Zeit gemessen, durch Differentiation werden Geschwindigkeit und Beschleunigung über Zeit oder über Weg berechnet. Eine Anzeige über LCD steht zur Verfügung, ein Ausdruck in frei wählbaren Zeitintervallen sowie ein Ausdruck von Summenwerten ist möglich. Eine Datenübertragung über eine Schnittstelle zu einem PC/Laptop ist möglich. Die Auswertung erfolgt über ein Auswerteprogramm.

Der Messbereich beträgt 0,5 bis 400 km/h, die Wegauflösung 2,2 mm, Messunsicherheit < +/–0,1 %, Abtastrate bis 1.000 Hz. [8]

Bild A3-7 Corrsys Correvit 1 axialer optischer Sensor

5.6 Unfalldatenspeicher UDS

Der Unfalldatenspeicher, kurz: UDS, ist ein elektronisches, völlig autarkes Gerät, das nachträglich im Fahrzeug montiert werden kann. Der UDS zeichnet unter anderem die Geschwindigkeit des Fahrzeugs, aber auch das Betätigen z. B. von Blinker und Bremse auf. Ferner verfügt der UDS über Sensoren, mit denen die Beschleunigung in Längs- und in Querrichtung zum Fahrzeug gemessen wird. Bei Polizeifahrzeugen wird darüber hinaus erfasst, ob Signalhorn oder Blaulicht in Betrieb waren.

Auch wenn nur in einem der Fahrzeuge, die an einem Verkehrsunfall beteiligt waren, ein UDS eingebaut war, stehen dem Sachverständigen Möglichkeiten der Unfallanalyse offen, von denen er bisher nur träumen konnte. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs kann in den meisten Fällen direkt aus den UDS-Daten abgelesen werden.



Bild A3-8 UDS 2.0 (Siemens VDO)

Einer Aufzeichnung ist z. B. auch zu entnehmen, ob das Fahrzeug beschleunigt, oder ob und wie stark es gebremst wurde. Aus den Beschleunigungswerten ist abzulesen, aus welcher Richtung der Anstoß kam und wie stark er war.

Darüber hinaus verfügt jeder UDS über eine integrierte Uhr, so dass der Zeitpunkt des Unfalls festgestellt werden kann. Fahrzeugkennzeichen und Fahrgestellnummer sind im UDS hinterlegt, die Aufzeichnung kann also immer einem ganz bestimmten Fahrzeug zugeordnet werden.

Der UDS zeichnet zwar ständig Daten auf, dauerhaft gespeichert werden Daten jedoch nur unter bestimmten Bedingungen und dann nur über einen Zeitraum von etwa 45 s : 30 s vor und 15 s nach der Kollision. Um einen Unfall zu rekonstruieren reicht das völlig aus. Im Rahmen einer polizeilichen Geschwindigkeitskontrolle ließen sich diese Daten jedoch nicht verwenden.

Für das Auslesen der Daten ist spezielle Software notwendig. Die Daten sind fälschungssicher, Manipulationen werden von der Software erkannt. Die Aufzeichnungen können nur von autorisierten Sachverständigen und Händlern, die den UDS vertreiben, ausgelesen werden. Der Vertrieb liegt bei der Fa. Kienzle Argo GmbH. Die Sensoren des Gerätes erlauben auch den Einsatz bei Crash-Versuchen und Bremsversuchen. [4]

5.7 Motometer

Das Motometer ist ein mechanisches Messgerät das die Bremsverzögerung über der Zeit misst, das Gerät wird nicht mehr gebaut. Eine Masse mit einer Feder und einem Dämpfer wird ausgelenkt, ein Diagrammblatt wird mittels eines mechanischen Uhrwerks durch das Gerät gezogen.

Der Messbereich liegt zwischen 0 bis 6 s und 0,5 bis 9,81 m/s^2. Die Genauigkeit für die Beschleunigung a liegt bei 3 %, der Reibungsfehler beträgt 2 % vom Skalenendwert. [6]



5.8 VZM100

Die Bremsverzögerung über der Zeit wird gemessen. Die Messung erfolgt durch elektronische Bauteile. Der Ausdruck einer Kurve a(t) und die Berechnung der maximalen Bremsverzögerung ist direkt möglich. Anschluss einer Pedaldruckdose ist möglich, die Messwerte können auch über die serielle Schnittstelle ausgegeben werden.

Der Messbereich beträgt 0 bis 10 m/s^2, die Messgenauigkeit liegt unter < 1 % vom Endwert. Das Gerät verfügt über sechs feste Speicherplätze. [7]

Bild A3-9 VZM 100 (Maha)

5.9 VC2000/VC3000



Bild A3-10 VC3000 (Vericom)

Das Gerät misst elektronisch die Bremsverzögerung über der Zeit, eine Anzeige über LCD für Bremsweg, Geschwindigkeit, Zeit und mittlere Verzögerung über dem Weg ist möglich. Die Daten können über eine serielle Schnittstelle zu einem PC/Laptop übertragen werden. Die Auswertung am PC erfolgt über ein Auswerteprogramm.

Der Messbereich beträgt +3 bis –2 g, Geschwindigkeiten bis 500 km/h können aufgezeichnet werden, Strecken bis 900 m, bis zu 98 Einzelmessungen. Abtastrate 100 Hz. [5]

5.10 GPS

Das Global Positioning System (GPS) ist ein satellitengestütztes Navigationssystem des US-Verteidigungsministerium zur weltweiten Positionsbestimmung.

Die offizielle Bezeichnung ist „Navigational Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System“ (NAVSTAR-GPS). NAVSTAR wird manchmal auch als Abkürzung für „Navigation System using Timing and Ranging“ genutzt. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird das System häufig nur noch als GPS bezeichnet. GPS wurde am 17. Juli 1995 offiziell in Betrieb genommen.



Bild A3-11 Bluetooth GPS Empfänger (Garmin)

GPS basiert auf Satelliten, die ständig Signale ausstrahlen, aus deren Signallaufzeit GPS-Empfänger ihre Position bestimmen können. Theoretisch reichen dazu die Signale aus drei Satelliten, da daraus die genaue Position und Höhe bestimmt werden kann. In der Praxis haben aber die meisten GPS-Empfänger keine Uhr, die genau genug ist, um daraus die Laufzeiten korrekt berechnen zu können. Deshalb wird meist das Signal eines vierten Satelliten benötigt.

Mit den GPS-Signalen lässt sich aber nicht nur die Position, sondern auch die Geschwindigkeit des Empfängers bestimmen. Durch die relative Bewegung des Empfängers zu den Satelliten ergibt sich durch den Doppler-Effekt eine Verschiebung des Signals, und da die Geschwindigkeit der Satelliten bekannt ist, lässt sich die Geschwindigkeit des Empfängers berechnen.

Damit ein GPS-Empfänger immer zu mindestens vier Satelliten Kontakt hat, werden insgesamt mindestens 24 Satelliten eingesetzt, die die Erde jeden Sternentag zweimal in einer Höhe von 20.200 km umkreisen. Jeweils mindestens vier Satelliten bewegen sich dabei auf jeweils einer der sechs Bahnebenen, die 55° gegen die Äquatorebene inkliniert (geneigt) und gegeneinander um jeweils 60° verdreht sind.

In den verwendeten Frequenzbereichen breitet sich die elektromagnetische Strahlung ähnlich wie sichtbares Licht fast geradlinig aus und wird dabei durch das Wetter (Bewölkung, Niederschlag) nur wenig beeinflusst. Deshalb – und durch die geringe Sendeleistung der GPS-Satelliten – ist für den besten Empfang der Signale eine direkte Sichtverbindung zum Satelliten erforderlich. In Gebäuden, Tunneln, Tiefgaragen etc. war ein GPS-Empfang bis vor kurzem nicht möglich. Neue Empfängertechnologien ermöglichen jedoch nun auch Anwendungen in Gebäuden. Auch zwischen hohen Gebäuden kann es durch mehrfach reflektierte Signale (Mehrwege-Effekt) zu Ungenauigkeiten kommen. Zudem ergeben sich zum Teil große Ungenauigkeiten bei ungünstigen Satellitenkonstellationen, z. B. wenn nur drei dicht beieinander stehende Satelliten aus einer Richtung zur Positionsberechnung zur Verfügung stehen. Für eine genaue Positionsermittlung sollten möglichst Satellitensignale aus verschiedenen Himmelsrichtungen empfangbar sein.

Differential Global Positioning System (DGPS) ist eine Bezeichnung für Verfahren, die mehrere GPS-Empfänger zur Erhöhung der Genauigkeit verwenden. Bei dem Verfahren gibt es einen Empfänger, dessen Position bestimmt werden soll (Rover) und mindestens einen weiteren Empfänger, dessen Position bekannt ist (GPS-Basisstation). Eine Basisstation kann diverse Informationen über die Ursachen ermitteln, warum die mittels GPS bestimmte Position fehlerhaft ist, da deren Position bekannt ist. Mit diesen Informationen (Korrekturdaten) von einer Basisstation kann ein Rover seine Genauigkeit erhöhen. Die erreichbare Genauigkeit ist unter anderem vom Abstand zwischen Rover und Basistation abhängig.

5.10.1 Methoden des DGPS

Bei dem einfachsten Verfahren übermittelt die Basisstation ihren Positionsfehler an den Rover. Dieser korrigiert entsprechend seine Position. Dies funktioniert nur, wenn beide Empfänger die gleichen Satelliten auswerten (dies ist nur über kurze Distanz und in gleicher Umgebung der Fall).

Bei der Methode der Pseudorange-Korrektur berechnet die Basisstation die Fehler der Strecken zu den Satelliten und übermittelt diese an den Rover. So ist auch eine Korrektur möglich, wenn von der Basisstation und dem Rover unterschiedliche Satelliten empfangen werden. Es sind Genauigkeiten < 1 m möglich.

Die Übermittlung der Korrekturdaten von einer Basisstation zum Rover kann mittels Funk erfolgen. Ein Rover ist dann sofort in der Lage, seine Genauigkeit zu erhöhen. Auch im Nachhinein kann eine Korrektur erfolgen, wenn Rover und Basisstation alle Daten zur Positionsbestimmung aufzeichnen (Postprocessing). Die Korrekturdaten können von einem Anwender selbst erzeugt werden (mittels eines zweiten GPS-Empfängers) oder von diversen Anbietern bezogen werden (ALF, AMDS, SAPOS, ascos usw.).

Für die Bundesrepublik Deutschland werden Differential-Stationen von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung betrieben. Diese Stationen arbeiten nach dem internationalen IALA-Standard und senden Korrekturdaten auf Mittelwelle für den Küsten- und Binnenbereich aus. Zentrale technische Behörde ist die Fachstelle der WSV für Verkehrstechniken in Koblenz.

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) ist ein europäisches Erweiterungssystem zur Satellitennavigation, vergleichbar mit DGPS. Bei seiner Fertigstellung voraussichtlich 2006 soll es die Positionsgenauigkeit der Systeme GPS und GLONASS von 10 bis 20 m auf 1 bis 2 m steigern. Zusätzlich liefert es Informationssignale über die Integrität des Systems. Innerhalb von 5 bis 10 s warnt es die Nutzer, wenn die Positionierungssysteme falsche Daten ausstrahlen.

34 Bodenstationen (RIMS) empfangen die Positionssignale von GPS und Glonass. Daraus und aus der bekannten Position der RIMS berechnet das Kontrollzentrum (MCC) die Korrektursignale. Up-Link-Stationen (NLES) leiten sie an geostationäre Satelliten weiter, um so das EGNOS-Korrektursignal flächendeckend in Europa zur Verfügung zu stellen. Aus Redundanzgründen gibt es nicht nur ein, sondern vier MCC, die wechselseitig die Kontrolle von EGNOS übernehmen können.

EGNOS stützt sich auf zwei Inmarsat-Satelliten über Zentralafrika und Ostatlantik sowie den Forschungssatelliten Artemis (ebenfalls über Zentralafrika). Jeder Satellit erfordert eine NLES. Zur besseren Ausfallsicherheit ist jeweils eine weitere NLES vorgesehen.

5.10.2 Galileo

Galileo ist ein europäisches Satellitennavigationssytem. Es basiert auf 30 Satelliten (27 + drei Ersatz), die in einer Höhe von rund 24.000 km die Erde umkreisen, und einem Netz von Bodenstationen, die die Satelliten kontrollieren. Taschenempfänger in der Größe eines Handys müssen Signale von mindestens vier Satelliten gleichzeitig empfangen, um daraus die Position auf der Erde mit einer Genauigkeit von wenigen Metern zu bestimmen. Galileo ist für zivile Zwecke konzipiert und unterliegt nicht, wie das US-amerikanische GPS und das russische GLONASS, einer nationalen militärischen Kontrolle.

Der erste Testsatellit „Giove-A“ wurde am 28. Dezember 2005 um 6:19 Uhr MEZ auf dem Raumfahrtzentrum in Baikonur gestartet und hat um 13:51 in 23.222 km Höhe seinen planmäßigen Betrieb aufgenommen. Der Probebetrieb mit vier Satelliten ist für 2008 vorgesehen, 2010/11 soll das System mit allen 30 Satelliten verfügbar sein. [2], [3]

5.11 OBD

OBD ist die Abkürzung für „On Board Diagnostic“ oder die Onboard-Diagnose bei Kraftfahrzeugen, insbesondere moderner Pkw seit den 1980er Jahren.

Der erste Hersteller mit OBD war BMW mit der so genannten „Service-Intervallanzeige“, einer last- und nutzungsabhängigen optischen Anzeige mittels Leuchtdioden-Balken und einer entsprechenden Variierung der zuvor per Zeit- oder Km-Ablauf festgelegt Wartungsintervalle. (Anmerkung: Serviceanzeige hat nichts mit OBD zu tun.)

Mittlerweile versteht man in der Kfz-Technik OBD enger: im Sinne einer Einrichtung, die eine auftretende Fehlfunktion der Motorsteuerung, insbesondere der Gemischbildung dem Fahrer anzeigt und ihn zum Werkstattbesuch veranlasst.

Das Vorhandensein einer OBD-Anzeige im Sichtbereich des Fahrers ist nunmehr für eine Zulassung von neuen Fahrzeugen in Deutschland vorgeschrieben. Dies gilt für Pkw mit Benzinmotor ab Modelljahr 2000 und für Pkw mit Dieselmotoren ab Modelljahr 2003. Insbesondere Fahrzeugmodelle für den USA-Export sind aber auch in wesentlich älteren Baujahren OBD-(OBD-2)-fähig.

Zugang für die Fahrzeugdiagnose über OBD-2 ist die 16-polige OBD-2 Diagnosebuchse im Fahrzeug, die aber oft nicht nur für das herstellerübergreifende, abgasrelevante OBD-2 Diagnoseprotokoll verwendet wird, sondern auch für die spezifischen Diagnoseprotokolle der Hersteller.

OBD 2 enthält alle abgasrelevanten Daten unter anderem auch Geschwindigkeit, Drehzahl und Gaspedalstellung diese können bei Messfahrten über so genannte „Scan Tools“ aufgezeichnet werden.

5.12 Lackdickenmessung

Zur Messungen der Lackdicke werden Messgeräte nach dem Magnetinduktivverfahren (bei Stahlbleckuntergrund) und Wirbelstrommessverfahren (bei Nichteisenuntergrund) verwendet. Der Messbereich liegt üblicherweise zwischen 0 und 1,5 mm bei einer Auflösung von 1 µm.

Tabelle A3.1 Vergleich verschiedener Messgeräte

Name	Messprinzip	Gemessene Größe	Abgeleitete Größen	Genauigkeit	Abtastrate	Messbereich	Auflösung	Aufzeichnungszeit	Preis EUR (ca.)
Radar	Doppler	v	a, s	1 %	100 Hz	1,5–480 km/h	0,1 km/h		1.600
Radar	Doppler	v	a, s	1 %	10 Hz	6–500 km/h	1 km/h		700
GPS	Laufzeitmessung	s		ca. 15 m (95 %)	1–5 Hz	global			150
GPS	Doppler	v		0,2 km/h	1–5 Hz	0–1.600 km/h	0,1 km/h		150
Pocket DAQ	Piezo	a	v, s	1 %	variabel bis 10 kHz	± 50 g	0,02 g	variabel	3.500
Pocket DAQ	Piezo	a	v, s	1 %	variabel bis 10 kHz	± 5 g	0,002 g	variabel	
Pocket DAQ	Piezo	Omega	Phi	1 %	variabel bis 10 kHz	± 300 Grad/s	0,15 Grad/s	variabel	
PICDaq	Piezo	a	v, s	1 %	variabel bis 1 kHz	± 50 g	0,08 g	variabel	1.500
PICDaq	Piezo	a	v, s	1 %	variabel bis 1 kHz	± 5 g	0,008 g	variabel	
PICDaq	Piezo	Omega	Phi	1 %	variabel bis 1 kHz	± 300 Grad/s	0,6 Grad/s	variabel	
Messrad		s		1 cm		–	1 cm		300
Maßband		s		5 mm		0–30 m	1 mm		30
Messlatte		s		1 mm		0–5 m	1 mm		200
UDS		a		< 2,5 %		± 50 g		45 s	
UDS		v							
UDS		s							
Correvit		v	s, a	0,1 km/h	1.000 Hz	0–400 km/h	0,1		12.500
Motometer	mechanisch	a		3 %		0,5–9,81 m/s^2		6 s	–
XL Meter		a	s, v	0,1 m/s^2	200 Hz	±12,7 m/s^2	0,1 m/s^2	40 s x 3	800
Lackdicke				± 1 µm ± 2 %		0–5 mm	1 µm		
VZM100		a, Fb		0,1 m/s^2		0–10 m/s^2	0,1 m/s^2		1.250
VC2000		a, Fb			100 Hz	–2 g, +3 g			2.000

Literatur

[1] www.inventure.hu
[2] G. Xu: GPS-Theory, Algorithms and Applications. Springer-Verlag, 2003, ISBN 3540678123
[3] M. Bauer: Vermessung und Ortung mit Satelliten (2002)
[4] Unfalldatenspeicher Brochure, Siemens VDO Trading GmbH, Postfach 620127, D-60350 Frankfurt am Main, www.kienzle-argo.de
[5] www.ibwiek.de
[6] Motometer
[7] www.maha.de
[8] www.corrsys.com
[9] www.dsd.at
[10] www.racelogic.co.uk
[11] http://de.wikipedia.org/wiki/Verteilungsfunktion

A4 Systematik der Fahrzeugtechnik

Dr. Heinz Burg, Dr. Andreas Moser

1 Systematik der Kraftfahrzeuge

In dem Kraftfahrtechnischen Taschenbuch, das von der Firma Robert Bosch GmbH herausgegeben wird, ist eine Gliederung der Kraftfahrzeuge vorgenommen worden, die international verbreitet und anerkannt ist. Diese Systematik ist nachstehend wiedergegeben und wird in diesem Buch weitgehend verwendet.

In den einzelnen Ländern der Welt werden in den Straßenverkehrsgesetzen teilweise auch abweichende Kategorien und Einteilungen verwendet, auf die hier nicht eingegangen wird.

Tabelle A4.1 Einteilung von Kraftfahrzeugen

Straßenfahrzeug	Definition, Beispiele
Kraftfahrzeug (Kfz)	Maschinell angetriebenes Straßenfahrzeug
Kraftrad	Einspuriges Kfz mit 2 Rädern, eventuell mit Beiwagen
– Motorrad	Mit festen Fahrzeugteilen (z. B.: Tank) im Kniebereich
– Motorroller	Ohne feste Fahrzeugteile im Kniebereich
– Fahrrad mit Hilfsmotor	Mit Merkmalen von Fahrrädern (Moped, Mofa)
Kraftwagen	Zwei- oder mehrspuriges Kfz
Personenkraftwagen (Pkw)	Für maximal 9 Personen
– Limousine	Geschlossener Aufbau, maximal 4 Seitentüren
– Kabrio-Limousine	Verdeck zum Öffnen, feststehende Seitenwandumrandung
– Pullman-Limousine	Verlängerter Innenraum, maximal 6 Seitentüren
– Coupé	Geschlossener Aufbau, maximal 2 Seitentüren
– Kabriolett	Offener Aufbau, eventuell mit Überrollbügel, 2 oder 4 Türen
– Kombi	Vergrößerter Innenraum mit Ladefläche
– Nkw-Kombi	Transporter
– Spezial-Pkw	Krankenwagen, Wohnmobil
– Mehrzweck-Pkw	Geländewagen, Großraumlimousine
Nutzkraftwagen (Nkw)	Transport von Personen und Gütern
Kraftomnibus (KOM)	Transport von mehr als 9 Personen und Reisegepäck
– Kleinbus	Maximal 17 Personen
– Linienbus	Stadt- und Vorort-Linienverkehr, Sitz- und Stehplätze
– Überlandlinienbus	Überland-Linienverkehr, ohne spezielle Stehplätze

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_4

Straßenfahrzeug	Definition, Beispiele
– Reisebus	Langstreckenverkehr, keine Stehplätze
– Oberleitungsbus	Elektrischer Antrieb, Fahrstrom aus Oberleitung
– Gelenkbus	Zwei winkelbewegliche Fahrzeugteile mit Durchgang
– Spezialbus	Besondere Aufbauten für z. B. Behinderte, Gefangene
Lastkraftwagen (Lkw)	Transport von Gütern
– Vielzweck-Lkw	Lkw mit offenem oder geschlossenem Aufbau
– Spezial-Lkw	Transport spezieller Güter (z. B. Tank-Lkw) oder für besondere Einsatzzwecke (z. B. Abschleppwagen)
Zugmaschine	Nkw zum Ziehen von Anhängerfahrzeugen
– Anhängerzugmaschine	Mitführen von Anhängern, Gütern auf Hilfsladefläche
– Sattelzugmaschine	Mitführen von Sattelanhängern
– Traktor	Zugmaschine, auch zum Schieben, Tragen oder Antreiben von auswechselbaren Geräten
Anhängerfahrzeug	Nicht selbstfahrendes Straßenfahrzeug
– Gelenk-Deichselanhänger	
– Starr-Deichselanhänger	
– Zentralachsanhänger	
– Sattelanhänger	
– Lastanhänger	
– Busanhänger	
– Caravan	
– Spezialanhänger	
Fahrzeugkombination	Kfz mit Anhänger
– Personenkraftwagenzug	Pkw mit Anhänger
– Omnibuszug	KOM mit Anhänger
– Lastkraftwagenzug	Lkw mit Anhänger
– Zugmaschinenzug	Zugmaschine mit Anhänger
– Sattelkraftfahrzeug	Sattelzugmaschine mit Sattelanhänger
– Sattelzug	Sattelkraftfahrzeug mit Anhänger
– Brückenzug	Lkw oder Zugmaschine mit Spezialanhänger (Nachläufer), Last stellt Verbindung der beiden Fahrzeuge dar

2 Klasseneinteilung nach Vorschriften

Die Klasseneinteilung erfolgt nach den Richtlinien der Europäischen Union [2] und der ECE-Regelung Nr. 13.

Tabelle A4.2 Klasse L: Kraftfahrzeuge mit weniger als 4 Rädern, Krafträder, Dreiräder

Stufung	Bauart	Hubraum	Höchstgeschwindigkeit
L1	Zweirädrig	≤ 50 cm^3	≤ 50 km/h
L2	Dreirädrig	≤ 50 cm^3	≤ 50 km/h
L3	Zweirädrig	> 50 cm^3	> 50 km/h
L4	Dreirädrig asymmetrisch zur Fahrzeug-längsachse	> 50 cm^3	> 50 km/h
L5	Dreirädrig symmetrisch zur Fahrzeug-längsachse	> 50 cm^3, ≤ 1 t Ge-samtgewicht	> 50 km/h

Tabelle A4.3 Klasse M: zur Personenbeförderung bestimmte Kraftfahrzeuge mit mindestens 4 Rädern oder mit 3 Rädern und einem Gesamtgewicht von mehr als 1 t

Stufung	Führersitz + Sitzplätze	Gesamtgewicht
M1	1 bis 9	< 5 t
M2	> 9	< 5 t
M3	> 9	> 5 t

Tabelle A4.4 Klasse N: zur Güterbeförderung bestimmte Kraftfahrzeuge mit mindestens 4 Rädern oder mit 3 Rädern und einem Gesamtgewicht von mehr als 1 t

Stufung	Gesamtgewicht
N1	≤ 3,5 t
N2	> 3,5 t und ≤ 12 t
N3	> 12 t

Tabelle A4.5 Klasse O: Anhänger und Sattelanhänger

Stufung	Gesamtgewicht
O1 nur einachsige Anhänger	≤ 0,75 t
O2	> 0,75 t und ≤ 3,5 t
O3	> 3,5 t und ≤ 10 t
O4	> 10 t

3 Klasseneinteilung nach Marktgegebenheiten

3.1 Zweiradfahrzeuge



Roller/Scooter:
Diese Fahrzeuge gibt es ab 50 ccm Hubraum bis zu 600 ccm oder mehr. Die Fahrzeuge sind eher komfortorientiert und haben Automatikgetriebe, die größeren Modelle sind mit ABS lieferbar.



Leichtkrafträder:
Meist solide und einfach gebaut, bis 125 ccm Hubraum. Für Fahranfänger besonders geeignet.



Allrounder/Naked:
Unverkleidete Motorräder von eher einfacher Bauart in den unterschiedlichsten Hubraum- und Leistungsklassen.



Sport/Supersport:
Motorräder, die aus Maschinen abgeleitet wurden, die für Sportzwecke konstruiert wurden. Sitzposition des Fahrers, die teilweise ungünstig und ermüdend ist.



Tourer/Sporttourer:
Maschinen, die für längere Reisen gedacht sind, komfortabel, schwer, guter Geradeauslauf.



Enduro:
Souverän und gutmütig, für alle Strecken geeignet, egal ob Bergstraßen, Sandpisten oder winklige Gassen.



Cruiser/Custom:
Wie der Name schon sagt, zum gemütlichen Fahren auf guten Straßen geeignet.



Cross/Trial:
Für sportliche Leistung im Gelände. Zweitakt- oder Viertaktmotoren. Enorme Beschleunigung und zuverlässige Kontrolle des Fahrverhaltens sind wichtig. Leichte Aluminiumrahmen. Wettbewerbstaugliche Radaufhängungen.

3.2 Vierradfahrzeuge



Quad/ATV (all terrain vehicle):
Fahrzeuge, die zum Fahren in jedem Gelände tauglich sind. Sehr unterschiedliche Motorisierung und technische Ausstattung. Überwiegend Freizeitbereich.

Pkw:
Die Klasseneinteilung bei Pkw ist ständig im Wandel begriffen, was darauf zurückzuführen ist, dass aus Marketinggründen immer neue Nischenmodelle erfunden werden. Die jeweils aktuelle Einteilung kann den einschlägigen Automagazinen entnommen werden. Der Stand 2005 ist der nebenstehenden Aufzählung zu entnehmen.

- Minicars
- Kleinwagen
- Untere Mittelklasse
- Mittelklasse
- Obere Mittelklasse
- Luxusklasse
- Sportwagen
- Cabrios
- Crossover
- Geländewagen
- Vans

Transporter:
Transporter zählen zu den Nutzfahrzeugen. Es handelt sich um leichte Nutzfahrzeuge mit Gesamtgewichten von etwa 2 bis 7 t. Sie sind zur Güterverteilung und auch zum Personentransport gedacht. Hohe Anforderungen an Wendigkeit und Bedienkomfort. Unterschiedliche Antriebskonzepte, Fahrwerke, Aufbauten.

Aufbauarten:
- Kastenwagen mit und ohne Fenster
- Pritschenwagen mit einfacher und Doppelkabine
- Hochlader- und Tiefladerpritschen, mit und ohne Kipper
- Fahrgestelle für Sonderaufbauten

Lastkraftwagen:
Aufteilung in tragendes Fahrgestell und mittragende Aufbauten. Achsen meist starr mit Einzel- oder Zwillingsbereifung. Wichtig ist die Anzahl der Achsen und der angetriebenen Achsen. Bezeichnung der Fahrwerksart: N x Z/L, wobei N = Anzahl der Räder, Z = Anzahl der angetriebenen Räder, L = Anzahl der gelenkten Räder (z. B: 8 x 6/4 = Lkw mit 8 Rädern, davon sind 6 Räder angetrieben und 4 Räder sind lenkbar).

- Lastkraftwagen (Solo-Lkw)
- Lastzug (Lkw mit Anhänger)
- Großraumlastzug (Lkw mit Zentralachsanhänger)
- Sattelkraftfahrzeug

Omnibusse:
Fast für jeden speziellen Zweck werden von den Herstellern Fahrzeuge angeboten. Sogar Sonderausführungen für Großkunden sind üblich. Entsprechend unübersichtlich ist die Typenvielfalt, weshalb im Einzelfall genaue Auskunft über das spezielle Fahrzeug eingeholt werde muss. Einige Hauptarten sind rechts aufgeführt.

- Microbus
- Minibus
- Midibus
- Stadtomnibus
- Reiseomnibus

Literatur

[1] Bosch Kraftfahrtechnisches Handbuch. ISBN 3-528-03876-4
[2] EU-Richtlinie 71/320/EWG
[3] ECE Regelung 13
[4] Internetpräsenzen der Fahrzeughersteller
[5] Autozeitschriften

4 Begriffe aus der Fahrdynamik nach DIN 70 000

Tabelle A4.6 Begriffe aus der Fahrdynamik nach DIN 70 000

Koordinatensysteme (engl.: Axis systems)		
Ortsfestes Koordinatensystem (X_E, Y_E, Z_E)	Rechtwinkliges Rechtssystem, das an den Ort gebunden ist. Die X_E- und Y_E-Achsen liegen in einer Horizontalebene (= Fahrbahnebene) und die Z_E-Achse ist nach oben gerichtet.	earth-fixed axis system
Fahrzeugfestes Koordinatensystem (X_V, Y_V, Z_V)	Rechtwinkliges Rechtssystem mit einem beliebigen Koordinatenursprung im Fahrzeug (üblicherweise im Schwerpunkt) so, dass die X_V-Achse in jedem Fall waagerecht und nach vorne gerichtet ist, und sich in der Fahrzeuglängsebene befindet. Die Y_E-Achse steht senkrecht auf der Fahrzeuglängsmittelebene und zeigt nach links, die Z_V-Achse zeigt nach oben.	vehicle axis system
Horizontiertes Koordinatensystem (X, Y, Z)	Rechtwinkliges Rechtsystem, dessen XY-Ebene in der X_EY_E-Ebene liegt. Die X-Achse ist die Projektion der X_V-Achse auf die X_EY_E-Ebene und die Z-Achse zeigt nach oben.	intermediate axis system
Radfestes Koordinatensystem (X_W, Y_W, Z_W)		wheel axis system
Bewegung des Fahrzeugaufbaus (engl.: kinematics of sprung mass)		
Größen der linearen Bewegung		vehicle velocity
Fahrzeuggeschwindigkeit $\vec{v}$	Vektorielle Größe, welche die Geschwindigkeit des Ursprungs des fahrzeugfesten Koordinatensystems im ortsfesten Koordinatensystem beschreibt.	linear motion variables
Längsgeschwindigkeit v_X	Komponente der Fahrzeuggeschwindigkeit in Richtung der X-Achse.	longitudinal velocity
Quergeschwindigkeit v_Y	Komponente der Fahrzeuggeschwindigkeit in Richtung der Y-Achse.	lateral velocity
Vertikalgeschwindigkeit v_Z	Komponente der Fahrzeuggeschwindigkeit in Richtung der Z-Achse.	vertical velocity
Fahrzeugbeschleunigung $\vec{a}$	Vektorielle Größe, welche die Beschleunigung des Ursprungs des fahrzeugfesten Koordinatensystems im ortsfesten Koordinatensystem beschreibt. Komponenten analog zur Geschwindigkeit.	vehicle acceleration
Größen der Drehbewegung (engl.: angular motion variables)		
Gierwinkel ψ	Winkel (X_E,X), der sich aus einer Drehung um die Z_E-Achse ergibt.	yaw angle
Nickwinkel θ	Winkel (X,X_V), der sich aus einer Drehung um die Y-Achse ergibt.	pitch angle
Wankwinkel φ	Winkel (Y,Y_V), der sich aus einer Drehung um die X_V-Achse ergibt.	roll angle
Schwimmwinkel β $\beta = \arctan\frac{v_Y}{v_X}$	Winkel zwischen der X-Achse und der Richtung der Horizontalgeschwindigkeit, der sich aus einer Drehung um die Z-Achse ergibt.	sideslip angle
Winkelgeschwindigkeiten	Winkelgeschwindigkeiten können im fahrzeugfesten Koordinatensystem sowie auch im horizontierten Koordinatensystem definiert werden.	angular velocity
Giergeschwindigkeit $\frac{d\psi}{dt}$		yaw velocity

Nickgeschwindigkeit $\frac{d\theta}{dt}$		pitch velocity
Wankgeschwindigkeit $\frac{d\varphi}{dt}$		roll velocity
Größen zur Beschreibung der Bahnkurve (engl.: vehicle trajectory dimensions)		
Bahnkurve	Verlauf das auf die $X_E Y_E$-Ebene projizierten Ursprungs des fahrzeugfesten Koordinatensystems.	trajectory
Bahnradius R $R = \frac{v_h^2}{a_c}$	Abstand zwischen einem Punkt der Bahnkurve und dem zugehörigen Momentanpol.	path radius
Bahnkrümmung χ $\chi = \frac{1}{R}$		curvature of trajectory
Kurswinkel ν $\nu = \Psi + \beta$	Winkel zwischen *XE*-Achse und Horizontalgeschwindigkeit, der sich aus einer Drehung um die *Z*-Achse ergibt. Er kann aus dem Gierwinkel ψ und dem Schwimmwinkel β errechnet werden.	course angle
Kräfte und Momente (engl.: forces and moments)		
Kräfte *F* und Momente *M*	Äußere Kräfte, die zu einem bestimmten Zeitpunkt auf das Fahrzeug einwirken, können zu einem Kraftvektor $\vec{F}$ und zu einem Momentenvektor $\vec{M}$ zusammengefasst werden.	forces and moments
Längskraft F_X	Komponente der Kraft in Richtung der *X*-Achse	longitudinal force
Querkraft F_Y	Komponente der Kraft in Richtung der *Y*-Achse	lateral force
Vertikalkraft F_Z	Komponente der Kraft in Richtung der *Z*-Achse	vertical force
Radaufhängung (engl.: suspension)		
Ausrichtung und Lage des Rades		wheel orientation and positioning dimension
Radmittelebene	Mittelebene der Radfelge senkrecht zur Raddrehachse	wheel plane
Radmittelpunkt	Schnittpunkt der Raddrehachse mit der Radmittelebene	wheel centre
Radaufstandspunkt	Schnittpunkt der Radmittelebene mit der vertikalen Projektion der Raddrehachse auf die Fahrbahnebene	centre of tyre contact
Radstand *l*	Abstand zwischen den Radaufstandspunkten der beiden Räder auf der gleichen Seite des Fahrzeugs auf die *X*-Achse projiziert	wheelbase
Spurbreite *b*	Abstand zwischen den Radaufstandspunkten der beiden Räder einer Achse auf die *YZ*-Ebene projiziert. Bei Zwillingsrädern ist dies der Abstand zwischen den Punkten, die in der Mitte zwischen den Radaufstandspunkten beider Zwillingsradeinheiten liegen. Radstand und Spurweite bleiben im Regelfall nicht konstant.	track
Geometrie der Lenkachse (engl.: kingpin geometry)		
Lenkachse	Achse, um welche das Rad beim Lenken gegenüber dem Fahrzeugaufbau schwenkt. Dabei ist die Lenkanlage bis auf die Belastung, die sich aus den Bedingungen des statischen Bezugszustands ergeben, unbelastet.	steering axis
Spreizung σ	Winkel zwischen der *Z*-Achse und der Lenkachse projiziert auf die *YZ*-Ebene. Sie ist positiv, wenn die Lenkachse oben nach innen geneigt ist.	kingpin inclination angle

Lenkrollhalbmesser r_σ	Projektion des Lenkhebelarmes in der Fahrbahnebene r auf die Y_W-Achse. Er ist positiv, wenn der Radaufstandspunkt außerhalb des Schnittpunkts von Lenkachse und Fahrbahnebene liegt.	transverse offset at ground
Nachlaufwinkel τ	Winkel zwischen der Z-Achse und der Projektion der Lenkachse auf die X_Z-Ebene. Er ist positiv, wenn das obere Ende der Lenkachse nach hinten geneigt ist.	castor angle
Sturzwinkel ε_ν	Der Winkel zwischen Z-Achse und Radmittelebene. Er ist positiv, wenn die Oberseite des Rades in Bezug zum Fahrzeugaufbau nach außen geneigt ist.	camber angle
Lenkung		steering
Radlenkwinkel δ		steer angle
Statischer Gesamtvorspurwinkel Δ	Summe der statischen Vorspurwinkel des linken und rechten Rades bei Geradeausstellung der Lenkung. Der statische Vorspurwinkel ist dabei der Winkel zwischen X-Achse und X_W-Achse. Er ist positiv, wenn der Schnittpunkt zwischen X_W-Achse und X-Achse vor dem Radaufstandspunkt liegt.	total static toe angle
Ackermannwinkel δ_A	Winkel, dessen Tangens der Radstand dividiert durch den Bahnradius der Hinterachsmitte bei sehr niedriger Fahrzeuggeschwindigkeit ist. Bei mehr als einer Hinterachse kann diese Hinterachsmitte nicht geometrisch festgelegt werden.	Ackermann steer angle
Lenkradwinkel δ_H	Verdrehwinkel des Lenkrades gemessen aus der Geradeausstellung. Er ist bei Linkskurven des Fahrzeugs positiv.	steering-wheel angle
Auswirkung der Elastokinematik (engl.: compliance effects)		
Dies sind die Auswirkungen, die sich infolge elastischer Verformungen der Elemente von Radaufhängung und Lenkung sowie deren Verbindungselemente ergeben. Sie werden durch Änderungen in den Längs- und Querkräften und Drehmomenten erzeugt, welche im Radaufstandspunkt oder im Radmittelpunkt angreifen.		
Radlenkwinkeländerung infolge Elastizitäten	Änderungen des Radlenkwinkels infolge elastischer Verformungen.	compliance steer
Sturwinkeländerung infolge Elastizitäten		compliance chamber angle
Wanken (engl.: roll)		
Dies sind die Auswirkungen, die sich infolge elastischer Verformungen der Elemente von Radaufhängung und Lenkung sowie deren Verbindungselemente ergeben. Sie werden durch Änderungen in den Längs- und Querkräften und Drehmomenten erzeugt, welche im Radaufstandspunkt oder im Radmittelpunkt angreifen.		
Wankzentrum	Der Punkt in der vertikalen Querebene durch die Radmittelpunkte einer Achse, in welchem an der gefederten Masse eine Querkraft aufgebracht werden kann, ohne das ein kinematischer Wankwinkel erzeugt wird.	roll centre
Wankachse	Verbindungslinie, welche das vordere und das hintere Wankzentrum verbindet.	roll axis
Kinematische Wanksteifigkeit	Verhältnis der Änderung des rückstellenden Momentes, welches von der Aufhängung einer Achse auf die gefederte Fahrzeugmasse ausgeübt wird, zur Änderung des kinematischen Wankwinkels.	suspension roll stiffness
Kinematische Wanksteiffigkeit	Summe der einzelnen kinematischen Wanksteifigkeiten an Vorder- und Hinterachse.	total suspension roll stiffness

Lenkeigenschaften (engl.: seer properties)		
Eigenlenkgradient $\frac{\partial \delta_H}{\partial a_Y} \times \frac{1}{i_S} - \frac{\partial \delta_D}{\partial a_Y}$		understeer gradient
Untersteuern	Lenkeigenschaft bei stationärem Gleichgewicht, wobei der Eigenlenk-Gradient positiv ist.	understeer
Übersteuern	Lenkeigenschaft bei stationärem Gleichgewicht, wobei der Eigenlenk-Gradient negativ ist.	oversteer
Neutrales Fahrverhalten	Lenkeigenschaft bei stationärem Gleichgewicht, wobei der Eigenlenk-Gradient null ist.	neutral steer
Räder und Reifen (engl.: wheels and tyres)		
In diesem Abschnitt bedeutet der Begriff „Rad“ die Rad/Reifen-Einheit. Die definierten Begriffe beziehen sich auf das radfeste Koordinatensystem. Die Schreibweise erlaubt die Definition in Bezug auf andere Koordinatensysteme. Außerdem können die Buchstaben (X_W, Y_W, Z_W) mit Fußnoten zur Bezeichnung des betreffenden Rades versehen sein. Ungerade Zahlen bezeichnen die linksseitigen Räder und gerade Zahlen die rechtsseitigen Räder in der Reihenfolge der Achsen von vorne nach hinten.		
Schräglaufwinkel α	Winkel von der X_W-Achse zur Tangente der Bahnkurve des Radaufstandspunktes. Er ist positiv nach links.	slip angle
Radsturzwinkel ε_W	Winkel zwischen Z_W-Achse und Radebene. Er ist positiv nach rechts.	inclination angle
Dynamischer Rollradius $r_{dyn} = \frac{C_R}{2\pi}$		dynamic rolling radius
Reifenrollwiderstand F_R	Verlust (oder verbrauchte Energie) im Reifen pro Einheit zurückgelegten Weges. Er entspricht einer Zugkraft.	rolling resistance of tyre
Rollwiderstandsbeiwert $\frac{F_R}{F_{Z,W}}$	(üblicherweise in1/1.000 ausgedrückt)	rolling resistance
Umfangskraft am Rad $F_{X,W}$	Komponente der Bodenreaktionskraft in Richtung der X_W-Achse.	longitudinal force at wheel
Seitenkraft am Rad $F_{Y,W}$	Komponente der Bodenreaktionskraft in Richtung der Y_W-Achse.	lateral force at wheel
Radlast $F_{Z,W}$	Komponente der Bodenreaktionskraft in Richtung der Z_W-Achse.	vertical force at wheel
Umfangsschlupf $S_{X,W}$ $s_{X,W} = \frac{\varpi - \varpi_0}{\varpi_0}$		longitudinal slip
Seitenkraftbeiwert $\mu_{Y,W}$		lateral force coefficient
Maximaler Seitenkraftbeiwert $\mu_{Y,W,max}$	Maximaler Wert von $\mu_{Y,W}$, der für ein frei rollendes Rad auf einen gegebenen Belag bei gegebenen Bedingungen erreicht wird.	maximum lateral force coefficient
Gleitbeiwert in Querrichtung $\mu_{Y,W,lock}$	Seitenkraftbeiwert $\mu_{Y,W}$, wobei die Längskomponente des Radgeschwindigkeitsvektors und die Drehgeschwindigkeit null sind.	sliding lateral force coefficient
Seitensteifigkeit	Verhältnis der Änderung der Seitenkraft am Rad zur Verschiebung des Radmittelpunktes relativ zur Radaufstandsfläche in negative Richtung der Y_W-Achse.	lateral stiffness

A5 Kinematik

Dr. Manfred Becke, Dr. Heinz Burg, Dr. Andreas Moser

1 Weg-Zeit-Analyse

Für die rechtliche Beurteilung eines Unfalls ist das Geschehen bis zur Kollision bedeutsam. Und zwar ab dem Zeitpunkt, an dem die den Unfall herbeiführenden Umstände vorliegen, wie z. B. ein Überholbeginn, ein Abbiegebeginn oder das Auftauchen des Unfallgegners im Sichtbereich. Nicht die Kollision selbst ist für die rechtliche Beurteilung wichtig, sondern die Umstände, die dazu führten und diese liegen im Zeitraum davor. Im Anschluss an eine durchgeführte Kollisionsanalyse ist es daher notwendig, den relevanten davor liegenden Zeitraum zu analysieren.

Die Verbindung von objektiven Unterlagen wie Schadenbilder der Fahrzeuge, Sichtweite und ähnliches mit den Aussagen der unfallbeteiligten Fahrzeuglenker und Zeugen ermöglicht vielfach eine Analyse des Unfallgeschehens, oder können zumindest Behauptungen als technisch möglich bestätigt oder widerlegt werden (Plausibilitätsprüfung von Aussagen). Eine Weg-Zeit-Analyse anzustellen heißt, den Zusammenhang zwischen Zeitpunkt und Position der beteiligten Fahrzeuge oder Fußgänger darzustellen.

1.1 Weg-Zeit-Funktionen

Die Beschreibung einer allgemeinen Bewegung lässt sich durch Zerlegen in einzelne Abschnitte vereinfachen, wobei jeder idealisiert mit Hilfe einer einfachen Funktion dargestellt wird.

Die mathematische Funktion des Weges in Abhängigkeit von der Zeit erhält man durch zweimaliges Integrieren der Beschleunigungsfunktion. Die erste Integration liefert die Geschwindigkeit, die zweite den Weg. Umgekehrt gelangt man durch einmaliges Differenzieren ausgehend von der Wegfunktion zur Geschwindigkeitsfunktion und durch ein zweites Differenzieren zur Beschleunigungsfunktion.

1.1.1 Gleichförmige Bewegung

Dies ist die einfachste Bewegungsform, die Geschwindigkeit bleibt konstant, die Beschleunigung ist daher Null. In den nachstehenden Formeln bedeutet der Index *A* den Anfangswert der Größe und der Index *E* den Endwert.

$$v_E = v_A = \frac{s_E - s_A}{t_E - t_A} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad \text{(A5-1)}$$

Im Weg-Zeit-Diagramm ergibt die gleichförmige Bewegung eine Gerade. Die Steigung hängt von der Geschwindigkeit ab.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_5

1.1.2 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Diese Bewegungsform ist definiert durch eine konstante Beschleunigung, d. h., in derselben Zeitspanne ändert sich die Geschwindigkeit um den gleichen Betrag (entlang des Weges ändert sich die Geschwindigkeit nicht gleichmäßig).

$$v_E = v_A + a \cdot (t_E - t_A) \qquad \text{(A5-2)}$$

$$s_E = s_A + v_A \cdot (t_E - t_A) + \frac{a}{2} \cdot (t_E - t_A)^2 \qquad \text{(A5-3)}$$

Im Weg-Zeit-Diagramm ergibt die gleichmäßig beschleunigte Bewegung eine Parabel. Je stärker die Krümmung desto größer ist die Beschleunigung. Krümmt sich die Kurve nach oben, so handelt es sich um eine Bewegung mit positiver Beschleunigung, d. h., die Geschwindigkeit nimmt zu, alternativ dazu handelt es sich um einen Bremsvorgang.

1.1.3 Gleichmäßige Änderung der Beschleunigung

Diese Bewegungsform ist durch eine zeitlich konstante Änderung der Beschleunigung charakterisiert. Anwendungsmöglichkeiten finden sich in der Bremsschwellphase und bei veränderlicher Verzögerung auf nasser Fahrbahn.

$$a_E = a_A + k \cdot (t_E - t_A) \qquad \text{(A5-4)}$$

Aus den obigen Grundgleichungen lassen sich die folgenden Formeln zur allgemeinen Anwendung ableiten.

1.1.4 Translatorische Bewegung

Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit:

$$v = \frac{s}{t} \qquad s = v \cdot t \qquad t = \frac{s}{v}$$

Bewegung mit konstanter Beschleunigung (von $v_0 = 0$ auf v), Bewegung mit konstanter Verzögerung (von v auf $v_0 = 0$):

s in m	$\frac{1}{2} a \cdot t^2$	$\frac{v^2}{2 \cdot a}$	$\frac{v}{2} t$
v in m/s	$a \cdot t$	$\sqrt{2 \cdot a \cdot s}$	$\frac{2 \cdot s}{t}$
t in s	$\frac{v}{a}$	$\frac{2 \cdot s}{v}$	$\sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}}$
a in m/s^2	$\frac{v}{t}$	$\frac{v^2}{2 \cdot s}$	$\frac{2 \cdot s}{t^2}$

Bewegung mit konstanter Beschleunigung und Anfangsgeschwindigkeit $v_0 < v$:

s in m	$v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$	$\frac{v_0 + v}{2} \cdot t$	$\frac{v^2 - {v_0}^2}{2 \cdot a}$

v in m/s	$v_0 + a \cdot t$	$\sqrt{{v_0}^2 + 2 \cdot a \cdot s}$	
t in s	$\frac{v - v_0}{a}$	$\frac{2 \cdot s}{v_0 + v}$	
a in m/s^2	$\frac{v - v_0}{t}$	$\frac{v^2 - {v_0}^2}{2 \cdot s}$	$\frac{2 \cdot (s - v_0 \cdot t)}{t^2}$

Bewegung mit konstanter Verzögerung und Anfangsgeschwindigkeit $v_0 > v$:

s in m	$v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$	$\frac{v_0 - v}{2} \cdot t$	$\frac{{v_0}^2 - v^2}{2 \cdot a}$
v in m/s	$v_0 - a \cdot t$	$\sqrt{{v_0}^2 - 2 \cdot a \cdot s}$	
t in s	$\frac{v_0 - v}{a}$	$\frac{2 \cdot s}{v_0 + v}$	
a in m/s^2	$\frac{v_0 - v}{t}$	$\frac{{v_0}^2 - v^2}{2 \cdot s}$	$\frac{2 \cdot (v_0 \cdot t - s)}{t^2}$

1.1.5 Rotatorische Bewegung

Drehbewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit:

Drehwinkel φ im Bogenmaß	$\varphi = \omega \cdot t$	$\varphi = \frac{s}{r}$	
Weg s bei bekanntem Radius r	$s = r \cdot \varphi$	$s = r \cdot \omega \cdot t$	$s = v \cdot t$
Winkelgeschwindigkeit in 1/s	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$	$\omega = \frac{v}{r}$
Umfangsgeschwindigkeit in m/s	$v = r \cdot \omega$	$v = \frac{r \cdot \pi \cdot n}{30}$	
Zeit t in s	$t = \frac{\varphi}{\omega}$	$t = \frac{s}{v}$	$t = \frac{s}{r \cdot \omega}$
Drehzahl n in 1/min	$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi}$	$n = \frac{30 \cdot v}{r \cdot \pi}$	

Drehbewegung mit konstanter Winkelbeschleunigung:

Drehwinkel φ im Bogenmaß	$\varphi = \frac{s}{r}$	$\varphi = \frac{\omega}{2} \cdot t$	$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot z$	$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot t^2$
Weg s bei bekanntem Radius r	$s = r \cdot \varphi$	$s = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot z$	$s = \frac{\omega}{2} \cdot r \cdot t$	$s = \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{r}{\varepsilon}$

Winkelgeschwindigkeit ω in 1/s	$\omega = \frac{v}{t}$	$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$	$\omega = \varepsilon \cdot t$	$\omega = \sqrt{2 \cdot \varphi \cdot \varepsilon}$
Winkelbeschleunigung ε in 1/s^2	$\varepsilon = \frac{\omega}{t} \cdot \frac{b_t}{r}$	$\varepsilon = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{t}$	$\varepsilon = \frac{2 \cdot \varphi}{t^2}$	$\varepsilon = \frac{\omega^2}{2 \cdot \varphi}$
Umfangsgeschwindigkeit v in m/s	$v = \varepsilon \cdot r \cdot t$	$v = \sqrt{2 \cdot r \cdot \varepsilon \cdot s}$		
Umfangsbeschleunigung b_t in m/s^2	$b_t = r \cdot \varepsilon$	$b_t = \frac{\omega \cdot r}{t}$	$b_t = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r}{t}$	
Zeit t in s	$t = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{2 \cdot s}{r \cdot \omega}$	$t = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{\varepsilon}$	$t = \frac{v}{r \cdot \varepsilon}$	$t = \frac{2 \cdot z}{n}$
Zahl der Umdrehungen z	$z = \frac{n}{2} \cdot t$	$z = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi}$	$z = \frac{s}{\pi \cdot d}$	$z = \frac{\omega}{2} \cdot \frac{t}{2 \cdot \pi} = \frac{\omega \cdot t}{4 \cdot \pi}$

2 Weg-Zeit-Diagramm

2.1 Einleitung

Ein sehr altes Hilfsmittel des Sachverständigen bei der Analyse eines Verkehrsunfalls ist das Weg-Zeit-Diagramm. Dieses aufgrund neuer und moderner Berechnungs- und Analysemöglichkeiten als überholt abzustempeln, wäre jedoch fatal. Auch heute kommt dem Weg-Zeit-Diagramm nicht nur aufgrund seiner visuellen Anschaulichkeit sowohl im schriftlichen, als auch im mündlich zu erstattenden Gutachten eine große Bedeutung zu.

Ein geübter Umgang mit dem Weg-Zeit-Diagramm sollte zum Standardrepertoire eines jeden unfallanalytisch arbeitenden Sachverständigen gehören, da häufig erst dadurch Zusammenhänge erkannt werden.

2.2 Einführung in die Thematik – Das Weg-Zeit-Diagramm

Ursprünglich entstammt das Weg-Zeit-Diagramm der Eisenbahnfahrt, bzw. der Planung von Zugfahrplänen. Es wurde dazu verwendet, um anschaulich darzustellen, welcher Zug zu welcher Uhrzeit auf welchem Gleisabschnitt unterwegs ist. Darüber hinaus lässt sich dem Weg-Zeit-Diagramm entnehmen, wie schnell die Züge unterwegs sind und welche Haltezeiten im Bahnhof einem Zug zugewiesen wurden. Terminüberschneidungen, Stau- oder gar Unfallgefahren sind im Weg-Zeit-Diagramm leicht ablesbar.

Bild A5-1 zeigt ein solches Weg-Zeit-Diagramm in Rohform. Hierzu wird in einem Koordinaten-system auf der Abszisse der Weg und auf der Ordinate die Zeit aufgetragen. Die Zeitachse verläuft sinnvoller- und üblicherweise von oben nach unten, wie es die Pfeilrichtung darstellt. Mit fortschreitender Zeitdauer bewegt sich der Verkehrsteilnehmer also von oben nach unten. Die Richtung der Wegachse hängt von der Bewegungsrichtung des zu betrachtenden Verkehrsteilnehmers ab. Parallel zur Wegachse werden üblicherweise mehrere Linien (Zeit-Hilfslinien) im Abstand von 1 s gezeichnet. Die Einheit für die Wegachse wird meist in Meter (m) angegeben. Allerdings existieren bezüglich der Gestaltung keine Vorschriften, so dass bei-

spielsweise auch die Zeitachse von unten nach oben verlaufen kann, wenn dies gewünscht oder sinnvoll ist.

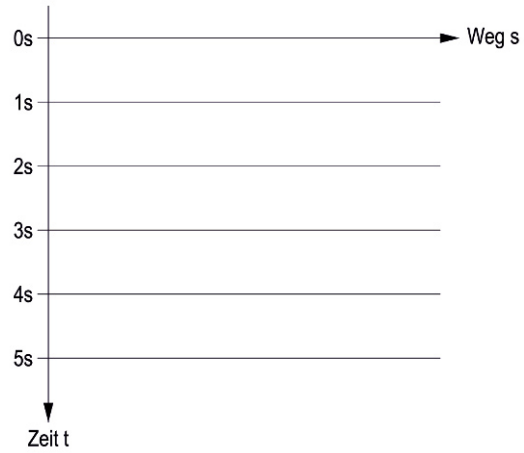


Bild A5-1 Koordinatenachsen im Weg-Zeit-Diagramm

Was das Weg-Zeit-Diagramm im Grunde darstellt, ist theoretisch gesehen denkbar einfach: Jeder Verkehrsteilnehmer (ursprünglich der Zug, bei der Unfallanalyse naturgemäß auch Pkw, Lkw, Fußgänger etc.) befindet sich zu einem beliebigen Zeitpunkt an einem bestimmten Ort. Zu einem späteren Zeitpunkt befindet sich der Verkehrsteilnehmer – sofern er sich bewegt hat oder in Bewegung ist – an einem anderen Ort und an einem dritten Zeitpunkt erneut an einem anderen Ort. Über die Wegkoordinate und die zugehörige Zeitkoordinate ist die Position eines jeden Verkehrsteilnehmers im Weg-Zeit-Diagramm eindeutig festgelegt. Dem Weg-Zeit-Diagramm ist also zu entnehmen, wo sich welcher Verkehrsteilnehmer zu welchem Zeitpunkt befand.

Für den Unfallanalytiker lassen sich im Weg-Zeit-Diagramm Fahrvorgänge unfallbeteiligter Fahrzeuge sowohl vor als auch nach dem Unfallgeschehen anschaulich graphisch dar- und einander gegenüberstellen. Auch Fahrvorgänge von nicht am Unfallgeschehen beteiligten Fahrzeugen können unter Umständen – beispielsweise zur Überprüfung von Zeugenaussagen – in das Diagramm eingebunden werden.

Mit der Darstellung der tatsächlichen und fiktiven Fahrlinien der unfallbeteiligten Fahrzeuge, bzw. Personen sind die Möglichkeiten des Weg-Zeit-Diagramms noch nicht erschöpft. Zu den weiteren Optionen gehört die Einbindung von Schaltzeiten von Lichtsignalanlagen (z. B. bei Kreuzungsunfällen), Erkennbarkeitsweiten (bei Dunkelheitsuntersuchungen), Sichtschattenkurven (bei verdeckter oder eingeschränkter Sicht) sowie die Glanzstreifenwanderung (bei Unfällen auf nasser, beleuchteter Fahrbahn). Diese Sonderthemen werden jedoch in diesem Kapitel nicht behandelt.

2.3 Grundlagen zur Verwendung des Weg-Zeit-Diagramms

Bewegungen werden im Weg-Zeit-Diagramm als Linien dargestellt; diese können gerade oder gekrümmt verlaufen. Bei einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit – hierzu zählt auch der Stillstand mit einer konstanten „Geschwindigkeit“ von 0 km/h – ist der Verlauf geradlinig, bei einer beschleunigten oder verzögerten Bewegung ist der Verlauf gekrümmt und beschreibt eine Parabel.

Mathematisch ist dies leicht zu erklären: Setzt man den zurückgelegten Weg eines Gegenstands in Abhängigkeit von der Zeitdauer, so ergibt sich bei konstanter Geschwindigkeit $s(t) = v \cdot t$. Dies entspricht der Funktion der Geradengleichung.

Bei beschleunigter oder verzögerter Fahrt verkompliziert sich die Berechnung. Der zurückgelegte Weg lässt sich mit der Formel $s(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$ berechnen. Die Zeit als Variable der Gleichung fließt nun quadratisch in die Berechnung ein, wodurch sich in der graphischen Ansicht eine Parabel ergibt. Die Beschleunigung a ist in diesem Fall der konstante Faktor.

Die verschiedenen Möglichkeiten bezüglich der Fahrvorgänge eines Fahrzeugs sind in **Bild A5-2** dargestellt.

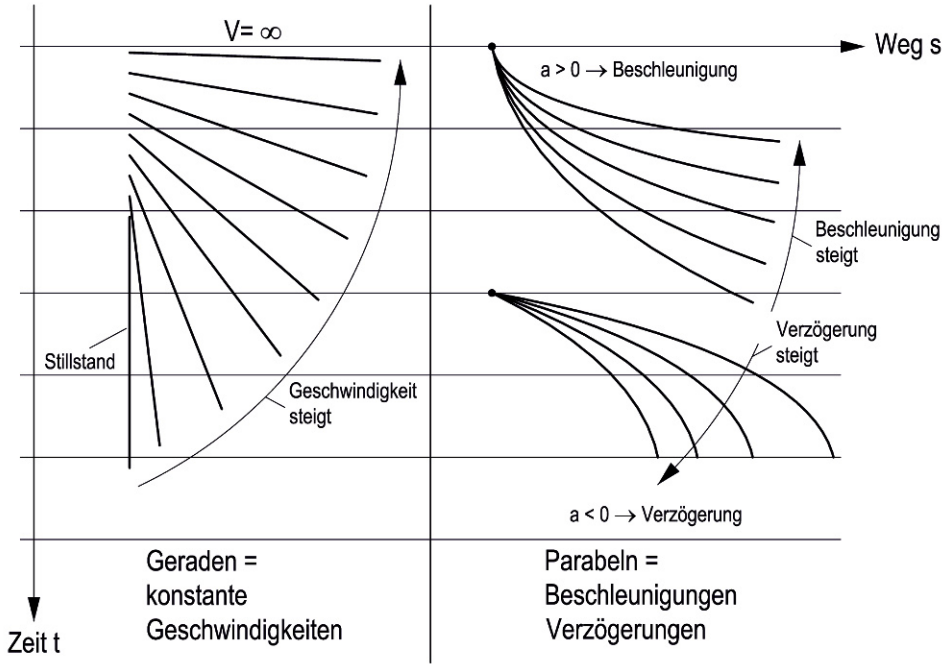


Bild A5-2 Prinzipielle Darstellung verschiedener Fahrvorgänge

Es ist zu beachten, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die Gerade flacher wird, sich also der Horizontalen annähert. Im theoretischen Maximalfall unendlicher Geschwindigkeit verläuft die Linie exakt horizontal, also parallel zur Wegachse. Bei Stillstand verläuft die Gerade parallel zur Zeitachse, also in der Senkrechten. Der Beschleunigungsvorgang aus dem Stillstand beginnt stets an einer Senkrechten, analog endet eine Verzögerung bis zum Stillstand ebenfalls an einer Senkrechten.

Die abstrakte Darstellung im Koordinatensystem kann zusätzlich durch die Skizzierung der Fahrzeugpositionen veranschaulicht werden, siehe **Bild A5-3**. Im Weg-Zeit-Diagramm ist ein Bremsvorgang bis in eine Stillstandsposition dargestellt. Zu jeder vollen Sekunde ist hier beispielhaft die korrespondierende Fahrzeugposition auf der Straße einskizziert. So ergibt sich der auch für den Laien gut nachvollziehbare Zusammenhang von Fahrvorgängen.

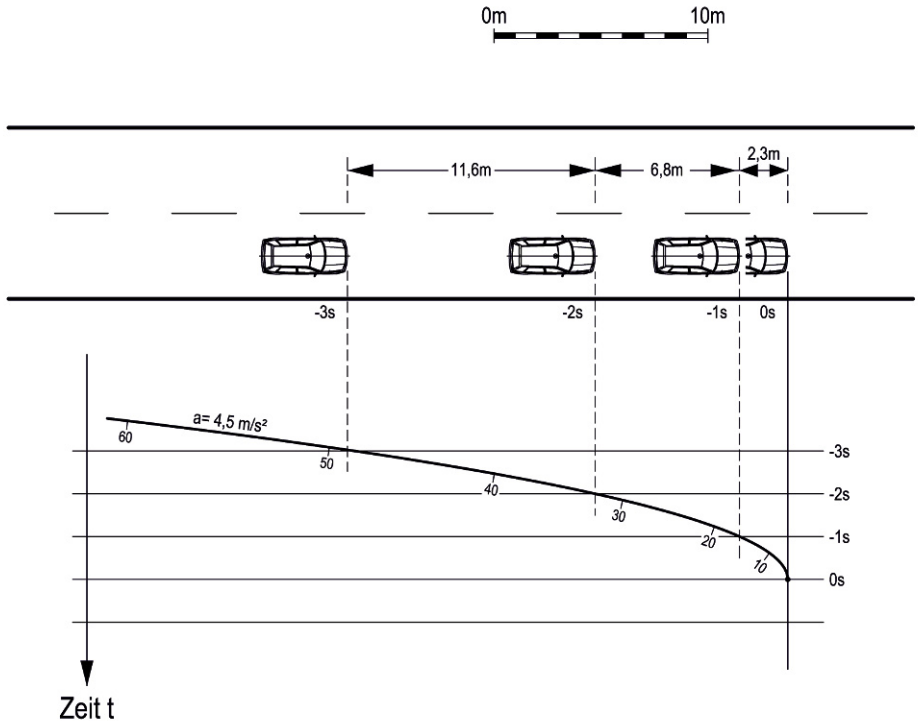


Bild A5-3 Fahrzeugpositionen zu verschiedenen Zeitpunkten

Diese theoretischen Darstellungen sollen beispielhaft auf einen realistischen Fahrvorgang eines Pkw angewendet werden, siehe hierzu **Bild A5-4**. Der Pkw befindet sich zu Beginn der Betrachtung (t = 0 s) zunächst in einer Stillstandsposition. Bei t = 1 s beginnt der Beschleunigungsvorgang – das Fahrzeug wird mit einer konstanten Beschleunigung von 2 m/s^2 auf 30 km/h beschleunigt. Über einen gewissen Zeitraum wird die konstante Geschwindigkeit von 30 km/h beibehalten, ehe das Fahrzeug bei t = 8 s durch einen Abbremsvorgang mit einer konstanten Verzögerung von 5 m/s^2 wieder zum Stillstand gebracht wird. Man erkennt auf der Abbildung, wie die verschiedenen Fahrzustände – erst Stillstand, dann Beschleunigung, konstante Fahrt, Verzögerung und abschließend erneuter Stillstand – nahtlos miteinander verbunden sind.

Bereits an dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die bei der Weg-Zeit-Analyse angesetzten Fahrvorgänge in der Regel idealisierten Annahmen entsprechen. Kein Fahrzeugführer wird über einen kurzen oder längeren Zeitraum ein Fahrzeug bei absolut konstanter Geschwindigkeit bewegen, bzw. vollständig konstant beschleunigen oder verzögern können. Wie immer bei der Unfallrekonstruktion hängt auch bei der Weg-Zeit-Analyse die Genauigkeit der Ergebnisse in erster Linie von der Genauigkeit der Eingabeparameter ab und natürlich sind gesicherte Unter- und Obergrenzen bei der Festlegung von Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Verzögerungen anzusetzen.

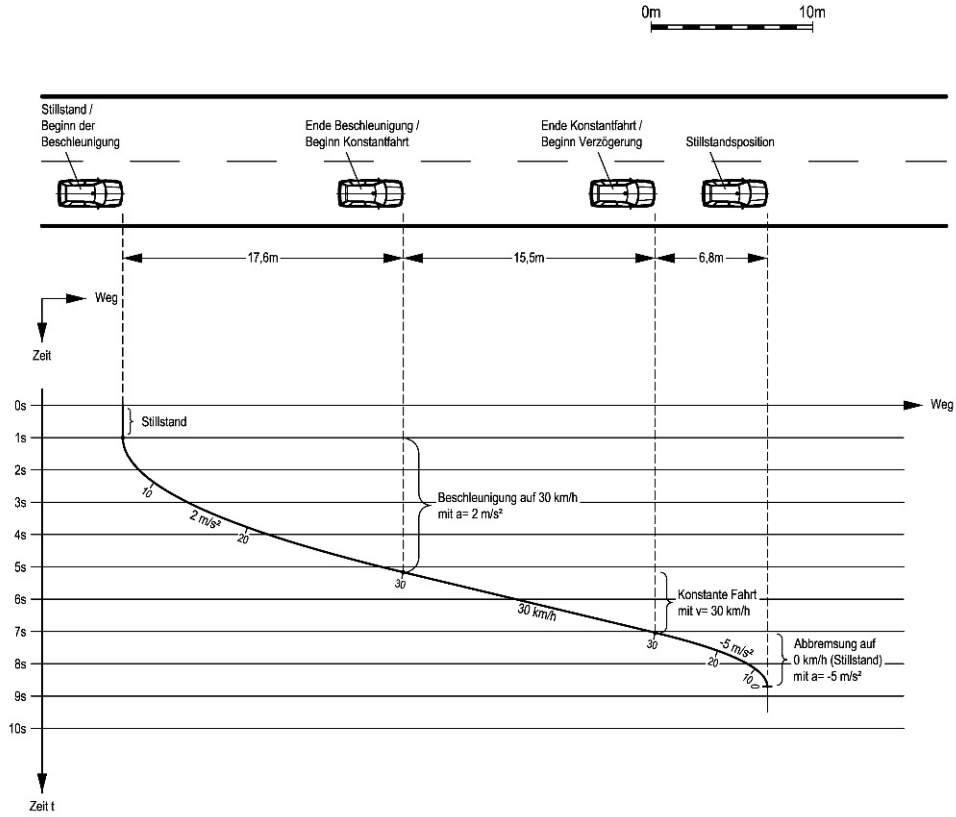


Bild A5-4 Darstellung eines Anfahrvorganges, einer konstanten Fahrt und eines Bremsvorganges

2.4 Die Weg-Zeit-Analyse in der praktischen Anwendung

Im arbeitstechnischen Ablauf der Verkehrsunfallanalyse beschreibt die Weg-Zeit-Analyse einen der letzten Arbeitsschritte. Um die Weg-Zeit-Analyse durchführen zu können, sind einige Vorarbeiten notwendig. Zunächst sind die exakte Unfallposition und die Anstoßkonfiguration der Fahrzeuge innerhalb der Unfallörtlichkeit zu bestimmen. Die Geschwindigkeiten der unfallbeteiligten Fahrzeuge zum Kollisionszeitpunkt müssen ebenfalls im Vorfeld ermittelt werden.

Im Zeitalter moderner Computertechnik lassen sich Weg-Zeit-Diagramme praktischerweise mithilfe von Zeichenprogrammen erstellen, was den Arbeitsaufwand erheblich verringert und die Präzision der Zeichnung zusätzlich verbessert. Einige Simulationsprogramme für die Kollisionsanalyse bieten außerdem die Möglichkeit der Erstellung eines Weg-Zeit-Diagramms, so dass diese Arbeitsschritte bei der Analyse möglicherweise bereits zusammengefasst werden können. Eine digitale Erstellung des Weg-Zeit-Diagramms ermöglicht es dem Zeichner außerdem, jederzeit Änderungen vorzunehmen, ohne gleich eine vollständige Zeichnung neu anlegen zu müssen.

Dennoch ist es selbst im mündlichen Gutachten vor Gericht nicht sinnvoll, das Weg-Zeit-Diagramm lediglich am Laptop zu demonstrieren, wenngleich bei kurzfristigen Ergänzungen, beispielsweise wenn sich während der Gerichtsverhandlung neue Anknüpfungspunkte ergeben, ein schnelles und einfaches Überarbeiten der Zeichnung möglich ist.

In der Praxis haben sich Zeichnungsmaßstäbe von 1:100 oder 1:200 eingebürgert. So wird das Weg-Zeit-Diagramm mitsamt einer zugehörigen Skizze der Örtlichkeit in der Praxis meist auf großformatigem Papier (DIN A2 oder A1) gezeichnet, bzw. nach der digitalen Erstellung ausgedruckt. Abhängig vom Maßstab lassen sich auch vollständige Weg-Zeit-Analysen auf DIN A3 Papier unterbringen.

Prinzipiell ist die Wahl des Maßstabs dem Sachverständigen überlassen, jedoch sollte man dem Benutzer nicht zumuten, in einer Darstellung im Maßstab 1 : 376 etwas nachzumessen. Die Maßstäbe 1:100 und 1:200 bringen neben der leichten Umrechnung auch noch den großen Vorteil mit sich, dass hierfür Parabelschablonen für Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge existieren, die dem Sachverständigen ein leichtes Zeichnen der Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge auch von Hand ermöglichen.

Das Zeichenpapier wird üblicherweise so unterteilt, dass im oberen Teil des Blattes die Skizze der Örtlichkeit und im unteren Teil das Weg-Zeit-Diagramm dargestellt wird, wie es bereits **Bild A5-4** zeigt. Die Maßstäbe für Zeichnung und Diagramm sind sinnvollerweise identisch zu wählen, so dass jedem Punkt im Weg-Zeit-Diagramm auch ein Punkt auf der Skizze zugeordnet werden kann. Man ist bestrebt, die Zeichnung der Örtlichkeit so zu drehen, dass zumindest für eines der unfallbeteiligten Fahrzeuge die Annäherung an das Unfallgeschehen in horizontaler Ausrichtung des Papiers verläuft. So lässt sich durch Ziehen vertikaler Linien jeder Punkt im Weg-Zeit-Diagramm ohne weiteren Aufwand auch in der zeichnerischen Ansicht konstruieren.

Dies ist nicht immer zu bewerkstelligen – beispielsweise bei gekrümmtem Straßenverlauf –, jedoch aufgrund der Einfachheit der Übertragung von Punkten nach Möglichkeit durchzuführen.

2.5 Zuordnung von Fahrbewegungen im Weg-Zeit-Diagramm

Ein Fallbeispiel soll die Anwendung des Weg-Zeit-Diagramms in der Praxis demonstrieren.

Es ist ein Verkehrsunfall zu rekonstruieren, bei dem ein Pkw auf gerader Straße einen die Straße überquerenden Fußgänger anfuhr. Der Fußgänger bewegte sich aus Sicht des Pkw-Fahrers von rechts nach links. Es wurde eine 27 m lange Bremsspur (Fahrzeug ohne ABS) mit einer Unstetigkeit festgestellt, so dass 10 m nach Spurbeginn der Kollisionsort festgelegt werden konnte. Die Ausgangsgeschwindigkeit des Pkw wurde unter Ansatz einer Verzögerung von 8 m/s^2 mit etwa 75 km/h ermittelt. Die Geschwindigkeit des Pkw zum Zeitpunkt der Kollision betrug etwa 60 km/h. Die vor Ort zulässige Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h wurde – dies lässt sich bereits feststellen – in der Annäherungsphase um 5 km/h überschritten. Ob diese Geschwindigkeitsüberschreitung unfallursächlich war, bzw. ob bei geringerer Geschwindigkeit der Unfall vermeidbar gewesen wäre, ist erst im Anschluss zu prüfen.

Grundsätzlich sind in der Unfallrekonstruktion die Ergebnisse gewissen Toleranzen unterlegen, die im Gutachten zu berücksichtigen und zu beschreiben sind. Im Folgenden wird jedoch allein der Übersichtlichkeit halber auf Einbeziehung von Toleranzen verzichtet. Die Betrachtung unter Einbeziehung von Toleranzbereichen erschwert die Anschaulichkeit und wäre für die Einführung in diese Thematik sicherlich nicht dienlich.

Bild A5-5 zeigt die Situation in der Örtlichkeit mit dem zugehörigen Weg-Zeit-Diagramm.

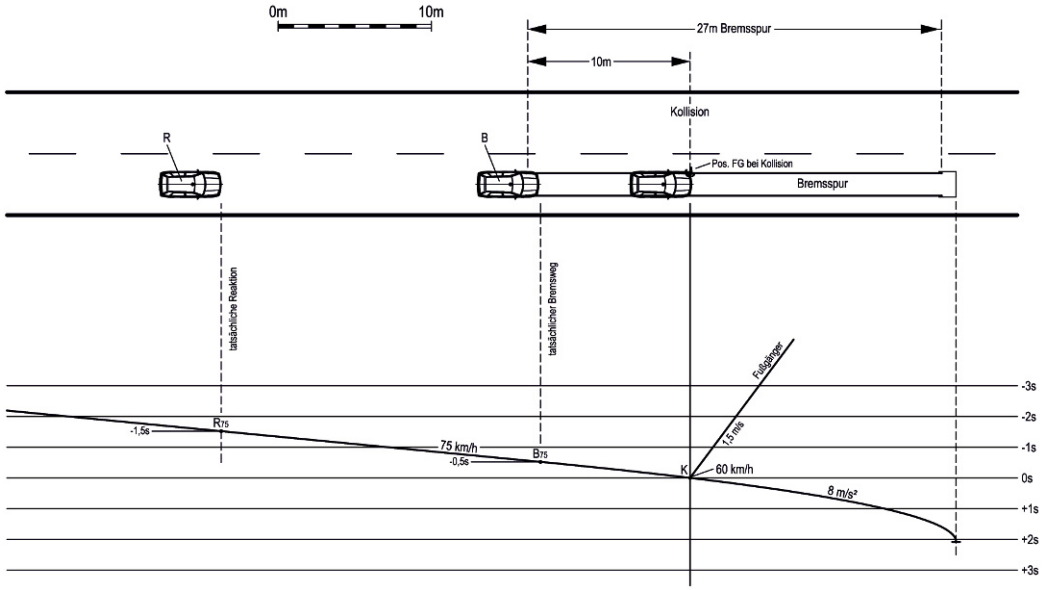


Bild A5-5 Fallbeispiel Fußgängerunfall

Der Anstoßpunkt am Pkw befand sich im Bereich der linken Frontecke. Über die Bremsspur ließ sich die exakte Position des Pkw innerhalb seiner Fahrspur bestimmen. Der Kollisionsort konnte daher exakt ermittelt werden und ist in der Skizze auf der Zeichnung dargestellt. Üblicherweise wird vom Kollisionspunkt aus eine senkrechte Linie nach unten gezogen, die die Zeitachse des Weg-Zeit-Diagramms darstellt. Der Kollisionszeitpunkt wird häufig in den Nullpunkt der Zeitachse ($t = 0$ s) gelegt, die vorkollisionäre Phase daher mit negativen Zeitangaben versehen. Die Fahrbewegungen der unfallbeteiligten Fahrzeuge werden dann so angelegt, dass sich die Fahrzeuge dem Kollisionspunkt annähern.

Die Bewegung des Pkw ist nun in das Weg-Zeit-Diagramm einzutragen. Eine Bremsparabel mit einer Verzögerung von 8 m/s^2 wird so einskizziert, dass bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h der Kollisionspunkt durchfahren wird. Ein Geschwindigkeitsabbau durch die Kollision wurde hier vernachlässigt. Der Beginn der Bremsung aus 75 km/h wird mit B_{75} bezeichnet. Vor dem Bremsbeginn lag eine konstante Fahrt mit 75 km/h vor, die geradlinige Fahrbewegung ist ebenfalls in das Weg-Zeit-Diagramm einzutragen.

Es ergibt sich für den Pkw eine Bremsdauer vor der Kollision von 0,5 s. Addiert man eine weitere Sekunde als Reaktionsdauer hinzu, so ergibt sich eine Reaktion des Pkw-Fahrers 1,5 s vor der späteren Kollision. Die Reaktion bei $t = -1{,}5$ s kann auf der Fahrlinie mit R_{75} eingetragen werden.

Um die Anschaulichkeit zu erhöhen, kann für die Punkte R_{75} und B_{75} die zugehörige Position in der Skizze dargestellt werden. Dies gelingt, wie dargestellt, durch das Ziehen einer Senkrechten, die die Punkte R und B schneidet.

Nach Aussage von Zeugen bewegte sich der Fußgänger mit normaler Gehgeschwindigkeit. Für diese Bewegung „normal gehend“ ist eine Gehgeschwindigkeit des Fußgängers von 1,5 m/s anzusetzen. Die Bewegungslinie konstanter Geschwindigkeit ist ebenfalls im Weg-Zeit-Diagramm einzutragen. Hierbei ist zu beachten, dass der Fußgänger sich nicht wirklich dem Pkw

entgegenbewegt, wie es im Weg-Zeit-Diagramm skizziert ist, sondern sich dem Pkw von der Seite nähert, so dass die jeweiligen Entfernungen in die Skizze durch Herumklappen um 90° zu konstruieren sind.

Es ist nun zu prüfen, wo sich der Fußgänger befand, als der Pkw-Fahrer reagierte und die Vollbremsung einleitete. In den 1,5 s zwischen Reaktion des Pkw-Fahrers und Kollision legte der Fußgänger 2,2 m zurück. Diese Position kann nun in die Skizze der Örtlichkeit eingetragen werden. Es zeigt sich, dass der Fußgänger sich zu diesem Zeitpunkt bereits deutlich auf der Fahrbahn befunden hat.

Die Analyse des tatsächlichen und eigentlichen Unfallhergangs endet prinzipiell an diesem Punkt. Das Unfallgeschehen ist vollständig in der Entstehung und Ausführung rekonstruiert worden. Der zeitliche Ablauf des Unfallgeschehens ist detailliert in der Weg-Zeit-Analyse betrachtet worden und anschaulich im Weg-Zeit-Diagramm dargestellt. Angesichts der obigen Darstellungen liegt die Vermutung nahe, dass der Pkw-Fahrer verspätet auf den querenden Fußgänger reagierte.

2.6 Vermeidbarkeitsbetrachtungen

Mit der Analyse des Unfallhergangs ist die Aufgabe des Sachverständigen nicht vollständig erfüllt. Da die Analyse eines Verkehrsunfalls meistens dazu dient, im Zivilprozess die Haftungsfrage zwischen den Parteien oder im Strafprozess die Schuldfrage zu klären, muss abschließend untersucht werden, ob für einen oder gegebenenfalls für beide Unfallbeteiligten in der Annäherung Vermeidbarkeitsmöglichkeiten vorgelegen hätten.

Es wird zwischen der räumlichen und der zeitlichen Vermeidbarkeit unterschieden, wobei grundsätzlich bei der Rekonstruktion beide Arten der Vermeidbarkeit zu prüfen sind. Hierauf wird im Folgenden noch eingegangen.

Aufgrund der mitunter hohen Toleranzbreite der bis zu diesem Punkt erzielten Ergebnisse insbesondere bezüglich Ausgangs- und Kollisionsgeschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge ist es im Zivilprozess notwendig, die Vermeidbarkeitsbetrachtungen mit Daten zu Gunsten sowohl des einen als auch des anderen Fahrzeugführers durchzuführen. Nur selten wird bei der gerichtlichen Beauftragung im Beweisbeschluss präzise formuliert, unter Einbeziehung welcher Randparameter die Vermeidbarkeitsbetrachtung durchzuführen ist. Daher ist, um alle möglichen Falldarstellungen in die Vermeidbarkeitsbetrachtung einbeziehen zu können, eine vollständige Berücksichtigung aller Toleranzen unbedingt notwendig.

2.7 Rechtliche Grundlagen der Vermeidbarkeitsbetrachtung

Mit der Vermeidbarkeitsbetrachtung wird die Weg-Zeit-Analyse beendet. Sie gehört daher zu den Aufgaben des Technikers. Es ist jedoch zu beachten, dass der Sachverständige bei der Beschreibung der Vermeidbarkeitsmöglichkeiten das juristische Terrain berührt. Mit der Vermeidbarkeitsbetrachtung wird letztlich die Brücke zwischen dem Techniker und dem Juristen geschlagen.

Entscheidend ist für jede Vermeidbarkeitsbetrachtung die Definition des Zeitpunktes des Eintritts der kritischen Lage, die unmittelbar zum Schaden führt. Die Festlegung dieses Zeitpunktes, ab dem ein Fahrzeugführer verpflichtet ist, Maßnahmen zur Vermeidung des Unfallgeschehens zu treffen, ist eine juristische Fragestellung, die oft von den näheren Umständen und der Situation an der Unfallstelle abhängt. Im Allgemeinen liegt in der Annäherung an das Un-

fallgeschehen eine so genannte „Signalposition“ des späteren Unfallgegners vor, auf die eine Reaktion des Fahrzeugführers zu erfolgen hat. Diese Signalposition stellt nicht notwendigerweise den Augenblick der ersten Erkennbarkeit dar, sondern kann wesentlich später vorliegen.

Obwohl die Bewertung der Signalposition den Juristen vorbehalten ist, ist eine präzise Formulierung dieses höchst wichtigen Parameters im richterlichen Beweisbeschluss, bzw. in der Fragestellung des Auftraggebers eine seltene Ausnahme. Der Techniker ist daher in den meisten Fällen angehalten, selbst eine plausible Signalposition zu definieren, um die Vermeidbarkeitsüberprüfung durchführen zu können. Nötigenfalls sind vom Techniker verschiedene Varianten unter Berücksichtigung mehrerer alternativer Signalpositionen zu präsentieren, die dann dem Juristen zur Bewertung angeboten werden.

Jede Vermeidbarkeitsprüfung setzt also mit dem Zeitpunkt der Signalposition des späteren Unfallgegners ein. Die im Weg-Zeit-Diagramm mit dem Buchstaben „S“ bezeichnete Signalposition beschreibt daher den juristischen Beginn der kritischen Lage, auf die der Fahrzeugführer zu reagieren hat. Für die Vermeidbarkeitsbetrachtung soll der Sachverständige daher eine Reaktion des Fahrzeugführers im Augenblick der Signalposition ansetzen.

2.8 Räumliche Vermeidbarkeit

Die Überprüfung der räumlichen Vermeidbarkeit beantwortet die Frage, unter welchen Umständen ein Fahrzeugführer den Konflikt dadurch hätte beheben können, dass er noch vor dem im Gefahrenbereich befindlichen Unfallgegner sein Fahrzeug zum Stillstand bringt.

Wie bereits beschrieben, stellt die Vermeidbarkeitsbetrachtung auf den Zeitpunkt des Eintritts der kritischen Lage ab, zu dem der Unfallgegner sich also in der Signalposition befindet.

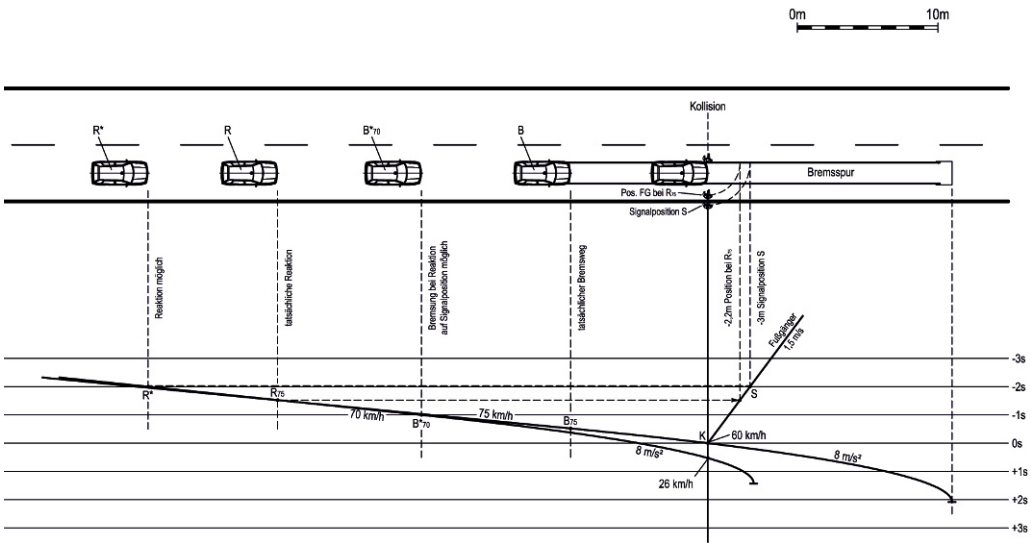


Bild A5-6 Prüfung der räumlichen Vermeidbarkeit

Auf das obige Beispiel des Fußgängerunfalls angewendet, soll der Pkw-Fahrer die kritische Lage in dem Augenblick erkennen, in dem der Fußgänger die Straße betritt. Dies ist die Signalposition, auf die der Pkw-Fahrer aus rechtlicher Sicht zu reagieren hat: Der Pkw-Fahrer

muss davon ausgehen, dass der Fußgänger, der sich auf die Straße begeben hat, diese zu überqueren beabsichtigt, und ist daher verpflichtet, Gegenmaßnahmen zur Vermeidung einer Kollision einzuleiten. In der Skizze auf **Bild A5-6** ist diese Position des Fußgängers mit S und die zugehörige Position des Pkw mit R* markiert. Das Sternchen weist darauf hin, dass es sich hierbei nicht um die real vorgelegene Reaktionsposition für den Pkw-Fahrer handelt, sondern diese Reaktionsposition mit der Signalposition des Fußgängers korrespondiert und daher zur Vermeidbarkeitsprüfung heranzuziehen ist.

Diese dargestellten Positionen liegen zeitlich gesehen 2,0 s vor der späteren Kollision. Der Skizze ist zu entnehmen, dass sich der Pkw bei R* in einer Entfernung von 40 m zum Kollisionsort befand. Die Reaktionsdauer des Pkw-Fahrers inklusive der Bremsschwelldauer wird wie zuvor auf eine Sekunde festgelegt. Die Vermeidbarkeitsprüfung ist außerdem unter der Prämisse durchzuführen, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h vom Pkw eingehalten wurde. Im Weg-Zeit-Diagramm ist diese Fahrlinie ebenfalls eingezeichnet. Ab dem Punkt R* ist eine konstante Fahrt mit 70 km/h skizziert, die ab dem Punkt B^*_{70} (eine Sekunde später) in eine Vollbremsung übergeht. Wie zu erkennen ist, kommt der Pkw bei dieser Betrachtung erst einige Meter nach dem Kollisionsort zum Stillstand. Im Kollisionsort beträgt die Geschwindigkeit des Pkw immerhin noch 26 km/h.

Es ist also festzuhalten, dass selbst bei rechtzeitiger Reaktion des Pkw-Fahrers und unter Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit eine räumliche Vermeidbarkeit des Unfallgeschehens nicht darstellbar ist.

2.9 Zeitliche Vermeidbarkeit

Bei der Überprüfung der zeitlichen Vermeidbarkeit ist die Frage zu beantworten, unter welchen Umständen der Konflikt dadurch hätte behoben werden können, dass der herannnahende Fahrzeugführer erst dann in den Gefahrenbereich einfährt, wenn der Kollisionsgegner diesen bereits wieder geräumt hat und somit kein Konfliktpotential mehr vorliegt. Im Regelfall ist diese Betrachtung nur bei Unfällen im querenden Verkehr zu untersuchen, beispielsweise wenn ein Pkw einen die Straße überquerenden Fußgänger anfährt oder bei einem Kreuzungsunfall. **Bild A5-7** zeigt diesen Sachverhalt.

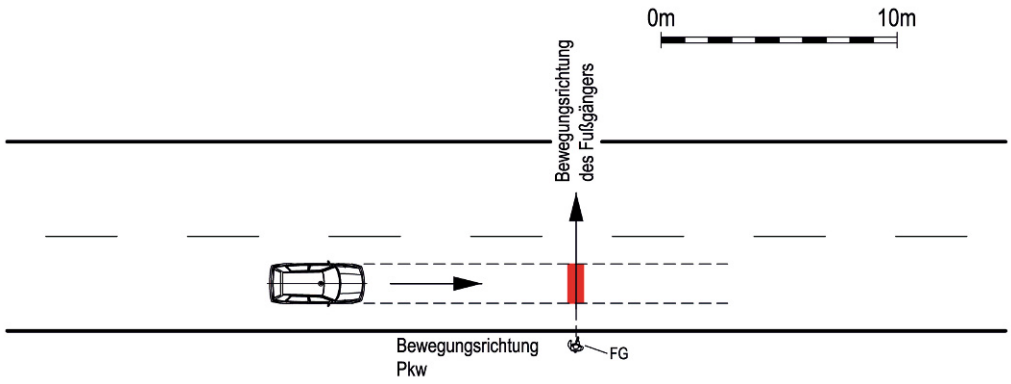


Bild A5-7 Erläuterung zur zeitlichen Vermeidbarkeit

Der Gefahrenbereich, der sich für den querenden Verkehr ergibt, ist in der Zeichnung rot gekennzeichnet. Dieser entspricht in der Regel der Spurbreite des herannahenden Fahrzeugs. Sobald der Querende die Spur geräumt hat, liegt kein Konfliktpotential mehr vor.

Folgende Frage wäre in unserem Beispiel konkret zu beantworten: Hätte der Fußgänger den Gefahrenbereich bereits geräumt, wenn der Pkw sich mit der zulässigen Geschwindigkeit angenähert hätte und außerdem rechtzeitig auf die Signalposition des Fußgängers reagiert hätte?

Das Weg-Zeit-Diagramm bietet auch für diese Fragestellung die Lösung an. In **Bild A5-8** ist für unser Beispiel ab dem Punkt R* eine Annäherungsgeschwindigkeit des Pkw von 70 km/h angesetzt, die ab dem Punkt B^*_{70} in eine Vollbremsung mündet. Diese Fahrlinie ist mit der Betrachtung zur räumlichen Vermeidbarkeit identisch, was jedoch nicht immer der Fall sein muss.

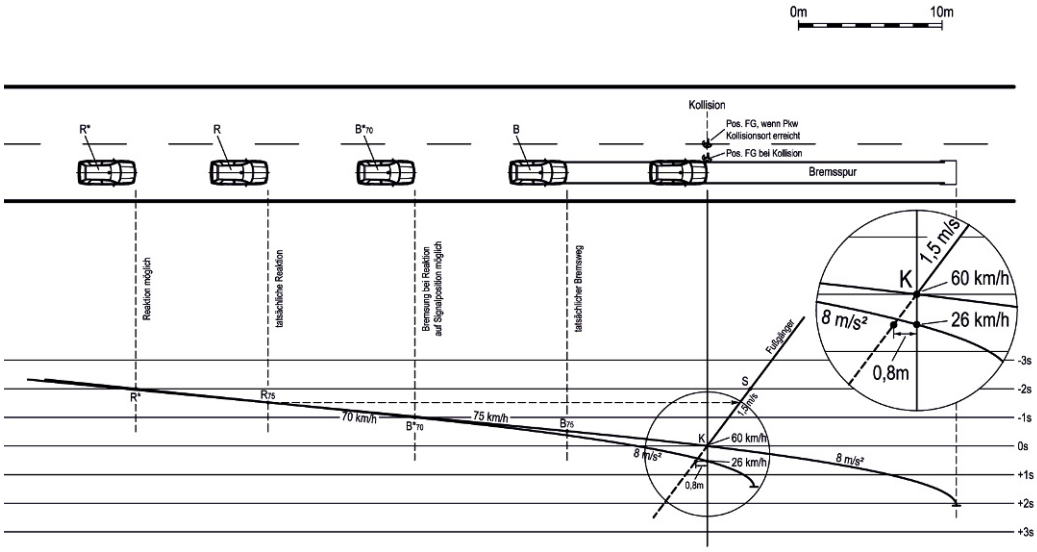


Bild A5-8 Prüfung der zeitlichen Vermeidbarkeit

Entscheidend ist bei der Untersuchung der zeitlichen Vermeidbarkeit die Frage, wie viel später der Pkw aufgrund geringer Ausgangsgeschwindigkeit und unter Umständen früherer Reaktion am Unfallort eingetroffen wäre. Diese Zeitdauer ist im Weg-Zeit-Diagramm abzulesen und liegt in unserem Beispielfall bei ≈ 0,5 s. Nun ist es einleuchtend, dass sich der Fußgänger in dieser Zeitspanne ohne die Kollision ebenfalls weiter fortbewegt hätte. Setzt man eine weiterhin konstante Gehgeschwindigkeit an, so kann die bereits existierende Bewegungslinie des Fußgängers einfach verlängert werden, um abzulesen, wie weit sich der Fußgänger in dieser zusätzlichen Zeit weiter nach vorn bewegt hätte. Dem Weg-Zeit-Diagramm ist zu entnehmen, dass dies einer Strecke von 0,8 m entspricht. Überträgt man diese Wegstrecke direkt in die Zeichnung, so lässt sich erkennen, dass bei einer zusätzlichen Wegstrecke des Fußgängers von 0,8 m dieser den Gefahrenbereich tatsächlich bereits verlassen hätte. Es wäre unter diesen Umständen folglich nicht zu einer Kollision gekommen, da der Fußgänger die Fahrspur des Pkw bereits verlassen hätte, als dieser den Unfallort erreichte. Der Pkw hätte, wie bereits festgestellt, zwar nicht rechtzeitig anhalten können, jedoch hätte aufgrund der gewonnenen Zeit der Fußgänger Gelegenheit gehabt, den Gefahrenbereich zu räumen, bevor der Pkw dort eintrifft.

Es liegt für den Pkw-Fahrer folglich eine zeitliche Vermeidbarkeit des Unfallgeschehens vor. An diesem Punkt ist die Weg-Zeit-Analyse des Unfallgeschehens komplett, womit auch die Begutachtung endet.

2.9.1 Sichtbegrenzungslinien oder Sichtgrenzen

Sichtbegrenzungslinien oder Sichtgrenzen sind die in eine Unfallskizze eingezeichneten Sichtstrahlen, in der Position, wo gerade die Sicht auf ein anderes Objekt beginnt bzw. endet. Die Sichtgrenzen hängen sowohl von der Örtlichkeit als auch von der momentanen Position des Kraftfahrers, eines Fahrzeugs oder eines Fußgängers ab.

Nähern sich Fahrzeuge beispielsweise einer Einmündung, so ändern sich die wechselseitigen Sichtverhältnisse mit zunehmender Annäherung. In einem Weg-Zeit-Diagramm kann diese Änderung der Blickverhältnisse recht anschaulich dargestellt werden. Es kann dann das Reaktionsverhalten der Fahrzeuglenker besser bewertet werden.

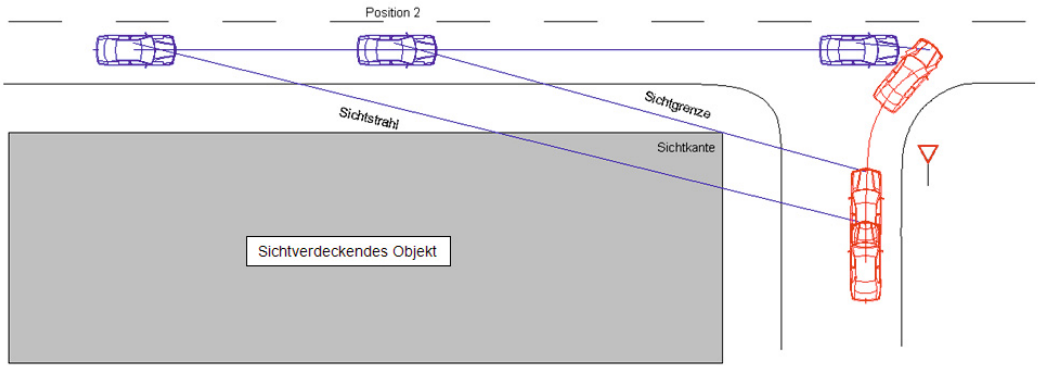


Bild A5-9 Sichtverhältnisse an einer Kreuzung

Bild A5-9 zeigt eine häufig eintretende Situation an einer Einmündung. Der bevorrangte Kraftfahrer (blaues Fahrzeug) hat erstmals in der Position 2 Sicht auf das von rechts kommende Fahrzeug. Der Zeitpunkt der ersten Sicht hängt von der Entfernung der beiden Fahrlinien vom sichtverdeckenden Gebäude und vom Fahrverlauf des anderen Fahrzeugs (rotes Fahrzeug) ab. Nicht nur die Örtlichkeit, sondern auch der zeitliche Verlauf spielen eine Rolle.

Die Sichtgrenze kann man unter Berücksichtigung der zeitlichen Annäherung der Unfallbeteiligten entweder anhand einer maßstabsgerechten Skizze ermitteln oder direkt an der Unfallstelle. Zur Vorbereitung ist Folgendes zu bedenken:

- Wo auf der Fahrbahn haben sich die Unfallbeteiligten bewegt?
- Wie waren die Bewegungsbahnen der Beobachter und die der zu beobachtenden Objekte?
- Welcher Punkt an dem zu beobachtenden Objekt muss als Bezugspunkt gewählt werden?

2.9.2 Sichtbegrenzungslinien bei Blick in einen Rückspiegel

Der Sichtbereich in einem Rückspiegel hängt von der Position des Spiegels relativ zur Sitzposition und von der Spiegelgröße ab. In erster Linie interessiert der einsehbare horizontale Winkelbereich. Zugleich stellt sich auch oft die Frage, wann ein auf einem benachbarten Fahrstreifen fahrendes Fahrzeug im Spiegel sichtbar wird.

Bild A5-10 zeigt schematisch einen Spiegel. Der Einfachheit halber wird der Augenabstand vernachlässigt und nur von einem einzigen Punkt dem Augpunkt ausgegangen. Von diesem Punkt aus wird der einsehbare Bereich berechnet. Bei einem ebenen Spiegel gilt Ausfallwinkel = Einfallwinkel. Diese beiden Winkel werden zur Spiegelnormalen gemessen.

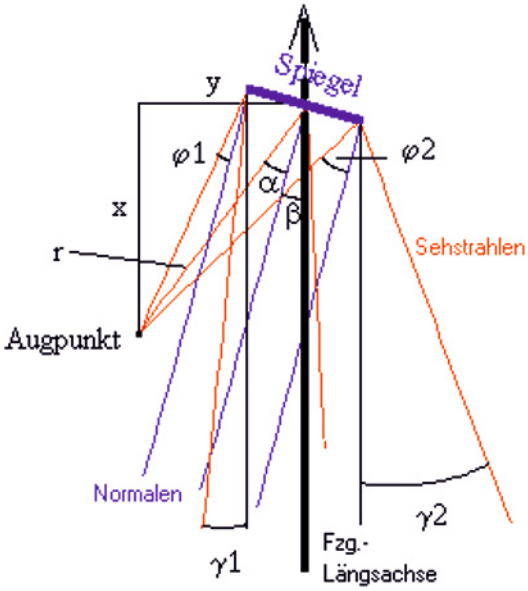


Bild A5-10 Konstruktion des Sichtbereichs in einem Rückspiegel

Folgende Größen werden definiert:

- α Winkel zwischen Sehstrahl und Spiegelnormale, bei Blick in die Spiegelmitte
- β Winkel, um welchen die Spiegelnormale aus der Längsachse des Fahrzeugs verdreht ist
- φ_1, φ_2 einsehbarer Bereich – links bzw. rechts von der Spiegelnormale
- γ_1, γ_2 einsehbarer Bereich – links bzw. rechts von der Fahrzeuglängsachse
- r Abstand des Augpunkts von der Spiegelmitte
- x Sitzposition hinter der Spiegelmitte (in Längsrichtung gemessen)
- y Sitzposition neben der Spiegelmitte (in quer zur Längsrichtung gemessen)
- A Abstand der Front eines nachfolgenden Fahrzeugs zum Spiegel
- SA Seitenabstand der Fahrzeuge
- B_1 Fahrzeugbreite
- B_2 Fahrzeugbreite des nachfolgenden Fahrzeugs
- k sichtbarer Anteil der Fahrzeugbreite des nachfolgenden Fahrzeugs (0 bis 1)
- B_S Spiegelbreite

Zwischen α und β gilt die Beziehung: $\alpha + \beta + \arctan\frac{x}{y} = 90°$

Es gilt allgemein für den links und rechts der Spiegelnormalen einsehbaren Bereich:

$$\varphi_1 = \arctan\frac{r\sin a - \frac{B_s}{2}}{r\cos a} \qquad \varphi_2 = \arctan\frac{r\sin\alpha + \frac{B_s}{2}}{r\cos\alpha}$$

Bezüglich der Fahrzeuglängsachse ergibt sich der Bereich: $[\gamma_1, \gamma_2] = [\varphi_1 - \beta, \varphi_2 - \beta]$.

Günstig ist es, sich die einsehbaren und nicht einsehbaren Bereiche aus Herstellerunterlagen zu beschaffen.

3 Bremsvorgänge

Das Thema Bremsen hat bei der Unfallanalyse sehr viele Aspekte. Da die zugehörige Technik zunehmend komplexer wird, kann bereits die richtige oder falsche Benutzung von Fachbegriffen zu Fehlern oder Verwirrungen führen. Bei der ISO (International Standardisation Organisation) ist man zwar um Normung bemüht, es ist aber sehr langwierig, diese Ergebnisse zumindest in die Fachwelt zu transportieren. Hinzu kommen Probleme bei den nationalen und internationalen Vorschriften zu den Mindestanforderungen an Bremsanlagen. Bei der Unfallrekonstruktion interessieren allerdings mehr die auf den Einzelfall bezogenen Eigenschaften der Bremsen.

Die Fahrzeugtechnik hat in den letzten Jahren rasante Fortschritte gemacht. Erkenntnisse, die noch vor kurzem als gesichert galten, müssen diesen Entwicklungen angepasst werden. Die bei der Unfallrekonstruktion sehr wichtigen Bremsverzögerungen haben einen deutlichen Wandel erfahren, der zuerst zu den Fachleuten und dann zusätzlich noch zu den Juristen transportiert werden muss. Die Änderungen resultieren aus der Reifentechnologie, der Fahrzeug- und Bremsentechnik und der Elektronik.

Die Bremsverzögerungen der verschiedenen Fahrzeuge müssen in ihrem Verlauf über dem Weg und/oder der Zeit gemessen und dann richtig interpretiert werden. Moderne elektronische Messgeräte machen es möglich, diese Vorgänge genauer zu untersuchen. Wenn Messdaten vorliegen, dann müssen sie in den Berechnungsmodellen entsprechend berücksichtigt werden. Die inzwischen vorhandenen Simulationsprogramme sollten in der Lage sein, diese Messdaten physikalisch korrekt zu verarbeiten.

Dem Sachverständigen werden entweder Bremsspuren oder behauptete Bremsvorgänge vorgelegt. Der Sachverständige muss beurteilen, ob und gegebenenfalls welche Bremsspuren es geben kann und welcher Bremsverzögerungsverlauf anzunehmen ist.

3.1 Der Unterschied zwischen Theorie und Praxis

Bei der Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen werden oft Geschwindigkeiten aus Spuren auf der Fahrbahn oder aus behaupteten Bremsmanövern berechnet. Jeder Bremsvorgang kann durch Aktionen der Fahrer beeinflusst werden. Diese menschliche Komponente ist als Unsicherheit bei der Berechnung zu bedenken. Besonders beim Bremsvorgang spielt das Fahrerverhalten eine große Rolle. Einflüsse des Fahrers können während der Bremsenschwellphase und der Vollbremsphase Auswirkungen haben.

In [7] und [11] sind Versuche beschrieben, bei denen Fußgängerattrappen in die Fahrbahn von nicht darauf vorbereiteten Pkw-Fahrern gezogen wurden. Die teilweise sehr heftigen Reaktionen der Fahrer zeigte äußerst unterschiedliche Verläufe des Bremspedaldrucks über der Zeit. Bis zum vollständigen Druckaufbau können bis zu 0,5 s vergehen. Dieser Effekt ist ein wesentlicher Grund für die Einführung von Bremsassistenzsystemen. Zögerliche Bremspedalbetätigung am Beginn einer Gefahrenbremsung führt zu deutlicher, unnötiger Bremswegverlängerung.

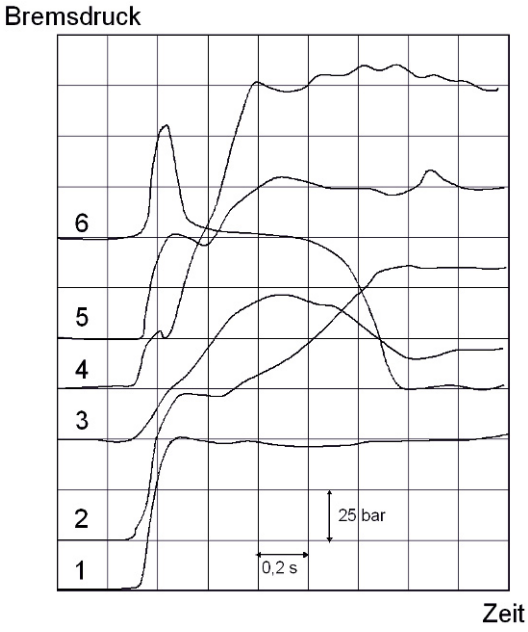


Bild A5-11 Bremsdruckverlauf über der Zeit bei Notbremsmanövern

Der eminente Fahrereinfluss bei Gefahrenbremsungen wurde bereits Anfang der 1970er Jahre auffällig, als Verkehrssicherheitsorganisationen sich um die Einführung des Sicherheitstrainings als Ergänzung zur Fahrschulausbildung bemühten. Die in [6] veröffentlichten Untersuchungen zeigten, dass die Teilnehmer an solchen Sicherheitstrainings nicht in der Lage waren, eine Gefahrenbremsung mit Blockierung von Rädern durchzuführen. Erst nach Einweisung und Übung war ihnen das möglich.

Zur Erzielung des kürzestmöglichen Bremswegs muss das Bremspedal so schnell wie möglich und so stark wie möglich durchgedrückt werden. Dies gilt für moderne Fahrzeuge genauso wie für ältere und hängt mit der installierten Bremskraftverteilung zusammen. Auch heute müssen die Trainer beim Sicherheitstraining darauf hinweisen, dass das Bremspedal stärker betätigt werden muss, auch wenn sich das ABS durch Pulsieren des Bremspedals oder als außergewöhnliches Geräusch bemerkbar macht.

Der Druck auf das Bremspedal hängt unter anderem vom Körpergewicht des Fahrers und von den Beinmuskeln ab. Die Beine sind darauf eingestellt, jeweils etwa die Hälfte des Körpergewichts zu tragen.

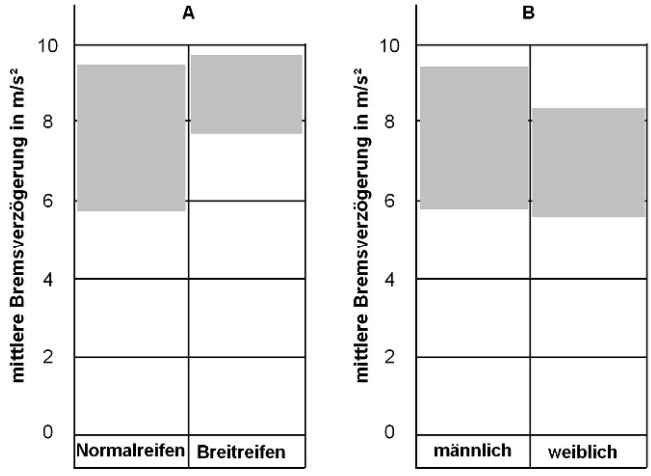


Bild A5-12 Bereich der mittleren Bremsverzögerung abhängig von der Reifenart (A) und vom Geschlecht (B) bei Bremsung auf trockener Fahrbahn. Versuche bei Sicherheitstrainings-Veranstaltungen [6]

Mit maximal dieser Gewichtskraft wird offenbar das Bremspedal betätigt. Dadurch ist erklärbar, warum Frauen z. B. in der Untersuchung [6] nur geringere Vollbremsverzögerungen erreichten als Männer. Die aus den 1970er Jahren stammende Untersuchung zeigt die damals messbaren mittleren Verzögerungen über dem Weg.

Andererseits wurden unabhängig vom Geschlecht deutliche Unterschiede bei den Verzögerungen in Abhängigkeit von den Reifen festgestellt.

Wegen der zunehmenden Verbreitung von Bremsassistenz- und Brake-by-Wire-Systemen muss dem Übertragungsverhalten zwischen Fahrer und Bremspedal verstärkte Aufmerksamkeit geschenkt werden, je nach dem, welches System an einem Fahrzeug eingebaut ist. In [10] werden folgende Einflussgrößen auf den Bremsvorgang genannt:

Tabelle A5.1 Einflüsse beim Bremsvorgang

Pedalweg – Pedalweg – Pedalübersetzung – Belaglüftspiel – Volumenaufnahme der Bremsanlage **Pedalkraft** – Pedalübersetzung – Boosterverstärkung – erforderliche Spannkraft **Pedaldämpfung** – Boosteransprechverhalten – Ansaugluftfilter – Leitungsquerschnitte – Reibung in den Komponenten **Pedalhysterese** – Sattelverschiebekräfte – Reibung in den Komponenten – Boosterhysterese	**Fahrzeugverzögerung** – Reibwert Belag/Scheibe – Reibwert Reifen/Fahrbahn – Fahrzeugzustand – Fahrbahngefälle etc. **Fahrereinfluss** – Körpergröße – Verfassung – Leistungsbereitschaft – Leistungsvermögen – Anspruchshaltung etc. **Fahrzeugeinfluss** – Pedalstellung – Sitzstellung – Lenkradstellung – Fahrzeugeigenverhalten – Aufforderungscharakter – Fahrzeugimage etc.

All diese Einflüsse sollen aus Bremsspuren herausgelesen werden. Das ist nur in bestimmten Schranken möglich. Ein Sachverständiger für Unfallrekonstruktion kann bei Vorlage von Lichtbildern, oder wenn er die Spuren selbst gesehen hat, sagen, um welche Art von Spuren es sich gehandelt hat. Er kann im Allgemeinen auch identifizieren, ab welcher Stelle die Vollbremsung begann. Wo die Bremsung tatsächlich begonnen hat, kann auch aus gegebenenfalls vorhandenen Spuren nicht abgelesen werden. Es helfen da allenfalls Plausibilitätsbetrachtungen. Es wird auch je nach Beweislast bzw. in Abhängigkeit vom Verfahren (Straf- oder Zivilprozess) anders vorzugehen sein.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Zeit zwischen Unfall und Fotografie/Besichtigung. Während der Bremsenschwelldauer entsteht meist nur Gummiabrieb, der auf der Straße liegen bleibt und solange sichtbar sein kann, wie er nicht verweht wird. Es kann somit sein, dass die Polizei, wenn sie einige Minuten nach dem Unfall vor Ort erscheint, Teile der Bremsspur nicht mehr vorfindet. Bei Bremsversuchen ist das nicht so. Dort wird der Versuch durchgeführt, und sofort danach wird die Spur fotografiert und besichtigt. Tendenziell wird bei Versuchen deshalb eine längere Spur festgestellt als nach Unfällen von der Polizei.

Die Auswertung von Bremsversuchen führt zu weiteren Problemen. Die Messgeräte haben sehr spezifische und unterschiedliche Eigenschaften. Meist messen sie Verzögerungen nur in zwei Richtungen, so dass Neigungseinflüsse gesondert berücksichtigt werden müssen. Auch Fahrzeugschwingungen haben Einfluss auf die Messung. Zufälligkeiten bei den Fahrbahnunebenheiten können Resonanzschwingungen der Räder hervorrufen, die zu geringeren Verzögerungswerten führen als ohne diese Zufälligkeit. Defekte Stoßdämpfer können bei Fahrbahn-

unebenheiten zur Absenkung der erreichbaren Verzögerung führen. Die Geräte haben nur bestimmte Messgenauigkeiten, es bestehen Möglichkeiten der Fehlbedienung oder der Fehlinterpretation. Die Übertragung der Messergebnisse auf die Unfallspuren muss in nachvollziehbarer Weise erfolgen. Dabei ist vor allem bei nasser Fahrbahn der Unterschied der Verzögerung über dem Weg und über der Zeit zu beachten. Die Reifenprofiltiefe hat hier ebenfalls deutlichen Einfluss.

3.2 Verzögerung über der Zeit und über dem Weg

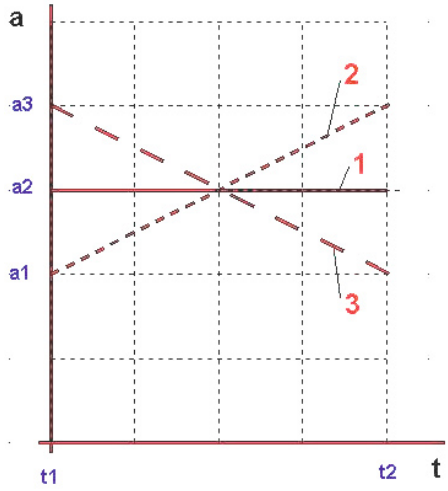
Die unterschiedlichen Verzögerungsfunktionen sind vielfach in der Literatur nicht klar gekennzeichnet. Das beginnt schon bei den gesetzlichen Vorschriften über die vorgeschriebene Verzögerung und die zu benutzenden Messverfahren.

Betrachtet man die gesetzlichen Vorschriften, so werden manchmal Mindestbremswege bei Abbremsung aus bestimmten Geschwindigkeiten vorgeschrieben, an anderer Stelle Verzögerungen oder Abbremsungen. Unklar ist, wie diese Werte ineinander umgerechnet werden können und was sie überhaupt aussagen. In der Sachverständigen-Literatur, z. B. [7], ist dagegen durchaus eine klare Linie erkennbar, auch die generelle Problematik ist richtig beschrieben.

Bedeutsam ist in diesem Zusammenhang, dass sich die Verzögerung als Funktion über der Zeit ($a = f(t)$) von der Verzögerung als Funktion über dem Weg ($a = f(s)$) immer dann unterscheidet, wenn die Verzögerung nicht konstant ist. Die Verzögerung während eines Bremsvorgangs ist nie konstant. Daraus folgt, dass bei der Anwendung von Formeln für konstante Verzögerung nur eine näherungsweise Lösung zu erwarten ist. Warum sich $a(t)$ von $a(s)$ unterscheidet, wird an folgendem Beispiel erklärt. Verglichen werden eine konstante Verzögerung mit einer konstant steigenden und einer konstant fallenden Verzögerung.

Tabelle A5.2 Vergleich von konstanter, konstant steigender und konstant fallender Verzögerung

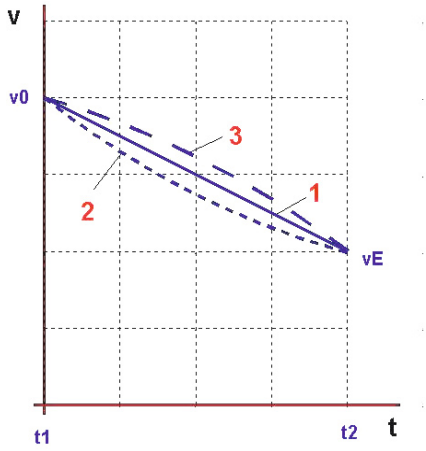
konstant	konstant steigend	konstant fallend
$a1(t) = \text{const.}$	$a2(t) = \frac{a_3 - a_1}{t_2 - t_1} \cdot t + a_1$	$a3(t) = -\frac{a_3 - a_1}{t_2 - t_1} \cdot t + a_1$



Die mittleren Verzögerungen sind in allen drei Fällen gleich groß. Dies folgt aus dem nebenstehenden Bild.

Die Flächen unter den drei Kurven sind ebenfalls gleich groß, woraus sich in allen drei Fällen die gleiche Geschwindigkeitsänderung berechnet (siehe folgende Ausführungen).

Durch Integration erhält man die Geschwindigkeiten, wobei die Anfanggeschwindigkeit v_0 immer gleich sein soll:



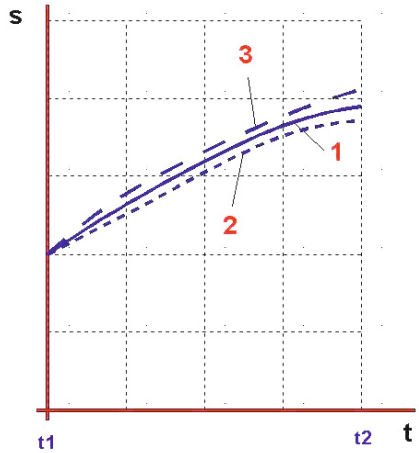
konstante Beschleunigung $v(t) = a_2 \cdot t + v_0$

konstant steigende Beschleunigung $v(t) = \frac{a_3 - a_1}{t_2 - t_1} \cdot \frac{t^2}{2} + a_1 \cdot t + v_0$

konstant fallende Beschleunigung $v(t) = -\frac{a_3 - a_1}{t_2 - t_1} \cdot \frac{t^2}{2} + a_3 \cdot t + v_0$

Die Darstellung der Geschwindigkeiten in dem Diagramm zeigt, dass die Flächen unterhalb der Kurven und damit der Bremsweg unterschiedlich groß sind. Die Anfangs- und Endgeschwindigkeit ist jedoch gleich.

Für die drei betrachteten Fälle ergibt sich ein unterschiedlich langer Bremsweg, der in der gleichen Zeit $t = t_2 - t_1$ zurückgelegt wird. Wird der Anfangsweg zur Zeit t_1 mit 0 angesetzt, so folgen die zurückgelegten Wege aus:



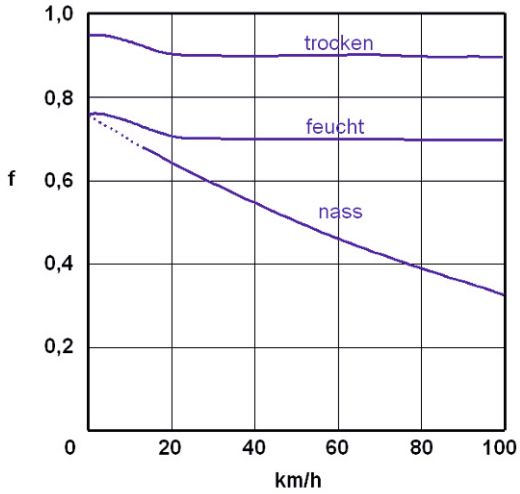
konstante Beschleunigung $s(t) = \frac{a_2}{2} t^2 + v_0 \cdot t$

konstant steigende Beschleunigung $s(t) = \frac{a_3 - a_1}{t_2 - t_1} \cdot \frac{t^3}{6} + \frac{a_1}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t$

konstant fallende Beschleunigung $s(t) = -\frac{a_3 - a_1}{t_2 - t_1} \cdot \frac{t^3}{6} + \frac{a_3}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t$

Ein veränderlicher Verlauf der Beschleunigung/Verzögerung wirkt sich, wie oben gezeigt, auf den zurückgelegten Weg aus. Im obigen Diagramm erkennt man, dass bei einer konstant steigenden Verzögerung der Bremsweg länger ist als bei einer konstanten Verzögerung. Die konstant fallende Verzögerung liefert in diesem Beispiel den kürzesten Bremsweg. Für die Berechnung der Geschwindigkeit am Anfang der Bremsung muss also berücksichtigt werden, ob eine veränderliche Verzögerung vorgelegen hatte. Würde man z. B. anstatt einer steigenden Verzögerung eine konstante Verzögerung über eine gemessene Bremsspurlänge annehmen, würde

sich eine zu hohe Geschwindigkeit aus einer Bremsspur mit einer bestimmten Länge berechnen. Alle Aussagen beziehen sich auf die in den Diagrammen gezeigte Zeitrichtung.



Eine veränderliche Verzögerung wird zumeist als Funktion der Geschwindigkeit angegeben, wie dies aus der Grafik links ersichtlich ist. Will man diese Diagramme verwenden, so müsste *a(v)* in *a(t)* umgerechnet werden, was im Allgemeinen recht aufwändig ist. Es empfiehlt sich in solchen Fällen eher eine iterative Vorgehensweise wie in dem folgenden Beispiel gezeigt: nasse Fahrbahn, 24 m Bremsspurlänge, Fahrzeug kommt am Ende der Bremsspur zum Stillstand. Es wird die Rückwärtsrechnung angewendet.

Zur Ermittlung der Ausgangsgeschwindigkeit wird geschätzt, dass die ersten 20 km/h auf den letzten 2,5 m vor Stillstand abgebaut werden. Aus dem obigen Diagramm kann die Verzögerung wie folgt entnommen werden:

$$f_{m1} = \frac{0{,}76 + 0{,}64}{2} = 0{,}7 \qquad \text{und damit} \qquad a_{m1} \approx 7 m/s^2$$

Daraus folgt die Geschwindigkeit 2,5 m vor Stillstand mit:

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot a_{m1} \cdot s_1} = \sqrt{2 \cdot 7 \cdot 2{,}5} m/s \approx 5{,}9 m/s = 21{,}2 km/h$$

Die berechnete Geschwindigkeit entspricht weitgehend der angenommenen Geschwindigkeit. Für die folgenden 10 m wird angenommen, dass die Geschwindigkeit von 40 auf 21 km/h abgebaut wird. Die mittlere Verzögerung folgt aus dem Diagramm mit etwa 6 m/s^2. Die Berechnung liefert eine etwas zu hohe Geschwindigkeit von:

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + 2 \cdot a_{m2} \cdot s_2} = \sqrt{34{,}8 + 2 \cdot 6 \cdot 10} \cdot m/s \approx 12{,}44 \cdot m/s = 44{,}8 \cdot km/h$$

Auf der restlichen Bremsstrecke von 11,5 m wird ein Geschwindigkeitsabbau von 60 auf 44,8 km/h geschätzt. Die Verzögerung folgt zu 5 m/s^2.

$$v_3 = \sqrt{v_2^2 + 2 \cdot a_{m3} \cdot s_3} = \sqrt{154{,}7 + 2 \cdot 5 \cdot 11{,}5} \cdot m/s \approx 16{,}42 \cdot m/s = 59{,}1 \cdot km/h$$

Hätte man den gesamten Mittelwert der Verzögerung anhand des Diagramms gebildet,

$$a_{mges} = \frac{0{,}76 + 0{,}45}{2} \cdot g = 6 \cdot \frac{m}{s^2}$$

dann wäre die Geschwindigkeit am Bremsbeginn mit einem höheren Wert berechnet worden

$$v_3 = \sqrt{2 \cdot 6 \cdot 24} \cdot m/s \approx 16{,}97 \cdot m/s = 61{,}1 \cdot km/h$$

Der Fehler wäre mindestens 2 km/h gewesen.

Genauer noch ist es, die Berechnung in den Intervallen nicht mit konstanter Verzögerung, sondern mit einem linearen Anstieg, also als Schwellphase, zu berechnen. So kann während des Geschwindigkeitsabbaus von 20 km/h auf 0 km/h ein Anstieg der Verzögerung von 6,5 bis 7,5 m/s², von 40 bis 20 mit 5,5 → 6,5 m/s² und davor 4,5 → 5,5 m/s² berücksichtigt werden.

Der Bremsweg von 20 bis 0 km/h berechnet sich zu 2,26 m, von 40 bis 20 km/h zu 7,79 m. Somit verbleibt ein Bremsweg davor von 13,96 m. Mit Hilfe der Formel

$$v(tS) = v_B = v_A + \frac{1}{2}(a_2 + a_1)t_s$$ wird t_s berechnet und weiter mit

$$s(tS) = s_S = v_A t_s + \frac{1}{6}(a_2 + 2a_1)t_s^2$$ dann der Bremsweg.

	I	II	III		Einheit
Phase	**Schwell**	**Schwell**	**Schwell**		
Endgeschwindigkeit	0,00	20,00	40,00		km/h
Weg	2,26	7,79	13,96		m
Verzögerung	7,50	6,50	5,50	4,50	m/m²
Dauer	0,79	0,93	1,02		s
Anfangsgeschwindigkeit	20,00	40,00	**58,29**		km/h
Summe Weg	2,26	10,04	**24,00**		m
Summe Zeit	0,79	1,72	2,72		s

3.3 Bestimmung der mittleren Vollverzögerung von Kraftfahrzeugen bei der Zulassungsprüfung

Die EU-Ratsrichtlinie 71/320/EWG und die ECE-R13 sehen vor, die ausreichende Bremswirkung eines Straßenfahrzeugs anhand des Bremswegs und/oder der mittleren Vollverzögerung festzustellen. Der Begriff der mittleren Vollverzögerung (Mean Fully Developed Deceleration, MFDD) ist erst vor kurzem in [2] vollständig erklärt und beschrieben worden. Als Formelzeichen wird in den internationalen Normen d_m verwendet. Durch die folgende Begriffsbestimmung sind die Messverfahren und die dabei gewonnenen Ergebnisse vergleichbar und können auch in technische Vorschriften zur Fahrzeugkonstruktion besser einfließen. Die Bestimmungen zum Bremsvermögen lauten:

„Der Bremsweg ist der vom Fahrzeug vom Beginn der Betätigung der Bremsanlage bis zum Stillstand zurückgelegte Weg; die Ausgangsgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit im Augenblick der Betätigung der Bremsanlage; die Ausgangsgeschwindigkeit darf nicht weniger als 98 % der für die jeweilige Prüfung vorgeschriebenen Geschwindigkeit betragen. Die mittlere Vollverzögerung d_m soll aus der im Intervall v_B bis v_E gemittelten wegbezogenen Verzögerung gemäß

$$d_m = \frac{v_B^2 - v_E^2}{25{,}92 \cdot (s_E - s_B)}$$

errechnet werden. Die Geschwindigkeit und der Weg sollen mit Messgeräten ermittelt werden, die bei der jeweils vorgeschriebenen Prüfgeschwindigkeit eine Genauigkeit von +/–1 % haben. Die mittlere Verzögerung darf auch durch andere Methoden ermittelt werden, die nicht auf der Messung von Geschwindigkeit und Weg beruhen; in diesem Fall muss die Genauigkeit von d_m innerhalb von +/–3 % liegen."

Die Bestimmungsgleichung für den maximal zulässigen Bremsweg und/oder die minimale mittlere Vollverzögerung lautet:

$$s \le s_L = s_R + s_D = t_R \cdot v + \frac{v^2}{2 \cdot d_m}$$

Die aktuell vorgeschriebenen Werte sind den Richtlinien zu entnehmen. Sie sind für jede Fahrzeugkategorie einzeln ausgewiesen.

3.4 Definitionen

Tabelle A5.3 Begriffe und Symbole, die in der EU-Richtlinie 71/320/EWG und ECE – R13 verwendet werden und damit genormt sind

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$a(t)$	m/s^2	zeitabhängige Verzögerung
$a(s)$	m/s^2	wegabhängige Verzögerung
a_B, a_E	m/s^2	Verzögerungswerte am Beginn und am Ende des Auswertebereichs
d_m	m/s^2	mittlere Vollverzögerung entsprechend EU-Richtlinie 71/320/EWG und ECE-R13
s	m	gemessener Bremsweg
s_B, s_E	m	Wege bei Auswertebeginn und -ende
s_L	m	gesetzlich erlaubter Bremsweg
s_D	m	Bremsweg bei voll entwickelter Verzögerung
s_R	m	Weg während Betätigungs-, Ansprech- und Schwelldauer

Bremsenterminologie deutsch/englisch (Auszug)

Abbremsung	braking rate
Ansprechzeit	time initial response
Betätigungskraft	control force
Bremskraftverteilung	brake force distribution
Bremsverzögerung	braking decceleration
Bremsweg	braking distance
Reaktionsdauer	time reaction
Scheibenbremse	pad assembly/disc brake
Schwelldauer	build-up time, brake lag
Trommelbremse	line shoe assembly
Zweikreisbremsanlage	braking system dual circuit

Literatur

[1] Bosch Presseinformation 2120 aus 9.98
[2] Bestimmung der mittleren Vollverzögerung von Kraftfahrzeugen, Christian Pflug und Günther Voßkötter, ATZ 98 (1996) 1
[3] Bremssysteme für Personenwagen, Bosch, Technische Unterrichtung 1 987 722 023
[4] ABS 5.3: The New and Compact ABS 5 Unit for Passenger Cars, SAE Paper 950757
[5] VDC, The Vehicle Dynamics Control System of Bosch, SAE Paper 950759

4 Schleudervorgang

4.1 Einleitung

Das Schleudern von Fahrzeugen kann aus irgendwelchen Fahrmanövern heraus, z. B. in Kurven oder als Folge von Ausweichmanövern, auftreten oder auch nach Kollisionen mit anderen Fahrzeugen oder mit irgendwelchen Objekten. Teilweise treten sehr komplizierte Schleudervorgänge auf, bei denen die Fahrbahn verlassen wird, Böschungen werden überfahren, Gräben behindern den Auslauf, Fahrzeuge überschlagen sich. Oft gibt es aber auch nur kurze Schleudervorgänge auf der Fahrbahn, insbesondere nach Kollisionen.

Im Allgemeinen interessiert der Geschwindigkeitsverlauf der Fahrzeuge entlang dieser Schleudervorgänge, die mehr oder weniger gut durch Spuren auf oder neben der Fahrbahn dokumentiert sind.

Wie man die Geschwindigkeitsverläufe berechnet, hängt von der Art des Schleudervorgangs ab und auch von den Genauigkeitsanforderungen, die gestellt werden. Dabei unterscheidet man grundsätzlich in Rückwärtsanalyse und in Vorwärtsanalyse.

Bei der Rückwärtsanalyse gibt es zwei Möglichkeiten. Die einfachste Form stellt die Berechnung mit Näherungsformeln dar, bei denen die Geschwindigkeit am Beginn des Schleudervorgangs durch Anwendung einer oder mehrerer Formeln berechnet wird. Eine genauere Analyse ist durch Anwendung des Verfahrens der Spurverfolgung möglich, mit der man auch Informationen über den Geschwindigkeitsverlauf in den einzelnen Teilabschnitten des Schleudervorgangs erhält. Voraussetzung für die Anwendung dieser Berechnungsart ist jedoch, dass genügend objektive Anhaltspunkte zur Verfügung stehen.

Die exakteste Methode ist die Vorwärtsrechnung mittels mathematischer Modelle. Dabei kommt es auf die Art und Güte der Modellierung an. Auch hier müssen genügend objektive Anhaltspunkte zur Verfügung stehen. Wenn das nicht der Fall ist, dann können mit dieser Methode zusätzlich bestimmte Behauptungen sehr gut auf ihre Richtigkeit und physikalische Möglichkeit überprüft werden.

4.2 Fallbeispiele

Als erstes wird ein Unfall betrachtet, bei dem ein Fahrzeuglenker zu schnell um eine Linkskurve fuhr, nach rechts von der Fahrbahn auf ein Grasbankett abkam und dann ins Schleudern geriet. Der Pkw schleuderte über die Fahrbahn nach links, verließ links die Fahrbahn und stieß gegen zwei Bäume.

Auf der Fahrbahn konnten Reifenspuren fotografiert und vermessen werden. Nach dem Abkommen von der Fahrbahn konnte die Bewegung des Pkw durch Auswertung der Spuren und Schäden auch hinreichend genau bestimmt werden. Entlang dieser Spuren konnte die Schwerpunktsbahn eingezeichnet werden. Die folgenden Fotos (**Bild A5-13** und **Bild A5-14**) zeigen einige Einzelheiten. Die nachstehende Rekonstruktionsskizze (**Bild A5-15**) zeigt einen Ausschnitt des Schleudervorgangs mit der Schwerpunktsbahn. Mittels des Simulationsprogramms Carat-3 wurde die Geschwindigkeit am Beginn der Spuren bestimmt.



Bild A5-13 In Fahrtrichtung Pkw



Bild A5-14 Entgegen der Fahrtrichtung

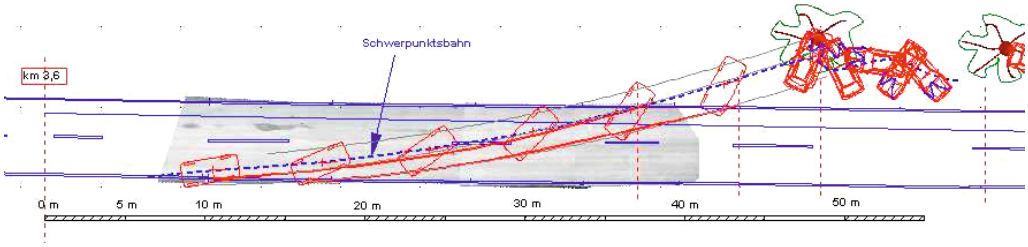


Bild A5-15 Auslaufsimulation

Ein zweites Beispiel zeigt den schleudernden Auslauf nach einer Kollision. Es handelt sich dabei um einen Unfallversuch (Wildhaus 1999). Die translatorischen und rotatorischen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge unmittelbar nach Kollision werden zur Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeiten gebraucht. Sie können durch Näherungsformeln oder durch Vorwärtsrechnung durch Anwendung eines Simulationsprogramms berechnet werden.



Bild A5-16 Reifenspuren und Endlagen

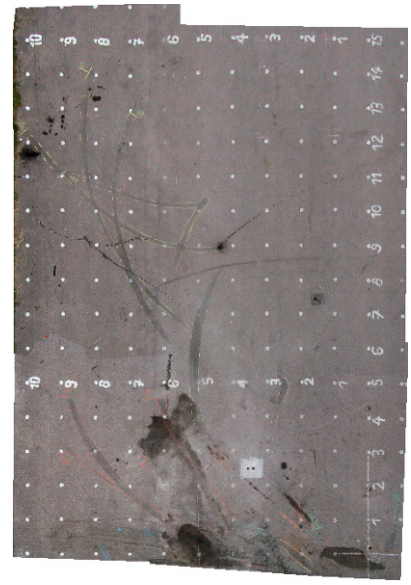


Bild A5-17 Reifenspuren in Draufsicht

4.3 Berechnungsverfahren

Im Allgemeinen ist ein ortsfestes *X,Y*-Koordinatensystem erforderlich, in dem der Bewegungszustand des zu untersuchenden Fahrzeugs beschrieben wird. Der Bewegungszustand des Fahrzeugs ist definiert durch folgende Größen:

Tabelle A5.4 Bezeichnungen/Definitionen

Gierwinkel	ψ (psi)	Grad	Schwerpunktsgeschwindigkeit	v	m/s
Kurswinkel	ν (ny)	Grad	Giergeschwindigkeit	$\dot{\psi}$	1/s

Außer dem ortsfesten Koordinatensystem wird noch ein fahrzeugfestes Koordinatensystem gebraucht. Dieses hat den Ursprung im Fahrzeugschwerpunkt, die *x*-Achse zeigt nach vorne, die *y*-Achse nach links. In der zweidimensionalen Betrachtung ist das fahrzeugfeste Koordinatensystem horizontiert, d. h., es macht weder Nick- noch Wankbewegungen mit.

Im fahrzeugfesten Koordinatensystem wird unter anderem betrachtet unter welchem Winkel der Schwerpunktsgeschwindigkeitsvektor im betrachteten Moment steht. Dieser Winkel wird Schwimmwinkel genannt und hat das Formelzeichen β.

In der folgenden Grafik sieht man die oben besprochenen Festlegungen im ortsfesten Koordinatensystem (Abkürzung: KS):

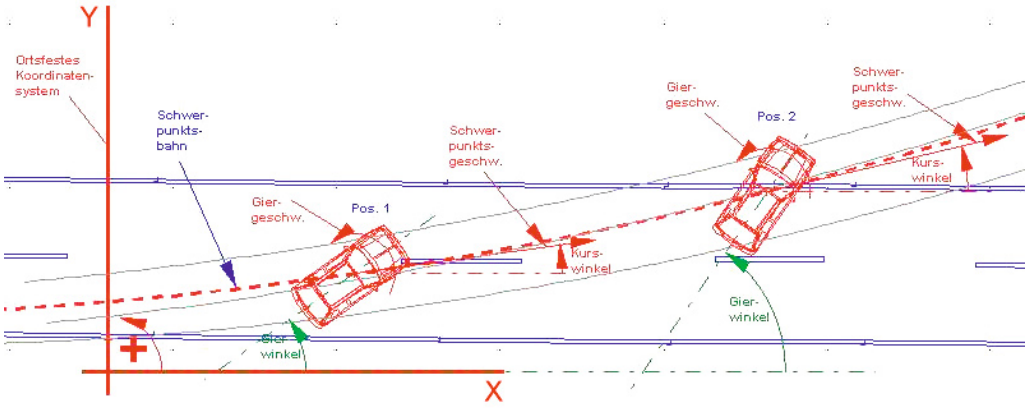


Bild A5-18 Bezeichnungen im ortsfesten Koordinatensystem

Für die folgenden Betrachtungen sind noch die Schräglaufwinkel an den Rädern und die Lenkwinkel von Bedeutung. Um die Schräglaufwinkel der Räder bestimmen zu können, müssen die Geschwindigkeitsrichtungen der Radaufstandspunkte bekannt sein. Die Schräglaufwinkel sind definiert als Winkel zwischen der Radebene und dem Geschwindigkeitsvektor des Radaufstandspunktes. Den Geschwindigkeitsvektor des jeweiligen Radaufstandspunktes erhält man aus der Überlagerung von Schwerpunktsgeschwindigkeit und Rotationsgeschwindigkeit des Radaufstandspunktes. Diese Rotationsgeschwindigkeit berechnet sich aus dem Ortsvektor vom Schwerpunkt zum Radaufstandspunkt multipliziert mit der Giergeschwindigkeit:

$$v_{\mathrm{rot}} = r \cdot \dot{\psi} \qquad \text{(A5-5)}$$

Der Schräglaufwinkel wird nun von der Radebene bis zu dem Geschwindigkeitsvektor des Radaufstandspunktes gemessen. Dabei sind eventuelle Lenkwinkel oder kollisionsbedingte Verformungen der Räder entsprechend dem folgenden Bild zu beachten.

Bild A5-19 Im nebenstehenden Bild sind zusätzlich das fahrzeugfeste Koordinatensystem und der Schwimmwinkel eingezeichnet. Letzterer ist in dem Beispiel negativ, weil er hier rechts herum gemessen worden ist.

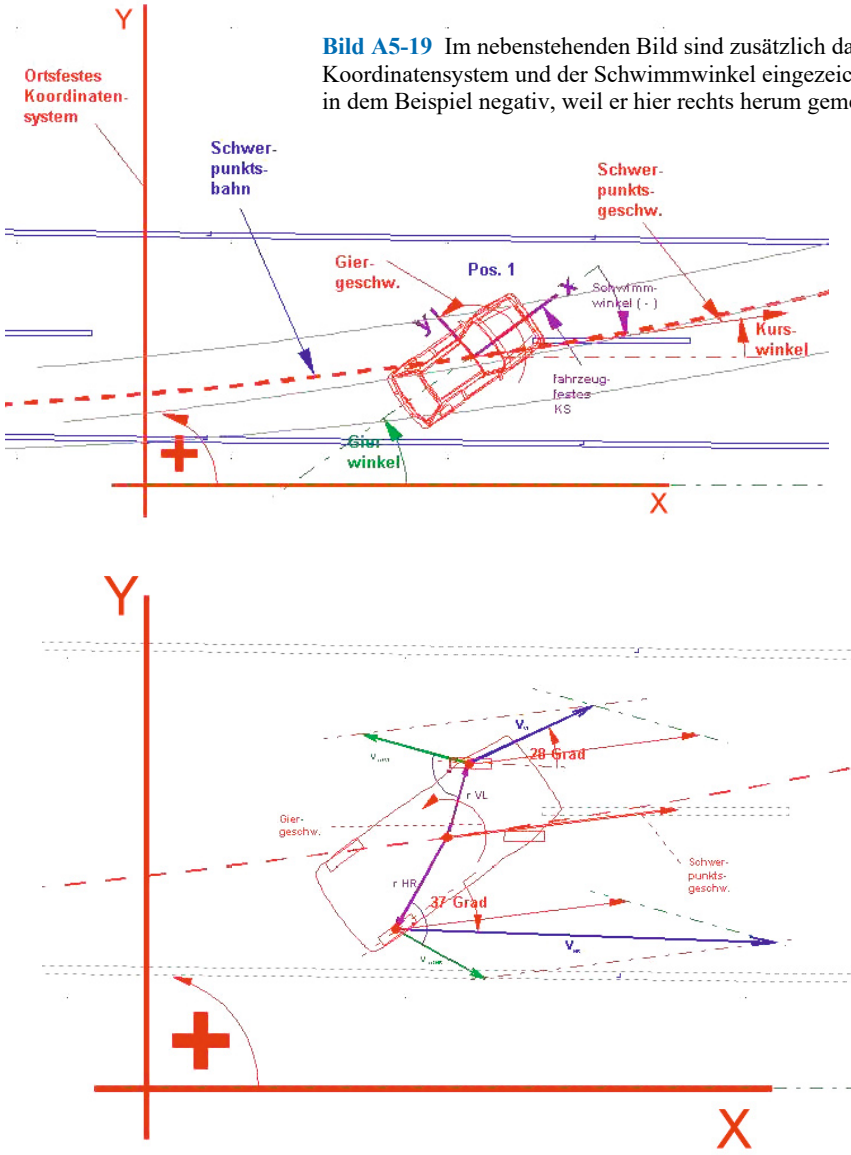


Bild A5-20 Ermittlung der Schräglaufwinkel

Bedeutsam ist, dass beim Auftreten eines Schräglaufwinkels eine Kraft senkrecht zur Reifenebene im Radaufstandspunkt auftritt. Diese Kraft wird Reifenseitenkraft genannt. Etwa zwischen 0 und 12 Grad Schräglaufwinkel nimmt sie von 0 bis zum Maximalwert zu, um dann weitgehend konstant zu bleiben.

Der Schräglaufwinkel ist zwischen 0 und 90 Grad definiert. Wie aus dem nachstehenden Bild ersichtlich ist, gibt es dabei eine Abhängigkeit vom Umfangsschlupf *s* (%). Das Diagramm gilt allerdings nur für eine trockene Fahrbahn. Für nasse, verschneite oder anderweitig veränderte Fahrbahnoberflächen gelten veränderte Kennlinien.

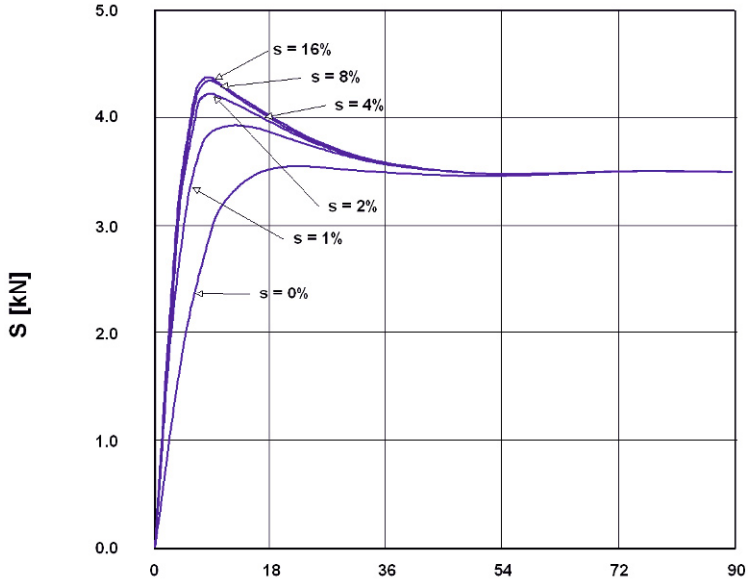


Bild A5-21 Reifenseitenkraft *S* über Schräglaufwinkel für verschiedene Längschlupf Werte *s*

Sobald zusätzlich zur Seitenkraft Umfangskraft auftritt, kommt es zuerst zu einer Zunahme der Seitenkraft, dann aber zu einem deutlichen Abfall, der bei blockiertem Rad gegen Null geht.

Beim Betrachten von Diagrammen über Reifeneigenschaften ist immer zu bedenken, dass Reifen sehr komplizierte Gebilde sind. Die Reibungs- bzw. Kraftschlusseigenschaften folgen *nicht* den Gesetzen der Coulombschen Reibung. Es gibt eine eigene Theorie der Gummireibung.

4.4 Anwendung von Näherungsformeln

4.4.1 Anwendung des mittleren Schwimmwinkels und Teilbremsfaktors

Dieses Verfahren wird zur überschlägigen Berechnung eines Fahrzeugauslaufs verwendet, um z. B. Startwerte für eine Auslaufsimulation mit einem mathematischen Fahrzeugmodell zu erhalten oder um eine überschlägige Kollisionsanalyse durchzuführen. Hinreichend genaue Ergebnisse lassen sich nur in einfach gelagerten Fällen erzielen. Bei der Anwendung sind folgende Regeln einzuhalten:

Translation und Rotation müssen in etwa gleichzeitig enden. Ein eventuelles Ausrollen der Fahrzeuge nach Abbau der Rotation muss vernachlässigt oder gesondert betrachtet werden.

Zur Berechnung sind die tatsächlichen, meist bogenförmigen Schwerpunktswege einzusetzen. Diese sollten nicht länger als 8 m sein, um noch ausreichend genaue Ergebnisse zu erhalten.

Wenn sich höhere Auslaufgeschwindigkeiten als 50 km/h berechnen, dann wird die Genauigkeit der Ergebnisse kaum noch ausreichend sein. In solchen Fällen sollten besser andere Verfahren angewendet werden.

Der Zustand der Räder (frei rollend, gebremst, luftleer, eingeklemmt) muss bekannt sein. Über einen Teilbremsfaktor wird für das Gesamtfahrzeug die Ausnutzung der maximal möglichen Verzögerung angegeben.

Bei den Näherungsformeln wird für die Berechnung der translatorischen Geschwindigkeit ein Massenpunktmodell verwendet, bei dem man sich einen einzigen Reifen als Ersatz für die tatsächlich vorhandenen Reifen (meist vier Reifen) im Schwerpunkt angeordnet vorstellt. Damit fallen Schwimmwinkel und Schräglaufwinkel zusammen, bzw. nehmen den gleichen Wert an. Für den gesamten Auslauf wird mit einem mittleren Schwimmwinkel oder Schräglaufwinkel gerechnet. Zur Berechnung der translatorischen Geschwindigkeit (auch Schwerpunktsgeschwindigkeit genannt) können über den Teilbremsfaktor Bremsungen unterschiedlicher Stärke berücksichtigt werden.

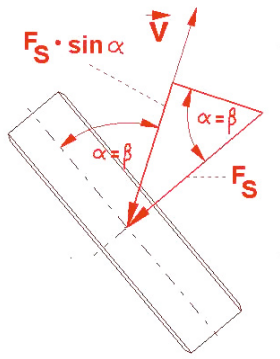


Bild A5-22 Einradmodell

Beim frei rollenden Rad tritt bei einem Schräglaufwinkel von mehr als 10 Grad näherungsweise die maximale Reifenseitenkraft auf. Diese wirkt aber rechtwinklig zur Radebene, weshalb nur die Komponente berücksichtigt werden darf, die der Geschwindigkeit entgegen gerichtet ist.

Wenn z. B. bei Stillstand des Fahrzeugs ein Schwimmwinkel von 20 Grad vorhanden ist und am Beginn des Auslaufvorgangs ein solcher von 80 Grad, dann kann mit einem mittleren Schwimmwinkel von 50 Grad gerechnet werden. Es gilt dann

$$a = a_{\max} \cdot \sin \beta_m$$
$$\beta_m = 50°$$

Wenn auch eine Umfangskraft vorhanden ist, dann wirkt aus dieser ebenfalls eine Komponente der Geschwindigkeit entgegen. Die Umfangskraft beeinflusst allerdings die übertragbare Seitenkraft. Dabei ist zu beachten, dass nicht ein einzelner Reifen betrachtet wird, sondern das Gesamtfahrzeug. Dieses verhält sich anders als ein einzelner Reifen. Entsprechende Messungen haben gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen Umfangs- und Seitenkraft in ausreichender Näherung durch eine Gerade (nachstehendes Teilbild rechts) beschrieben werden kann. Durch Normierung kann ein Teilbremsfaktor definiert werden, der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann.

Damit kann für die mittlere Verzögerung für einen Auslaufvorgang folgende Formel angegeben werden:

$$a_i = a_{\max} \left(TB \cdot \left|\cos \beta_m\right| + \left(1 - TB\right) \cdot \left|\sin \beta_m\right| \right) \qquad \text{(A5-6)}$$

Die Überprüfung der Formel durch Anwendung auf Versuche hat ergeben, dass auf das cos-Glied verzichtet werden kann, wodurch sich die Gleichung, insbesondere bei manueller Berechnung, etwas vereinfacht:

$$a_i = a_{\max} \left(TB + \left(1 - TB\right) \cdot \left|\sin \beta_m\right| \right) \qquad \text{(A5-7)}$$

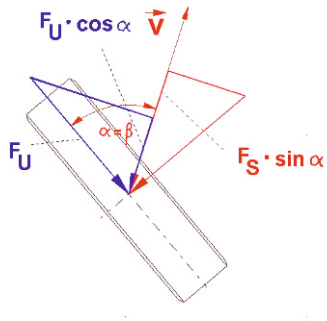


Bild A5-23 Kräftezerlegung am Einradmodell

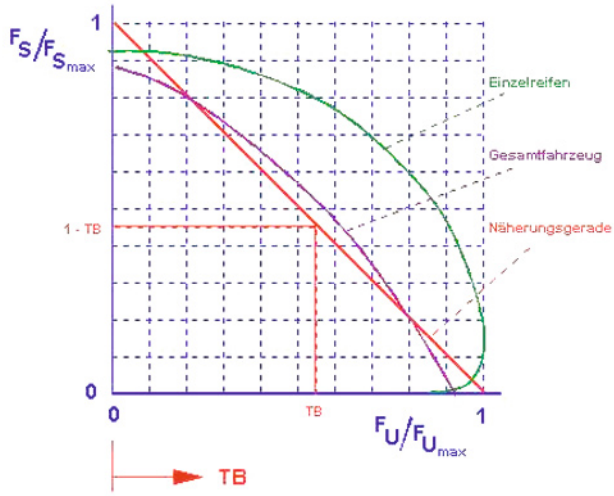


Bild A5-24 Kraftmodell am Einradmodell

Der Abbremszustand wird durch den Teilbremsfaktor *TB* berücksichtigt. Folgende Richtwerte sind zu beachten:

Tabelle A5.5 Richtwerte zur Festlegung der Teilbremsfaktoren

Zustand der Räder	*TB*
frei rollende Räder	0,05–0,1
1 Rad luftleer	0,15
1 Rad eingeklemmt	0,25
2 Räder luftleer	0,3
Teilbremsung oder 2 Räder auf einer Fahrzeugseite eingeklemmt	0,5
beide Vorderräder eingeklemmt	0,7
4-Rad-Blockierung	1,0

Nach Ermittlung des Schwerpunktswegs kann die Schwerpunktsgeschwindigkeit berechnet werden:

$$v_{i+1} = \sqrt{2 \cdot \frac{a_i + a_{i+1}}{2} s_{i \text{ bis } i+1}} \qquad \text{(A5-8)}$$

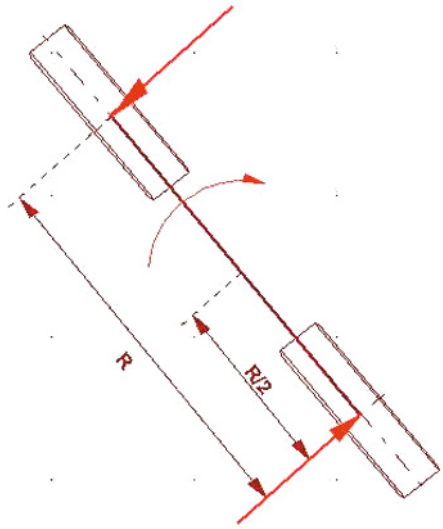
Die rotatorische Geschwindigkeit (Drehgeschwindigkeit) wird entweder aus der Zeitdauer des gesamten Vorgangs und dem dabei überstrichenen Winkel berechnet oder es wird ein Zweiradmodell verwendet, bei dem man sich vorstellt, dass die anfänglich vorhandene rotatorische Energie in Arbeit (Drehung um einen bestimmten Winkel) umgesetzt wird.

Bei der ersten Methode wird davon ausgegangen, dass die Zeit für den Auslaufvorgang aus der berechneten Geschwindigkeit und der mittleren Verzögerung mit

$$t_{i \text{ bis } i+1} = \frac{\left(v_i + v_{i+1}\right)/2}{\left(a_i + a_{i+1}\right)/2} \qquad \text{(A5-9)}$$

bestimmt werden kann. Ferner kann aus der Rekonstruktionszeichnung ausgemessen werden, welche Gierwinkeländerung (Gesamtdrehung) vorgelegen hat. Daraus kann die mittlere Drehgeschwindigkeit $\dot{\psi} = \Delta\psi / \Delta t$ berechnet werden. Wenn man linearen Abbau der Drehgeschwindigkeit annimmt, dann ist die anfängliche Drehgeschwindigkeit doppelt so hoch wie die mittlere. Das führt zu folgender Berechnungsformel:

$$\dot{\psi} = \frac{2 \cdot \Delta\psi \cdot a_m}{v_m} \qquad \text{(A5-10)}$$



Bei dem zweiten Ansatz wird das Fahrzeug idealisiert mit zwei Aufstandspunkten dargestellt. Damit folgt aus dem Arbeitssatz

$$\frac{1}{2} J \dot{\psi}^2 = M \cdot \Delta\psi$$

und nach Umstellung:

$$\dot{\psi} = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot w_R \cdot R}{J}} \cdot \left|\Delta\psi\right| \cdot \operatorname{sgn}\left(\Delta\psi\right)$$

$\operatorname{sgn}\left(\Delta\psi\right)$ multipliziert das Ergebnis des Ausdrucks mit dem Vorzeichen von $\Delta\psi$. Der Winkel $\Delta\psi$ muss im Bogenmaß eingegeben werden.

Bild A5-25 Zweiradmodell

Die Anwendung dieser Formeln setzt die Kenntnis der Parameter a_{max}, w_R und *TB* voraus. Der Rotationswiderstandsbeiwert w_R muss von Unfalltypen abhängig gemacht werden, wobei die Richtung des Stoßantriebs die entscheidende Rolle spielt. Liegt der Stoßantrieb eher längsachsenorientiert (+/–20° Abweichung von der Fahrzeuglängsachse), so ist für den Rotationswiderstandsbeiwert etwa w_R = 0,15 anzusetzen. Bei anderen Kollisionen liegt w_R ungefähr bei 0,35. Der Übergang ist fließend.

Diese Werte für w_R sind so zu verstehen, dass bei den mehr längsachsenparallel wirkenden Kollisionskräften die Fahrzeuge an einer Achse angehoben werden und oft beachtliche Strecken ohne Bodenkontakt zurücklegen. Bei den seitlich wirkenden Kollisionskräften kommt es zu starken Wankbewegungen und Radabhebungen, weshalb auch hier fast nie der Rotationswiderstand w_R Werte erreicht, wie sie dem Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn entsprechen würden. Die obigen Werte gelten für trockene und feuchte Asphalt- oder Betonfahrbahn. Bei anderen Fahrbahnzuständen sind Anpassungen erforderlich.

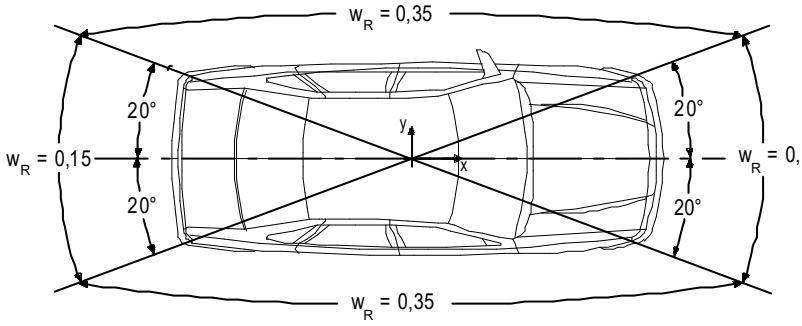
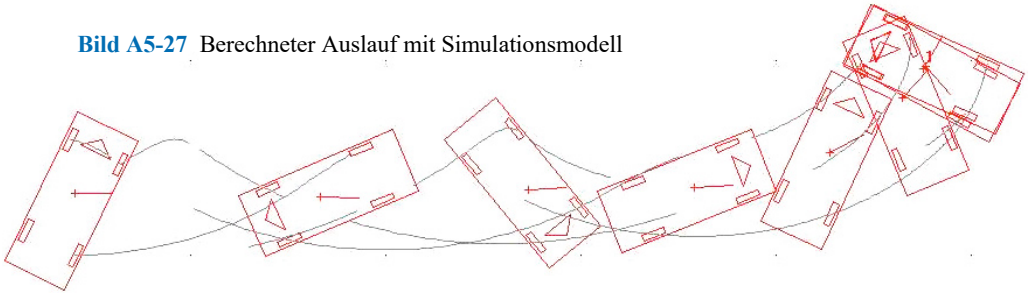


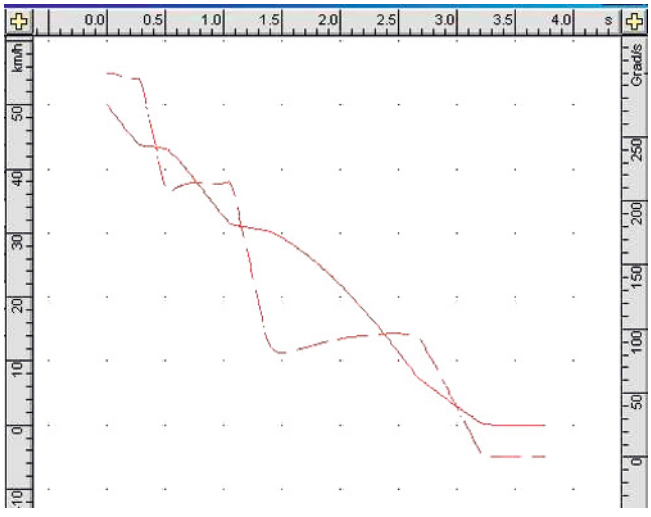
Bild A5-26 Empfehlung zur Wahl des Rotationswiderstandbeiwertes w_R abhängig von Stoßkraftrichtung und Lage des Stoßkrafthebelarms

4.4.2 Formeln von Marquardt und McHenry

Bei diesen Formeln wird von einem linearisierten Abbau von translatorischer und rotatorischer Geschwindigkeit ausgegangen. Berechnet man den wahren Verlauf dieser Geschwindigkeiten, dann ergibt sich ein treppenartiger Abbau wie nachstehend gezeigt. Anstelle des treppenartigen Abbaus wird eine Gerade gesetzt. Das führt zu den weiter unten aufgeführten Formeln.

Bild A5-27 Berechneter Auslauf mit Simulationsmodell





Berechnet man einen beliebigen Schleudervorgang, z. B. wie oben gezeigt, dann liefert die Simulation mittels mathematischem Modell den nebenstehenden Verlauf von translatorischer und rotatorischer Geschwindigkeit.

Bild A5-28 Die durchgezogene Linie zeigt die translatorische Geschwindigkeit, die gestrichelte Linie die rotatorische.

Wie man sieht, kann der Abbau der translatorischen Geschwindigkeit leichter durch eine Gerade angenähert werden, als beim stark treppenartigen Verlauf der rotatorischen Geschwindigkeit. Man sieht bei der Rotation, dass es Phasen gibt, bei denen die Drehgeschwindigkeit sogar wieder zunimmt, um dann sehr stark abzufallen. Deshalb wird jede Berechnung mit dem Problem zu kämpfen haben, ob nun gerade eine Phase vorgelegen hat, in der die Drehgeschwindigkeit abgebaut oder nicht abgebaut wurde.

Diese Formeln sind zur Ermittlung der Drehgeschwindigkeit und der Schwerpunktsgeschwindigkeit deshalb auch nur anwendbar, wenn eine nennenswerte Rotation ($\Delta\psi > 60°$) vorliegt.

$$\dot{\psi} = \sqrt{\frac{a_{max} \cdot |\Delta\psi|}{\frac{J}{m \cdot R} \cdot |\Delta\psi| \cdot (1 - TB) - \frac{s_{Auslauf}}{1{,}7}}} \operatorname{sgn}(\Delta\psi) \qquad \text{(A5-11)}$$

$$v_{Auslauf} = 1{,}7 \cdot \left[\frac{a_{max} \cdot \Delta\psi}{\dot{\psi}} - \frac{J \cdot |\dot{\psi}| \cdot (1 - TB)}{m \cdot R} \right] \qquad \text{(A5-12)}$$

Nach obigem ist festzustellen, dass es drei Formeln zur Bestimmung der Drehgeschwindigkeit am Beginn eines Schleudervorgangs gibt und zwei Formeln zur Bestimmung der Schwerpunktsgeschwindigkeit. Die Auswertung von Unfallversuchen hat gezeigt, dass der Mittelwert der drei errechneten Drehgeschwindigkeiten meist näher am wahren Wert liegt als jeder Ergebniswert für sich. Lag jedoch nur eine relativ geringe Rotation vor, so dürfen die Ergebnisse nach den Formeln von Marquardt und McHenry nicht zur Mittelwertbildung verwendet werden. Für die Gewichtung bei der Mittelwertbildung konnte keine Gesetzmäßigkeit entdeckt werden, es empfiehlt sich darum, das arithmetische Mittel zu verwenden. Bei der Berechnung der Schwerpunktsgeschwindigkeit ist ebenfalls der Mittelwert aus beiden Formeln statistisch gesehen besser als ein Einzelwert.

4.5 Spurverfolgung

4.5.1 Sehnenmodell

Diesem Verfahren liegen die gleichen Modellvorstellungen zugrunde wie bei den Näherungsformeln (Einrad- bzw. Zweiradmodell).

Vorbedingung für dieses Verfahren ist, dass während des Auslaufs ausreichend verwertbare Reifenspuren gezeichnet wurden, anhand derer die Fahrzeugbewegung hinreichend genau bestimmt werden kann. In einer maßstabsgerechten Skizze müssen die Schwerpunktsbahn und der Gierwinkelverlauf so genau wie möglich rekonstruiert werden. Um für alle weiteren Berechnungen einen Bezugspunkt herzustellen, wird ein ortsfestes Koordinatensystem festgelegt. Für mehrere Fahrzeugstellungen innerhalb des gezeichneten Auslaufs werden bezogen auf dieses Koordinatensystem die Schwerpunktskoordinaten und die Gierwinkel ermittelt. Der Abstand zwischen zwei gezeichneten Fahrzeugstellungen bildet somit ein Intervall. Der Auslauf wird also in mehrere Intervalle unterteilt.

Der Schwerpunktsweg innerhalb eines Intervalls kann als geradlinig also als Sehnenzug angenommen, was bei der Wahl der Intervallgröße zu berücksichtigen ist. Dabei muss allerdings ein geeigneter Kompromiss gesucht werden, da sehr kleine Intervalle leicht zu Zeichenfehlern führen können, während zu große Intervalle Problem bei der Bestimmung des Schwerpunktsverzögerung verursachen können und auch bei der Rotation wegen des oben beschriebenen treppenartigen Abbaus.

Zur Beschreibung des Auslaufs muss die auf der Straße mögliche maximale Verzögerung und über einen Teilbremsfaktor der Umfangskraftanteil angegeben werden. Diese Werte können für jeden Abschnitt verschieden sein, so dass auf diese Weise berücksichtigt werden kann, dass innerhalb des Auslaufweges z. B. eine Eisfläche oder sonstige Reibwertschwankungen (Abkommen von der Fahrbahn) aufgetreten sind. In jedem Intervall kann außerdem eine Geschwindigkeitsänderung berücksichtigt werden, wodurch Kollisionen mit Bordsteinen, Wänden oder Fahrzeugen eingefügt werden können. Bei den dabei anzunehmenden Geschwindigkeitsänderungen wird es sich im Allgemeinen um Schätzwerte handeln.

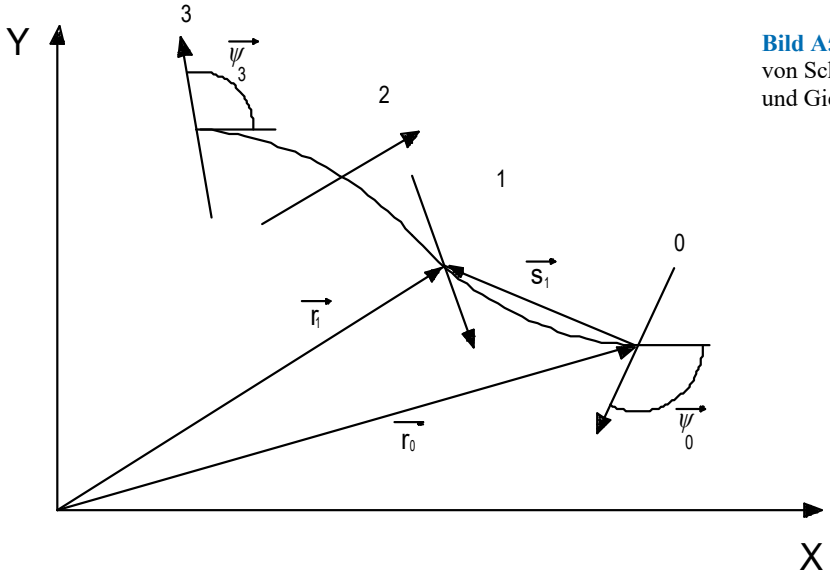


Bild A5-29 Ermittlung von Schwerpunktswegen und Gierwinkeln

Die Beträge der Wegstrecken werden wie folgt ermittelt:

$$\vec{s}_{i+1} = \vec{r}_{i+1} - \vec{r}_i \qquad \text{mit} \quad i = 0,1,2,\ldots\ldots,n$$

$$\left.\begin{aligned} s_{x_{i+1}} &= x_{i+1} - x_i \\ s_{y_{i+1}} &= y_{i+1} - y_i \end{aligned}\right\} \quad s_{i+1} = \sqrt{\left(s_{x_{i+1}}\right)^2 + \left(s_{y_{i+1}}\right)^2}$$

Der Kurswinkel ergibt sich dann aus der Beziehung:

$$\nu_{i+1} = \arctan \frac{s_{y_{i+1}}}{s_{x_{i+1}}}$$

wobei für die verschiedenen Quadranten eine Fallunterscheidung durchgeführt werden muss.

Da die Gierwinkel-Eingabedaten somit bekannt sind, können mit den errechneten Kurswinkeln die Schwimmwinkel jedes Intervallpunktes und die mittleren Schwimmwinkel im Intervall berechnet werden.

$$\vec{\beta}_0 = \vec{\psi}_0 - \vec{\nu}_1 \qquad \vec{\beta}_{i+1} = \vec{\psi}_{i+1} - \frac{\vec{\nu}_{i+1} + \vec{\nu}_i}{2} \qquad \vec{\beta}_n = \vec{\psi}_n - \vec{\nu}_n$$

$$\vec{\beta}_{m_{i+1}} = \frac{\vec{\beta}_{i+1} + \vec{\beta}_i}{2} \qquad \text{mit:} \quad i = 0,1,2 \ldots\ldots\ldots n-1$$

Damit die Berechnungen die richtigen Werte liefern, muss auch hier eine Fallunterscheidung für die verschiedenen Quadranten vorgenommen werden.

Mit den soeben berechneten mittleren Schwimmwinkeln kann jetzt die tatsächliche Verzögerung a_{i+1} z. B. nach Gl. (A5-5) ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Verzögerung ergibt sich dann die Schwerpunktsgeschwindigkeit am Beginn des Intervalls zu

$$v_{i+1} = \sqrt{\left(v_i + \Delta v_{i+1}\right)^2 + 2 \cdot a_m \cdot s_{i+1}} \qquad v_0 = \Delta v_0$$

Aus der Geschwindigkeitsdifferenz innerhalb eines Intervalls lässt sich dann die Intervalldurchlaufzeit bestimmen, wobei sich durch Aufsummierung der Intervallzeiten die Zeitdauer des Auslaufs ergibt.

$$\Delta t_{i+1} \frac{v'_{i+1} - \Delta v_{i+1} - v'_i}{a'_{i+1}}$$

Schließlich müssen noch die Drehgeschwindigkeiten berechnet werden, welche unmittelbar aus dem Bewegungsablauf folgen.

$$\dot{\psi}_{i+1} = \frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{\Delta t_{i+1}}$$

Hierbei ist allerdings noch eine Besonderheit zu beachten. Die angegebene Gleichung berechnet eine mittlere Geschwindigkeit im Intervall. Da aber unmittelbar nach der Kollision eine wesentliche Drehbeschleunigung zu erwarten ist, sollte der Schwerpunktsweg zwischen Kollisionspunkt und erster rekonstruierter Position (also im letzten Intervall) nicht größer als 2 m sein. Die grafische Darstellung der mittleren Drehgeschwindigkeiten erlaubt eine Abschätzung der wirklichen Drehgeschwindigkeit am Beginn des Schleudervorgangs.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass für die Kollisionsanalyse im Rückwärtsverfahren die Auslaufrichtung einen bedeutenden Einfluss hat. Die Richtung der Bewegung zwischen Kollisionspunkt und erster rekonstruierter Position sollte daher möglichst genau ermittelt werden. Die Richtung des Vektors von dem Kollisionspunkt zur ersten rekonstruierter Position entspricht einer Sehne der Bahnbewegung und stimmt mit der tatsächlichen Richtung der Auslaufbewegung nicht exakt überein. Der Fehler kann umso größer werden je größer die Distanz zwischen dem Kollisionspunkt und der ersten rekonstruierten Position wird. Bei zu kleinen Distanzen wird wieder die Ermittlung der Richtung problematisch. Es muss daher ein vernünftiger Kompromiss geschlossen werden.

4.5.2 Lineares Modell

Die „Standardformel“ lautet:

$$a_i = a_{\max} \cdot \left(TB_i \left|\cos \beta_i\right| + \left(1{,}0 - TB_i\right) \left|\sin \beta_i\right|\right)$$

Dieser Formel liegt ein linearer Zusammenhang zwischen der Seitenführungskraft und der Umfangskraft zugrunde. Der Teilbremsfaktor geht hier richtungsunabhängig in die Berechnung ein. Die maximale Seitenführungskraft wird gleich groß wie die maximale Umfangskraft angenommen.

Diese Formel kann nun modifiziert werden indem für die Längs- und für die Querrichtung eine unterschiedliche maximale Verzögerung angenommen werden kann.

Modifiziertes Lineares Modell

$$a_i = a_{\max} \cdot TB_i \; a_{S\,\max} \cdot \left(1{,}0 - \left|TB_i\right|\right)\left|\sin \beta_i\right|$$

$$a_{\max} = a_{U\,\max} \cdot \sqrt{\cos\left(\beta_i\right)^2 + \left(RV \cdot \sin\left(\beta_i\right)^2\right)}$$

$$a_{S\,\max} = a_{U\,\max} \cdot RV$$

mit: $a_{U\max}$ = 9,81 · Reibwert (abhängig von den Reifen und der Fahrbahn)
RV Verhältnis des Reibwertes: längs zu quer = 1 : RV

Wird der Teilbremsfaktor (TB) negativ eingegeben, so bedeutete dies eine Beschleunigung.

5 Fahrvorgänge

5.1 Zeitlicher Ablauf eines Bremsvorgangs als zusammengesetzte Bewegung

Der gesamte Bremsvorgang setzt sich zusammen aus:

1. Reaktionsphase,
2. Bremsschwellphase und
3. Vollbremsphase.

Die Reaktionsphase beinhaltet die:

Tabelle A5.6 Reaktionsphase aufgegliedert

Reaktionsgrundzeit:	0,45 s (2 % : 0,22 s; 98 % : 0,58 s)
Umsetzzeit:	0,19 s (2 % : 0,15 s; 98 % : 0,21 s)
Ansprechzeit:	0,05 s (2 % : 0,03 s; 98 % : 0,06 s)
Summe	0,69 s (2 % : 0,40 s; 98 % : 0,85 s)

Die in den Klammern stehenden Werte bedeuten 2 % (bzw. 98 %) der Fahrzeuglenker benötigen durchschnittlich weniger als der nachstehende Wert.

Die gesamte Zeitdauer der Reaktionsphase wird Reaktionsdauer genannt.

Zeitlich vorgelagert ist die Blickzuwendungszeit, das ist die Zeit, die vergeht zwischen der peripheren Wahrnehmung und der Objektfixierung: 0,48 s (2 %: 0,32 s ; 98 % : 0,55 s).

Die Reaktionsdauer beginnt mit der Gefahrerkennung.

Stellt die Gefahr nicht das Objekt selbst, sondern erst die Änderung des Bewegungszustands dar, so muss der Reaktionsdauer noch die Zeitspanne vorgelagert werden, die benötigt wird, bis das Ereignis auffällig wird.

Beispiel: Ein sich im Querverkehr befindliches zunächst stehendes Fahrzeug setzt sich in Bewegung. Je nach Entfernung dieses Fahrzeugs wird der Eintritt des Auffälligkeitsmerkmals erst nach einer zurückgelegten Wegstrecke dieses Fahrzeugs in der Größenordnung von 0,3 bis 1 m bzw. nach zumindest 0,4 bis 1 s liegen.

Die Bremsschwellphase beginnt mit dem Verzögerungsbeginn und endet mit dem Erreichen der mittleren maximalen Verzögerung (MFDD – mean fully developed deceleration).

Die Dauer der Bremsschwellphase hängt von der Bremsenkonstruktion, der Straßenbeschaffenheit und der Art und Weise ab, wie die Bremse betätigt wurde. Im Allgemeinen kann mit folgenden Richtwerten gerechnet werden:

Tabelle A5.7 Bremsschwellzeiten für verschiedene Fahrzeugtypen

Pkw	0,2–0,4 s
Lkw	0,2–0,5 s
Motorrad	0,3–0,6 s

Da der Bremsvorgang häufiger als der Beschleunigungsvorgang berechnet wird, sind die nachstehenden Formeln so umgeformt, dass die Bremsverzögerung a positiv eingegeben werden kann. Die Formeln gelten in gleicher Weise auch für einen Beschleunigungsvorgang, nur muss dann für a ein negativer Wert eingegeben werden.

Die Vollbremsphase wird normalerweise durch eine Phase konstanter Bremsverzögerung idealisiert.

Wo dies nicht zulässig ist, empfiehlt sich den Vollbremsweg in einzelne Abschnitte zu zerlegen und jeden Abschnitt als Phase konstanter Bremsverzögerung zu rechnen was mathematisch einer Stufenfunktion entspricht, oder besser die Formeln der gleichmäßigen Änderung der Beschleunigung (Abschnitt 2.4) zu verwenden.

In den nachstehenden Formeln werden die drei Phasen des Bremsvorgangs zusammengefasst, während der Reaktionsphase (in den nachstehenden Formeln mit Index *R* beschriftet) wird eine konstante Anfangsgeschwindigkeit, während der Bremsschwellphase (Index: *S*) ein linearer Anstieg der Bremsverzögerung von 0 auf der Wert a und während der Vollbremsphase (Index: *B*) ein konstanter Wert a angenommen.

$$v_E = v_A - \frac{1}{2} a\, t_s - a\, t_B \tag{A5-13}$$

$$v_B = v_A - \frac{1}{2} a\, t_s \tag{A5-14}$$

$$s_R = v_A\ t_R \tag{A5-15}$$

$$s_S = v_A\ t_S - \frac{1}{6} a\, {t_S}^2 \tag{A5-16}$$

$$s_B = v_A\ t_B - \frac{a\, t_s\, t_B}{2} - \frac{a\, {t_B}^2}{2} = \frac{{v_B}^2 - {v_E}^2}{2a} \tag{A5-17}$$

Der Gesamtweg des Bremsvorgangs ist die Summe aus dem während der Reaktionsdauer und der Bremsschwelldauer zurückgelegten Weges zuzüglich des Bremsweges:

$$s_{ges} = s_R + s_S + s_B \tag{A5-18}$$

$$s_{ges} = v_A\, t_R + v_A\, t_S - \frac{1}{6} a\, t_S^2 + v_B\, t_B - \frac{1}{2} a\, t_B^2 \qquad \text{(A5-19)}$$

ersetzt man v_B so ergibt sich:

$$s_{ges} = v_A\,(t_R + t_S + t_B) - \frac{1}{6} a\, t_S^2 - \frac{1}{2} a\, t_S\, t_B - \frac{1}{2} a\, t_B^2 \qquad \text{(A5-20)}$$

Die Gesamtzeit ergibt sich aus der Summe der Reaktionsdauer, der Bremsschwelldauer und der Bremsdauer:

$$t_{ges} = t_R + t_S + t_B \qquad \text{(A5-21)}$$

$$t_B = \frac{v_B - v_E}{a} \qquad \text{(A5-22)}$$

v_E, v_A, a, t_R, t_B, s_B, t_{ges}, s_{ges} sind acht Größen, von denen mit Hilfe der Gln. (A5-13) bis (A5-22) vier berechnet werden können. Daraus folgt, dass vier Größen gegeben sein müssen. Hierbei ergeben sich 70 Berechnungsmöglichkeiten, die jedoch nicht alle in der Praxis relevant sind. Exemplarisch werden einige häufig vorkommende Probleme nachstehend gelöst:

5.2 Berechnung des Gesamtweges aus der Anfangsgeschwindigkeit und Endgeschwindigkeit

$$s_{ges} = v_A\left(t_R + t_S\right) - \frac{1}{6} a t_S^2 + \frac{\left(v_A - \frac{a}{2} t_S\right)^2 - v_E^2}{2a} \qquad \text{(A5-23)}$$

Zur Anwendung kommt diese Formel z. B. zur Berechnung des Anhalteweges aus einer bestimmten Anfangsgeschwindigkeit (v_A ist gegeben, $v_E = 0$), oder zur Berechnung des Reaktionsortes, wenn die Kollisionsgeschwindigkeit (v_E) berechnet werden kann und eine Anfangsgeschwindigkeit vorgegeben ist (etwa aus der Aussage des Fahrzeuglenkers oder wenn eine Geschwindigkeitsbegrenzung vorliegt).

Beispiel:
Anhalteweg aus v_A = 50 km/h bei einer Bremsverzögerung von a = 7,5 m/s^2, einer Reaktionsdauer von 0,8 s und einer Schwelldauer von 0,2 s:

s_{ges} = 25,35 m

Beispiel:
Wo erfolgte die Reaktion, wenn die Kollisionsgeschwindigkeit 20 km/h betrug (sonst gleiche Werte wie vorhin)?

s_{ges} = 23,29 m

5.3 Berechnung der Anfangsgeschwindigkeit aus Gesamtweg und Endgeschwindigkeit (Fahren auf Sicht oder halbe Sicht)

Aus der quadratischen Gleichung:

$$\frac{a}{2} t_{ges}^2 + v_E\, t_{ges} - \left(\frac{a}{2}\left(\frac{t_S^2}{3} + t_R\, t_S + t_R^2\right) + s_{ges}\right) = 0 \qquad \text{(A5-24)}$$

lässt sich t_{ges} errechnen:

$$t_{ges} = \frac{-v_E + \sqrt{v_E^2 + (a^2 (\frac{t_S^2}{3} + t_R\, t_S + t_R^2) + s_{ges})}}{a}$$

und weiter:

$$t_B = t_{ges} - t_R - t_S$$

$$v_B = v_E + a\, t_B$$

$$v_A = v_B + \frac{a}{2} t_S$$

$$s_B = \frac{v_B^2 - v_E^2}{2a}$$

Anwendung findet die Formel wenn etwa die Sichtweite (s_{ges}) und die Kollisionsgeschwindigkeit gegeben ist und ausgerechnet werden soll, wie schnell der Verkehrsteilnehmer war, wenn ihm kein Reaktionsverzug oder Beobachtungsfehler unterlaufen ist.

Beispiel:
Die objektivierte Sichtweite betrug 35 m, die rekonstruierte Kollisionsgeschwindigkeit 25 km/h, die Bremsverzögerung 6 m/s^2.
Betrug die Reaktionsdauer nur 1 s und die Schwelldauer 0,2 s, so muss die Annäherungsgeschwindigkeit knapp 62 km/h betragen haben.

Mit Hilfe dieser Formeln lässt sich auch die maximale Geschwindigkeit berechnen, die gefahren werden darf, um innerhalb der Sichtweite (oder halben Sichtweite) anhalten zu können. Dazu muss lediglich der s_{ges} durch die (halbe) Sichtweite ersetzt werden. v_E hat dann den Wert 0.

5.4 Berechnung der Reaktionszeit bei gegebener Anfangs- und Endgeschwindigkeit und gegebenem Gesamtweg

v_B wird mit Hilfe von Gl. (A5-14) berechnet und dann weiter die Größen:

$$s_B = \frac{v_B^2 - v_E^2}{2a}$$

$$s_S = v_A\, t_S - \frac{a}{6} t_S^2$$

$$t_B = \frac{v_A - v_E}{a} - \frac{t_S}{2}$$

$$t_R = \frac{s_{ges} - s_B - s_S}{v_A}$$

Anwendung findet diese Berechnung, wenn etwa die Sichtweite (s_{ges}) und die Kollisionsgeschwindigkeit gegeben ist und ausgerechnet werden soll, wie lange die Reaktionszeit des Verkehrsteilnehmers war, wenn eine Geschwindigkeitsüberschreitung nicht vorliegt. Es könnte daher anders als im vorigen Beispiel ausgehend von einer zulässigen Geschwindigkeit von z. B. 50 km/h die Reaktionsdauer berechnet werden. Die Rechnung liefert: t_R = 1,9 s.

Das heißt, es könnte dem Fahrzeuglenker entweder einer überhöhte Geschwindigkeit (62 km/h) oder eine Reaktionsverspätung um 0,9 s, wenn eine Reaktionsdauer von 1 s angemessen erscheint, oder ein Beobachtungsfehler vorgehalten werden.

5.5 Berechnung der Bremsverzögerung bei gegebener Anfangsgeschwindigkeit und Gesamtweg

Wenn die Schwelldauer t_S ungleich 0 ist, lässt sich aus der quadratischen Gleichung

$$t_S^2\, a^2 + 12\,(2\,s_{ges} - v_A\,(2\,t_R + t_S))\,a + 12\,(v_E^2 - v_A^2) = 0 \qquad \text{(A5-25)}$$

die Bremsverzögerung berechnen, sonst ergibt sich der Wert aus:

$$a = \frac{v_A^2 - v_E^2}{2\,s_{ges} - v_A\,2\,t_R}$$

v_B nach Gl. (A5-14), t_B nach Gl. (A5-22) usw.

Anwendung findet dies, wenn die Gesamtstrecke vom Reaktionsort bis zum Kollisionsort (s_{ges}) gegeben ist und ausgerechnet werden soll, wie stark der Verkehrsteilnehmer hätte bremsen müssen, wenn ihm kein Reaktionsverzug (Beobachtungsfehler) unterlaufen wäre, bzw. wenn die Geschwindigkeit nicht überhöht gewesen wäre (siehe auch *Vermeidbarkeitsüberlegungen*). In der Gerichtspraxis taucht die Frage oft in Verbindung mit einer Vorrangverletzung dann auf, wenn der Bevorrangte eine überhöhte Geschwindigkeit inne hatte und daher untersucht werden soll, welches Ausmaß das Mitverschulden des Bevorrangten hat.

Beispiel:
Die Kollision erfolgte mit 20 km/h, davor erfolgte eine Vollbremsung (Spurenzeichnung) über 22 m. Die Reaktionsdauer betrug 1 s, die Schwelldauer 0,2 s. Daraus lässt sich die Anfangsgeschwindigkeit nach Gl. (A5-17) und (A5-14) und der Reaktionsort nach (A5-16) und (A5-18) berechnen. Die Rechnung liefert für: s_{ges} = 45,65 m, v_A = 71 km/h.
Angenommen, die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 50 km/h, so interessiert die Frage nach der notwendigen Bremsverzögerung um auf diesen 45,65 m zum Stillstand kommen zu können. Die Rechnung liefert: a = 3,18 m/s^2.

5.6 Berechnung der Anfangsgeschwindigkeit aus Gesamtzeit und Endgeschwindigkeit

$$t_B = t_{ges} - t_R - t_S$$

$$v_B = v_E + a\,t_B$$

$$v_A = v_B + \frac{a}{2}\,t_S$$

Anwendung findet dies, wenn etwa die zur Verfügung gestandene Gesamtzeit (t_{ges}) und die Kollisionsgeschwindigkeit gegeben ist und ausgerechnet werden soll, wie schnell der Verkehrsteilnehmer gewesen sein kann, wenn er ohne Reaktionsverzug oder Beobachtungsfehler mit einer Bremsung reagierte.

5.7 Berechnung der Anfangsgeschwindigkeit aus Gesamtweg und Gesamtzeit

$$v_A = \frac{s_{ges} + \frac{a}{2}\left(t_B^2 + t_B\, t_s + \frac{t_S^2}{3}\right)}{t_{ges}}$$

v_B und v_E nach (A5-14) und (A5-13)

5.8 Losfahren-Umsetzen-Abbremsen

Eine häufige Problemstellung ist:

Ein Verkehrsteilnehmer überfährt beschleunigend eine Haltelinie, d. h., ein Fahrzeug wird aus einer Anfangsgeschwindigkeit v_A mit der Beschleunigung a_1 beschleunigt, dann wird eine Gefahr erkannt und daher abgebremst, d. h. nach einer Dauer (t_U) mit gleich bleibender Geschwindigkeit mit a_2 bis zur Kollision mit der Endgeschwindigkeit v_E abgebremst.

Die Fragestellung lautet, welche Geschwindigkeit erreichte das Fahrzeug, wie lange benötigte es für die Wegstrecke Haltelinie – Kollisionsstelle und wann und wo erfolgte die Reaktion?

Der Gesamtweg lässt sich in vier Abschnitte aufteilen:

1. Beschleunigungsweg,
2. eventuell vorhandener Weg mit konstanter Geschwindigkeit,
3. Bremsschwellweg und
4. Bremsweg.

Der Reaktionsbeginn liegt im 1. oder 2. Abschnitt.

Zu beachten gilt, dass während der Reaktionsdauer die vorhandene Aktion fortgesetzt wird, d. h., der vorhandene Bewegungszustand wird beibehalten.

Konkret auf dieses Problem bezogen bedeutet dies, war der ursprüngliche Vorsatz des Fahrzeuglenkers eine durchgehende Beschleunigung, so wird er auch während der Reaktionsdauer weiter beschleunigen.

Der zurückgelegte Gesamtweg errechnet sich zu:

$$s_{ges} = v_A\, t + \frac{1}{2} a_1\, t^2 + v_{höchst}\,(t_U + t_S) - \frac{1}{6} a_2\, t_S^2 + \frac{(v_{höchst} - a_2\, t_S)^2 - v_E^2}{a_2} \qquad \text{(A5-26)}$$

mit:

t	Beschleunigungsdauer
s	Beschleunigungsweg
a_1	Beschleunigung (positive Eingabe)
a_2	Bremsverzögerung (positive Eingabe)
t_U	Dauer gleich bleibender Geschwindigkeit
$v_{höchst}$	erreichte Höchstgeschwindigkeit
s_{Reakt}, t_{Reakt}	Ort, Zeitpunkt der Reaktion nach dem Losfahren mit der Anfangsgeschwindigkeit v_A

Für die Beschleunigungsdauer *t* gilt:

$$a_1 (a_1 + a_2)t^2 + (2a_2 v_A + 2a_1 a_2 (t_U + t_S) + a_1 (2v_A - a_2 t_S))t + 2a_2 v_A (t_U + t_S) - \frac{a_2^2 t_S^2}{3} + (v_A - \frac{a_2 t_S}{2})^2 - v_E^2 - 2a_2 s_{ges} = 0 \quad \text{(A5-27)}$$

die erreichte Höchstgeschwindigkeit errechnet sich zu:

$$v_{höchst} = v_A + a_1 t$$

v_B nach (2)

$$t_B = \frac{v_B - v_E}{a_2}$$

$$t_{ges} = t + t_U + t_S + t_B$$

Für den Reaktionszeitpunkt errechnet sich:

$$t_{Reakt} = t + t_U - t_R \text{ (nach Beginn des Losfahrens).}$$

Wenn $t_U > t_R$ dann errechnet sich der Reaktionsort mit

$$s_{Reakt} = v_A t + \frac{a_1}{2} t^2 + v_{höchst} (t_U - t_R)$$

sonst mit:

$$s_{Reakt} = v_A t + \frac{a_1}{2} t^2$$

Zusammenhang zwischen s und *t*:

$$t = -\frac{v_A}{a_1} + \sqrt{(\frac{v_A}{a_1})^2 + \frac{2s}{a_1}}$$

$$s = v_A t + \frac{a_1 t^2}{2}$$

Für die Geschwindigkeit zum Reaktionszeitpunkt gilt:

$$v_{Reakt} = \sqrt{v_A^2 + 2a_1 s}$$

Für die erreichte Höchstgeschwindigkeit gilt:

$$v_{höchst} = v_{Reakt} + a_1 t_R$$

$$s_R = v_{Reakt} t_R + \frac{a_1 t_R^2}{2}$$

unter Anwendung der einleitenden Formeln folgt weiter:

$$s_{ges} = s + s_R + s_S + s_B \text{ und } t_{ges} = t + t_R + t_S + t_B$$

Rechenbeispiel:
Ein Fahrzeug fährt z. B. von einer Haltelinie mit 5 km/h und mit 2 m/s^2 beschleunigend in eine Kreuzung ein und wird mit einer Vollbremsung mit 7,5 m/s^2 abgebremst, nach einer Wegstrecke von 12 m kommt es zu einer Kollision. Die Endgeschwindigkeit (= Kollisionsgeschwindigkeit) beträgt 15 km/h.
Eingabe:

v_A = 5 km/h, a = 2 m/s^2, Zeit (v = const) = 0 s
t_R = 1,0 s, t_S = 0,2 s, v_E = 10 km/h, s_{ges} = 12 m
Ergebnis: die benötigte Zeit beträgt: t_{ges} = 2,91 s
Für den berechneten Gefahrenerkennungspunkt (das ist der Ort des Beginns der Reaktionsdauer) ergibt sich:
4,28 m nach der Haltelinie und 1,49 s nach dem Überqueren der Haltelinie.
Erreicht wurde eine Geschwindigkeit von 22,92 km/h.

5.9 Die Kurvenfahrt von Fahrzeugen

5.9.1 Die Dynamik der Kurvenfahrt

Bewegt sich ein Punkt mit konstanter Bahngeschwindigkeit auf einer Kreisbahn, so bleibt wohl der Betrag des Geschwindigkeitsvektors gleich, seine Richtung ändert sich jedoch ständig. Die Beschleunigung, die durch die Änderung des Geschwindigkeitsvektors pro Zeit definiert ist, ist daher von Null verschieden. Die Kurvenfahrt stellt im physikalischen Sinn daher eine beschleunigte Bewegung dar.

Im Falle einer Kreisbahn mit konstanter Bahngeschwindigkeit ist die Beschleunigung stets senkrecht zur momentanen Tangente zum Mittelpunkt hin gerichtet.

Die Ursache jeder beschleunigten Bewegung ist eine Kraft.

In einem mitbewegten Koordinatensystem lässt sich die Situation einfach durch das Kräftegleichgewicht zwischen der nach innen gerichteten *Zentripetalkraft* und der nach außen gerichteten *Zentrifugalkraft* (Fliehkraft) beschreiben.

Die Zentripetalkraft, die die Ursache der Beschleunigung ist, muss bei einem Fahrzeug von der Reibung der Reifen aufgebracht werden. Diese Kraft wird als Seitenführungskraft bezeichnet.

Für die Zentrifugalkraft gilt:

$$F = m\,a_q = \frac{m\,v^2}{R} \qquad \text{(A5-28)}$$

Für die Seitenführungskraft gilt:

$$F = \mu F_n \qquad \text{(A5-29)}$$

μ ist der ausgenutzte Seitenreibwert und F_n ist die Normalkraft, d. h. die Kraft, die senkrecht zwischen den Reibflächen (Straße – Reifen) wirkt.

Wenn ein Fahrzeug eine ebene Kurve durchfährt, so ist die Normalkraft gleich dem Gewicht (Einradmodell) und es gilt einfach:

$$\frac{m\,v^2}{R} = \mu G = \mu\,m\,g \qquad \text{(A5-30)}$$

Ist eine Querneigung (Neigungswinkel α) vorhanden, so wird die Sache etwas komplizierter.

Es müssen sowohl das Gewicht als auch die Fliehkraft in zwei Komponenten zerlegt werden nämlich in eine parallel zur Straßenoberfläche gerichtete und eine dazu senkrechte Komponente.

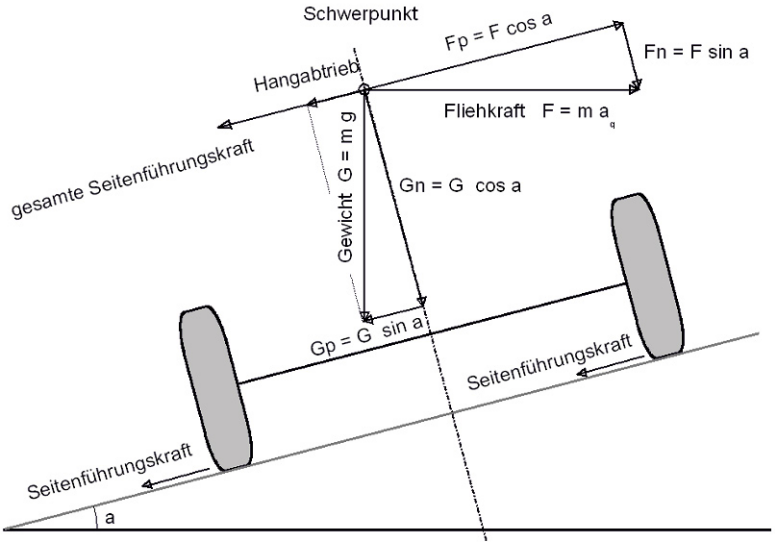


Bild A5-30
Kurvenfahrt

Die parallel zur Straßenoberfläche wirkende Komponente der Fliehkraft ist:

$F_p = F \cos\alpha$, die senkrecht dazu: $F_n = F \sin\alpha$

Die parallel zur Straßenoberfläche wirkende Komponente des Gewichtes (*Hangabtrieb*) ist:

$G_p = G \sin\alpha$, die senkrecht dazu: $G_n = G \cos\alpha$

Das Kräftegleichgewicht ergibt sich daraus wie folgt:

$$\mu (G_n + F_n) + Gp = Fp \qquad \text{(A5-31)}$$

$$\mu\left(mg\cos\alpha + \frac{m v^2}{R}\sin\alpha\right) + mg\sin\alpha = \frac{mv^2}{R}\cos\alpha \qquad \text{(A5-32)}$$

Diese Gleichung lässt sich nach v auflösen:

$$v = \sqrt{\frac{g\left(\mu\ \cos a + \sin a\right) R}{\left(\cos a - \mu \sin a\right)}} \qquad \text{(A5-33)}$$

oder, wenn Gl. (A5-28) eingesetzt wird:

$$a_q = \frac{g(\tan\alpha + \mu)}{1 - \mu\tan\alpha} \qquad \text{(A5-34)}$$

Gl. (A5-33) kann dazu verwendet werden, die Kurvengrenzgeschwindigkeit zu berechnen. Dazu muss für den Reibwert, der maximal mögliche Wert eingesetzt werden. Es zeigt sich, dass mit zunehmenden Wert von α die Kurvengrenzgeschwindigkeit größer oder für eine bestimmte Geschwindigkeit der ausgenützte Reibwert kleiner wird.

5.9.2 Die fühlbare Querbeschleunigung

Auch auf den Körper des Insassen wirken die zwei Kräfte nämlich Gewicht und Fliehkraft. Subjektiv spürt der Insasse als sein Gewicht die Komponente der resultierenden Gesamtkraft, die senkrecht zum Boden des Fahrzeugs gerichtet ist, und als Fliehkraft die dazu rechtwinkelige Komponente.

Die Größe der Komponente der Gesamtkraft parallel zum Boden errechnet sich zu:

$$F = m_{Insasse}\,(a_q \cos\alpha - g\sin\alpha)\, m_{Insasse}\, a_{qf} \qquad \text{(A5-35)}$$

Die „fühlbare" Querbeschleunigung beträgt somit:

$$a_{qf} = a_q \cos\alpha - g\sin\alpha \qquad \text{(A5-36)}$$

Wird in Gl. (A5-36) a_q aus (A5-34) eingesetzt so ergibt sich:

$$a_{qf} = g\mu \frac{\cos\alpha + \sin\alpha \tan\alpha}{1 - \mu\tan\alpha} \qquad \text{(A5-37)}$$

Im Wesentlichen ist also die fühlbare Querbeschleunigung proportional zum ausgenützten Seitenreibwert. Das heißt, die fühlbare Querbeschleunigung gibt auch bei einer Querneigung der Kurve Auskunft darüber, wie stark die Seitenführungskraft zur Bewältigung der Kurve in Anspruch genommen wird. Das bedeutet, auch beim Vorliegen einer Querneigung ist die fühlbare Querbeschleunigung ein objektives Maß für die Rutschgefahr.

5.9.3 Der ausgenutzte Seitenreibwert

Die von Spindler durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass im Durchschnitt von den Fahrzeuglenkern eine Fahrlinie mit einem Kurvenradius eingehalten wird, der um 12 bis 15 % kleiner als der gebaute ist. Die Erklärung dafür ist im zu späten Lenkeinschlag zu suchen. Wird am Beginn der Kurve etwas zu spät oder zu wenig eingeschlagen, so muss zum Ausgleich dafür, damit das Fahrzeug am Kurvenende die gleiche Gierwinkeländerung durchgeführt hat, ein größerer Lenkeinschlag gemacht werden.

Von Interesse ist der Zusammenhang zwischen dem ausgenutzten Seitenreibwert und der Fahrgeschwindigkeit.

Aus den Messungen von Spindler und amerikanischen Fachleuten ergibt sich, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten (20 km/h) μ etwa 0,15 beträgt. Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt μ ab und ist im Bereich von 100 bis 120 km/h etwa 0,1. Der Grund mag darin liegen, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die Haftreibung als Folge der unruhigeren Anpressung der Räder an die Straße abnimmt. Auch psychologische Gründe sind vorhanden. Bei großen Geschwindigkeiten werden bei gleichem μ größere Radien gefahren und sind daher kleinere Lenkeinschläge notwendig. Der Quotient aus Änderung des Lenkwinkels durch den Lenkwinkel selbst ($d\varphi/\varphi$) ist bei größeren Geschwindigkeiten somit größer. Das heißt, die Auswirkung einer bestimmten Lenkwinkeländerung ist bei einer großen Geschwindigkeit wesentlich größer als bei einer kleinen. Um einen bestimmten Kurs zu fahren, sind bei hohen Geschwindigkeiten nur mehr kleine Lenkkorrekturen notwendig, die Auswirkung einer falschen Korrektur ist wesentlich größer. Unter anderem entsteht auch dadurch der subjektive Eindruck, dass bei großen Geschwindigkeiten die Straße enger erscheint. Zum Teil entsteht dieser Eindruck auch durch die größere Vorausschaustrecke.

Für eine trockene Asphaltfahrbahn (bzw. Beton) gelten nachstehende Werte:

Tabelle A5.8 Ausgenutzte Seitenreibwerte

Fahrweise	μ
sportliches Fahren:	0,4–0,45
zügiges Fahren:	0,3–0,35
normales Fahren:	0,1–0,2

Vergleiche dazu auch **Bild A5-30** Querbeschleunigungen.

Der kritische Grenzwert liegt bei rund 0,6, die Sicherheitsgrenze bei rund 0,55.

Im rennmäßigen Fahren können auch deutlich größere Werte erreicht werden. Zum Teil liegt dies an besonderen Gummimischungen der Reifen. Außerdem werden mit Hilfe des aerodynamischen Abtriebes die Normalkraft und damit die Seitenführungskraft stark vergrößert. Die im Rennbetrieb erreichten Werte der Querbeschleunigungen sind für Straßenfahrzeuge nicht aussagekräftig.

Der Grenzwert des Seitenreibwertes lässt sich näherungsweise berechnen, wenn berücksichtigt wird, dass Schräglaufwinkel von mehr als 7,5° von durchschnittlichen Fahrern nicht mehr beherrscht werden. Setzt man den dort angegebenen Schräglaufwinkel der Vorderräder gleich dem Schwimmwinkel des ganzen Fahrzeugs, was bei einem Fahrzeug mit neutralem Lenkverhalten stimmt, so kann μ berechnet werden.

Auf einer trockenen Straße ergibt sich daher für $\mu = 0{,}09 \cdot 7{,}5 = 0{,}675$.

5.10 Der Spurwechselvorgang bzw. Ausweichvorgang

Im Zuge eines Spurwechsel- oder Ausweichvorgangs etwa bei einem Überholvorgang muss das Fahrzeug auf einer Fahrlinie bewegt werden, die von der ursprünglichen Bahn ausgehend in eine neue Bahn, die zur alten parallel verläuft, einmündet.

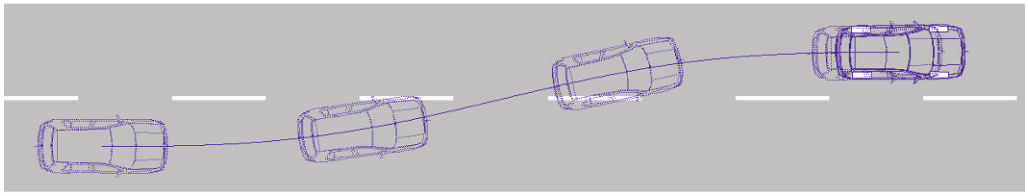


Bild A5-31 Der Spurwechselvorgang

5.10.1 Gerade Straße

Erfolgt der Vorgang auf einem geraden Straßenstück, so ist am Anfang und am Ende die Lenkradstellung auf Geradeausfahrt. Der Lenkwinkel ist definitionsgemäß bei Geradeausfahrt Null.

Der Spurwechselvorgang etwa nach links setzt sich aus vier Abschnitten zusammen. Zunächst wird nach links gelenkt, der Lenkwinkel wird von 0 (Geradeausfahrt) bis auf einen bestimmten Maximalwert vergrößert (erster Abschnitt) und anschließend wieder bis 0 zurückgelenkt (zweiter Abschnitt). In diesem Moment erreicht das Fahrzeug wieder den Geradeauslauf, gleichzeitig wird der maximale Gierwinkel erreicht. Anschließend wird analog nach rechts und dann wieder zurückgelenkt.

Die dabei durchfahrene Kurve zeichnet sich dadurch aus, dass ihr Krümmungsradius, der dem momentanen Kurvenradius entspricht, von Unendlich bis auf einen Minimalwert abnimmt um anschließend wieder unendlich groß zu werden. In der Rechtslenkphase läuft dasselbe noch einmal ab.

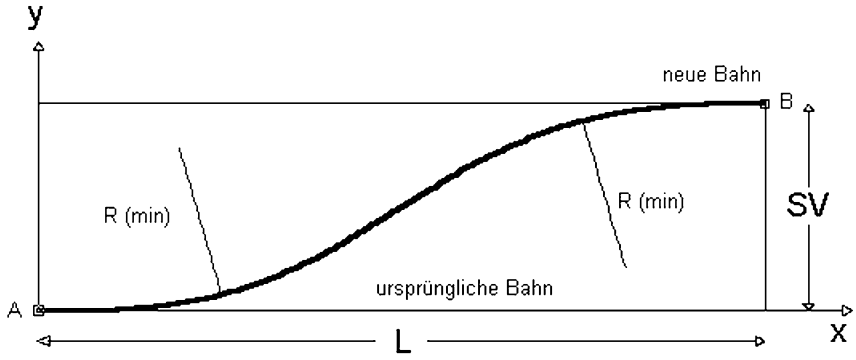


Bild A5-32 Spurwechselvorgang

Für die Berechnung des Vorgangs muss die Fahrlinie in eine brauchbare mathematische Form gebracht werden.

Die durchfahrene Kurve mit zwei aneinander gereihten Kreisbögen zu beschreiben wäre zwar mathematisch recht einfach und kann auch zur Berechnung des benötigten Weges geschehen. Der kleinste Kurvenradius während des Spurwechselvorgangs stimmt jedoch nicht mit dem Radius dieser Kreisbögen überein, sondern ist um einiges kleiner.

Die Quer- oder Normalbeschleunigung ist von der Geschwindigkeit und dem Kurvenradius abhängig:

$$a_q = \frac{v^2}{R} \qquad \text{(A5-38)}$$

Will man die maximale Querbeschleunigung während des Spurwechselns berechnen oder aus der vorgegebenen maximalen Querbeschleunigung die benötigte Zeit und den Weg berechnen, so darf die durchfahrene Kurve nicht durch zwei Kreisbögen beschrieben werden.

In Anlehnung an die im Straßenverkehr sehr häufig benützte Klothoide wäre es denkbar eine so genannte Wendeklothoide zu verwenden. Von Spindler konnte festgestellt werden, dass tatsächlich meist eine klothoidenähnliche Kurve gefahren wird.

Nun ist die Klothoide aber mathematische nur schwer zu handhaben. Es wird deshalb seit langem schon eine andere der Wendeklothoide sehr ähnliche Funktion verwendet nämlich die so genannte schräge Sinus- oder Cosinuslinie.

Bei einer Sinuskurve ist der Krümmungsradius, genau wie gewünscht, zu Anfang, in der Mitte und am Ende unendlich groß (Lenkwinkel ist Null) und erreicht nach ungefähr einem Viertel und drei Vierteln der Bahn jeweils den kleinsten Radius. Die maximale Querbeschleunigung ergibt sich annähernd in einem dieser beiden Punkte, und zwar in demjenigen, in welchem die Geschwindigkeit größer ist.

Die Gleichung der schrägen Sinuslinie lautet:

$$y=S_V\left(\frac{x}{L}-\frac{1}{2\pi}\sin\frac{2\pi x}{L}\right) \qquad \text{(A5-39)}$$

mit:

y	momentaner Seitenversatz
x	Weg entlang der geraden Straße, x geht von 0 bis L
SV	Seitenversatz (Ausweichbreite)
L	Ausweichweg (eigentlich der Platzbedarf in Längsrichtung der Straße)

Für die Berechnung des kleinsten Krümmungsradius ist es besser die schräge Sinuslinie in die x-Achse zu drehen:

$$y=\frac{S_V}{2\pi L}\sqrt{SV^2+L^2}\sin\frac{2\pi x}{\sqrt{S_V{}^2+L^2}} \qquad \text{(A5-40)}$$

Der kleinste Krümmungsradius wird dann erreicht, wenn gilt

$$\frac{2\pi x}{L}=\frac{\pi}{2} \quad \text{oder} \quad \frac{2\pi x}{L}=\frac{3\pi}{2} \quad \text{d. h. bei} \quad x=\frac{L}{4} \quad \text{und} \quad x=\frac{3L}{4}$$

Der kleinste Krümmungsradius errechnet daraus zu:

$$R=\frac{L\sqrt{S_V{}^2+L^2}}{2\pi S_V} \qquad \text{(A5-41)}$$

In [5] sind für die benötigte Zeit und Wegstrecke folgende Gleichungen für eine näherungsweise Berechnung, die durchgeführt werden kann, wenn eine konstante Geschwindigkeit vorliegt, hergeleitet:

$$s=v\sqrt{\frac{S_V}{0{,}156a_q}} \qquad \text{(A5-42)}$$

$$t=\sqrt{\frac{S_V}{0{,}156a_q}} \qquad \text{(A5-43)}$$

Wie ersichtlich kürzt sich bei der Berechnung der Zeit die Geschwindigkeit heraus, sodass die benötigte Zeit von der Geschwindigkeit unabhängig und nur mehr von der Querbeschleunigung abhängig ist.

Soll während des Spurwechselvorgangs eine Beschleunigung oder ein Abbremsen berücksichtigt werden, so lassen sich die obigen Formeln nicht mehr anwenden. Man muss sich die Mühe machen, ein iteratives Verfahren anzuwenden.

Für eine bestimmte Geschwindigkeit lässt sich die für einen Seitenversatz benötigte Länge L berechnen, wenn die Querbeschleunigung gegeben ist. Dazu wird Gl. (A5-40) in (A5-28) eingesetzt.

Es ergibt sich für L die Gleichung, wenn in (A5-41) für R der Ausdruck (A5-38) eingesetzt wird:

$$L^4+S_V\,L^2-\left(2\pi S_V\frac{v^2}{a_q}\right)^2=0 \qquad \text{(A5-44)}$$

Diese Gleichung kann wie eine gewöhnliche quadratische Gleichung nach L^2 aufgelöst werden. Die Wurzel aus der positiven Lösung ergibt L.

In **Tabelle A5.9** wurden die benötigten Wege, um einen Seitenversatz von 3 m zu erreichen, für verschiedene Geschwindigkeiten berechnet. In den Klammern sind die Werte für den Platzbedarf in Längsrichtung der Straße (L) angegeben.

Tabelle A5.9 Benötigte Wege für einen Seitenversatz von 3 m

	Querbeschleunigung (m/s²)					
v (km/h)	0,5	1	1,5	2	3	4
20	34,2 (34,0)	24,3 (24,0)	19,9 (19,6)	17,3 (16,9)	14,3 (13,8)	12,4 (11,9)
30	51,3 (51,1)	36,3 (36,1)	29,7 (29,5)	25,8 (25,5)	21,1 (20,8)	18,3 (18,0)
40	68,3 (68,2)	48,3 (48,2)	39,5 (39,3)	34,2 (34,0)	28,0 (27,8)	24,3 (24,0)
50	85,3 (85,2)	60,4 (60,3)	49,3 (49,2)	42,7 (42,6)	34,9 (34,8)	30,3 (30,1)
70	119,4	84,5 (84,4)	69,0 (68,9)	59,8 (59,7)	48,8 (48,7)	42,3 (42,2)
100	170,6	120,6	98,5	85,3	69,7 (69,6)	60,4 (60,3)

Der tatsächlich zurückgelegte Weg ist größer als L. Die Berechnung muss durch eine numerische Integration der Sinuskurve erfolgen. Bei großen Wegstrecken ist die Differenz zu L nur mehr im Zentimeterbereich.

Es kann aus Gl. (**A5-44**) zu jedem Wert von a_q und der Anfangsgeschwindigkeit der benötigte Wert von L berechnet werden. Im Falle einer Beschleunigung (bzw. Bremsung) wird die Geschwindigkeit am Ort 3/4 L (bzw. 1/4 L) berechnet. An dieser Position nimmt die Querbeschleunigung den größten Wert an. Nun wird für diese Geschwindigkeit der neue Wert von L berechnet und weiter wieder die Geschwindigkeit am Ort der größten Querbeschleunigung und daraus wieder L. Diese Berechnung wird solange fortgesetzt, bis die Änderung von L nur mehr unwesentlich ist.

Bei konstanter Geschwindigkeit kann der erreichbare Seitenversatz (Ausweichbreite) mit nachstehender Formel berechnet werden:

$$S_V = \frac{L^2 g m}{2 p v^2} \qquad \text{(A5-45)}$$

sonst muss die Gl. (**A5-44**) nach S_V aufgelöst werden.

5.10.2 Gekrümmte Straße

Wird ein Spurwechsel- oder Ausweichvorgang auf in einer Straßenkurve durchgeführt, so muss berücksichtigt werden, dass die Fahrtrichtung am Ende des Spurwechselns nicht mehr dieselbe ist, wie am Anfang. Dementsprechend sind die Tangenten am Beginn und am Ende nicht mehr parallel sondern um einen bestimmten Winkel gedreht.

Die entstehende Fahrlinie kann durch eine gebogene Sinuslinie nachgestellt werden.

Die Gleichung für die entstehende Kurve lautet:

$$y = R_0 \pm SV\left(\frac{x}{L} - \frac{1}{2\pi}\sin\frac{2\pi x}{L}\right) \qquad \text{(A5-46)}$$

Diese Funktion ist nicht im kartesischen Koordinatensystem dargestellt, sondern ist von polarem Charakter.

R_0 Kurvenradius der ursprünglichen Fahrlinie
y momentaner Radius, d. h. Abstand vom Kurvenzentrum
x $x = R_0\,\varphi$ (Weg entlang des Kreisbogens mit Radius R_0). Der Wertebereich von x ist von 0 bis L.

Für L gilt: $L = R_0\,\varphi_{max}$, wobei φ_{max} der Winkel ist, um welchen sich das Fahrzeug während der Kurvenfahrt gedreht hat.

Das positive Vorzeichen gilt für das Ausweichen nach der Kurvenaußenseite, das negative für das Ausweichen nach der Kurveninnenseite.

Die kleinsten Krümmungsradien liegen bei der gebogenen Sinuslinie mit guter Näherung bei $x = L/4$ und $x = 3L/4$. Für den kleinsten Krümmungsradius gilt ausreichend genau:

$$R_{min} = \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{2\pi S_V}{L^2}} \qquad \text{(A5-47)}$$

Der Fehler der Näherungsformel liegt außer bei sehr engen Kurven unter 10 %.

Die erreichbare Ausweichbreite lässt sich näherungsweise mit nachstehender Formel berechnen.

$$S_V = L^2/2\pi\,(g\,\mu / v^2 - 1/R_0)$$

oder unter Berücksichtigung eines Quergefälles:

$$S_V = \frac{L^2}{2\pi}\left(\frac{g(\mu+\tan\alpha)}{v^2(1-\mu\tan\alpha)} - \frac{1}{R_0}\right) \qquad \text{(A5-48)}$$

Wird die Gleichung nach L aufgelöst, so lässt sich der für einen bestimmten Seitenversatz (Ausweichbreite) benötigte Weg berechnen.

Interessant und im ersten Moment vielleicht überraschend ist, dass auch bei einem Ausweichmanöver zur Kurvenaußenseite hin ein größerer Seitenreibwert als nach Innen benötigt wird. Es wird zwar zunächst der Lenkwinkel vergrößert, aber anschließend muss, damit am Ende eine Bahn zwar mit größerem Kurvenradius, aber mit gleichem Mittelpunkt resultiert, ein größerer Lenkeinschlag als ursprünglich gemacht werden. Wird nur bis zum ursprünglichen Lenkeinschlag zurückgelenkt, so entsteht zwar eine Bahn mit dem gewünschten größeren Radius, diese ist aber nicht konzentrisch.

In nachstehendem Beispiel wird ein Ausweichen nach rechts außen simuliert. Die beiden dargestellten Fahrzeuge fahren mit 50 km/h. Das innere Fahrzeug fährt mit einem konstanten Lenkeinschlag von 45°. Das äußere weicht eine Fahrzeugbreite nach rechts aus.

In **Bild A5-33** ist das Ergebnis der Simulationsrechnung dargestellt. Das Diagramm in der linken Ecke zeigt den zeitlichen Verlauf der Querbeschleunigungen (die beiden oberen lang strichlierte Kurven). Die Werte während der ersten Zentelsekunden sind hier nicht von Bedeutung.

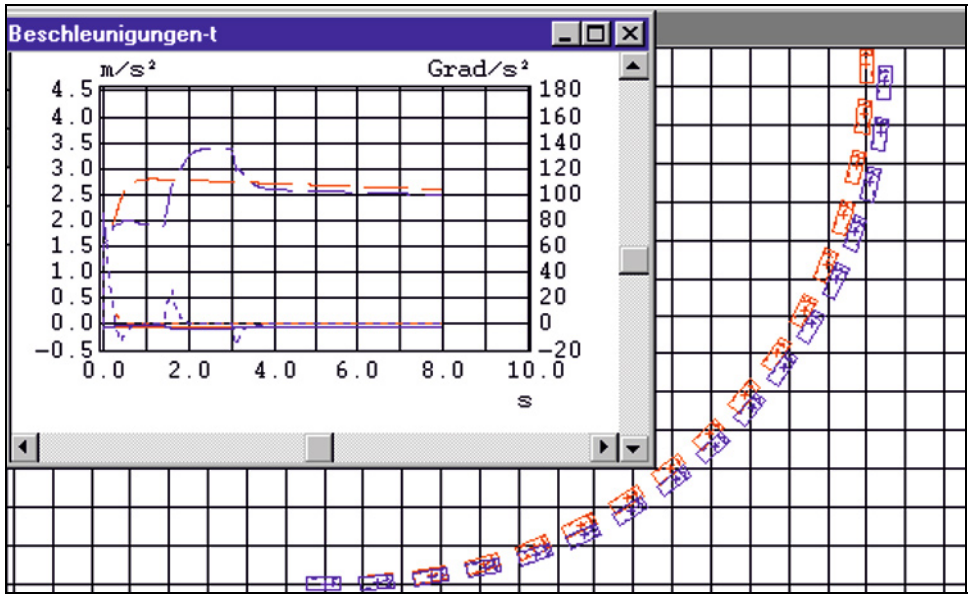


Bild A5-33 Ausweichvorgang nach außen

Lenkradwinkelverlauf des inneren Fahrzeugs: konstant 45°.

Tabelle A5.10 Lenkradwinkelverlauf des äußeren Fahrzeugs

Zeit (s)	0,00	0,20	0,40	1,40	1,60	3,00	3,10
Lenkwinkel (Grad)	45,00	45,00	30,00	30,00	55,00	55,00	43,00

Wie aus **Tabelle A5.10** hervorgeht, wurde nach 0,2 s der Lenkwinkel innerhalb einer Dauer von 0,2 s auf 30° verkleinert. Das Fahrzeug schwenkt nach außen. Nach Ablauf einer Sekunde muss wieder zurückgelenkt werden und es ist ein Lenkwinkel von 55° notwendig, um eine konzentrische Bahnkurve zu erreichen. Am Ende wird auf 43° zurückgelenkt. Dieser Lenkwinkel wird für den um etwa eine Fahrzeugbreite größeren Radius benötigt.

Während die Querbeschleunigung des inneren Fahrzeugs etwa 2,7 m/s^2 beträgt, vergrößert sich der Wert beim äußeren Fahrzeug auf 3,4 m/s^2. Damit kann sich z. B. ein Problem im Zuge des Zurücklenkens nach einem Überholvorgang ergeben, wenn die Geschwindigkeit bis auf die Kurvengrenzgeschwindigkeit gesteigert wurde. In diesem Fall könnte überhaupt nicht mehr in eine stabile Fahrlinie zurückgelenkt werden.

5.11 Der Abbiegevorgang

Der Abbiegevorgang ist dadurch gekennzeichnet, dass ein Fahrzeug den ursprünglichen Fahrstreifen verlässt und in einen anderen Fahrstreifen, der mit dem ursprünglichen einen Winkel größer Null bildet, einfährt. Dazu muss von der ursprünglichen Lenkradstellung ausgehend das Lenkrad verdreht werden. Der angestrebte Lenkradwinkel ist abhängig davon, wie stark die zu fahrende Kurve gekrümmt ist.

Häufig muss die beim Abbiegevorgang eingehaltene Fahrlinie rekonstruiert werden, um die Frage beantworten zu können, wo die ursprüngliche verlaufen ist, ob also das Fahrzeug richtig eingereiht war.

Angenommen das Fahrzeug soll aus einer geraden Straße nach links in eine dazu im rechten Winkel verlaufende eingelenkt werden. Aus dem Straßenverlauf sei ein Kurvenradius von 10 m zu entnehmen. Falsch wäre es, wenn nun die Fahrlinie so rekonstruiert würde, dass an eine gerade Linie ein Kreisbogen mit 10 m Radius angeschlossen wird.

Es ist zu berücksichtigen, dass für die Lenkraddrehung aus der Geradeausfahrt (Lenkwinkel = 0) bis zum Erreichen des notwendigen Lenkwinkels eine gewisse Zeit benötigt wird. Während dieser Zeit verändert sich der Kurvenradius von unendlich bis auf 10 m.

Für die Rekonstruktion dieses Fahrmanövers muss daher ermittelt werden:

- Kurvenradius der ursprünglichen Fahrlinie,
- angestrebter Kurvenradius,
- geometrische Daten des Fahrzeugs zur Ermittlung des Lenkeinschlages,
- Lenkstellzeit, das ist die Zeit, die benötigt wird, um das Lenkrad in die gewünschte Stellung zu verdrehen,
- Geschwindigkeit und gegebenenfalls Beschleunigung oder Verzögerung,
- erreichter Gierwinkel oder Weg.

Zur Kontrolle ist auch die Berechnung der Querbeschleunigung empfehlenswert.

Wenn die Querbeschleunigung nicht zu hoch ist, kann das Driften des Fahrzeugs vernachlässigt und die Ackermannbedingung angewendet werden. Dann liegt der momentane Kurvenmittelpunkt in der Verlängerung der Hinterachse. Die drei Punkte Kurvenmittelpunkt, kurveninneres Hinterrad und Vorderrad bilden ein rechtwinkeliges Dreieck.

R Radstand
R_{Hi} Kurvenradius (Hinterrad)

Es kann daher der Winkel zwischen dem Radius zum Hinterrad und dem zum Vorderrad berechnet werden.

Es gilt: $\tan\delta = \frac{R}{R_{Hi}}$

Bei Geradeausfahrt ist R_{Hi} unendlich groß und $\delta = 0$. Im Allgemeinen erhält man für die ursprüngliche Fahrlinie einen Wert für δ (= δ_1) und für den angestrebten Kurvenradius ebenfalls (= δ_2).

Der Radeinschlag ist stets etwas größer als δ. Für die Abschätzung der Lenkstellzeit kann der Radeinschlag mit δ gleichgesetzt werden.

Der Winkel um den das kurveninnere Vorderrad verdreht werden muss ergibt sich zu $\delta_2 - \delta_1$.

Dieser Wert ist mit dem Übersetzungsverhältnis Vorderradwinkel/Lenkradwinkel zu multiplizieren. Meist beträgt dieses Übersetzungsverhältnis 1 : 16.

Das heißt, der Winkel, um den das Lenkrad gedreht werden muss, beträgt:

$$16 \cdot (\delta_1 - \delta_2)$$

Die Zeit, die für diese Lenkraddrehung notwendig ist, hängt von der Lenkradwinkelgeschwindigkeit ab. Die Obergrenze liegt bei etwa 400°/s, wobei bei großen Lenkradwinkeldrehungen (über 150°) dieser Wert wohl kaum erreicht werden kann.

Die tatsächliche Lenkstellzeit muss aus den Angaben der Beteiligten abgeschätzt werden.

Einem normalen Lenkverhalten entspricht eine Lenkradwinkelgeschwindigkeit von etwa 100°/s.

$$\omega = \frac{\delta_2 - \delta_1}{t_{Stell}}$$

Die Berechnung des Abbiegevorgangs kann nur iterativ erfolgen.

Es muss die Winkelgeschwindigkeit des Radeinschlages berechnet werden. Dann ist eine geeignete Schrittweite (Zeitintervall) für die iterative Berechnung zu wählen.

Ein Intervall dt = 0,001 bis dt = 0,0001 ist für eine rechnerunterstützte Berechnung sinnvoll, für eine manuelle Berechnung ist auch etwas weniger ausreichend.

Für jedes Zeitintervall erfolgt dann die Berechnung des momentanen Radeinschlages und Kurvenradius.

$t_i = t_{i-1} + dt$	Zeitpunkt
$\delta_i = \omega t + \delta_{i-1}$	momentaner Radeinschlag
$R_i = R \cdot \cot(\delta_i)$	momentaner Kurvenradius

Weiterhin erfolgt die Berechnung des Weges während des Zeitintervalls: $ds = v \cdot dt$, wobei v die momentane Geschwindigkeit ist und aus dem Zeitpunkt berechnet werden kann.

Aus ds und dem Kurvenradius des Fahrzeugschwerpunktes R_S lässt sich die Änderung des Kurswinkels des Fahrzeugs in diesem Zeitintervall berechnen.

$$\Delta\nu = \frac{ds}{R_i}$$ Für R_S gilt: $R_S = \sqrt{(R_i + 0.5B)^2 + R^2}$

Daraus ergibt sich für den momentanen Kurswinkel: $\nu_i = \nu_i + \Delta\nu$.

Der momentane Seitenversatz lässt sich ähnlich berechnen, indem wieder die Änderung während des Intervalls berechnet wird:

$$S_{Vi} = S_{Vi-1} + ds \frac{R_i}{R_S} \sin\nu$$

Die iterative Berechnung erfolgt, bis der gewünschte Endradius erreicht wird.

Gleichzeitig mit der iterativen Berechnung kann der Zeitpunkt berechnet werden, wann der für die Auffälligkeit notwendige Seitenversatz erreicht wird.

6 Überholvorgang

6.1 Einleitende Erklärungen

Die Analyse und Berechnung von Überholvorgängen in der forensischen Praxis muss mit großen Streubreiten aus Angaben von Beteiligten und Zeugen zurechtkommen, weil es meist keine ausreichenden objektiven Merkmale gibt. Allenfalls sind teilweise Spuren auf der Fahrbahn vorhanden, wenn es zu Kollisionen oder Schleudervorgängen kommt. Die meisten erforderlichen Berechnungsdaten müssen geschätzt oder den vorliegenden Aussagen entsprechend berücksichtigt werden. Zur Abschätzung von Berechnungsdaten dienen Ergebnisse von Verkehrsbeobachtungen unterschiedlichster Art. Beispielsweise das Abstandsverhalten, das Ausnutzen möglicher Beschleunigungen, das Lenkverhalten der Kraftfahrer usw. Am einfachsten ist meist noch die Beschaffung der Fahrbahn- und der Fahrzeugdaten.

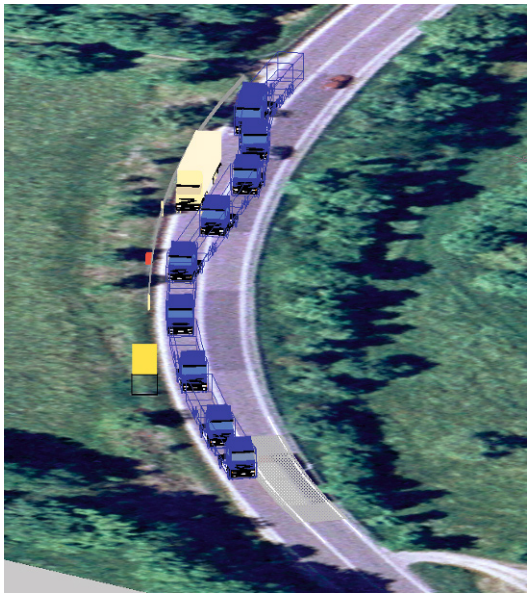


Bild A5-34 Vorbeifahrt eines Sattelzugs an einem haltenden Sattelzug (Carat-4)

Sind alle erforderlichen Daten festgelegt, dann ist zu entscheiden, wie ein konkreter Überholvorgang analysiert und berechnet werden soll.

Es gibt dafür Überschlagsformeln, mehr oder weniger komplexe Formeln für eine geschlossene Lösung und die unterschiedlichen Simulationsprogramme, mit denen mit großem Detaillierungsgrad alle Fahrvorgänge im Zusammenhang mit Überholmanövern nachgerechnet werden können.

Das Bild links zeigt beispielhaft als einfachste Form eines solchen Fahrvorgangs eine Vorbeifahrt eines Sattelzugs an einem anderen, haltenden Sattelzug als eine Simulationsberechnung.

6.2 Berechnungsverfahren

6.3 Einfache Abschätzungen

Ein erster Anhaltspunkt zur Überholdauer und zum Überholweg ist die Abschätzung der Dauer für das Ausscheren und das Einscheren mit jeweils etwa 2,5 s. Aus- und Einscheren dauern somit zusammen rund 5 s. Nach dem Ausscheren ist der Überholer im Allgemeinen mit der Front gerade am Heck oder eine Wagenlänge vor dem Heck des zu Überholenden. Das Einscheren kann ohne *Belästigung* des Überholten dann erfolgen, wenn der Überholer mit dem Heck ein bis zwei Wagenlängen vor der Front des Überholten ist. Ohne *Gefährdung* des Über-

holten kann eingeschert werden, wenn sich das Heck des Überholers in Höhe der Front des Überholten befindet. Außer dem Aus- und Einscheren muss also noch die bei dem Aus- und Einscheren noch nicht enthaltene Aufholstrecke berechnet werden.

Im Bild unten ist der Beginn eines hypothetischen Überholvorgangs zu sehen. Das blaue (vorausfahrendes Fahrzeug) fährt mit konstant 45 km/h. Das rote Fahrzeug nähert sich mit 65 km/h, beschleunigt und beginnt seinen Ausschervorgang bei einem Abstand zum blauen Fahrzeug von 20 m. Nach 2,5 s ist der Ausschervorgang beendet (Querbeschleunigung wieder 0). Es ist jetzt noch ein Abstand zum Heck des blauen Fahrzeugs von 1,2 m vorhanden.

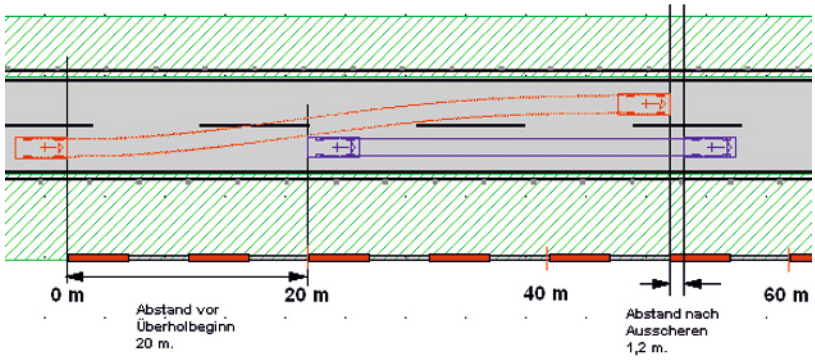


Bild A5-35 Überholvorgang vom Beginn bis zum beendeten Ausscheren

Nun muss noch abgeschätzt werden, wie lange es dauert, bis der Überholer gegenüber dem Überholten soweit aufgeholt hat, dass er wieder einscheren kann. Diese Relativstrecke berechnet sich aus einem eventuellen Abstand zwischen der Front des Überholers und dem Heck des Überholten nach erfolgtem Ausscheren, den beiden Fahrzeuglängen und dem Abstand zwischen Front des Überholten und Heck des Überholers beim Beginn des Einscherens. Bei einer Fahrzeuglänge von jeweils 4,3 m und einem Abstand bei Einscherbeginn von z. B. 4,2 m ist die relative Aufholstrecke (1,2 + 4,3 + 4,3 + 4,2) m = 14 m. Die mittlere Geschwindigkeit des Überholers während der Aufholstrecke ist in diesem Beispiel 78 km/h oder 21,7 m/s. Somit ist die Differenzgeschwindigkeit zum Überholten, der mit 45 km/h fährt, 33 km/h oder 9,16 m/s. Mit dieser Differenzgeschwindigkeit werden die 14 m zurückgelegt, was rund 1,5 s dauert.

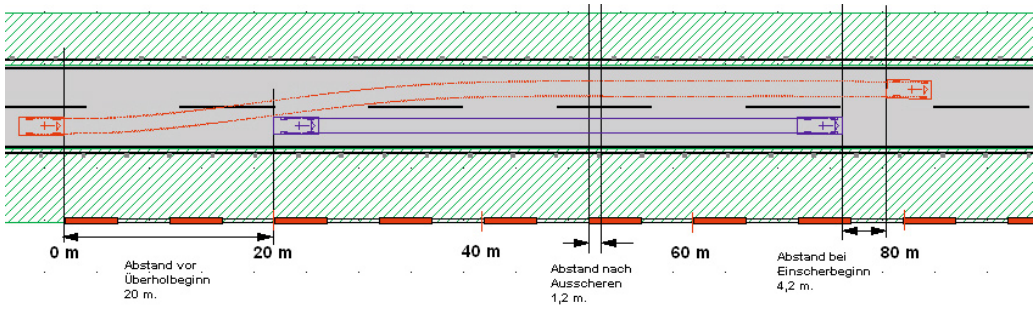


Bild A5-36 Überholvorgang bis zum Einscherbeginn

Jetzt kann der Überholer wieder einscheren, was weitere 2,5 s dauert. Damit berechnet sich der gesamte Überholvorgang mit (2,5 + 1,5 + 2,5) s = 6,5 s. Daraus folgt, dass ein Überholvorgang in erster Näherung überschlägig 7 s dauern kann. Diese Zeitspanne ist abhängig von den Differenzgeschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge.

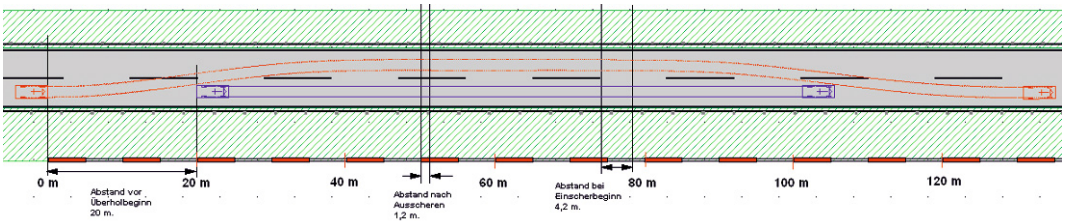


Bild A5-37 Überholvorgang ist mit dem vollendeten Einscheren abgeschlossen

Soll die erforderliche Sichtweite für einen gefahrlosen Überholvorgang berechnet werden, dann muss diese so groß sein, dass der Überholvorgang auch dann gefahrlos durchgeführt werden kann, wenn bei Überholbeginn Gegenverkehr auftaucht. Der Überholer fährt im obigen Beispiel im Durchschnitt mit 75 km/h oder 20,8 m/s und legt in 7 s eine Strecke von (7 s · 20,8 m/s) = 146 m zurück. Falls Gegenverkehr mit 100 km/h oder 27,8 m/s auftaucht, so fährt dieser in 7 s rund 200 m. Damit kann die erforderliche Sichtweite des Überholers berechnet werden. Es sind das die 146 m für den Überholvorgang, die 200 m für den Gegenverkehr und ein ausreichend bemessener Sicherheitsabstand, der etwa die Strecke sein sollte, die Überholer und Gegenverkehr in 1 s zurücklegen, somit (20,8 + 27,8) m = 48,6 m oder rund 50 m; in der Summe ungefähr 400 m.

6.4 Formeln für geschlossene Lösungen

Im **Bild A5-38** ist der grundsätzliche Ablauf eines Überholvorgangs nochmals etwas idealisiert dargestellt. Das Fahrzeug 2 (rot) will das Fahrzeug 1 (blau) überholen. Geht man zunächst einmal davon aus, dass das Fahrzeug 1 steht, dann müsste das Fahrzeug 2 um das Fahrzeug 1 herumfahren. Die dabei zurückgelegte Strecke wird Aufholstrecke genannt.

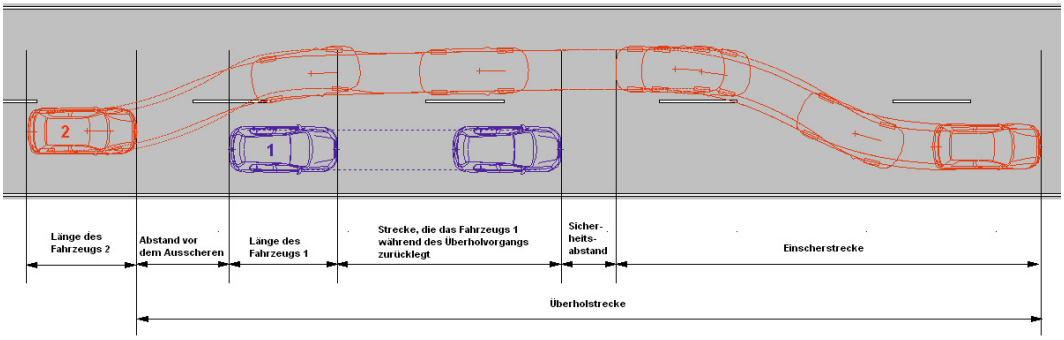


Bild A5-38 Grundskizze zum Überholvorgang

Genau diese Situation des um das Fahrzeug 1 Herumfahrens sieht ein Beobachter, der im Fahrzeug 1 sitzt. Er könnte eine Stoppuhr nehmen und die Zeit messen, die das Fahrzeug 2 vom Ausscheren bis zum Einscheren braucht. Bei der so gemessenen Zeitspanne handelt es sich um die Überholdauer.

Man könnte nun sagen, dass sich die Überholstrecke aus der Aufholstrecke und aus der Strecke zusammensetzt, die das Fahrzeug 1 selbst während der Überholdauer zurücklegt. Genau das gleiche Ergebnis erhält man, wenn man die Fahrtstrecke des Fahrzeugs 2 berechnet, die dieses während der Überholdauer mit der tatsächlichen Geschwindigkeit zurücklegt. Diese beiden Überlegungen werden bei der Herleitung von Formeln für die Berechnung des Überholvorgangs verwendet.

Bezeichnungen beim Überholvorgang:

$s_Ü$ **Überholstrecke:** wird mit der Geschwindigkeit v_2 des Überholers in der Überholdauer $t_Ü$ zurückgelegt. Gleichzeitig setzt sich die Überholstrecke aus der Aufholstrecke und der Grundstrecke zusammen.

$$s_Ü = v_2 \cdot t_Ü = s_a + s_{Grund}$$

s_a **Aufholstrecke:** wird mit der Differenz aus der Geschwindigkeit des Überholers und der Geschwindigkeit der/des Überholten während der Überholdauer zurückgelegt und setzt sich aus den einzelnen Fahrzeuglängen und -abständen zusammen.

$$s_a = a_{Vor} + l_1 + a_{Nach} + l_2$$

s_g **Grundstrecke:** wird von dem Überholten mit seiner eigenen Geschwindigkeit v_1 während der Überholdauer zurückgelegt.

$$s_{Grund} = v_1 \cdot t_Ü$$

Rechnerisch ist die Herleitung der Formeln kein Problem. Was in der täglichen Gerichtspraxis schwierig ist, das ist die Festlegung des Aufholweges. Dieser setzt sich nach **Bild A5-38** aus dem Abstand a_{Vor} zusammen, den der Überholer vor dem Ausscheren hat, aus den Längen l_1 und l_2 der Fahrzeuge und aus dem Abstand a_{Nach} nach erfolgtem Einscheren. Die Längenmaße der Fahrzeuge werden aus Datenkatalogen ermittelt. Bei den Abständen vor dem Ausscheren und nach dem Wiedereinscheren wird es schon schwieriger, weil dabei auch Rechtsprobleme eine Rolle spielen. Wenn dann noch mehrere Fahrzeuge in einem Zuge überholt wurden und die Abstände zwischen den einzelnen Fahrzeugen nach Zeugenaussagen festgelegt werden müssen, dann verlässt man den Boden der Auswertung von objektiven Merkmalen vollends.

Bei Zeugenaussagen ist immer zu berücksichtigen, dass Entfernungsschätzungen aus einem fahrenden Fahrzeug heraus äußerst schwierig sind, weshalb sehr oft Fehlschätzungen vorkommen. Die Bewertung dieser Schätzungen ist allerdings primär ein juristisches Problem. Hat man keinerlei Angaben über solche Abstände, dann wird in der Regel davon auszugehen sein, dass die Fahrzeuge in der Kolonne den üblichen Sicherheitsabstand einhalten, der dem Weg der Fahrzeuge in 0,8 bis 1,0 s entspricht, d. h., wenn eine Kolonne beispielsweise 50 km/h fährt, dann könnte man zweckmäßigerweise davon ausgehen, dass die Fahrzeuge einen Abstand von 10 bis 14 m haben (gilt nicht im Stadtverkehr). Am besten ist es, wenn die Zeugenaussagen durch das Gericht interpretiert und dem Sachverständigen vorgegeben werden.

Bei dem Abstand des Überholers zu dem Vorausfahrenden (a_{Vor}) wird der Überholer vielleicht eine Schätzung abgeben, die aber auch durch das erkennende Gericht überprüft und schließlich bewertet werden muss. Aus technischer Sicht kann die Meinung vertreten werden, dass der Abstand des Überholers dem üblichen Sicherheitsabstand in der Kolonne entspricht. Diese Annahme ist jedoch wenig praxisgerecht, denn beim Überholbeginn werden diese Abstände meist unterschritten. Der SV wird hier wieder seine Annahmen an der juristischen Situation orientieren müssen (Straf- oder Zivilprozess, gefahrloses Überholen, Mindestüberholstrecke etc.).

Nähert sich der Überholer dem zu überholenden Pkw mit Überschussgeschwindigkeit, dann können die vorgenannten Maßstäbe nicht angewandt werden. Hier kann ein Mindestabstand berechnet werden, da der Überholer ja zunächst auf der rechten Fahrbahnseite fährt, möglicherweise etwas nach links versetzt, dann aber ausscheren muss, um den vor ihm fahrenden Wagen zu überholen. Dieses Ausscheren kann unter Berücksichtigung des seitlichen Versatzes berechnet werden, wobei es nicht zur Kollision kommen darf. Außerdem darf der Abstand nicht kleiner sein als der, der sich aus der Möglichkeit zur Geschwindigkeitsanpassung zu dem Vorausfahrenden bei plötzlich auftauchendem Gegenverkehr berechnet.

Die gleiche Überlegung gilt auch für den Wiedereinschervorgang. Der Überholer muss so rechtzeitig wieder auf seiner Fahrbahnhälfte sein, dass er einen Entgegenkommenden nicht gefährdet.

Ist man sich über die Abstände der Fahrzeuge, deren Längen und damit auch über den relativen Überholweg klar geworden, dann kann die eigentliche Berechnung des Überholweges bzw. der erforderlichen Sichtweite beginnen. In der Praxis treten vier Fälle auf, von denen die beiden ersten die wichtigsten sind:

A – Überholen mit konstanter Geschwindigkeit

B – Überholen mit konstanter Beschleunigung aus gleicher Anfangsgeschwindigkeit wie der Überholte

C – Überholen mit konstanter Beschleunigung ab Überholbeginn mit einer Anfangsgeschwindigkeiten, die ungleich der des Überholten ist

D – Überholen mit konstanter Beschleunigung ab Überholbeginn mit einer Anfangsgeschwindigkeit, die ungleich der des Überholten ist. Überholter beschleunigt oder verzögert während des Überholvorgangs

6.4.1 Überholen mit konstanter Geschwindigkeit

Der Beobachter im überholten Fahrzeug sieht den Überholer mit konstanter Geschwindigkeit (das ist die Differenzgeschwindigkeit) vorbeifahren:

Überholdauer $$t_{Ü} = \frac{s_a}{v_2 - v_1}$$

Überholstrecke $$s_{Ü} = s_a + v_1 \cdot t_{Ü}$$

Beispiel:
Ein Pkw (2) überholt mit 80 km/h einen anderen (1), der mit 50 km/h fährt. Entgegen kommt ein Pkw (3) mit 100 km/h. Zu berechnen sind die Überholstrecke und die erforderliche Sichtweite.
Der Abstand a_{Aus} muss so gewählt werden, dass der Pkw 2 notfalls anhalten kann.
Anhalteweg: $\Delta v = v_2 - v_1 = 30$ km/h oder 8,33 m/s, Reaktionsdauer $t_R = 0{,}5$ s,
Verzögerung $a = 5\ m/s^2$.

$$s_A = t_R \cdot \Delta v + \frac{\Delta v^2}{2 \cdot a}$$

$$s_A = 0{,}5s \cdot 8{,}33\,m/s + \frac{(8{,}33\,m/s)^2}{2 \cdot 5\,m/s^2}$$

$s_A \approx 11$ m

Einscherzeit: Spurversatz B = 3 m, $a_{quer} = 5 m/s^2$ (Maximalwert), Berechnung nach der Formel von Weiss:

$$t_E = K \cdot \sqrt{\frac{B}{a_{quer}}}, \qquad t_E = 2{,}67 \cdot \sqrt{\frac{3}{5}}$$

$t_E \approx 2{,}0$ s

Einscherweg: Spurversatz B = 3 m, Berechnung nach der Formel von Weiss

$$s_E = t_E \cdot \Delta v, \qquad s_E = 2{,}0\,s \cdot 8{,}33\ m/s$$

$$\underline{s_E \approx 17\ m}$$

Aufholstrecke: $a_{Vor} + l_1 + a_{Nach} + l_2 = (15 + 4 + 17 + 4)$ m = 40 m
Rechnungsgang:

Überholdauer

$$t_Ü = \frac{s_a}{\Delta v}$$

$$t_Ü = \frac{40m}{8{,}33\,m/s}$$

$$\underline{t_Ü = 4{,}8\,s}$$

Überholstrecke

$$s_Ü = v_2 \cdot t_Ü$$

$$s_Ü = 22{,}2\,m/s \cdot 4{,}8s$$

$$\underline{s_Ü = 106{,}7\ m}$$

Fahrstrecke des Gegenverkehrs während der Überholdauer

$$s_{Gegen} = v_{Gegen} \cdot t_Ü$$

$$s_{Gegen} = 27{,}8\,m/s \cdot 4{,}8s$$

$$\underline{s_{Gegen} = 133{,}3\ m}$$

Erforderliche Sichtweite *SW* bei Überholbeginn für ein gefahrloses Überholmanöver

$$SW_{erf} = s_Ü + s_{Gegen} + \text{Sicherheitsabstand}$$

$$SW_{erf} = 106{,}7m + 133{,}3m + 27{,}8\ m$$

$$SW_{erf} = 268\ m$$

6.4.2 Überholen mit konstanter Beschleunigung aus gleicher Anfangsgeschwindigkeit wie der Überholte

Der Beobachter im überholten Fahrzeug sieht den Überholer hinter sich, gewissermaßen stehend. Der Überholer beschleunigt aus dem relativen Stillstand und hat nach erfolgtem Einscheren eine bestimmte Differenzgeschwindigkeit zum überholten Fahrzeug. Hier muss eine mittlere Beschleunigung aus Beschleunigungsdiagrammen in einer ersten Schätzung der erreichten Endgeschwindigkeit ermittelt werden. Falls diese erste Schätzung nicht richtig war, muss nach Bestimmung der Endgeschwindigkeit mit dem ersten Schätzwert eine neue Ermittlung der mittleren Beschleunigung erfolgen.

Während des Aufholweges s_a wird beschleunigt, und es gilt:
Beachte: a_m ist eine konstante mittlere Beschleunigung

$$s_a = \frac{1}{2} \cdot a_m \cdot t_Ü^2$$

$$t_Ü = \sqrt{\frac{2 \cdot s_a}{a_m}}$$

$$s_Ü = s_a + v_1 \cdot t_Ü$$

Erreichte Endgeschwindigkeit des Überholers

$$v_E = v_2 + a \cdot t_Ü$$

Beispiel:
Beschleunigung von 80 km/h auf 120 km/h in 10 s laut Testbericht

$$a_m = \frac{\Delta v}{t}$$

$$a_m = \frac{11{,}1\,\text{m/s}}{10\,\text{s}}$$

$$\underline{a_m = 1{,}1\,\text{m/s}^2}$$

Beispiel:
Es gilt die gleiche Aufgabenstellung wie unter „Überholen mit konstanter Geschwindigkeit“. Zum Überholbeginn wird $v_2 = v_1$ vorausgesetzt. Aus der Beschleunigungskurve zwischen 50 km/h und 90 km/h wurde $a_m = 1{,}5\ \text{m/s}^2$ ermittelt.

Berechnungsgang:
Überholdauer

$$t_Ü = \sqrt{\frac{2 \cdot s_a}{a_m}}$$

$$t_Ü = \sqrt{\frac{2 \cdot 40\,\text{m}}{1{,}5\,\text{m/s}^2}}$$

$$\underline{t_Ü = 7{,}3\,\text{s}}$$

Überholstrecke

$$s_Ü = s_a + v_1 \cdot t_Ü$$

$$s_Ü = 40\,\text{m} + 13{,}9\,\text{m/s} \cdot 7{,}3\,\text{s}$$

$$\underline{s_Ü = 142\,\text{m}}$$

Fahrstrecke des Gegenverkehrs während der Überholdauer

$$s_{Gegen} = v_{Gegen} \cdot t_Ü$$

$$s_{Gegen} = 27{,}8\,\text{m/s} \cdot 4{,}8\,\text{s}$$

$$\underline{s_{Gegen} = 133{,}3\,\text{m}}$$

Erreichte Endgeschwindigkeit (Erster Schätzwert war richtig, Korrektur nicht erforderlich.)

$$v_{End} = v_2 + a \cdot t_Ü$$

$$v_{End} = 13{,}9\,\text{m/s} + 1{,}5\,\text{m/s}^2 \cdot 7{,}3\,\text{s}$$

$$\underline{v_{End} = 24{,}9\,\text{m/s} = 89{,}6\,\text{km/h}}$$

Erforderliche Sichtweite bei Überholbeginn für ein gefahrloses Überholmanöver

$$SW_{erf} = s_Ü + v_{Gegen} \cdot t_Ü + \text{Sicherheitsabstand}$$

$$SW_{erf} = 142\,\text{m} + 27{,}8\,\text{m/s} \cdot 7{,}3\,\text{s} + 25\,\text{m}$$

$$\underline{SW_{erf} = 370\,\text{m}}$$

6.4.3 Überholen mit konstanter Beschleunigung ab Überholbeginn mit einer Anfangsgeschwindigkeiten, die ungleich der des Überholten ist

Der Beobachter im überholten Fahrzeug sieht den Überholer auf das eigene Fahrzeug aufschließen. Ab Überholbeginn beschleunigt der Überholer aus der anfänglichen Differenzgeschwindigkeit und hat nach erfolgtem Einscheren eine andere Differenzgeschwindigkeit zum überholten Fahrzeug. Auch hier muss eine mittlere Beschleunigung aus Beschleunigungsdiagrammen in einer ersten Schätzung der erreichten Endgeschwindigkeit ermittelt werden. Gegebenenfalls muss die erste Schätzung korrigiert werden.

Während der Aufholstrecke s_a wird beschleunigt und es gilt:
Beachte: a_m ist eine konstante mittlere Beschleunigung

$$s_a = (v_2 - v_1)\cdot t_Ü + \frac{1}{2}\cdot a_m \cdot t_Ü^2$$

$$0 = t_Ü^2 + \frac{2\cdot(v_2 - v_1)}{a_m}\cdot t_Ü - \frac{2\cdot s_a}{a_m}$$

$$t_Ü = \sqrt{\left(\frac{v_2 - v_1}{a_m}\right)^2 + \frac{2\cdot s_a}{a_m}} - \frac{v_2 - v_1}{a_m}$$

$$s_Ü = s_a + v_1 \cdot t_Ü$$

Erreichte Endgeschwindigkeit des Überholers

$$v_E = v_2 + a_m \cdot t_Ü$$

Beispiel:
Es gilt die gleiche Aufgabenstellung wie unter „Überholen mit konstanter Geschwindigkeit“.
Zum Überholbeginn wird v_2 = 60 km/h angenommen.

Überholdauer

$$t_Ü = \sqrt{\left(\frac{2{,}78\,\text{m/s}}{1{,}5\,\text{m/s}^2}\right)^2 + \frac{2\cdot 40\,\text{m}}{1{,}5\,\text{m/s}^2}} - \frac{2{,}78\,\text{m/s}}{1{,}5\,\text{m/s}^2}$$

$$\underline{t_Ü = 5{,}0\,\text{s}}$$

Überholstrecke

$$s_Ü = 40\,\text{m} + 13{,}9\,\text{m/s}\cdot 5{,}0\,\text{s}$$

$$\underline{s_Ü = 109{,}5\,\text{m} \approx 110\,\text{m}}$$

Fahrstrecke des Gegenverkehrs während der Überholdauer

$$s_{Gegen} = 27{,}8\,\text{m/s}\cdot 5\,\text{s}$$

$$\underline{s_{Gegen} = 139\,\text{m}}$$

Erreichte Endgeschwindigkeit (Erster Schätzwert war richtig, Korrektur nicht erforderlich.)

$$v_{End} = 16{,}7\,\text{m/s} + 1{,}5\,\text{m/s}^2\cdot 5{,}0\,\text{s}$$

$$\underline{v_{End} = 24{,}2\,\text{m/s} = 87{,}1\,\text{km/h}}$$

Erforderliche Sichtweite bei Überholbeginn für ein gefahrloses Überholmanöver

$$SW_{erf} = 110\,\text{m} + 27{,}8\,\text{m/s}\cdot 5{,}0\,\text{s} + 24{,}2\,\text{m}$$

$$\underline{SW_{erf} = 273\,\text{m}}$$

6.4.4 Überholen mit konstanter Beschleunigung ab Überholbeginn mit einer Anfangsgeschwindigkeit, die ungleich der des Überholten ist. Überholter beschleunigt oder verzögert während des Überholvorgangs

Der Beobachter im überholten Fahrzeug sieht den Überholer auf das eigene Fahrzeug aufschließen. Ab Überholbeginn beschleunigt der Überholer aus der anfänglichen Differenzgeschwindigkeit und hat nach erfolgtem Einscheren eine andere Differenzgeschwindigkeit zum

überholten Fahrzeug. Auch hier muss eine mittlere Beschleunigung aus Beschleunigungsdiagrammen in einer ersten Schätzung der erreichten Endgeschwindigkeit ermittelt werden. Gegebenenfalls muss die erste Schätzung korrigiert werden. Gleichzeitig mit dem Beschleunigungsbeginn des Überholers beschleunigt (positiver Beschleunigungswert) oder verzögert (negativer Beschleunigungswert) auch der Überholte.

Während der Aufholstrecke s_a wird beschleunigt, und es gilt:

Beachte: a_m ist eine konstante mittlere Beschleunigung,
Vorzeichen beachten:
+ = Beschleunigung
– = Verzögerung

$$s_a = (v_2 - v_1)\cdot t_Ü + \frac{1}{2}\cdot(a_{m2} - a_{m1})\cdot t_Ü^2$$

daraus folgt:

$$t_Ü = \sqrt{\left(\frac{v_2 - v_1}{a_{m2} - a_{m1}}\right)^2 + \frac{2\cdot s_a}{a_{m2} - a_{m1}}} - \frac{v_2 - v_1}{a_{m2} - a_{m1}}$$

$$s_Ü = s_a + v_1\cdot t_Ü + \frac{1}{2}\cdot a_{m1}\cdot t_Ü^2$$

Erreichte Endgeschwindigkeit des Überholers und des Überholten

$$v_{1End} = v_1 + a_{m1}\cdot t_Ü$$
$$v_{2End} = v_2 + a_{m2}\cdot t_Ü$$

Diese Formeln sind gleichzeitig die allgemeinen Formeln, die auch für jeden der unter A bis C behandelten Sonderfälle anwendbar sind. Setzt man die einzelnen Größen entsprechend der Vereinfachungen ein, dann ergeben sich gerade die unter A bis C abgeleiteten Formeln.

6.5 Abbruch des Überholvorgangs

Kommt es im Zuge eines Überholmanövers zu einem Unfall mit einem Gegenverkehr, so ist oft die Frage zu untersuchen, ob ein rechtzeitiger Abbruch des Überholmanövers möglich gewesen wäre. Diese Frage wird vor allem dann relevant sein, wenn der Gegenverkehr eine überhöhte Geschwindigkeit inne hatte und daher zu untersuchen ist, ob bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit der Unfall durch ein Abbrechen des Überholvorgangs zu vermeiden gewesen wäre.

Als Zeitpunkt des Beginnes des Abbrechens sei der Zeitpunkt verstanden, an welchem entweder zu bremsen oder einzuscheren begonnen wird. Diesem Zeitpunkt ist die Reaktionsdauer vorgelagert.

Der Abbruchsvorgang kann auf zwei Arten erfolgen, nämlich dass zunächst gebremst und anschließend der Einschervorgang durchgeführt wird, oder es kann aber auch gleichzeitig mit dem Bremsen der Einschervorgang durchgeführt werden. Letzteres ist nur dann möglich, wenn der Einschervorgang früh genug begonnen wird.

Auf Grund des für das Überholmanöver notwendigen Geschwindigkeitsüberhangs muss in allen Fällen die Geschwindigkeit zumindest bis auf die des zu überholenden Fahrzeugs reduziert werden. Sobald das Überholmanöver soweit fortgeschritten ist, dass das überholende Fahrzeug bis zum überholten seitlich überlappend aufgeschlossen hat, muss die Geschwindigkeit sogar kleiner werden, damit sich der Überholer wieder zurückfallen lassen kann.

Der Abbruchsvorgang besteht somit aus einem oder zwei Vorgängen nämlich Bremsen und anschließend Einscheren eventuell mit gleichzeitigem Bremsen.

Punkt 1 kann unter Umständen entfallen, dann muss aber der Einschervorgang bremsend erfolgen.

Generell ist zu prüfen, ob der Einschervorgang kollisionsfrei mit dem voraus fahrenden Fahrzeug möglich ist. Die Prüfung darf nicht am Ende des Einschervorgangs zu Ende sein, sondern muss bis zu dem Zeitpunkt weiter erfolgen, bis die Geschwindigkeit des Überholers bis auf die des voraus fahrenden Fahrzeugs reduziert wurde.

Für den Vorgang sind zwei Zeitpunkte relevant, nämlich der Beginn des Abbruchs und der Beginn des Einschervorgangs. Diese Punkte können durch eine Zeitangabe oder durch die Angabe des zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Tiefenabstandes definiert werden.

Der Einschervorgang im Zuge des Überholabbruchs kann analog zum normalen Überholvorgang durch eine schräge Sinuslinie nachgestellt werden. Normalerweise wird die beim Überholabbruch in Anspruch genommene Querbeschleunigung einen höheren Wert haben. Ein Problem ergibt sich, wenn der Einschervorgang einsetzt ehe der Ausschervorgang völlig abgeschlossen ist. Dies bedeutet, dass die Sinuskurve des Ausschervorgangs nicht fertig gefahren wird. Analog dazu wird die Sinuskurve des Einschervorgangs nicht von Anfang an gefahren. Es muss daher rechnerisch ein Übergang von einer Sinuskurve zur anderen erfolgen. Angenommen der Abbruch erfolgt zu einem Zeitpunkt an welchem das Fahrzeug in der zweiten Hälfte der Sinuskurve befindet und somit eine Rechtskurve fährt, so ist davon auszugehen, dass das Lenkrad nicht zurückgestellt und anschließend erneut rechts verlenkt wird, sondern es wird aus der Rechtsverlenkung heraus in den Einschervorgang eingeschwenkt. Sinnvoll ist es anzunehmen, dass vom momentanen Kurvenradius (R_1) zum Zeitpunkt des Abbruches in den Kurvenradius eingelenkt wird, der sich als Minimum für den Einschervorgang errechnet (R_2). Dieser Kurvenradius ergibt sich aus der Sinuskurve nach einem Viertel bzw. drei Viertel der Strecke. Er ist abhängig von der Geschwindigkeit und der Querbeschleunigung (siehe Spurwechselvorgang).

Der momentane Kurvenradius lässt sich mit der nachstehenden Formel berechnen:

$$R=\frac{\left(1+\frac{S_V}{L_{Scher}}\cos\left(\frac{2\pi}{\sqrt{S_V{}^2+L_{Scher}{}^2}}s\right)\right)^{3/2}}{2\pi S_V\sin\left(\frac{2\pi}{\sqrt{S_V{}^2+L_{Scher}{}^2}}s\right)}L_{Scher}\sqrt{S_V{}^2+L_{Scher}{}^2}$$

mit:

S_V	Seitenversatz
L_{Scher}	Länge des vollständigen Spurwechselvorgangs (schräge Sinuslinie)
s	Weg bis zum Abbruch

Die Einschlagzeit kann vorgegeben sein, es kann aber auch die Information aus dem Spurwechselvorgang des Einschervorgangs entnommen werden. Und zwar kann der Weg berechnet werden, der zwischen den Punkten der Sinuslinie mit Kurvenradius R_1 und R_2 liegt.

Es muss daher zuerst der Kurvenradius zum Zeitpunkt des Abbruches durch Vorgabe des Weges ($s_{Abbruch}$) berechnet werden und anschließend der Punkt der Sinuslinie des Einschervorgangs mit gleichem Radius. Das heißt, die obige Gleichung muss nach s aufgelöst werden, wobei für S_V und L_{Scher} die entsprechenden Werte des Einschervorgangs einzusetzen sind. Eine exakte Lösung der Gleichungen ist nicht möglich. Die Berechnung hat daher iterativ zu erfolgen. Der Wert von s sei s_1. Der Punkt mit minimalem Kurvenradius liegt bei $s_2 = L_{Scher}/4$. Der für den Einschlag benötigte Weg ist der Weg zwischen s_1 und s_2. Die Berechnung erfolgt durch Integration der Sinuskurve entlang des Weges (Berechnung der Bogenlänge).

Weiterhin ist zu berechnen um welchen Winkel sich das Fahrzeug während diese Weges gedreht hat. Dieser Winkel wird addiert zum Kurswinkel zum Zeitpunkt des Abbruchs. Das Ergebnis ergibt den Kurswinkel zum Zeitpunkt, wenn der minimale Kurvenradius erreicht wird. Da dieser nicht gleich groß ist, wie der Kurswinkel am Punkt des kleinsten Kurvenradius (R_2) der Einschersinuslinie (nach einem Viertel der Einschersinuslinie) muss noch ein Teilkreis mit Radius R_2 durchfahren werden.

Der momentane Kurswinkel υ hängt vom zurückgelegten Weg s ab und lässt sich mittels der nachstehenden Formel berechnen. Genau genommen ist s die Projektion des Weges auf die x-Achse (bzw. ursprüngliche Fahrtrichtung).

$$\upsilon = \arctan\left(\frac{S_V}{L_{Scher}}\left(1-\cos\left(\frac{2\pi}{\sqrt{S_V{}^2+L_{Scher}{}^2}}s\right)\right)\right)$$

Vom Beginn des Abbruchs wird also der Weg $\overline{s_1 s_2}$, dann der Teilkreis und anschließend die Sinuslinie ab dem ersten Viertel durchfahren. Dieser Weg ist meist etwas größer als die vollständige Sinuslinie des Einschervorgangs. Für eine näherungsweise Lösung kann auch die vollständige Sinuslinie vermehrt um einige Meter verwendet werden.

6.6 Mindestsichtweite für den Überholvorgang

Ein Überholmanöver kann durchgeführt werden, wenn zum Zeitpunkt des Ausschervorgangs die Sicht zumindest gleich dem Überholweg plus Weg, den ein möglicher Gegenverkehr während der Überholzeit bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zurücklegen kann, ist. Voraussetzung ist, dass der Gegenverkehr nicht mit überhöhter Geschwindigkeit und ungebremst naht.

Nun ist es aber so, dass sich während des Überholmanövers der einsehbare Bereich verschiebt und bei Auftauchen eines Gegenverkehrs das Überholmanöver abgebrochen werden kann.

Der Überholer muss den Gegenverkehr wahrnehmen und daraufhin reagieren. Es muss daher eine entsprechende Reaktionsdauer berücksichtigt werden. Am Ende der Reaktionsdauer kann der Überholabbruch erfolgen. Die Mindestsichtweite ergibt sich aus diesen Überlegungen aus der Summe von Reaktionsweg, Weg, der für den Abbruch benötigt wird, und Weg, den der Gegenverkehr während dessen zurücklegen kann.

Während des Überholmanövers vergrößert sich der für den Abbruch benötigte Weg und wenn beschleunigt wird auch der Reaktionsweg. Deshalb vergrößert sich mit zunehmender Dauer die Mindestsichtweite. Irgendwann wird der Punkt erreicht, ab dem es dann besser ist, das Überholmanöver abzuschließen und nicht abzubrechen. Dieser Punkt wird als Punkt des letzten Abbruchs bezeichnet.

Vom Beginn des Überholmanövers nimmt die Mindestsichtweite bis zum Punkt des letzten Abbruchs zu. Taucht während des Überholvorgangs ein Fahrzeug innerhalb der momentanen Mindestsichtweite auf, so muss der Überholvorgang unverzüglich abgebrochen werden. Der Abbruch kann dann kollisionsfrei durchgeführt werden, sofern nicht der Gegenverkehr mit überhöhter Geschwindigkeit und ungebremst naht.

Die Mindestsichtweite ist also eine Funktion von der Zeit (bzw. Weg). Die Berechnung kann tabellarisch erfolgen. Der rechnerische Aufwand ist aber enorm und kann in vernünftiger Zeit nur mittels eines Computers erfolgen. Es wird daher hier auf eine ausführliche mathematische Beschreibung verzichtet.

Beispiel:
Ein Fahrzeug fährt mit 60 km/h und wird von einem nachfolgendem überholt. Dieses fährt zunächst ebenfalls mit 60 km/h und beginnt aus einem Tiefenabstand von 10 m beschleunigend (1,5 m/s^2) zu überholen. Die Länge der Fahrzeuge sei jeweils 4 m, die Breite 1,7 m. Der Seitenversatz beim Ausscheren und Einscheren wird mit 2,7 m (ergibt einen Seitenabstand von 1 m bei ursprünglich fluchtender Fahrlinie) angenommen. Am Ende des Vorgangs soll der Tiefenabstand 20 m betragen.
Der benötigte Überholweg berechnet sich zu 157 m, die dafür benötigte Zeit zu 7,1 s.
Für den Abbruch des Überholmanövers wird für die Bremsverzögerung 3 m/s^2 und für die Querbeschleunigung beim Einscheren 4 m/s^2 (Notvorgang) angenommen. Der Seitenversatz soll 2,5 m betragen. Weiterhin wird angenommen, dass der Gegenverkehr nur 80 km/h schnell sein darf (ausgewiesene Geschwindigkeitsbeschränkung).
Der Zeitpunkt des letzten Abbruchs errechnet sich zu 3,4 s nach dem Beginn des Überholmanövers. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Überholer noch etwa 1,6 m hinter dem Überholten. Das Ende des Abbruches wird rund 1 s später erreicht als der Überholvorgang gedauert hätte. Aber auf Grund der Bremsung wird um 23 m weniger Weg zurückgelegt.

Abbruchdaten: 4 Überholter: 1 Gegenverkehr: 3

Abbruch-Abstand:	Front-Front:	5.58 m	Einscher-Abstand:	Front-Front:	1.86 m
Zeitpkt.:	vom Anf.:	3.37 s		Seitenversatz:	2.70 m S
	vom Ende:	3.76 s		max Querbeschl.:	4.00 m/s²
Bremsverzögerung: (vor dem Einscheren)		3.00 m/s²	Bremsverzögerung: (nach Einscherbeginn)		3.00 m/s²

Positionen (von Ende)		Überholter	Überholabbr.	Gegenverk.	Distanz
Überholbeginn:	7.14 s	142.95 m	156.95 m	158.60 m	315.56 m
Abbruchbeginn:	3.76 s	86.70 m	92.37 m	83.61 m	175.97 m
Einscherbeginn:	1.46 s	48.39 m	50.34 m	32.51 m	82.85 m
Einscherende:	-1.03 s	6.85 m	22.89 m	-22.87 m	0.02 m
Überholbeginn:		60.00 km/h	60.00 km/h	80.00 km/h	
Abbruchbeginn:		60.00 km/h	78.22 km/h	80.00 km/h	
Einscherbeginn:		60.00 km/h	53.39 km/h	80.00 km/h	
Einscherende:		60.00 km/h	26.48 km/h	80.00 km/h	

Bild A5-39
Abbruch des Überholvorgangs

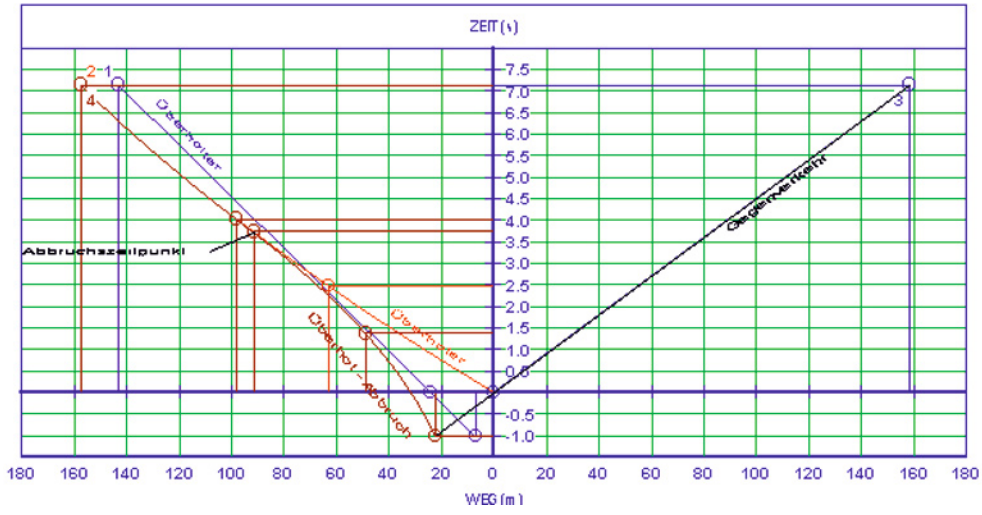


Bild A5-40 Weg-Zeit-Diagramm mit Überholmanöver und Abbruch

Die Mindestsichtweiten berechnen sich wie folgt:

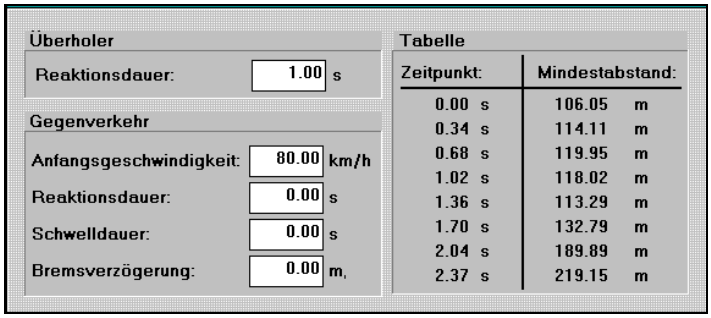


Bild A5-41
Mindestsichtweiten

Die Tabelle umfasst einen Zeitraum von 0 bis 2,4 s. Jeweils 1 s später erfolgt nach Ablauf der Reaktionsdauer von 1 s der Abbruch. Am Beginn muss die Sichtweite zumindest 106 m betragen. Die Sicht muss sich während des Überholvorgangs nach 2,4 s bis auf 219 m vergrößern. 1 s später kann der letzte Abbruch erfolgen. Für den Gegenverkehr wurde ein Abbremsen nicht angenommen. Es soll die Mindestsichtweite für die Situation berechnet werden, wo das Überholmanöver ohne Behinderung des Gegenverkehrs durchgeführt werden kann. Das heißt, der Gegenverkehr soll nicht zu einem Abbremsen gezwungen werden.

Im Weg-Zeit-Diagramm wurde die Kurve für den letzten Abbruch eingezeichnet. Die Mindestsichtweite ergibt sich aus der Distanz zur Kurve des Gegenverkehrs zum Zeitpunkt der Reaktion. Die Kurve des Gegenverkehrs trifft auf die Kurve des Überholvorgangs an deren Ende, d. h., die Begegnung der Fahrzeuge erfolgt am Ende des Überholvorgangs. Wird die Kurve des Gegenverkehrs verlängert, so trifft sie auch das Ende der Kurve des letzten Abbruchs.

Wird zu einem späteren Zeitpunkt der Überholvorgang noch abgebrochen, so müsste sich der Gegenverkehr in einer größeren räumlich-zeitlichen Distanz befinden, damit eine Begegnung erst nach erfolgtem Einscheren erfolgt, als dies notwendig ist, wenn das Überholmanöver abgeschlossen wird. Im Weg-Zeit-Diagramm des Beispiels müsste die Kurve des Gegenverkehrs weiter nach rechts geschoben werden. Wird hingegen der Überholvorgang früher abgebrochen, so kann die Kurve des Gegenverkehrs weiter nach links geschoben werden.

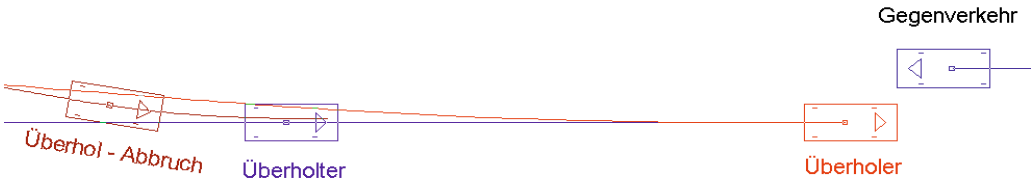


Bild A5-42 Situation zum Zeitpunkt Ende des Überholvorgangs ($t = 0$)

Das voranstehende Bild zeigt die Situation zum Zeitpunkt, wo das Überholmanöver abgeschlossen wäre. Der Gegenverkehr befindet sich dann mit der Front auf gleicher Höhe. 1 s später wäre auch der Abbruch des Überholmanövers abgeschlossen.

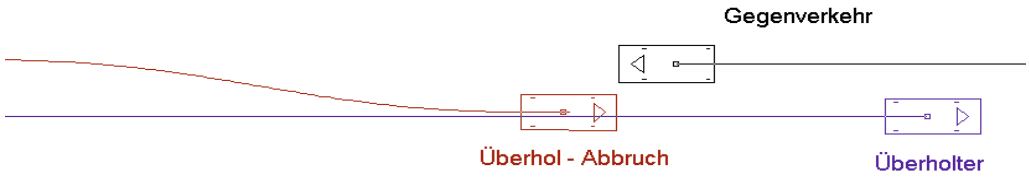


Bild A5-43 Situation zum Zeitpunkt Ende des Überholabbruchs ($t = -1{,}1$ s)

Literatur

[1] Weber, M. und W. Hugemann: die Geschwindigkeitsrückrechnung bei Motorradbremsungen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 1990, Heft 10, S. 260
[2] Tönnies, Christian: Die Blockier- und Idealverteilung der größten Bremskraft eines Fahrzeugs. ATZ, 57. Jahrgang (1955), S. 235–237
[3] Riekert, P. und T. E. Schunck: Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs. Ingenieur Archiv, 11. Band (1941), S. 210
[4] Hörz, E.: Anforderungen an eine Bremskraftregelung von Personenwagen. ATZ, 71. Jahrgang (1969), Heft 6, S. 189–193 und Heft 7, S. 238–244
[5] WS: Aerodynamik. Motorrad, Heft 24 (1992), S. 69

7 Ampelphasen

Bei Unfällen auf Kreuzungen mit Lichtzeichenanlagen machen die Beteiligten nachträglich recht häufig die Freigabe durch grünes Licht jeweils für ihre Fahrtrichtung geltend. Bei der Unfallrekonstruktion kann deshalb die Einbeziehung der Schaltphasen in den zeitlichen Ablauf des Unfallgeschehens notwendig werden. Zusätzlich zu einem Übersichtsplan der Kreuzung, in dem die Standorte der verschiedenen Ampeln eingetragen sind, muss noch der Signalzeitenplan der betreffenden Lichtzeichenanlage vorliegen, aus dem die zeitliche gegenseitige Abhängigkeit der einzelnen Lichtzeichen zu ersehen ist. Eine zeitlich absolute Zuordnung der Schaltphasen zum Kollisionszeitpunkt ist nicht möglich.

Lichtsignalanlagen (LSA), auch als Lichtzeichenanlagen (LZA) bezeichnet, sind Verkehrseinrichtungen im Sinn der Straßenverkehrsordnung (StVO). Sie werden dort aufgestellt, wo der Verkehrsfluss ohne LSA nicht mehr ausreichend flüssig oder sicher ist.

Grundsätzlich gibt es zwei Typen von Steuerungsmodellen.

- Typ A Die zeitplanabhängige Signalsteuerung
- Typ B Die verkehrsabhängige Signalsteuerung

Typ A arbeitet nach einem festen Signalzeitenplan, d. h., alle Lichtzeichen leuchten mit gleichem zeitlichen Abstand und in gleicher Reihenfolge erneut auf. Variationsmöglichkeiten bestehen allerdings darin, dass für einen Zeitraum von 24 Stunden nacheinander mehrere Signalzeitenpläne gültig sein können. Es ist daher wichtig, bei der Anforderung und auch der Auswertung von Signalzeitenplanen auf die Gültigkeit zum Unfallzeitpunkt zu achten.

Merkmal der zeitplangesteuerten LSA sind feste Umlaufzeiten.

Bei Typ B wird die LSA von den eintreffenden Verkehrsströmen gesteuert. Als einfachstes Beispiel sei hier die Fussgängerampel per Knopfdruck genannt.

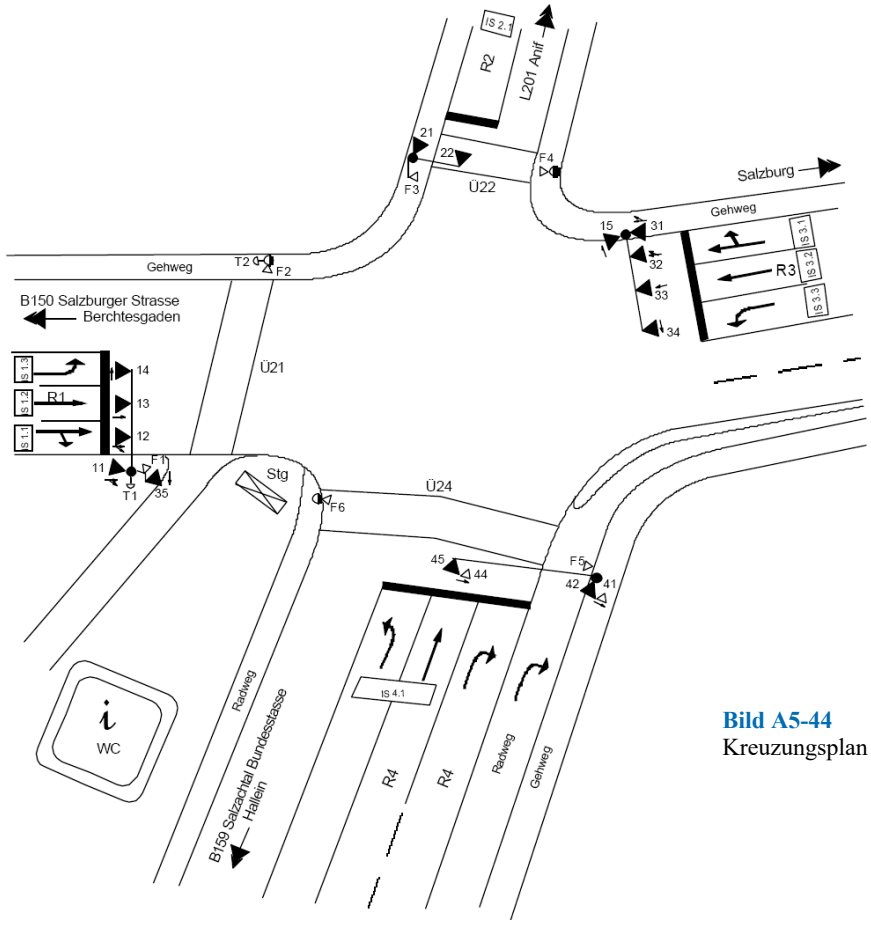


Bild A5-44
Kreuzungsplan

Bild A5-44 zeigt einen typischen Übersichtsplan einer ampelgeregelten Kreuzung. Die einzelnen Fahrtrichtungen sind mit R1 bis R4 bezeichnet. Im Signalzeitenplan (**Bild A5-45**) sind die Phasenschaltungen zu diesen Richtungen eingetragen. In Fahrtrichtung R1 gibt es hier eine eigene Ampel für Linksabbieger, diese wird im Plan mit R1l bezeichnet. Die Ampeln für die Geradeausrichtung und für Rechtsabbieger sind in diesem Beispiel gleichgeschaltet. Die betreffenden Signalzeiten tragen die Bezeichnung R1gr.

Die Signalzeiten für die Fußgängerübergänge und deren Ampeln werden in diesem Plan mit Ü21, Ü22, Ü24 bezeichnet. Die Bezeichnungen sind nicht überall einheitlich, halten sich aber an ein ähnliches Muster. Moderne Signalanlagen besitzen eine so genannte „Doppelgrünsperre“. Das heißt, es wird dadurch verhindert, dass in zwei einander kreuzenden Fahrtrichtungen gleichzeitig Grünphase herrscht. Die Gesamtdauer aller Phasen wird üblicherweise als Umlaufdauer bezeichnet. Im folgenden Beispiel beträgt diese 80 s.

Im Phasendiagramm schreitet die Zeit von links nach rechts fort. So kann z. B. entnommen werden, dass 3 s nach dem Beginn der Gelbphase und 1 s vor deren Ende der Geradeaus- und Rechtsabbiegeampel R1gr die Linksabbiegeampel R1l die Phase Rot/Gelb bekommt. Im bereits fertig gestellten Weg-Zeit-Diagramm kann jetzt der Versuch unternommen werden, eine zeitliche Zuordnung der Schaltphasen zum Unfallablauf zu finden. Dazu wird die folgende Methode vorgeschlagen:

Der relevante Bereich der Phasen wird für die betreffende Fahrtrichtung auf einen Folien- bzw. Transparentpapierstreifen gezeichnet. Dabei muss der Zeitmassstab des Streifens dem des Weg-Zeit-Diagramms entsprechen. Nun wird jeder Streifen entlang der Zeitachse des Diagramms verschoben, wobei die Streifen entsprechend dem Phasenplan zu synchronisieren sind. Eventuell vorhandene Zeugenaussagen müssen sind in diese Überlegung einzubeziehen. Insbesondere sind diejenigen Konstellationen auf Wahrscheinlichkeit zu überprüfen, die jeweils für den einen der beiden Fahrer als belastend auszulegen sind.

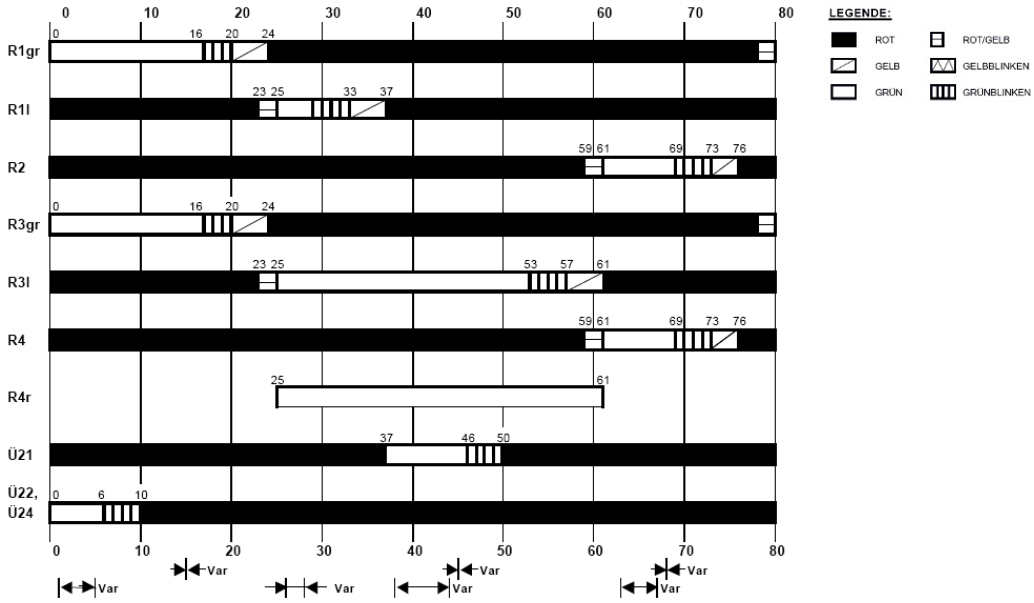


Bild A5-45 Ampelphasendiagramm

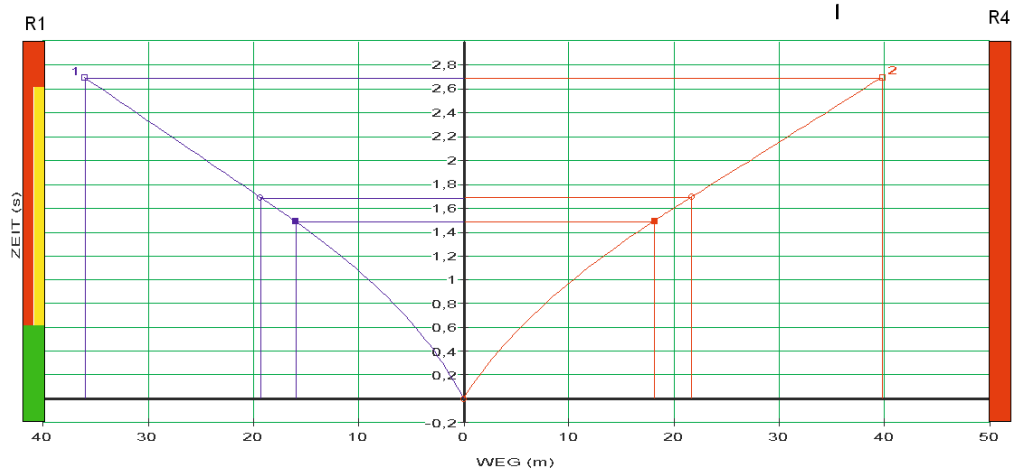


Bild A5-46 Weg-Zeit-Diagramm mit Ampelphasen

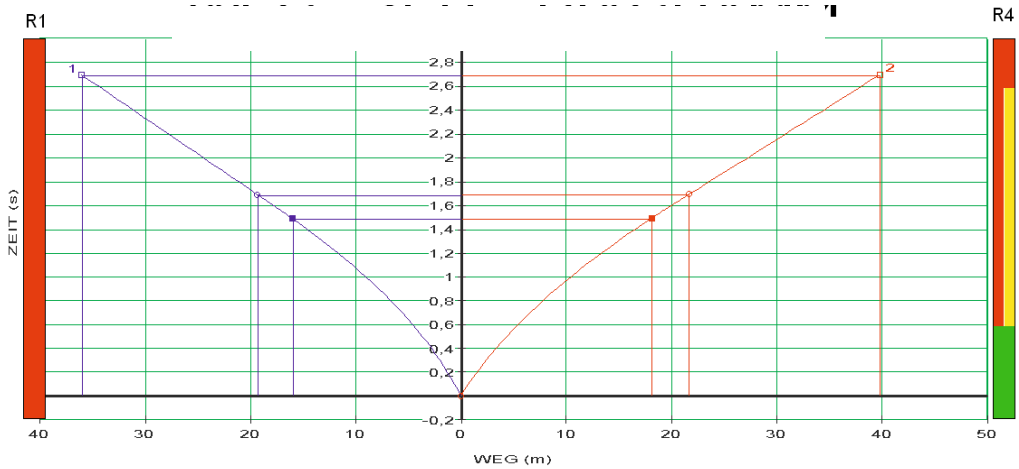


Bild A5-47 Weg-Zeit-Diagramm mit Ampelphasen

8 Radkontaktspuren

Dr. Klaus-Dieter Brösdorf

8.1 Allgemein

Radkontaktspuren liefern für die Rekonstruktion von realen Verkehrsunfällen wertvolle Hinweise auf den Geschehensablauf, sind aber auch häufig bei manipulierten Schadenfällen festzustellen. Radkontaktspuren sind Spuren aus Relativbewegungen an Fahrzeugen bzw. Kollisionsobjekten (gestreiftes Fahrzeug bzw. gestreiftes Kollisionsobjekt) aus Kontakten mit einem Rad des Verursacherfahrzeugs (streifendes Fahrzeug), hier meist einem Vorderrad. Kontakte an einem Fahrzeug bzw. Kollisionsobjekt mit mehreren Rädern des streifenden Fahrzeugs sind auch möglich. Mit **Bild A5-48** bis **Bild A5-51** wird die rechte Seite eines Audi A6 gezeigt, der von einem Lkw, welcher auf der Autobahn von der rechten auf die linke Fahrspur gewechselt ist, über einen längeren Zeitraum zwischen Lkw und Mittelleitplanke eingeklemmt wurde.



Bild A5-48 Schadenumfang am Audi A6

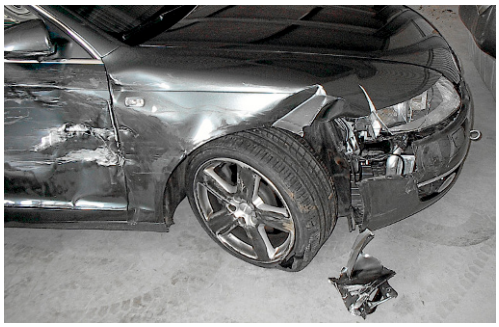


Bild A5-49 Schadenumfang am Audi A6



Bild A5-50 Schadenumfang am Audi A6



Bild A5-51 Schadenumfang am Audi A6

Radkontaktspuren über ganze bzw. wesentliche Abschnitte von Fahrzeugseiten (**Bild A5-52** bis **Bild A5-55**) sind auch häufig bei Schadenfällen mit Manipulationsverdacht festzustellen.

Radkontaktspuren sind einfach anmutende Spurzeichnungen, die jedoch von komplex wirkenden Mechanismen abhängig sind, welche auf der Kinematik der Relativbewegung zwischen dem spurverursachenden Rad und dem Kollisionsobjekt und damit auf Grundlagen der Mechanik basieren. Die korrekte Bewertung von Radkontaktspuren kann erhebliche Probleme bereiten. Parameter für der Bewertung von Radkontaktspuren finden sich in **Tabelle A5.11**.

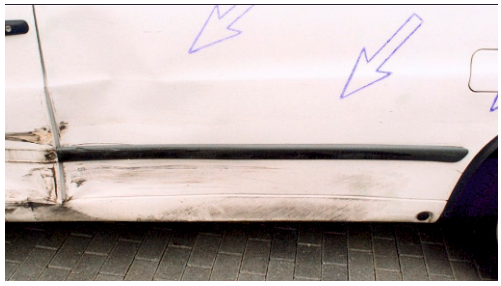


Bild A5-52 Intensive Radkontaktspuren



Bild A5-53 Intensive Radkontaktspuren



Bild A5-54 Intensive Radkontaktspuren



Bild A5-55 Intensive Radkontaktspuren

Tabelle A5.11 Parameter für die Bewertung von Radkontaktspuren

Spuren durch ein sich drehendes Rad		Spuren durch ein stillstehendes Rad
Spuren an der Karosserie des gestreiften Fahrzeugs		Spuren am Rad/den Rädern des gestreiften Fahrzeugs
Fahrzeuge in einer Richtung angeordnet/fahrend		Fahrzeuge in entgegengesetzte Richtungen angeordnet/fahrend
spurzeichnendes Rad angetrieben		spurzeichnendes Rad nicht angetrieben
Spuren aus Dagegenlenken (Kontakt mit dem vorderen äußeren Radbereich)	seitliches Anlegen des Rades (Kontakt des gesamten Rades bzw. wesentlicher Bereiche)	Spuren aus Weglenken (Kontakt mit dem hinteren äußeren Radbereich)
streifendes Fahrzeug steht	beide Fahrzeuge in Bewegung	gestreiftes Fahrzeug steht
spurzeichnendes Rad steht	Räder beider Fahrzeuge nicht in Bewegung	gestreiftes Rad steht
spurzeichnendes Rad in Bewegung	Räder beider Fahrzeuge in Bewegung	gestreiftes Rad in Bewegung
streifendes Fahrzeug schneller als gestreiftes Fahrzeug	beide Fahrzeuge gleich schnell	streifendes Fahrzeug langsamer als gestreiftes Fahrzeug

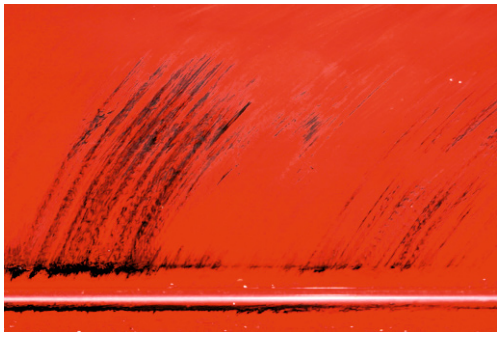


Bild A5-56 Dunkle Fremdmaterialantragungen (Gummimaterial) am gestreiften Fahrzeug

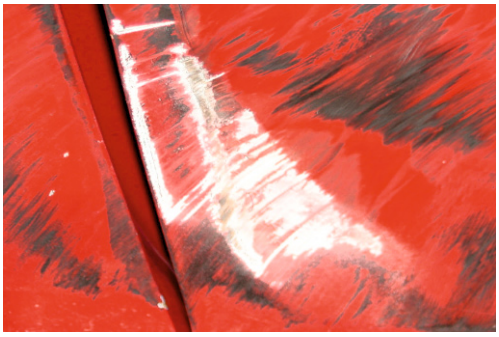


Bild A5-57 Verschürfungen der Oberflächen (Lackmaterialabtragung) am gestreiften Fahrzeug



Bild A5-58 Verwischungen der Schmutzschicht am gestreiften Fahrzeug (Karosserie)



Bild A5-59 Verwischungen der Schmutzschicht am gestreiften Fahrzeug (Reifen)

Infolge der Kontakte mit dem spurverursachenden Rad stellen sich Radkontaktspuren am gestreiften Kollisionsobjekt häufig dar als:

- dunkle Fremdmaterialantragungen (Gummimaterial vom Reifen) (**Bild A5-56**),
- Verschürfungen der Materialoberflächen (Abtragung des Lackmaterials) (**Bild A5-57**) sowie
- Verwischungen von Schmutzschichten (**Bild A5-58** und **Bild A5-59**).

Insbesondere in strukturweichen Karosseriebereichen sind an gestreiften Fahrzeugen häufig auch Deformationen der Karosserie (z. B. Eindrückungen) zu beobachten. Vereinzelt war auch schon festzustellen, dass Radkontaktspuren am gestreiften Fahrzeug von einer Radabdeckung des streifenden Fahrzeugs verursacht wurden. **Bild A5-60** und **Bild A5-61** zeigen die Radkontaktspuren an der linken Seite eines Mercedes-Benz (R170). Mit **Bild A5-62** und **Bild A5-63** werden der Beschädigungsumfang links vorn sowie die Radabdeckung der Stahlfelge vorn links am Kontaktpartner zu dem Mercedes-Benz – einem Volkswagen Golf IV – dargestellt.



Bild A5-60 linke Fahrzeugseite des Mercedes-Benz (gestreiftes Fahrzeug)

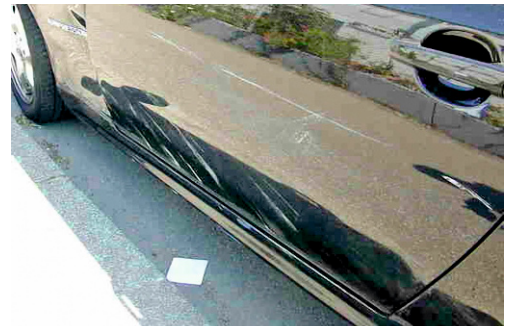


Bild A5-61 Radkontaktspuren an der linken Fahrzeugseite des Mercedes-Benz



Bild A5-62 linke Fahrzeugseite des Volkswagen Golf (streifendes Fahrzeug)



Bild A5-63 Radabdeckung vorn links des Volkswagen Golf (Kontaktpartner)

Auch bei Radkontaktspuren gilt, dass nur Spuren aus **Erstkontakten** für Rückschlüsse auf das Bewegungsverhalten der Kontaktpartner verwendbar sind. Zu prinzipiellen Wirkungsmechanismen von Radkontaktspuren wird in [1] berichtet. Umfassend wurden Radkontaktspuren theoretisch und praktisch in [2] untersucht. Radkontaktspuren sind im Wesentlichen abhängig:

- vom Radius r_S des spurverursachenden Rades sowie der Lage des Kontaktpunktes r_{SZ} am spurverursachenden Rad,

- von der Drehgeschwindigkeit ω_S des spurverursachenden Rades sowie
- vom translatorischen Geschwindigkeitsverhältnis z zwischen den Kontaktpartnern.

Bei Radkontaktspuren an sich in Drehbewegung befindlichen Rädern ist weiterhin bedeutsam:

- der Radius r_G des gestreiften Rades sowie
- die Drehgeschwindigkeit ω_G des gestreiften Rades.

8.2 Einfaches Berechnungsmodell

Mit einer einfachen Modellbildung können die kinematischen Verhältnisse von Radkontaktspuren an Karosserien bzw. ortsfesten Kollisionsobjekten dargestellt werden, wenn sich ein spurzeichnendes Rad bei einer Streifkollision abbildet. Grundlage ist hierzu das mit **Bild A5-64** dargestellte Ersatzmodell mit einem freirollenden Rad mit dem Radius r_S. Die Bewegung des Kontaktpunktes am spurverursachenden Rad relativ zur Kontaktfläche am gestreiften Fahrzeug bzw. Kollisionsobjekt ergibt sich aus nachfolgend dargestellten Zusammenhängen.

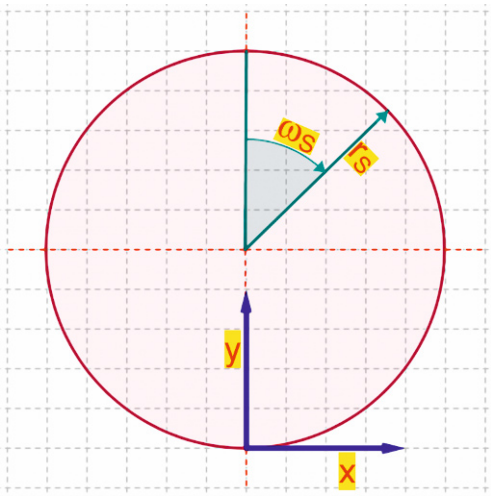


Bild A5-64 Ersatzmodell für Radkontaktspuren

Aus der Drehgeschwindigkeit ω_S des spurverursachenden Rades am streifenden Fahrzeug im Zusammenhang mit dem Radius des spurverursachenden Rades r_S am streifenden Fahrzeug:

$$\omega_S = \frac{v_S}{r_S} \tag{A5-49}$$

und der Geschwindigkeit des gestreiften Fahrzeugs bzw. gestreiften Kollisionsobjektes v_G kann die Bewegungsbahn relativ zum gestreiften Fahrzeug bzw. gestreiften Kollisionsobjekt mit den nachfolgenden Gleichungen berechnet werden:

$$x = r_{SZ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega_S \cdot t\right) + v_S \cdot t - v_G \cdot t \tag{A5-50}$$

$$y = r_{SZ} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega_S \cdot t\right) + r_S \tag{A5-51}$$

Hierbei ist zu beachten, dass der Spurzeichnungsverlauf nur vom Geschwindigkeitsverhältnis z:

$$z = \frac{v_S}{v_g} \tag{A5-52}$$

bestimmt wird. Der Abstand von Kontaktpunkt zum Radmittelpunkt r_{SZ} kann auch kleiner sein als der Radius r_S des spurverursachenden Rades am streifenden Fahrzeug. Somit gilt weiterhin:

$$r_{SZ} \leq r_S \tag{A5-53}$$

Mit **Bild A5-65** bis **Bild A5-73** werden verschiedene Spurzeichnungsverläufe für repräsentative Werte für das Geschwindigkeitsverhältnis z dargestellt, wobei es sich hierbei um idealisierte Kontakte eines Punktes bzw. mehrerer Punkte am Umfang des spurzeichnenden Rades bei einer parallelen Anordnung des spurzeichnenden Rades zu einer Ebene handelt.

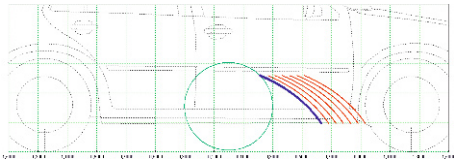
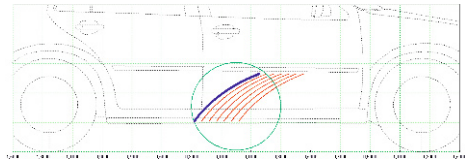
$z \to \infty$	– streifendes und gestreiftes Fahrzeug haben gleiche Richtungen – das gestreifte Fahrzeug steht
gegen das gestreifte Fahrzeug gelenktes Rad	vom gestreiften Fahrzeug weg gelenktes Rad
	

Bild A5-65 Spurenverlauf bei $z \to \infty$ ($v_G = 0$ und $v_S > 0$)

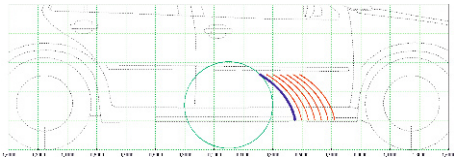
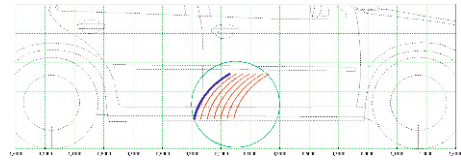
$1 < z < \infty$	– streifendes und gestreiftes Fahrzeug haben gleiche Richtungen – das streifende Fahrzeug ist schneller als das gestreifte Fahrzeug
gegen das gestreifte Fahrzeug gelenktes Rad ($z = 2$)	vom gestreiften Fahrzeug weg gelenktes Rad ($z = 2$)
	

Bild A5-66 Spurenverlauf bei $z = 2$

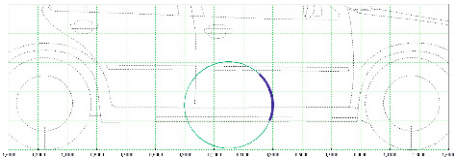
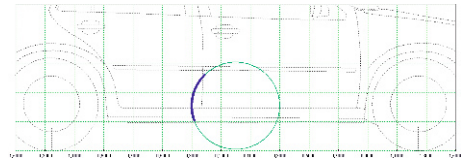
$z = 1$	– streifendes und gestreiftes Fahrzeug haben gleiche Richtungen – beide Fahrzeuge haben die gleiche Geschwindigkeit
gegen das gestreifte Fahrzeug gelenktes Rad	vom gestreiften Fahrzeug weg gelenktes Rad
	

Bild A5-67 Spurenverlauf bei $z = 1$

$0 < z < 1$	– streifendes und gestreiftes Fahrzeug haben gleiche Richtungen – das streifende Fahrzeug ist langsamer als das gestreifte Fahrzeug

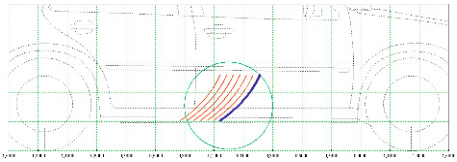
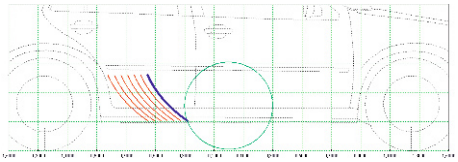
gegen das gestreifte Fahrzeug gelenktes Rad ($z = 0{,}5$)	vom gestreiften Fahrzeug weg gelenktes Rad ($z = 0{,}5$)
	

Bild A5-68 Spurenverlauf bei $z = 0{,}5$

$z = 0$	– streifendes und gestreiftes Fahrzeug haben die gleiche Richtung bzw. entgegengesetzte Richtungen – das streifende Fahrzeug steht oder das spurzeichnende Rad ist blockiert

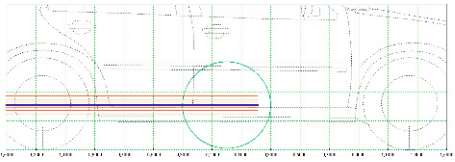


Bild A5-69 Spurenverlauf bei $z = 0$

$-1 < z < 0$	– streifendes/gestreiftes Fahrzeug haben entgegengesetzte Richtungen – das streifende Fahrzeug ist langsamer als das gestreifte Fahrzeug

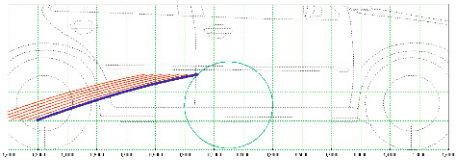
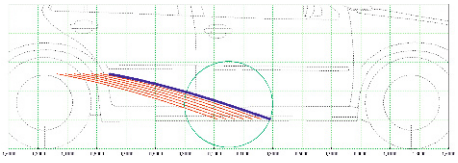
gegen das gestreifte Fahrzeug gelenktes Rad ($z = -0{,}5$)	vom gestreiften Fahrzeug weg gelenktes Rad ($z = -0{,}5$)
	

Bild A5-70 Spurenverlauf bei $z = -0{,}5$

$z = -1$	– streifendes/gestreiftes Fahrzeug haben entgegengesetzte Richtungen – beide Fahrzeuge haben vom Betrag her die gleiche Geschwindigkeit

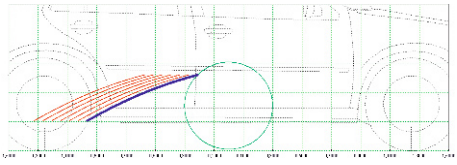
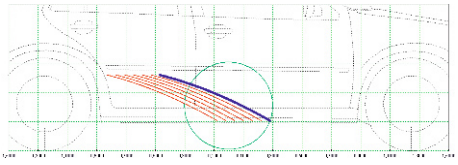
gegen das gestreifte Fahrzeug gelenktes Rad	vom gestreiften Fahrzeug weg gelenktes Rad
	

Bild A5-71 Spurenverlauf bei $z = -1$

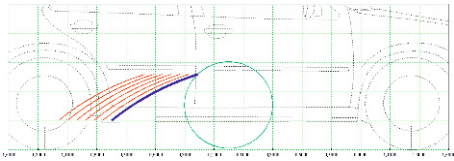
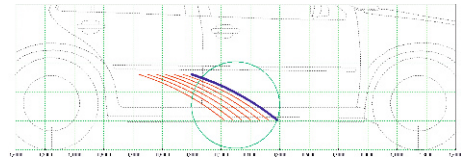
$-\infty < z < -1$	– streifendes/gestreiftes Fahrzeug haben entgegengesetzte Richtungen – das streifende Fahrzeug ist schneller als das gestreifte Fahrzeug
gegen das gestreifte Fahrzeug gelenktes Rad ($z = -2$)	vom gestreiften Fahrzeug weg gelenktes Rad ($z = -2$)
	

Bild A5-72 Spurenverlauf bei $z = -2$

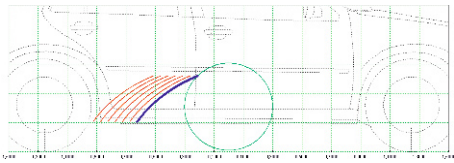
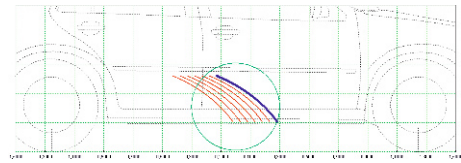
$z \rightarrow -\infty$	– streifendes/gestreiftes Fahrzeug haben entgegengesetzte Richtungen – das gestreifte Fahrzeug steht
gegen das gestreifte Fahrzeug gelenktes Rad	vom gestreiften Fahrzeug weg gelenktes Rad
	

Bild A5-73 Spurenverlauf bei $z \rightarrow -\infty$ ($v_G = 0$ und $v_S < 0$)

Im realen Kollisionsgeschehen können die Spurenlagen am gestreiften Kollisionsobjekt von einer Reihe weiterer Faktoren beeinflusst werden. Hierbei handelt es sich sowohl um konstruktive Eigenschaften der kontaktierenden Fahrzeugteile, als auch um fahr- und kollisionsdynamische Prozesse, wie beispielsweise:

- Geschwindigkeitsänderungen der Fahrzeuge (translatorische Geschwindigkeit),
- Schlupf am spurzeichnenden Rad (Beschleunigungs- und Verzögerungsschlupf),
- Lenkeinschlag (Winkel zwischen Radebene und Kontaktfläche),
- konstruktive Besonderheiten am spurverursachenden Rad (Reifen, Felge, Radabdeckung),
- Reifendeformation am spurzeichnenden Rad,
- Formgebung und Struktursteifigkeiten der Karosserie des gestreiften Fahrzeugs sowie
- Karosseriebewegungen (Wank- und Nickbewegungen sowie seitliches Federn).

Jeder einzelne Einflussfaktor lässt sich grundsätzlich auch theoretisch für Berechnungen erfassen. Neben theoretischen Betrachtungen wird in der Literatur auch von Fahrversuchen berichtet [2, 3, 4, 5, 6, 7], wobei die wesentliche Einflussgröße das Geschwindigkeitsverhältnis z bleibt, sofern vorgenannte Einflussfaktoren nicht dominieren.

8.3 Erweitertes Berechnungsmodell

Mit Hilfe des erweiterten Berechnungsmodells können sowohl Radkontaktspuren des streifenden Rades auf der Karosserie des gestreiften Fahrzeugs als auch Radkontaktspuren auf den Rädern des gestreiften Fahrzeugs berechnet werden. In der Berechnung werden verschiedene Koordinatensysteme verwendet (**Bild A5-74**). Der zeichnende Punkt am Rad des streifenden

Fahrzeugs wird vom Rad- über das Fahrzeugkoordinatensystem des streifenden Fahrzeugs in das globale Koordinatensystem transformiert und anschliessend in das Fahrzeugkoordinatensystem (für Spuren auf der Karosserie) bzw. Radkoordinatensystem (für Spuren auf dem Rad) des gestreiften Fahrzeugs transformiert. Die Berechnungsgrundlagen sind wie folgt:

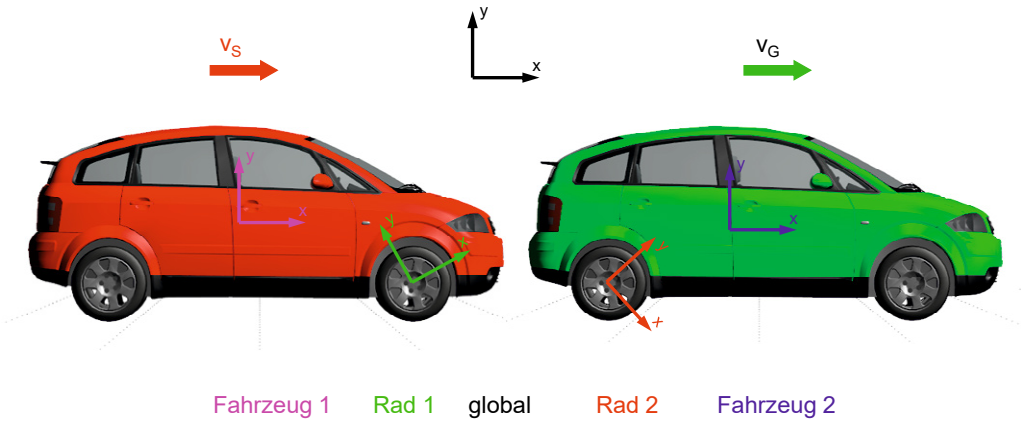


Bild A5-74 Koordinatensysteme

$$z = \frac{v_S}{v_G} \tag{A5-54}$$

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{A5-55}$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_Z) & -\sin(\varphi_Z) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_Z) & \cos(\varphi_Z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{A5-56}$$

$$P_{Kontakt} = r_{Kontakt} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\varphi_{Start}) \\ \sin(\varphi_{Start}) \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{A5-57}$$

$$\omega = \frac{v}{r_{Rad}} \tag{A5-58}$$

$$\varphi = \omega \cdot t \tag{A5-59}$$

$$s = v \cdot t \tag{A5-60}$$

$$P_{\text{ZeichnungRad}} = \left(R_{G\text{Rad}}^{-1} \cdot T_{G\text{Rad}}^{-1} \cdot T_G^{-1} \cdot T_S \cdot T_{S\text{Rad}} \cdot R_{S\text{Rad}} \right) \cdot P_{\text{Kontakt}} \tag{A5-61}$$

$$P_{\text{ZeichnungKarosserie}} = \left(T_G^{-1} \cdot T_S \cdot T_{S\text{Rad}} \cdot R_{S\text{Rad}} \right) \cdot P_{\text{Kontakt}} \tag{A5-62}$$

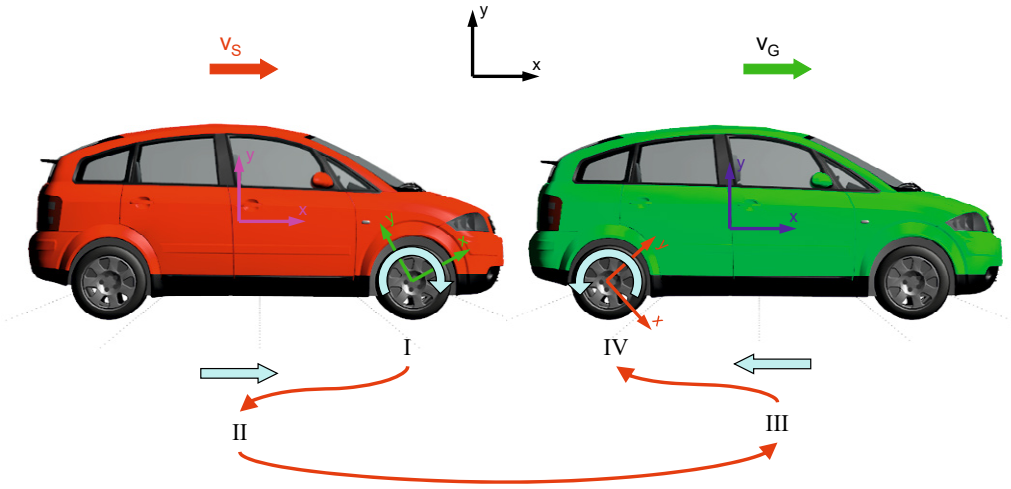


Bild A5-75 Transformation vom Radkoordinatensystem des streifenden Fahrzeugs in die Koordinatensysteme des gestreiften Fahrzeugs

8.4 Beispiele zu Radkontaktspuren

Nachfolgend werden einige Beispiele zu interessanten Spurenlagen in Bezug auf Radkontaktspuren gezeigt. Im Rahmen eines Schadenfalles wurde ein geparkter BMW Z3 an seiner linken Seite von einem Opel Vectra B kontaktiert, da die Fahrzeugführerin des Opel Vectra B aufgrund eines vor ihrem Fahrzeug abbiegenden Mofas habe nach rechts ausweichen müssen.

Der als ereignisbedingt deklarierte Beschädigungsumfang an der linken Fahrzeugseite des BMW Z3 wird mit **Bild A5-76** bis **Bild A5-79** gezeigt. Hierbei waren insbesondere die etwa auf Höhe des Türgriffs bzw. des seitlichen Herstelleremblems über wesentliche Abschnitte der linken Fahrzeugseite verlaufenden dunklen Fremdmaterialantragungen von Bedeutung.

Bei einer statischen Gegenüberstellung zeigte der Opel Vectra B (**Bild A5-80** und **Bild A5-81**) an seiner rechten Fahrzeugseite keine Kontaktmerkmale, mit denen die dunklen Fremdmaterialantragungen am BMW Z3 nachvollziehbar erklärt werden könnten. Aus der Struktur der dunklen Fremdmaterialantragungen am BMW Z3 war zu schließen, dass es sich um Spurenlagen aus Kontakten mit den rechten Rädern des Opel Vectra B handelt, insbesondere des rechten Vorderrades. **Bild A5-82** bis **Bild A5-85** zeigen Bildüberlagerungen, mit denen repräsentative, zeitlich aufeinanderfolgende Situationen des Kontaktverlaufs untersucht wurden.

Damit waren bereits anhand theoretischer Überlegungen im zweidimensionalen Bereich die dunklen Fremdmaterialantragungen an der linken Seite des BMW durchaus als Radkontaktspuren interpretierbar. Die Bildüberlagerungen zeigen, dass die Spurenlagen an beiden Fahrzeugen

eine gegenseitige Zuordnung gesamtheitlich erlaubten, demzufolge keine signifikanten Widersprüche bezüglich der Kompatibilität der Schäden vorliegen. Dass das Aufsteigen eines Pkw an einem anderen Pkw im Zuge seitlicher Kollisionen technisch nachvollziehbar ist, zeigen entsprechende Versuche. Bei einem Versuch zur Untersuchung von Radkontaktspuren an gestreiften Fahrzeugen wurde ein Audi 80 vor und auch während der Streifkollision in Richtung eines Volkswagen Jetta gelenkt [3].



Bild A5-76 Spurenlage an der linken Fahrzeugseite des BMW Z3



Bild A5-77 Spurenlage an der linken Fahrzeugseite des BMW Z3



Bild A5-78 Spurenlage an der linken Fahrzeugseite des BMW Z3



Bild A5-79 Spurenlage an der linken Fahrzeugseite des BMW Z3

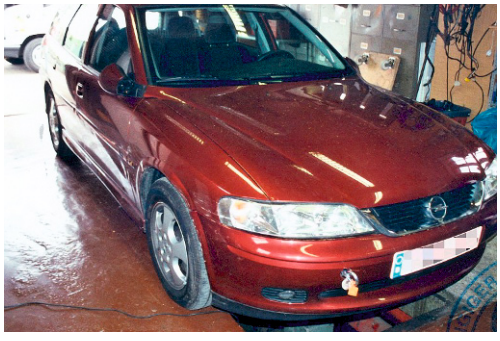


Bild A5-80 Spurenlage am Opel Vectra



Bild A5-81 Spurenlage am Opel Vectra



Bild A5-82 Bildüberlagerung für erste Kontakte zwischen rechtem Vorderrad am Opel Vectra und hinterem Stoßfänger/linkem Hinterrad des BMW

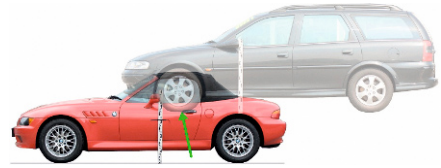


Bild A5-83 Bildüberlagerung für Kontakte zwischen rechtem Vorderrad am Opel Vectra und der linken Tür des BMW



Bild A5-84 Bildüberlagerung für Kontakte zwischen dem rechten Vorderrad am Opel Vectra und dem Kotflügel links vorn des BMW



Bild A5-85 Bildüberlagerung für letzte Kontakte zwischen Opel Vectra und BMW mit nahezu übereinstimmenden statischen Höhenlagen

Mit der Bildserie in **Bild A5-86** wird der Ablauf dieser Streifkollision gezeigt. Infolge von Kontakten zwischen dem linken Vorderrad des Audi 80 und dem rechten Vorderrad des Volkswagen Jetta kam es zum Aufsteigen des Audi 80 (streifendes Fahrzeug) an dem Volkswagen Jetta (gestreiftes Fahrzeug).



Bild A5-86 Versuch zu Radkontaktspuren mit Aufsteigen des streifenden Fahrzeugs

Weitere Beispiele zum Aufsteigen eines Pkw an einem anderen Pkw zeigen Veröffentlichungen zu Unfällen in diversen Internetforen, beispielsweise **Bild A5-87** und **Bild A5-88** [8].



Bild A5-87 Unfall mit Aufsteigen eines Pkw



Bild A5-88 Unfall mit Aufsteigen eines Pkw

Im Rahmen eines weiteren Schadenfalles soll die Fahrzeugführerin eines Volkswagen Polo zu eng an einem geparkten Ford Focus vorbeigefahren sein. Hierbei sei es über nahezu die gesamte linke Fahrzeugseite des Ford Focus zu streifenden Kontakten gekommen. An nahezu der gesamten linken Fahrzeugseite des Ford Focus befanden sich ausgeprägte Radkontaktspuren. **Bild A5-89** und **Bild A5-90** zeigen hierzu zwei repräsentative Abschnitte.



Bild A5-89 Radkontaktspuren am Ford Focus



Bild A5-90 Radkontaktspuren am Ford Focus

Im ersten Schritt wurde untersucht, ob die Schäden an der linken Seite des Ford Focus prinzipiell aus Kontakten mit dem Volkswagen Polo resultieren können. Da der Volkswagen Polo nicht mehr besichtigt werden konnte, wurde für die technischen Betrachtungen auf ein hinreichend baugleiches Fahrzeug zurückgegriffen [9]. Bei den Betrachtungen zur Schadenzuordnung zeigte sich schnell, dass die Beschädigungen am Ford Focus durchaus aus streifenden Kontakten mit einem Volkswagen Polo resultieren konnten. Ob diese tatsächlich von dem angegebenen Volkswagen Polo verursacht wurden, konnte nicht gesichert bestätigt werden, da zu der Spurenlage am Volkswagen Polo verwertbaren Informationen nicht vorlagen. Allein die Angaben der Beteiligten, dass das Fahrzeug im vorderen Abschnitt der rechten Fahrzeugseite beschädigt gewesen sein soll, konnte für detaillierte Spurenzuordnungen keine hinreichende Basis sein. **Bild A5-91** und **Bild A5-92** zeigen zwei repräsentative Bildüberlagerungen. Für Untersuchungen von Streifkollisionen ist die Darstellung mehrerer repräsentativer, gemäß dem Kollisionsablauf zeitlich aufeinanderfolgender Anstoßanordnungen empfehlenswert.



Bild A5-91 Bildüberlagerung zur Untersuchung der Kompatibilität der Spurenlagen

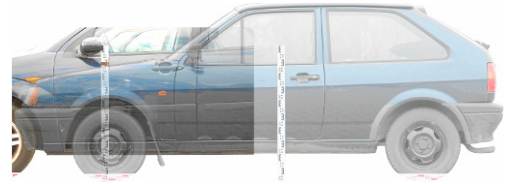


Bild A5-92 Bildüberlagerung zur Untersuchung der Kompatibilität der Spurenlagen

In einem weiteren Schritt wurden die Radkontaktspuren an der linken Seite des Ford Focus untersucht. Repräsentativ zeigt hierzu **Bild A5-93** eine Bildüberlagerung zu den Radkontaktspuren im vorderen Abschnitt der Tür links vorn des Ford Focus unterhalb der Stoßleiste. Die Abbildungen wurden mittels Tonwertkorrektur bzw. Kontrast bearbeitet, um die Aussagefähigkeit zu verbessern. Aus der Spurenkrümmung ist abzuleiten, dass die Radkontaktspuren am Ford Focus vom vorderen Abschnitt des rechten Vorderrades am Volkswagen Polo bei einer – bezogen auf den Ford Focus – von hinten nach vorn gerichteten Streifkollision verursacht wurden (**Bild A5-93** – rote Kreismarkierung). Der nahezu übereinstimmend kreisbogenförmige Verlauf der Radkontaktspuren am Ford Focus (**Bild A5-94** – blaue Pfeilmarkierung) und die geometrische Form der Bereifung des Volkswagen Polo im Schulterbereich (**Bild A5-94** – rote Pfeilmarkierung) weist auf ein (durch-)drehendes rechtes Vorderrad am Volkswagen Polo hin, ohne dass dieses Fahrzeug bei stehendem Ford Focus eine wesentliche Eigengeschwindigkeit hatte.

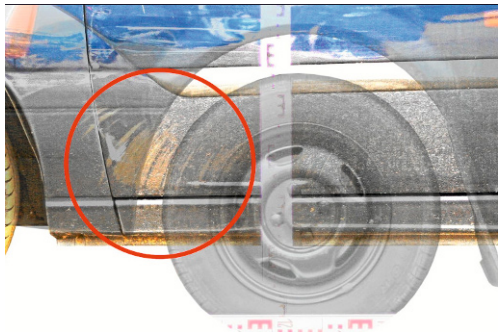


Bild A5-93 Bildüberlagerung zur Untersuchung der Radkontaktspuren am Ford Focus

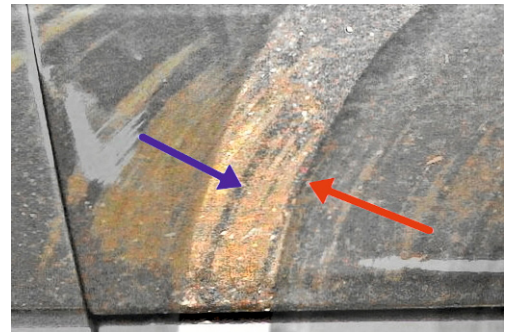


Bild A5-94 Ausschnitt aus **Bild A5-93**

Zur Bewertung von Schadenbildern an kollisionsbeteiligten Fahrzeugen bzw. Kollisionsobjekten können im Weiteren Spurenlagen herangezogen werden, die bei Versuchen festgestellt wurden. **Bild A5-95** zeigt Radkontaktspuren an der rechten Fahrzeugseite eines Volkswagen Jetta (gestreiftes Fahrzeug) bei dem in **Bild A5-86** dargestellten Versuch. Bei diesem Versuch hat der Fahrer des Audi 80 (streifendes Fahrzeug) vor und auch noch während der Streifkollision in Richtung des stehenden Volkswagen Jetta gelenkt. In Ergänzung hierzu zeigt **Bild A5-96** die Spurenlage an einem unfallbeschädigten Fahrzeug (gestreiftes Fahrzeug). Die abgebildete Spurenlage resultiert aus Kontakten mit dem hinteren Abschnitt des Vorderrades am streifenden Fahrzeug. Diese Spurzeichnung kann auf Weglenken hinweisen. Diese Bewertungen sind aber nur dann zulässig, wenn die Spurenlagen räumlich und/oder zeitlich getrennt werden können. Bei massiven Spurüberlagerungen sind eindeutige Bewertungen meist nicht möglich.

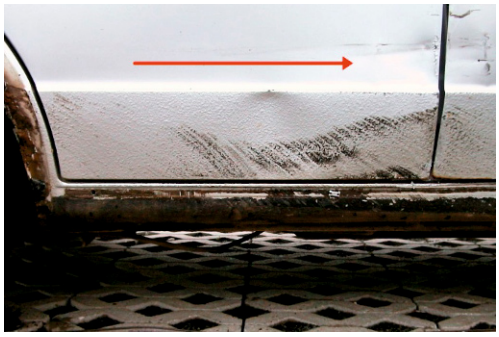


Bild A5-95 Spurenlage am Versuchsfahrzeug mit eingezeichneter Schadeneintragrichtung (gestreiftes Fahrzeug)

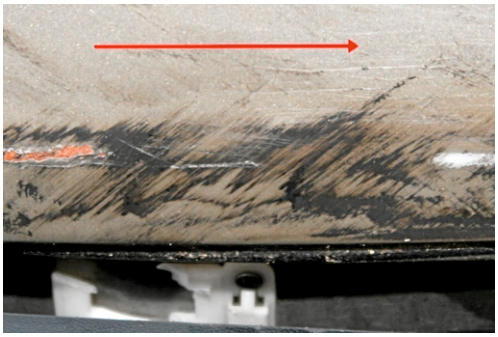


Bild A5-96 Radkontaktspuren aus Kontakten mit dem hinteren Abschnitt am spurzeichnenden Rad mit Schadeneintragrichtung (gestreiftes Fahrzeug)

Bei einem Vergleich der Radkontaktspuren am Ford Focus in vorstehendem Beispiel und den Radkontaktspuren aus dem Versuch an der rechten Seite des Volkswagen Jetta sind deutliche Differenzen erkennbar. In einem weiteren Versuch wurde untersucht, auf welche Weise Radkontaktspuren – wie am Ford Focus zu sehen – erzeugt werden können (**Bild A5-97**) [3].



Bild A5-97 Versuch zu Radkontaktspuren mit durchdrehendem Kontaktrad vorn rechts am Audi 80

Durch Betätigen des Gaspedals, der Kupplung und der Lenkung in geeigneter Kombination wurde das rechte Vorderrad des aus dem Stillstand anfahrenden Audi 80 am Durchdrehen gehalten, wobei die translatorische Geschwindigkeit des Audi 80 relativ zum Volkswagen Jetta gering war. **Bild A5-98** und **Bild A5-99** zeigen die Spuren an der linken Seite des Volkswagen Jetta (dunkle/entsprechend orientierte Fremdmaterialantragungen und Verschürfungen).



Bild A5-98 Spurenlage am Versuchsfahrzeug (gestreiftes Fahrzeug)



Bild A5-99 Spurenlage am Versuchsfahrzeug (gestreiftes Fahrzeug)

Bei einem weiteren Schadenfall soll der Spurwechsel eines Volkswagen Golf V (**Bild A5-100** und **Bild A5-101**) eine Kollision zwischen der linken Fahrzeugseite des Volkswagen Golf V und der rechten Seite eines BMW (Baureihe E39, **Bild A5-102** und **Bild A5-103**) initiiert haben, wodurch der BMW noch gegen die linksseitig befindliche Leitplanke gekommen sei.



Bild A5-100 Spurenlage an der linken Fahrzeugseite des Volkswagen Golf V



Bild A5-101 Ausschnitt aus **Bild A5-100**

Sowohl an der linken Fahrzeugseite des Volkswagen Golf V (**Bild A5-101**) als auch an der rechten Fahrzeugseite des BMW (**Bild A5-103**) finden sich jeweils näherungsweise kreisrunde Kontaktspuren, wobei an dem BMW zwei ganz ähnliche Spurengruppen kurz hintereinander vorhanden sind (**Bild A5-103** – rote Kreismarkierungen). Die deutlichen Rotationsspuren weisen darauf hin, dass die beiden beteiligten Fahrzeuge im Kontaktzeitraum in Bewegung waren, wobei zu den Absolutgeschwindigkeiten der Fahrzeuge keine Aussage getroffen werden kann. Im Weiteren weisen diese Radkontaktspuren darauf hin, dass die beiden beteiligten Fahrzeuge bei annähernd gleichen Geschwindigkeiten sowie sehr kleinem Winkel zwischen den Fahrzeuglängsachsen in Kontakt kamen. Die beiden getrennten, aber räumlich eng beieinander liegenden Spurenlagen am BMW lassen auf mindestens zwei separate Kontaktereignisse mit jeweils näherungsweise übereinstimmenden Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge schließen.



Bild A5-102 Spurenlage an der rechten Fahrzeugseite des BMW

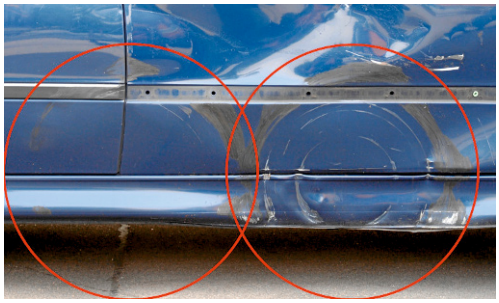


Bild A5-103 Ausschnitt aus **Bild A5-102**

Für die Untersuchung und Bewertung von Radkontaktspuren stehen verschiedene Berechnungsprogramme zur Verfügung. Auf die Bewertung von Radkontaktspuren speziell zugeschnittene Anwendungen ermöglichen eine wesentlich einfachere Verknüpfung von Bildmaterial zu den Spurenlagen mit den Ergebnissen der rechnerischen Betrachtungen. **Bild A5-104** zeigt die Nachrechnung eines Versuchs sowohl zu den Radkontaktspuren an der Karosserie als auch zu denen an dem sich in Drehbewegung befindlichen Rad des gestreiften Fahrzeugs [10].

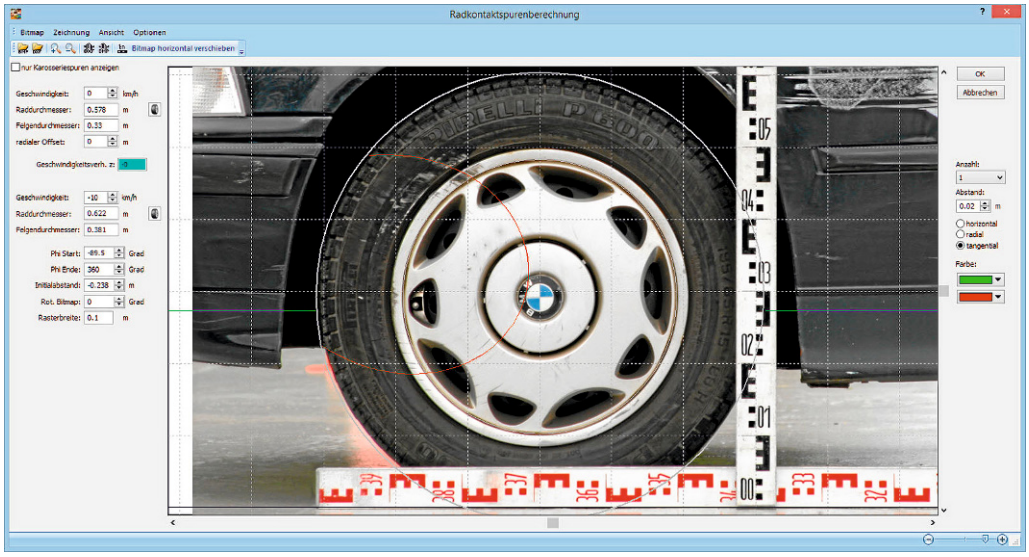


Bild A5-104 Nachrechnung eines Versuchs [10]

Ergebnis bei der Anwendung von Berechnungsprogrammen zu Radkontaktspuren ist allein das Geschwindigkeitsverhältnis z, nicht jedoch die Absolutgeschwindigkeiten der Fahrzeuge. Eine Aussage zu den Absolutgeschwindigkeiten ist nur dann möglich, wenn gesicherte Informationen zur Geschwindigkeit eines der beiden beteiligten Fahrzeuge vorliegen. Außer bei ortsfesten Kollisionsobjekten kann von Seiten des Technikers anhand von Radkontaktspuren im entsprechenden Einzelfall nur abgeleitet werden, dass die Geschwindigkeit eines gestreiften Fahrzeugs

unterhalb von 3 ... 5 km/h gelegen hat. Der Nachweis, dass ein gestreiftes Fahrzeug im Zeitraum der Kollision tatsächlich gestanden hat, ist allein aus technischer Sicht nicht zu führen.

Bei der Anfertigung des Bildmaterials für die rechnerischen Betrachtungen gelten die gleichen Anforderungen an die Qualität wie bei der Anfertigung von Bildmaterial mit angelegtem Maßstab für Bildüberlagerungen (siehe hierzu auch das Kapitel A2, Gliederungspunkt 7.2.6 „Abbildungen mit Maßstab“). Für die Anwendung des Radkontaktspurenmodells sind nur Abbildungen in Orthogonalansicht geeignet. Abweichungen hiervon führen zu signifikanten Fehlern bei der Bewertung von Radkontaktspuren. In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass eine zweidimensionale „Entzerrung“ von schräg – deutlich abweichend von der Orthogonalansicht – aufgenommenem Bildmaterial mittels Bildbearbeitungsprogrammen bzw. 2-D-Photogrammetrieprogrammen nicht zu einer geeigneten Orthogonalansicht führt. Von einer solchen Vorgehensweise muss eindringlich abgeraten werden [11].

In einem Schadenfall stand das in **Bild A5-61** gezeigte Fahrzeug für eine Besichtigung zur Anfertigung von Orthogonalbildmaterial nicht mehr zur Verfügung. Vorliegendes **Bild A5-61** kann aber aufgrund signifikanter Abweichungen vom Anforderungsprofil an die Bildfertigung in dieser Form nicht im Radkontaktspurenmodell weiterverarbeitet werden. Mittels Bildbearbeitungsprogramm kann diese Abbildung auch nicht in eine Orthogonalansicht transformiert werden (**Bild A5-105**). Deutlich wird dies mit **Bild A5-106**, welches eine Bildüberlagerung der nicht korrekt entzerrten Fahrzeugtür und einer Orthogonalansicht eines vergleichbaren Fahrzeugs zeigt (Bildausschnitt ohne Maßstab dargestellt). Mit diesen Abbildungen ist daher keine korrekte Bewertung der Radkontaktspuren der Radkontaktspuren möglich.



Bild A5-105 nicht korrekt entzerrte Spurenlage

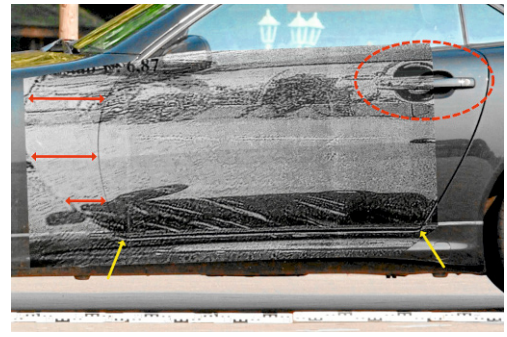


Bild A5-106 Bildüberlagerung von nicht korrekt entzerrter Spurenlage und Orthogonalansicht eines hinreichend vergleichbaren Fahrzeugs

Eine technische Möglichkeit besteht darin, von einem hinreichend baugleichen Fahrzeug mittels 3-D-Photogrammetrie ein dreidimensionales Modell anzufertigen, das Foto von der Spurenlage (**Bild A5-61**) im Modell zu orientieren, die Fototextur aus dem Foto von der Spurenlage zu extrahieren und in das dreidimensionale Modell einzubinden – dies auch partiell – und abschließend eine Orthogonalansicht in Parallelprojektion (**Bild A5-107**) in verschiedenen Abbildungsformaten zu exportieren. Ausführlich wird dieses Verfahren in [11] beschrieben.

Bild A5-108 zeigt eine Bildüberlagerung der korrekt entzerrten Fahrzeugtür und einer Orthogonalansicht eines vergleichbaren Fahrzeugs mit entsprechenden Übereinstimmungen. Erst in dieser Phase der Bearbeitung – also mit dem Vorliegen einer ausreichend exakten Orthogonalansicht von den Spurenlagen – können nun die Radkontaktspuren untersucht werden.

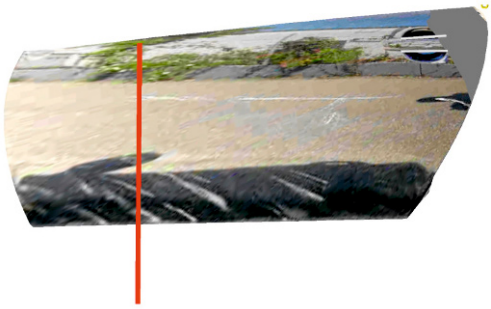


Bild A5-107 mittels 3-D-Photogrammetrie korrekt entzerrte Spurenlage an der Tür

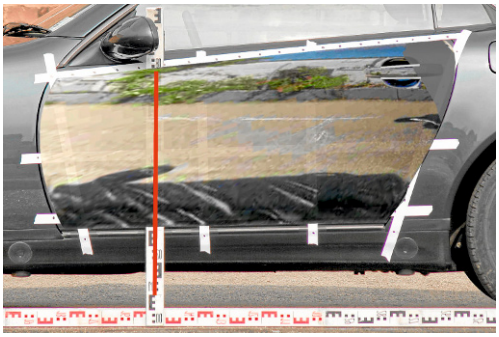


Bild A5-108 Bildüberlagerung von korrekt entzerrter Spurenlage und Orthogonalansicht eines vergleichbaren Fahrzeugs mit Maßstab

Im Rahmen von Untersuchungen zu Radkontaktspuren soll von Seiten des Technikers gelegentlich auch zu der Frage Stellung genommen werden, ob der Fahrzeugführer des streifenden Fahrzeugs absichtlich gegen das gestreifte Fahrzeug gelenkt hat. Hierzu ist prinzipiell anzumerken, dass es nicht dem Techniker obliegt, eine Wertung dahingehend abzugeben, ob ein Fahrer absichtlich oder aus anderen Gründen gehandelt hat. Der Techniker kann dem Juristen nur insoweit eine Entscheidungshilfe liefern, als dass technische Sachverhalte im Zusammenhang mit deren technischen Ursachen aufgezeigt werden. Bei der technischen Bewertung der Frage des Lenkeinschlags sind objektive Einflussfaktoren zu berücksichtigen (**Tabelle A5.12**).

Tabelle A5.12 Objektive Einflussfaktoren bei der technischen Beurteilung des Lenkeinschlags

Streifendes Fahrzeug	Gestreiftes Fahrzeug
Reifendimension und Reifenbauart	
Radanordnung im Radhaus	
Karosseriekontur um das kontaktierende Rad	Karosseriekontur im Kontaktbereich
Beschädigungsumfang am Vorderrad/Achse	
Beschädigungsumfang an der Karosserie	Beschädigungsumfang an der Karosserie
Lenkunterstützung	
Antriebskonzept (Front-, Heck-, Allradantrieb)	
Bodenunebenheiten	Bodenunebenheiten
weitere Fahrerhandlungen	
	Intensität der Radkontaktspuren

Der derzeitige Erkenntnisstand zur Auswertung von Radkontaktspuren – dies auch mittels Radkontaktspurenmodell in PC-Crash – lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Anhand des Radkontaktspurenverlaufs kann eine Bewertung vorgenommen werden, ob die Radkontaktspuren von der vorderen oder hinteren Rad-/Reifenflanke gezeichnet wurden.

- Mit den Radkontaktspurencharakteristika kann eine Bewertung vorgenommen werden, ob neben der Bereifung noch weitere Teile am Rad des streifenden Fahrzeugs kontaktierten.
- Nur Spurzeichnungen aus ersten Kontakten sind geeignet, gesicherte Rückschlüsse auf das Geschwindigkeitsverhältnis der beteiligten Fahrzeuge bzw. Kollisionsobjekte zuzulassen.
- Die Qualität der Analysen kann erhöht werden, wenn eine Bewertung der Radkontaktspuren auf der Karosserie und auf den Rädern sowie der sonstigen Spurenlagen an den beteiligten Fahrzeugen in ihrer Gesamtheit erfolgt.
- Die Geschwindigkeiten zwischen dem streifenden Fahrzeug und dem streifenden Rad müssen konsistent sein. Äquivalente Anforderungen gelten für das gestreifte Fahrzeug.
- Radkontaktspuren aus Streifkollisionen im entgegengerichteten Verkehr sind in der Regel gut auswertbar, da der Erstkontaktbereich in den meisten Fällen lokalisierbar ist.
- Radkontaktspuren aus Streifkollisionen im gleichgerichteten Verkehr sind in der Regel schlechter auswertbar, da aufgrund von Spurenüberlagerungen der Erstkontaktbereich nur bedingt bzw. in den meisten Fällen nicht gesichert bestimmbar ist.
- Radkontaktspuren aus Streifkollisionen im gleichgerichteten Verkehr mit nahezu kreisförmiger Ausprägung lassen den Schluss auf nahezu identische Absolutgeschwindigkeiten der Kontaktpartner zu.
- Den wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der Radkontaktspuren hat das Geschwindigkeitsverhältnis z, wobei die Wirkungen weiterer Faktoren zu berücksichtigen sind.
- Mit den Betrachtungen zu Radkontaktspuren kann nur zum Geschwindigkeitsverhältnis z Stellung genommen werden. Aussagen zu den Absolutgeschwindigkeiten der Fahrzeuge bzw. Kollisionsobjekte sind allein anhand von Radkontaktspuren nicht möglich.
- Anhand von Radkontaktspuren kann nicht eindeutig abgeleitet werden, ob ein gestreiftes Fahrzeug im Rahmen einer Streifkollision tatsächlich gestanden ($v_G = 0$) hat.
- Bei der Anwendung von Berechnungsmodellen zu Radkontaktspuren in Simulationsprogrammen bzw. in Form von selbständigen Programmlösungen müssen die Möglichkeiten und Grenzen – folglich der Modellcharakter – unbedingt berücksichtigt werden.
- Es kann keine sichere Aussage getroffen werden, ob der Fahrer des streifenden Fahrzeugs gegen das gestreifte Fahrzeug bzw. Kollisionsobjekt oder nur geradeaus gelenkt hat.
- Eine Aussage, dass der Fahrer des streifenden Fahrzeugs bei Erstkontakt vom gestreiften Fahrzeug bzw. Kollisionsobjekt zumindest „nicht weggelenkt“ hat, ist technisch möglich.
- Radkontaktspuren, die von der hinteren Reifenflanke des streifenden Fahrzeugs verursacht wurden, weisen bei einer Spurzeichnungslänge von mehr als 0,2 m nicht zwangsläufig darauf hin, dass das streifende Fahrzeug vom gestreiften Fahrzeug weggelenkt wurde (z. B. bei einer schleudernden Einlaufbewegung des streifenden Fahrzeugs in die Kollision).

Literatur

[1] Weber, Michael: Die Aufklärung des Kfz-Versicherungsbetrugs: Grundlagen der Kompatibilitätsanalyse und Plausibilitätsprüfung/Michael Weber, Juristische Aspekte: Probleme des Haftpflichtprozesses bei behaupteter Unfallmanipulation/Hermann Lemcke [u. a.], 1. Auflage, Münster, Schriftenreihe Unfallrekonstruktion, c/o Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, 1995 (Schriftenreihe Unfallrekonstruktion)

[2] Gerlach, Alexander: Experimentelle Untersuchung zur Bestimmbarkeit des Geschwindigkeitsverhältnisses zwischen den Kollisionspartnern aus den von der Seitenwand eines Reifens gezeichneten Aufriebspuren: Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin, Institut für Straßen- und Schienenverkehr – Fahrzeugtechnik –, 2000

[3] Burg, Heinz; Brösdorf, Klaus-Dieter; Martinsohn, Matthias: Zwei Versuche zur Problematik Radandrehspuren, Verkehrsunfall + Fahrzeugtechnik, Heft 2/2001

[4] Burg, Heinz; Brösdorf, Klaus-Dieter; Depré, Klaus; Göritz, Jörg: Weitere Versuche zur Problematik Radandrehspuren, Verkehrsunfall + Fahrzeugtechnik, Heft 7-8/2001

[5] Burg, Heinz; Brösdorf, Klaus-Dieter; Gerlach, Alexander; Priester, Johannes; Weyde, Michael: Bewertung von Radkontaktspuren, Verkehrsunfall + Fahrzeugtechnik, Heft 6/2003

[6] Brösdorf, Klaus-Dieter: Bewertung von Radkontaktspuren: Nachschlagewerk für Sachverständige, Herausgeber: Prof. Dr. oec. habil. Dipl.-Ing. Kurt Jakubasch

[7] Krause, Ralf; Saat, Detlev: Interpretation von Reifen-Kontaktspuren im gleichläufigen Verkehr, Verkehrsunfall + Fahrzeugtechnik: Heft 1/2004

[8] www.wreckedexotics.com

[9] ReconData (www.dsd.at)

[10] PC-Crash-Programm zur Simulation von Verkehrsunfällen: DSD Dr. Steffan Datentechnik: Linz, Austria

[11] Brösdorf, Klaus-Dieter; Görtz, Marco; Kubjatko, Tibor: 3-D-Photogrammetrie in der Unfallrekonstruktion, VKU: Heft 3/2014

A6 Kinetik

Dr. Hermann Steffan, Dr. Andreas Moser, Dr. Heinz Burg

1 Einleitung

Die **Dynamik (Kinetik**) ist ein Teilgebiet der Mechanik und beschreibt im Gegensatz zur Statik und Kinematik die Änderung der Bewegungsgrößen (Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung) unter Einwirkung von Kräften im Raum.

Die Dynamik ist die Fortführung der Erkenntnisse von *Galilei* und *Newton*. Galilei formulierte 1638 das Trägheitsgesetz. 1687 formulierte Newton seine Grundgesetze (siehe auch Kapitel A09), die die Zusammenfassung all seiner Erfahrungen und der Folgerungen daraus sind. Er verfasste damit die wissenschaftliche Begründung der Dynamik.

Im Gegensatz zur **Kinetik** ist die **Kinematik** (griech.: kinema, Bewegung) die Lehre von der Bewegung von Punkten und Körpern im Raum, beschrieben durch die Größen Weg s (Änderung der Ortskoordinate), Geschwindigkeit v und Beschleunigung a, ohne die Ursachen einer Bewegung (Kräfte) zu betrachten.

Die Position eines Punktes wird durch drei Koordinaten (Freiheitsgrade) im Raum definiert. Bei einem Starrkörper, also einer starr zusammenhängenden Gruppe von Punkten, kommen zu sdiesen drei Freiheitsgraden für die Position noch drei Freiheitsgrade für die Rotation (Drehungen im Raum) hinzu.

2 Kinetische Berechnung der Bewegungen von Fahrzeugen/Gespannen

Da bei fast allen Verkehrsunfällen nicht nur die Bewegungszustände bei langsamen Rangierfahrten untersucht werden sollen, sondern auch das Fahr- und Schleuderverhalten des Fahrzeugs oder Gespanns bei hohen Geschwindigkeiten, musste ein kinetisches Fahrmodell gewählt werden. Außerdem sollte dieses Modell dynamische Einflüsse, wie z. B. die Federungscharakteristik, die Dämpfungscharakteristik, den Einfluss der Reifenkennfelder sowie die Verteilung der Massen berücksichtigen. Auch die Berücksichtigung verschiedener Straßenverhältnisse und unterschiedlicher Aktionen des Fahrzeuglenkers sollen berücksichtigt werden.

In Europa wurde für die Simulation von Verkehrsunfällen bereits im Jahr 1960 ein Computerprogramm vorgestellt, das auf einer kinetischen Vorwärtsrechnung basierte. Es handelte sich dabei um ein 2-dimensionales Berechnungsmodell ohne Berücksichtigung der dynamischen Radlastveränderungen [2]. Im Jahr 1988 wurden außerdem von *Kersche* [3], [4] ein 2-dimensionales, ebenes Computerprogramm für die Unfallrekonstruktion vorgestellt. Dieses enthielt neben einem Stoßmodell auch eine kinetische Vorwärtsrechnung.

Im Jahr 1967 wurde in den USA von *McHenry* [5] ein erstes Computerprogramm für die Analyse von Einzelunfällen vorgestellt, das eine kinetische 2-dimensionale Vorwärtsrechnung enthielt. Im Jahr 1973 wurde von McHenry [6] außerdem das Programm SMAC vorgestellt. Dieses Programm enthielt neben einem Kollisionsmodell, ebenfalls eine 2-dimensionale kineti-

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_6

sches Vorwärtsrechnung. Dieses Modell wurde laufend weiter entwickelt, wobei bis heute das Programm ED-SMAC, das erstmals im Jahr 1988 von *Terry Day* [7] vorgestellt wurde, in den USA für die Unfallrekonstruktion eine bedeutende Rolle spielt.

In Japan wurde im Jahr 1985 von *ISHIKAWA* [8] ein Computerprogramm für die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen veröffentlicht. Dieses enthielt ebenfalls neben einem Kollisionsmodell eine ebene kinetische Vorwärtsrechnung.

Auch in der Automobilentwicklung werden zahlreiche derartige Berechnungsmodelle verwendet. Beispielhaft seien hier nur die Veröffentlichungen von *Gnadler*, *Führer* und *Rill* angeführt. [9], [10], [11], [12] Diese „Fahrsimulatoren“ sind jedoch darauf optimiert, das Fahrverhalten bei Vorgabe genau definierter Anfangs- und Randbedingungen möglichst genau wiederzugeben, weshalb diese Modelle sehr viele Eingabeparameter verlangen. So sind meist genaue Kenntnisse über die Konstruktion der Radaufhängung, der Lenkungsgeometrie und der Federung notwendig. Auch die Elastizitäten in den Gelenken werden vielfach bei diesen Modellen berücksichtigt. Für die Simulation der Auslaufbewegung unfallbeschädigter Fahrzeuge sind diese Programme meist nicht sehr geeignet. Auch fehlt Ihnen vielfach die Koppelung mit einem Stoßmodell.

Im Fall der Rekonstruktion eines Verkehrsunfalls stehen derartige Messdaten jedoch nicht zur Verfügung. So sind der Verlauf der Lenkeinschläge sowie die Größe und Verteilung der Bremskräfte nicht aufgezeichnet. Es kommt durch die Kollision auch vielfach zu Deformationen an den Radaufhängungen und Beschädigungen der Reifen. Aus diesem Grund sollte berücksichtigt werden, ein Modell zu entwickeln, das die prinzipielle Fahr- und Schleudercharakteristik der Fahrzeuge richtig wiedergibt. Jedoch sollte die Anzahl der Fahrzeugparameter möglichst gering gehalten werden. Die Eingabewerte sollten so gewählt werden, dass Ihre Vorgabe in Form allgemein bekannter Parameter erfolgt. Auch eine einfache Beschreibung verschiedener Fahrzeugdefekte sollte möglich sein.

Das so entstandene Computerprogramm PC-CRASH [13] wurde im Jahr 1993 vorgestellt.

Im Jahr 1995 veröffentlichte *Burg* [15] das Programm Carat für die Unfallrekonstruktion, dessen Fahrdynamikanalyse auf dem vor allem in der Fahrzeugentwicklung verwendeten Programm Carat [10] basiert.

Ein weiteres Programm, das erstmals die dreidimensionale Echtzeitsimulation eines Fahrzeugs oder Anhängergespanns bei gleichzeitiger dreidimensionaler Darstellung auf einem Personal Computer erlaubte, wurde im Jahr 1994 von *Melegh* [16] vorgestellt. Dieses Programm erlaubt es interaktiv die Randbedingungen während der Simulation zu ändern, und so deren Einfluss auf das Fahrverhalten zu untersuchen.

Im Jahr 1995 wurde für das Programm PC-Crash [14] die Integration eines Anhängermodells erstmals vorgestellt. Die Zielsetzung bei der Integration dieses Modells bestand darin, das bereits existierende kinetische Fahrzeugmodell so zu erweitern, dass mehrere Fahrzeuge, ohne in das bestehende Modell einzugreifen, gekoppelt werden können.

Dies wurde so realisiert, dass das Fahrmodell durch die Koppelung nicht verändert wurde. Es wurde lediglich das Fahrmodell so erweitert, dass auch der Einfluss der Anhängerkupplungskräfte berücksichtigt werden konnte. Hierbei wurde eine Methode gewählt, bei der zunächst die zu jedem Zeitschritt gültigen Kupplungskräfte zwischen Zugfahrzeug und Anhänger berechnet werden. Diese Kräfte werden dann dem Zugfahrzeug und Anhänger als externe Kräfte vorgeschrieben. In der Literatur ist dieses Verfahren auch unter dem Begriff Differential-Algebraische Gleichungen bekannt [11].

Da bei dieser Methode nur die Beschleunigungen im Kupplungspunkt für Fahrzeug und Anhänger gleichgesetzt werden, kann es bei der numerischen Integration über einen großen Zeitraum zu einem Trennen von Fahrzeug und Anhänger kommen. Bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen ist dieser Umstand jedoch meistens nicht von Bedeutung, da das Unfallgeschehen generell nur wenige Sekunden dauert. Um jedoch Rechenfehler infolge dieses Umstandes zu vermeiden, erfolgt im Rechenprogramm eine laufende Kontrolle der Positionen und Geschwindigkeitszustände von Hänger und Zugfahrzeug. Wird eine vorgegebene Toleranz überschritten, wird die gesamte Berechnung mit einem kleineren Berechnungszeitschritt wiederholt.

Im Folgenden werden exemplarische die Fahrdynamikmodelle von PC-Crash besprochen, andere Simulationsprogramme wie etwa CARAT verwenden ähnliche Modellansätze, die sich zwar im Detail unterscheiden können, prinzipiell aber vergleichbar sind. Diese Beschreibungen sollen einen Einblick über die Berechnungsvorgänge bei der Fahrdynamiksimulation in der Unfallrekonstruktion geben.

3 Fahrmodell

Zunächst wird das Fahrzeug als ein starrer Körper betrachtet, der sich unter dem Einfluss äußerer Kräfte im Raum bewegt.

3.1 Koordinatensysteme

Zunächst werden zwei Koordinatensysteme definiert: ein ortsfestes Inertialsystem x_i sowie ein Koordinatensystem, das fix mit der Fahrzeugkarosserie verbunden ist x_i'. Der Ursprung des Koordinatensystems x_i' liegt im Schwerpunkt der Karosserie.

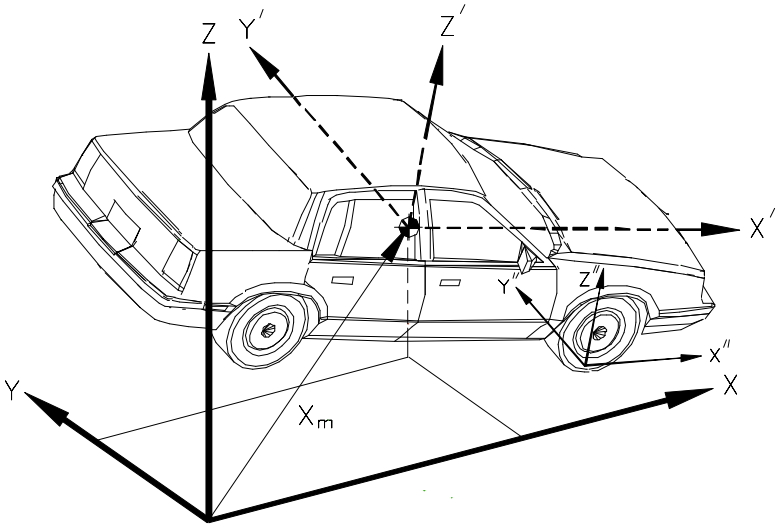


Bild A6-1 Die Koordinatensysteme (fahrzeugfestes Koordinatensystem und Inertialsystem)

Die Koordinatenrichtungen dieses fahrzeugfesten Koordinatensystems werden wie folgt definiert: Die Fahrzeuglängsachse (x'-Achse) wird bei beladenem Fahrzeug im Stillstand als Schnittlinie zwischen der Fahrzeugsymmetrieebene und einer Ebene parallel zur Fahrbahnebene in Höhe des Schwerpunktes definiert. Die Fahrzeugquerachse (y'-Achse) steht senkrecht zur Fahrzeugsymmetrieebene. Die Fahrzeughochachse (z'-Achse) ergibt sich aus der Orthogonalität des Koordinatensystems. Die Koordinatenrichtungen sind so definiert, dass die x'-Achse immer zur Fahrzeugfront und die z'-Achse immer nach oben zeigt. Die Richtung der y'-Achse ergibt sich aus der Verwendung eines Rechtskoordinatensystems. **Bild A6-1** zeigt die beiden Koordinatensysteme an einem Fahrzeug.

Zunächst erfolgt die Festlegung der Position des Massenmittelpunktes im Inertialsystem durch den Ortsvektor x_m Die Drehung des Fahrzeugkörpers gegenüber dem Inertialsystem wird durch die Angabe der Drehmatrix T festgelegt, die aus drei Teilrotationen zusammengesetzt werden kann. Hierbei werden Kardanwinkel verwendet. Die Reihenfolge der Rotation wird hierbei wie folgt festgelegt:

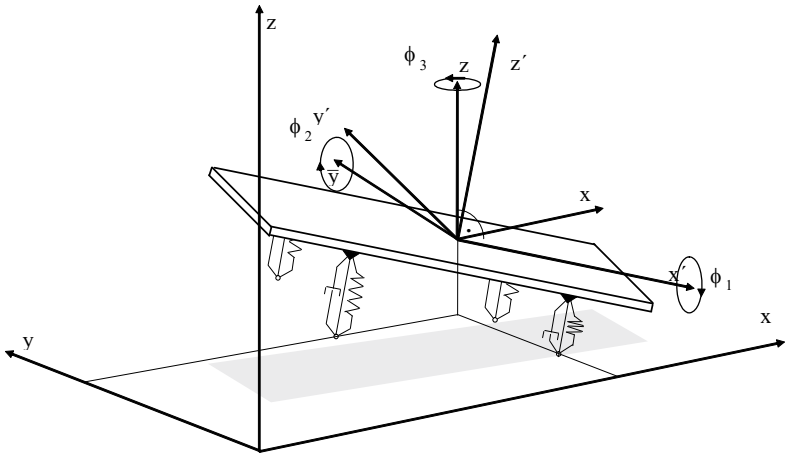


Bild A6-2 Fahrzeugmodell

Zunächst erfolgt eine Rotation um die z-Achse, anschließend um die verdrehte y-Achse. Zuletzt erfolgt die Drehung um die x'-Achse. Somit ergeben sich für die einzelnen Drehungen folgende Rotationsmatrizen für die Transformation vom Inertialsystem ins Fahrzeugsystem:

1. Rotation: (z-Achse) [ϕ_3]

$$\mathbf{T_3} = \begin{pmatrix} \cos(\phi_3) & \sin(\phi_3) & 0 \\ -\sin(\phi_3) & \cos(\phi_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{A6-1}$$

2. Rotation: (gedrehte y-Achse) [ϕ_2]

$$\mathbf{T_2} = \begin{pmatrix} \cos(\phi_2) & 0 & -\sin(\phi_2) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\phi_2) & 0 & \cos(\phi_2) \end{pmatrix} \tag{A6-2}$$

3. Rotation: (x'-Achse) [ϕ_1]

$$\mathbf{T_1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_1) & \sin(\phi_1) \\ 0 & -\sin(\phi_1) & \cos(\phi_1) \end{pmatrix} \tag{A6-3}$$

somit ergibt sich die gesamte Rotation vom Inertialsystem ins fahrzeugfeste Koordinatensystem aus:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} c2\cdot c3 & c2\cdot s3 & -s2 \\ s1\cdot s2\cdot c3 - c1\cdot s3 & s1\cdot s2\cdot s3 + c1\cdot c3 & s1\cdot c2 \\ c1\cdot s2\cdot c3 + s1\cdot s3 & c1\cdot s2\cdot s3 - s1\cdot c3 & c1\cdot c2 \end{pmatrix} \tag{A6-4}$$

bzw. die Rücktransformation aus:

$$\mathbf{T^{-1}} = \begin{pmatrix} c2\cdot c3 & s1\cdot s2\cdot c3 - c1\cdot s3 & c1\cdot s2\cdot c3 + s1\cdot s3 \\ c2\cdot s3 & s1\cdot s2\cdot s3 + c1\cdot c3 & c1\cdot s2\cdot s3 - s1\cdot c3 \\ -s2 & s1\cdot c2 & c1\cdot c2 \end{pmatrix} \tag{A6-5}$$

mit den Abkürzungen:

$$s1 = \sin(\phi_1);\ y2 = \sin(\phi_2);\ s3 = \sin(\phi_3)$$

und

$$c1 = \cos(\phi_1);\ c2 = \cos(\phi_2);\ c3 = \cos(\phi_3)$$

3.2 Die Berechnung der Radaufstandspunkte

Aus der Lage des Massenmittelpunktes, der Fahrzeugverdrehung sowie den Abständen der Räder zum Fahrzeugschwerpunkt kann der Federweg der Fahrzeugräder berechnet werden.

Angenommen wurde die Bedingung, dass die z-Koordinate der Radaufstandspunkte im Inertialsystem 0 ist, solange die Räder mit der Fahrbahn in Kontakt sind.

Die Verschiebung der Radaufstandspunkte in der fahrzeugfesten x'-y'-Ebene infolge des Ein- und Ausfederns der Fahrzeugräder ist am realen Fahrzeug durch die Fahrwerkskinematik bestimmt. In dieser Arbeit wurde angenommen, dass es durch die Einfederung zu keiner Verschiebung der Radaufstandspunkte in der x'-y'-Ebene kommt.

Die Positionen der Federachsen x', y' seien vorgegeben.

Der Radaufstandspunkt wird in dieser Arbeit immer als Schnittpunkt der Federachse mit der Fahrbahnebene berechnet. Der Einfluss des Reifendurchmessers und der Reifenbreite wurde somit in dieser Arbeit vernachlässigt.

Als Null-Lage für den Federweg wird hierbei die statische Gleichgewichtslage des beladenen Fahrzeugs festgelegt. Für diese Lage werden die beiden Drehwinkel ϕ_1 und ϕ_2 Null gesetzt. Die Veränderung des Federweges (Ausfederung) der Räder f_r gegenüber dieser Lage berechnen sich aus folgenden Komponenten: Die Ausfederung der Räder infolge einer Verschiebung des Fahrzeugschwerpunktes auf die Höhe z_m und einer Verdrehung des Fahrzeugs um die Winkel ϕ_1 und ϕ_2 berechnet sich zu:

$$f_r = \frac{z_m + y_r'\sin(\phi_1)\ \cos(\phi_2) - x_r'\sin(\phi_2)}{\cos(\phi_1)\ \cos(\phi_2)} - z_{m0} \tag{A6-6}$$

z_m beschreibt hierbei die aktuelle Höhe des Fahrzeugschwerpunktes im Inertialsystem wohingegen z_{m0} die ursprüngliche Höhe des Fahrzeugschwerpunktes in der statischen Gleichgewichtslage beschreibt.

x_r' und y_r' beschreiben die Koordinaten des Radaufstandspunktes r im fahrzeugfesten Koordinatensystem.

Die z_r'-Koordinate berechnet sich zu:

$$z_r' = -z_{m0} - f_r \tag{A6-7}$$

Diese Gleichung gilt, solange das jeweilige Rad Bodenkontakt hat.

Die Position der Radaufstandspunkte im Inertialsystem erhält man aus:

$$x_r' = x_m + T^{-1}\, x_r' \tag{A6-8}$$

mit:

$$x_r' = \begin{pmatrix} x_r' \\ y_r' \\ z_r' \end{pmatrix} \tag{A6-9}$$

Die Ausfedergeschwindigkeiten der Räder werden aus den ersten Ableitungen der Federwege nach der Zeit berechnet. Sie bestimmen die Dämpfungskräfte der Stoßdämpfer.

$$\dot{f}_r = \frac{df_r}{dt} \tag{A6-10}$$

3.3 Die Kräfte am freigeschnittenen Fahrzeug

Folgende äußere Kräfte beeinflussen die Bewegung eines Fahrzeugs:

- Radkräfte (Radaufstands-/Radseiten- und Radumfangskräfte),
- Luftwiderstand,
- Schwerkraft,
- Anhängerkupplungskräfte.

3.4 Die Radkräfte

In diesem Abschnitt soll ein Überblick über die Berechnung dieser Kräfte gegeben werden. Zahlreiche Reifenmodelle werden in der Literatur beschrieben. [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]

Bei fast allen Modellen, die für die kinetische Simulation der Fahrzeugbewegungen verwendet werden, erfolgt eine Aufteilung der Kräfte in folgende drei Komponenten:

- Die Radaufstandskraft (Vertikalkraft) beschreibt jene Komponente, die normal zur Tangentialebene an die Fahrbahnoberfläche im idealisierten Radaufstandspunkt steht.
- Die Richtung der Seitenkraft ergibt sich als Normalprojektion der Drehachse des jeweiligen Rades in die Fahrbahnoberfläche.
- Die Richtung der Umfangskraft ergibt sich aus der Orthogonalität der drei Komponenten und der Festlegung eines Rechtssystems.

Es wird also für jeden Reifen ein weiteres Koordinatensystem definiert, das genau den Richtungen der Umfangskraft (x_r"-Richtung), der Seitenkraft (y_r"-Richtung) und der Vertikalkraft (z_r"-Richtung) entspricht.

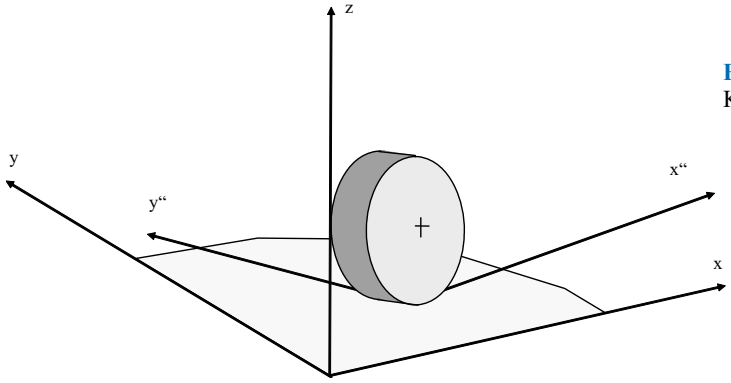


Bild A6-3
Koordinatensystem am Rad

3.5 Feder- und Dämpferkräfte

Den ersten Schritt bei der Ermittlung der Radkräfte bildet die Berechnung der Radaufstandskräfte, da diese als Eingangsgrößen für die Berechnung der jeweiligen Radumfangs- und Radseitenkräfte benötigt werden.

In dieser Arbeit werden die Radaufhängungen masselos angenommen, und die Kräfte in Richtung der Feder- bzw. Dämpferachse (z') werden direkt aus dem Federweg (Federcharakteristik) sowie der Federungsgeschwindigkeit (Stoßdämpfer), über einen algebraischen Zusammenhang berechnet. Hierbei wird eine lineare Federsteifigkeit vorausgesetzt.

$$F_{rz'(\text{Feder})} = -c_r f_r + F_{rz'0} \tag{A6-11}$$

Wobei c_r die Federsteifigkeit angibt, die für jedes Rad individuell vorgegeben werden kann. f_r bezeichnet den Federweg gegenüber dem statischen Gleichgewicht und F_{rz0} die statische Radaufstandskraft.

Die Dämpfung berechnet sich aus der Federgeschwindigkeit nach folgendem Zusammenhang:

$$F_{rz'(\text{Dämpfung})} = -d_r \dot{f}_r \tag{A6-12}$$

Wobei d_r die Dämpfungskonstante angibt, die für jedes Rad individuell vorgegeben werden kann. Somit besteht auch die Möglichkeit, den Einfluss eines beschädigten Stoßdämpfers auf das Fahrverhalten zu berücksichtigen. Das bei einem beschädigten Stoßdämpfer häufig auftretende Phänomen einer Schwingung der Kombination Rad – Radaufhängung in Richtung der Federachse kann mit diesem Modell wegen der nicht berücksichtigten ungefederten Massen nicht nachvollzogen werden. Das Schwingverhalten des Fahrzeugkörpers wird jedoch berücksichtigt.

$\dot{f}_r$ bezeichnet die Ausfedergeschwindigkeit des jeweiligen Rades.

Die gesamte Kraft in Richtung der Feder- bzw. Dämpferachse berechnet sich somit zu:

$$F_{rz'(\text{gesamt})} = F_{rz'0} - c_r f_r - d_r \dot{f}_r \qquad \text{(A6-13)}$$

3.6 Federanschläge

Da die Federn bei einem Fahrzeug nicht beliebig verkürzt werden können, sondern die Radaufhängung nach einem bestimmten Einfederweg gegen einen Anschlag stößt, wurde diesem Umstand in folgender Weise Rechnung getragen:

$$f_r < f_{r\,\min} \qquad \text{(A6-14)}$$

In diesem Fall wird eine erhöhte Federsteifigkeit angenommen und die Federkraft berechnet sich nach folgendem Zusammenhang

$$F_{rz'(\text{Feder})} = F_{rz'0} - c_r f_{r\min} - c_{r2}\,(f_r - f_{r\min}) \qquad \text{(A6-15)}$$

Die Werte für $f_{r\min}$ und die zweite, steife Federkonstante c_{r2} müssen vorgegeben werden. Andererseits muss das Abheben eines Rades berücksichtigt werden. Es muss also die Bedingung:

$$F_{rz'} \geq 0 \qquad \text{(A6-16)}$$

immer erfüllt sein.

3.7 Radaufstandskräfte

Aus der momentanen Einfederung, der Einfedergeschwindigkeit sowie der Feder- und Dämpfercharakteristik kann die Radkraft $F_{rz'}$ in Richtung der Federachse berechnet werden:

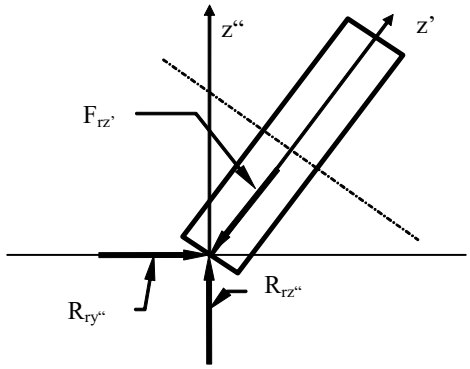


Bild A6-4 Reifenkontaktkräfte

Somit kann auch eine Gleichgewichtsbedingung in Richtung der Federachse formuliert werden. Für die Umrechnung wurde jeweils der Einfluss des Lenkeinschlages vernachlässigt.

$$F_{rz'} = -R_{rx''}\sin(\phi_2) + R_{ry''}\sin(\phi_1)\cos(\phi_2) + R_{rz''}\cos(\phi_1)\cos(\phi_2) \qquad \text{(A6-17)}$$

Da nun die Komponenten der Reifenkräfte $R_{rx''}$ und $R_{ry''}$ und erst aus dem Reifenmodell berechnet werden können, und dieses aber als Eingangsgröße die Radaufstandskraft benötigt, wurden für diese Berechnung die Kräfte $R_{rx''}$ und $R_{ry''}$ aus dem letzten Zeitschritt verwendet.

Somit erhält man für die Radaufstandskraft:

$$R_{z''} = \frac{F_{rz''} + R_{rx''}\sin(\phi_2) - R_{ry''}\sin(\phi_1)\cos(\phi_2)}{\cos(\phi_1)\cos(\phi_2)} \qquad \text{(A6-18)}$$

3.8 Reifeneigenschaften

In der Literatur wird die Umfangskraft meist als Funktion der Radaufstandskraft, des Umfangsschlupfes sowie des Reifenschräglaufes angegeben. Der Umfangsschlupf berechnet sich aus der Komponente der Absolutgeschwindigkeit des Radmittelpunktes in Umfangsrichtung und der Umfangsgeschwindigkeit des Rades infolge der Raddrehung. Abhängig davon, ob es sich um einen Antriebs- oder Bremsvorgang handelt, spricht man vom

Bremsschlupf

$$s_{rx''} = \frac{(v_{rx''} - r_r \omega_r)}{v_{rx''}} \qquad \text{(A6-19)}$$

oder Antriebsschlupf

$$s_{rx''} = \frac{(v_{rx''} - r_r \omega_r)}{r_r \omega_r} \qquad \text{(A6-20)}$$

wobei

$v_{rx''}$ die Komponente der Absolutgeschwindigkeit des Radmittelpunktes in x"-Richtung,
r_r den Radradius und
ω_r die Winkelgeschwindigkeit des Rades

beschreibt.

Die Seitenkraft hingegen wird meist als Funktion des „Schräglaufwinkels“ angegeben, der den Winkel zwischen dem Vektor der Geschwindigkeit des Reifenmittelpunktes und der Richtung der Umfangskraft angibt.

$$\tan(\alpha_r) = v_{ry''} / v_{rx''} \qquad \text{(A6-21)}$$

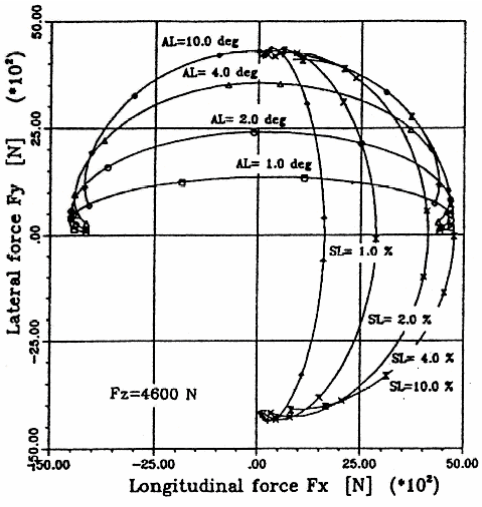
Die meisten Reifenmodelle beschreiben den Zusammenhang zwischen den Radkräften (Seitenkraft und Umfangskraft) und dem Schlupf (Umfangsschlupf und Schräglaufwinkel) für verschiedene Parameter.

Messungen haben gezeigt, dass moderne Reifen immer eine sehr ähnliche Charakteristik aufweisen. Das nachfolgende **Bild A6-5** zeigt beispielhaft den gemessenen Zusammenhang zwischen den Radkräften und dem Umfangsschlupf sowie Schräglaufwinkel.

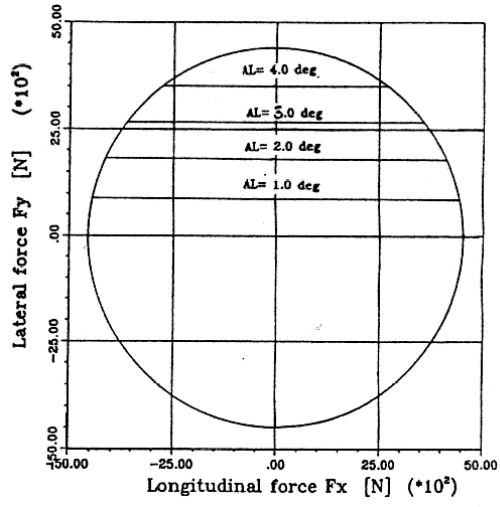
Bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen muss davon ausgegangen werden, dass das Lenk-, Brems- oder Beschleunigungsverhalten der Fahrzeuglenker nur abgeschätzt werden kann. Wichtig ist, dass die jeweiligen Grenzwerte bei einem Schleudern des Fahrzeugs sowie das charakteristische Fahrverhalten richtig wiedergegeben werden.

Auch sollte die Möglichkeit bestehen, die Auswirkungen veränderter Parameter sowie das Auftreten verschiedener Defekte, einfach vorgeben zu können.

Aus diesem Grund wurde für die vorliegende Arbeit ein relativ einfaches, lineares, quasistationäres Reifenmodell gewählt. Das Trägheitsmoment der Räder bleibt unberücksichtigt. Somit wird die Reifenumfangskraft nicht aus dem Umfangsschlupf berechnet, sondern die auftretenden Brems- oder Beschleunigungskräfte F_{rB} werden vielmehr direkt als Randbedingungen vorgegeben.



gemessen



numerisches Berechnungsmodell

Bild A6-5 Reifenkennfeld

Das Reifenmodell definiert so nur den Zusammenhang zwischen der Seitenkraft und dem Reifenschräglauf für eine vorgegebene Radumfangskraft. Allerdings kann auch die Situation auftreten, dass die Radumfangskraft (Bremskraft oder Beschleunigungskraft) infolge der Seitenkraft nicht vollständig übertragen werden kann. In diesem Fall kommt es zum Blockieren bzw. Durchdrehen der Räder

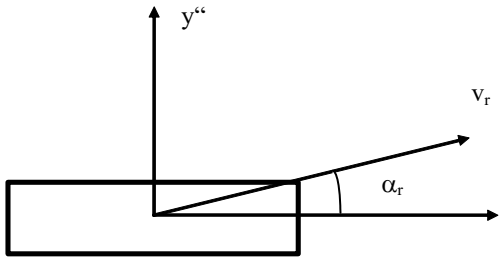


Bild A6-6 Der Reifenschräglaufwinkel

Modelliert wird zunächst folgender linearer Zusammenhang zwischen der Seitenkraft und dem Reifenschräglauf:

$$R_{ry}'' = -\frac{\alpha_r}{\alpha_{r\,\max}} \mu_r \; R_{rz}'' \qquad \text{für } \alpha_r \le \alpha_{r\,\max} \tag{A6-22}$$

und

$$R_{ry}'' = -\operatorname{sign}(\alpha_r)\,\mu_r \; R_{rz}'' \qquad \text{für } \alpha_r > \alpha_{r\,\max} \tag{A6-23}$$

Hierbei beschreibt:

α_r den momentanen Schräglaufwinkel

$\alpha_{r\,max}$ den maximalen Schräglaufwinkel. (Bei diesem Winkel wird beim ungebremsten Reifen die maximale Seitenkraft erreicht. Beim Überschreiten dieses Wertes bleibt die Seitenkraft konstant)

μ_r den für jedes Rad gerade gültigen Reibungskoeffizienten für die jeweilige Kombination Reifen – Straße

R_{rz}'' die momentane dynamische Radaufstandskraft

3.9 Das gebremste Rad

Mit F_{rB}, einer auf das Rad wirkenden Bremskraft, wird beim gebremsten Rad eine Kraftkomponente in Richtung x" erzeugt.

Für die Resultierende aus R_{rx}'' und R_{ry}'' gilt zusätzlich, dass diese niemals größer als $\mu_r\ R_{rz}''$ werden kann. Bei dieser Betrachtung wird angenommen, dass die maximale Reifenkraft, die in der Fahrebene übertragen werden kann, unabhängig von der Bewegungsrichtung des Reifens ist. Die möglichen Reifenkräfte in der Fahrebene können somit von einem Kreis mit dem Radius $\mu_r R_{rz}''$ umschrieben werden. Dieses Modell stimmt auch gut mit der Konstruktion und Gummimischung moderner Reifen überein. Auch ist eine wesentliche Veränderung des Reibungskoeffizienten beim Übergang vom rollenden zum rutschenden Reifen bei modernen Reifenkonstruktionen nur mehr geringfügig feststellbar und wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

$$\sqrt{R_{rx}''^{\,2} + R_{ry}''^{\,2}} \le \mu_r\ R_{rz}'' \qquad \text{(A6-24)}$$

Wird dieser Wert überschritten, hängt die Größe der Radkraftkomponenten R_{rx}'' und R_{ry}'' zunächst von der Richtung der Radgeschwindigkeit ab.

$$R_{rx}'' = -\cos(\alpha_r)\ \mu_r\ R_{rz}'' \qquad \text{(A6-25)}$$

$$R_{ry}'' = -\sin(\alpha_r)\ \mu_r\ R_{rz}'' \qquad \text{(A6-26)}$$

Ist die Bremskraft größer als die aus dieser Formel berechnete Radumfangskraft R_{rx}'', so blockiert das gebremste Rad und die Komponenten R_{rx}'' und R_{ry}'' können direkt aus diesen Gleichungen berechnet werden.

Andernfalls dreht sich das Rad und die beiden Komponenten werden aus folgendem Zusammenhang errechnet:

Die Radumfangskraft entspricht wiederum der Bremskraft:

$$R_{rx}'' = -F_{rB} \qquad \text{(A6-27)}$$

Die Seitenkraft ergibt sich jedoch aus folgendem Zusammenhang:

$$R_{ry}'' = -\text{sign}(\alpha_r)\sqrt{(\mu_r R_{rz}'')^2 - F_{rB}^{\,2}} \qquad \text{(A6-28)}$$

3.10 Fahrzeuge mit Anti-Blockier-System (ABS)

Die Radkräfte von Fahrzeugen, bei denen beim Bremsen ein Blockieren der Räder durch ABS verhindert wird, werden wie folgt berechnet:

Zunächst wird die Seitenkraft wiederum aus dem aktuellen Schräglaufwinkel nach oben angeführtem Zusammenhang berechnet:

$$R_{ry}'' = -\frac{\alpha r}{\alpha_{r\max}} \mu_r \, R_{rz}'' \tag{A6-29}$$

Anschließend wird die Bremskraft nach folgender Beziehung berechnet:

$$R_{rx}'' = -\sqrt{(\mu_r R_{rz}'')^2 - R_{ry}''^2} \tag{A6-30}$$

Bei dieser Berechnung ist noch zu beachten, dass bei ABS Anlagen die Bremse vom System nicht vollständig gelöst wird, sondern die Bremskraft lediglich auf einen bestimmten Wert reduziert wird. In dieser Arbeit wurde diesem Umstand dadurch Rechnung getragen, dass die Bremskraft durch ABS minimal auf einen Wert von 10 % der für diesen Bremsvorgang zur Verfügung stehenden Verzögerung abgesenkt wird:

$$R_{rx''\min} = -0{,}1 \, \mu_r \, R_{rz} \tag{A6-31}$$

In diesem Fall berechnet sich die Seitenkraft zu:

$$R_{ry}'' = -\text{sign}(\alpha_r)\sqrt{(\mu_r R_{rz}'')^2 - R_{rx}''^2} \tag{A6-32}$$

3.11 Das angetriebene Rad

Wird das Rad angetrieben, so ergibt sich folgender Zustand:

Zunächst erhält man:

$$R_{rx}'' = F_{rA} \tag{A6-33}$$

Die Seitenkraft berechnet sich zunächst wiederum aus dem Schräglaufwinkel zu

$$R_{ry}'' = -\frac{\alpha_r}{\alpha_{r\max}} \mu_r \, R_{rz}'' \tag{A6-34}$$

sie wird jedoch durch die zur Verfügung stehende Reibung beschränkt:

$$R_{ry}'' = -\text{sign}(\alpha_r)\sqrt{(\mu_r R_{rz}'')^2 - F_{rA}^2} \tag{A6-35}$$

Nach diesen Zusammenhängen können nun zunächst die Reifenkräfte berechnet werden.

3.12 Die Transformation der Reifenkräfte ins Inertialsystem

Da die Bewegungsgleichungen für das Fahrzeug im ortsfesten Inertialsystem integriert werden, müssen die Kraftkomponenten sowie die Kraftangriffspunkte in das Inertialsystem transformiert werden.

Dies kann in Form einer direkten Transformation zwischen dem Koordinatensystem des jeweiligen Reifens und dem Inertialsystem erfolgen:

Die Reifenkräfte berechnen sich somit zu

$$R_{rx} = R_{rx''} \cos(\beta_r) - R_{ry''} \sin(\beta_r) \quad \text{(A6-36)}$$

$$R_{ry} = R_{rx''} \sin(\beta_r) + R_{ry''} \cos(\beta_r) \quad \text{(A6-37)}$$

wobei β_r den gesamten Drehwinkel zwischen dem Inertialsystem und dem lokalen Koordinatensystem des Reifens bezeichnet. Dieser setzt sich zusammen aus dem Drehwinkel des Fahrzeugs ϕ_3 und dem lokalen Lenkeinschlag des jeweiligen Rades φ_r.

$$\beta_r = \phi_z + \varphi_r \quad \text{(A6-38)}$$

3.13 Der Luftwiderstand

Da sich fast alle Verkehrsunfälle in einem Geschwindigkeitsbereich ereignen, in dem der Luftwiderstand gegenüber den Reifenkräften eines gebremsten oder schleudernden Fahrzeugs vernachlässigt werden kann, wurde dieser Einfluss nicht berücksichtigt.

3.14 Die Anhängerkupplungskräfte

Die Berechnung der Kräfte in der Anhängerkupplung wird später in einem eigenen Abschnitt behandelt. Sie werden jedoch aus dem Kopplungsalgorithmus direkt berechnet und für das Fahrzeugmodell als externe Kräfte im Inertialsystem vorgegeben:

$$\boldsymbol{K} = \begin{pmatrix} K_x \\ K_y \\ K_z \end{pmatrix} \quad \text{(A6-39)}$$

3.15 Die Bewegungsgleichungen für das Fahrzeug

Nach der Ermittlung sämtlicher auf das Fahrzeug wirkenden äußeren Kräfte können die Bewegungsgleichungen für den Fahrzeugkörper wie folgt angeschrieben werden:

$$\dot{p} = m\,\ddot{x}_m = \sum F \quad \text{(A6-40)}$$

daraus ergibt sich für den Impulssatz im Inertialsystem:

$$\ddot{x}_m = \sum F/m \quad \text{(A6-41)}$$

bzw. in Komponenten:

$$\ddot{x}_m = \sum Fx/m \quad \text{(A6-42)}$$

$$\ddot{y}_m = \sum Fy/m \quad \text{(A6-43)}$$

$$\ddot{z}_m = \sum Fz/m \quad \text{(A6-44)}$$

Der Drallsatz für den allgemeinen Körper ergibt sich zu

$$\dot{L}_m = \sum M \quad \text{(A6-45)}$$

bzw.:

$$\Theta_C \cdot \dot{\omega} + \omega \times \Theta_C \cdot \omega = \sum M \quad \text{(A6-46)}$$

wobei Θ_C den Trägheitstensor des Fahrzeugs bezüglich des Massenzentrums repräsentiert.

Dieser berechnet sich im fahrzeugfesten System zu

$$\Theta_C = \begin{pmatrix} I_{x'} & -I_{x'y'} & -I_{x'z'} \\ -I_{x'y'} & I_{y'} & -I_{y'z'} \\ -I_{x'z'} & -I_{y'z'} & I_{z'} \end{pmatrix} \tag{A6-47}$$

Aufgrund der Tatsache, dass das fahrzeugfeste Koordinatensystem so gewählt wurde, dass die x'-z'-Ebene eine Symmetrieebene bildet, ist sichergestellt, dass die y'-Achse eine Hauptachse bildet. Daraus folgt $I_{x'y'} = 0$ und $I_{y'z'} = 0$.

Das Deviationsmoment $I_{x'z'}$ hingegen verschwindet bei einem Fahrzeug nicht vollständig. In dieser Arbeit wurde jedoch auch diese Komponente des Trägheitstensors vernachlässigt, da bei den meisten modernen Fahrzeugen der Massenmittelpunkt in Fahrzeuglängsrichtung gesehen annähernd in der Fahrzeugmitte liegt und die Massenverteilung der Fahrzeuge in Längsrichtung gesehen annähernd symmetrisch ist.

Somit reduziert sich der Trägheitstensor für das Fahrzeug in guter Näherung zu

$$\Theta_C = \begin{pmatrix} I_{x'} & 0 & 0 \\ 0 & I_{y'} & 0 \\ 0 & 0 & I_{z'} \end{pmatrix} \tag{A6-48}$$

Das Differentialgleichungssystem ist somit hinsichtlich der Winkelbeschleunigungen entkoppelt und kann in Komponentenform wie folgt angeschrieben werden:

$$I_{x'}\dot{\omega}_{x'} = \sum M_{x'} - I_{z'}\omega_{y'}\omega_{z'} + I_{y'}\omega_{y'}\omega_{z'} \tag{A6-49}$$

$$I_{y'}\dot{\omega}_{y'} = \sum M_{y'} - I_{z'}\omega_{x'}\omega_{z'} + I_{x'}\omega_{x'}\omega_{z'} \tag{A6-50}$$

$$I_{z'}\dot{\omega}_{z'} = \sum M_{z'} - I_{y'}\omega_{x'}\omega_{y'} + I_{x'}\omega_{x'}\omega_{y'} \tag{A6-51}$$

3.16 Die Integration der Bewegungsgleichungen

Für die Integration der Bewegungsgleichungen wurde ein explizites Eulerverfahren gewählt. Dieses Verfahren bewährt sich im vorliegenden Fall deshalb, da alle Differentialgleichungen ähnliche Steifigkeiten aufweisen und somit die Wahl des Integrationszeitschrittes sehr einfach ist.

Hierbei werden zunächst die Komponenten der Schwerpunktsbeschleunigung im Inertialsystem aus den Gleichungen

$$\ddot{x} = \sum \frac{F_x}{m} \tag{A6-52}$$

$$\ddot{y} = \sum \frac{F_y}{m} \tag{A6-53}$$

$$\ddot{z} = \sum \frac{F_z}{m} \tag{A6-54}$$

berechnet. Die neuen Geschwindigkeiten und die neue Position des Fahrzeugschwerpunktes im Inertialsystem berechnet sich somit zu:

$$\dot{x}_{(t+\Delta t)} = \dot{x}_{(t)} + \ddot{x}_{(t)} \cdot \Delta t \tag{A6-55}$$

$$\dot{y}_{(t+\Delta t)} = \dot{y}_{(t)} + \ddot{y}_{(t)} \cdot \Delta t \tag{A6-56}$$

$$\dot{z}_{(t+\Delta t)} = \dot{z}_{(t)} + \ddot{z}_{(t)} \cdot \Delta t \tag{A6-57}$$

und

$$x_{(t+\Delta t)} = x_{(t)} + \dot{x}_{(t)} \cdot \Delta t + \ddot{x}_{(t)} \frac{\Delta t^2}{2} \tag{A6-58}$$

$$y_{(t+\Delta t)} = y_{(t)} + \dot{y}_{(t)} \cdot \Delta t + \ddot{y}_{(t)} \frac{\Delta t^2}{2} \tag{A6-59}$$

$$z_{(t+\Delta t)} = z_{(t)} + \dot{z}_{(t)} \cdot \Delta t + \ddot{z}_{(t)} \frac{\Delta t^2}{2} \tag{A6-60}$$

wobei Δt den numerischen Integrationszeitschritt beschreibt. Die Transformation der Geschwindigkeiten in das lokale Koordinatensystem erfolgt gemäß folgendem Zusammenhang:

$$v' = T^{-1} v \tag{A6-61}$$

Die Komponenten der Winkelbeschleunigung im fahrzeugfesten System können direkt aus:

$$\dot{\omega}_{x'} = \frac{\left(\sum M_{x'} - I_{z'} \omega_{y'} \omega_{z'} + I_{y'} \omega_{y'} \omega_{z'}\right)}{I_{x'}} \tag{A6-62}$$

$$\dot{\omega}_{y'} = \frac{\left(\sum M_{y'} - I_{z'} \omega_{x'} \omega_{z'} + I_{x'} \omega_{x'} \omega_{z'}\right)}{I_{y'}} \tag{A6-63}$$

$$\dot{\omega}_{z'} = \frac{\left(\sum M_{z'} - I_{y'} \omega_{x'} \omega_{y'} + I_{x'} \omega_{x'} \omega_{y'}\right)}{I_{z'}} \tag{A6-64}$$

berechnet werden.

Die neuen Winkelgeschwindigkeiten im fahrzeugfesten Koordinatensystem können somit durch Integration über einen Zeitschritt berechnet werden:

$$\omega_{x'(t+\Delta t)} = \omega_{x'(t)} + \dot{\omega}_{x'} \Delta t \tag{A6-65}$$

$$\omega_{y'(t+\Delta t)} = \omega_{y'(t)} + \dot{\omega}_{y'} \Delta t \tag{A6-66}$$

$$\omega_{z'(t+\Delta t)} = \omega_{z'(t)} + \dot{\omega}_{z'} \Delta t \tag{A6-67}$$

Hierbei wurde angenommen, dass innerhalb des kleinen Zeitschrittes Δt die Winkelbeschleunigungen konstant bleiben. Die zusätzliche Fahrzeugverdrehung im fahrzeugfesten Koordinatensystem ergeben sich so zu:

$$\Delta\phi_{x'(t+\Delta t)} = \omega_{x'(t)} \Delta t + \dot{\omega}_{x'(t)} \Delta t^2 / 2 \tag{A6-68}$$

$$\Delta\phi_{y'(t+\Delta t)} = \omega_{y'(t)}\Delta t + \dot{\omega}_{y'(t)}\Delta t^2/2 \tag{A6-69}$$

$$\Delta\phi_{z'(t+\Delta t)} = \omega_{z'(t)}\Delta t + \dot{\omega}_{z'(t)}\Delta t^2/2 \tag{A6-70}$$

Diese Winkelgeschwindigkeiten und Winkel, die nunmehr im fahrzeugfesten Koordinatensystem vorliegen, müssen nun auf die drei eingangs definierten Rotationsachsen umgerechnet werden. Die drei Richtungen der Drehachsen 1, 2 und 3 können im fahrzeugfesten Koordinatensystem wie folgt beschrieben werden:

$$\boldsymbol{e_1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{e_2} = \begin{pmatrix} 0 \\ c1 \\ -s1 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{e_3} = \begin{pmatrix} -s2 \\ s1 \cdot c2 \\ c1 \cdot c2 \end{pmatrix} \tag{A6-71}$$

Somit kann die Transformationsvorschrift für die Umrechnung der Winkelgeschwindigkeiten vom fahrzeugfesten Koordinatensystem in das 1,2,3-System, das die Rotationen beschreibt wie folgt ermittelt werden:

$$\bar{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -s2 \\ 0 & c1 & s1 \cdot c2 \\ 0 & -s1 & c1 \cdot c2 \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{c2}\begin{pmatrix} c2 & s1 \cdot s2 & s2 \cdot c1 \\ 0 & c1 \cdot c2 & -s1 \cdot c2 \\ 0 & s1 & c1 \end{pmatrix} \tag{A6-72}$$

Somit kann der Vektor der Winkelgeschwindigkeit in das 1,2,3-System transformiert werden:

$$\omega_{1,2,3} = \bar{T}\ \omega_{x',y',z'} \tag{A6-73}$$

In Komponentenform erhält man somit für den Vektor ω im 1,2,3-System:

$$\omega_1 = \omega_{x'} + \frac{s1 \cdot s2}{c2} \cdot \omega_{y'} + \frac{s2 \cdot c1}{c2} \cdot \omega_{z'} \tag{A6-74}$$

$$\omega_2 = c1 \cdot \omega_{y'} - s1 \cdot \omega_{z'} \tag{A6-75}$$

$$\omega_3 = \frac{s1}{c2} \cdot \omega_{y'} + \frac{c1}{c2} \cdot \omega_{z'} \tag{A6-76}$$

Die Änderung der Fahrzeugdrehwinkel ergibt sich so zu:

$$\Delta\phi_1 = \Delta\phi_{x'} + \frac{s1 \cdot s2}{c2} \cdot \Delta\phi_{y'} + \frac{s2 \cdot c1}{c2} \cdot \Delta\phi_{z'} \tag{A6-77}$$

$$\Delta\phi_2 = c1 \cdot \Delta\phi_{y'} - s1 \cdot \Delta\phi_{z'} \tag{A6-78}$$

$$\Delta\phi_3 = \frac{s1}{c2} \cdot \Delta\phi_{y'} + \frac{c1}{c2} \cdot \Delta\phi_{z'} \tag{A6-79}$$

Aus diesen Gleichungen zeigt sich, dass diese unbestimmt sind, wenn $c2$ gleich 0 ist. In diesem Fall wird das ermittelte $\Delta\phi$ und $\Delta\omega$ des letzten Zeitschritts verwendet und konstant beibehalten. Die neuen Drehwinkel im 1,2,3-System können somit wie folgt bestimmt werden:

$$\phi_{1(t+\Delta t)} = \phi_{1(t)} + \Delta\phi_1 \tag{A6-80}$$

$$\phi_{2(t+\Delta t)} = \phi_{2(t)} + \Delta\phi_2 \tag{A6-81}$$

$$\phi_{3(t+\Delta t)} = \phi_{3(t)} + \Delta\phi_3 \tag{A6-82}$$

4 Das Anhängermodell

Wird mit einem Fahrzeug ein Anhänger verbunden, so ergibt sich, dass im Kupplungspunkt zusätzliche Kupplungskräfte in das Fahrzeug und den Anhänger eingeleitet werden. Abhängig von der Art der Kupplung und vom Typ des Anhängers können diese in ihrer Richtung und Größe variieren. So gibt es Anhängertypen, bei denen die Richtung der Kupplungskraft aus der augenblicklichen Stellung von Fahrzeug und Anhänger bestimmt wird (z. B. gelenkte Anhänger). Bei anderen Typen hingegen gibt es keine geometrische Einschränkung für die Richtung der Kupplungskraft. Die zweite Bedingung, die für die Berechnung der Kupplungskräfte erfüllt sein muss, ergibt sich aus der Tatsache, dass die Beschleunigungen von Anhänger und Zugfahrzeug im Kupplungspunkt zu jedem Zeitpunkt gleich groß sein müssen.

In der Literatur ist dieses Verfahren auch unter dem Begriff „Differential-Algebraische Gleichungen“ bekannt. Es wurde erstmals von Führer vorgestellt. [11] So werden bei diesem Verfahren zunächst die Bewegungsgleichungen für Zugfahrzeug und Anhänger als Funktion der Kupplungskräfte und des momentanen Bewegungszustands formuliert. Aus der Kinematik der Bewegung können so auch die Beschleunigungen des Kupplungspunktes für Zugfahrzeug und Anhänger als Funktion fiktiver Kupplungskräfte berechnet werden. Aus der Bedingung, dass die Beschleunigungen im Kupplungspunkt für Zugfahrzeug und Anhänger identisch sein müssen, ergeben sich algebraische Gleichungen, aus denen die Kupplungskräfte explizit berechnet werden können.

Als Einschränkung für diese Arbeit werden nur Kupplungen berücksichtigt, bei denen nur Kräfte und keine Momente übertragen werden können. Die Beschleunigung eines beliebigen Fahrzeugpunktes kann unmittelbar aus dem momentanen Bewegungszustand des Fahrzeugs über folgenden Zusammenhang berechnet werden:

$$\ddot{x}_K = \ddot{x}_m + \dot{\vec{\phi}} \times x_{Km} + \dot{\phi} \times (\dot{\phi} \times x_{Km}) \qquad \text{(A6-83)}$$

Hierin beschreibt:

$\ddot{x}_K$ die Beschleunigung des Kupplungspunktes im Inertialsystem
$\ddot{x}_m$ die Beschleunigung des Massenmittelpunktes im Inertialsystem
$\dot{\phi}$ Vektor der Winkelgeschwindigkeit des Fahrzeugs
$\ddot{\phi}$ Vektor der Winkelbeschleunigung des Fahrzeugs
x_{Km} bezeichnet den Abstand des Kupplungspunktes vom Massenmittelpunkt im Inertialsystem

Über diese Beziehung können somit auch die Beschleunigungen von Fahrzeug und Anhänger im Kupplungspunkt unter Berücksichtigung der Anhängerkupplungskräfte berechnet werden. Die Schwerpunktsbeschleunigungen sowie die Winkelbeschleunigungen werden hierbei wiederum explizit aus den Bewegungsgleichungen für Fahrzeug und Anhänger berechnet.

4.1 Der ungelenkte Anhänger

Bei ungelenkten Anhängern besteht keine geometrische Einschränkung über die Richtung die die Kupplungskraft während eines Fahrvorgangs einnehmen kann. Da der Kupplungspunkt einerseits starr mit dem Zugfahrzeug und andererseits starr mit dem Anhänger verbunden ist, können die Beschleunigungen direkt aus der oben angeführten Gleichung berechnet werden.

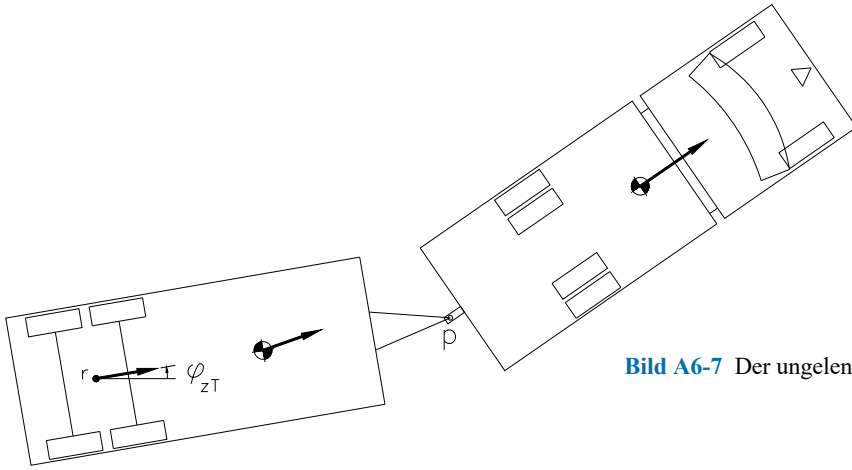


Bild A6-7 Der ungelenkte Anhänger

Hierbei zeigt sich, dass für Zugfahrzeug und Anhänger ein linearer Zusammenhang zwischen den Beschleunigungen im Kupplungspunkt und den Kupplungskräften besteht. Somit können nun folgende Gleichungen für das Zugfahrzeug und den Anhänger angesetzt werden, die die Beschleunigungen der Fahrzeuge im Kupplungspunkt als Funktion der Kupplungskräfte beschreiben:

Für das Zugfahrzeug erhält man:

$$\ddot{x}_{KZ} = C_{xZ} + C_{xxZ}\,K_{xZ} + C_{xyZ}\,K_{yZ} + C_{xzZ}\,K_{zZ} \qquad \text{(A6-84)}$$

$$\ddot{y}_{KZ} = C_{yZ} + C_{yxZ}\,K_{xZ} + C_{yyZ}\,K_{yZ} + C_{yzZ}\,K_{zZ} \qquad \text{(A6-85)}$$

$$\ddot{z}_{KZ} = C_{zZ} + C_{zxZ}\,K_{xZ} + C_{zyZ}\,K_{yZ} + C_{zzZ}\,K_{zZ} \qquad \text{(A6-86)}$$

Für den Anhänger erhält man in gleicher Form:

$$\ddot{x}_{KA} = C_{xA} + C_{xxA}\,K_{xA} + C_{xyA}\,K_{yA} + C_{xzA}\,K_{zA} \qquad \text{(A6-87)}$$

$$\ddot{y}_{KA} = C_{yA} + C_{yxA}\,K_{xA} + C_{yyA}\,K_{yA} + C_{yzA}\,K_{zA} \qquad \text{(A6-88)}$$

$$\ddot{z}_{KA} = C_{zA} + C_{zxA}\,K_{xA} + C_{zyA}\,K_{yA} + C_{zzA}\,K_{zA} \qquad \text{(A6-89)}$$

Hierin beschreibt

$\ddot{x}_{KZ}$, $\ddot{y}_{KZ}$, $\ddot{z}_{KZ}$	die Beschleunigung des Zugfahrzeugs im Kupplungspunkt (beschrieben im Inertialsystem)
$\ddot{x}_{KA}$, $\ddot{y}_{KA}$, $\ddot{z}_{KA}$	die Beschleunigung des Anhängers im Kupplungspunkt (beschrieben im Inertialsystem)
K_{xZ}, K_{yZ}, K_{zZ}	die Komponenten der auf das Zugfahrzeug wirkenden Kupplungskraft
K_{xA}, K_{yA}, K_{zA}	die Komponenten der auf den Anhänger wirkenden Kupplungskraft
C_{xZ}, C_{xxZ}...	die Koeffizienten der Matrizen für Zugfahrzeug und
C_{xA}, C_{xxA}...	Anhänger

Die Koeffizienten der Matrizen C_Z und C_A können am einfachsten ermittelt werden, indem man die Beschleunigungen im Kupplungspunkt einmal ohne Kupplungskraft und dann jeweils unter Vorgabe einer Normkomponente der Kupplungskraft numerisch berechnet. Da diese Matrizen auch die momentane Fahrzeugstellung sowie die Bewegungszustände des jeweiligen Fahrzeugs beinhalten, müssen diese für jeden Zeitschritt neu berechnet werden.

Zusätzlich gilt außerdem die Gleichgewichtsbedingung für die Kupplungskräfte:

$$K_{xA} = -K_{xZ} \tag{A6-90}$$

$$K_{yA} = -K_{yZ} \tag{A6-91}$$

$$K_{zA} = -K_{zZ} \tag{A6-92}$$

sowie die Gleichheit der Fahrzeugbeschleunigungen im Kupplungspunkt.

$$\ddot{x}_{KZ} = \ddot{x}_{KA} \tag{A6-93}$$

$$\ddot{y}_{KZ} = \ddot{y}_{KA} \tag{A6-94}$$

$$\ddot{z}_{KZ} = \ddot{z}_{KA} \tag{A6-95}$$

Somit erhält man ein System von zwölf linearen Gleichungen, das direkt gelöst werden kann. Als Ergebnis erhält man somit die drei Komponenten der Kupplungskraft, die nun als externe Kräfte für die explizite Berechnung des nächsten Zeitschrittes vorgegeben werden können. Die Integration erfolgt für Zugfahrzeug und Anhänger getrennt. Über eine automatische Kontrolle der Positionen des Kupplungspunktes für Fahrzeug und Anhänger kann das Ergebnis kontrolliert werden.

4.2 Sattelkraftfahrzeuge

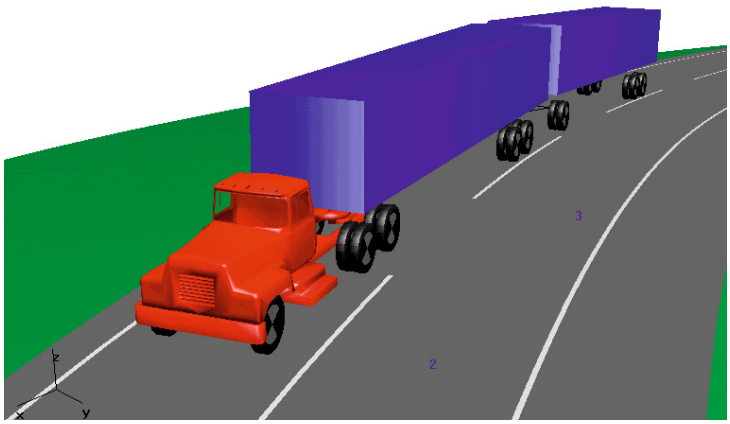


Bild A6-8
Das Sattelkraftfahrzeug

Da Sattelkraftfahrzeuge prinzipiell die gleiche Kinematik aufweisen wie ungelenkte Anhänger, werden diese auch gleich behandelt. Es muss lediglich darauf geachtet werden, dass die Lage des Kupplungspunktes richtig vorgegeben wird.

4.3 Der gelenkte Anhänger

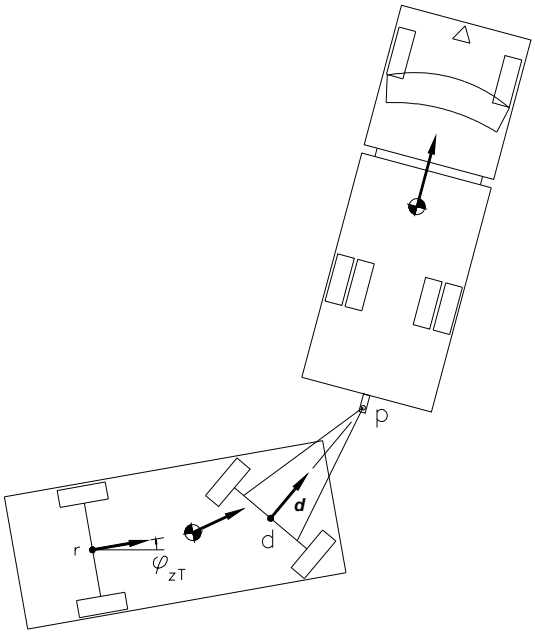


Bild A6-9 Der gelenkte Anhänger

Bei gelenkten Anhängern ist der Kupplungspunkt nicht starr mit dem Anhänger verbunden. Er befindet sich an einer Deichsel (Länge L_D), die über ein horizontal liegendes Drehgelenk mit der Vorderachse des Anhängers verbunden ist. Die Vorderachse des Anhängers wiederum, die als Starrachse ausgeführt ist, ist über ein vertikal angeordnetes Drehgelenk mit dem Anhänger verbunden. Diese drehbar gelagerten Teile, bestehend aus Vorderachse, deren Aufhängung und dem Drehgelenk werden auch Drehschemel genannt.

Da die Massen und Trägheitsmomente der Vorderachse sowie der Deichsel immer wesentlich geringer sind als die des gesamten Anhängers, wurden sie in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, ihre Masse wurde vielmehr der gesamten Masse des Anhängers zugezogen.

In dieser Arbeit wurde außerdem der Einfluss des horizontal liegenden Drehgelenks vernachlässigt. Es wurde angenommen, dass die Deichsel immer horizontal liegt und somit die vertikale Kraftkomponente verschwindet.

Da sich die Wirkungslinien der Radseitenkräfte der gelenkten Achse des Anhängers mit der vertikalen Drehachse des Drehschemels schneiden, wird durch diese Kräfte auf den Drehschemel kein Moment bezüglich dieser Achse erzeugt.

Sind außerdem die Radumfangskräfte der beiden Räder an der gelenkten Achse gleich groß, so hebt sich auch deren resultierendes Moment bezüglich der Schemeldrehachse auf. Unter diesen Bedingungen zeigt sich unmittelbar, dass ein Gleichgewichtszustand für den Drehschemel nur existiert, wenn die resultierende Kupplungskraft horizontal liegt und Ihre Wirkungslinie die Schemeldrehachse schneidet. Somit kann die Kupplungskraft durch eine Resultierende K_D ersetzt werden, die in Richtung der Deichselachse wirkt.

$$K_x = K_D \cos(\varphi_{zD}) \tag{A6-96}$$

$$K_y = K_D \sin(\varphi_{zD}) \tag{A6-97}$$

$$K_z = 0 \tag{A6-98}$$

Für das Zugfahrzeug erhält man zunächst die Beschleunigung im Kupplungspunkt aus

$$\ddot{x}_{KZ} = \ddot{x}_{mZ} + \ddot{\phi}_Z \times x_{KmZ} + \dot{\phi}_Z \times (\dot{\phi}_Z \times x_{KmZ}) \tag{A6-99}$$

bzw. in Richtung der Deichselachse aus:

$$\ddot{d}_{KZ} = \ddot{x}_{KZ} \cos(\varphi_{zD}) + \ddot{y}_{KZ} \sin(\varphi_{zD}) \tag{A6-100}$$

Für den Anhänger berechnet man zunächst die Beschleunigungen im Drehschemellager aus

$$\ddot{x}_{DA} = \ddot{x}_{mA} + \ddot{\phi}_A \times x_{DmA} + \dot{\phi}_A \times (\dot{\phi}_A \times x_{DmA}) \qquad \text{(A6-101)}$$

bzw. in Richtung der Deichselachse aus:

$$\ddot{d}_{DA} = \ddot{x}_{DA} \cos(\varphi_{zD}) + \ddot{y}_{KA} \sin(\varphi_{zD}) \qquad \text{(A6-102)}$$

Zusätzlich erhält man in dieser Richtung noch einen weiteren Beitrag als Folge der Drehung der Deichsel zum Anhänger.

$$\ddot{d}_{KA} = \ddot{d}_{DA} - L_D \dot{\varphi}_{zD}^2 \qquad \text{(A6-103)}$$

Hierbei zeigt sich wiederum, dass für Zugfahrzeug und Anhänger ein linearer Zusammenhang zwischen der Beschleunigung im Kupplungspunkt und der Kupplungskraft, jeweils in Deichselrichtung gesehen, besteht.

Somit können nun folgende Gleichungen für das Zugfahrzeug und den Anhänger angesetzt werden, die die Beschleunigungen der Fahrzeuge im Kupplungspunkt als Funktion der Kupplungskräfte beschreiben:

$$\ddot{d}_{KZ} = C_Z + C_{DZ} K_{DZ} \qquad \text{(A6-104)}$$

Für den Anhänger erhält man in gleicher Form:

$$\ddot{d}_{KA} = C_A + C_{DA} K_{DA} \qquad \text{(A6-105)}$$

Hierin beschreibt

$\ddot{d}_{KZ}$, $\ddot{d}_{KA}$ die Beschleunigungskomponenten des Kupplungspunktes in Deichselrichtung für Zugfahrzeug und Anhänger.

$\ddot{d}_{DA}$ die Beschleunigungskomponente der Schemelachse in Deichselrichtung für den Anhänger.

K_{DZ} die in Deichselrichtung wirkende Komponente der Kupplungskraft am Zugfahrzeug.

K_{DA} die in Deichselrichtung wirkende Komponente der Kupplungskraft am Anhänger.

C_Z, C_{DZ} die Koeffizienten des linearen Zusammenhangs zwischen Kraft und Beschleunigung für Zugfahrzeug und

C_A, C_{DA} Anhänger

Die Koeffizienten C_Z und C_A können am einfachsten ermittelt werden, indem man die Beschleunigungen im Kupplungspunkt einmal ohne Kupplungskraft und dann jeweils unter Vorgabe einer Normkomponente der Kupplungskraft numerisch berechnet. Da diese Gleichungen auch die momentane Fahrzeugstellung sowie die Bewegungszustände des jeweiligen Fahrzeugs beinhalten, müssen diese für jeden Zeitschritt neu berechnet werden.

Zusätzlich gilt außerdem die Gleichgewichtsbedingung für die Kupplungskraft:

$$K_{DZ} = -K_{DA} \qquad \text{(A6-106)}$$

sowie die Gleichheit der Fahrzeugbeschleunigungen im Kupplungspunkt.

$$\ddot{d}_{KZ} = \ddot{d}_{KA} \qquad \text{(A6-107)}$$

Aus diesen Gleichungen kann die Kupplungskraft direkt berechnet werden. Diese wird nun als externe Kraft für die explizite Berechnung des nächsten Zeitschrittes vorgegeben. Werden die beiden Vorderräder jedoch ungleichmäßig gebremst, so ergibt sich auf den Drehschemel zu-

sätzlich ein resultierendes Moment bezüglich der Schemeldrehachse. Unter Vernachlässigung der Trägheit des Schemels und der Deichsel resultiert dieses Moment in einer zusätzlichen Komponente der Kupplungskraft, die orthogonal zur Deichsel- und Schemelachse steht.

Sie kann direkt aus der Differenz der Radumfangskräfte berechnet werden:

$$K_M = \Delta F_u \frac{B_S}{L_D} \tag{A6-108}$$

mit:

ΔF_u Differenz der Radumfangskräfte
B_S Spurweite der gelenkten Achse

Die neue Richtung der Anhängerdeichsel wird nach der Integration der Bewegungsgleichungen aus den geometrischen Positionen von Kupplungspunkt und Drehschemelachse berechnet.

4.4 Die Vorgabe von Anfangsbedingungen bei Hängergespannen

Da bei dieser Art der Anhängerkoppelung nur die Beschleunigungen im Kupplungspunkt berechnet werden, müssen die Anfangsbedingungen so gewählt werden, dass bei Beginn der Berechnung einerseits die Koordinaten, aber auch die Geschwindigkeiten des Kupplungspunktes von Zugfahrzeug und Anhänger übereinstimmen.

Somit berechnen sich zunächst die Koordinaten des Massenmittelpunktes des ungelenkten Anhängers aus:

$$x_{mA} = x_{mZ} + x_{mKZ} + x_{KmA} \tag{A6-109}$$

Hierin beschreibt

x_{mA} Koordinaten des Massenmittelpunktes des Anhängers im Inertialsystem
x_{mZ} Koordinaten des Massenmittelpunktes des Zugfahrzeugs im Inertialsystem
x_{mKZ} Vektor Massenmittelpunkt Kupplungspunkt des Zugfahrzeugs im Inertialsystem
x_{KmA} Vektor Kupplungspunkt Massenmittelpunkt des Anhängers im Inertialsystem

Der ursprünglich vorgegebene Drehwinkel zwischen Fahrzeug und Anhänger bleibt somit erhalten und die Position des Anhängers wird aus der Position des Zugfahrzeugs berechnet.

Für den gelenkten Anhänger erhält man:

$$x_{mA} = x_{mZ} + x_{mKZ} + x_{KDA} + x_{DmA} \tag{A6-110}$$

Hierin beschreibt

x_{mA} den Ortsvektor des Massenmittelpunktes des Anhängers im Inertialsystem
x_{mZ} den Ortsvektor des Massenmittelpunktes des Zugfahrzeugs im Inertialsystem
x_{mKZ} den Vektor Massenmittelpunkt – Kupplungspunkt des Zugfahrzeugs im Inertialsystem
x_{KDA} den Vektor Kupplungspunkt – Drehgelenk der Vorderachse des Anhängers im Inertialsystem
x_{DmA} den Vektor Drehgelenk der Vorderachse – Massenmittelpunkt des Anhängers im Inertialsystem

Bei der Berechnung des Geschwindigkeitszustands des Anhängers muss ebenfalls zwischen ungelenktem und gelenktem Anhänger unterschieden werden. Prinzipiell gibt es unendlich viele Bewegungszustände für den Anhänger, die die Bedingung gleicher Geschwindigkeiten im Kupplungspunkt erfüllen.

4.4.1 Anfangsbedingungen für den ungelenkten Anhänger

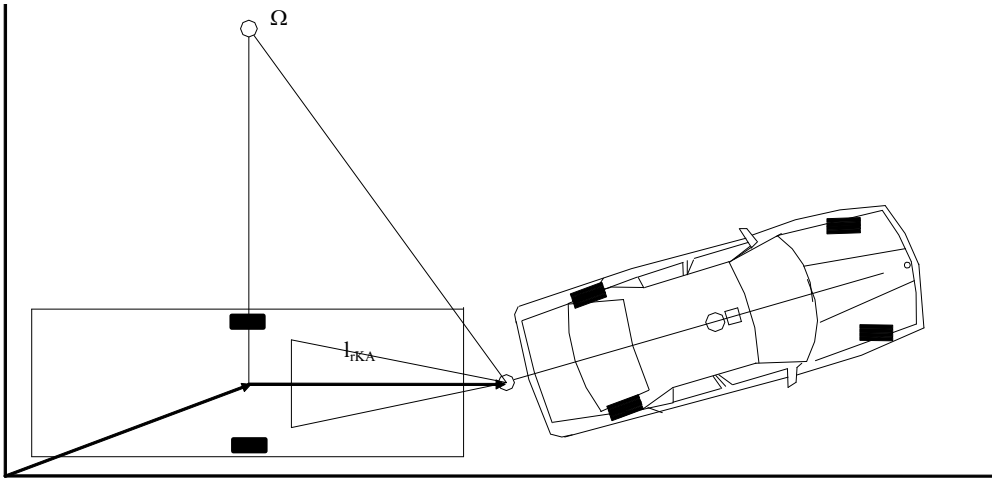


Bild A6-10 Der ungelenkte Anhänger

In dieser Arbeit wurde für die Berechnung des Geschwindigkeitszustands des ungelenkten Anhängers angenommen, dass sich der Schwerpunkt, der von allen Radaufstandspunkten umschriebenen Fläche (x_{RA}) in Fahrzeuglängsrichtung bewegt. Außerdem wird vorausgesetzt, dass das Fahrzeug keine Nick- und Wankbewegungen ausführt. Für den Momentanpol der Bewegung des Anhängers ergibt sich somit, dass dieser auf einer Geraden normal zur Anhängerlängsrichtung, die durch den mittleren Radaufstandspunkt x_{RA} geht, liegt. Die Geschwindigkeit des Kupplungspunktes des Zugfahrzeugs berechnet sich zunächst aus:

$$\dot{x}_{KZ} = \dot{x}_{mZ} + \omega_Z \times x_{mKZ} \qquad \text{(A6-111)}$$

Hierin beschreibt

$\dot{x}_{KZ}$	Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes des Zugfahrzeugs im Inertialsystem
ω_Z	Winkelgeschwindigkeit des Zugfahrzeugs
x_{mKZ}	Vektor Massenmittelpunkt – Kupplungspunkt des Zugfahrzeugs im Inertialsystem

Nun kann die Schwerpunktsgeschwindigkeit des Anhängers sowie dessen Winkelgeschwindigkeit ermittelt werden. Zunächst erhält man die Komponente der Geschwindigkeit des Anhängers im Kupplungspunkt in Richtung der Deichsel durch Transformation der Geschwindigkeit des Kupplungspunktes ins anhängerfeste Koordinatensystem:

$$v_{KAl} = \dot{x}_{KZ}\cos(\varphi_{zA}) + \dot{y}_{KZ}\sin(\varphi_{zA}) \qquad \text{(A6-112)}$$

Beziehungsweise quer zur Deichsel

$$v_{KAq} = -\dot{x}_{KZ}\sin(\varphi_{zA}) + \dot{y}_{KZ}\cos(\varphi_{zA}) \qquad \text{(A6-113)}$$

Die Winkelgeschwindigkeit erhält man nun aus

$$\dot{\varphi}_{zA} = \frac{v_{KAq}}{l_{RKA}} \qquad \text{(A6-114)}$$

Hierin beschreibt

v_{KAl}, v_{KAq}	die Geschwindigkeitskomponenten des Anhängers im Kupplungspunkt in dessen Längs- und Querrichtung
$\dot{x}_{KZ}, \dot{y}_{KZ}$	die Komponenten der Geschwindigkeit des Kupplungspunktes im Inertialsystem
φ_{zA}	Drehwinkel des Anhängers um die z-Achse
l_{RKA}	den Abstand zwischen dem Kupplungspunkt und dem gemittelten Radaufstandspunkt

Der Bewegungszustand des Anhängers kann somit wie folgt beschrieben werden:

$$\omega_A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_{zA} \end{pmatrix} \tag{A6-115}$$

und

$$\dot{x}_{RA} = \begin{pmatrix} v_{KAl}\cos(\varphi_{zA}) \\ v_{KAl}\sin(\varphi_{zA}) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{A6-116}$$

Die Schwerpunktsgeschwindigkeit des Anhängers erhält man aus:

$$\dot{x}_{mA} = \dot{x}_{RA} + \omega_A \times x_{RmA} \tag{A6-117}$$

wobei x_{RmA} den Vektor vom gemittelten Radaufstandspunkt zum Massenmittelpunkt des Anhängers beschreibt.

4.4.2 Anfangsbedingungen für den gelenkten Anhänger

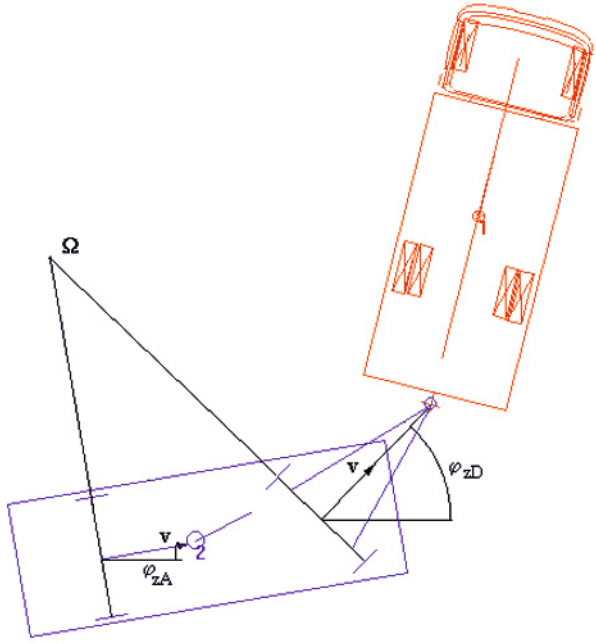


Bild A6-11
Kinematik des gelenkten Anhängers

Die Geschwindigkeit des Kupplungspunktes des Zugfahrzeugs berechnet sich analog wie beim ungelenkten Anhänger aus:

$$\dot{x}_{KZ} = \dot{x}_{mZ} + \omega_Z \times x_{mKZ} \tag{A6-118}$$

Den nächsten Schritt bildet die Berechnung der Geschwindigkeitskomponenten des Deichseldrehpunktes im Inertialsystem. Hierbei wurde ebenfalls vorausgesetzt, dass weder Anhänger noch Zugfahrzeug Nick- oder Wankbewegungen ausführen.

$$\dot{x}_D = \left(\dot{x}_{KZ}\cos(\varphi_{zD}) + \dot{y}_{KZ}\sin(\varphi_{zD})\right)\cos(\varphi_{zD}) \tag{A6-119}$$

$$\dot{y}_D = \left(\dot{x}_{KZ}\cos(\varphi_{zD}) + \dot{y}_{KZ}\sin(\varphi_{zD})\right)\sin(\varphi_{zD}) \tag{A6-120}$$

Aus diesen kann nun der Geschwindigkeitszustand des Anhängers berechnet werden

$$\omega_A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_{zA} \end{pmatrix} \tag{A6-121}$$

mit:

$$\dot{\varphi}_{zA} = \frac{-\dot{x}_D \sin(\varphi_{zA}) + \dot{y}_D \cos(\varphi_{zA})}{l_{RD}} \tag{A6-122}$$

und

$$\dot{x}_{RA} = \begin{pmatrix} \left(\dot{x}_D \cos(\varphi_{zA}) + \dot{y}_D \sin(\varphi_{zA})\right)\cos(\varphi_{zA}) \\ \left(\dot{x}_D \cos(\varphi_{zA}) + \dot{y}_D \sin(\varphi_{zA})\right)\sin(\varphi_{zA}) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{A6-123}$$

mit:

$\dot{x}_D, \dot{y}_D$	den Komponenten der Geschwindigkeit des Deichseldrehpunktes im Inertialsystem
φ_{zD}	dem Drehwinkel der Deichsel um die z-Achse
φ_{zA}	dem Drehwinkel des Anhängers um die z-Achse
l_{RD}	dem Abstand zwischen dem Deichseldrehpunkt und dem gemittelten Radaufstandspunkt der ungelenkten Achsen

Die Schwerpunktsgeschwindigkeit des Anhängers erhält man gleich wie beim ungelenkten Anhänger aus:

$$\dot{x}_{mA} = \dot{x}_{RA} + \omega_A \times x_{RAm} \tag{A6-124}$$

wobei x_{RAm} den Vektor vom gemittelten Radaufstandspunkt zum Massenmittelpunkt des Anhängers beschreibt.

5 Zur Berechnung der Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahn

5.1 Einführung

Bei der mathematischen Simulation kommt der Nachbildung der Wirkung der Kräfte in der Reifenaufstandsfläche die größte Bedeutung zu. Die Kraftfahrzeugindustrie muss immer höheren Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit ihrer Produkte gerecht werden. Damit verbunden ist die Notwendigkeit, weitere detaillierte Kenntnisse über die sicherheitsrelevanten Bauteile eines Fahrzeugs zu erhalten. Die Fahrzeugeigenschaften des Fahrzeugs werden optimal an den Fahrer angepasst, der Wagen soll immer gut kontrollierbar bleiben und sein Verhalten in allen Situationen vorhersehbar sein. Diese Ansprüche können unter dem Begriff „dynamische Fahrsicherheit“ (Dynamic Safety) zusammengefasst werden. Zur Erreichung dieses Ziels müssen Fahrstabilität, Lenkung und Bremsverhalten abgestimmt werden. Konstruktive Maßnahmen am Fahrgestell und am Reifendesign sind dafür notwendig.

Eine entscheidende Rolle hierbei spielt der Reifen als Verbindungsglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn. Sein Verhalten entscheidet letztlich darüber, wie sicher Brems- und Lenkkräfte übertragen werden können. Um den Einfluss der Reifen auf das Fahrzeugverhalten besser kontrollieren und vorhersagen zu können, wurden schon über Jahrzehnte hinweg umfangreiche Fahrverhaltensstudien und Messungen durchgeführt, Simulationsprogramme wurden erarbeitet. Ein wichtiger Schritt bei solchen Untersuchungen ist die Entwicklung eines geeigneten Simulationsmodells für die Reifeneigenschaften.

Gerade die Beschreibung der Eigenschaften der Reifen erfordert hohen mathematischen Aufwand. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass die Reibungsgesetze der klassischen Mechanik (Coulombsche Reibung) beim Reifen, wie er bei Automobilen Verwendung findet, nicht angewendet werden können. Gummi ist kein starrer Körper, sondern besitzt viskoelastische Eigenschaften von hoher Komplexität [1], [2], [3]. Einen ganz bestimmten Kraftschlussbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn gibt es deshalb nicht. Nach der Theorie der Gummireibung setzt sich die momentan übertragene Reibkraft aus den folgenden vier Komponenten zusammen:

- Adhäsionskomponente (Scherung molekularer Bindungen),
- Hysteresekomponente (Verformung des Gummis),
- Viskosekomponente (Scherung einer Flüssigkeitsschicht in der Kontaktfläche),
- Kohäsionskomponente (Energieverluste durch Abrieb oder Einrisse).

Für die Fahrbewegung des Fahrzeugs ist die Adhäsionskomponente der Reifen von primärer Bedeutung. Ihr Maximum tritt bei sehr kleinen Gleitgeschwindigkeiten auf. Diese sind im normalen Fahrbetrieb im Bereich von Antriebs- und Bremsschlupf vorhanden. Dabei ist die Erkenntnis von Bedeutung, dass ohne Schlupf keine Kraft übertragen wird.

Die Eigenschaften von Reifen werden auf Prüfständen ermittelt. Die übertragbaren Kräfte werden als Funktion von Schlupf oder Schräglaufwinkel gemessen. Weiteren Einfluss haben: Fahrbahnbeschaffenheit, Fahrbahnzustand, Fahrzeug- und Reifenzustand und Fahrzustand.

Bei der Fahrbahnbeschaffenheit ist an die verwendeten Materialien in der Fahrbahnoberfläche zu denken, an das Alter der Fahrbahndecke, die Verkehrsbelastung, die Jahreszeit und an die Mikro- und Makrorauhigkeit. Von den Straßenbauern wurden verschiedene Messverfahren entwickelt, die zur Überwachung der Fahrbahngriffigkeiten dienen, d. h., es wird damit unter

anderem geprüft, wann Fahrbahndecken ersetzt werden müssen. Bauarten und Besonderheiten der Geräte sind der anliegenden Tabelle aus der Literaturstelle [5] zu entnehmen.

Der Fahrbahnzustand beschreibt die konkrete Art der Oberfläche, d. h. trockene, nasse, verschneite, vereiste oder verunreinigte Fahrbahn.

Beim Fahrzeug- und Reifenzustand ist an die konstruktive Gestaltung, die Achsaufhängung, die Reifendimension, die Profilgestaltung, den Reifeninnendruck u. a. zu denken.

Beim Fahrzustand spielen Fahrgeschwindigkeit, Längs- und Querbeschleunigung, Fahrzeugschwingungen und alle Fahreraktivitäten eine Rolle. Sie wirken sich auf die Radlast und auf Schlupf und Schräglauf als transiente Funktion aus.

5.2 Messtechnische Erfassung der Reifeneigenschaften

Üblich ist für die Vermessung der Reifeneigenschaften und der Reifenkennlinien der Einsatz von Prüfmaschinen wie Innen- oder Außentrommelprüfstand und Flachbandprüfstand. Bei diesen Maschinen kann ein Rad (Reifen mit Felge) auf die sich drehende Trommel oder ein laufendes Band gedrückt werden. Das Rad kann angetrieben, gebremst, gelenkt oder geneigt werden. Die Radlast kann variiert werden.

Es entstehen dabei die typischen Kennlinien wie aus den Anlagen ersichtlich. Diese Kennlinien müssen nun in analytischer oder numerischer Form vorliegen, damit sie in Simulationsprogrammen eingesetzt werden können. Für die mathematische Darstellung der Reifeneigenschaften gibt es unterschiedlichste Ansätze in der Fachliteratur. Zu unterscheiden sind geschlossene Lösungen, die zahlreiche Vereinfachungen beinhalten können und iterative Verfahren, bei denen Messdaten eingegeben und Zwischenwerte punktweise bestimmt werden.

5.3 Mathematische Ersatzmodelle für Reifen

Die Ersatzmodelle zur Beschreibung von Umfangskraft über Schlupf und Seitenkraft über Schräglauf können beliebige Komplexität aufweisen. Notwendig für eine hinreichend genaue Beschreibung der Reifeneigenschaften ist die Darstellung der Abhängigkeit der übertragenen Umfangskraft abhängig vom Schlupf und der Reifenseitenkraft abhängig vom Schräglaufwinkel. Beide hängen erheblich von der Radlast ab. Deshalb gibt es Reifen mit bestimmter Tragfähigkeit.

Die Reifentragfähigkeit ergibt sich aus der Reifenbezeichnung. Einzelheiten dazu sind dem ETRTO Standards Manual zu entnehmen [4]. Dort finden sich auch Hinweise über die Veränderung der Reifentragfähigkeit abhängig vom Reifeninnendruck. Näherungsweise kann man sagen, dass pro 0,1 bar Druckänderung eine Änderung der Reifentragfähigkeit von 100 N eintritt.

Der Verlauf der Reifenseitenkraft über dem Schräglauf ist stark von der Reifenkonstruktion abhängig, jedoch auch von der Radlast, vom Reifeninnendruck und vom Sturz. Die Schwierigkeit liegt in der mathematischen Nachbildung dieser Kennlinie. Verschiedene Ansätze wurden veröffentlicht, manche Ansätze werden als Know-how von Entwicklern von Simulationsmodellen verstanden.

5.4 Modellbildung

Vor der Modellbildung muss entschieden werden, welche Einflüsse und Faktoren berücksichtigt werden sollen und von welchen anzunehmen ist, dass sie das Modell hinsichtlich der Fragestellung nicht nachhaltig beeinflussen. Modelle dieser Art können in ihrer vereinfachten Form daran mitwirken, Problembereiche einzugrenzen, um sich dann auf die relevanten Fragen zu konzentrieren.

Die Reifeneigenschaften können auf verschiedene Arten dargestellt und in Programmen auch verabeitet werden:

- Darstellung durch Tabellen,
- Darstellung durch Graphen,
- Darstellung durch Formeln.

Die ersten beiden Möglichkeiten sind recht umständlich in der Handhabung. Die Auswertung erfordert eventuell einen sehr hohen Aufwand oder kann vor allem bei Graphen eine notwendige Genauigkeit nicht erfüllen. Die beste Handhabung bietet die dritte Möglichkeit, nämlich die Verwendung einer geschlossenen Formel.

Bei einer Entscheidung zugunsten der Formel besteht die Wahl zwischen:

- Formeln, welche Reihen enthalten, z. B. Fourieransätze oder Polynome n-ten Grades, oder
- Formeln, welche spezielle Modellfunktionen enthalten.

Die Verwendung von Reihen birgt einige Nachteile:

- Relativ viele Koeffizienten werden benötigt, um eine geschlossene Kurve an eine Menge von Daten anzupassen.
- Das Extrapolieren über den anzupassenden Bereich hinaus kann sehr große Abweichungen mit sich bringen.

Die Koeffizienten beschreiben die Messgrößen im Allgemeinen nicht in einer erkennbaren Art und Weise, mit der es möglich wäre, die Werte kontrolliert und zielgerichtet zu verändern.

Der beste Weg, die genannten Nachteile zu umgehen, führt über eine auf das Problem zugeschnittene Modellfunktion. Diese sollte durch ihre besondere Struktur fähig sein, die gemessenen Daten mit einer großen Genauigkeit zu beschreiben. Darüber hinaus sollte sie Parameter besitzen, die sich auf die typischen Größen der Messdaten beziehen.

Um die aufgenommenen Daten leichter verarbeiten zu können und dabei eine schnelle und einfache Simulation der gemessenen Werte auf dem Rechner zu ermöglichen, sollte das Reifenmodell vor allem Folgendes beschreiben können:

- die Umfangskraft F_x als Funktion der Schlupfes χ,
- die Seitenkraft F_y als Funktion des Schräglaufwinkels α,
- das Rückstellmoment M_z als Funktion von α.

Dabei sollte das Modell folgende Anforderungen erfüllen:

- Es muss stationäres und dynamisches Verhalten beschreiben können.
- Die Koeffizienten sollten einfach aus Messungen zu erhalten sein.

- Es muss physikalisch sinnvoll sein, d. h., die Parameter sollten charakteristische Größen des Reifens beschreiben, um Rückschlüsse auf das Stabilitätsverhalten durch deren Veränderung ziehen zu können.
- Die Anzahl der Parameter sollte nicht zu groß sein, damit die Formel kompakt und einfach zu handhaben ist.
- Das Modell muss die Messwerte genau nachbilden.

Literatur

[1] Schieschke, R.: RALPHS – ein effizientes Rechenmodell zur Ermittlung von Reifenkräften auf physikaler Basis, Automobil-Industrie 4/86

[2] Schieschke, R., Gnadler, R.: Modellbildung und Simulation von Reifeneigenschaften, VDI-Berichte 650, VDI-Verlag Düsseldorf 1987

[3] Schieschke, R. Wurster, U.: IPG-TIRE – ein umfassendes, effizientes Reifenmodell zum Einsatz, in Simulationsumgebungen Automobil-Industrie 5/88

[4] Schieschke, R.: Zur Relevanz der Reifendynamik in der Fahrzeugsimulation, VDI-Berichte 778, VDI-Verlag Düsseldorf 1989

[5] Schieschke, R.: The Importance of Tire Dynamics in Vehicle Simulations, Nineth Annual Meeting and Conference on Tire Science and Technology, March 20–21, 1990 in Akron, Ohio

[6] Schieschke, R.: The Relevance of Tire Dynamics in Vehicle Simulations, XXIII FISITA Congress, May 7–11, 1990 in Torino, Italy

[7] Schieschke, R.: Reifendynamik, Fahrzeugstabilität und Allradlenkung – eine Unterschulung mit IPG-TIRE, Automobil-Industrie 3/91

[8] Schieschke, R., Hiemenz, R.: The Decisive Role the Quality of Tyre Approximation Plays in Vehicle Dynamics Simulations Proceeding 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, held in Delft, the Netherlands, October 21–22, 1991 Supplement to Vehicle System Dynamics, Volume 21

[9] Schieschke, R.: Zusammenwirken von Reifendynamik und Allradlenkung zur Verbesserung der Fahrzeugstabiltität, Tagung: Allradlenksysteme bei Personalwagen, Haus der Technik, Essen, 3.–4. Dezember 1991

[10] Wang, Y, Q., Gnadler, R., Schieschke, R.: Two-Dimensional Contact Area of a Pneumatic Tire Subjected to a Lateral Force Vehicle System Dynamics to be published

6 Grobe Einteilung der Reifenmodelle

6.1 Linearisierte Beschreibung

Die Seitenkräfte der Vorder- bzw. Hinterachsen werden mit einer linearen Funktion beschrieben.

6.2 Nichtlineare Approximation gemessener Kennfelder

Bei der Beschreibung der Kraftübertragung werden die spezifischen Eigenschaften eines Reifens betrachtet. Die physikalischen Eigenschaften werden jedoch nur als Grundinformation verwendet. Die Tatsache, dass die Kraft-und Momentenverläufe qualitativ ähnliche Kurvenformen besitzen, lässt eine analytische Beschreibung der Kennfelder zu. Die gefundene Basiskurve stellt die Grundlage für die analytische Approximation dar.

6.3 Einfache Deformationsmodelle

Bei dieser Art der Modellierung des Reifens geht man von einem gegen die Felge elastisch gebetteten Ring oder Band als Ersatz für den Gürtel mit Protektor aus. Diese Reifenmodelle können auch bei instationären Vorgängen (zumindest bei kleinen Schräglaufwinkeln und Verstellgeschwindigkeiten) verwendet werden.

6.4 Strukturmodelle

Die Modellbildung geht auf den komplexen Aufbau des Reifens ein und beinhaltet eine detaillierte Betrachtung des Reifenlatsches. Der Rechenaufwand ist bei diesen Modellen beträchtlich, besonders bei FE-Modellierungen des ganzen Reifens (z. B. Gipser, Böhm). Sie werden deshalb vor allem für Untersuchungen des dynamischen Verhaltens der Reifen eingesetzt.

6.5 Realisierte und angewandte Modelle nach Autoren

Lugner beschreibt ein rein mathematisches Modell zur Nachbildung von Messergebnissen. Diesem Ansatz liegt die Absicht zugrunde, die Messkurven durch verzerrte ellipsenartige Kurven zu ersetzen, deren Mittelpunkte gegen den Koordinatenursprung entsprechend verschoben, deren Achsen gegen die Koordinatenachsen entsprechend geneigt und deren Halbachsen in Abhängigkeit des Schräglaufwinkels und der Radlast den Messergebnissen angepasst sind. [4]

Bakker, Nyborg, Pacejka gehen, basierend auf den physikalischen Haft- und Gleiteigenschaften von Gummi, von einer gleichen Kurvenform für Seitenkraft-Rückstellmoment-Schräglaufwinkel-Messungen und Umfangskraft-Schlupf-Messungen aus. Diese Messkurven werden mit einer gegen den Reibwert für reines Gleiten konvergierenden Sinus-Funktion (Magic Formula) nachgebildet. [5]

Schieschke und Wurster entwickelten das Modell IPG-Tyre. Hier werden physikalische Grundüberlegungen und die Approximierungen an die jeweilige Messung sinnvoll verknüpft. Die Approximation erfolgt hier durch Spline-Polynome der 4. Ordnung. Durch dieses Verfahren wird eine Glättung der Messkurven erreicht. Damit bleiben stochastische Fehler nahezu

unberücksichtigt. Die Kombination von Längs- und Querschlupf wird über den so genannten Weber'schen-Reibungskuchen ermittelt. [6]

Burckhardt schlägt zur Nachbildung von gemessenen Kraftschlusskurven einen Ansatz mit einer e-Funktion vor. Die Parameter besitzen hier keine physikalische Bedeutung. Außerdem werden in diesem Reifenmodell der Fahrbahnzustand und die Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt. [7]

Ammon bildet das Reifenverhalten mit einem rein mathematischen Ansatz nach. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Modellen ergeben sich die Parameter direkt aus charakteristischen Reifenkenngrößen wie, z. B. die Anfangssteigung oder die Lage des Wendepunkts. [8]

Frank leitet auf der Grundlage der Seil- und Balkenmodelle das stationäre Seitenkraft-Schräglaufwinkelverhalten unter Berücksichtigung der Haft- und Gleitvorgänge im Reifenlatsch her. [9]

Rill beschreibt im Modell „TM-Easy" die Bereiche des Haftens und Gleitens getrennt und mit unterschiedlichen Ansätzen. So wird für den linearen Bereich bis zum Maximum eine rationale Funktion verwendet, für den Bereich hinter dem Maximum dagegen ein kubisches Polynom. Dabei wird der Sturzeinfluss durch Einführung eines modifizierten Querschlupfes berücksichtigt. Für die Modellierung des Rückstellmoments wird in gleicher Weise wie beim Ansatz zur Kraftberechnung der dynamische Reifennachlauf bereichsweise als Funktion des Querschlupfes approximiert. [10]

Segel schlägt ähnlich wie Rill vor, den Bereich des kombinierten Gleitens und Haftens (lineare Approximation) und den Bereich des reinen Haftens (Approximation durch einen konstanten Reibwert) getrennt zu betrachten. In diesem so genannten HSRI-Modell wird eine lineare Abnahme des Reibwerts mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit angenommen. Zusätzlich führt Segel ähnlich wie Burckhardt den so genannten Kraftschlussabnahmefaktor ein, mit dem auch der Fahrbahnzustand berücksichtigt wird. [11]

Literatur

[1] Günter Leister: New Procedures For Tyre Characteristic Measurement. In Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, volume 27, pages 22–36. Swets & Zeitlinger, 1997

[2] C. Dori and W. Halbmann: Messung von Reifenkennfeldern auf dem Prüfstand mit realitätsnaher, stochastischer Belastung. In Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, volume 778. VDI-Berichte, 1989

[3] M. Augustin and H.-J. Unrau: Final Report of Workpackage 2. Technical report, Universität Karlsruhe – Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, 1997

[4] Peter Lugner. Numerische Erfassung von Reifenkennfeldern zur Berechnung von Fahrzeugbewegungen. Automobiltechnische Zeitschrift, 74:17–23, 1972

[5] E. Bakker, L. Nyborg, and H. B. Pacejka: Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies. SAE Technical Paper Series, (870421), 1987

[6] Ralph Schieschke and Uwe Wurster. IPG-TIRE–Ein flexibles, umfassendes Reifenmodell für den Einsatz in Simulationsumgebungen. Automobil-Industrie, 5:495–500, 1988

[7] Manfred Burckhardt: Fahrwerktechnik: Radschlupf-Regelsysteme. Vogel Fachbuch, 1993

[8] Dieter Ammon: Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrzeugdynamik. B. G. Teubner, 1997

[9] F. Frank: Grundlagen zur Berechnung der Seitenführungskennlinien von Reifen. Kautschuk und Gummi. Kunststoffe, 8:515–535, 1965

[10] Georg Rill: Simulation von Kraftfahrzeugen. Vieweg, 1994

[11] L. Segel: The Tire as a Vehicle Component, in Mechanics of Transportation System. ASME AMD, 15, 1975

7 Dynamik von Kraftfahrzeugen

7.1 Gemessene Luftwiderstandsbeiwerte von Einspurfahrzeugen und anderen Fahrzeugen

Zum Vergleich verschiedener Fahrzeugkategorien werden übliche Kleinst- und Größtwerte in **Tabelle A6.1** zusammengestellt. Die Werte stammen aus [5].

Tabelle A6.1 c_W-Werte für verschiedene Fahrzeugkategorien

Fahrzeugkategorie	Kleinstwert	Größtwert
Motorrad-Gespann	0,88	1,10
Formel 1 Rennwagen je nach Abtrieb (6.000 ... 9.000 [N])	0,80	1,00
Dreigliedriger Lkw-Zug	0,60	0,90
KOM	0,50	0,80
Straßenmotorräder	0,55	0,67
Kleintransporter	0,40	0,57
Motorrad-Rennmaschinen	0,47	0,55
Renn-Motorrad-Gespanne	0,43	0,49
Pkw	0,27	0,46
Rennsportwagen der Gruppe C	0,37	0,43
Rekordautos, Rekordmotorräder	0,16	0,24

Beschränkt man die Betrachtung auf Einspurfahrzeuge, so haben Rennmotorräder c_W-Werte im Bereich von 0,47 bis 0,55 und serienmäßige Straßenmotorräder von 0,55 bis 0,67. Bei den serienmäßigen Straßenmotorrädern spielt auch die Sitzhaltung eine Rolle. So treten beispielsweise deutlich höhere Luftwiderstandsbeiwerte auf, als vorstehend genannt, wenn sich ein Motorradführer zur Erhöhung des Luftwiderstandes auf die Fußrasten stellt. Entsprechende Luftwiderstandszahlen aus Windkanalmessungen, die ebenfalls aus [5] stammen, sind in **Tabelle A6.2** zusammengestellt.

Tabelle A6.2 Luftwiderstandszahlen für liegende und sitzende Motorradführerposition

	$c_W \cdot A_F$ [m^2] liegend	$c_W \cdot A_F$ [m^2] sitzend
BMW K 75 S	0,414	0,439
BMW K 100 RS	0,402	0,429
BMW K 100 RT	0,495	–
Honda RS 500 (Rennmaschine)	0,243	–
Honda VFR 750	0,366	0,447
Honda VF 1000 F	0,400	0,455
Kawasaki GPz 900 R	0,361	0,443
Kawasaki 1000 GTR	–	0,605
Kawasaki 1000 RX	0,474	0,354
Suzuki GSX-R 750	0,455	0,410
Suzuki GSR 1100	0,398	0,430
Suzuki GSX-R 1100 EF	0,412	0,444

Beschränkt man die Betrachtung auf die sitzenden Motorradführer, so treten Luftwiderstandszahlen auf, die zwischen 0,35 und 0,61 liegen. Die Extremwerte hängen sicherlich mit der gesamten Umströmung zusammen. Der Mittelwert liegt bei 0,40. Es empfiehlt für Berechnungen im unteren und im mittleren Geschwindigkeitsbereich mit diesem Mittelwert zu rechnen oder mit (27) den mittels der Leistungsbilanz ermittelten Wert für ($c_W \cdot F$) zu verwenden.

7.2 Bremskraftverteilung Grundlagen

7.2.1 Berechnung des Bremsvorgangs eines Personenwagen

7.2.2 Grundlagen

Die Bremskraft wird als Umfangskraft über den Reifen auf die Straße übertragen. Grundlage für alle weiteren Untersuchungen und Berechnungen ist sein Verhalten. Mit ausreichender Genauigkeit kann das Reifenverhalten durch das Coulombsche Gesetz

$$F_B = \mu \cdot F_G$$

beschrieben werden. Der Faktor μ wird als Kraftschlussbeiwert bezeichnet. Seine Größe hängt von der Beschaffenheit des Reifens und der Straßenoberfläche (trocken, nass, vereist ...), vom Schlupfzustand sowie in geringem Maß von der Belastung selbst ab.

7.2.3 Achskraftverteilungsdiagramm

Es gibt in der Literatur verschiedene Formen der Darstellung der Bremskräfte an Vorder- und Hinterachse. Weitgehend üblich und sehr übersichtlich ist eine Darstellungsform in einem Diagramm, bei dem auf der Abszisse die Bremskraft vorne und auf der Ordinate die Bremskraft hinten bezogen auf die Gewichtskraft des Fahrzeugs dargestellt ist. In diesem Diagramm zeichnet man zuerst die Kurve optimaler Bremskraftverteilung, d. h. die Kurve für gleiche Kraftschlussausnutzung an Vorder- und Hinterachse, ein. Zur Herleitung der geltenden Beziehungen werden die auf ein gebremstes, zweiachsiges Fahrzeug wirkenden Kräfte (**Bild A6-12**) betrachtet. Dabei ist vorausgesetzt, dass außer den Massenkräften und den an den Reifen wirkenden Umfangskräften keine weiteren Einwirkungen vorhanden sind. Des weiteren wird vorausgesetzt, dass das Fahrzeug durch die Bremsung weder seine Lage bezüglich der Fahrbahn noch seine Schwerpunktshöhe ändert.

Der Einfluss der Fahrzeug-Aerodynamik auf die ideale Bremskraftverteilung, die hier nicht betrachtet wird, darf bei höheren Geschwindigkeiten nicht mehr vernachlässigt werden. Im unteren Geschwindigkeitsbereich (bis ca. 80 km/h) ist die Auswirkung relativ gering.

Aus dem Schwerpunktsatz ergibt sich:

$$m \cdot a = F_{BV} + F_{BH} \qquad \textbf{(A6-125)}$$

$$m \cdot g = F_G = F_{GV} + F_{GH} \qquad \textbf{(A6-126)}$$

Normierung bzw. Division der beiden Gleichungen liefert:

$$\frac{m \cdot a}{m \cdot g} = \mathbf{z} = \frac{F_{BV}}{F_G} + \frac{F_{BH}}{F_G} \qquad \textbf{(A6-127)}$$

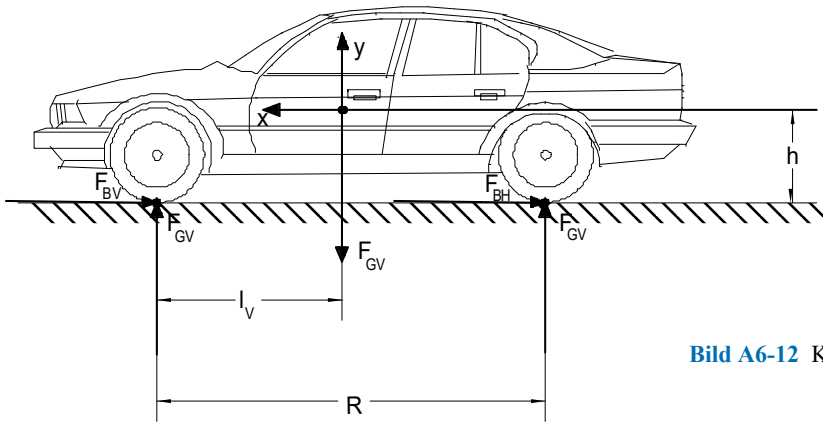


Bild A6-12 Kräfte am Fahrzeug

(Die Abbremsung z, oft auch in % angegeben, ist gleich der auf das Fahrzeuggewicht bezogenen Bremskraft.) Aus dem Drallsatz ist abzuleiten (Momentenbetrachtung um Radaufstandspunkt der Hinterachse):

$$J \cdot \varepsilon = 0 = - \underbrace{F_{GV}}_{F_G - F_{GH}} \cdot l_V + \underbrace{\left(F_{BV} + F_{BH}\right)}_{z \cdot F_{GV}} \cdot h + F_{GV} \cdot \left(R - l_V\right) \qquad \text{(A6-128)}$$

$$0 = -F_G \cdot l_V + F_{GH} \cdot l_V + z \cdot F_G \cdot h + F_{GV} \cdot \left(R - l_V\right)$$

$$F_G \cdot l_V - F_G \cdot z \cdot h = F_{GH} \cdot \left(R - l_V + l_V\right)$$

$$F_{GH} = \frac{l_V - h \cdot z}{R} \cdot F_G \qquad \text{(A6-129)}$$

Auf gleiche Weise ergibt sich:

$$F_{GV} = \frac{R - l_V + h \cdot z}{R} \cdot F_G \qquad \text{(A6-130)}$$

Aus obigen Gleichungen ist zu ersehen, dass sich die Geometrieparameter jeweils auf den Radstand beziehen. Deshalb werden zwei neue Kennzahlen definiert. Diese sind:

- die radstandsbezogene Schwerpunktsrücklage (Abstand des Schwerpunktes von der Vorderachsmitte)

$$\psi = \frac{l_V}{R}$$

- die radstandsbezogene Schwerpunktshöhe (Höhe des Schwerpunktes über der Fahrbahnoberfläche)

$$\chi = \frac{h}{R}$$

(je kleiner χ ist, umso geringer wird die dynamische Achslastverlagerung bei einer Bremsung oder beim Beschleunigen des Fahrzeugs). Durch die Angaben dieser Größen ist der Schwerpunkt eindeutig festgelegt.

Die Gln. (A6-129) und (A6-130) lassen sich nun übersichtlicher schreiben:

$$\frac{F_{GH}}{F_G} = \psi - z \cdot \chi \qquad \text{(A6-131)}$$

$$\frac{F_{GV}}{F_G} = 1 - \psi + z \cdot \chi \qquad \text{(A6-132)}$$

Im Idealfall ist die Kraftschlussausnutzung an Vorder- und Hinterachse gleich groß. Bei gleichen Reifen sind auch die Kraftschlussbeiwerte identisch. Dann gilt:

$$f = f_V = f_H = z \qquad \text{(A6-133)}$$

$$F_{BV} = f \cdot F_{GV} \quad ; \quad F_{BH} = f \cdot F_{GH}$$

Mit dieser Bedingung werden aus den Gln. (A6-132) und (A6-133)Parabelgleichungen in Parameterform.

$$\frac{F_{BH}}{F_G} = z \cdot (\psi - z \cdot \chi) \qquad \text{(A6-134)}$$

$$\frac{F_{BV}}{F_G} = z \cdot (1 - \psi + z \cdot \chi) \qquad \text{(A6-135)}$$

Durch Auflösen der Gleichungen nach der Abbremsung z und Gleichsetzen ergibt sich die geschlossene Form:

$$\frac{F_{BH}}{F_G} = \sqrt{\frac{F_{BV}}{\chi \cdot F_G} + \left(\frac{1-\psi}{2 \cdot \chi}\right)^2} - \frac{1-\psi}{2 \cdot \chi} - \frac{F_{BV}}{F_G} \qquad \text{(A6-136)}$$

Diese Gleichung beschreibt die Parabel der idealen Bremskraftverteilung

Linien konstanter Abbremsung

Aus Gl. (A6-127) folgt sofort:

$$\frac{F_{BV}}{F_G} + \frac{F_{BH}}{F_G} = z \qquad \text{(A6-137)}$$

Die Linien konstanter Abbremsung sind also Geraden, die unter einem Winkel von –45° verlaufen und sowohl die Abszisse als auch die Ordinate im Punkt z schneiden. (Dies ergibt sich durch Null setzen jeweils eines Summanden).

Linien konstanten Kraftschlussbeiwerts

Das Diagramm wird vervollständigt durch die Linien konstanten Kraftschlussbeiwerts für Vorder- bzw. Hinterachse. Da zwischen Bremskraft und Radlast ein linearer Zusammenhang besteht, muss es sich hierbei um Geraden handeln. Diese Geraden müssen unter anderem auch durch die so genannten Ausfallpunkte, also die Punkte des Zustands, bei dem der Vorder- bzw. Hinterachsbremskreis ausfällt, gehen. Diese Ausfallpunkte sind die Schnittpunkte der Linien konstanten Kraftschlussbeiwerts mit den Koordinatenachsen, die nicht auf der Bremsparabel liegen. Für den Zustand, bei dem die Hinterachse keine Kraft mehr überträgt bzw. die Vorderachse alleine bremst, erhält man aus Gl. (A6-137) sofort:

$$\frac{F_{BV}}{F_G} = z$$

Durch Einsetzen von Gl. (A6-135) erhält man:

$$z \cdot (1 - \psi + z \cdot \chi) = z \qquad <=> \qquad z = \frac{\psi}{\chi}$$

Dies ist der Schnittpunkt der Bremsparabel mit der Abszisse. Das heißt, bei einer Abbremsung von

$$z = \psi / \chi$$

ist die Hinterachse dynamisch voll entlastet. Für die Bremskräfte ergibt dies unmittelbar (1. Punkt der Geraden):

$$F_{BH} = 0 \qquad ; \qquad F_{BV} = \frac{\psi}{\chi}$$

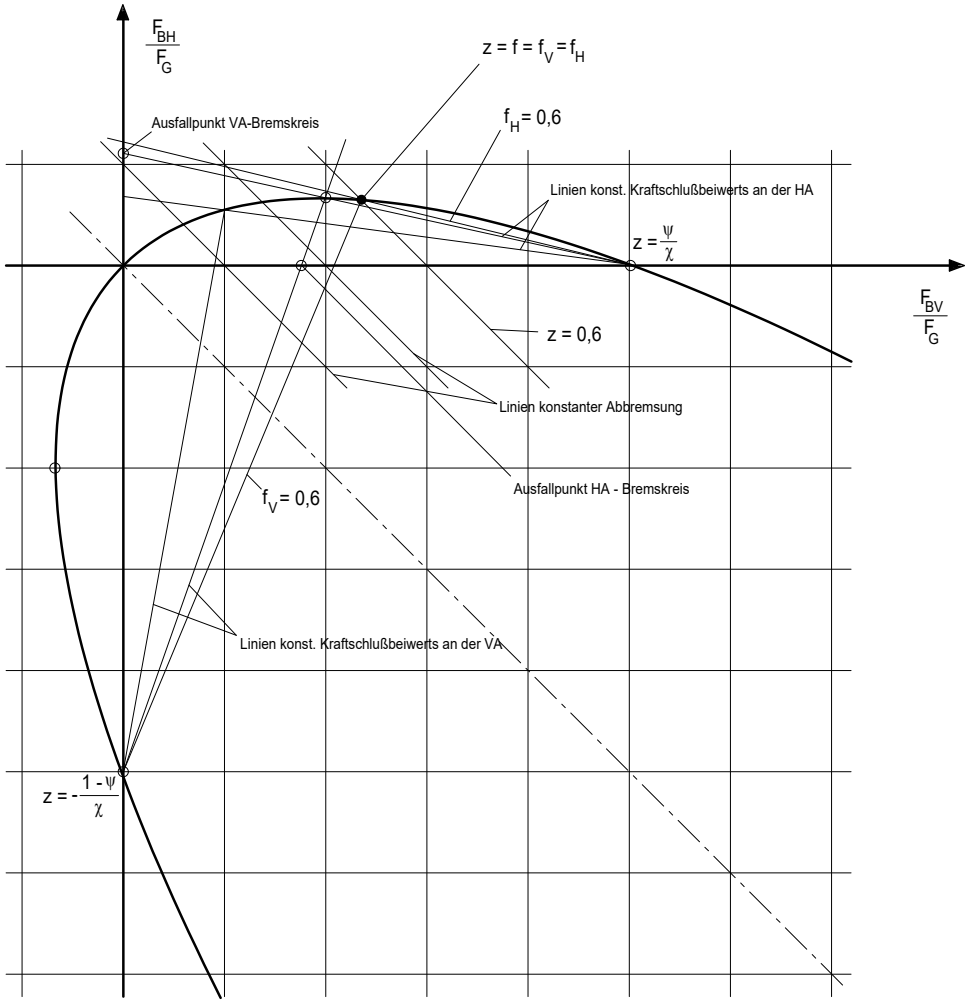


Bild A6-13 Achskraftverteilungsdiagramm: Parabel der idealen Bremskraftverteilung, Linien konstanter Abbremsung und konstanten Kraftschlussbeiwerts

Die Abbremsung z an dieser Stelle muss dem Kraftschlussbeiwert f_V an der Vorderachse entsprechen. Für ein Fahrzeug mit der Schwerpunktlage $\chi << 1,\ \psi \approx 1$ ist dieser Kraftschlussbeiwert schwer zu realisieren. Er könnte jedoch bei einer Schwerpunktlage $\chi \approx 1$ erreichbar sein.

Da nach Gl. (A6-133) für die ideale Bremskraftverteilung die Bedingung $f = f_V = f_H = z$ gilt, ergibt sich als 2. Punkt der Geraden gleichen Kraftschlussbeiwerts der Schnittpunkt der Linie konstanter Abbremsung (z. B. $z = 0{,}6$) mit der Bremsparabel. In analoger Weise erhält man aus den Gln. (A6-137) und (A6-134) für den Zustand, bei dem die Vorderachse keine Kraft mehr überträgt:

$$F_{BV} = 0 \qquad ; \qquad F_{BH} = -\frac{1-\psi}{\chi}$$

Die Abbremsung z an dieser Stelle muss dem Kraftschlussbeiwert f_H der Hinterachse entsprechen. Bei einem angenommenen tiefliegenden Schwerpunkt des Fahrzeugs mit der Schwerpunktslage $\chi << 1,\ \psi \approx 1$ ist der Kraftschlussbeiwert f_H nicht mehr realisieren (negativ). Damit sind alle Größen bekannt, die zur Beschreibung der „äußeren Parameter" des dynamischen Verhaltens eines Fahrzeugs bei geradliniger Bewegung auf ebener, waagerechter Fahrbahn benötigt werden. Das vollständige Diagramm wird in Bild A6-13 gezeigt.

7.2.4 Bremskraftverteilungsdiagramm

Das Bremskraftverteilungsdiagramm setzt sich zusammen aus dem 1. Quadranten des Achskraftverteilungsdiagramms und der installierten Bremskraftverteilung. Dieses Diagramm macht es möglich Aussagen über das Bremsverhalten von Kraftfahrzeugen zu treffen. Zur Erstellung des Diagramms ist an dieser Stelle lediglich noch die Kurve der installierten Bremskraftverteilung unbekannt. Falls vom Fahrzeughersteller keine Werte bekannt oder in Erfahrung zu bringen sind, so muss die Kurve durch Messung erstellt werden. Hierbei geht man im Allgemeinen so vor, dass man auf dem Rollenprüfstand die Bremskräfte an der Vorder- und Hinterachse separat über den stufenweise erhöhten Pedaldruck aufnimmt. Die Bremskräfte können direkt von der Anzeigentafel des Rollenprüfstandes abgelesen und die Pedaldrücke mit einem Pedalkraftmesser aufgenommen werden. Trägt man pro Achse die Bremskräfte über dem Pedaldruck auf, so erhält man zwei Diagramme, in denen durch die erhaltenen Punkte eine Ausgleichsgerade gezogen wird. Über den gemeinsamen Parameter p können jetzt die Verläufe der installierten Bremskraftverteilung in das Bremskraftverteilungsdiagramm eingetragen werden (siehe Bild A6-14).

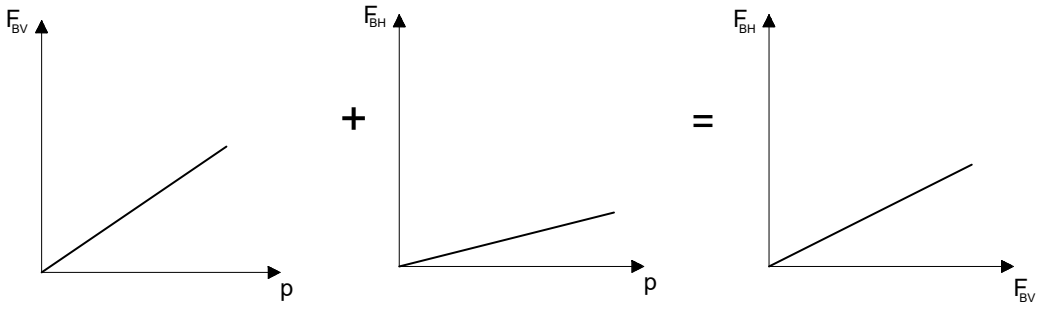


Bild A6-14 Beispieldiagramme zur Ermittlung der Kurve der installierten Bremskraftverteilung

Sind jedoch Herstellerangaben zur installierten Bremskraftverteilung vorhanden, so kann die Kurve direkt eingezeichnet werden. Die Fahrzeughersteller geben in der Regel den Bremskraftverteilungsfaktor DB oder den Hinterachsbremskraftanteil Φ an. Ist eine Bremskraft-Steuereinrichtung (Beschreibung weiter unten) im Fahrzeug eingebaut, so wird für den unteren linearen Teil der Verteilungskurve DB' bzw. Φ' und für den Teil oberhalb des Umschaltpunktes DB bzw. Φ angegeben.

mit:

$$\left.\begin{aligned} DB &= \frac{\Phi}{1-\Phi} = \left(\frac{F_{BH}}{F_{BV}}\right)_{\text{inst}} = \frac{\psi - z_{\text{krit.}}\cdot\chi}{1-\psi+z_{\text{krit.}}\cdot\chi} \\ \Phi &= \frac{DB}{1+DB} = \left(\frac{F_{BH}}{F_{BV}+F_{BH}}\right)_{\text{inst}} = \psi - z_{\text{krit.}}\cdot\chi \end{aligned}\right\} \quad (z_{\text{krit.}}\text{: siehe unten})$$

($DB = 1$ bzw. $\Phi = 0{,}5$ bedeutet, dass die Bremskräfte an Vorder- und Hinterachse gleich groß sind.)

Umformung liefert: $$F_{BH\,\text{inst}} = DB \cdot F_{BV\,\text{inst}} = \frac{\Phi}{1-\Phi} \cdot F_{BV\,\text{inst}} \qquad \text{(A6-138)}$$

Durch Umrechnung der Angaben nach Gl. (A6-138) kann unmittelbar auf das Verhältnis von Hinter- zu Vorderachsbremskraft geschlossen und so die jeweilige Kurve ins Diagramm eingezeichnet werden. In Bild 4 ist ein solches Diagramm mit der installierten Bremskraftverteilung als Festabstimmung (Φ und DB konstant, nur ein Wert) dargestellt. Um ein stabiles Fahrverhalten bei einer Blockierbremsung zu gewährleisten, ist es wichtig, dass immer zuerst die Vorderachse blockiert. Grundsätzlich gilt, dass die Räder einer Achse dann blockieren, wenn die Linie der installierten Bremskraftverteilung die jeweils geltende Gerade konstanten Kraftschlussbeiwerts schneidet. Liegt dieser Schnittpunkt unterhalb der Bremsparabel, so blockieren zuerst die Vorderräder; oberhalb blockieren zuerst die Hinterräder. Ausgehend von obiger Forderung ergibt sich, dass der Schnittpunkt der installierten Bremskraftverteilung mit der Bremsparabel bei einer Abbremsung oberhalb auf der Straße möglicher Kraftschlussbeiwerte liegen muss.

Dieser Schnittpunkt wird daher auch „kritische Abbremsung“ $z_{krit.}$ genannt. Liegt $z_{krit.}$ jedoch bei einer sehr großen Abbremsung, so wird zwangsläufig eventuell lebenswichtige Bremskraft verschenkt, wenn beim Blockieren der Vorderräder die Pedalkraft nicht noch weiter erhöht wird. Je weiter sich der Schnittpunkt im Diagramm nach rechts bewegt, umso weiter entfernt sich bei Festabstimmung die Kurve der installierten von der idealen Bremskraftverteilung. Nach dem ECE-Reglement 13 muss $z_{krit.}$ für das fahrfertige Fahrzeug inklusive Fahrer oberhalb von 0,82 liegen. Bei guten, griffigen Straßen und modernen Reifen ist dieser Wert jedoch zu gering. Es besteht die Gefahr, dass das Fahrzeug bei Notbremsungen aus hoher Geschwindigkeit ausbricht. Die Erfahrung zeigt, dass $z_{krit.}$ zur Gewährleistung der Bremssicherheit im Bereich zwischen 0,9 und 1,0 gewählt werden sollte.

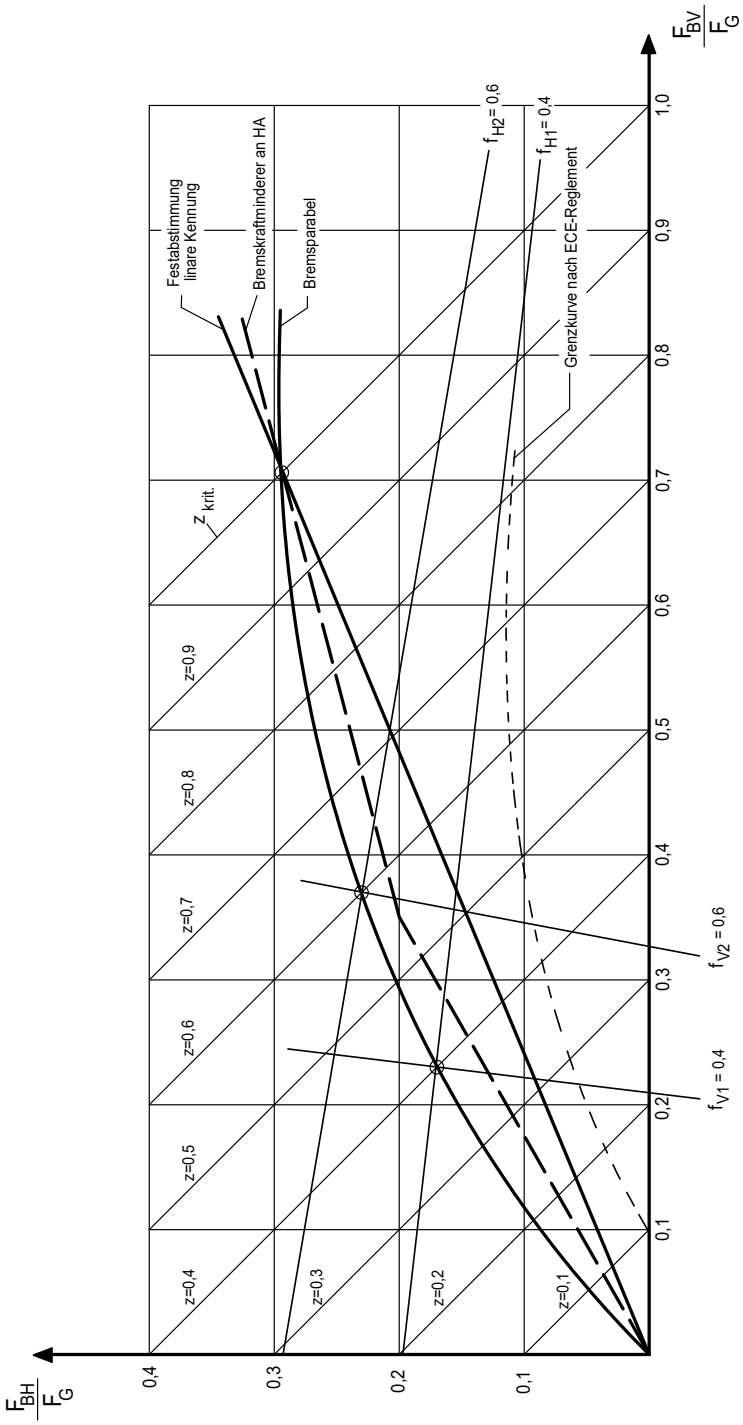


Bild A6-15 Bremskraftverteilungsdiagramm installierte Bremskraftverteilung als Festabstimmung, mit Bremskraftminderer

Beispiel zur Erstellung einer Parabel idealer Achskraftverteilung im Bremskraftverteilungsdiagramm

Fahrzeug ist mit 1 Person besetzt

h = 0,5 m Schwerpunktshöhe
R = 2,5 m Radstand
lV = 1,0 m Schwerpunktsabstand von der VA

Fahrzeug vollbeladen:

h = 0,6 m Schwerpunktshöhe

Mit diesen Angaben lassen sich zunächst die radstandsbezogenen geometrischen Parameter ψ und χ für beide Fahrzeuge berechnen.

$$\text{leer: } \psi_l = \frac{l_V}{R} = \frac{1{,}0}{2{,}5} = 0{,}4 \quad ; \qquad \chi_l = \frac{h_l}{R} = \frac{0{,}5}{2{,}5} = 0{,}2$$

$$\text{beladen: } \psi_b = \psi_l = 0{,}4 \quad ; \qquad \chi_b = \frac{h_b}{R} = \frac{0{,}6}{2{,}5} = 0{,}24$$

Die Bremskräfte an der Vorder- und Hinterachse werden nun nach den Gln. (A6-134) und (A6-135) bestimmt. Hierbei ist es zweckmäßig, sich die Abbremsung z stufenweise vorzugeben und die ermittelten Bremskräfte pro Fahrzeug in eine Wertetabelle einzutragen (als Beispiel auf der nächsten Seite ausgeführt). Im nächsten Schritt zeichnet man ein entsprechendes Koordinatensystem, wobei man sinnvollerweise für die Ordinate und Abszisse eine gleiche Teilung wählt. In dieses Koordinatensystem werden nun die für jede vorgegebene Abbremsung z erhaltenen Werte für die Bremskräfte vorn und hinten eingetragen, woraufhin man durch Verbinden der einzelnen Punkte die Kurve der idealen Bremskraftverteilung, die Bremsparabel, erhält. Gleichzeitig können auch unmittelbar die Linien konstanter Abbremsung als 45°-Geraden eingezeichnet werden.

Tabelle A6.3 Bremskraftverteilung Fahrzeug leer

z	$1-\psi$	$z-\chi$	$1-\psi+z\cdot\chi$	$\frac{F_{BV}}{F_G}$	$\psi-z\cdot\chi$	$\frac{F_{BV}}{F_G}$
0,1	0,6	0,02	0,62	0,062	0,38	0,038
0,2	0,6	0,04	0,64	0,128	0,36	0,072
0,3	0,6	0,06	0,66	0,198	0,34	0,102
0,4	0,6	0,08	0,68	0,272	0,32	0,128
0,5	0,6	0,10	0,70	0,350	0,30	0,150
0,6	0,6	0,12	0,72	0,432	0,28	0,168
0,7	0,6	0,14	0,74	0,518	0,26	0,182
0,8	0,6	0,16	0,76	0,608	0,24	0,192
0,9	0,6	0,18	0,78	0,702	0,22	0,198
1,0	0,6	0,20	0,80	0,800	0,20	0,200

Tabelle A6.4 Bremskraftverteilung Fahrzeug beladen

z	$1-\psi$	$z-\chi$	$1-\psi+z\cdot\chi$	$\frac{F_{BV}}{F_G}$	$\psi-z\cdot\chi$	$\frac{F_{BV}}{F_G}$
0,1	0,6	0,024	0,624	0,0624	0,376	0,0376
0,2	0,6	0,048	0,648	0,130	0,352	0,0704
0,3	0,6	0,072	0,672	0,202	0,328	0,098
0,4	0,6	0,096	0,696	0,278	0,304	0,122
0,5	0,6	0,120	0,720	0,360	0,280	0,140
0,6	0,6	0,144	0,744	0,446	0,256	0,154
0,7	0,6	0,168	0,768	0,538	0,232	0,162
0,8	0,6	0,182	0,782	0,626	0,218	0,174
0,9	0,6	0,216	0,816	0,734	0,184	0,166
1,0	0,6	0,240	0,840	0,840	0,160	0,160

7.2.5 Bremskräfte im Bremskraftverteilungsdiagramm bei Steigerung der Bremswirkung

Betätigt der Fahrer die Bremse, so steigen die Vorder- und Hinterradbremskräfte entlang der Kurve der installierten Bremskraftverteilung an, bis diese die Linie konstanten Kraftschlussbeiwerts, der maximal auf die Fahrbahn übertragen werden kann, schneidet. Bei einem richtig ausgelegten Fahrzeug ist dies zuerst an der Vorderachse der Fall. Dies ist der Punkt, an dem die Vorderräder blockieren. Die Bremskräfte an den Vorderrädern lassen sich nun durch erhöhten Bremspedaldruck nicht mehr steigern. Der Eintritt des Blockierens wird im Fahrzeug eindeutig festgestellt, es entsteht ein Ruck in der Lenkung und das Fahrzeug schiebt auf ebener, homogener Straße unabhängig vom Lenkeinschlag geradeaus. Auf trockener Straße setzt das charakteristische Reifenquietschen ein, was bei den meisten Fahrern bewirkt, dass diese den Bremsdruck nicht weiter steigern, da sie glauben bereits die Grenze der möglichen Bremsverzögerung erreicht zu haben. Dieser psychologische Aspekt tritt auch beim Einsetzen der Regelimpulse bei ABS-gebremsten Fahrzeugen auf. Für Geschwindigkeitsrückrechnungen ist hierbei $a = z_{VA,bl} \cdot g$ einzusetzen. $z_{VA,bl}$ ist die Abbremsung, die beim Blockieren der Vorderräder erreicht wird. Sie kann im Diagramm beim Schnittpunkt der Kurve der installierten Bremskraftverteilung mit der Linie konstanten Kraftschlussbeiwerts an der Vorderachse abgelesen werden.

Steigert der Fahrer an dieser Stelle jedoch die Bremspedalkraft weiter, so steigt auch der Hinterachsbremskraftanteil weiter an und die Abbremsung nimmt weiter zu. Im Bremskraftverteilungsdiagramm wandert der Arbeitspunkt nun entsprechend der Steigerung der Hinterachsbremskraft auf der Linie konstanten Kraftschlussbeiwerts f_V weiter, bis er die Linie konstanten Kraftschlussbeiwerts f_H erreicht hat. An dieser Stelle beginnen auch die Hinterräder zu blockieren, eine weitere Steigerung der Hinterachsbremskräfte ist nun nicht mehr möglich und die Abbremsung ist maximal (z_{max}). Für Geschwindigkeitsrückrechnungen ist $a = z_{max} \cdot g$ einzusetzen. Mit dem Blockieren setzt auch hier die Spurzeichnung ein und eine Vierradblockierspur wird sichtbar. Die gutachterliche Praxis hat jedoch gezeigt, dass sich die von Vorder- und Hinterrädern gezeichneten Spuren oft so gut decken, dass nicht immer mit Sicherheit bestimmt

werden kann, ob es sich um eine Zwei- oder Vierradblockierspur handelt. In diesem Fall muss man sich für eine von beiden Möglichkeiten entscheiden. Für Geschwindigkeitsrückrechnungen bei Vierradblockierspuren muss der Radstand des Fahrzeugs von der Bremsspurlänge abgezogen werden.

7.2.6 Einfluss der Beladung auf das Bremskraftverteilungsdiagramm

Durch Beladung des Fahrzeugs ändert sich das Achskraftverteilungsdiagramm grundlegend. Die zwangsläufige Verschiebung des Schwerpunktes bewirkt eine Änderung der radstandsbezogenen Schwerpunktsgrößen ψ und χ. Eine Vergrößerung von ψ (Schwerpunktsrücklage) bewirkt eine wesentlich „steilere" Bremsparabel. Hingegen wird die Parabel flacher, wenn χ vergrößert wird (Schwerpunktshöhe). Der Einfluss einer Änderung von ψ auf die Form der Parabel ist wesentlich stärker als bei einer Änderung von χ. Die Steigung der Parabel aus Null heraus wird alleine durch ψ bestimmt. In der Regel wird ψ wesentlich größer, während sich χ meist nicht oder nur geringfügig ändert. Durch eine größere Dachlast wird χ jedoch so stark vergrößert, dass die Bremsparabel wesentlich flacher und damit $z_{krit.}$ wesentlich kleiner wird. Im Extremfall kann dies dazu führen, dass zuerst die Hinterräder blockieren, wodurch das Fahrzeug sofort instabil wird. Dies macht deutlich, dass das Bremsverhalten sehr stark in der Verantwortung des Fahrers liegt, da es entscheidend darauf ankommt, wie das Fahrzeug beladen wird. Es sollte daher wann immer möglich darauf verzichtet werden Güter auf dem Fahrzeugdach zu transportieren. In den meisten Fällen ist eine Kofferraumlast zu betrachten. Diese verschiebt den Schwerpunkt in Richtung Fahrzeugheck, wodurch die radstandsbezogene Schwerpunktsrücklage ψ größer und die Parabel steiler wird. Dies bewirkt, dass die kritische Abbremsung $z_{krit.}$ größer, also das Fahrzeug stabiler wird. Gleichzeitig wächst auch der Abstand zwischen der Parabel und der Kurve der installierten Bremskraftverteilung, vor allem im mittleren μ-Bereich, stark an, was bedeutet, dass die Vorderachse bereits sehr früh in den Blockierzustand übergehen kann. Dieser Umstand ist in Bezug auf den Bremsweg nicht weiter tragisch, wenn sich der Fahrer über dieses Verhalten bewusst ist und auch nach der Blockierung der Vorderachse den Bremsdruck weiter steigert. Die maximale Abbremsung $z = \mu$ ist auch bei bis zum zulässigen Gesamtgewicht beladenen Fahrzeugen erreichbar. Allerdings steigen die notwendigen Pedalkräfte überproportional an.

Der Abstand zwischen Parabel und installierter Bremskraftverteilung darf einen gesetzlich festgelegten Wert nicht überschreiten. Im ECE-Reglement 13 ist die Gleichung für eine Grenzkurve angegeben. Sie ist im Bremskraftverteilungsdiagramm eine aus dem Ursprung verschobene Parabel, die unterhalb der Bremsparabel liegt. Sie gibt für jeden Wert von μ für die Paarung Reifen/Fahrbahn den Mindestwert für die Abbremsung z an, ist also für jeden Fahrzeugtyp in jedem möglichen Beladungszustand gleich. Die Kurve der installierten Bremskraftverteilung darf diese Grenzkurve nicht schneiden, d. h., sie muss vollständig zwischen den beiden Parabeln liegen. Die Grenzkurve ist in **Bild A6-15** gestrichelt eingezeichnet.

7.2.7 Bremskraft-Steuereinrichtungen

Insbesondere bei Fahrzeugen mit Vorderradantrieb und/oder hochliegendem Schwerpunkt (Bremsparabel flach) lassen sich die oben erwähnten gesetzlichen Forderungen mit einer Festabstimmung nicht erfüllen. In diesen Fällen gelangen dann Bremskraft-Steuereinrichtungen zum Einsatz.

Hier ist zwischen

- Bremskraftbegrenzern und
- Bremskraftminderern

zu unterscheiden. Beim Bremskraftbegrenzer wird oberhalb des so genannten Umschaltpunkts jeder weitere Anstieg der Bremskräfte an der Hinterachse unterbunden. Der Bremskraftminderer lässt oberhalb des Umschaltpunkts nur einen begrenzten Anstieg der Bremskräfte an der Hinterachse zu. Die Umschaltung erfolgt entweder beschleunigungs- oder druckabhängig. Letztere kann zusätzlich noch lastabhängig veränderlich sein, was z. B. durch Änderung der Federvorspannung beim Einfedern des Fahrzeugs bewirkt werden kann (nur Fahrzeuge ohne Niveauregelung). Bremskraft-Steuereinrichtungen bedeuten einen zusätzlichen Aufwand und besitzen eine nur eingeschränkte Zuverlässigkeit. Die tatsächliche Lage des Umschaltpunktes im Bremskraftverteilungsdiagramm ist von der Reibwertentwicklung der Bremsbeläge abhängig, so dass dieser daher niemals exakt bestimmt werden kann. Aus diesen Gründen sollte bei der Konstruktion eines Fahrzeugs wenn möglich auf sie verzichtet werden. Eine Festabstimmung ist eindeutig besser und zuverlässiger.

7.2.8 Einfluss der Motorbremswirkung auf das Bremskraftverteilungsdiagramm

Die bisherigen Darstellungen gingen jeweils von Fahrzeugen mit ausgekuppeltem Arbeitsstrang aus. Dieser Zustand wird auch vom Gesetzgeber zugrunde gelegt. Aus Untersuchungen über das Bremsverhalten von einem großen Spektrum von Fahrern ist jedoch bekannt, dass in den meisten Fällen bei Fahrzeugen mit mechanischem Getriebe nicht die Kupplung betätigt wird. Bei Fahrzeugen mit Automatikgetriebe ist es ohnehin nicht üblich bzw. zeitlich unmöglich bei einer Notbremsung den Wählhebel in Stellung N zu bewegen. Wird im eingekuppelten Zustand eine Bremsung durchgeführt, so wird auf die Antriebsräder durch das Motorbremsmoment eine zusätzliche Bremskraft $F_{B,M}$ übertragen, wodurch zwangsläufig das Bremsverhalten des Fahrzeug beeinflusst wird.

Diese zusätzliche Bremskraft ändert die installierte Bremkraftverteilung, je nachdem welche Achse angetrieben ist, in unterschiedlicher Weise. Sie muss jeweils zu der durch die Bremse erzeugten Kraft hinzuaddiert werden, wodurch sich dann die Blockierpunkte der Achsen ändern.

7.2.9 Hinterradantrieb

Hier werden die Bremskräfte an der Hinterachse erhöht. Dies bewirkt, dass die installierte Bremskraftverteilung in Ordinatenrichtung (vertikal) um den Betrag $F_{B,M}/F_G$ verschoben wird. Aus dem Diagramm kann man daher ableiten, dass durch die Motorbremswirkung die Blockierabbremsung an der Hinterachse herab-, an der Vorderachse aber hinaufgesetzt wird. Es ist daher sinnvoll, die Bremskraftverteilung des Fahrzeugs „stabiler“ auszulegen als vom Gesetzgeber gefordert.

7.2.10 Vorderradantrieb

Da hier die Bremskräfte an der Vorderachse erhöht werden, wird die installierte Bremskraftverteilung in Abszissenrichtung (horizontal) um den Betrag $F_{B,M}/F_G$ verschoben. Anhand des Diagramms wird ersichtlich, dass dadurch die Blockierabbremsung an der Vorderachse herab- und an der Hinterachse hinaufgesetzt wird. Das Fahrzeug neigt also bei nicht getretener Kupplung zur Überbremsung der Vorderachse und wird somit „bremsstabiler“. Die installierte

Bremskraftverteilung sollte hier daher so ausgelegt werden, dass sie ohne Berücksichtigung des Arbeitsstranges die ideale Bremskraftverteilung möglichst gut annähert, was bei frontgetriebenen Fahrzeugen (ψ <) durch den notwendigen Einsatz von Bremskraft-Steuereinrichtungen auch fast problemlos möglich ist. Die Größe der zusätzlichen Bremskraft wird bestimmt durch den bei der Bremsung eingelegten Gang. Weiterhin ist sie zeitlich veränderlich, da das Motorbremsmoment von der Motordrehzahl abhängt.

7.2.11 Einfluss der Luftkräfte auf das Bremskraftverteilungsdiagramm

Die Umströmung eines Fahrzeugs hat aerodynamische Kräfte zur Folge, die bei hohen Geschwindigkeiten beträchtliche Größen annehmen können. Sie spielen nicht nur bezüglich des Fahr-, sondern auch des Bremsverhaltens eine große Rolle. Durch den Luftwiderstand wird die Abbremsung des Fahrzeugs erhöht, ohne dass dazu der Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn in Anspruch genommen werden muss. Wichtiger ist jedoch, die gleichzeitig entstehenden Auftriebseinflüsse zu betrachten, da diese bei ungünstiger Karroserieform sehr groß sein können, wodurch dann die Bremsstabilität beträchtlich beeinflusst wird. Besonders betroffen sind Fahrzeuge mit widerstandgünstiger Aerodynamik (Abbremsung durch Luftwiderstand gering). Hier wirkt sich das durch Auftriebskräfte beeinflusste Bremsverhalten des Fahrzeugs stärker aus, als wenn die Abbremsung bereits einen Offset besitzt.

Der Einfluss dieser Auftriebskräfte und ihre Größe wurden erst in den letzten Jahrzehnten bekannt. Hier waren Renn- und Sportfahrzeuge bahnbrechend. Durch entsprechende Ausbildung des Fahrzeugbodens und zusätzliche Flügel gelang es den vorhandenen Auftrieb in Abtrieb zu verwandeln und damit die Anpressung der Räder sehr stark zu vergrößern, wodurch letztendlich auch das Erreichen von Kraftschlussbeiwerten beim Bremsen über $\mu = 1$ möglich wurde. Bei der Konstruktion von Gebrauchsfahrzeugen wurde die Aerodynamik ebenfalls systematisch verbessert, meist durch Strömungskorrekturen mit Hilfe von Spoilern. Keine Firma kann es sich heute mehr leisten, bei schnellen Fahrzeugen den Einfluss der aerodynamischen Gestaltung auf das Fahr- und Bremsverhalten zu vernachlässigen.

Wenn die Auftriebskräfte vor allem an der Hinterachse angreifen, wird diese entlastet, wodurch dann nach dem Coulomb'schen Gesetz eine nicht mehr so große Bremskraft übertragen werden kann. Dies kann dann dazu führen, dass die Hinterachse überbremst, d. h. die Hinterräder vor den Vorderrädern blockieren. Ist dies der Fall, so wird das Fahrzeug sofort instabil. Durch diesen Geschwindigkeitseinfluss auf das Bremsverhalten werden manche „Hochgeschwindigkeitsunfälle" erklärbar.

7.3 Zusammenhang zwischen Bremskraftverteilung und Fahrzeugtyp

Nachfolgende Beispiele sind der Zeitschrift „Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik" Februar 1994, Heft 2 entnommen.

7.3.1 Mittelmotor-Sportwagen

Das betrachtete Fahrzeug weist eine radstandsbezogene Schwerpunktsrücklage von $\psi = 0{,}6$ auf. Es ist also stark hinterachslastig. Die kritische Abbremsung wird bei Ausrüstung des Fahrzeugs mit handelsüblichen Straßenreifen im Allgemeinen zu $z_{krit.} = 1$ gewählt. Zusammen mit der radstandsbezogenen Schwerpunktshöhe $\chi = 0{,}17$ ergibt sich damit der Hinterachsbremskraftanteil zu $\Phi = 0{,}43$ und der Bremskraftverteilungsfaktor zu $DB = 0{,}75$. Das Fahrzeug weist also eine ausgeglichene Bremsenbelastung an Vorder- und Hinterachse auf. Bei einem ange-

nommen Kraftschlussbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn von $f_{max} = 0{,}8$ ist beim Ausfall des Vorderachs-Bremskreises allein mit der Hinterachse eine Abbremsung von $z = 0{,}42$ erreichbar. Fällt der Hinterachsbremskreis aus, so kann bei einer Bremsung nur mit der Vorderachse eine maximale Abbremsung von $z = 0{,}37$ erreicht werden. Der Anstieg der Parabel der idealen Achskraftverteilung aus Null heraus beträgt 1,5. Mit den angegebenen Daten ist ein besonders ausgewogenes Bremsverhalten zu erwarten.

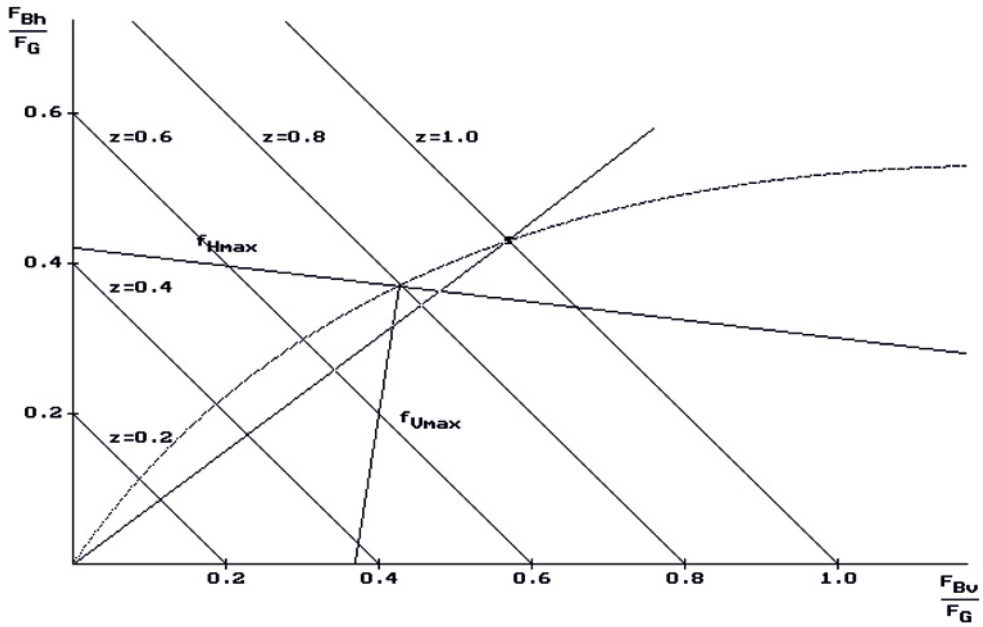


Bild A6-16 Bremskraftverteilungsdiagramm des betrachteten Mittelmotor-Sportwagens
($\psi = 0{,}6$ $\chi = 0{,}17$ $\Phi = 0{,}43$ $DB = 0{,}75$ $f_{V\max} = f_{H\max} = f_{\max} = 0{,}8$)

7.3.2 Oberklasse-Limousine

In dieser Fahrzeugklasse ist üblich, dass der Motor vorne und die Antriebsachse hinten liegt, was auch unter „Standardantrieb“ bekannt ist. Damit lässt sich im Auslegungszustand (fahrfertig mit Fahrer) eine radstandsbezogene Schwerpunktsrücklage von $\psi = 0{,}48$ realisieren. Die radstandsbezogenen Schwerpunktshöhe ist in der Regel $\chi = 0{,}2$. Bei einer kritische Abbremsung von $z_{krit.} = 1$ ergibt sich damit der Hinterachsbremskraftanteil zu $\Phi = 0{,}28$ und der Bremskraftverteilungsfaktor zu $DB = 0{,}39$.

Die Bremsen der Vorderachse sind also erheblich mehr belastet als die der Hinterachse. Die Steigung der Parabel der idealen Achskraftverteilung aus Null heraus ist 0,92. Bei $f_{max} = 0{,}8$ wird mit ausgefallenem Vorderachs- noch $z = 0{,}33$ und bei ausgefallenem Hinterachsbremskreis noch $z = 0{,}5$ erreicht. Damit kann das Bremsverhalten noch als gut bezeichnet werden.

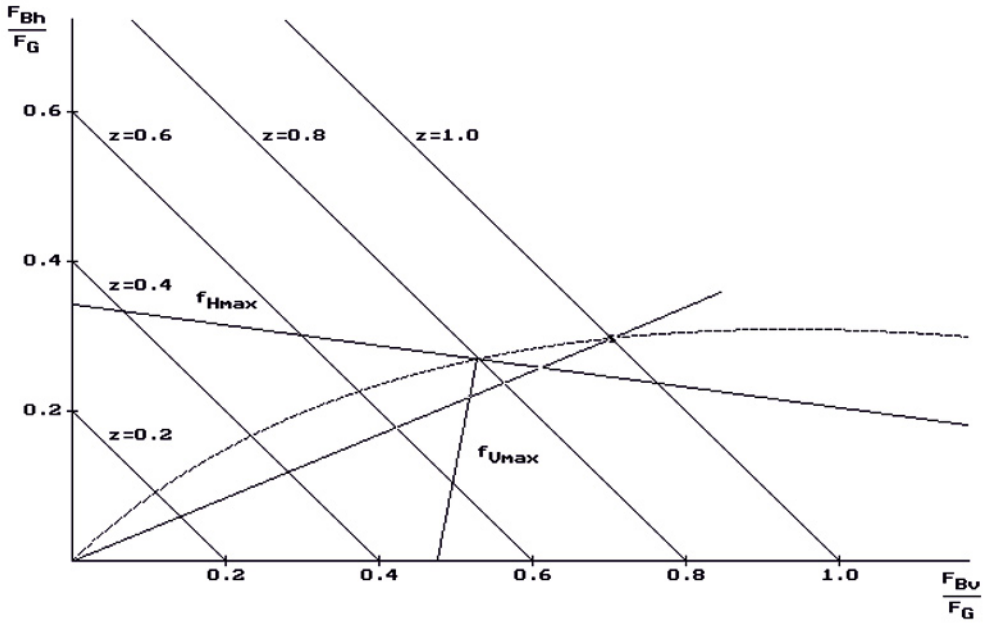


Bild A6-17 Bremskraftverteilungsdiagramm der betrachteten Oberklasse-Limousine
($\psi = 0{,}48$ $\chi = 0{,}2$ $\Phi = 0{,}28$ $DB = 0{,}39$ $f_{V\max} = f_{H\max} = f_{\max} = 0{,}8$)

7.3.3 Mittelklassefahrzeug mit Vorderradantrieb

Infolge des vorn liegenden Motors und vorn liegendem Achsantrieb wird bei Fahrzeugen dieser Klasse die radstandsbezogene Schwerpunktsrücklage lediglich etwa $\psi = 0{,}4$. Die radstandsbezogene Schwerpunktshöhe ist in aller Regel $\chi = 0{,}2$, was der eines Fahrzeugs der Oberklasse entspricht. Die Parabel der idealen Achskraftverteilung wird hier verhältnismäßig „flach“. Ihre Steigung aus Null heraus beträgt lediglich 0,67. Bei einer kritischen Abbremsung von $z_{krit.} = 1$ ergibt sich damit der sehr geringe Hinterachsbremskraftanteil zu $\Phi = 0{,}2$, was einem Bremskraftverteilungsfaktor von $DB = 0{,}25$. Die Hinterachsbremse ist somit also nur sehr gering belastet. Eine Festabstimmung würde in Bezug auf das Bremsverhalten des Fahrzeugs große Nachtteile bringen, da die Vorderachse im Bereich mittlerer Abbremsungen zu früh blockieren würde. Abhilfe schafft hier eine Bremskraft-Steuereinrichtung, in der Regel werden Bremskraftminderer eingesetzt. Erst dadurch wird im Bereich mittlerer Kraftschlussbeiwerte ein akzeptables Bremsverhalten gewährleistet.

Eine Bremskreisaufteilung in Vorder- und Hinterachsbremskreis ist hier wegen des geringen Hinterachsbremskraftanteils nicht angebracht. Es kommt daher nur eine Diagonal-Bremskreisaufteilung in Frage. Diese fordert zur Erreichung eines akzeptablen Lenkverhaltens bei Kreisausfall einen negativen Lenkrollhalbmesser. Von der Auslegung her besitzen also Fahrzeuge mit Vorderradantrieb schlechtere Bremseigenschaften als solch mit Mittelmotor oder Standardantrieb. Dieser Nachteil kann nur durch eine besonders sorgfältige Konstruktion gemindert werden.

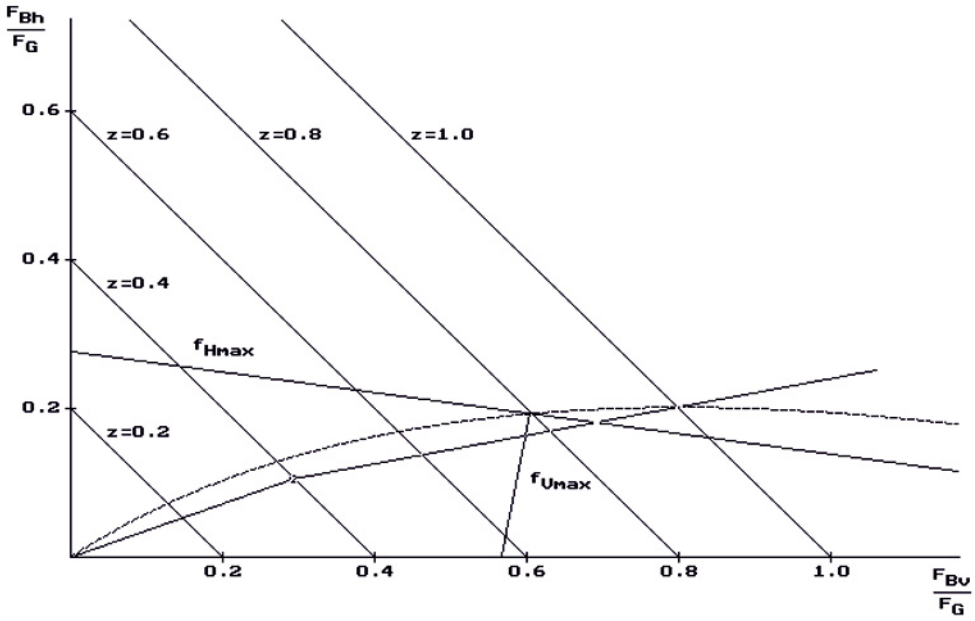


Bild A6-18 Bremskraftverteilungsdiagramm des betrachteten Mittelklassefahrzeugs
(ψ = 0,4 χ = 0,2 Φ = 0,2 DB = 0,25 $f_{V\max}$= $f_{H\max}$= $f_{\max}$ = 0,8)

7.3.4 Allradgetriebenes Geländefahrzeug mit kurzem Radstand

Fahrzeuge dieser Kategorie besitzen meist eine ausgeglichene Achslastverteilung (ψ = 0,5). Wegen der Handlichkeit wird ein kurzer Radstand angestrebt. Geländegängigkeit setzt aber auch eine ausreichende Bodenfreiheit voraus, was zwangsläufig zu einem verhältnismäßig hoch liegenden Schwerpunkt führt. Zusammen mit dem kurzen Radstand ergibt sich dadurch eine große radstandsbezogene Schwerpunktshöhe, die meist um χ = 0,35. Die Parabel der idealen Achskraftverteilung dabei trotz der Steigung 1,0 aus Null heraus sehr „flach“. Bei $z_{krit.}$ = 1 schrumpft der Hinterachsbremskraftanteil zu Φ = 0,15. Dies entspricht einem Bremskraftverteilungsfaktor von DB = 0,18. Die Hinterachsbremsen können folglich nur sehr gering belastet werden. Eine richtig ausgelegte Bremskraft-Steuereinrichtung ist ebenso wie eine Diagonal-Bremskreisaufteilung unverzichtbar. Dennoch bleibt das Bremsverhalten stets kritisch und gewöhnungsbedürftig. Auf griffiger Straße kann ein Geländefahrzeug schon von seiner Auslegung her niemals so gut bremsen wie ein Standardfahrzeug. Die Fahrer geländegängiger Fahrzeuge mit großer Bodenfreiheit (hoher Schwerpunkt) sollten sich stets darüber klar sein, dass sie bezüglich des Bremsvermögens im normalen Straßenverkehr immer die Unterlegenen sind. Dies gilt besonders im Notbremsfall.

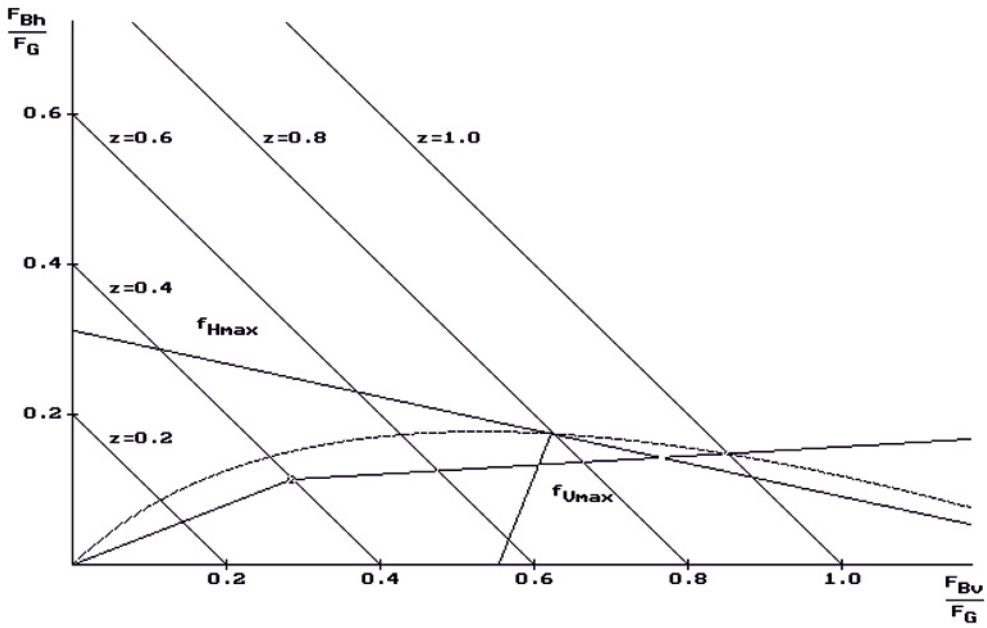


Bild A6-19 Bremskraftverteilungsdiagramm des betrachteten Geländefahrzeugs
(ψ = 0,5 χ = 0,35 Φ = 0,15 DB = 0,18 $f_{V\max} = f_{H\max} = f_{\max}$ = 0,8)

7.3.5 Motorrad

Motorräder haben fast unabhängig von ihrer Motorisierung Radstände um R = 1,4 m. In fahrfertigem Zustand mit Fahrer liegt die Schwerpunktshöhe bei etwa h = 0,68 m und die Schwerpunktsrücklage bei etwa lV = 0,75 m. Bei der Bremsung gelten generell die gleichen dynamischen Gesetze wie beim Pkw. Mit den Daten des Beispiels (ψ = 0,54; χ = 0,49) ergibt sich trotz des Anstiegs der Parabel der idealen Achskraftverteilung von 1,17 aus Null heraus eine sehr „flache“ Parabel. Bei $z_{krit.}$ = 1 ergäbe sich daher der Hinterachsbremskraftanteil Φ = 0,05 und ein Bremskraftverteilungsfaktor DB gleicher Größenordnung. Dies bedeutet, dass bei einer Abbremsung z = 1 die Hinterradbremse fast nicht betätigt werden darf. Die größte mit diesem Fahrzeug überhaupt erreichbare Abbremsung liegt bei $z = \psi / \chi$ = 1,1. Dann hebt das Hinterrad ab.

Da moderne Reifen auf trockener Straße einen wesentlich höheren Kraftschluss erreichen, ist das Bremsvermögen eines Motorrads nur durch dessen Konstruktion bestimmt. Motorräder beschleunigen in der Regel wesentlich besser als Pkws, bremsen aber nicht besser. Durch Missachtung oder Unkenntnis dieses Umstands ereignen sich sehr oft für schwere Unfälle.

Bei Rennmotorrädern kommt meist nur die Vorderradbremse zum Einsatz. Auch beim Gebrauchsmotorrad bietet die üblicherweise getrennte Betätigung von Vorder- und Hinterradbremse Vorteile, wobei allerdings das Können des Fahrers die entscheidende Rolle spielt. Eine „Kombibremse“ bringt nur für den ungeübten Fahrer bei schlechtem Kraftschluss Vorteile, weshalb sie auch nur selten angewendet wird. Außerdem gehen die bisher bekannt gewordenen Konstruktionen auf die aus Stabilitätsgründen bei hohen Abbremsungen notwendige Abnahme des Hinterachsbremskraftanteils nicht ein.

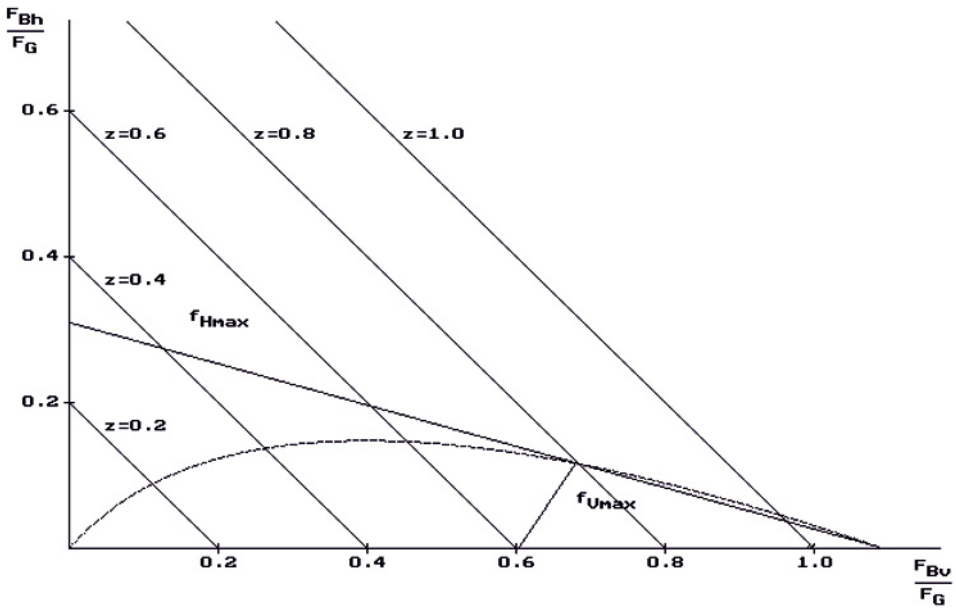


Bild A6-20 Bremskraftverteilungsdiagramm des betrachteten Motorrades
(ψ = 0,54 χ = 0,49 Φ = 0,05 DB = 0,05 $f_{V\max} = f_{H\max} = f_{\max}$ = 0,8)

Literatur

[1] Steffan, H.: Die kinetische Berechnung der Fahrbewegungen eines Fahrzeugs oder Anhängergespanns zur Rekonstruktion von Verkehrsunfällen, Habilitationsschrift TU Graz 1996

[2] Rau, H.: Rekonstruktion von Fahrzeugkollisionen mit Hilfe von Bewegungsgleichungen. Dissertation TU-Berlin 1975

[3] Kersche, F.: Computer-Digital-Simulation zur Rekonstruktion von Verkehrsunfällen. Beitrag zum Jungunternehmerpreis der Innovationsagentur, Wien Mai 1968

[4] Kersche, F., Ecker, H.: Möglichkeiten und Grenzen der computermäßigen Unfallanalyse. Internationales Fachseminar für Straßenverkehrsunfall und Fahrzeugschaden, Badgstein 1990

[5] McHenry, R. R., Segal, D. J., DeLeys, N. J.: Computer simulation of single vehicle accidents; Stapp Car Crash Conf., Anaheim, California 1967 (October)

[6] McHenry, Raymond R.: „Computer program for reconstruction of highway accidents“, 17th Stapp Car Crash Conference SAE 730980

[7] Day, Terry D., Hargens, Randall L.: „An overview of the way EDSMAC computes delta-V“, SAE International (BUS 76) Buschmann

[8] Ishikawa, Hirotoshi: „Computer simulation of automobile collision – reconstruction of accidents“, 29th Stapp Car Crash Conference, SAE Transactions Vol. 94 (1985) SAE 851729

[9] Gnadler, R.: Das Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen bei instationärer Kurvenfahrt mit verschiedener Anordnung der Hauptträgheitsachsen und der Rollachse. Diss., Univ. Karlsruhe, Karlsruhe 1971

[10] Gnadler, Rolf, Schmidt, A., Habich K.: CARAT: Ein Programmsystem zur rechnergestützten Unfallrekonstruktion, dargestellt am Beispiel der Kollisionsanalyse, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik Mai 1986

[11] Führer, C., Leimkuhler B.: Formulation and Numerical Solution of the Equations of Constrained Mechanical Motion; DFVLR Forschungsbericht; DFVLR 89-08l

[12] Rill, G.: Simulation von Kraftfahrzeugen, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 194l

[13] Steffan, H.: PC-CRASH, A Simulation Program for Car Accidents; ISATA; 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation, Aachen 1993
[14] Steffan, H.: „Die kinetische Berechnung der Fahrbewegungen eines Anhängergespanns zur Rekonstruktion von Verkehrsunfällen“; EVU-Jahrestagung; Budapest 1995
[15] Burg, H.: Bedienungshandbuch Carat – Fahrdynamik und Kollisionsanalyse, IbB Wiesbaden 1995
[16] Melegh, G.: „Interaktive Simulation der Fahrdynamik von Fahrzeugen mit und ohnen Anhänger“, Budapest 1994
[17] Gim, Gwanghun, Nikravesh, Parviz E.: „A three-dimensional tire model for steady-state simulations of vehicles“, International Pacific Conference on Automotive Engineering and High Temperature Engineering Conference, SAE 931913
[18] Araki, Kazuo, Sakai, Hideo, Yanase, Minao: „Study of tire model consisting of theoretical and experimental equations for vehicle dynamics analysis“, SAE Worldwide Passenger Car Conference and Exposition SAE 932884
[19] Metz, L. D., Alter, D. M.: „Transient and steady state performance characteristics of a two-wheel-steer and four-wheel steer vehicle model“, SAE Passenger Car Meeting and Exposition SAE 911926
[20] Bakker, Egbert, Pacejka, Hans B., Lidner, Lars: „A new tire model with an application in vehicle dynamics studies“, Autotechnologies Conference and Exposition, SAE Transactions Vol. 98 (1989) SAE 890087
[21] Babbel, Eckhard: „Tire model designed for horizontal dynamics of vehicles“, 22nd FISITA Congress (1988), Dearborn, Michigan, USA SAE 885142
[22] Ratti, P.: „Tire model and vehicle handling“, 22nd FISITA Congress (1988), Dearborn, Michigan, USA SAE 885009
[23] Rai, N. S., Solomon, A. R., Angell, J. C.: „Computer simulation of suspension abuse tests using ADAMS“, International Congress and Exposition SAE 820079
[24] Bernard, James E.: „A digital computer method for the prediction of braking performance of trucks and tractor-trailers“, International Automotive Engineering Congress and Exposition, SAE Transactions Vol. 82 (1973) 730181

(APP 95) Appel, H., Krabbel, G.: Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion.Verlag INFORMATION Ambs GmbH, ISBN 3-88550-028-0, Kippenheim 1995
(BEC 88)Becke, M., Nackenhorst, U.: Auslaufanalyse bei Gespannen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Okt 1988
(BRA 91) Raymond M. Brach: Mechanical Impact Dynamics; Rigid Body Collisions. John Wiley & Sons 1991
(BUR 81) Burg, Rau: Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion, Kippenheim; Verlag Information Ambs 1981
(BUR 82) Burg, H., Lindenmann, M.: Unfallversuche Pkw-Pkw-Kollisionen, Verlag Information Ambs 1982
(BUR 84) Burg, H.: Rechnerunterstütze Rekonstruktion von Pkw/Pkw-Unfällen, Dissertation, Berlin 1984
(BUR 93) Burkhardt, M., Reimpell, J.: Fahrwerkstechnik: Radschlupf-Regelsysteme, Vogel Verlag 1993.
(CRO 94) Crolla, D. A., Horton, D. N. L., Brooks, P. C., Firth, G. R., Shuttlewood, D. W., Woods, M., Yip, C. K.: „A systematic approach to vehicle design using VDAS (Vehicle Dynamics Analysis Software)“, SAE International Congress and Exposition SAE 940230
(FLI 88) Flick, Mark A.: The Effect of Brake Adjustment on Braking Performance; Vehicle Research and Test Center; Report Number DOT HS 807 287; April 1988
(LUG 84) Lugner, P., Lorenz, R., Schindler, E.: The Connexion of Theoretical Simulation and Experiments in Passenger Car Dynamic. In: The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks. Hrsg.: Hedrick, H. J., Lisse, Swets-Zeitlinger 1984
(LUG 85) Lugner, Peter, Endlicher, Karl-Otto, Desoyer, Kurt: Fahrdynamik des Fahrspurwechsels und des Abbremsvorgangs bei Baustellen, insbesondere im Kurvenbereich; Wien: (Forschungsges. f. das Straßenwesen im Oesterr. Ingenieur- u. Architekten-Verein [in Komm]) 1985. 84 S.

(MAR 90) Marialigeti, J. [Hrsg.]: Proceedings of the 2nd Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, held at the Technical University of Budapest, Hungary, Budapest, 12.–15. November, 1990
(MIT 88) Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge Bände A-C; 2. Auflage, Springer, 1988
(REI 84) Reimpell, J.: Fahrwerkstechnik: Lenkung, Vogel Verlag 1984
(REI 86a) Reimpell, J.: Fahrwerkstechnik: Grundlagen, Vogel Verlag 1986
(REI 86b) Reimpell, J.: Fahrwerkstechnik: Federung und Fahrwerksmechanik, Vogel Verlag 1986
(REI 86c) Reimpell, J.: Fahrwerkstechnik: Radaufhängung, Vogel Verlag 1986
(REI 86d) Reimpell, J.: Fahrwerkstechnik: Reifen und Räder, Vogel Verlag 1986
(SLI 86a) Slibar, A., Kersche, F., Springer H.: Rechnerunterstützte Unfallanalyse und Crashsimulation von Fahrzeugen auf dem Microcomputer, Forschungskurzbericht an die Hochschuljubiläumsstiftung der Stadt Wien zum Projekt 3, 1986
(SLI 86b) Slibar, A., Kersche, F., Springer H.: Kollisionsanalyse und Auslaufbewegung von Kraftfahrzeugen- Simulation und Unfallrekonstruktion, Internationales Fachseminar für Straßenverkehrsunfall und Fahrzeugschaden, Badgstein 1986
(STE 96) Steffan, H., Moser, A.: „The Collision and Trajectory Models of PC-CRASH“, SAE Worldwide Passenger Car Conference and Exposition SAE 96
(UDS 95) UDS, Der Unfalldatenspeicher; Bedienungsanleitung; Mannesmann Kienzle GmbH
(WAC 95) Wach, W.: PC-Crash-Program for Simulation of Road Accidents – Step by Step. Institute of Forensic Research Publisher, ISBN 83-902564-4-4, Krakow 1995

8 Gefahren oder gestanden?

Dr. Klaus-Dieter Brösdorf, Marco Görtz

8.1 Einführung

Häufig wird an den technischen Sachverständigen die Frage gerichtet, ob eine Aussage getroffen werden kann, dass ein Fahrzeug bei Kollision mit einem anderen Fahrzeug gestanden hat, dies insbesondere im Zusammenhang mit Kollisionen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich (Kollisionen auf Parkplätzen o. ä.). In diesem Abschnitt wird nun der Frage nachgegangen, ob von Seiten des Technikers eine solche Aussage überhaupt möglich ist, dies auch unter Berücksichtigung des Sachverhaltes, dass eine Vielzahl von Anstoßanordnungen in Betracht kommt.

8.2 Anknüpfungsinformationen

Für Bewertungen können die nachfolgenden Informationen zur Verfügung stehen:

- Beschädigungsspuren an den beteiligten Fahrzeugen,
- Spurenlage an der Unfallstelle sowie
- sonstige Daten.

Die wesentliche Bewertungsgrundlage sind die Beschädigungen und Spurzeichnungen an den beteiligten Fahrzeugen. Da es sich bei dem querenden Fahrzeug (gestoßenes Fahrzeug) überwiegend um das Geschädigtenfahrzeug handelt, ist zu diesem Fahrzeug die beste Informationslage zu erwarten (z. B. durch Schadengutachten). Liegen Informationen zur Spurenlage an der Unfallstelle vor, so sind insbesondere die Endlagen der beteiligten Fahrzeuge sowie Hinweise auf den Kollisionsort von besonderem Interesse. Die Rubrik „sonstige Daten“ beinhaltet alle

sonstigen Informationen, die im Zusammenhang mit einem Kollisionsereignis noch vorliegen können. Hierbei kann es sich um fahrzeuginterne Daten (z. B. Daten aus Steuergeräten und DashCams) sowie um fahrzeugexterne Daten (z. B. Überwachungskameras) handeln.

Nach derzeitigem Kenntnisstand sind für praktische Anwendungsfälle insbesondere die Beschädigungen und Spurenlagen an den beteiligten Fahrzeugen – hier vornehmlich am gestoßenen Fahrzeug – zu priorisieren. Sollten weitere Anknüpfungsinformationen vorliegen, sind diese bei den Bewertungen selbstredend zu berücksichtigen und können der Kontrolle dienen.

8.3 Bewertungsgrundlagen

In der Literatur finden sich zu vorliegender Problemstellung verschiedene Veröffentlichungen, in denen Versuche, die mit variierenden Anstoßanordnungen und Geschwindigkeiten durchgeführt wurden, vorgestellt und theoretische Betrachtungen angestellt werden [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Im Jahre 2008 wurde von einer Gruppe von Sachverständigen begonnen, die Thematik „gefahren oder gestanden“ systematisch aufzuarbeiten, wobei die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind. Erste Ergebnisse wurden in [8, 9] vorgestellt. Eine detaillierte Darstellung und Analyse derzeit bekannter Versuche zu dieser Thematik erfolgte in [10]. Der aktuelle Erkenntnisstand wird im Weiteren dargestellt, wobei die nachfolgenden Randbedingungen gelten:

- (nahezu) rechtwinkliger Anstoß des stoßenden Fahrzeugs (Fahrzeugfront) gegen das gestoßene Fahrzeug im Karosseriebereich zwischen Vorder- und Hinterachse (**Bild A6-21**),
- Kollisionsgeschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs bis 20 km/h,
- Kollisionsgeschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs im Bereich von 0 bis 10 km/h,
- beide Fahrzeuge sind bei Kollision ungebremst sowie
- Spurenlage am gestoßenen Fahrzeug als wesentliches Bewertungskriterium.

Grundsätzlich bedeutsam bei der Auswertung von Kontaktspuren an den Fahrzeugen ist, dass ausschließlich erste Kontaktspuren gesicherte Hinweise auf die vorkollisionäre Fahrdynamik liefern, da zu diesem Zeitpunkt kollisionsursächliche Einflüsse auf die relative Fahrzeuganordnung sowie auch auf die Höhenlagen der Fahrzeuge noch vernachlässigbar sind. **Bild A6-22** zeigt eine Fahrzeugzusammenstellung, die verdeutlicht, dass der Erstkontakt in dem gezeigten Beispiel im Bereich des vorderen Stoßfängers des stoßenden Fahrzeugs einzugrenzen ist. Eine Bewertung möglicher Spurenlagen aus Kontakten mit der Motorhaubenvorderkante kann zu Fehlbewertungen führen. Hier sind im Einzelfall die geometrischen Bedingungen zu prüfen.

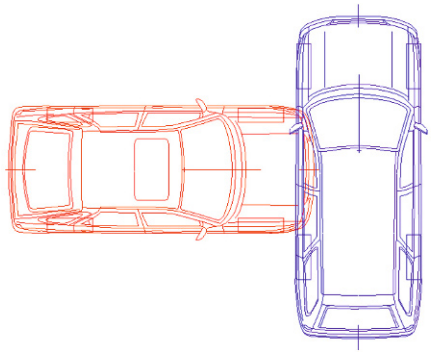


Bild A6-21 Anstoßanordnung

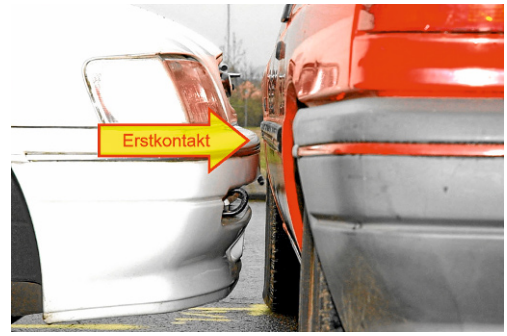


Bild A6-22 Erstkontaktbereich

8.4 Theoretische Überlegungen

Die Spurzeichnungen am gestoßenen Fahrzeug resultieren aus Relativbewegungen zwischen den Fahrzeugen während der Kontaktphase. Hierbei ist eine Aufteilung der Spurzeichnungen in eine vertikale und eine horizontale Spurzeichnungskomponente möglich. Die vertikalen Spurzeichnungskomponenten resultieren im Wesentlichen aus kollisionsursächlichen Nick- und Wankbewegungen der Fahrzeuge. Die horizontalen Spurzeichnungskomponenten resultieren im Wesentlichen aus der Eigenbewegung des gestoßenen Fahrzeugs. Formgebung und Deformationsverhalten der Fahrzeuge in den Kontaktzonen wirken sich ebenso auf die Relativbewegung aus.

Aus den Komponenten der Spurzeichnungen aus ersten kollisionären Kontakten kann auf die Vertikal- und Horizontalrelativbewegung in der Kontaktzone geschlossen werden, nicht jedoch zwangsläufig auf die Schwerpunktgeschwindigkeiten bzw. -bewegungen des gestoßenen Fahrzeugs bei Kollision. Aus den beiden Relativbewegungskomponenten im Kontaktpunkt ergibt sich die resultierende Spurzeichnungsrichtung mit **Bild A6-23** sowie folgender Gleichung:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{v_{rel\,z}}{v_{rel\,x}}\right)$$

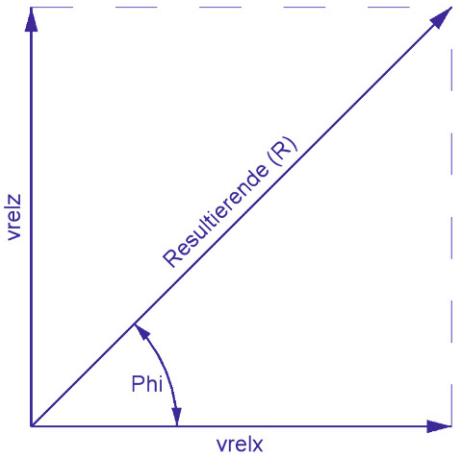


Bild A6-23 Komponenten der Relativbewegung

8.5 Repräsentative Versuchsergebnisse und Bewertungen

Nach einer Basisversuchsreihe, im Rahmen derer die Kollisionen der stoßenden Fahrzeuge (Pkw) mit variierenden Geschwindigkeiten gegen die jeweils stehenden gestoßenen Fahrzeuge (Pkw) erfolgten, wurde eine Vielzahl von Versuchen mit verschiedenen Geschwindigkeitsverteilungen durchgeführt. **Bild A6-24** zeigt die Beschädigungscharakteristika am gestoßenen Fahrzeug für einen Versuch, bei dem das stoßende Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h gegen das stehende gestoßene Fahrzeug gefahren wurde. Neben den im Wesentlichen vertikal orientierten Relativspurzeichnungen finden sich im Erstkontaktbereich auch deutlich von einer vertikalen Orientierung abweichende Relativspurzeichnungen, die aber in diesem Fall nicht auf eine Eigengeschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs bei Kollision hinweisen.

Im Rahmen von Spurenbewertungen ist es zu empfehlen, von im Wesentlichen vertikal bzw. im Wesentlichen horizontal orientierten Relativspurzeichnungen zu sprechen, da reale Spuren weder ideal senkrecht noch ideal waagerecht verlaufen müssen.

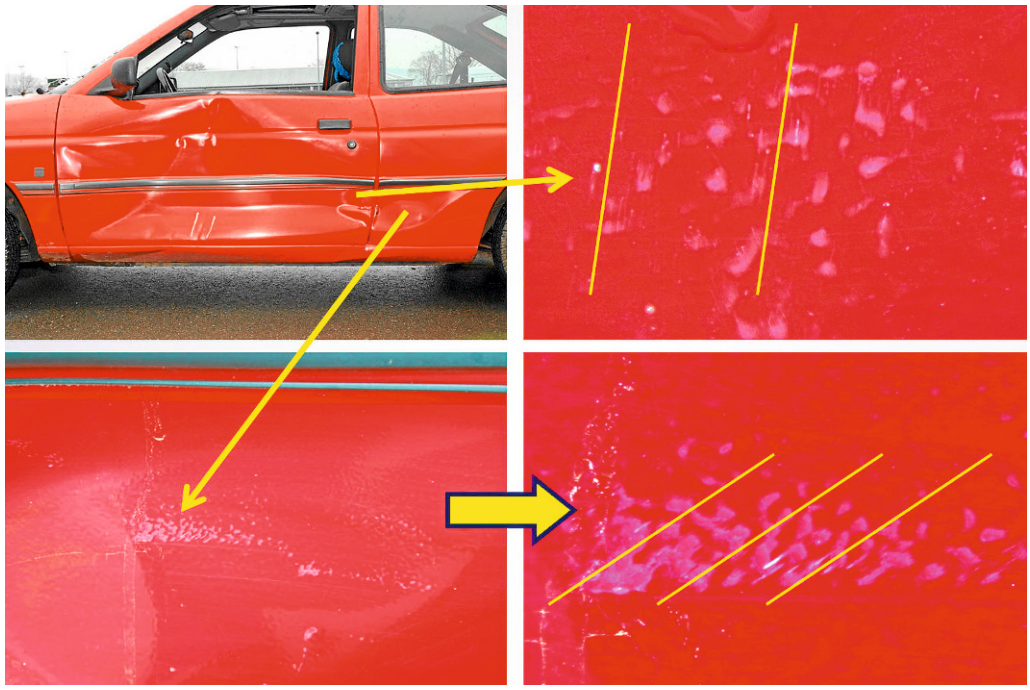


Bild A6-24 Beschädigungscharakteristika am gestoßenen Fahrzeug für eine Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs von 10 km/h sowie eine Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs von 0

Auch ist auf mögliche Fehlinterpretationen von Spurenlagen hinzuweisen, dies insbesondere dann, wenn Bildmaterial zu den Beschädigungscharakteristika an nur einem Fahrzeug vorliegt. **Bild A6-25** zeigt oben links eine Spurzeichnung, die bei oberflächlicher Betrachtung als im Wesentlichen horizontal verlaufende Streifspur fehlbewertet werden könnte. Tatsächlich ist die Richtung der Relativbewegung innerhalb der Spurenlage im Wesentlichen vertikal orientiert (**Bild A6-25** oben rechts), so dass bei den Bewertungen entsprechende Vorsicht geboten ist.

Im Weiteren könnte die nach hinten gerichtete Deformation im Bereich des Türspalts an der linken B-Säule (**Bild A6-25** unten links) als Eintragrichtung von vorn nach hinten fehlgedeutet werden. Hierbei handelt es sich jedoch um eine Sekundärdeformation infolge danebenliegenden Kontaktes mit der Abschleppöse des stoßenden Fahrzeugs (**Bild A6-25** unten rechts).

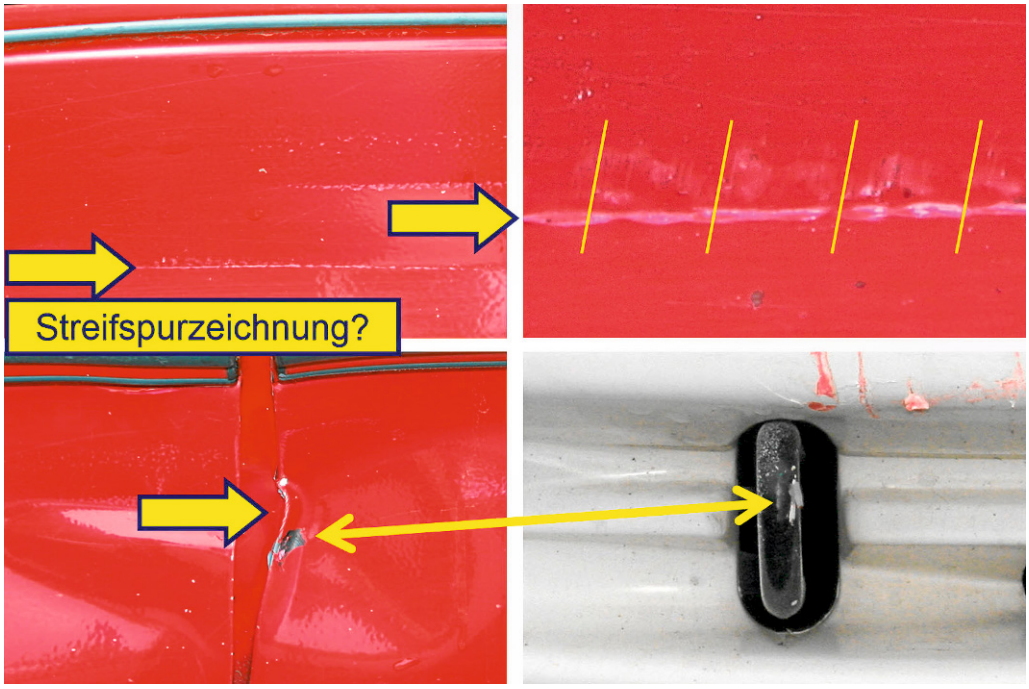


Bild A6-25 mögliche Fehlinterpretation von tatsächlich im Wesentlichen vertikal orientierten Relativspuren als horizontal verlaufende Streifspurzeichnungen (oben) sowie von Deformationen (unten)

Bild A6-26 bis **Bild A6-29** zeigen die Beschädigungen und Spurzeichnungen für einen Versuch, bei dem das stoßende Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 18 km/h nahezu quer gegen das mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h bewegte gestoßene Fahrzeug gefahren wurde.



Bild A6-26 Schäden am gestoßenen Fahrzeug



Bild A6-27 Schäden am gestoßenen Fahrzeug



Bild A6-28 Schäden am gestoßenen Fahrzeug



Bild A6-29 Schäden am gestoßenen Fahrzeug

Bild A6-30 und **Bild A6-31** zeigen Einzelheiten des Versuchsergebnisses. So finden sich am gestoßenen Fahrzeug nahezu formkompatible Abprägungen von Bereichen der Fahrzeugfront des stoßenden Fahrzeugs (**Bild A6-30**), wobei hier auch deutlich ausgeprägte, im Wesentlichen vertikal orientierte Relativspurzeichnungen vorliegen. Solcherart im Wesentlichen vertikal orientierte Relativspurzeichnungen finden sich im gesamten Kontaktbereich am gestoßenen Fahrzeug (**Bild A6-31** unten). Ein weiteres interessantes Spurenmerkmal ist der im Wesentlichen formkompatible Abdruck der Abschleppöse des stoßenden Fahrzeugs an der Seite des gestoßenen Fahrzeugs (**Bild A6-31** oben), wobei es sich hierbei nicht um Erstkontaktspuren handelt.

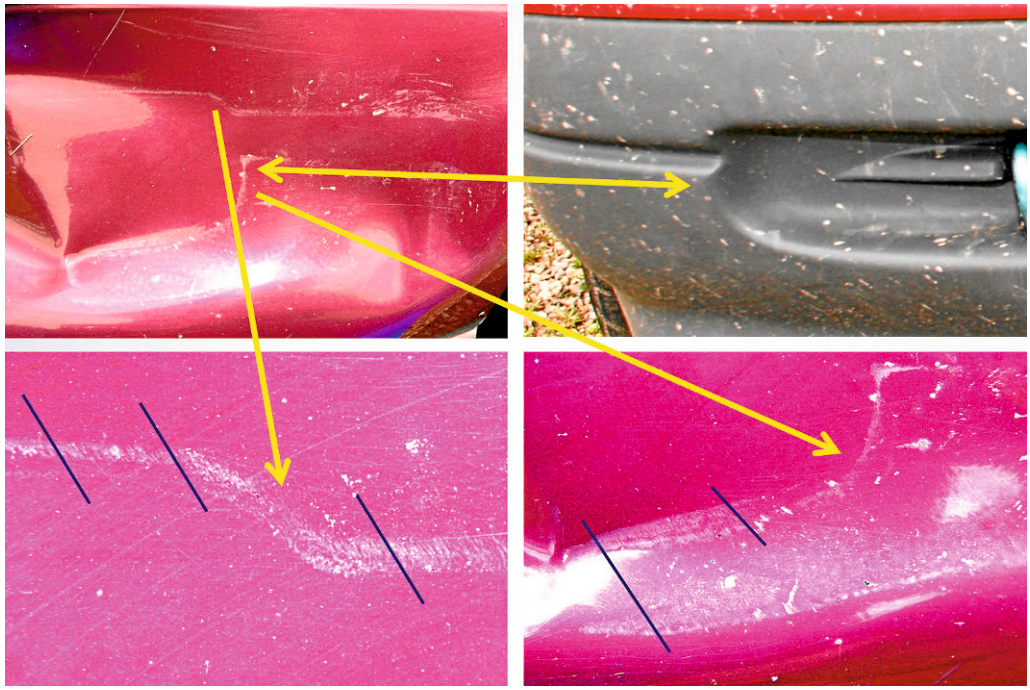


Bild A6-30 Beschädigungscharakteristika am gestoßenen Fahrzeug (oben links sowie unten) für eine Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs von 18 km/h sowie eine Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs von 5 km/h

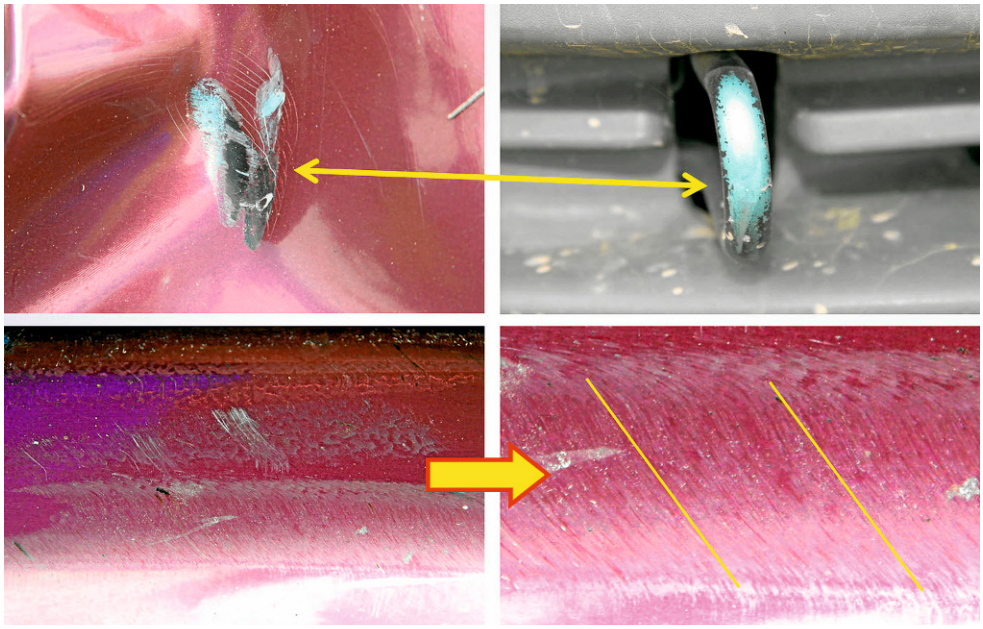


Bild A6-31 Beschädigungscharakteristika am gestoßenen Fahrzeug (oben links sowie unten) für eine Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs von 18 km/h sowie eine Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs von 5 km/h

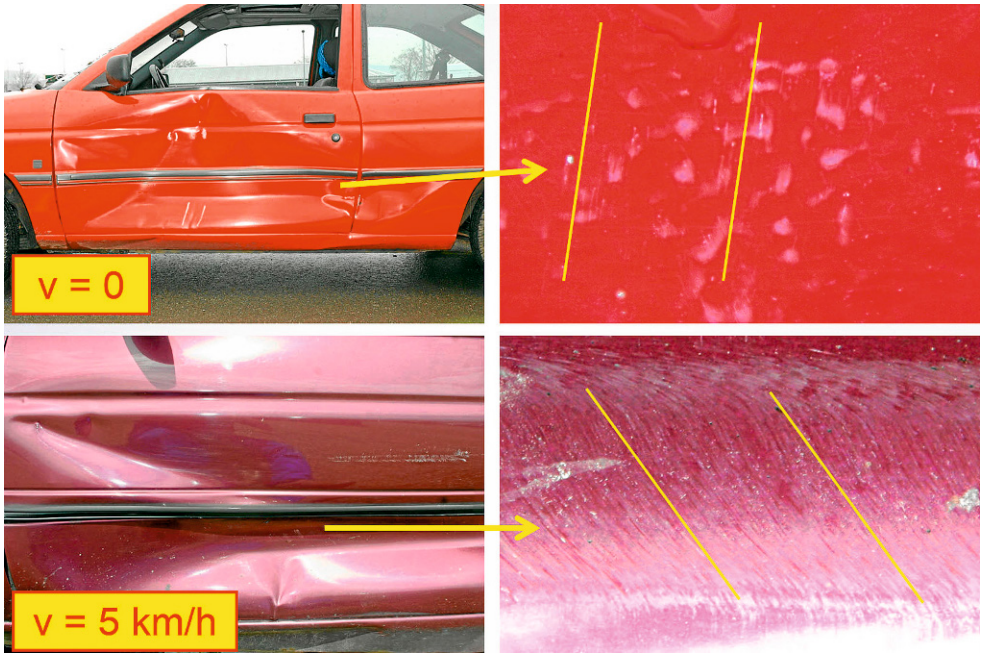


Bild A6-32 Gegenüberstellung der Beschädigungscharakteristika am gestoßenen Fahrzeug für ein bei Kollision stehendes gestoßenes Fahrzeug (oben) sowie ein bei Kollision mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h bewegtes gestoßenes Fahrzeug (unten) im Erstkontaktbereich

Bei einer Gegenüberstellung der Beschädigungen, hier insbesondere der Relativspurzeichnungen (**Bild A6-32**), wird deutlich, dass die im Wesentlichen vertikal orientierten Relativspurzeichnungen bei einem bei Kollision stehenden gestoßenen Fahrzeug (**Bild A6-32** oben) sowie einem bei Kollision mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h in Bewegung befindlichen gestoßenen Fahrzeug (**Bild A6-32** unten) keine signifikanten Unterscheidungsmerkmale zeigen.

Bild A6-33 und **Bild A6-34** zeigen die Beschädigungen und Spurzeichnungen für einen Versuch, bei dem das stoßende Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 16 km/h nahezu quer gegen das mit einer Geschwindigkeit von 7 km/h bewegte gestoßene Fahrzeug gefahren wurde. Bei diesem Versuch wurden in der Anstoßzone an der Fahrzeugseite des gestoßenen Fahrzeugs ausschließlich im Wesentlichen horizontal orientierte Relativspurzeichnungen festgestellt.

Bild A6-33 zeigt hierzu verschiedene Einzelheiten im Erstkontaktbereich. Ein weiteres interessantes Spurendetail ist der der Abschleppöse des stoßenden Fahrzeugs zuzuordnende Kontaktbereich am gestoßenen Fahrzeug (**Bild A6-34**), wobei es sich auch hier nicht um Erstkontaktspuren handelt. Die deutlich ausgeprägten Relativspuren der Abschleppöse waren bei dieser Geschwindigkeitsverteilung ausschließlich im Wesentlichen horizontal orientiert.

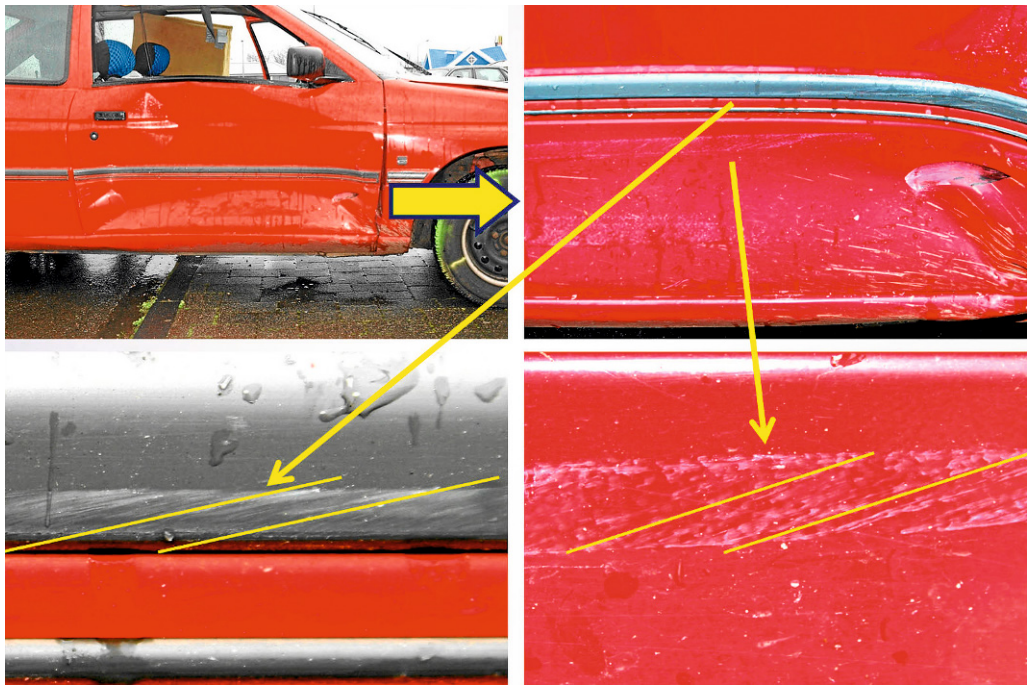


Bild A6-33 Beschädigungscharakteristika am gestoßenen Fahrzeug für eine Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs von 16 km/h sowie eine Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs von 7 km/h

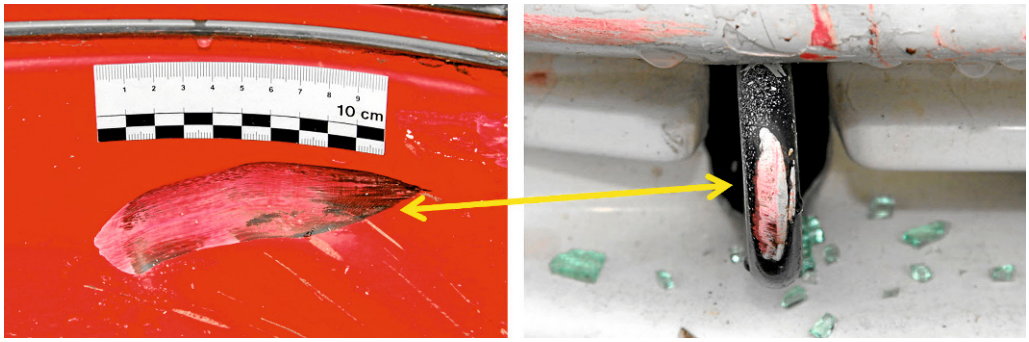


Bild A6-34 Beschädigungscharakteristika am gestoßenen Fahrzeug für eine Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs von 16 km/h sowie eine Geschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs von 7 km/h

8.6 Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung

Die Auswertung einer Vielzahl durchgeführter Versuche führt zu dem Ergebnis, dass bis zu einer Geschwindigkeit von **5...6 km/h** für das gestoßene Fahrzeug auch im Wesentlichen vertikal orientierte Relativspurzeichnungen im Erstkontaktbereich am gestoßenen Fahrzeug auftreten können. Bei höheren Geschwindigkeiten wurden dann jedoch ausschließlich im Wesentlichen horizontal orientierte Relativspurzeichnungen festgestellt. Auch bei stehendem gestoßenem Fahrzeug sind im Kontaktbereich deutlich von der Vertikalen abweichende Relativspurzeichnungen möglich. Damit kann für (nahezu) rechtwinklige Pkw-Pkw-Kollisionen mit Kontaktbereich zwischen Vorder- und Hinterachse am gestoßenen Fahrzeug im niedrigen Geschwindigkeitsbereich allein anhand von Spurzeichnungen am gestoßenen Fahrzeug aus technischer Sicht keine Aussage getroffen werden, dass das gestoßene Fahrzeug bei Kollision tatsächlich **gestanden** (**v = 0**) hat. Eine Geschwindigkeit von **5...6 km/h** ist für das gestoßene Fahrzeug möglich und führt zu einem ganz ähnlichen Spurenbild. Hierbei ist noch bedeutsam, dass bei signifikanten Abweichungen von den genannten Randbedingungen die Versuchsergebnisse nicht mehr für den zu untersuchenden Einzelfall anwendbar sein müssen. Dies betrifft insbesondere Anstöße mit hoher Exzentrizität. Anzumerken ist noch, dass seitliche Verschiebungen am Vorbau des stoßenden Fahrzeugs bei niedrigen Geschwindigkeiten nicht zwingend zu erwarten sind. Sollten solche Schäden festzustellen sein, können diese als Zusatzinformation Verwendung finden. Auch lassen sich aus der horizontalen Ausdehnung der Kontaktmerkmale am gestoßenen Fahrzeug in Bezug auf die geometrische Breite des Kontaktbereichs an der Fahrzeugfront des stoßenden Fahrzeugs keine gesicherten Hinweise auf eine Eigengeschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs ableiten. Dies deshalb, da es im Anschluss an erste kollisionäre Kontakte (Primärkollision) zu sekundären Kontakten (Sekundärkollision und weitere Kollisionen) bei gleichzeitiger Änderung der relativen Anordnung der Fahrzeuge kommen kann.

Literatur

[1] Blanke, Thomas: Der Einfluß der vorkollisionären Fahrzustände auf das Auslaufverhalten und die Endstellungen der Fahrzeuge bei PKW/PKW-Kreuzungsunfällen. Wuppertal, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, Diplomarbeit, 1994.

[2] Weber, Michael: Die Aufklärung des Kfz-Versicherungsbetrugs. Grundlagen der Kompatibilitätsanalyse und Plausibilitätsprüfung. Schriftenreihe Unfallrekonstruktion. Münster: Schimmelpfennig + Becke, 1995.

[3] Becke, Manfred: Drei Crashtestreihen zur Ermittlung von Kollisionsgeschwindigkeiten. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 37 (1999), Nr. 2.

[4] Weber, Michael: Versicherungsbetrug mit Kraftfahrzeugen. In: Hugemann, Wolfgang (Hrsg.): Unfallrekonstruktion. 1. Auflage. Münster: autorenteam GbR, 2007.

[5] Placht, Silvio: Planung, Durchführung und Auswertung von PKW-PKW-Kollisionsversuchen zur Unterscheidung des Bewegungszustandes beim Anprall eines PKW gegen die Fahrzeugseite. Berlin, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Diplomarbeit, 2007.

[6] Gilsdorf, Volker; Wiek, Alexander: Gefahren oder gestanden? In: VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 45 (2007), Nr. 10.

[7] Wiek, Alexander: Gefahren oder gestanden. Rösrather Crashtage (Versuchsunterlagen). Rösrath, Ingenieurbüro Alexander Wiek, 2010 und 2012.

[8] Brösdorf, Klaus-Dieter: Hat sich das gestoßene Fahrzeug bewegt oder hat es gestanden? Kriterien zur Entscheidungsfindung aus Versuchen. In: Vortrag auf dem AREC-Jahresmeeting. Wildhaus, 04. bis 05.07.2008.

[9] Brösdorf, Klaus-Dieter: Analysis of the condition of movement of vehicles at collision. Was a vehicle standing still? In: Vortrag auf der EVU-Jahrestagung. Brasov, 27. bis 29.09.2012.

[10] Augustin, Niclas: Analyse und Bewertung von Randbedingungen zur Beurteilung des Bewegungszustandes von Fahrzeugen während Kollisionen. Zwickau, Westsächsische Hochschule Zwickau, Diplomarbeit, 2013.

A7 Informationsaufnahme beim Kraftfahrer

Wahrnehmung und Sicherheitsverhalten

Amos S. Cohen

1 Einleitung

Die Fahrzeuglenkung gehört zu den beliebtesten sensomotorischen Tätigkeiten des modernen Menschen, die ein uralter Traum realisiert. Der Automobilist vermag seinen Aktionsradius beträchtlich zu erweitern und sich von einem Ort zum nächsten rasch und bequem fort zu bewegen, ohne nennenswerte physische Anstrengung.

Für die Beliebtheit des Pkw spricht auch die Verwendung des Kfzs als Mittel der Freizeitbeschäftigung. Etwa 50 % der Verkehrsleistung mit dem PW kommt im Rahmen des Individualverkehrs während der Freizeit zustande (BFS und ARE, Mikrozensus, 2007). Neben dem oberflächlichen Faktor „Freude am Fahren“ dürfte die Mobilität in tieferen Gründen verwurzelt sein. Für diese Annahme spricht die hohe Korrelation zwischen dem Verkehrsvolumen und dem Nationalsozialprodukt: Nimmt die Mobilität zu, steigt der nationale Wohlstand im gleichem Zeitraum ebenfalls (Schafer und Victor, 1997). Von der ermittelten Korrelation lässt sich auf die Ursächlichkeit nicht schließen. Kohler (1991) zeigte aber über längere Zeiträume, beginnend mit dem Einsatz von Dampfmaschinen auf den Schienen und in der Schifffahrt ab dem 19. Jahrhundert, dass eine erhöhte Verkehrsleistung eine Wohlstandsvermehrung zur Folge hat.

Wer die Vorteile der Mobilität erzielen will, muss eine grosse Opferbereitschaft befürworten oder zumindest akzeptieren. Mit dieser Wortwahl kommt eine fatalistische Einstellung gegenüber der Schattenseite des Straßenverkehrs zur Geltung. Die Kollisionen und ihre Folgen werden irrtümlich als inhärierender Bestandteil der Mobilität angesehen. Weltweit kommen etwa 1,2 Millionen Menschen auf der Straße pro Jahr stillschweigend um, bei steigender Tendenz (WHO und Weltbank, 2004). Die juristische Legitimation dieses Massensterbens auf den Straßen leitet sich vom Prinzip des tolerierbaren Risikos ab: die Vorteile der Mobilität überwiegen ihre Nachteile (vgl. Schubart, 1997). Sie entstehen meistens wegen kleinen Handlungsfehlern, die schwerwiegende Folgen haben.

Als Ursache der meisten Kollisionen gilt das so genannte „menschliche Versagen“. Dieser Faktor soll dann vorliegen, wenn sowohl (1) technische Mängel des Fahrzeuges als auch (2) höhere Gewalt als Unfallursache ausgeschlossen werden können. So wird der Lenker – per Definitionem – als Verursacher fast aller Kollisionen genannt, zumindest in 95 % der Fälle. Folglich wird der Mensch als schwächstes Glied des Systems Straßenverkehr angesehen. Diese verbreitete Auffassung muss zumindest relativiert werden, weil ein Aufprall kaum monokausal erklärt werden kann. Zu einer Kollision kommt es in der Regel bei einer Konstellation von ungünstigen Bedingungen, denen meistens ein Handlungsfehler vorausgeht. In seltenen Fällen kann die Situation so eskalieren, dass die eben noch verfügbare Zeit für die Durchführung eines unfallverhütenden Fahrmanövers zu kurz ist. Aus einer systemischen Perspektive kann der Lenker – ohne Rücksicht auf die Gesamtsituation und ihren Entstehungsbedingungen – selten als ausschließlicher Unfallverursacher angesehen werden.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_7

Kollisionen sind seltene Ereignisse, weil das Sicherheitsverhalten meistens, aber nicht lückenlos gewährt ist. Die Handlungszuverlässigkeit nimmt aber dann ab, wenn die Belastung durch die Fahraufgabe und Begleitumstände die aktuelle Leistungsmöglichkeit übersteigt. Umgekehrt kann auch eine langdauernde Unterbeanspruchung zu Monotonie führen, eine nachlassende Vigilanz und so eine herabgesetzte Leistungsfähigkeit bedingen. Die optimale Handlungszuverlässigkeit liegt bei der mittleren Belastung vor.

Bei Fehlbeanspruchung, sei es infolge einer zu komplexen Straßenführung, Verkehrskonstellation oder Monotonie, ist mit abnehmender Handlungszuverlässigkeit zu rechnen. Komplementär zählt auch der Zustand des Organismus des jeweiligen Lenkers. Mit erhöhter Fehlerwahrscheinlichkeit ist zu rechnen, wenn die aktuelle Leistungsfähigkeit für die Bewältigung der konkreten Anforderungen der Fahraufgabe nicht ausreicht. Bei Überbeanspruchung liegt eine Leistungsanomalie vor, weshalb Fahrfehler wahrscheinlicher werden. Die Wechselwirkung zwischen der Belastung und der Beanspruchung und die Auswirkung auf das Sicherheitsverhalten stellt den Gegenstand der vorliegenden Abhandlung dar, die anhand von exemplarisch gewählten Inhalten behandelt werden kann.

Wird der Mensch als schwächstes Glied im System Straßenverkehr angesehen, so liegt die Annahme nahe, dass die Technik überlegen ist, weil sie nicht so fehleranfällig wie der Mensch ist. Die Folgerung ist, dass die menschlichen Schwächen durch die Technik beseitigt werden sollen. Die Hypothese wird wiederholt thematisiert, ohne die Schranken dieser Möglichkeit zu vernachlässigen.

2 Sensomotorik

Die Sinne stellen die einzigen Fenster des Menschen zur Umwelt dar. Nur so kann er die aktuellen Umweltverhältnisse erkennen, um seine Handlungen an die vorliegenden Bedingungen anpassen zu können. Der Lenker muss mit Hilfe seiner Sensoren die Umweltbedingungen frühzeitig erfassen. Der relevante Input muss kognitiv verwertet werden, gefolgt vom Treffen von Handlungsentscheidungen, insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten durch die Betätigung der Bedienungselemente. Diese Kette von Vorgängen wiederholt sich zyklisch. Dank der sensorischen Situationserfassung, der Kognition und der motorischen Umsetzung der Handlungsentscheidungen kann die Anpassung der Fahrweise an die sich im Laufe der Zeit ändernden Umweltbedingungen gewährt werden.

Am Anfang des Sicherheitsverhaltens steht die Wahrnehmung der Verkehrskonstellation, worunter Straße, Verkehr und Begleitumstände verstanden werden. Die Bedeutung der Sensorik kann auch von der Negation her, anhand der Unfallanalyse belegt werden, worauf schon ältere Untersuchungen hinweisen. Nagayama 1978) deckte auf, dass über 50 % aller Kollisionen auf fehlende oder verspätete Wahrnehmung der Gefahr zurückzuführen sind. Hills (1980) schätzt diesen Anteil etwas tiefer ein. Weitere 37 % der Kollisionen werden auf Entscheidungsfehler zurückgeführt, die unter Zeitdruck wahrscheinlicher werden. Demgegenüber spielt die Motorik bloss eine marginale Rolle. Nur in 2 % der Fälle – so Nagayama – trifft der Lenker eine richtige Entscheidung, die er aber falsch ausführt; er will beispielsweise bremsen, drückt aber irrtümlich auf das Gaspedal. Diese Ergebnisse der Unfallanalyse weisen auf die zentrale Bedeutung der Wahrnehmung und der Kognition für das Sicherheitsverhalten hin. Demgegenüber kommt der Motorik im Unfallgeschehen eine marginale Bedeutung offenbar nur deshalb zu, weil sie in der Regel so reibungslos funktioniert.

Kleine Fehler können gravierende Konsequenzen zur Folge haben (vgl. WHO und Weltbank, 2004). Dafür spricht die Analyse des Unfallherganges. Enke (1977) rekonstruierte die Kollisionsbahn und stellte sich die Frage, was hätte der Lenker tun müssen, um die Kollision eben noch verhindern zu können. Seine Befunde zeigen, dass etwa 50 % aller Kollisionen eben noch verhindert werden könnten, wenn jeder Beteiligte sein einwandfreies unfallverhütendes Fahrmanöver bloss 0,5–1,0 s früher eingeleitet hätte. Das lässt sich durch raschere Reaktionszeit nicht herbeiführen, weil sie einer biologischen Schranke unterworfen ist. Eine hektische, aber unüberlegte Reaktion kann die prekäre Ausgangslage verschärfen. Die zeitliche Vorverlegung einer Reaktion ist nur dann möglich, wenn die Gefahr entsprechend früher erkannt wird, womit die Bedeutung der rechtzeitigen Wahrnehmung bekräftigt wird. Winzige Zeitspannen haben eine riesige Wirkung auf die Verkehrssicherheit. Das erklärt auch die häufig subjektiv verfälschte Deutung von Kollisionen als Schicksalsschlag. Stünde den Unfallbeteiligten bloss 0,5–1,0 s mehr zur Verfügung, wie Enke (1979) festhält, könnten sie die Kollision abwenden, was aufgrund des physikalischen Kalküls auch zutrifft.

Die Wahrnehmungsvorgänge des Automobilisten, die die informationsgestützte Grundlage seiner Handlungsentscheidungen darstellen, ermöglichen die reibungslose Fortbewegung. Gibson und Crooks setzten schon 1938 die Wahrnehmung des Automobilisten einem Überlebensmechanismus gleich. Was der Lenker sieht oder übersieht, beeinflusst sein Sicherheitsverhalten bzw. sein Fehlverhalten. Diese Aussage darf nicht zur simplifizierenden Vermutung führen, wonach der Mensch sein Fahrzeug umso zuverlässiger lenken kann, je besser er seine Verkehrsumwelt wahrzunehmen vermag. *Sehen* muss in einem viel grösseren Kontext verstanden werden, weil die Wahrnehmung sich auf die Sensorik nicht reduzieren lässt. Die Sensoren nehmen die Information aus der Umwelt auf, nehmen aber selber nichts wahr.

3 Kognition

Die sensorische Informationsaufnahme ist für die Aufstellung einer internen Repräsentation der externen Umweltverhältnisse erforderlich (Gregory, 1989). Diese unerlässliche Voraussetzung stellt aber noch keine hinreichende Bedingung des Sicherheitsverhaltens dar. Die möglichst vollständige Aufnahme der relevanten Information ist vorteilhaft, weil die Umweltsituation erst bekannt sein muss. Der Input allein ist aber noch ungenügend, weil die Informationsaufnahme nur den Beginn einer Kette von Vorgängen auslöst. Sie münden im antizipatorischen Agieren bzw. Reagieren auf die aktuelle Verkehrslage.

Der relevante Input ist erforderlich. Fehlende oder gar verspätete Wahrnehmung halten schon Nagayama (1978), Hills (1980) oder Cavallo und Cohen (2001) für eine bedeutsame Unfallursache. Liegt ein Wahrnehmungsfehler vor, wie Unterschätzung des Krümmungsgrades einer bevorstehenden Kurve oder das Übersehen eines Fussgängers bei nächtlicher Fahrt, so besteht vorerst gar keine Kompensationsmöglichkeit des Informationsmangels auf einer höheren Ebene. Wird die akute Gefahr nicht – oder nur zu spät wahrgenommen – kann eine Anpassungsreaktion nicht oder zumindest nicht rechtzeitig ausgelöst werden. Aus diesem Grund ist die Wahrnehmung eine entscheidende Einflussgrösse der Verkehrssicherheit. Die Alternativen, raschere Reaktion, noch effizientere Transmission der Bremspedalbewegung oder die Verkürzung der Todzeit des Wagens, stellen keine effizienten Maßnahmen dar (Cohen, 1998).

Intakte Sinnesorgane sind für die zuverlässige Fahrzeuglenkung erforderlich. Sie stellen allein noch keine hinreichende Bedingung für den intakten Sehvorgang bzw. für das Sicherheitsverhalten dar. Die Wahrnehmung kommt durch zwei verschiedene Informationsströme zustande.

- Das Sinnesorgan nimmt die Information aus der Umwelt auf, die zur cortikalen Verarbeitung geleitet wird. Dieser Strom wird als Information „*von unten nach oben*“ bezeichnet. Der Input fließt vom Sensor zum Verarbeitungszentrum.
- Der sensorische Input aktiviert das verwandte und relevante Wissen des Lenkers. So entsteht ein zweiter Informationsstrom, der vom Arbeitsgedächtnis zum Verarbeitungszentrum geleitet und als Information „*von oben nach unten*“ bezeichnet wird. Dieser zweite Informationsstrom umfasst die Erfahrung des Lenkers, sein habituelles Handlungsrepertoire oder die Reaktionsschematas.

Die Wahrnehmung kann nur als eine Interaktion zwischen den beiden Informationsströmen verstanden werden: als eine Wechselwirkung zwischen dem aktuellen Input und dem aktualisierten Wissen. **Bild A7-1** verdeutlicht die Rolle des Informationsstroms von „oben nach unten“ am Beispiel einer ambivalenten Figur.

Durch die Interaktion zwischen den beiden Informationsströmen kann ein Paradoxon der Verkehrssicherheit geklärt werden. Junge Menschen verfügen über die höchst möglichen sensorischen und motorischen Leistungsvoraussetzungen. Sie sind trotzdem keineswegs seltener in Kollisionen beteiligt als ältere Lenker, obwohl die Leistungsvoraussetzungen während der Alterung drastisch nachlassen. Junge Lenker können die Information vorteilhaft aufnehmen. Der Vorteil der Senioren besteht darin, dass sie den Input effizient mit dem Informationsstrom „von oben nach unten“ bereichern und so zielführende Handlungsentscheidungen treffen können. Die altersspezifischen Vorteile erklären, weshalb Senioren trotz drastisch nachlassender sensomotorischer Leistungsfähigkeit seltener verunfallen, als aufgrund ihrer Ressourcen zu erwarten wäre (Cohen, 2002). (Hinzu kommt auch die ungleiche Risikobewertung und -bereitschaft.)

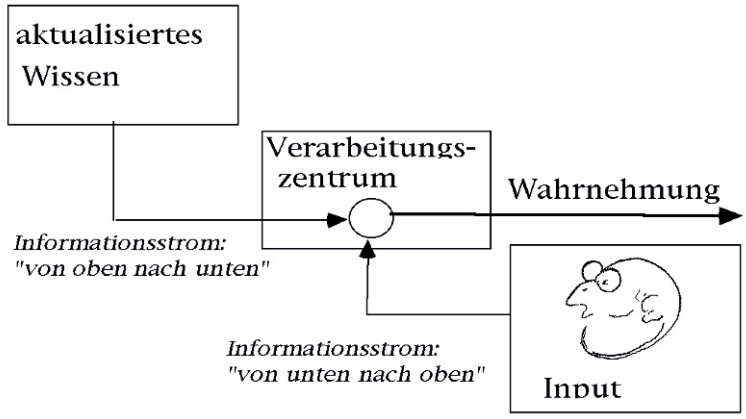


Bild A7-1 Die ambivalente Mann-Maus-Figur von Bugelski und Alampay (1961). Wie dieser identische **Input** (Information „von unten nach oben“) wahrgenommen wird, hängt neben der Informationsaufnahme auch vom aktualisierten Wissen (Information „von oben nach unten“) ab

Die Untersuchungsergebnisse zeigen Folgendes:

- Schreibt eine Gruppe von Vpn eine Minute lang Männervornamen auf, hält die Mehrheit den Input für einen *Männerkopf, weil dieser Kontext soeben aktiviert wurde* .
- Schreiben die Vpn Säugetiere auf, nimmt die Mehrheit die gleiche Figur als *Maus* wahr.

Der Kontext (aktiviertes Wissen), in dem derselbe Input eingebettet wird, beeinflusst die hervorgerufene Wahrnehmung.

Die Sinne führen gemeinsam mit der Kognition zur Wahrnehmung von Objekten oder Vorgängen. Wie bedeutend die kognitive Bereicherung ist, kann am Beispiel von **Bild A7-2** geschätzt werden. Auf der linken Seite sind fünf sinnvolle Muster (Buchstaben) fragmentarisch dargestellt. Welche diese sind, kann so lange nicht erkannt werden, bis das Organisationsprinzip erworben ist (rechte Seite). Wer von einer Verdeckung ausgeht, kann die Fragmente zu den Buchstaben „B“ integrieren.

Diese Wechselbeziehung zwischen den Informationsströmen von „unten nach oben“ und „von oben nach unten“ erklärt, weshalb die beträchtliche Rückbildung der sensorischen Leistungsfähigkeit während des Alterungsprozesses stark gedämpft im Wahrnehmungsprozess bzw. im Unfallgeschehen äussert (vgl. Rytz, 2006). Es ist sogar ein Paradoxon, wie es scheint, dass junge Menschen mit höchst möglicher sensomotorischer Leistungsfähigkeit nicht seltener in Kollisionen beteiligt sind als Senioren bis zu einem Alter von etwa 75 Jahren. Offenbar kann der beeinträchtigte Informationsstrom „von unten nach oben“ durch andere Mechanismen – zumindest in gewissen Grenzen – kompensiert werden. Das gilt zwar nicht für alle Funktionen, wohl aber für mehreren. Die kognitive Bereicherung kann erst dann kontraproduktiv werden, wenn sie Vorrang über den Input erhält. Das Interesse wird nachstehend auf die visuelle Sinnesmodalität eingeschränkt und die Rolle der Alterung, die eine sehr grosse interindividuelle Variation aufweist, anhand von ausgewählten Funktionen illustriert.

Die Rolle des Lebensalters wird deshalb berücksichtigt, weil die Gesellschaft sich in einem Vorgang der stetigen Alterung befindet. Kenntnisse über das Verkehrsverhalten werden hingegen meistens von Untersuchungen abgeleitet, an denen Menschen teilnahmen. Folglich sind Angaben über Senioren spärlich, insbesondere während realer Fahrten im Straßenverkehr. Dieses schwarze Loch soll hier etwas erhellt werden.

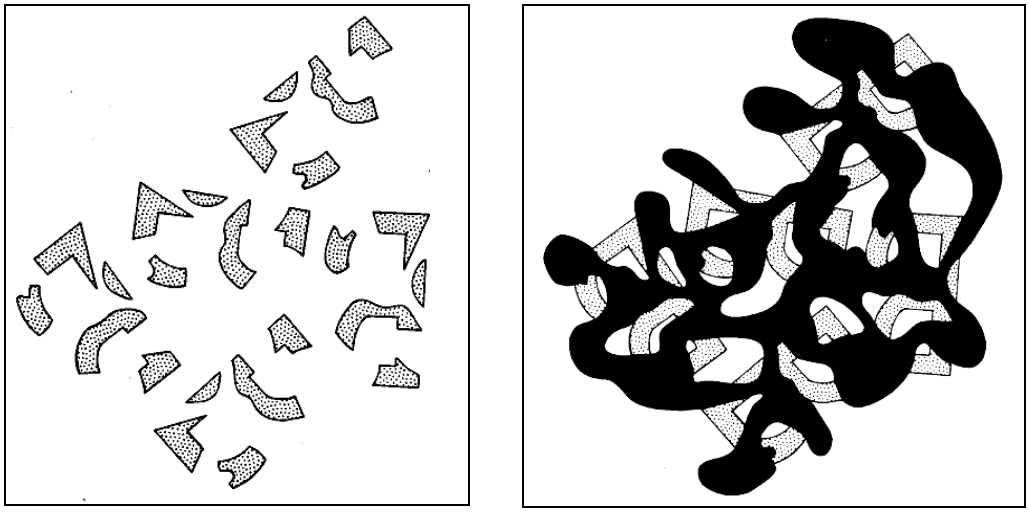


Bild A7-2 Die Rolle der kognitiven Bereicherung

- Fehlt der Informationsstrom von „oben nach unten“ wegen fehlendem Wahrnehmungslernen, können die Fragmente nicht als Gestalten erkannt werden (links; nach Bergmann, in Kubovy und Pomeranz, 1981).
- Erwirbt der Betrachter das Organisationsprinzip (rechts), können die Fragmente mühelos als fünf wohl bekannte Muster erkannt werden.

Mit zunehmender Alterung verlangsamt sich der Organismus im Allgemeinen. Folglich ist mit einem erhöhten Zeitbedarf für die Situationswahrnehmung, Treffen einer Handlungsentscheidung oder Generierung einer Anpassungsreaktion zu rechnen. Zugleich nimmt die Sinnesleistung ab. Die Kombination der beiden Faktoren (1) nachlassende Wahrnehmungsfähigkeit, was das Übersehen von Gefährdungen wahrscheinlicher macht, die dann (2) rasch und präzis beantwortet werden müssen, erhöht das *individuelle Risiko* eines Lenkers. Die prognostizierte demographische Entwicklung bedingt für die kommenden Jahrzehnte einen stetig steigenden Anteil von leistungsschwachen Senioren im Straßenverkehr. Die individuelle Schwäche führt dazu, dass die *Kompensation von Fremdfehlern* unwahrscheinlicher wird, obwohl mit nachlassender Handlungszuverlässigkeit zu rechnen ist. Die Kombination beider Faktoren, (1) steigende Fehlerhäufigkeit, die (2) seltener durch andere Verkehrsteilnehmer kompensiert werden kann, wird die Verkehrssicherheit voraussichtlich beeinträchtigen, es sei denn, dass der Verkehrsraum menschengerechter gestaltet wird.

4 Sensorik und Alterungsvorgang

Die Orientierung im Straßenverkehr wird vorwiegend durch die visuelle Sinnesmodalität getragen, weil das Auge das einzig fernorientierte Sinnesorgan ist. Darüber hinaus wird die meiste Information am präzisesten und am schnellsten visuell aufgenommen, etwa über Objekte und Vorgänge, Distanzen und Richtungen oder Bewegungen und Geschwindigkeiten. Was ein Lenker sieht oder allenfalls übersieht, bestimmt sein Sicherheitsverhalten bzw. sein Fehlverhalten. Je älter ein Mensch ist, umso stärker lassen die einzelnen Sehfunktionen nach (Cohen, 2002) und umso wahrscheinlicher hat er irgendeinen Sehfehler (Schober, zit. nach Gramberg-Danielsen, 1967) sowie die begonnene Rückbildung der Sehkraft, worauf verschiedene Indikatoren hinweisen (**Bild A7-3**).

- Die *Akkommodationsbreite* des Auges, der Bereich der Scharfeinstellung in der Tiefe nimmt von 15 Dioptrien während der Jugend auf 2 Dioptrien im Alter von ca. 50 Jahren ab (**Bild A7-3a**). Diese Einschränkung erschwert die Informationsaufnahme beim Blickwechsel von der Ferne (Straße) in die Nähe (Instrumente) und vice versa. Der Akkommodationswechsel beansprucht auch eine Zeitspanne, die bis zu über 2.0 s dauern kann (vgl. Krueger, 1982). Um diese Dauer zu verkürzen, müssen die Instrumente, Straßenelemente etc. so auffällig sein, dass sie auch ohne perfekte Akkommodation einwandfrei erkannt werden können.
- Die statische Sehschärfe, das Detailsehen beim Betrachten von ruhenden Objekten, wird bei der Erteilung der Fahrerlaubnis hervorgehoben. Es reduziert sich während der Alterung umso stärker, je geringer die Leuchtstärke und je kleiner die Kontraste werden oder bei Blendung (**Bild A7-3b**; vgl. z. B. Richards, 1977; Shinar, 1977; Shinar und Schieber, 1991). Die Folge ist neben dem Verlust des Detailsehens eine Verkürzung der Sichtdistanz. Sie reduziert sich bei nächtlichen Fahrten auf etwa 65–77 % im Alter von 60 Jahren, verglichen mit derjenigen von 25-jährigen Lenkern (Sivak, Olson und Pastalan, 1981). Das ist bei Dunkelheit dramatisch, weil sogar junge Menschen einen schwarz gekleideten Fussgänger

bloss aus einer Distanz von ca. 25–40 m bei Verwendung der Abblendlichter erkennen können (vgl. Schmidt-Claussen, 1982 oder Bartmann et al., 1993). Der Zusammenhang zwischen der statischen Sehschärfe und der Unfallhäufigkeit ist bei Tagesfahrten belanglos (Burg, 1968; Shinar, 1977; Scherer, 1989; Shinar und Schieber, 1991), sofern die Mindestanforderungen nicht unterschritten werden (Alsbrik, 1992). Hingegen stellen die mesopischen und die skotopischen Sehschärfen eine Einflussgrösse der nächtlichen Unfallbeteiligung dar (Shinar, 1977; Aulhorn, 1980; Sivak, Olson und Pastalan, 1981).

- Die *dynamische Sehschärfe* widerspiegelt die Fähigkeit, ein bewegtes Objekt detailliert wahrzunehmen. Wahrnehmungslernen fördert die dynamische Sehschärfe des Fahranfängers. Ihre schleichende Rückbildung beginnt recht früh, setzt sich ab dem 40. bis 50. Lebensjahr mit beschleunigtem Tempo fort (OECD, 1985; Shinar und Schieber, 1991) und zeigt sich umso ausgeprägter, je rascher die Bewegung ist (vgl. **Bild A7-3c**). Die dynamische Sehschärfe stellt einen Prädikator der Unfallbeteiligung dar (Burg, 1967, 1968, 1971; Hills 1976; Shinar und Schieber, 1991).

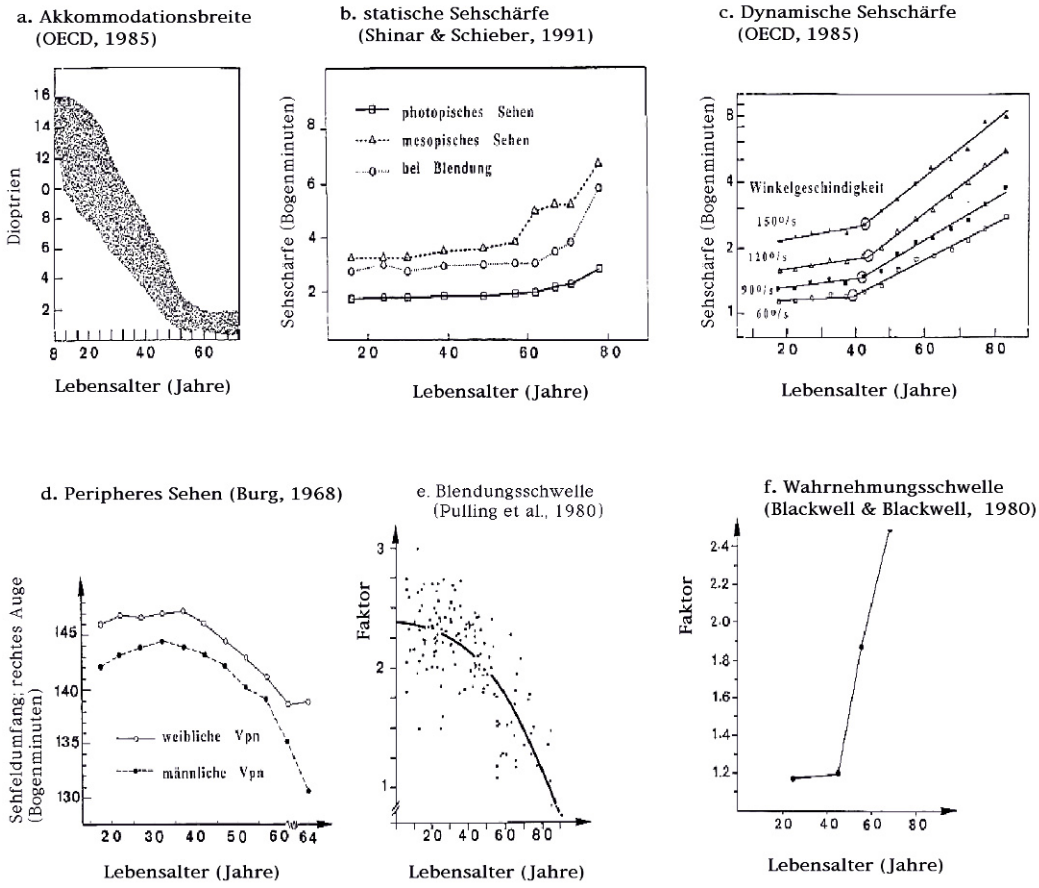


Bild A7-3 Zusammenhang zwischen sechs ausgewählten Indikatoren des Sehvermögens und des Lebensalters

- Das *periphere Sehen* erfüllt eine dreifache Funktion im Wahrnehmungsvorgang.
  - Erstens steht es im Dienste der Objektwahrnehmung als eine Art „Alarmstation". Gegenstände oder Vorgänge werden zuerst in diesem Sehbereich grob erkannt, woraufhin eine entsprechende Blickverlagerung stattfinden kann, um ein relevantes Objekt ins Zentrum der Aufmerksamkeit zu rücken und es auf die Luxusregion der Netzhaut (Fovea) abzubilden. Die peripheren und die zentralen Sehbereiche arbeiten eng zusammen.
  - Zweitens können besonders auffällige und redundante Straßenelemente, wie breite und kontrastreiche Spurstreifen, mit Hilfe des peripheren Sehens überwacht werden.
  - Drittens können hohe Geschwindigkeiten, ab einer höheren Winkelgeschwindigkeit als 15°/s, nur mit Hilfe des peripheren Sehens vorteilhaft wahrgenommen werden.

  Die massive Einengung des peripheren Sehens während der Alterung beeinträchtigt einerseits das Erkennen von Objekten im Verkehrsraum. Andererseits wird die Fahrgeschwindigkeit unterschätzt (Hills, 1980; Parsonson, Isler und Hansson, 1999). Die Einschränkung des nutzbaren Sehfeldes beeinträchtigt ganz generell die Handlungszuverlässigkeit (Wood und Troutbeck, 1994). Der Zusammenhang mit der Unfallhäufigkeit kommt nur dann zur Geltung, wenn das nutzbare Sehfeld bei geteilter Aufmerksamkeit gemessen wird, wie dies beim Autofahren erforderlich ist (Ball und Owsley, 1991; Johnson und Keltner, 1983). Wird das periphere Sehen bei voller Konzentration gemessen, etwa im Rahmen einer perimetrischen Untersuchung, so kann der ermittelte Wert nicht einmal als Indikator des nutzbaren Sehfeldes während realer Fahrten herangezogen werden (Cohen, 1984).
- Die *Blendempfindlichkeit* nimmt schon ab einem frühen Alter monoton zu, wodurch die Wahrnehmung immer stärker beeinträchtigt wird (Pulling et al., 1980; **Bild A7-3e**). Durch die Blendung wird auch die Dunkelheitsadaptation gestört. Als Folge nimmt die Wahrnehmungsschwelle temporär zu, weshalb die störende Wirkung für eine zusätzliche Weile anhält. Trotzdem liegt nur ein vager Zusammenhang zwischen der Blendempfindlichkeit und der Unfallhäufigkeit vor (Burg, 1967). Shinar (1977) führt dies auf eine kompensatorische Reaktion des Lenkers zurück; bei Blendung fährt er besonders vorsichtig.
- Die *absolute Wahrnehmungsschwelle* nimmt im Laufe der Alterung drastisch zu, weil die verschiedenen Schichten des Auges trüber werden und so mehr Licht absorbieren. Folglich benötigen die Senioren das Mehrfache an Licht, um ein Objekt auf der Fahrbahn zu bemerken. Entsprechend verkürzt sich ihr Sichtabstand bei Nacht auf einen nicht mehr zu tolerierenden kurzen Abstand. Selbst junge Lenker können, wie erwähnt, einen schwarz gekleideten Fussgänger aus einem so kurzen Abstand nicht erkennen, dass rechtzeitiges Anhalten bei zulässiger Fahrgeschwindigkeit ausgeschlossen ist, es sei denn, dass man in einer Temo-30-Zone fährt. Bei nächtlichen Fahrten mit Abblendlichtern auf Straßen ohne ortsfeste Beleuchtung herrscht Lichtmangel (vgl. Cohen, 1989). Trotzdem sind die Senioren in Dunkelheitsunfällen unterrepräsentiert. Da der Lichtmangel in keiner Form kompensiert und die Sichtprobleme nicht entschärft werden können, muss man davon ausgehen, dass die ältere Lenker ihre Sichtprobleme kennen und präventiv von Fahrten bei Dunkelheit absehen, so gut es geht (Brühning, 1991). Die Optimierung der Beleuchtungssysteme bleibt weiterhin eine wichtige Aufgabe der Fahrzeugtechnik.

Die exemplarisch aufgezählten Indikatoren der Sehkraft und ihre Rückbildung im Laufe der Alterung *beeinflussen die Unfallwahrscheinlichkeit in einem viel geringeren Ausmaß als man erwarten könnte.* Es werden nur ca. 5 % aller Kollisionen in irgendeiner Beziehung mit den einzelnen Indikatoren der Sehkraft gebracht (Ball und Owsley, 1991). Dieser vage Zusammenhang ergibt sich offenbar deshalb, weil intakte Augen eine unerlässliche Voraussetzung, aber

keine hinreichende Bedingung für die Wahrnehmung und für das Sicherheitsverhalten darstellen (Cohen, 1979).

Demgegenüber steht die enge Beziehung zwischen der Wahrnehmung und dem Unfallgeschehen (Nagayama, 1978; Hills, 1980). Trotzdem liegt eine bloss marginale Vorhersagekraft der ophthalmologischen Indikatoren und der Handlungszuverlässigkeit vor. Dieses Paradoxon führt zur Auffassung, wonach die Gefährdungen besser durch Variablen höherer Ordnung als isolierten Indikatoren geschätzt werden können (z. B. Shinar und Schieber, 1991; Ball und Owsley, 1991; Klein, 1991; Stelmach und Nahom, 1992). Beispiele dafür sind die Variation des nutzbaren Sehfeldes in Abhängigkeit von der jeweiligen Belastung oder der Einsatz des Auges im Vorgang der Informationsaufnahme o. Ä. (z. B. Cohen, 1984, 1997). Ähnliches gilt auch für die Geschwindigkeitswahrnehmung, die durch die Bewegungsparallaxe zustande kommt. Variablen höherer Ordnung könnten mögliche Informationsdefizite verlässlicher kompensieren als durch die atomistisch enge Perspektive der Ophthalmologie erklärt werden kann.

5 Blickverhalten

Die ophthalmologischen Indikatoren der Sehkraft weisen auf die potentiellen Möglichkeiten der Informationsaufnahme hin, wie sie in idealen Laborbedingungen ermittelt werden können. Wie der Lenker seine visuelle Sinnesmodalität einsetzt, wird dabei kaum berücksichtigt, obwohl die aktive Suche nach der Aufnahme von verkehrsrelevanter Information bedeutsamer als das Potential sein dürfte. Welche Information ein Lenker in welchem Zeitpunkt aufnimmt bzw. welche Objekte und Vorgänge er mit grosser Wahrscheinlichkeit übersieht, kommt im Blickverhalten zur Geltung.

Unter Blickverhalten versteht man die sich fortsetzende Kette von Blickfixationen und sakkadischen Bewegungen des Augapfels. Eine Blickfixation entspricht einem relativen Ruhezustand des Augapfels. Dann bleibt der Blick auf einem Objekt ganz kurz haften, aus dem die Information aufgenommen wird. Nach erfolgtem Input führt eine sakkadische Blickbewegung oder Sakkade, den Blick äußerst rasch zur nächstfolgenden Fixationsstelle, wo neue verkehrsrelevante Information vermutet wird. **Der aktuelle Input erfolgt meist von der fixierten Umweltstelle und unter Zeitdruck kaum aus der Netzhautperipherie**. So nimmt die Wahrscheinlichkeit des Übersehens eines Objekts oder Vorganges mit zunehmender Peripherie und steigender Beanspruchung zu. Der Input, der mit höchst möglicher Wahrscheinlichkeit zur bewussten Wahrnehmung führt, wird foveal aufgenommen, weil die jeweils fixierte Stelle in der Regel auch im Zentrum der visuellen Aufmerksamkeit steht. Das Blickverhalten widerspiegelt somit den dynamischen Verlauf der visuell gesteuerten Aufmerksamkeitsverteilung. Verlagert sich die Aufmerksamkeit, folgt meistens eine korrespondierende Blickbewegung, um die entsprechende Information möglichst effizient aufzunehmen.

Die Blickverhaltensanalyse weist auf die Rückbildung der visuellen Orientierung im höheren Alter hin. Im Durchschnitt benötigen jüngere Vpn (20–30j.) vergleichsweise weniger Zeit für den Input aus einer Szene im Simulator als Senioren (62–80j). Senioren benötigen in der Regel mehr Zeit für den Input. Sie konzentrieren sich eher auf gewisse Objekte oder Vorgänge, statt die Aufmerksamkeit auf die ganze Verkehrskonstellation zu verteilen, wie schon erfahrene aber noch jüngere Vpn tun (Maltz und Shinar, 1999). Die Senioren brauchen im Durchschnitt auch mehr Zeit für den Input, beachten aber trotzdem nur einen beschränkten Ausschnitt des Verkehrsraumes. Die Senioren scheinen – im Durchschnitt – die Information irgendwie ähnlich wie Kinder aufzunehmen, die ihre Aufmerksamkeit (noch) nicht verteilen können (Mackworth und Bruner, 1970) während die Senioren nicht mehr können.

Die berichteten Ergebnisse stellen Durchschnittswerte dar und verschleiern so die interindividuelle Variation. Sie liegen in jeder Altersstufe vor, vergrössern sich aber im Laufe der Alterung. Entsprechend betrachteten einige Senioren die Straßenszenen für die vergleichbare Dauer wie die Gruppen der jungen Vpn und verteilten ihre Aufmerksamkeit im Verkehrsraum auch ähnlich. Andere Senioren benötigten jedoch besonders viel Zeit für den Input und konzentrierten sich zugleich auf nur wenige Straßenelemente. Die bedeutsame interindividuelle Variation, wie sie im Vorgang der Informationsaufnahme quantitativ und qualitativ zur Geltung kommt, bekräftigt die Regel, wonach das chronologische Alter mit dem biologischen nicht gleichgesetzt werden kann.

Die jungen Vpn verteilen ihre Aufmerksamkeit auf den ganzen Verkehrsraum, so gut es unter Zeitdruck geht. Die biologische Alterung bedingt hingegen eine Konzentration auf wenige Straßenelemente. Maltz und Shinar (1999) meinen, dass die Aufmerksamkeitsverteilung im Verkehrsraum im jungen Alter recht gut verläuft. Mit der Alterung ist hingegen eine Konzentration auf einen beschränkten Straßenbereich zu beobachten. Parallel wird der Vorgang der Informationsaufnahme instabiler im Laufe der Alterung. Phasen der Orientierungsschwierigkeit äußern sich durch kleine Blickbewegungen, gefolgt von kurzen Fixationen. Diese Forscher meinen, dass die Häufung von vielen kurzen Fixationen im engen Bereich entweder auf eine rückgebildete visuelle Suchstrategie oder auf eine massive Einschränkung des nutzbaren Sehfeldes zurückgeführt werden dürfte. Ball, Owsley, Sloane, Roenker und Bruni (1991) bezeichnen solche Phasen bloss als Ausdruck inadäquater Aufmerksamkeit. Ihr gelegentliches Auftreten dürfte Augenblicke der Gefährdung bedeuten, die hin und wieder vorkommen. Solche sporadische Augenblicke der Gefährdung stellen kurze Phasen der beeinträchtigten Orientierung dar, die mit erhöhterm Risiko korrelieren dürfen.

6 Nutzbarer Sehfeldumfang

Komplementär zum fovealen Input werden gewisse Reize um die aktuelle Fixationsstelle herum entweder sofort erkannt oder sie fallen so auf, dass sie die visuelle Aufmerksamkeit unterschwellig fesseln und damit Ziel einer nächsten Blickzuwendung werden können. Diese klassische Zusammenarbeit zwischen dem zentralen und dem peripheren Sehen stellt die Grundlage für die visuelle Orientierung im Verkehr dar. Sie kann um so effizienter ablaufen, je leistungsfähiger die jeweilige Netzhautstelle, je auffälliger der Reiz und je kleiner die aktuelle Beanspruchung des Lenkers ist.

Die räumliche Ausdehnung des peripheren Sehens um die aktuelle Fixationsstelle herum, wo ein gegebener Reiz eben noch wahrgenommen werden kann, wird als *nutzbares Sehfeld* (NSF) oder gleichwertig als *Useful Field of View* (UFOV) bezeichnet. In diesem Sehbereich kann die Information so effizient aufgenommen werden, dass sie das Verhalten zu beeinflussen vermag. Die Ausdehnung des NSFs wird primär vom anatomischen Aufbau des Auges sowie seiner physiologischen Arbeitsweise beeinflusst, aber nicht vollständig determiniert. Der nutzbare Sehfeldumfang variiert auch in Abhängigkeit der jeweiligen Beanspruchung des Menschen und wird von seinem Alter überlagert.

Die jeweilige Ausdehnung des NSFs beginnt sich ab einem recht jungen Alter von nur 20 Jahren schleichend, aber monoton einzuschränken (Ball, Beard, Roenker, Miller und Griggs, 1988; Sekuler und Bennett, 2000). Kompensatorisch zur Sehfeldeinengung kann die Reizintensität erhöht werden. Auch Erfahrung oder gezieltes Training vermögen der Einengung des NSFs entgegen zu wirken, zumindest bis zu einem Alter von 75 Jahren (Ball, Beard,

Roenker, Miller und Griggs, 1988). Kognitive Faktoren, wie die Erwartung eines Signals, erleichtert seine Wahrnehmung, insbesondere wenn auch der Ort seines Erscheinens vorhersehbar ist. Das gilt selbst für das Erkennen von Fussgängern während realer nächtlicher Fahrten (Bartmann et al., 1993) oder für das Entdecken von Signalen im Rahmen der Grundlagenforschung im Laboratorium, was schon längst nachgewiesen wurde (z. B. Ikeda und Takeuchi, 1975).

Sekuler und Bennett (2000) halten den Umfang des NSFs für ein Kriterium der Fahrtüchtigkeit. Je grösser die Ausdehnung, umso einfacher und schneller kann der Lenker seine Umgebung erfassen. Zugleich vermag er die potentiellen Ziele für die nächstfolgende Fixationsstelle effizienter und in einem grösseren Bereich um die aktuelle Fixationsstelle zu erkennen. Diese vorteilhaften Voraussetzungen lassen mit der progressiven Einengung des NSFs bei Überbeanspruchung, aber auch während der Alterung nach. Parallel erhöht sich die Unfallwahrscheinlichkeit (Wood, 2002; Tarawneh, McCoy, Bishu und Ballard, 1993). Dieser Leistungsabfall kann kompensiert werden, zumindest teilweise. Sensomotorische und kognitive Schulung, begleitet von körperlichem Training und der Förderung des Verkehrswissens vermag die Handlungszuverlässigkeit so zu steigern, dass das Unfallrisiko wieder verringert wird, wie Tarawneh et al. (1993) in einer Langzeitstudie unter Beteiligung von Senioren im Durchschnittsalter von über 70 Jahren gezeigt haben. Visuelle Leistungsdefizite können durch Kognition in gewissen Grenzen kompensiert werden.

Die Einengung des NSFs kann aus verschiedenen Perspektiven gesehen werden. *Nachteil* des eingeschränkten Sehfeldes ist eine erschwerte visuelle Orientierung (vgl. **Bild A7-4**), wodurch das Sicherheitsverhalten beeinträchtigt wird (Wood, 2002). Von einem entgegengesetzten Standpunkt aus kann die Variation des NSFs als ein *sinnvoller und vorteilhafter Selektionsvorgang* gesehen werden. Objekte oder Vorgänge, die von Anfang an im Zentrum der visuellen Aufmerksamkeit stehen, werden auf der leistungsfähigen Fovea abgebildet und damit mit dem Blick fixiert. Der entsprechende Input wird vorrangig verarbeitet. Damit erweist sich die Einengung des NSFs bei Überbeanspruchung als ein nützlicher Mechanismus der Informationsselektion, um eine zusätzliche Belastung möglichst zu meiden. Reize in der Peripherie des Sehfeldes werden bei Überbeanspruchung eher vernachlässigt.

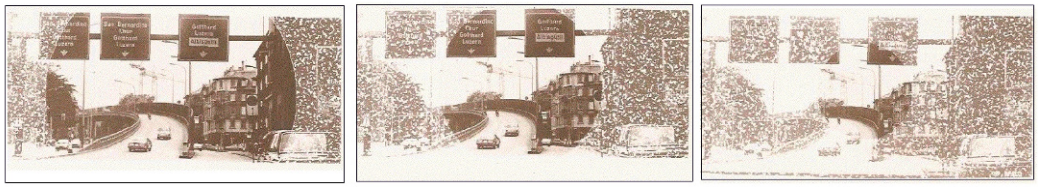


Bild A7-4 Schematische Darstellung des nutzbaren Sehfeldes (NSF) und seine progressive Einengung (von lins nach rechts). Sein jeweiliger Umfang wird als diejenige räumliche Ausdehnung um die aktuelle Fixationsstelle herum verstanden, aus der die Information so effizient aufgenommen werden kann, daß sie das Verhalten zu beeinflussen vermag. Je grösser der nutzbare Sehfeldumfang ist, umso vollständiger kann der Verkehrsraum gesehen werden.

Diese Konzentration mit ihrer negativen Begleiterscheinung beim Autofahren kann zum so genannten *Tunnelsehen* (Mackworth, 1976) führen. Dabei spielt es keine Rolle, aus welcher Quelle die Belastung stammt. Es handelt sich um einen zentralen Vorgang. Was zählt, ist die aktuelle kognitive Belastung. Bedingt sie eine Überbeanspruchung, sei es wegen der aktuellen Kognition bzw. Beanspruchung des Lenkers, wie exzessiv hohe Informationsdichte oder wegen

Ermüdung (z. B. Rogé et al. 2003, 2004; Cohen, 1984). Eine mentale Überforderung wird – unabhängig von der Ursache – durch die Reduktion des Inputs beantwortet, weshalb der Verkehrsraum bei eingeschränktem NSF noch lückenhafter beachtet werden kann.

Ob und wann eine Überbeanspruchung und damit die Einengung des NSFs eintritt, hängt auch von den Fähigkeiten des Lenkers ab. Die Erfahrung, mit autodidaktischem Training vergleichbar, worüber die Senioren verfügen, erleichtert die aktuelle Situation zu erfassen und daraus das Kommende, an Hand der vorliegenden Zeichen, vorherzusehen. Diese Fähigkeit, die Antizipation des Künftigen, beruht auf effizienter Verwertung von Signalen, wie die Grundlagenforschung zeigt (vgl. Hollis, 1997). Darin liegt die Stärke der erfahrenen Lenker im Allgemeinen.

Die Antizipation erleichtert die Orientierung in der Regel, solange sie einwandfrei funktioniert. Ein Übermass an kognitiver Bereicherung des Inputs, was bei mangelhafter Informationsaufnahme wahrscheinlicher wird, kann hingegen zu einer Quelle von neuartigen Gefährdungen werden. Riskant wird es dann, wenn der Informationsstrom von „oben nach unten“ stärker gewichtet wird als derjenige von „unten nach oben“ (vgl. **Bild A7-1**). Kommt dies beim Autofahren vor, dann lenkt man sein Fahrzeug eher aufgrund vergangener Erfahrung als der konkreten Situation. *Ein Zeichen der Gefährdung liegt dann vor, wenn eine Änderung der Straßenanlage, Verkehrskonstellation oder der Signalisation vorerst unbemerkt bleibt.* Davon kann der Lenker erst dann etwas merken, wenn er überraschend in Situationen gerät, bei denen er sich nicht erklären kann, wie sie entstanden sind.

Die Fahrpraxis fördert die Erfassung der Redundanz und den Übergang von der Fertigkeits- zur Wissensebene bei der Handlungskontrolle (Rasmussen, 1986). Wird die Redundanz erfasst und verwertet, benötigt der Lenker weniger Input, um auf die Gesamtsituation zu schließen, etwa im Vergleich zu einem Fahranfänger, der jede Einzelheit beachten muss, so gut es geht, und danach die Teile zu einer Einheit integrieren muss. Die Erfahrung ermöglicht den Übergang von kontrollierter zu automatisierter Handlung. Durch die effiziente Verwertung des Inputs nimmt der Bedarf an Information für die Generierung einer Anpassungsreaktion und auch die Beanspruchung bei gleichbleibender Belastung ab. Die kognitive Entlastung wirkt der Einschränkung des NSFs entgegen. Der gleiche Effekt kann auch durch spezifisches Training erzielt werden, aber auch durch die Förderung der Erwartung, etwa Vorwissen über den Erscheinungsort eines Reizes oder Ereignisses (vgl. Cohen, 1984; Ball und Owsley, 1991).

7 Folgerungen

Die zuverlässige Steuerung eines Wagens kann nur dann erwartet werden, wenn der Lenker seine Handlungen von informationsgestützten Entscheidungen ableitet. Das setzt wiederum die Wahrnehmung des Verkehrsraumes und die im Laufe der Zeit sich ändernde Verkehrskonstellation voraus. Trotz der intuitiven Annahme einer engen Beziehung zwischen den geläufigen Indikatoren der Sehkraft und der Unfallhäufigkeit kann dieser Zusammenhang sachlich kaum bekräftigt werden. Ball, Owsley, Sloane und Roenker (1993) führen drei Gründe auf:

- Unfälle sind seltene Ereignisse.
- Die Automobilisten dürften Sehdefizite durch Verhaltensänderung kompensieren, und
- In Untersuchungen werden einzelne Indikatoren **isoliert** erfasst, während das Sicherheitsverhalten als Ganzheit unter Beteiligung der Kognition gesteuert wird.

Hinzu kommt, dass Standardtests der Ophthalmologie einzelne Indikatoren der Sehkraft in idealer Laborbedingung messen, bei bester Beleuchtung und fokussierter Aufmerksamkeit des Probanden. Die Laborbefunde stellen so eine zu optimistische Schätzung dar, die der komplexen Alltagssituation der Fahrzeuglenkung keine Rechnung trägt und die Kognition vernachlässigt (Ball, Beard, Roenker, Miller und Griggs, 1988). Selbst der Umfang des NSFs kann aufgrund der ophthalmologischen Indikatoren, darunter auch Perimetrie, für die reale Fahrt nicht zuverlässig geschätzt werden. Mögliche Ursachen sind die Bedingungen, die zwischen den Labor- und Feldsituationen unterschieden werden oder das Verhältnis zwischen dem Ganzen und der Summe seiner Teile (Cohen, 1984). Darüber hinaus ist eine geteilte Aufmerksamkeit im Straßenverkehr erforderlich, während eine fokussierte Aufmerksamkeit auf gewissen Straßenelementen, wie im Labor, Gefährdungen wegen inflexiblem Input zur Folge haben kann.

Ein weiterer Grund dürfte im Verhältnis zwischen der potenziellen Leistung des Auges liegen, wie sie anhand der diskreten ophthalmologischen Indikatoren ermittelt wird und den realisierbaren Möglichkeiten im Alltag. Wird ein intaktes Sinnesorgan vorausgesetzt, was erforderlich ist, so ist es entscheidend, wie der Lenker seine Augen für die Suche und Aufnahme der verkehrsrelevanten Information einsetzt. Wenn jemand eine Sehschärfe von 1.0 bei fokussierter Aufmerksamkeit aufweist, aber ein relevantes Objekt mit dem Blick nicht fixiert, so resultiert ein markanter Abfall des Auflösungsvermögens Richtung Netzhautperipherie. Bei einer Exzentrizität von nur 10^{o} kann höchstens noch eine Sehschärfe von bloß 0.2 realisiert werden. Was der Lenker ins Zentrum seiner Aufmerksamkeit rückt, indem er es mit dem Blick fixiert, oder eben nicht, hängt stärker von seinem Blickverhalten ab, als von der im Untersuchungsraum gemessenen Sehschärfe allein. Der Einsatz des Auges bei der visuellen Orientierung kann als ein Beispiel des kompensatorischen Verhaltens angesehen werden. Davon machen die Senioren offenbar mehr Gebrauch als die jüngeren Lenker, etwa indem sie ihre Aufmerksamkeit einer bevorstehenden Belastung früher zuwenden. Wird ein Ereignis antizipiert, so können sie beim Eintreten eines erwarteten Ereignisses etwa gleich gut wie die jüngeren Lenker handeln (Cohen, 1996). Zu dieser Kategorie der Verhaltenskompensation gehört auch die Feststellung, dass „Verkehrsuntüchtigkeit“ mit zunehmendem Alter seltener mit zunehmendem Alter als Unfallursache vorkommt, obwohl die Senioren rascher als die jüngeren Lenker ermüden (Ellinghaus, Schlag und Steinbrecher, 1990). Die ersteren legen pro Fahrt auch kürzere Strecken zurück (OECD, 1985).

Im Laufe der Alterung nimmt die Wahrnehmungsschwelle drastisch zu. Folglich muss man mit zunehmender Unfallhäufigkeit der Senioren während nächtlicher Fahrten rechnen. Diese Erwartung kommt in der Unfallstatistik nicht zum Vorschein, im Gegenteil. Senioren verunfallen sogar seltener bei Dunkelheit als die jüngeren Lenker (Brühning, 1991). Der Bedarf an mehr Licht mit zunehmendem Alter kann nicht kompensiert werden, weil die Lichtstärke der Scheinwerfer normiert ist. Dieses Paradoxon, geringere Unfallhäufigkeit trotz beträchtlicher Verschlechterung der Sehkraft, kann behoben werden, wenn man eine *Verhaltensänderung* annimmt: Die Senioren, die ihre Sichtprobleme bei Nacht merken, meiden offenbar Dunkelheitsfahrten, wenn immer möglich. Fahren sie seltener, sind sie auch kaum grossem Risiko exponiert und an weniger Kollisionen beteiligt (**Bild A7-5**). Diese Erklärung geht aber davon aus, dass die Senioren bei Dunkelheitsfahrten gefährdeter als junge Lenker sind. Müssen die Senioren trotzdem fahren, so sind sie auch exponierter. Diese Erwartung bekräftigt die Unfallanalyse, wenn nur Berufsfahrer berücksichtigt werden, die ihren Wagen auch nachts regelmäßig lenken müssen (vgl. **Bild A7-6**). Die Wahrnehmungsvorgänge bleiben eine entscheidene Einflussgrösse des Sicherheitsverhaltens. Lassen sie nach, so wird diese negative Wirkung durch die Verhaltensänderung kompensiert, so gut es geht.

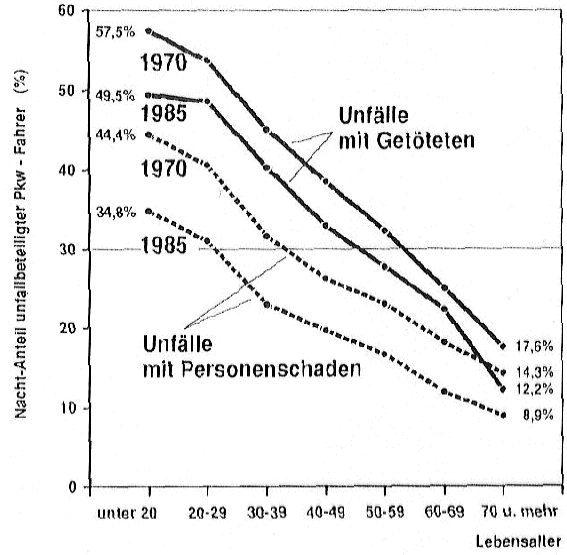


Bild A7-5 Anteil von Pkw-Fahrern, die 1970–1985 in der BRD (alte Länder) an nächtlichen Unfällen mit Personenschäden und fatalen Folgen beteiligt waren. Der Anteil der Senioren nimmt mit zunehmendem Alter ab, wobei Männer häufiger als Frauen beteiligt sind.

Eine nachlassende Leistungsfähigkeit der visuellen Sinnesmodalität kommt im Unfallgeschehen nicht linear zur Geltung. Das ist verständlich, weil die Wahrnehmung durch die Wechselwirkung zwischen den Informationsströmen „von unten nach oben“ und „von oben nach unten“ zustande kommt. Bei dieser Wechselwirkung dürfte die nachlassende Sehkraft durch die kognitive Bereicherung kompensiert werden, so gut es geht. Daher können auch die einzelnen ophthalmologischen Indikatoren, wie dies bei isolierter Betrachtung von isolierten Merkmalen nicht proportional zur Geltung kommen. Die visuelle Sinnesmodalität, als ein funktionierendes System verstanden, dürfte Vorrang der Ganzheit über seine einzelnen Bestandteile haben. Für diese Annahme spricht einerseits der beschränkte Zusammenhang zwischen den Kennwerten der Sehkraft und der Unfallhäufigkeit. Demgegenüber können Variablen höherer Ordnung als Prädikatoren der Gefährdung dienen (z. B. Wood, 2002; Tarawneh et al., 1993 oder McKnight und McKnight, 1999). Schließlich wird ein beachtlicher Anteil der Kollision wegen Wahrnehmungsfehlern verursacht, indem der Lenker die Gefahr nicht oder erst zu spät erkennt (Nagayama, 1978; Hills, 1980), womit die hervorragende Bedeutung der visuellen Sinnesmodalität als funktionierende Einheit für die Verkehrssicherheit zur Geltung kommt. Diese Fehlerart kann die Folge von zu hoher Informationsdichte, aber auch von mangelnder Aufmerksamkeit sein.

Eine Restriktion des Fahrausweises aufgrund von stereotypischen Vorstellungen über Sehdefizite oder über nachlassende kognitive Fähigkeiten halten Ball, Owsley, Sloane und Roenker (1993) für sachlich kaum begründbar. Demgegenüber stellte die gleiche Forschergruppe (Ball, Beard, Roenker, Miller und Griggs, 1988) schon früher eine Beziehung zwischen der Unfallgeschichte eines Lenkers und ausgewählten ophthalmologischen Funktionen, wie allgemeiner Zustand der Augen oder der kognitive Zustand des Lenkers fest. Wood (2002) ist es sogar gelungen, eine korrelative Beziehung zwischen der Fahrtüchtigkeit und den Variablen höherer Ordnung, wie das NSF, festzustellen. Entsprechende Messungen sind komplex und eignen sich deshalb für Reihenuntersuchungen vorerst noch nicht.

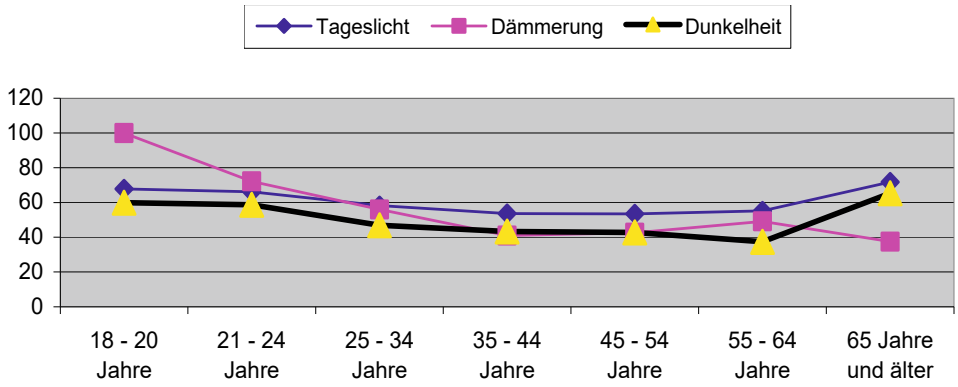


Bild A7-6 Anteil der Hauptverursacher an Beteiligten an Unfällen mit Personenschaden nach Altersklassen und Lichtverhältnissen, LKW über 7,5t im Jahr 2004 (nach Sonderauswertung StBa, 2006). (Diese Abbildung wurde von den Herren W. Fastenmeier und H. Gstalter freundlicherweise zur Verfügung gestellt.)

Die nachlassende Leistung des Wahrnehmungssystems kann durch Übung und Training so beeinflusst werden, dass sogar die sensorische Rückbildung während der Alterung verzögert und gedämpft wird. Dadurch können die interindividuellen Unterschiede, die sich im Laufe der Alterung immer mehr vergrössern, noch ausgeprägter werden. Das bedeutet einerseits, dass das chronologische Alter weder mit dem biologischen gleichgesetzt noch als einfaches Selektionskriterium verwendet werden darf. Andererseits muss die Fahrzeuglenkung andauernd trainiert werden, wer rastet, der rostet und dann ist das Absehen von Fahrzeuglenkung ratsam, etwa von nächtlichen Fahrten. Bis zu einem solchen Zeitpunkt müssen die Lenker fahren und fahren und weiterfahren, damit ihre Fähigkeiten und Fertigkeiten aufrecht erhalten bleiben. Die Bedeutung für die Praxis der Unfallrekonstruktion ist, dass das chronologische Alter eines Lenkers kein eindeutiger Indikator seiner sensomotorischen Leistungsfähigkeit darstellen kann.

Literaturhinweise

Alsbrik, K. E. (1992). Sehen und Verkehrsunfälle. Eine dänische Studie über 359 Autounfälle mit Personenschaden. Der Ophthalmologe, Supplement 1, 89, 10

Aulhorn, E. (1980). Der Fussgängerunfall bei Dunkelheit. In: Bericht über den 3. ADAC-Aerztekongress vom 21. bis 22. Juni 1979, in Hamburg. München, ADAC, Schriftreihe Straßenverkehr, 24, 90–99

Ball, K. K., Beard, B., Roenker, D. L., Miller, R. I., und Griggs, D. S. (1988). Age and visual search: expending the useful field of vision of view. Journal of the Optometric Society of America, 5, 2210–2219

Ball, K. und Owsley, C. (1991). Identifying correlates of accident involvement for older drivers. Human Factors, 33, 583–595

Ball, K. K., Owsley, C., Sloane, M. E., Roenker, D. L. und Bruni, J. (1993). Visual attention problems as predictor of vehicle crashes in older drivers.. Investigative Ophthalmology & Visual Sciences, 34, 3110-3123

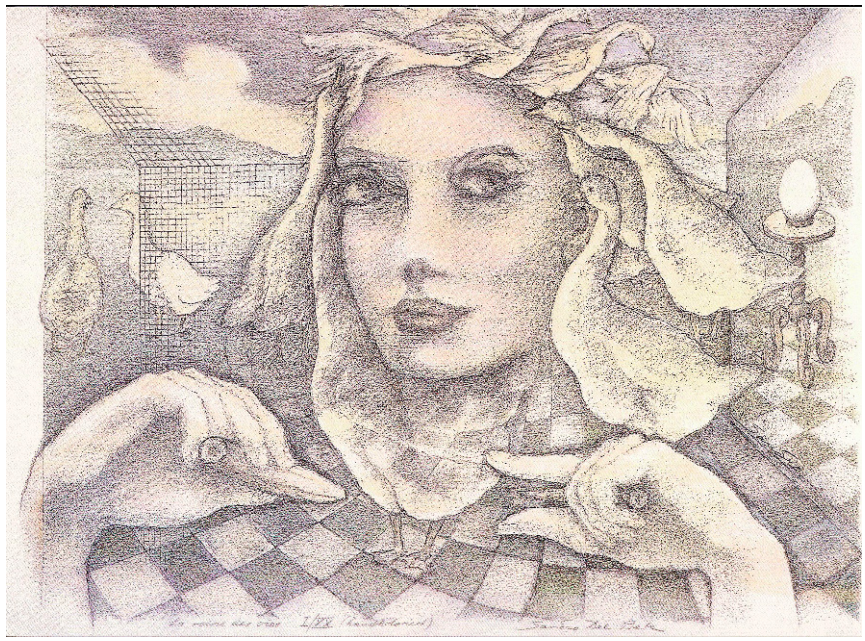
Bartmann, A., Reiffenrath, D., Jacobs, A. M., Leder, H., Wakowiak, M. und Szymkowiak, A. (1993). Sichtabstand bei Fahrten in der Dunkelheit. Bremerhaven: Verlag für Neue Wissenschaft

Blackwell, O. M. und Blackwell, H. R. (1971). Visual performance data for 156 normal observers of various ages. Journal of the Illumination Engineering Society, 1, 3–13

Brühning, E. (1991). Das Unfallgeschehen bei Nacht. Zeitschrift für Verkehrssicherheit. 37, 17–24

Bugelski, B. R. und Alampay, D. A. (1961). The role of frequency in developing perceptual sets. Canadian Journal of Psychology, 15, 205–211
Burg, A. (1967). The relationship between vision test scores and driving record: General findings (Report 67-24). Los Angeles, University of California, Department of Engineering
Burg, A. (1968). Lateral visual fields as related to age and sex. Journal of Applied Psychology, 52, 10–15.
Burg, A. (1971). Vision and driving: A report on research. Human Factors, 13, 79–87
Cavallo, V. E. und Cohen, A. S. (2001). Perception. In Barjonet, P.-E. (Hrsg.): Traffic psychology today. Boston: Kluwer, 63–89
Cohen, A. S. (1979). Auge und Kamera. Der Augenoptiker, 34, 6, 4–13
Cohen, A S. (1984). Einflußgrößen auf das nutzbare Sehfeld. Bergisch Gladbach: BASt. Bericht # 100 zum FP 8005
Cohen, A. S. (1987). Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen
Cohen, A. S. (1989). Fahrt auf Sichtdistanz in der Nacht: Eine bisher unerfüllbare Forderung des Gesetzgebers. In: Kroj, G. und Porschen, K. M.: Fortschritte der Verkehrspsychologie ’88. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 342–351
Cohen, A. S. (1996). Psychisch bedingte Straßenbreite. Köln: TÜV
Cohen, A. S. (1997). Möglichkeiten und Grenzen der Informationsaufnahme und –verarbeitung im motorisierten Straßenverkehr aus psychologischer Sicht. In: Schaffhauser, R. (Hrsg.): Aspekte der Überforderung im Straßenverkehr – Forderungen an die Praxis. St. Gallen: Universität St. Gallen; Schweizerisches Institut für Verwaltungskurse, 9–34
Cohen, A. S. (1998). Visuelle Orientierung im Straßenverkehr. Bern: bfu Report #34
Cohen, A. S. (2002). Leistungaanforderungen und Leistungsmöglichkeiten. In: Schlag, B. und Megel, K. (Hrsg.). Mobilität und gesellschaftliche Partizipation im Alter. Stuttgart: Kohlhammer, 292–310
Ellinghaus, D., Schlag, B. und Steinbrecher, J. (1990). Leistungsfähigkeiten und Fahrverhalten älterer Kraftfahrer. Bremerhaven: Verlag für Neue Wissenschaft
Enke, K. (1979). Möglichkeiten zur Verbesserung der aktiven Sicherheit innerhalb des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Umgebung. Referat gehalten an der 7. Tagung über Sicherheitsfahrzeuge. Paris, 5. –6. Juni 1979
Gibson, J. J. und Crooks, L. E. (1938). A theoretical field analysis of automobile driving. The American Journal of Psychology, 51, 453–471
Gramberg-Danielsen, B. (1967). Sehen und Verkehr. Berlin-Heidelberg-New York: Springer
Gregory, R. L. (1989). Light on black boxes. Perception, 18, 281–284
Hills, B. L. (1976). Visibility under night driving conditions: Derivation of (dL, A) characteristics and factors in their application. Lightning Research and Technology, 8, 11–26
Hills, B. L. (1980). Vision, visibility, and perception in driving. Perception, 9, 183–216
Hollis, K. L. (1997) Contemporary research on Pavlovian conditioning. American Psychologist, 52, 956–965
Ikeda, M. und Takeuchi, T. (1975). Influence of the foveal load on the function of the visual field. Perception & Psychophysics, 18, 255–260
Johnson, C. A. und Keltner, J. L. (1983). Incidence of visual field loss in 20000 eyes and its relationship to driving performance. Archives of Ophthalmology, 101, 371–375
Klein, R. (1991). Age related eye disease, visual impairment and driving in the eldery. Human Factors, 33, 521–525
Kohler, W. (1991). Gütertransport aus ökonomischer und ökologischer Sicht. In: Cohen, A. S. und Hirsig, R. (Hrsg.).Fortschritte der Verkerhspsychologie `90. Köln: TÜV-Rheinland, 45–51
Krueger, H. (1982). Objektive, kontinuierliche Messung der Refraktion des Auges. Biomedizinische Technik. 27, 142–147
Kubovy M. und Pomeranz, J. R. (1981). Perceptual organization. Hillsdale, New Jersey, S. 439–440
Mackworth, N. H. (1976). Stimulus density limits the useful field of view. In: Monty, R. A. und Senders, J. W. (Hrsg.). Eye movements and the higher prsychological processes. New Jersey: Erlbaum, 307–321
Mackworth, N. H. und Bruner, J. S. (1970). How adults and children search and recognize pictures. Human Development, 13, 149–177

Maltz, M. und Shinar, D. (1999). Eye movements of young and older driver. Human Factors, 41, 16–25
McKnight, A. J. und McKnight, A. S. (1999). Multivariate analysis of age-related driver ability and performance deficits. Accident Analysis & Prevention, 31, 445–454
Mikrozensus Verkehrsverhalten, BAS und ARE, Bern: 2007, www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index.Document.91826.pdf
Nagayama, Y. (1978). Role of visual perception in driving. IATSS Research, 2, 64–73
OECD (1985). Traffic safety of eldery road users. Paris: OECD
Owsley, C., Ball, K., Sloane, M. E., Roenker D. L. und Bruni, J. R. (1991). Visual/cognitive correlates of vehicle accidents in older drivers. Psychology and Aging, 6, 403–415
Parsonson, B. S., Isler, R. B. und Hansson, G. J. (1999). Aging and driver behaviour at rural T-intersections. New Zealand Journal of Psychology, 28, 51–54
Pulling, N. H., Wolf, E., Strugis, S. P., Vaillancourt, D. R. und Dolliver. J. J. (1980). Headlight glare resistance and driver age. Human Factors, 22, 103–112
Rasmussen, J. (1986). Information processing and human machine interactions. Amsterdam: North Holland: Series on system science engineering
Richards, O. W. (1977). Effects of luminance and contrast on visual accuity, ages 16 to 90. American Journal of Optometry and Physiological Optics, 54, 178–184
Rogé, J., Pébayle, T., El Hannachi, S. und Muzet, A. (2003). Effect of sleep deprivation and driving duration on the useful visual field in younger and older subjects during simulator driving. Vision Research, 43, 1465–1472
Rogé, J., Pébayle, T., Lambilliotte, E., Spitzenstetter, F., Giselbrecht, D. und Muzet, A. (2004). Influence of age, speed and duration of monotonous driving task in traffic on driver´s useful visual field. Vision Research, 44, 2737–2744
Rytz, M. (2006). Senioren und Verkehrssicherheit. Bern: VCS
Schafer, A. und Victor, D. (1997) . The past and the future of global mobility. Scientific American, 277 (4), 36–39
Scherer, Ch. (1989). Sehvermögen und Verkehrssicherheit – Literaturstudie. Bern: bfu, interner Bericht.
Schmidt-Clausen, H.-J. (1982). Das lichttechnische Gutachten bei Dunkelheitsunfällen. Deutsches Autorecht, 1, 3–12
Schubart, M. (1997).Antworten des Rechts auf den Stand der Kenntnisse von Physiologie und Psychologie – Versuch einer Stellungnahme. In:Schaffhausen, R. (Hrsg.) Aspekte der Überforderung im Straßenverkehr – Forderungen an die Praxis. St. Gallen: Universität St. Gallen, Institut für Verwaltungskure, S. 113–121
Sekuler, A. B. und Bennett, P. J. (2000). Effects of aging on the useful field of view. Experimental Aging Research, 26, 103–120
Shinar, D. (1977). Driver visual limitations, diagnosis and treatment. Technical Report DOT-HS-5-01275, Bloomington, Indiana University
Shinar, D. und Schieber, F. (1991). Visual requirements for safety and mobility of older drivers. Human Factors, 33, 507–519
Sivak, M., Olson, P. und Pastalan L. (1981). Effect of driver`s age on night time legibility of high way signs. Human Factors, 23, 59–64
Stelmach, G. E. und Nahom, A. (1992). Cognitive motor abilities of the eldery driver. Human Factors, 34, 53–65
Tarawneh, M. S., McCoy, P. T., Bishu, R. R. und Ballard, J. L. (1993). Factors associated with driving performance of older drivers. National Research Council (Hrsg.): Pedestrian, bicycle and older driver research, 64–71
WHO & The World Bank (Hrsg.) (2004). World report on road traffic injury prevention. Paris: WHO.
Wood, J. M. (2002). Age and visual impairment decrease driving performance as measured on a closed-road circuit. Human Factors, 44, 482–492
Wood, J. M. und Troutbeck, R. (1994). Effect of visual impairment on driving. Human Factors, 36, 476–487



Im Werk von Sandro Del Prete nimmt der Betrachter das Porträt einer jungen Frau spontan wahr, obwohl der Künstler lediglich Gänse gezeichnet hat, die erst beim näheren Hinsehen erkannt werden. Dieses Phänomen entsteht wegen der Dominanz des Informationsstromes „von oben nach unten“ über den Informationsstrom „von unten nach oben“. Die junge Frau stammt von den Augen des Betrachters.

A8 Vermeidbarkeitsbetrachtungen

Dr. Heinz Burg

1 Einleitung

Wenn sich ein Unfall ereignet hat und der Sachverständige eine Rekonstruktion durchgeführt hat, dann tauchen die Fragen danach auf, wie denn der Unfall hätte vermieden werden können. Diese Fragen sind für die juristische Bewertung der Verantwortlichkeiten der Beteiligten oder für die Haftungsverteilung von großer Bedeutung. Teilweise ist es aus technischer Sicht durchaus schwierig und problematisch, eine sinnvolle Antwort zu geben. Eher unproblematisch ist die Beurteilung dann, wenn einer der Beteiligten zu schnell gefahren ist, und es wird die Frage gestellt, ob der Unfall bei Einhaltung der maximal zulässigen oder der angemessenen Geschwindigkeit vermeidbar gewesen wäre. Schwierig ist es, wenn ein Beteiligter eine Vollbremsung gemacht hat und die Frage gestellt wird, ob der Unfall zu vermeiden gewesen wäre, wenn der Fahrer zusätzlich ausgewichen wäre. Daran schließt sich oft die Frage an, nach welcher Seite er hätte ausweichen können, um den Unfall zu vermeiden. Es kann auch so sein, dass ein Unfallbeteiligter auf einer Straße mit Gegenverkehr wegen eines seine Fahrspur kreuzenden Linksabbiegers ausgewichen und dann mit dem Gegenverkehr kollidiert ist. In einem solchen Fall könnte man fragen, ob der Unfall zu vermeiden gewesen wäre, wenn der Fahrer dem Rechtsfahrgebot folgend eine Vollbremsung gemacht hätte und auf seiner Fahrspur geblieben wäre. Solche Fragestellungen werden z. B. von den Parteien eines Rechtsstreits aufgeworfen und können dann auch beantwortet werden. Unter Umständen wird die Frage gestellt, wie wahrscheinlich es ist, dass nur gebremst oder gebremst und ausgewichen wird und gegebenenfalls nach welcher Seite.

Die Entscheidung über eine geeignete Abwehrmaßnahme (Bremsen, Bremsen mit Ausweichen oder nur Ausweichen) trifft der Fahrer zu einem Zeitpunkt, zu dem er noch nicht weiß, wie sich die kritische Situation, in die er, wie auch immer, gekommen ist, entwickeln wird. Wenn der Fahrer den Unfall vermeiden konnte, dann war es – wahrscheinlich zufällig – die richtige Entscheidung.

Im Auftrag der Bundesanstalt für den Straßenverkehr wurde von der TU Braunschweig das **Bild A8-1** entwickelt, mit dem sehr anschaulich das allgemeine Problem dargestellt wird [1].

Beim Fahren mit einem Kraftfahrzeug sind latente Gefahren immer vorhanden, diese gehen vom Fahrer, vom Fahrzeug und von der Umwelt aus.

Normalerweise ist ein ausreichender zeitlicher Abstand zu dem Ereignis eines Unfalls vorhanden. Auf „Störgrößen“ kann der Fahrer z. B. richtig reagieren und wieder den gewünschten Sicherheitsabstand zu einem eventuellen Unfall herstellen. Der Fahrer kann aber auch gar nicht reagieren und dadurch möglicherweise in den Unfallbereich gelangen.

Der Fahrer kann auch falsch reagieren und es kommt zum Unfall. Die Störgröße kann aber auch so groß werden, dass auch richtiges Handeln zur Gefahrenabwehr nicht mehr zur Unfallvermeidung führt.

Aus dem **Bild A8-1** ist ersichtlich, dass der Übergang vom störungsfreien Fahren durch die Störgröße markiert wird. Auf die Störgröße wird reagiert und nach Ablauf der Reaktionsdauer folgt die Gefahrenabwehr, die erfolgreich oder nicht erfolgreich sein kann.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_8

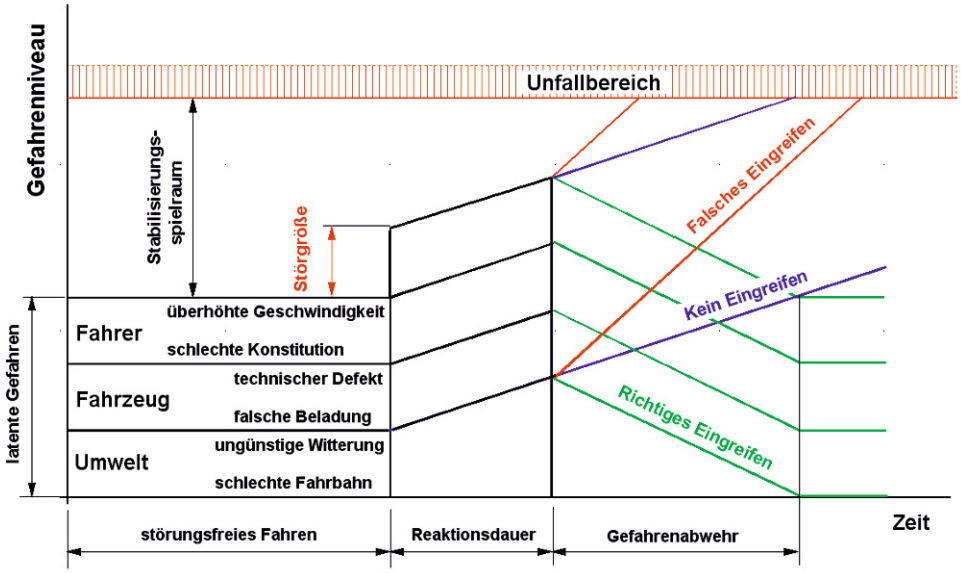


Bild A8-1 Varianten des Handlungsablaufs bei einem kritischen Fahrmanöver (TU Braunschweig)

2 Festlegung des Reaktionspunktes

Es gibt verschiedene Definitionen für die Reaktionsdauer. Im Allgemeinen wird darunter die Zeitspanne verstanden, die zwischen dem Auftreten einer Reaktionsaufforderung bis zu der ersten darauf gerichteten Handlung verstreicht. Reaktionsdauern wurden situationsunabhängig unter Laborbedingungen und situationsabhängig unter realitätsnahen Bedingungen ermittelt.

Im ersten Fall wird die Reaktionsdauer im Labor mit meist einfachen Geräten getestet. Beispielsweise wird beim Aufleuchten einer Lampe ein möglichst rasches Niederdrücken einer Taste verlangt. Diese Reaktionsform wird als Einfachreaktion bezeichnet, weil auf ein bestimmtes Signal nur eine bestimmte Reaktion erfolgen soll. Anfang und Ende der Reaktionsdauer sind in diesem Fall exakt messbar. Diese Form der Reaktion wird auch Erwartungsreaktion genannt, weil die Testperson auf den Vorgang vorbereitet ist. Mit vergleichenden Untersuchungen wurde festgestellt, dass die so für ein Individuum gemessene charakteristische Reaktionsgeschwindigkeit mit dem verkehrsangepassten Reaktionsverhalten im realen Straßenverkehr in keinem gesicherten Zusammenhang steht. Ein solcher ist zwar nicht auszuschließen, er ist aber weitgehend belanglos, weil das reale Reaktionsverhalten primär reaktionssicher, also richtig sein sollte – und nur wenn die Reaktion sicher ist, kann sie auch schnell sein. Bei Wahl- oder Fehlreaktionen sind geringe Reaktionsgeschwindigkeiten sogar besser, weil das Fahrzeug nicht in extreme Fahrverhaltenssituationen gebracht werden kann und deshalb noch Korrekturen möglich sind.

Im Straßenverkehr ist die Bestimmung des Anfangs der Reaktionsdauer sehr schwierig. Es ist oft nicht feststellbar, wann ein objektiv vorhandenes Signal vom Fahrer tatsächlich wahrgenommen und als Reaktionsaufforderung erkannt wurde.

Erste realitätsnahe Versuche wurden von Zomotor et al. mit plötzlich erscheinenden Fußgängerattrappen durchgeführt [2].

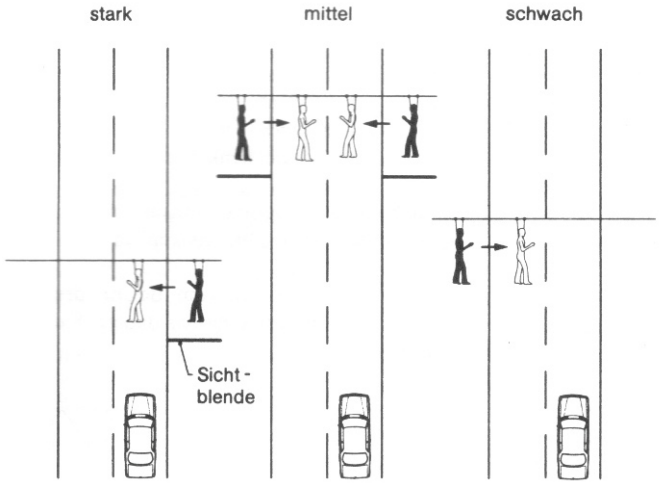


Bild A8-2 Stärke der Reaktionsaufforderung bei in die Fahrbahn laufenden Fußgängern

Die Reaktionsdauer der absolut unvorbereiteten Fahrer wurde vom Zeitpunkt des Erscheinens einer Fußgängerattrappe aus Schaumstoff hinter einer Sichtblende bis zum Beginn des Bremsdruck- bzw. Lenkradwinkelanstiegs definiert und gemessen.

Die gesamte Zeitspanne vom Auftreten der Reaktionsaufforderung (Gefahr) bis zum Ansprechen des Fahrzeugs auf eine Abwehrhandlung des Fahrers kann in folgende Abschnitte unterteilt werden:

Wahrnehmungsdauer	Vom Erscheinen des Signals bis zur optischen oder akustischen Wahrnehmung.
Erkennungsdauer	Von der Wahrnehmung des Signals bis zur Erkennung einer notwendigen Abwehrhandlung.
Entscheidungsdauer	Von der Erkennung der Reaktionsaufforderung bis zur Entscheidung über die Art der Handlung.

Bis hierher dauert die so genannte Informationsverarbeitungszeit, die auch als primäre Reaktionszeit bezeichnet wird. Daran schließen sich folgende Phasen an:

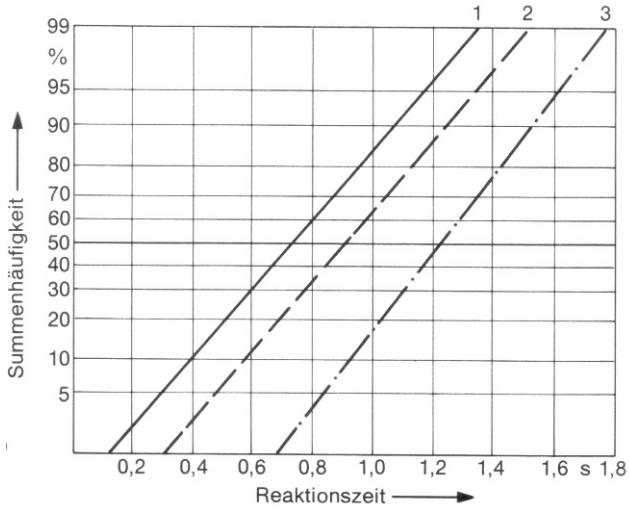
Motorische Phase	Reizleitung und Muskelaktivierung. 0,005 s bis 0,05 s.
Umsetzdauer	Vom Beginn der Handlung (Wegnahme des Fußes vom Gaspedal) bis zum Berühren des Bremspedals (sekundäre Reaktionszeit). 0,15 s bis 0,3 s.
Anlegedauer	Überwindung der Spiele und Elastizitäten im mechanischen Teil der Bremsanlage oder der Lenkung. 0.015 s bis 0,05s.
Schwelldauer	Vom Anfang des Bremsdruckanstiegs bis zum Erreichen des Maximaldrucks für die jeweilige Bremsung bzw. des notwendigen Lenkradwinkels (tertiäre Reaktionszeit). 0,15 s bis 0,3 s.

Die Gesamtreaktionsdauer endet im Allgemeinen am Anfang der Schwelldauer oder konkreter am Beginn einer messbaren Längsverzögerung bzw. am Beginn eines messbaren Radwinkeleinschlags oder einer beginnenden Gierbewegung.

Eine Trennung von Wahrnehmungs- und Erkennungsdauer ist kaum möglich, weil diese Zeitspannen stark von der Aufmerksamkeit des Fahrers sowie von der Qualität und Intensität der Reaktionsaufforderung abhängen. Die Wahrnehmung kann foveal oder peripher stattfinden. Bei peripherer Wahrnehmung kann noch eine Blickzuwendung erforderlich werden.

Die Entscheidungsdauer hängt von der Anzahl der Alternativen ab, zwischen denen der Fahrer entscheiden muss. Sie steigt mit der Anzahl der subjektiv möglichen Entscheidungsalternativen an (nur Bremsen, nur Lenken, Lenken und Bremsen etc.). In dieser Phase kommt es neben der Reaktionsgeschwindigkeit besonders auf die Reaktionssicherheit an.

Ein interessantes Ergebnis war, dass bei den Versuchen, bei denen ein Fußgänger in auffälliger Kleidung (bei den Versuchen orange) von der rechten Seite her plötzlich die Straße betrat, die Reaktionsdauern der Fahrer kürzer waren als wenn er nicht so auffällig gekleidet war (bei den Versuchen grau) und von der linken Seite kam.



Offensichtlich verkürzt sich die Informationsverarbeitungsdauer mit der Stärke der Reaktionsaufforderung.

Im ersten Fall wurde die Reaktionsaufforderung bei den Versuchen als „stark“ (durchgezogene Linie 1 im **Bild A8-3**), im zweiten Fall als „mittel“ und im dritten Fall als „schwach“ bezeichnet.

Bei dem von links kommenden Fußgänger hatte möglicherweise auch die erforderliche Blickzuwendung einen Einfluss auf die Reaktionsdauer.

Bild A8-3 Reaktionsdauern für unterschiedlich starke Reaktionsaufforderung

Von Burckhardt et al. [3] wurden Versuche ausgewertet, die von Studenten an der TU Karlsruhe durchgeführt wurden. Die Aufgabenstellung war so, dass der Fahrer eines hinter einem Pkw 1 herfahrenden Pkw 2 sein Bremspedal betätigen sollte, wenn das Bremslicht des vorausfahrenden Pkw aufleuchtete. Die Zeit zwischen Aufleuchten des Bremslichtes von 1 bis zum Betätigen des Bremspedals von 2 wurde gemessen.

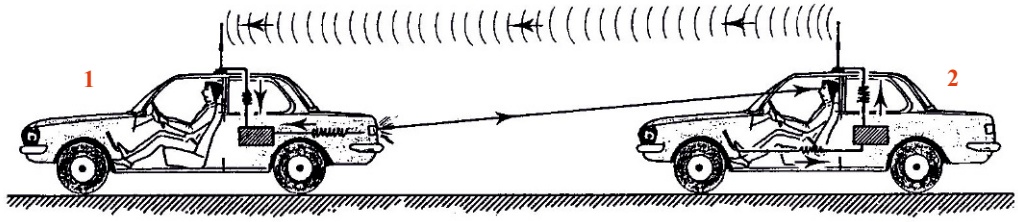


Bild A8-4 Versuchsanordnung zur Messung der Reaktionsdauern von Fahrzeuglenkern

Die Ergebnisse von 3.841 Einzelmessungen wurden statistisch nach dem Weibull-Verfahren ausgewertet (**Bild A8-5**) und so gedeutet, dass 15 bis 20 % der Reaktionsdauern mit einer Blickzuwendungszeit behaftet und deshalb um etwa 0,4 s länger waren als die Reaktionsdauern ohne Blickzuwendung.

Die Messungen wurden später von Hugemann [4] nochmals statistisch ausgewertet. Dabei wurde eine Gauß-Verteilung unterstellt und die Meinung vertreten, dass die Annahme einer Blickzuwendung bei den längeren Reaktionsdauern nicht zwangsläufig erforderlich sei (**Bild A8-6**).

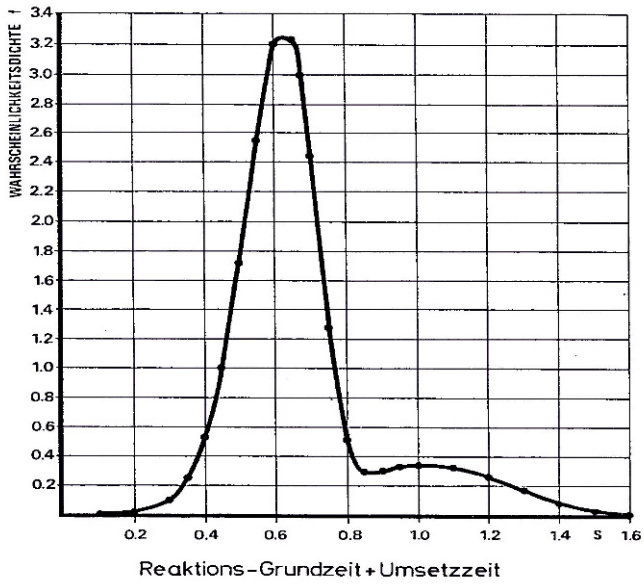


Bild A8-5 Verteilung der Reaktionsdauern nach [3]

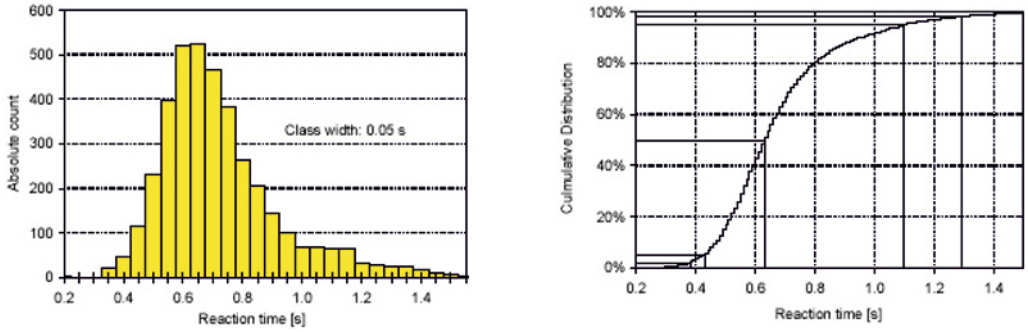


Bild A8-6 Verteilung der Reaktionsdauern nach [4]

Im Ergebnis ist festzustellen, dass im Mittel eine Reaktionsdauer von etwa 0,7 s von Gefahrerkennung (= Reaktionspunkt) zum Bremsbeginn angenommen werden kann. Es können aber auch kürzere (bis 0,4 s) und längere (bis 1,2 s) Reaktionsdauern als möglich angesehen werden. Durch Blickzuwendung bei peripherem Auftauchen der Gefahr kann sich die Reaktionsdauer noch verlängern, ebenso kann eine Verlängerung bei Dunkelheitsunfällen diskutiert werden.

3 Grundsätzliche Überlegungen zu den Vermeidbarkeitsmöglichkeiten

Im Anschluss an die Analyse des realen Unfallgeschehens ist es für die rechtliche Beurteilung notwendig, aus technischer Sicht zu prüfen, ob es ein Alternativverhalten des Fahrers gegeben hätte, das zur Unfallvermeidung geführt hätte oder haben könnte. Beispielsweise hätte der betreffende Verkehrsteilnehmer: weiter rechts fahren, stärker bremsen, nicht bremsen sondern ausweichen, langsamer fahren oder stehen bleiben können etc. Darüber, ob und wie ein Unfall hätte vermieden werden können, kann im Einzelfall heftig diskutiert werden und muss letztlich aus rechtlicher Sicht entschieden werden. An den SV werden in diesem Zusammenhang oft die folgenden Fragen gestellt:

- Wie hoch hätte die Ausgangsgeschwindigkeit allenfalls sein dürfen?
- Wie hoch hätte die Bremsverzögerung sein müssen?
- Wo hätte reagiert werden können (mit der tatsächlichen Ausgangsgeschwindigkeit und Verzögerung)?
- Welche Fahrlinie hätte der Fahrer alternativ wählen können?

4 Berechnungsmöglichkeiten

Aus der Rekonstruktion folgt die gegebenenfalls überhöhte oder situationsbedingt zu hohe Geschwindigkeit eines Fahrzeugs. Es fragt sich dann um wie viel langsamer ein Fahrzeug hätte fahren müssen, damit sich der Unfall nicht ereignet hätte. Die Vermeidbarkeit kann räumlich und zeitlich gesehen werden: Bei der räumlichen Kollisionsvermeidung wird verlangt, dass das betreffende Fahrzeug vor dem Kollisionsort anhalten kann. Die zeitliche Vermeidbarkeit bedeutet, dass das eine Fahrzeug um so viel später am Kollisionsort eintrifft, dass der andere Verkehrsteilnehmer den Fahrkanal dessen bereits vollständig verlassen hat.

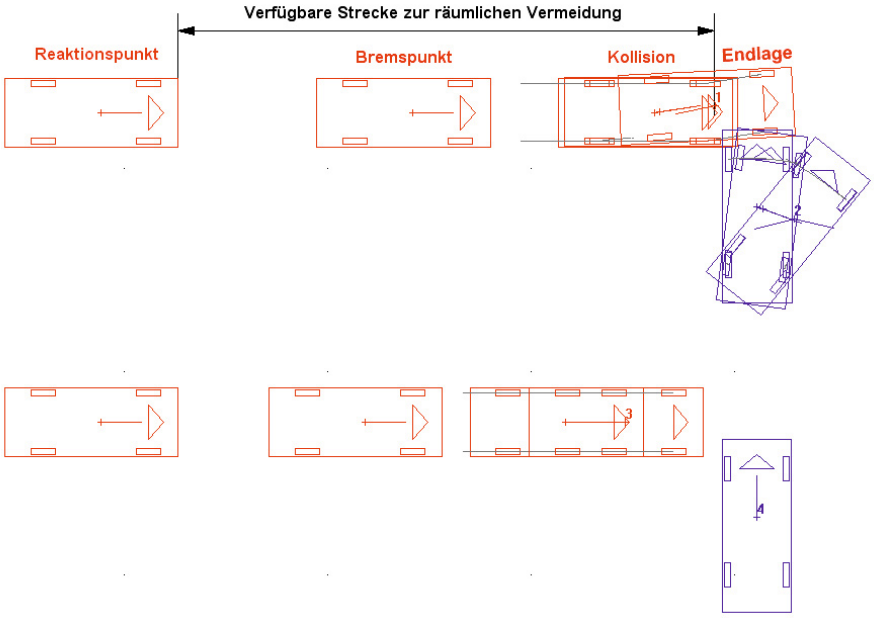


Bild A8-7 Darstellung der räumlichen Vermeidbarkeit: Pkw kann vor der Kollisionsstelle anhalten.

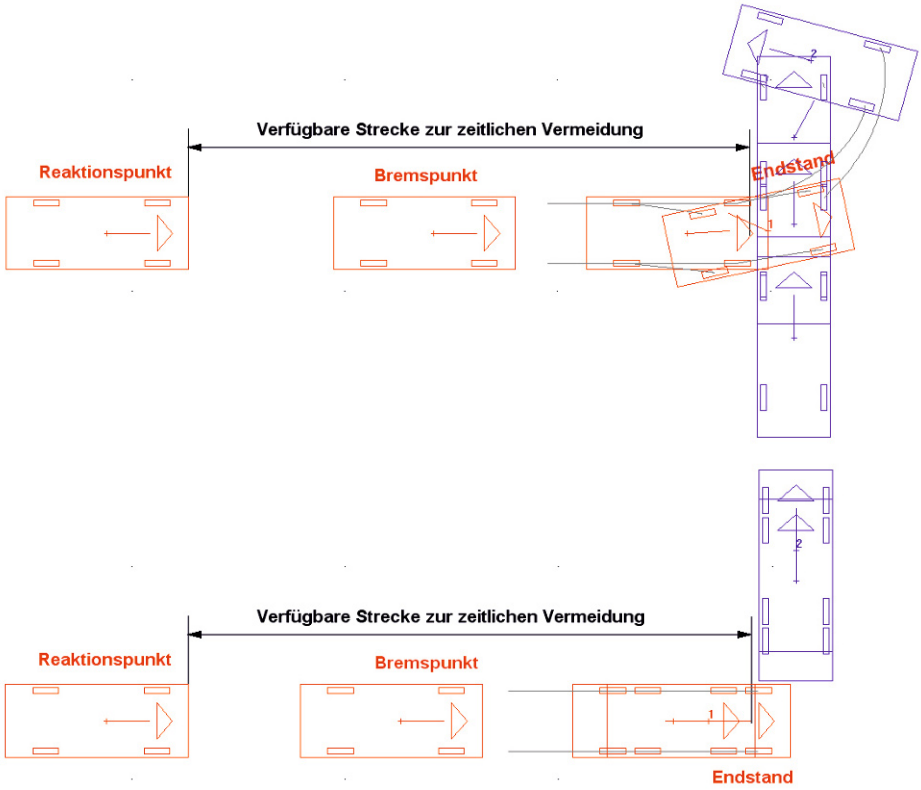


Bild A8-8 Darstellung der zeitlichen Vermeidbarkeit: Pkw kommt um die Räumzeit $t_{\text{Räum}}$ später als tatsächlich an die Kollisionsstelle und der andere Pkw ist schon vorbei

Vermeidbarkeitsmöglichkeiten können sehr komplex werden, wenn sich die Kollisionspartner unter schiefen Winkeln zueinander bewegen. Der Übersichtlichkeit halber wird deshalb zunächst der einfachste Fall, das ist die rechtwinklige Kollision, behandelt.

1. Modell: Die Bremsspur beginnt in der Mitte der Bremsenschwelldauer.

Weil hier die Bremsspur in der Mitte der Bremsenschwelldauer beginnt, vereinfachen sich die Berechnungsformeln deutlich, weil man annehmen kann, dass der Geschwindigkeitsabbau mit einer konstanten maximalen Bremsverzögerung ab Spurbeginn erfolgt, was in dem **Bild A8-9** dargestellt ist. Für die Vermeidbarkeit interessiert nur das, was sich vor der Kollision ereignet hat. Bei diesem Modell ist noch zu bedenken, dass die Reaktionsdauer die halbe Bremsenschwelldauer beinhaltet.

Formel für die Berechnung der räumlichen Vermeidbarkeitsgeschwindigkeit

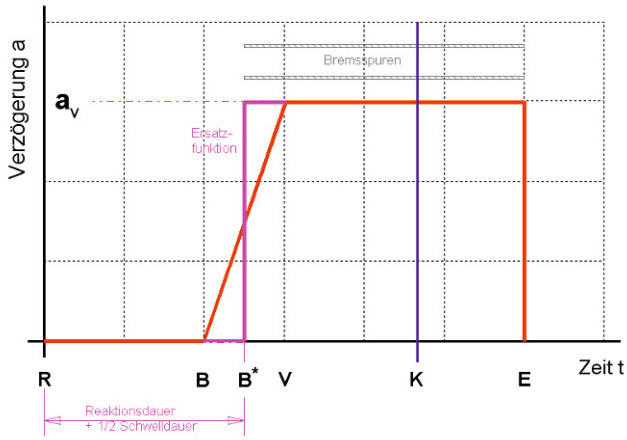
$$v_r = \sqrt{(a_V \cdot t_{B^*-R})^2 + 2 \cdot a_V \cdot s_{K-R}} - a_V \cdot t_{B^*-R}$$

Formel für die Berechnung der zeitlichen Vermeidbarkeitsgeschwindigkeit

$$v_z = \frac{s_{K-R} + \frac{a_V}{2}(t_{K-B^*} + t_{\text{Räum}})^2}{(t_{B^*-R} + t_{K-B^*} + t_{\text{Räum}})}$$

Bei dieser Formel ist zu prüfen, ob die theoretische Geschwindigkeit am Kollisionsort noch positiv ist, ansonsten gibt es keine zeitliche Vermeidbarkeit.

$$v_{K\,\text{th.}} = v_z - a_V\,(t_{K-B^*} + t_{\text{Räum}})$$



a_V = constant

$$v_{B^*} = v_K + a_V \cdot t_{K-B^*}$$

oder

$$v_{B^*} = \sqrt{v_K^2 + 2 \cdot a_V \cdot s_{\text{Spur},K-B^*}}$$

$$t_{K-R} = \frac{v_{B^*} - v_K}{a_V} + t_{B^*-R}$$

$$s_{K-R} = s_{\text{Spur},K-B^*} + v_{B^*} \cdot t_{B^*-R}$$

Bild A8-9 Ersatzfunktion und Berechnungsformeln für einen Bremsvorgang nach der Modellvorstellung 1

2. Modell: Die Bremsspur beginnt am Ende der Bremsenschwelldauer.

Die Methode berücksichtigt die Bremsenschwelldauer wesentlich besser, wenn auch noch nicht ganz korrekt. Die Methode ist aber noch ganz gut durchschaubar und man kann diese Formeln noch für eine Handrechnung heranziehen. Die Bremsspur beginnt hier am Ende der Bremsenschwelldauer. Die Verzögerung steigt linear vom Punkt *B* (Bremsbeginn) bis zum Punkt *V* (Vollbremsbeginn) an. Ein Vorteil ist auch, dass zu der Reaktionsdauer nichts hinzugezählt werden muss.

Formel für die Berechnung der räumlichen Vermeidbarkeitsgeschwindigkeit

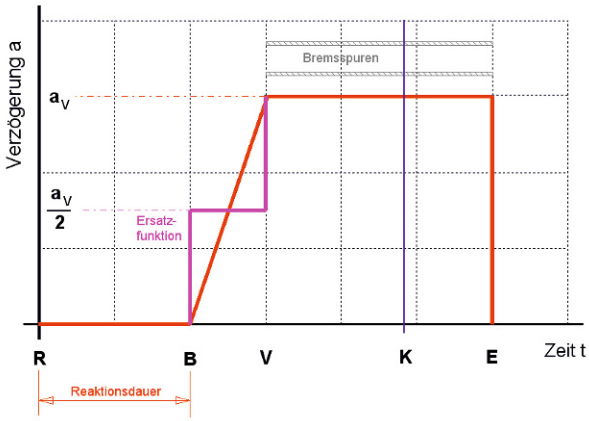
$$v_r = \sqrt{a_V^2 \cdot \left(t_{B-R} + \frac{t_{V-B}}{2}\right)^2 + 2 \cdot a_V \cdot s_{K-R} + \frac{a_V^2}{4} \cdot t_{V-B}^2} - a_V \cdot \left(t_{B-R} + \frac{t_{V-B}}{2}\right)$$

Formel für die Berechnung der zeitlichen Vermeidbarkeitsgeschwindigkeit

$$v_z = \frac{s_{K-R} + \frac{a_V}{2}\left((t_{K-V} + t_{\text{Räum}})^2 + t_{V-B} \cdot (t_{K-V} + t_{\text{Räum}}) + \frac{t_{V-B}^2}{2}\right)}{(t_{B-R} + t_{V-B} + t_{K-V} + t_{\text{Räum}})}$$

Bei dieser Formel ist ebenfalls zu prüfen, ob die theoretische Geschwindigkeit am Kollisionsort noch positiv ist.

$$v_{K\,\text{th.}} = v_z - a_V \cdot (t_{V-B} + t_{K-V} + t_{\text{Räum}})$$



$$a_V = \text{constant}$$

$$v_V = v_K + a_V \cdot t_{K-V}$$

$$v_B = v_V + \frac{a_V}{2} \cdot t_{V-B}$$

oder

$$v_B = \sqrt{2 \cdot a_V \cdot s_{\text{Spur},K-V}} + \frac{a_V}{2} \cdot t_{V-B}$$

$$t_{K-R} = \frac{v_V - v_K}{a_V} + t_{V-B} + t_{B-R}$$

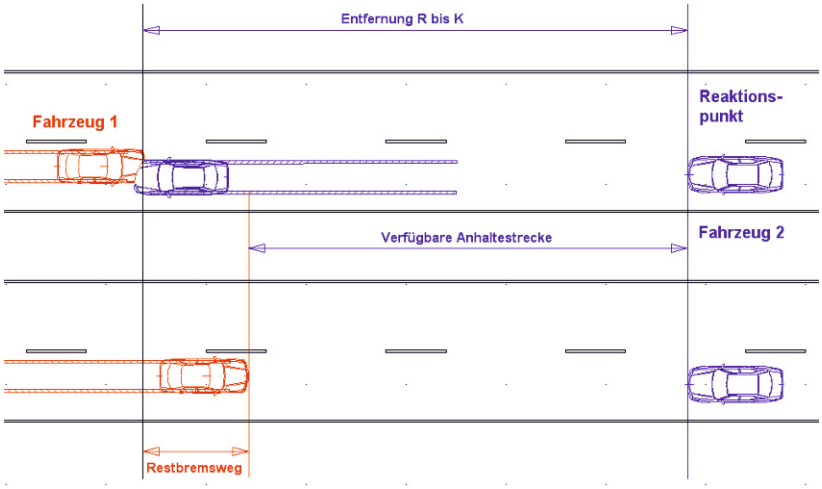
$$s_{K-R} = s_{\text{Spur}\,K-V} + s_{V-B} + s_{B-R}$$

$$= s_{\text{Spur},K-V} + \frac{v_V + v_B}{2} \cdot t_{V-B} + v_B \cdot t_{B-R}$$

Bild A8-10 Ersatzfunktion und Berechnungsformeln für einen Bremsvorgang nach der Modellvorstellung 2

Sonderfälle

Kommt es im Gegenverkehr mit zwei bremsenden Fahrzeugen (Fahrzeug 1 und Fahrzeug 2) zu einer Kollision, so muss bei der Vermeidbarkeitsberechnung für das Fahrzeug 2 berücksichtigt werden, dass das entgegenkommenden Fahrzeug 1 bis zum Stillstand abbremsen können muss, damit das Fahrzeug 2 innerhalb der dann noch verfügbaren Anhaltestrecke zum Stillstand kommen kann, es sei denn, es wäre am Kollisionsort gerade zum Stillstand gekommen. Um diesen eventuellen Restbremsweg muss der Anhalteweg für das Fahrzeug 2 gegebenenfalls reduziert werden. Für diesen Fall gilt also: Verfügbare Anhaltestrecke = Entfernung vom Reaktionspunkt bis zu Kollisionsstelle – Restbremsweg. Der Restbremsweg wird berechnet aus:



$$s_{\text{Rest}} = \frac{v_{K_2}^{\,2}}{2 \cdot a_1}$$

Bild A8-11 Vermeidbarkeit bei Gegenverkehrsunfällen

Ist der Winkel zwischen den Fahrlinien der Fahrzeuge nicht 180°, sondern weicht dieser um α davon ab, so ist die Fehlbremsstrecke mit $\cos\alpha$ zu multiplizieren, wenn der Endpunkt des Restbremswegs von Fahrzeug 1 innerhalb des Fahrkanals von Fahrzeug 2 liegt. Andernfalls ist es sinnvoll einen Verschwindepunkt zu definieren. Darunter ist die Strecke zu verstehen, um welche sich der zur Verfügung stehende Anhalteweg verkleinert (Winkel größer als 90°) oder ver-

größert (Winkel kleiner als 90°). Der Verschwindepunkt ist der Punkt am Rand des Fahrkanals von Fahrzeug 2, wo Fahrzeug 1 diesen verlässt.

Eventuell muss noch die Position der Kontaktpunkte der Fahrzeuge, vor allem wenn ein Fahrzeug an der Seite getroffen wird, berücksichtigt werden.

Berechnung der zur Unfallvermeidung erforderlichen Bremsverzögerung

Für diese Formel gibt es zwei oft vorkommende Anwendungsmöglichkeiten:

1. Falls ein Fahrzeuglenker vor der Kollision nicht voll gebremst hat, möglicherweise aber voll gebremst haben könnte, dann kann mit der folgenden Formel berechnet werden, welche Bremsverzögerung zur Unfallvermeidung durch rechtzeitiges Anhalten vor dem Kollisionsort erforderlich gewesen wäre. Es kann überprüft werden, ob die berechnete Verzögerung mit dem konkreten Fahrzeug hätte erreicht werden können.
2. Die andere Anwendung ergibt sich aus der Überlegung, dass ein Fahrzeuglenker die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschritten hatte. Wenn er aber am Reaktionspunkt die zulässige Höchstgeschwindigkeit eingehalten hätte, dann hätte er in der Strecke zwischen Reaktionspunkt und Kollisionsstelle vielleicht mit einer technisch möglichen, eventuelle geringen, Verzögerung anhalten können, die es zu berechnen gilt.

$$a = \frac{2\cdot\left(v\cdot\left(2\cdot t_{B-R}+t_{V-B}\right)-2\cdot s_{K-R}\right)}{t_{V-B}^2} + \sqrt{\left(\frac{2\cdot\left(v\cdot\left(2\cdot t_{B-R}+t_{V-B}\right)-2\cdot s_{K-R}\right)}{t_{V-B}^2}\right)^2 + \frac{4\cdot v^2}{t_{V-B}^2}}$$

v = Geschwindigkeit bei Bremsbeginn, muss je nach Anwendungsfall festgelegt werden.
a = mittlere Verzögerung während des Bremsvorgangs, die der Interpretation je nach Fallgestaltung bedarf.

Vermeidbarkeit, falls verspätete Reaktion festgestellt werden kann

In diesem Fall kann aus objektiven Merkmalen (z. B. Bremsspuren oder andere Merkmale) ein konkreter Reaktionspunkt bestimmt werden. Aus anderen Merkmalen kann festgestellt werden, dass früher hätte reagiert werden können und wo dieser frühere Reaktionspunkt gewesen wäre. Es kann nun berechnet werden, aus welcher Geschwindigkeit der Unfall zu vermeiden gewesen wäre, wenn der Kraftfahrer an dem zeitlich und örtlich früheren Reaktionspunkt reagiert hätte. Der Abstand von dem früheren Reaktionspunkt bis zum Kollisionsort wird in der nachstehenden Formel s_{korr} genannt. Berechnet wird die Geschwindigkeit $v_{r\ \text{Reaktion}}$, das ist die Geschwindigkeit, aus der das Fahrzeug von dem früheren Reaktionspunkt bis zur Kollisionsstelle bis zum Stillstand hätte abgebremst werden können.

$$v_{r\ \text{Reaktion}} = \sqrt{a_V^2\cdot\left(t_{B-R}+\frac{t_{V-B}}{2}\right)^2 + 2\cdot a_V\cdot s_{\text{korr.}} + \frac{a_V^2}{4}\cdot t_{V-B}^2} - a_V\cdot\left(t_{B-R}+\frac{t_{V-B}}{2}\right)$$

Literatur

[1] Reichelt, W.: Ein adaptiver Regler als Fahrermodell in kritischen Situationen. V. ifF-Tagung, Braunschweig 1984
[2] Zomotor, A.: Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, Vogel Buchverlag, Würzburg 1987
[3] M. Burckhardt, H. Burg, R. Gnadler, E. Näumann, G. Schiemann: Die Brems-Reaktionsdauer von Pkw-Fahrern. Der Verkehrsunfall, Dezember 1981, Heft 12
[4] Burckhardt, M.: Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen, Verlag TÜV Rheinland, 1985
[5] Hugemann, W.: Driver reaction times in road traffic, EVU-Tagung 2002 in Portoroz

A9 Kollisionsmechanik

Dr. Heinz Burg, Dr. Werner Gratzer, Dr. Andreas Moser, Dr. Hermann Steffan

1 Einleitung

Die Kollisionsrechnung spielt in der Unfallrekonstruktion eine zentrale Rolle und ist von besonderer Bedeutung. Über die Kollisionsrechnung erfolgt die Verknüpfung von Einlaufphase und Auslaufphase also der Bewegung der Fahrzeuge vor und nach der Kollision. Abhängig von der verwendeten Berechnungsmethode erfolgt diese Verknüpfung entweder von bekannten Daten nach der Kollision rückwärts in die Vorkollisionsphase (Rückwärtskollisionsrechnung) oder ausgehend von bekannten Daten vor der Kollision vorwärts in die Nachkollisionphase (Vorwärtskollisionsrechnung).

Zur Berechnung von Fahrzeugkollisionen wurden verschiedene Stoßmodelle mit unterschiedlichen Annahmen (Stoßhypothesen) und Einschränkungen (Vereinfachungen) entwickelt, diese werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Bevor Computer für den allgemeinen Einsatz verfügbar waren, konnten Kollisionen von Fahrzeugen nur grafisch oder rechnerisch, jedenfalls manuell analysiert werden. Als generelle Methode war die Impulsberechnung zur praktischen Anwendung verfügbar [1], [2], [3]. Dazu wurden meist die Impulse nach der Kollision nach Betrag und Richtung ermittelt. Die Richtungen der Impulse vor der Kollision wurden als bekannt angenommen. Damit war es möglich, alle linearen Impulse zu berechnen. Mit Informationen über die geometrische Lage des Kontaktpunkts konnte der Drallsatz (Drehimpuls) zur Kontrolle des Ergebnisses aus der linearen Bewegung verwendet werden.

Etwa Mitte der 1960er Jahre wurden von dem amerikanischen Rechtsanwalt Ralph Nader die vermeidbaren Folgen von Unfällen angeprangert. Dies führte dazu, dass zum Schutz der Bürger vom amerikanischen Verkehrsministerium erste Mindestanforderungen (Standards) für die Passive Sicherheit von Pkw definiert wurden. Die Einhaltung der Mindestanforderungen musste durch Crash-Tests nachgewiesen werden. Dadurch entstanden Erkenntnisse über den Zusammenhang von Geschwindigkeitsänderungen und Verformungen an den Fahrzeugen. Diese Erkenntnisse führten dazu, dass auch der Energiesatz für die Kollisionsanalyse herangezogen werden konnte. In diesem Zusammenhang wurde als Maß für die Verformungsarbeit(-energie) die Energy Equivalent Speed (EES) definiert

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot \mathrm{EES}^2 = W_{\mathrm{Def}} \qquad \text{(A9-1)}$$

[4], [5], [6].

Die Verwendung dieser Maßzahl erforderte allerdings schon den Einsatz von programmierbaren Taschenrechnern.

Parallel zu der Einführung der Crash-Tests wurde in den USA vom Verkehrsministerium (NHTSA) der Auftrag zur Entwicklung von Unfallrekonstruktionsprogrammen erteilt. Vom Calspan Institute wurden zwei Programme entwickelt. Das Crash-Programm verwendete die

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_9

Impulsmethode (diskrete Methode) in Verbindung mit Informationen über die Verformungsenergie. Mit dem SMAC Programm wurde erstmals die Kraftrechnung (kontinuierliche Methode) für die Kollisionsanalyse anwendbar gemacht. Beide Programme liefen damals nur auf Großrechnern.

Mit dem Aufkommen von Personal Computern (PC) konnten auch die komplexen Formeln für die Impulsmethode in Vorwärtsrechnung in praxisgerechter Form gelöst werden. Bei der Vorwärtsrechnung sind Annahmen über die Reibung in der Kontaktzone und über die Restitution des verformten Materials in der Kontaktzone erforderlich. Das führt zu recht komplizierten Formeln, deren manuelle Berechnung zu viel Zeit verbrauchen würde.

Die manuelle Berechnung würde auch zu viele Möglichkeiten für Rechenfehler beinhalten. Außerdem ist die Vorwärtsrechnung nur dann sinnvoll, wenn der Auslauf der Fahrzeuge nach Kollision mit mathematischen Modellen gleich mitberechnet wird.

Für dieses Verfahren der Kollisionsanalyse stehen heute mehrere Programme zur Verfügung. Die Anwendung dieser Programme und die weitere Analyse der Ergebnisse hat gezeigt, dass die bei der Impulsmethode verwendeten Modelle über die Reibung und die Restitution (Stoßhypothese von Newton oder Poisson) verbesserungsfähig bzw. zumindest problematisch sind, weil beim Auftreten von Reibung in der Kontaktzone ein unrealistischer Energiezuwachs entstehen kann, wenn ungeeignete Stoßhypothesen verwendet werden (die Verhakungshypothese nach Slibar und die Abgleithypothese nach Kudlich stellen sicher, dass kein Energiezuwachs auftreten kann). Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Impulsmethode bei der Kollision von Multibody-Modellen angewendet wird.

Betrachtet man die Entwicklung der Rekonstruktionstechnik seit etwa 1960, so zeigt sich, dass früher überwiegend grafische Verfahren, teilweise auch rechnerische Verfahren in Rückwärtsrechnung zur Analyse von Kollisionen verwendet wurden. Seit etwa 1990 sind überwiegend rechnerische Verfahren als Vorwärtsrechnung für die praktische Anwendung entwickelt worden. Die grafischen und die rechnerischen Verfahren verwenden überwiegend die Stoßhypothese. In neuerer Zeit fanden in Europa erste rechnerische Verfahren in die Praxis Eingang, bei denen die Kollision kontinuierlich in kleinen Zeitschritten unter Berücksichtigung des Verlaufs der Kraft über der Zeit und der Eindringung berechnet werden. In den USA bzw. im englischsprachigen Raum sind die kontinuierlichen Verfahren (auch Kraftrechnung genannt) schon seit etwa 1970 im Gebrauch. Einige spezielle Begriffe werden nachstehend in der **Tabelle A9.1** erläutert.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Annahme eines Stoßes als mathematisches Modell für die Berechnung von Fahrzeugkollisionen nicht der Realität entspricht. Trotzdem haben sich die auf der Stoßhypothese basierenden Berechnungsmodelle in der Praxis bewährt und liefern bei fachgerechter Anwendung gute Ergebnisse. Fachgerechte Anwendung bedeutet, dass die mit der Stoßhypothese verbundenen Bedingungen beachtet und bei jedem Fall in der richtigen Weise berücksichtigt werden müssen. Diese Anwendungsbedingungen sind folgende:

1. Es werden nur die zwischen den beiden Fahrzeugen wirkenden Kontaktkräfte berücksichtigt.
2. Die Stoßdauer ist unendlich klein. Deshalb kann es keine Lageänderungen der Körper während der Kollision geben.
3. Die Stoßkraft ist nicht definiert und wegen der unendlich kleinen Stoßdauer unendlich groß.
4. Es werden keine Verformungen der Körper berechnet.



PC-Crash

Software zur Simulation von Verkehrsunfällen

Kollisionen mit bis zu 32 Fahrzeugen können in 2D und 3D berechnet werden.

Simulation von Fahrzeug-, Motorrad-, Fußgänger-, Fahrradunfällen sowie Insassenbewegung und Überschlägen ist möglich.

Mehr als 5000 Installationen der Software zeigen, dass sie eine der führenden Instrumente für die Verkehrsunfallrekonstruktion weltweit ist.

Stoßrechnung - Kinematikmodul
Mehrkörpersimulation - Anhängersimulation
FE Modul - Aktive Sicherheit
Crash III Modul - Zeichenprogramm
3D Ansichten - Animation

DSD
Dr. Steffan Datentechnik
Linz – Austria
www.dsd.at

Tabelle A9.1 Begriffsdefinitionen zur Kollisionsanalyse

Rückwärtsrechnung, Rückwärtsanalyse	Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeit von der Endlage aus zeitlich gesehen rückwärts über die Auslaufspuren bis zur Kollisionsposition. Damit sind die Bedingungen unmittelbar nach der Kollision bekannt. Davon ausgehend wird auf die Geschwindigkeiten vor der Kollision geschlossen.
Vorwärtsrechnung, Vorwärtsanalyse	Die Kollisionsgeschwindigkeiten werden zunächst entweder überschlägig berechnet oder nach Versuchsergebnissen eingestuft. Diese Kollisionsgeschwindigkeiten werden in die Rechenmodelle eingegeben. Die mathematisch modellierten Körper (das können Fahrzeuge, Menschen, Tiere usw. sein) kollidieren und bewegen sich entsprechend der programmierten Gesetzmäßigkeit unter Hinterlassung von Spuren bis in die theoretischen Endlagen. Die berechneten Werte werden dann mit dem realen Unfallablauf verglichen. Gegebenenfalls kann eine Optimierung erfolgen.
Vor-Kollisions-/ Kollisions-/Nach-Kollisions-Phase	Einteilung eines Unfallablaufs in das Geschehen vor der Kollision, während der Kollision und nach der Kollision.
Kollision ohne Abgleiten	Unfälle, bei denen Körper in beliebiger Stellung zusammenstoßen. Am Ende der Kompressionsphase haben die Kontaktpunkte eine gemeinsame Geschwindigkeit.
Kollision mit Verhakung	Sonderfall des Stoßes ohne Abgleiten. Das kann bei einem plastischen Stoß eintreten oder wenn es zu einer formschlüssigen Verbindung der Körper am Kontaktpunkt kommt.
Kollision mit Abgleiten	Unfälle, bei denen Körper zusammenstoßen, aneinander abgleiten und sich mit verringerter oder erhöhter Geschwindigkeit weiterbewegen. Die Geschwindigkeiten der Kontaktpunkte haben unterschiedliche Größen und teilweise verschiedene Richtungen.

Literatur

[1] Brüderlin, A.: Die Mechanik des Verkehrsunfalls. Verlag zum Elsässer AG, Zürich 1941

[2] Slibar, A.: Das Antriebsbalance-Diagramm als optimales Hilfsmittel der Unfallanalyse. der Verkehrsunfall 1973, Heft 2

[3] Schimmelpfennig et al.: Rhomboid-Schnittverfahren und Energiering-Verfahren. der Verkehrsunfall 11/1980 und 09/1982

[4] Campbell, K. L.: Energy Basis for Collision Severity. 3th International Conference on Occupant Protection, 1974

[5] McHenry, R.: Mathematical Reconstruction of Highway Accidents. DOT HS-800 801, 1973

[6] Burg, H. Zeidler, F.: EES – Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkungen auf die Unfallforschung. der Verkehrsunfall 1980, Heft 4

[7] CRASH 3 Technical Manual, NHTSA

[8] Stronge, W. J.: Energy dissipated in planar collision, Univ of Cambridge, Cambridge, England, Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME Volume 59, Issue 3, September 1992, Pages 681-682 ISSN 0021-8936

[9] G. Gilardi, I. Sharf: Literature survey of contact dynamics modelling. Mechanism and Machine Theory, 37 (2002) Pergamon

[10] Handbuch PC-Crash

[11] Handbücher Carat-3 und Carat-4

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der klassischen (Newton'schen) Mechanik, soweit sie für die Untersuchung von Fahrzeugkollisionen relevant sind, erläutert.

2.1 Newton'sche Axiome

Im Jahr 1687 erschien *Isaac Newtons* berühmtes Werk Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie), in dem Newton drei Grundsätze (Axiome) der Bewegung formuliert, die als die newtonschen Axiome, Grundgesetze der Bewegung, newtonsche Prinzipien oder auch newtonsche Gesetze bekannt sind. Diese Axiome bilden das Fundament der klassischen Mechanik und damit auch der Kollisionsrechnung.

2.1.1 Lex Prima: Trägheitsprinzip

Ein Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, solange die Summe aller auf ihn einwirkenden Kräfte Null ist.

Die Geschwindigkeit v ist also unter der genannten Voraussetzung in Betrag und Richtung konstant. Eine Änderung des Bewegungszustands kann nur durch Ausübung einer Kraft von außen erreicht werden, beispielsweise durch die Gravitationskraft oder die Reibungskraft oder Kontaktkräfte.

Das Trägheitsprinzip wurde 1638 von *Galileo Galilei* aufgestellt.

2.1.2 Lex Seconda: Aktionsprinzip; Grundgesetz der Dynamik

Die Änderung der Bewegung einer Masse ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.

Der Proportionalitätsfaktor dabei ist die träge Masse m des Körpers, auf den die Kraft wirkt. Es gilt also:

$$\vec{a} \sim \vec{F} \tag{A9-2}$$

und daraus resultierend:

$$m \cdot \vec{a} \sim \vec{F} \tag{A9-3}$$

Bei geeigneter Wahl der Einheiten ergibt sich:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \tag{A9-4}$$

Bis hier wurde angenommen, dass die Masse m während der Bewegungsänderung konstant ist, für die meisten technischen Systeme ist dies auch eine zutreffende Annahme. In einigen Systemen, wie z. B. der Rakete, nimmt die Masse ständig ab, da sie ihren Treibstoff verbrennt und durch den Ausstoß Vortrieb erzeugt (siehe auch Raketengleichung). Eine für solche Fälle verallgemeinerte Version des zweiten newtonschen Axioms lautet:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}\left(m \cdot \vec{v}\right) = \frac{d}{dt}\vec{p} = \dot{\vec{p}} \tag{A9-5}$$

wobei

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \tag{A9-6}$$

den Impuls bezeichnet. In dieser Form bleibt das Axiom auch bei relativistischen Geschwindigkeiten gültig.

2.1.3 Lex Tertia: (Reaktionsprinzip; Wechselwirkungsprinzip)

Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (actio), so wirkt eine gleichgroße, aber entgegen gerichtete Kraft von Körper B auf Körper A (reactio).

$$\vec{F}_{A\to B} = -\vec{F}_{B\to A} \tag{A9-7}$$

Dieses Prinzip ist kurz als actio = reactio (Actio est reactio) bekannt.

2.2 Kollisionsphasen

Bei einer Kollision gibt es zwei Phasen. Die erste ist die der Kompression, bei welcher die Körper solange ineinander eindringen, bis die relativen Geschwindigkeiten an der Kontaktstelle in Normalenrichtung gleich Null geworden sind. Die zweite Phase ist die der Rückverformung (Restitution), bei der sich die Fahrzeuge wieder voneinander entfernen. Sie endet, wenn die Körper keinen Kontakt mehr haben. Beide Phasen werden unter anderem stark beeinflusst durch Schockwellen, die durch die Körper laufen. Diese sind abhängig von der Geschwindigkeit, mit welcher die Körper aufeinander treffen und von der Materialdämpfung. Beide Phänomene beeinflussen die Aufnahme von Verformungsarbeit der Körper an den Kontaktstellen. Um diese Effekte zu berücksichtigen, wurde von Stronge empfohlen, den Restitutions-Koeffizienten als die Wurzel aus dem Verhältnis der elastischen Energie während der Restitution zur absorbierten Energie während der Kompression zu definieren.

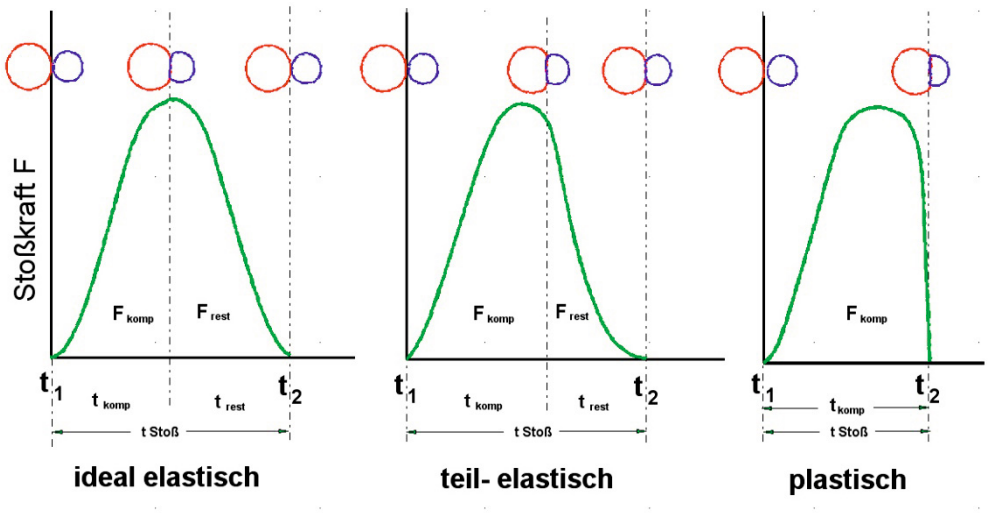


Bild A9-1 Verlauf der Kontaktkraft zeitlich aufgelöst für verschiedene Stoßarten. Für die Stoßrechnung ist das Ende der Kompressionsphase der zeitliche Referenzpunkt.

Ein weiteres Problem ist die Reibung in der Kontaktzone. Es sind drei Fälle zu unterscheiden. Der erste und einfachste Fall ist der, bei dem es zu keiner Relativbewegung in der Kontaktzone kommt. Der nächste Fall ist der, bei dem eine Gleitbewegung in der Kontaktzone vorliegt, die vom Kollisionsbeginn bis zum Kollisionsende vorhanden ist und ihre Richtung nicht ändert.

Der komplizierteste Fall ist der, bei dem Gleiten und Nichtgleiten abwechseln und auch Richtungsänderungen des Gleitens in der Kontaktzone auftreten.

Bei der Anwendung der Impulsmethode ist schnell festzustellen, dass es Fälle gibt, bei denen es keine zufrieden stellenden Lösungen gibt. Es sind das solche, bei denen es keine Ansätze für den Verlauf der Reibung in der Kontaktzone während der Kollision gibt und solche, bei denen während der Kontaktzeit z. B. auch Reifenkräfte einen erheblichen Einfluss haben. Auch sind erhebliche Schwierigkeiten bei Kollisionen von Multibody-Modellen zu überwinden.

Um diesen Problemen aus dem Weg zu gehen, wurden Modelle zur kontinuierlichen Berechnung der Kollisionskräfte während der Kontaktzeit entwickelt. Dazu sind Kenntnisse des Kraftverlaufs an der Kontaktstelle oder an diskreten Punkten im Kontaktbereich erforderlich. Dies sind Daten, die nicht ohne weiteres beschaffbar sind, zumal sie vom einzelnen Fahrzeug abhängen und je nach der verformten Region starken Schwankungen unterliegen können. Ein weiteres, durchaus gravierendes Problem ist die automatische Kontakterkennung beim gegenseitigen Eindringen der Körper (Fahrzeuge). Die einigermaßen korrekte Berechnung, insbesondere im dreidimensionalen Raum, erfordert aber sehr große Computerleistung, Eine einzelne Berechnung kann deswegen lange dauern, was bei der Unfallrekonstruktion, bei der oft viele Varianten untersucht werden müssen, doch sehr nachteilig sein kann.

Beim Zusammenstoß von Fahrzeugen mit anderen Fahrzeugen, Hindernissen, Menschen oder Tieren treffen Körper mit sehr komplexen Eigenschaften aufeinander. Die Eigenschaften dieser Körper sind teilweise erforscht, teilweise existieren auch mathematische Modelle, mit denen diese Eigenschaften beschrieben werden können. Überwiegend sind aber doch erhebliche Kenntnislücken vorhanden. Eine korrekte Nachbildung der schon bekannten Eigenschaften erfordert großen mathematischen und Berechnungsaufwand. Solche sehr detaillierten Modelle gelten nur für einen ganz speziellen Fall. Eine Verallgemeinerung ist kaum möglich.

Deshalb werden bei Kollisionsberechnungen starre Körper verwendet. Diesen starren Körpern werden spezielle physikalische Eigenschaften zugeordnet, mit deren Hilfe es möglich wird, reale Kollisionsvorgänge zu approximieren. Die Zuordnung der speziellen Eigenschaften ist vom Anwendungsfall abhängig.

Ganz allgemein gilt, dass die Körper bei der Kollision ineinander eindringen (Kompressionsphase). Dabei bauen sich Kräfte auf, die dem Newton'schen Prinzip Kraft = Gegenkraft gehorchen. Diese Kräfte verändern sich während der Kompressionsdauer. Der Kraftverlauf über der Zeit ist abhängig von den Materialien, die an der Kontaktstelle verformt werden. Nach einer bestimmten Zeit ist im theoretischen Modell eine maximale Kraft erreicht. Die Körper dringen dann nicht mehr weiter ineinander ein. In der Realität muss es nicht so sein, dass das Ende der Eindringung mit dem Maximum der Kraft zusammenfällt. Dies deshalb, weil der Kraftverlauf über der Zeit eine komplexe Schwingung ist.

Nach dem Ende der Eindringung beginnt eine begrenzte Rückverformung der Materialien an der Kontaktstelle (Restitution). Die Körper trennen sich voneinander. In der Restitutionsphase gibt es einen eigenen Verlauf der Kraft über der Zeit. Im Allgemeinen kommt es zu einem raschen Abfall der Kraft in der Kontaktzone. Wegen der niedrigen Relativgeschwindigkeit der Kontaktstellen nach der Kollision und der geringen Restitutionskräfte dauert die Phase der Trennung der Fahrzeuge relativ lange. Eine genaue Vorhersage der Restitutionsdauer ist nicht möglich. Auch ist es äußerst schwierig, diese aus den Versuchsdokumentationen zuverlässig zu bestimmen, sogar die Messung ist sehr problematisch.

Der Unterschied zwischen Kompression und Restitution wird mit dem Restitutionskoeffizienten beschrieben.

2.3 Erhaltungssätze

2.3.1 Impulserhaltung – Impulserhaltungssatz

Der **Impulserhaltungssatz** ist einer der wichtigsten Erhaltungssätze der Physik und besagt, dass in einem abgeschlossenen System der Gesamtimpuls konstant bleibt. „Abgeschlossenes System“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass keine Kräfte von außen wirken.

Der Gesamtimpuls $\vec{p}$ des Systems, das aus n miteinander wechselwirkenden Teilen besteht, ist die Summe der einzelnen Impulse.

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \ldots + \vec{p}_n = \text{konst} \qquad \text{(A9-8)}$$

Die Impulse sind dabei Vektoren, es ist also ihre Richtung zu berücksichtigen (wird nur eine Bewegung längs einer Richtung betrachtet, also eine Vektorkomponente, muss das Vorzeichen berücksichtigt werden).

Die Impulserhaltung gilt sowohl in der klassischen Physik (bzw. klassischen Mechanik) wie auch in der Relativitätstheorie und der Quantenphysik. Die Impulserhaltung gilt unabhängig von der Erhaltung der Energie und ist z. B. bei der Beschreibung von Stößen von grundlegender Bedeutung. Der Impulserhaltungssatz besagt hier, dass der Gesamtimpuls aller Stoßpartner vor und nach dem Stoß gleich sein muss. Impulserhaltung gilt sowohl, wenn die kinetische Energie beim Stoß erhalten bleibt (elastischer Stoß), als auch dann, wenn das nicht der Fall ist (unelastischer Stoß).

2.3.2 Drallerhaltung – Drallerhaltungssatz

Der Drehimpulserhaltungssatz gehört zu den Erhaltungssätzen der Physik (Mechanik) und besagt, dass der Gesamtdrehimpuls in abgeschlossenen Systemen konstant ist.

$$\vec{L} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \ldots + \vec{L}_n = \text{konst} \qquad \text{(A9-9)}$$

Die Drehimpulserhaltung lässt sich über das Noether-Theorem auf die Isotropie des Raums zurückführen, d. h. auf Unabhängigkeit des Ablaufes eines Experiments von seiner Orientierung im Raum.

Eine Veranschaulichung dafür ist ein Drehteller, auf dem eine Modellbahn fährt. Auf dem zuvor zum Stillstand gebrachten Drehteller fährt die Bahn im Kreis. Wird die Bahn z. B. durch ein Funksignal zum Stillstand gebracht, so beginnt unmittelbar der Drehteller mit der stillstehenden Bahn zu drehen.

Hervorgehoben sei nochmals, dass dies nur für abgeschlossene Systeme gilt, die nur ideell existieren. Der oben erwähnte Drehteller kommt – solange keine weitere Energiezufuhr erfolgt – nach einiger Zeit durch Reibungsverluste zum Stillstand. Auch das gern für eine vollständige Impulserhaltung vorgebrachte Beispiel eines „reibungsfreien“ Systems im „schwerelosen“ All geht fehl, da sich – abgesehen von inneren Widerständen des Systems – auch dort Partikel und beispielsweise auch magnetische Felder befinden, die letztendlich jedes System zum Stillstand bringen.

Das zweite Keplersche Gesetz ist ein Beispiel für den Drehimpulserhaltungssatz.

2.3.3 Energieerhaltungssatz

Der Energieerhaltungssatz ist der wichtigste Erhaltungssatz in der klassischen Physik (und gilt genauso in der Quantenmechanik und der (speziellen) relativistischen Physik) und sagt aus, dass die Gesamtenergie eines Systems durch Prozesse, die ausschließlich innerhalb des betrachteten Systems stattfinden, nicht verändert werden kann. Das heißt, es ist unmöglich, innerhalb eines abgeschlossenen Systems Energie zu erzeugen oder zu vernichten. Die Energie ist damit eine Erhaltungsgröße.

In einem abgeschlossenen System ohne Energieaustausch mit der Umgebung und unter Vernachlässigung jedweder Reibung, gilt zu jedem Zeitpunkt der Energieerhaltungssatz der klassischen Mechanik:

$$E = T + V \tag{A9-10}$$

mit: V – potenzielle Energie
T – kinetische Energie
E – Gesamtenergie

In Worten: Die Summe aus potenzieller und kinetischer Energie, einschließlich der Rotationsenergie, ist konstant und entspricht der Gesamtenergie des mechanischen Systems.

Dieser idealisierte Spezialfall ist auch heute sehr gebräuchlich, da man mit seiner Hilfe nicht nur das Konzept des Energieerhaltungssatzes anschaulich darlegen kann, sondern auch reale Bewegungen hierdurch auf eine sehr einfache Art und Weise mit guter Näherung beschreibbar sind.

Ein alltägliches Beispiel ist die Position eines Objekts im Gravitationsfeld der Erde, beispielsweise bei einem idealen Pendel (Perpetuum Mobile dritter Art). Dieses ist so definiert, dass keinerlei Störung durch Reibung oder sonstige Einflüsse besteht und es daher eine ungedämpfte Schwingung mit konstanter Auslenkung ausführt. Im Ruhezustand, also bei einem Faden der senkrecht zum Boden weist, ist die potenzielle und die kinetische Energie des Pendels gleich Null. Lenkt man das Pendel nun aus, so schwingt es zwischen zwei Wendepunkten und erreicht seine höchste Geschwindigkeit am Punkt der ehemaligen Ruhelage, weshalb dieser auch das Maximum der kinetischen Energie darstellt. An den Wendepunkten ist die kinetische Energie hierbei wiederum gleich Null und die potenzielle Energie maximal. Völlig unabhängig von der Position des Pendels gilt jedoch, dass die Summe aus kinetischer und potenzieller Energie hierbei immer konstant bleibt.

Für die Unfallrekonstruktion kann der Energieerhaltungssatz in der nachstehenden Form Anwendung finden:

$$E_{T_1} + E_{T_2} + E_{R_1} + E_{R_2} = E'_{T_1} + E'_{T_2} + E'_{R_1} + E'_{R_2} + E_{D_1} + E_{D_2} + E_{\text{Rest}} \tag{A9-11}$$

Hierin sind E_T die translatorischen und E_R die rotatorischen Energieanteile vor dem Stoß und E'_T die translatorischen und E'_R die rotatorischen Energieanteile nach dem Stoß. E_{Rest} sind nicht näher erfaßte Energieanteile aus z. B. Reibung, Scherung, Hubarbeit, Drehenergie in Antriebswellen und Rädern bzw. Energieanteile, die als im unfallspezifischen Schadensbild enthalten angesehen werden.

Die Deformationsenergie E_D wird in der folgenden sinnvollen Form verwendet:

$$E_D = \frac{1}{2} m \cdot (\text{EES})^2 \tag{A9-12}$$

mit: EES = Energy Equivalent Speed

2.4 Stoßtheorien

2.4.1 Stoßtheorie nach Hertz und Saint Venant

Die Ermittlung der maximalen Stoßkräfte und der Stoßdauer während des Stoßvorgangs mit Hilfe der Hook'schen Deformationsgesetze ist das Ziel.

2.4.2 Stoßtheorie nach Galilei, Huygens und Newton (klassische Stoßtheorie)

Die Ermittlung der Geschwindigkeit am Ende des Stoßvorgangs aus der Geschwindigkeit beim Stoßbeginn ist das Ziel. Dabei werden die Annahmen getroffen, dass die Stoßdauer sehr kurz und die Stoßkräfte sehr groß sind, dass alle äußeren Kräfte gegenüber der Stoßkraft vernachlässigbar klein sind und dass das Zeitintegral der Stoßkraft $\int F dt$ endlich bleibt. Weiterhin wird angenommen, dass die kinematische Konfiguration während des Stoßes erhalten bleibt. Deformation des Körpers während des Stoßes wird nicht berücksichtigt.

2.5 Ergänzungshypothesen zur klassischen Stoßtheorie

2.5.1 Stoßzahlhypothese nach Newton

Die Stoßziffer ε wird zahlenmäßig angenommen und ist über das Verhältnis der Relativgeschwindigkeiten der Kontaktpunkte nach Kollision zur Relativgeschwindigkeit der Kontaktpunkte vor Kollision in Normalenrichtung zur Berührebene definiert. Sie beschreibt das plastisch-elastische Verhalten. Die beiden Grenzfälle ergeben sich für $\varepsilon = 0$ (vollkommen plastischer Stoß) und $\varepsilon = 1$ (vollkommen elastischer Stoß).

$$\varepsilon = \frac{v'_{SN2} - v'_{SN1}}{v_{SN1} - v_{SN2}} \tag{A9-13}$$

2.5.2 Stosszahlhypothese nach Poisson

Über die Stoßziffer kann der elastische Anteil in der Kollision vorgegeben werden. Die Stoßziffer wird über das Verhältnis der Stoßantriebe in der Restitutions- und Kompressionsphase vorgegeben. Diese Darstellungen ist äquivalent zur Stoßzahlvorgabe nach Newton.

$$\varepsilon = \frac{S_{\text{rest}}}{S_{\text{komp}}} \tag{A9-14}$$

$$\vec{S} = \vec{S}_{\text{komp}} + \vec{S}_{\text{rest}} = \vec{S}_{\text{komp}} \cdot (1 + \varepsilon) \tag{A9-15}$$

2.5.3 Richtungshypothese nach Marquard

Der Stoßantrieb ist unabhängig von der Gestalt der Körper und liegt in Richtung der Relativgeschwindigkeit der Schwerpunkte zum Zeitpunkt der Erstberührung.

2.5.4 Hypothese nach Slibar für Kollisionen ohne Abgleiten

Liegt der Stoßantrieb innerhalb des Reibungskegels $T \leq \mu N$, dann ist die tangentiale Relativgeschwindigkeit am Ende der Kompressionphase gleich Null. Diese Hypothese stellt auch sicher, dass es in der Kollision zu keiner Energiezunahme kommen kann.

2.5.5 Gleithypothese von Kudlich und später Böhm und Hörz

Falls eine Kollision ohne Abgleiten nicht angenommen werden kann, wird $T = \pm \mu N$ gesetzt. Dabei ist allerdings besondere Sorgfalt bei der richtigen Festlegung der Berührebene und des Reibbeiwertes erforderlich.

Literatur

[1] Brüderlin, A.: Die Mechanik des Verkehrsunfalls. Verlag zum Elsässer AG, Zürich 1941
[2] Slibar, A.: Das Antriebsbalance-Diagramm als optimales Hilfsmittel der Unfallanalyse. der Verkehrsunfall 1973, Heft 2
[3] Schimmelpfennig et al.: Rhomboid-Schnittverfahren und Energiering-Verfahren. der Verkehrsunfall 11/1980 und 09/1982
[4] Campbell, K. L.: Energy Basis for Collision Severity. 3th International Conference on Occupant Protection, 1974
[5] McHenry, R.: Mathematical Reconstruction of Highway Accidents. DOT HS-800 801, 1973
[6] Burg, H. Zeidler, F.: EES – Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkungen auf die Unfallforschung. der Verkehrsunfall 1980, Heft 4
[7] CRASH 3 Technical Manual, NHTSA
[8] Stronge, W. J.: Energy dissipated in planar collision, Univ of Cambridge, Cambridge, England, Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME Volume 59, Issue 3, September 1992, Pages 681-682 ISSN 0021-8936
[9] G. Gilardi, I. Sharf: Literature survey of contact dynamics modelling. Mechanism and Machine Theory, 37 (2002) Pergamon
[10] Handbuch PC-Crash
[11] Handbücher und Onlinehilfen Carat-3 und Carat-4

3 Gerader zentraler Stoß

Beim geraden zentralen Stoß verläuft die Wirkungslinie der Stoßkräfte genau durch die Schwerpunkte der beteiligten Fahrzeuge oder Körper. Vereinfacht kann dies mit zwei kugelförmigen Gebilden dargestellt werden:

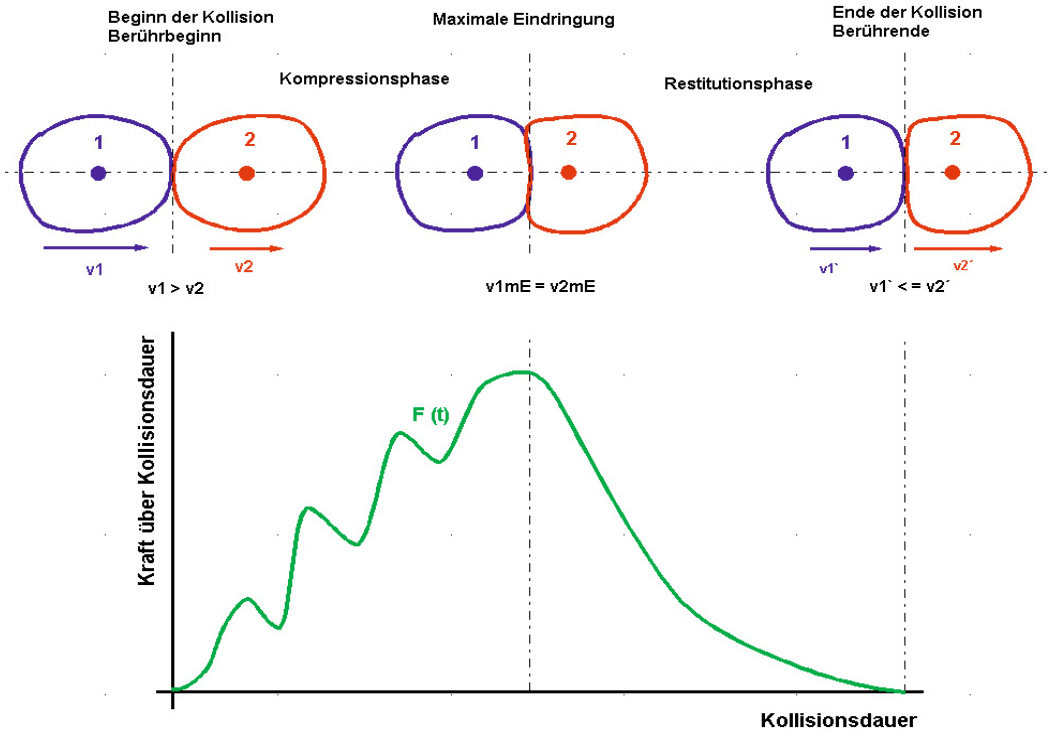


Bild A9-2 Ablauf einer Kollision von zwei Körpern

Das oben geschilderte physikalische Verhalten der Körper wird durch die Stoßzahl oder den Restitutionskoeffizienten (Formelzeichen k oder ε) charakterisiert. Die Hypothese nach Newton (Gl. (A9-16)) verwendet die Relativgeschwindigkeiten der Stoßpunkte in Normalenrichtung zur Berührebene vor und nach der Kollision wie folgt:

$$k = \frac{v'_{1n} - v'_{2n}}{v_{2n} - v_{1n}} = \frac{v'_1 - v'_2}{v_2 - v_1} \qquad \text{(A9-16)}$$

mit $0 \le k \le 1$. Eine Alternative dazu ist die Hypothese von *Poisson*, der das Verhältnis aus Stoßantrieb in der Restitutions- und der Kompressionsphase zur Beschreibung der Elastizität des Stoßes verwendet:

$$k = \varepsilon = \frac{S_{\text{rest}}}{S_{\text{komp}}} \qquad \text{(A9-17)}$$

$$\vec{S} = \vec{S}_{\text{komp}} + \vec{S}_{\text{rest}} = \vec{S}_{\text{komp}} \cdot (1 + \varepsilon)$$

Bei beiden Hypothesen kann es vorkommen, dass sich die Gesamtenergie der beiden kollidierenden Körper erhöhen kann, wenn Reibung in der Kontaktzone auftritt. Dies ist abhängig vom verwendeten Modellansatz für die Beschreibung von Abgleitvorgängen.

Um dieses Problem zu umgehen bzw. auszuschließen, wurde von Stronge vorgeschlagen, den Restitutionskoeffizienten als das Verhältnis aus der Deformationsarbeit in der Kompressions- und Restitutionsphase zu definieren.

Dabei ist zu beachten, dass es sich um Arbeit handeln muss, die aus den Normalkräften resultiert und dass der Energiesatz nur für das Gesamtsystem angesetzt werden darf.

Die Hypothese von Stronge geht davon aus, dass die positive Arbeit während der Restitution e^2 mal der negativen Arbeit während der Kompressionsphase ist. Damit ist garantiert, dass die Effekte der Normalkräfte, genauso wie die Reibungskräfte, immer dissipativ sind. Dem System kann also keine Energie zugeführt werden. Als Formel sieht das wie folgt aus:

$$W_{\text{rest}} = W_{\text{Def}} - W_{\text{komp}} = -W_{\text{komp}} \cdot \varepsilon^2 \tag{A9-18}$$

Nach dem dritten Newtonschen Gesetz sind die Stoßkräfte auf beide Körper während der Stoßzeit, d. h. während beide Körper in Kontakt sind, dem Betrage nach gleich und entgegengesetzt gerichtet. Daher ist die Summe ihrer Impulse gleich Null und die gesamte Bewegungsgröße des Zweikörpersystems wird durch den Stoß nicht geändert. Damit gilt:

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v_1' + m_2 \cdot v_2' \tag{A9-19}$$

Aus Gl. (A9-16) folgt:

$$v_2' = v_1' + k(v_1 - v_2) \tag{A9-20}$$

Einsetzen von (A9-20) in (A9-19) liefert:

$$v'_1 = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 - k \cdot m_2 (v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \tag{A9-21}$$

$$v'_2 = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 + k \cdot m_1 (v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \tag{A9-22}$$

Damit sind schon ganz wesentliche Gleichungen vorhanden, mit denen verschiedene in der Praxis vorkommende Fälle berechnet werden können. Wünschenswert wäre es aber noch, den Stoßantrieb direkt berechnen zu können. Das geht nur durch Einbeziehung des Energiesatzes, denn der Stoßantrieb erzeugt die Schäden an den Fahrzeugen. Die Deformationsarbeit (in Form von Schäden) an den beiden Fahrzeugen berechnet sich aus dem Energieverlust, der bei der Kollision eintritt:

$$W_{\text{Deformation}} = E_{\text{vor dem Stoß}} - E_{\text{nach dem Stoß}}$$

$$W_D = \frac{1}{2}(m_1 \cdot v_1^2 + m_2 \cdot v_2^2) - \frac{1}{2}(m_1 \cdot v'^2_1 + m_2 \cdot v'^2_2) \tag{A9-23}$$

Einsetzen von (A9-20) und (A9-21) in die Gl. (A9-22) liefert:

$$W_D = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}(1 - k^2)(v_1 - v_2)^2 \tag{A9-24}$$

Unbekannt in Gl. (A9-24) sind v_1 und v_2. Die Deformationsarbeit kann beispielsweise nach Gl. (A9-23) berechnet werden, es ist aber auch eine direkte Bestimmung mittels EES-Einstufung der Schäden an beiden Fahrzeugen möglich. Der Restitutionskoeffizient k muss unter Berücksichtigung der Umstände des Einzelfalls angenommen werden. Die Umstellung von Gl. (A9-24) liefert folgenden Zusammenhang:

$$v_1 - v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot W_D}{\frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}(1-k^2)}} \qquad \text{(A9-25)}$$

Weiterhin gilt:

$$\Delta v_1 = v_1 - v'_1$$

$$\Delta v_2 = v_2 - v'_2$$

und mit (A9-21) und (A9-22):

$$\Delta v_1 = (1+k)\frac{m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$$

$$\Delta v_2 = -(1+k)\frac{m_1}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2)$$

Die Multiplikation mit der Fahrzeugmasse liefert unmittelbar eine Gleichung für den Stoßantrieb:

$$S_1 = m_1 \cdot \Delta v_1 = (1+k)\frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2) = -S_2 \qquad \text{(A9-26)}$$

Im Weiteren wird die Abkürzung $m^* = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$ verwendet.

Nun wird (A9-25) in (A9-26) eingesetzt. Damit ergibt sich eine Bestimmungsgleichung für den Betrag des Stoßantriebs, berechnet aus der Deformationsenergie (E_D), den Fahrzeugmassen und dem Restitutionskoeffizienten:

$$S = (1+k) \cdot m^* \sqrt{\frac{2 \cdot E_D}{m^*(1-k^2)}}$$

$$S = \sqrt{\frac{2 \cdot E_D \cdot (1+k)^2 \cdot m^{*2}}{m^*(1-k) \cdot (1+k)}}$$

$$S = \sqrt{\frac{2 \cdot E_D \cdot (1+k) \cdot m^*}{(1-k)}} \qquad \text{(A9-27)}$$

Der Stoßantrieb kann damit grafisch als Kreis um den Stoßpunkt verstanden werden. Der Schnitt mit der Stoßkraftgeraden bestimmt die Länge derselben. Da sowohl die Deformationsenergie als auch der Restitutionskoeffizient toleranzbehaftet sind, gibt es einen Maximalwert und einen Minimalwert für den Stoßantrieb. Grafisch bedeutet das einen Kreisring, mit dem die Stoßkraftgerade geschnitten werden kann.

Grundsätzlich kann die Gl. (A9-27) auch bei einem exzentrischen Stoß (das ist mindestens ein zweidimensionaler Stoß) sinnvoll angewendet werden. Allerdings gilt die Gl. (A9-27) nur für gerade, zentrale Stöße, weshalb der exzentrische Stoß auf den eindimensionalen (geraden, zentralen) Stoß zurückgeführt werden muss.

Tut man dies, dann ist zu bedenken, dass beim exzentrischen Stoß nur ein Teil der Masse der Fahrzeuge in Richtung des Stoßantriebs wirkt.

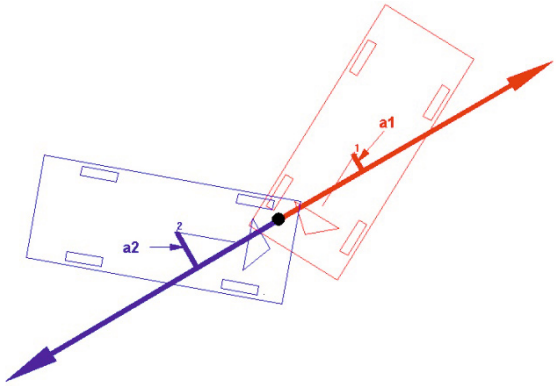


Bild A9-3: Stosskonstellation■

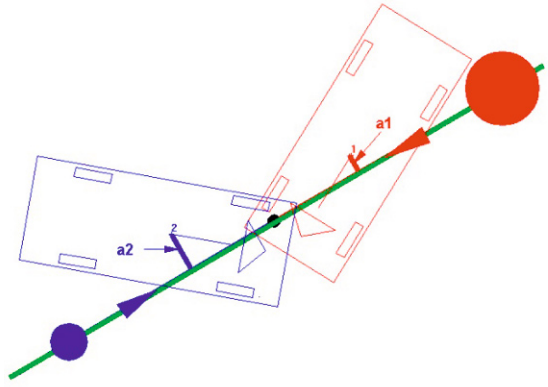


Bild A9-4: Reduzierte Massen

Diese Teilmasse wird durch den Abstand der Stoßkraft bzw. des Stoßantriebs vom Schwerpunkt bestimmt. Je größer der Abstand, desto geringer die wirksame Masse (reduzierte Masse). Die reduzierte Masse bei dem roten Fahrzeug ist größer als die reduzierte Masse des blauen Fahrzeugs.

Die Rückführung des zweidimensionalen Stoßes in den Bildern links auf einen eindimensionalen Stoß darf die Wirkung der Stoßkraft hinsichtlich der Drehung der Fahrzeuge nicht verändern. Für die Drehung ist das Massenträgheitsmoment bestimmend. Dieses ändert sich, wenn man die Drehachse verschiebt; der Effekt kann mit dem Verschiebungssatz von Steiner berücksichtigt werden.

Dabei soll sich mit der reduzierten Masse die gleiche Rotation des Körpers berechnen, wie wenn sich der tatsächliche Körper mit der tatsächlichen Masse um seine Symmetrieachse dreht. Dabei ist i der Trägheitsradius, der sich aus

$$i^2 = \frac{J_{\text{tats. Körper}}}{m}$$

berechnet.

$$J_{\text{tats.Körper}} = J_{S(\text{mred})} + m_{\text{red}} \cdot a^2$$

$$m \cdot i^2 = m_{\text{red}} \cdot i^2 + m_{\text{red}} \cdot a^2 \qquad \text{bzw.} \qquad m_{\text{red}} = m \cdot \frac{i^2}{i^2 + a^2}$$

Bei exzentrischen Stößen muss deshalb in der Gl. (A9-27) mit den reduzierten Massen gerechnet werden:

$$m^* = \frac{m_{1\text{red}} \cdot m_{2\text{red}}}{m_{1\text{red}} + m_{2\text{red}}}$$

3.1 Realer Ablauf eines geraden zentralen Stoßes

Der tatsächliche Ablauf von Kollisionen mit realen Fahrzeugen wurde mittlerweile sehr genau untersucht. Aufwändige Messtechnik hat gute Einsichten in diese Art der Kollision ermöglicht. Versuchsergebnisse können teilweise kostenlos, teilweise gegen eine Gebühr aus dem Internet bezogen werden (Adressen siehe Teil E).

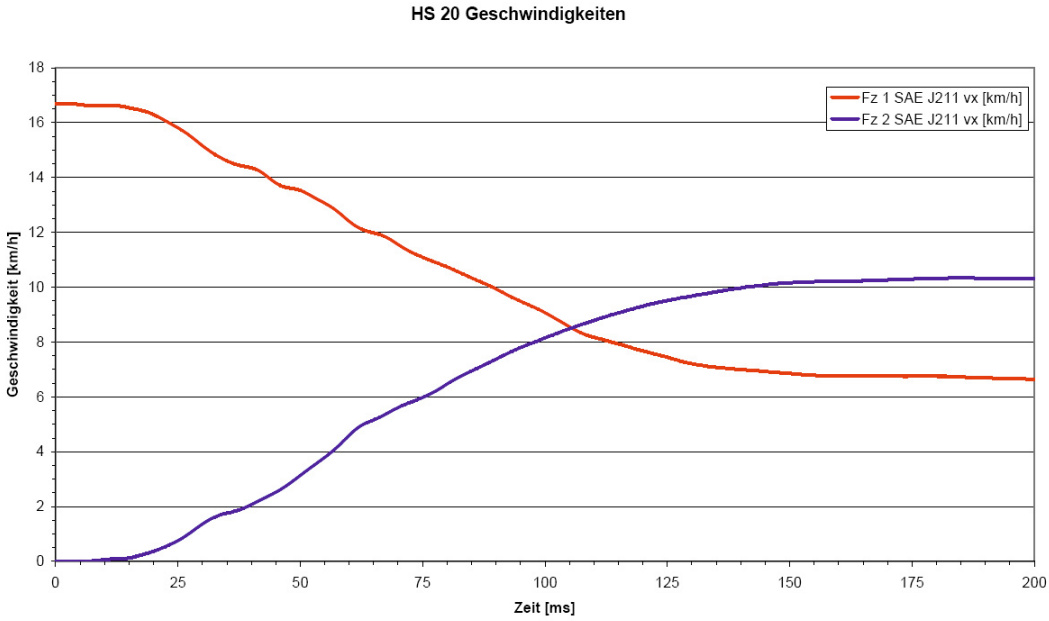


Bild A9-5 Geschwindigkeitsverlauf bei einem Crash-Versuch

Ein Versuch der AGU Schweiz wird vorgestellt. Dabei ist ein Mercedes W124 ungebremst mit 16,7 km/h und mit voller Überdeckung auf das Heck eines Renault Espace aufgefahren.

Im **Bild A9-5** ist rot der Geschwindigkeitsverlauf des Mercedes und blau der des Renault dargestellt.

Etwa bei 105 ms haben beide Fahrzeuge gleiche Geschwindigkeit erreicht. Hier ist die Kompressionsphase beendet.

Wie lange die Restitutionsphase dauert kann aus der Filmauswertung entnommen werden oder aus den Beschleunigungsaufschrieben.

Im **Bild A9-6** ist der Verlauf der Intrusion für beide Fahrzeuge in Summe über der Zeit dargestellt. Diese Kurve ist das Ergebnis einer Filmauswertung.

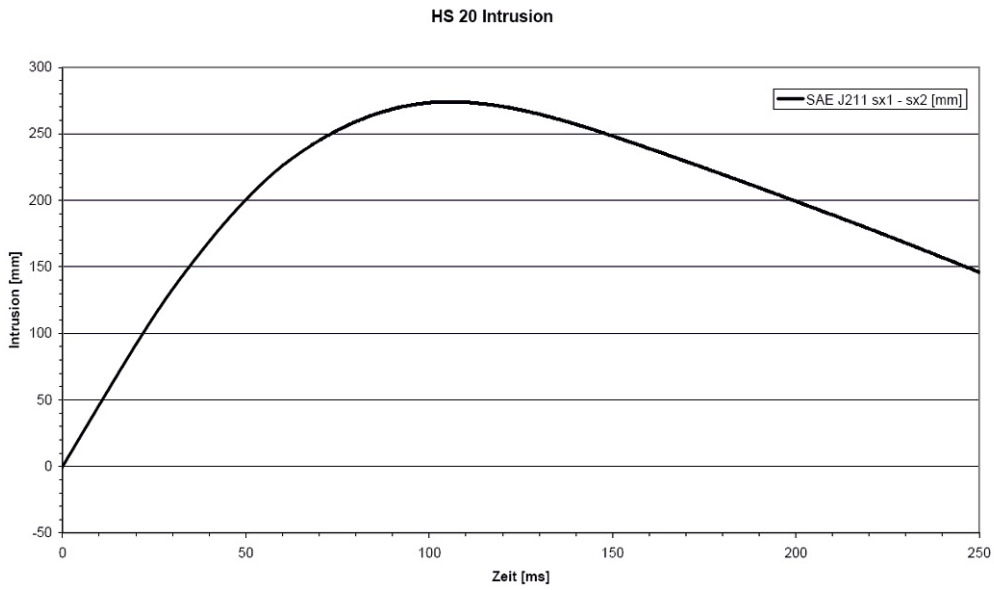


Bild A9-6 Verlauf der Intrusion für beide Fahrzeuge in Summe über der Zeit

Bild A9-7 und **Bild A9-8** zeigen die gemessenen Beschleunigungen für beide Fahrzeuge.

Zu beachten ist bei solchen Diagrammen, dass die gemessenen Signale von den verwendeten Sensoren und vom Anbringungsort derselben abhängen. Die Darstellung hängt schließlich stark von der Filterung/Glättung der Signale ab.

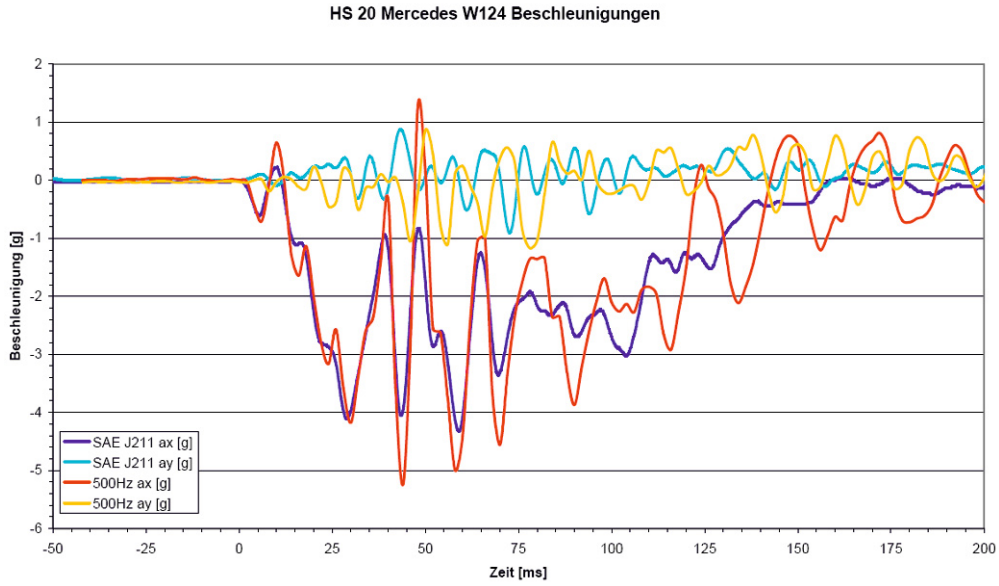


Bild A9-7 Beschleunigungsverlauf über der Zeit beim stoßenden Pkw

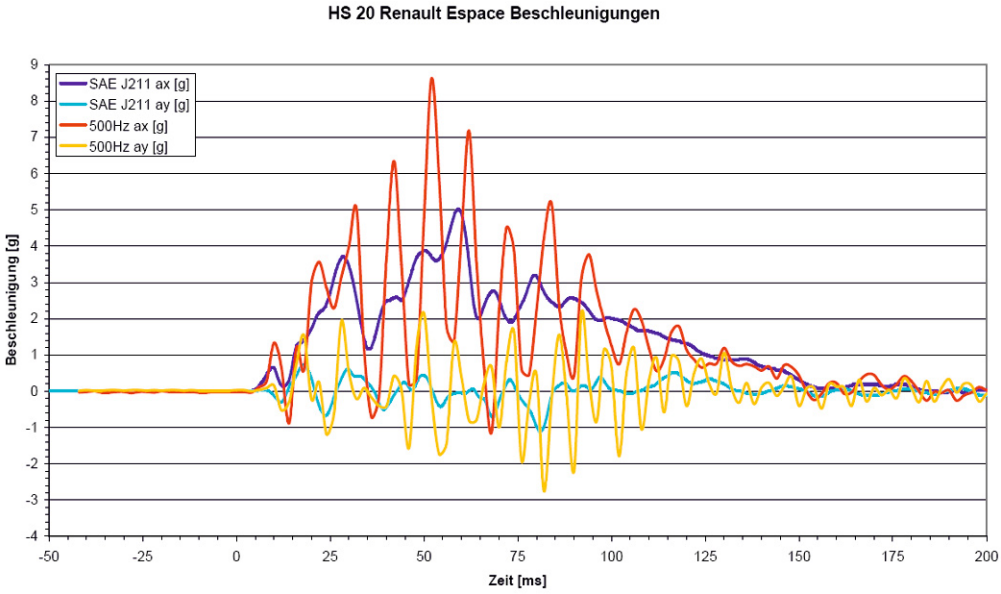


Bild A9-8 Beschleunigungsverlauf über der Zeit beim gestoßenen Pkw



Bild A9-9 Video-dokumentation

3.2 Berechnung nach EDCrash bzw. Crash3

Die Bestimmung der Geschwindigkeitsänderung Δv aus der Verformungsarbeit anhand der Schäden der beteiligten Fahrzeuge ist die zentrale Grundlage für die Kollisionsberechnung in EDCRASH, diese ist mit der Berechnung in Crash3 weitestgehend identisch. [13], [16]

Annahme für die Berechnung ist ein vollplastischer Stoß ohne Abgleiten und damit das Erreichen einer gemeinsamen Geschwindigkeit im Stoßpunkt am Ende der Kompressionsphase mit $k = 0$. Rotatorische Komponenten werden in der Berechnung nicht berücksichtigt, die Berechnung beruht rein auf der Impulserhaltung und dem Energieerhaltungssatz in Form einer eindimensionalen Betrachtung für den geraden zentralen Stoß. Die Grundlage der Berechnung bildet die Berechnung der Deformationsenergie aus den bleibenden Fahrzeugdeformationen und den als bekannt vorausgesetzten konstanten Steifigkeiten der Fahrzeugkarosserie in der Deformationszone.

Für den exzentrischen und den schiefen Stoß werden aus der Geometrie Korrekturfaktoren abgeleitet, die dann in die Berechnung einbezogen werden. Aus dem Impulserhaltungssatz und der Annahme eines vollplastischen Stoßes kann die gemeinsame Geschwindigkeit der Fahrzeuge nach der Kollision berechnet werden.

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v_1' + m_2 \cdot v_2' = (m_1 + m_2) \cdot v_{gem} \tag{A9-28}$$

$$v_{rel} = v_1 - v_2 \tag{A9-29}$$

$$v_{gem} = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} \tag{A9-30}$$

Weiterhin wird der Energieerhaltungssatz wie folgt verwendet.

$$W_{Def} = W_{Def1} + W_{Def2} = \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) \cdot v_{gem}^2}{2} \tag{A9-31}$$

$$W_{Def1} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot EBS_1^2 \tag{A9-32}$$

$$W_{Def2} = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot EBS_2^2 \tag{A9-33}$$

$$W_{Def} = \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} - \frac{m_1 + m_2}{2} \left(\frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} \right)^2 \qquad \text{(A9-30) + (A9-31)}$$

$$W_{Def} = \frac{1}{2} \frac{m_1 \cdot v_1^2 \cdot (m_1 + m_2) + m_2 \cdot v_2^2 \cdot (m_1 + m_2) - (m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2)^2}{m_1 + m_2}$$

$$W_{Def} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_1^2 - 2 \cdot v_1 \cdot v_2 + v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2)^2$$

$$W_{Def} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_{rel}^2$$

$$v_{rel} = \sqrt{2 \cdot W_{Def} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}} \tag{A9-34}$$

Somit kann die Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuge und damit die Geschwindigkeitsänderung der Fahrzeuge berechnet werden.

$$\Delta v_1 = v_1 - v_{gem} = v_1 - \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_{rel} \quad \text{(A9-35)}$$

$$\Delta v_2 = v_2 - v_{gem} = v_2 - \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} = -\frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_{rel} \quad \text{(A9-36)}$$

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{Def} \cdot m_2}{m_1 \cdot (m_1 + m_2)}} \quad \text{(A9-37)}$$

$$\Delta v_2 = -\sqrt{\frac{2 \cdot W_{Def} \cdot m_1}{m_2 \cdot (m_1 + m_2)}} \quad \text{(A9-38)}$$

Literatur

[2] Hans Hagen: Stossvorgänge bei Verkehrsunfällen von Personenwagen, untersucht an Modellfahrzeugen, TU München, 1965

[3] Karl Plankensteiner: Mathematische Grundlagen für die Rekonstruktion von Fahrzeugstößen, TU Graz, 1975

[3] Schimmelpfennig et al.: Rhomboid-Schnittverfahren und Energiering-Verfahren. der Verkehrsunfall 11/1980 und 09/1982

[4] Stronge, W. J.: Energy dissipated in planar collision, Univ of Cambridge, Cambridge, England, Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME Volume 59, Issue 3, September 1992, Pages 681–682 ISSN 0021-8936

[13] Danne, Anja: Vergleich und Bewertung von computergestützten Verfahren zur Rekonstruktion von Fahrzeugkollisionen, Diplomarbeit Nr. 7/99 (FG 7), TU-Berlin April 1999

[16] Crash3 User's Guide and Technical Manual, National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transporation, Washington, DC, USA, 1982

4 Grafische Verfahren

Um die praktische Vorgehensweise bei den einzelnen Berechnungsverfahren beschreiben zu können, werden zwei Unfallversuche (Kreuzungskollision und Gegenverkehrskollision) der AREC 1999 in Wildhaus (CH) kurz vorgestellt. Nähere Informationen sind unter www.arecgroup.info erhältlich. Auf diese beiden Versuche werden die unterschiedlichen Verfahren angewendet.

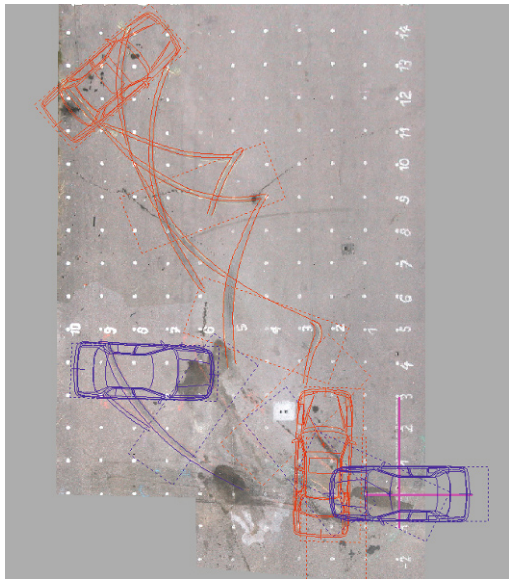


Bild A9-10 Kreuzungskollision

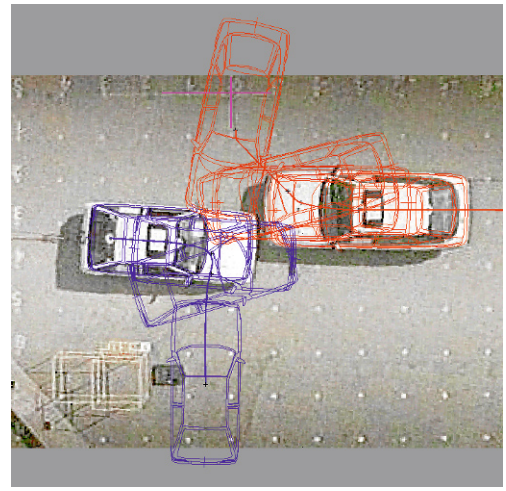


Bild A9-11 Gegenverkehrskollision

Die folgenden Tabellen enthalten Messwerte und Zusatzangaben. Bei Berechnungen (Rekonstruktionen) von realen Unfällen treten Toleranzen auf, die zu berücksichtigen sind. Beim schleudernden Auslauf ist im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 50 km/h meist eine Toleranz von +/–3 km/h bei den Beträgen der Auslaufgeschwindigkeiten und von +/–3 Grad bei den Richtungen als zu erwarten anzusehen. Für die Giergeschwindigkeiten ist keine höhere Genauigkeit als +/–10 % zu erwarten.

Bei der Verkehrsunfallrekonstruktion ist der Sachverständige auf Befunde angewiesen, die nach dem Unfall feststellbar sind und meist von anderen Personen (z. B. Polizeibeamten) festgestellt wurden. Daraus folgt, dass viele Einflussgrößen, wie z. B. der Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn, Lenkwinkel- und Bremsdruckverläufe, Reifenluftdruck, eingelegter Gang usw. nicht oder nur unvollständig bekannt sind. Diese Einflussgrößen müssen deshalb im Rahmen des möglichen variiert werden, wobei sich allerdings manche Bereiche gegenseitig ausschließen.

Tabelle A9.2 Daten zu dem Versuch Kreuzungskollision

	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2
Fabrikat und Typ	Ford Sierra	Mitsubishi Lancer
Masse in kg	1.142	1.067
Kollisionsgeschwindigkeit in km/h	55	55
Kurswinkel vor Kollision in Grad	90	180
Auslaufgeschwindigkeit in km/h	45 +/– 3	36 +/– 3
Betrag der Auslaufimpulse $p = m \cdot v$ in kg·m/s oder Ns	14.275 12.848 bis 15.703	10.670 9.603 bis 11.737
Kurswinkel nach Kollision in Grad	117 +/– 3	150 +/– 3
Giergeschwindigkeit nach Kollision in Grad/s	–365 +/– 37	–256 +/– 26

Tabelle A9.3 Daten zu dem Versuch Gegenverkehrskollision

	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2
Fabrikat und Typ	Ford Scorpio	Mitsubishi Colt
Masse in kg	1.370	880
Kollisionsgeschwindigkeit in km/h	58	58
Kurswinkel vor Kollision in Grad	180	–2
Auslaufgeschwindigkeit in km/h	18 +/– 3	17 +/– 3
Betrag der Auslaufimpulse $p = m \cdot v$ in kg·m/s	6.850 5.708 bis 7.992	4.156 3.422 bis 4.889
Kurswinkel nach Kollision in Grad	139 +/– 3	–108 +/– 3
Giergeschwindigkeit nach Kollision in Grad/s	150 +/– 15	90 +/– 9

Wegen ungenauer oder oft nur teilweise möglicher Datenerhebung kann bei den realen Unfällen kaum einmal aus den Fahrzeugendstellungen und den Spuren eine völlig exakte Rekonstruktion der Fahrzeugbewegungen zwischen Kollisionsort und Endstellung durchgeführt werden. Gerade das ist aber Voraussetzung für die exakte Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeiten. Ebenso wenig lassen sich aus den Deformationen exakte Werte für die Deformationsenergie berechnen. Deshalb können nur obere und untere Grenzwerte angegeben werden, deren Auswirkungen auf das Ergebnis von Fall zu Fall verschieden sind und mit denen sich der Sachverständige auseinandersetzen muss.

Die bisherige Entwicklung der Rekonstruktionsmethoden hat gezeigt, dass die gleichzeitige Anwendung von Impulssatz, Drallsatz und Energiesatz zu einer Redundanz führt, die eine Einengung des Ergebnisses trotz Berücksichtigung der vollen Bandbreite der Einflussgrößen liefert. Außerdem bieten verschiedene Kontrollgrößen zusätzliche Beurteilungskriterien.

Die oben erwähnten Einflüsse werden bei den zwei in Europa gebräuchlichen grafischen Verfahren, dem Antriebs-Balance-Diagramm nach Prof. Slibar und dem Rhomboid-Schnitt-Verfahren nach Schimmelpfennig und Becke weitgehend berücksichtigt. Die Anwendung wird

an zwei typischen Fällen, dem Kreuzungsunfall und dem Gegenverkehrsunfall erläutert. Die Berechnung des Betrags des Stoßantriebs (Energieringverfahren) führt bei den spitzwinkligen Kollisionen zur notwendigen Einengung der Ergebnisse.

4.1 Antriebs-Balance-Verfahren

Von Slibar [1] wurde Ende der 1960er Jahre eine sehr anschauliche grafische Lösung des Impulssatzes vorgestellt. Man zeichnet sich die Situation der Fahrzeuge bei Kollision auf und legt den Stoßpunkt fest, das ist die Stelle, an der die resultierende Stoßkraft angreift. Slibar schlug noch vor, die Fahrzeuge als feste, nicht verformbare Körper anzunehmen. Das hat sich später als nicht zweckmäßig herausgestellt. Heute werden die Körper im maximal eingedrungenen Zustand gezeichnet. Die Verformungslinien werden eingezeichnet, wobei größte Sorgfalt anzuwenden ist, und es wird eine Position der Fahrzeuge bei maximaler Eindringung verwendet, die nach Becke als Kompensationsstellung bezeichnet wird.

Der Stoßangriffspunkt wird als Ursprung eines Koordinatensystems für die Stoßrechnung verwendet. Dann werden die Auslaufimpulse so eingezeichnet, dass die Spitzen der Impulsvektoren im Ursprung des Koordinatensystems enden. In der Fassung von Slibar werden in der Zeichnung keine Toleranzen der Auslaufimpulsvektoren berücksichtigt, sondern es wurde vorgeschlagen, mehrere Lösungen zu zeichnen. Es ist aber auch möglich, die Toleranzen in einer Zeichnung einzutragen. An den Fußpunkten der Auslaufimpulsvektoren werden die Richtungen der Einlaufimpulse eingetragen. Über das Prinzip Kraft = Gegenkraft werden dann die möglichen Stoßantriebe „einbalanciert“. Dazu wird bei der manuellen Durchführung ein Geodreieck verwendet, in einem Zeichenprogramm kann ein entsprechend gestalteter Maßstab Anwendung finden.

Die Gültigkeit der Lösung wird daran beurteilt, ob durch den gefundenen Stoßantriebsvektor der Drallssatz erfüllt wird. Diese Kontrolle erfolgt rechnerisch.

Anwendung auf den Versuch Kreuzungskollision

Im **Bild A9-12** ist die Konstruktion bis zu der Stelle gezeigt, an welcher das Einbalancieren des Stoßantriebs stattfindet.

Im **Bild A9-13** ist die Konstruktion fertig. Durch die einbalancierten Stoßantriebe werden die Beträge der Einlaufimpulse bestimmt. Es können nun die Kollisionsgeschwindigkeiten aus $v = p/m$ berechnet werden. In dem **Bild A9-13** sind zusätzlich die Toleranzen bei den Auslaufimpulsvektoren angedeutet und der sich daraus ergebende Bereich der Stoßantriebsvektoren. Damit wird auch ein Bereich für die Kollisionsgeschwindigkeiten geliefert.

Da durch den Stoßantrieb auf die beiden Fahrzeuge multipliziert mit dem wirksamen Hebelarmen a Rotationen (Giergeschwindigkeiten) der Fahrzeuge erzeugt (induziert) werden, können diese zahlenmäßig aus

$$\dot{\psi} = S_i \cdot \frac{a_i}{J_i}$$

berechnet und mit den zuvor durch Auslaufanalyse ermittelten Giergeschwindigkeiten verglichen werden. Ist die Abweichung geringer als 10 %, kann die gefundene Lösung als ausreichend genau angesehen werden. Wenn nicht, muss ein im möglichen Bereich geänderter Stoßantrieb untersucht werden.

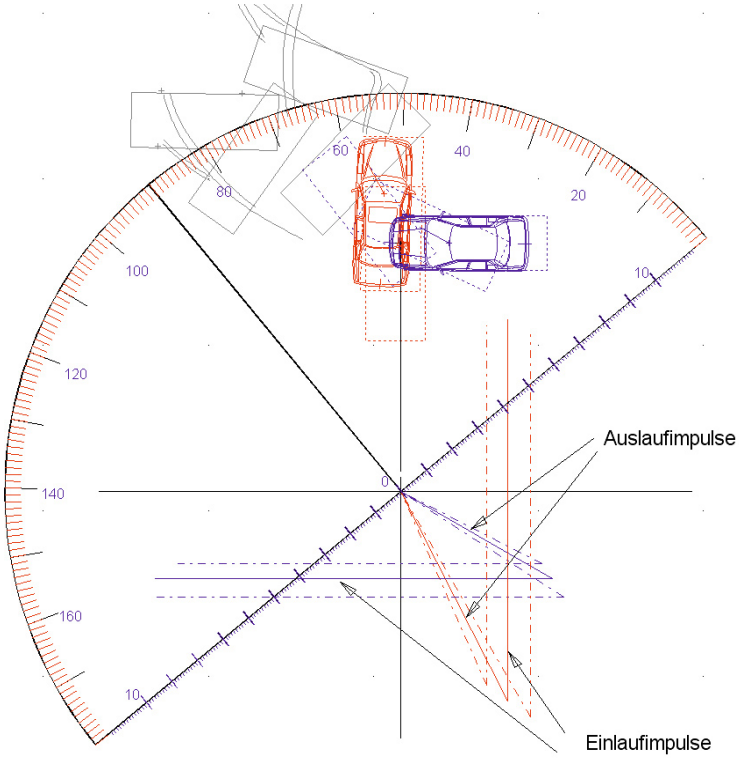


Bild A9-12 Konstruktion des Antriebs-Balance-Diagramms bis zum Einbanlancieren des Stoßantriebs. Toleranzen der Auslaufimpulse angedeutet

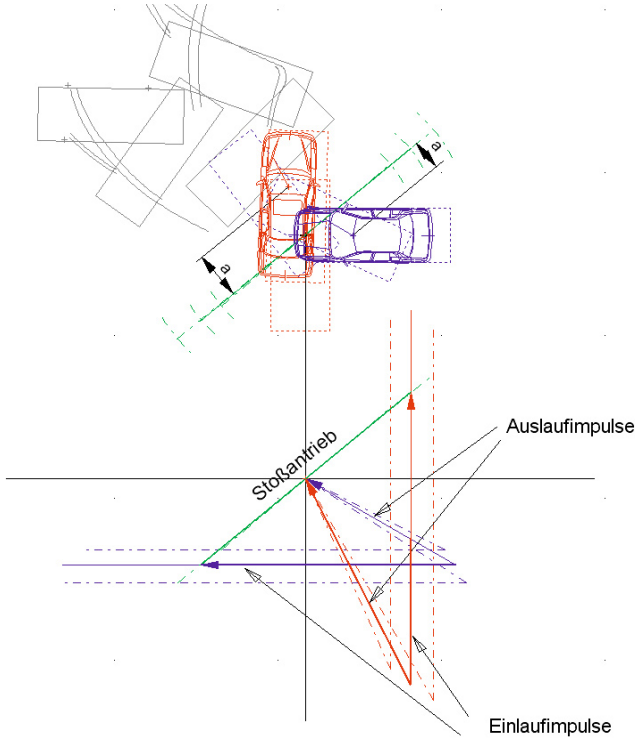


Bild A9-13 Stoßantriebe eingezeichnet und in den Stoßangriffspunkt übertragen. Toleranzbereiche eingezeichnet. Senkrechte Abstände a zu den Schwerpunkten abgemessen

Anwendung auf den Versuch Gegenverkehrskollision

Die Vorgehensweise ist hier prinzipiell gleich, jedoch kommt es wegen der spitzen Winkel, unter denen die Einlaufimpulse verlaufen, zu sehr großen Änderungen der Kollisionsgeschwindigkeiten bei ganz geringen Änderungen der Kurswinkel vor Kollision. Eine Eingrenzung ist hier möglich durch die Rotation der Fahrzeuge, da der Stoßantrieb jeweils vor oder hinter dem Schwerpunkt bzw. links oder rechts davon vorbeigehen und eine ganz bestimmte, bereits aus der Auslaufanalyse bekannte Giergeschwindigkeit nach der Kollision erzeugen muss.

Wichtig ist es, darüber nachzudenken, ob und in welchem Ausmaß sich die Lageveränderungen der Fahrzeuge zwischen Erstberührung und Ende der Kompressionsphase auswirken können. Es muss die Möglichkeit von Kompensationsstellungen in Betracht gezogen werden. Praxisgerechte und allgemein anwendbare Regeln für die Festlegung der Kompensationsstellung sind derzeit noch nicht verfügbar. Die Drehung von Fahrzeugen während der Eindringphase ist aus den folgenden Videobildern zu sehen:

Unfallversuch Gegenverkehrskollision bei der AREC 1999

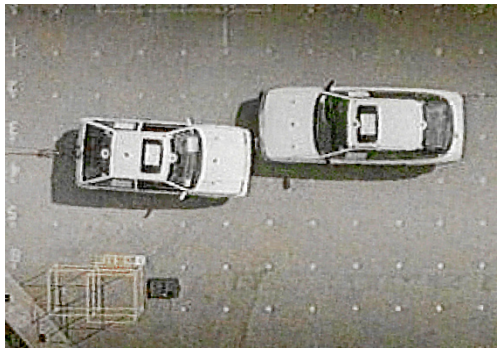


Bild A9-14 Berührbeginn

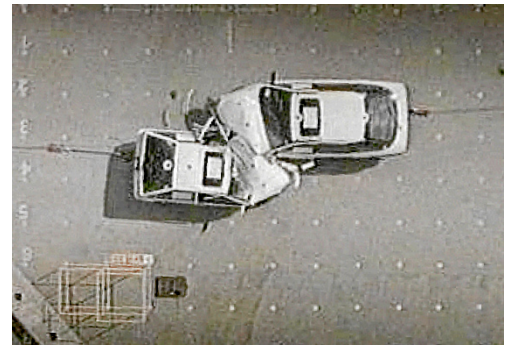


Bild A9-15 Ende der Kompressionsphase

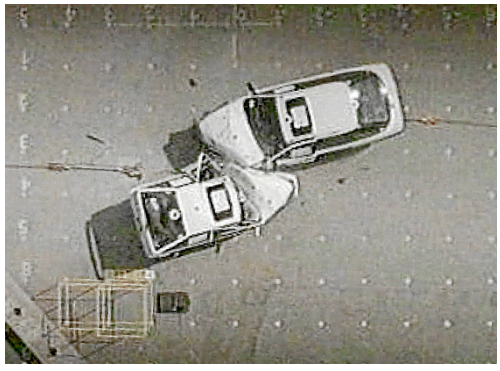


Bild A9-16 Restitutionsphase

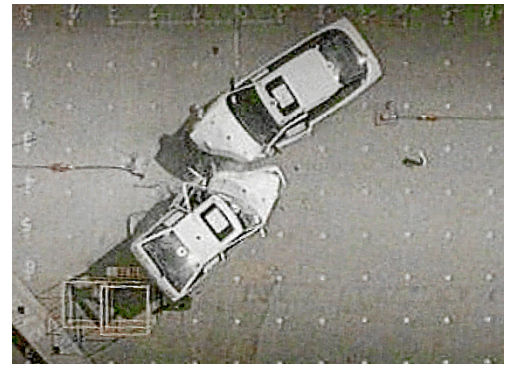


Bild A9-17 Fahrzeuge getrennt

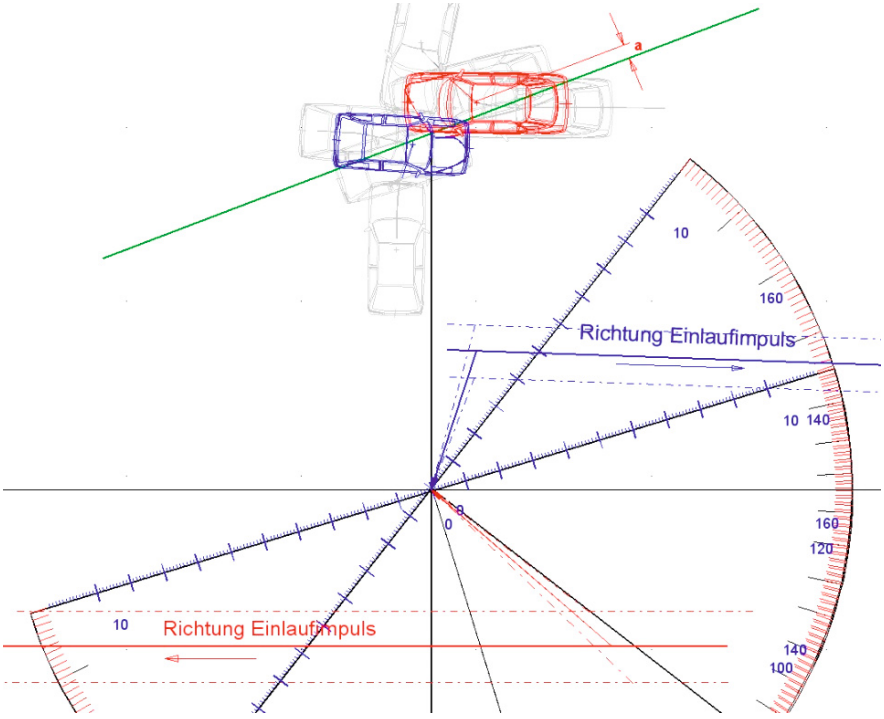


Bild A9-18 Antriebs-Balance-Diagramm für die Gegenverkehrskollision

4.2 Rhomboid-Schnittverfahren

Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine Abwandlung des Antriebs-Balance-Verfahrens es besteht aus dem Impuls-Spiegel-Verfahren und dem Drehimpuls-Spiegel-Verfahren. Man beginnt mit einem Impuls-Diagramm und überlagert die Drallsatzlösungen in grafischer Form. Nach dem Prinzip der Schnittmengen entsteht eine Einengung der Lösungsmengen. Auch hier sind die linearen und rotatorischen Impulse nach Betrag und Richtung mit ihren Toleranzen aus der Auslaufanalyse als bekannt vorausgesetzt.

Impuls-Spiegel-Verfahren

Das Verfahren entspricht prinzipiell dem von Slibar. Es wird der Stoßantrieb gesucht, mit dem unter den gegebenen Randbedingungen den Impulssatz erfüllt wird. Die beiden Verfahren unterscheiden sich in der Darstellung des Impulsdiagramms. Typisch für das Verfahren von Schimmelpfennig und Becke ist, dass die Spitzen der Einlaufimpulse zusammengezeichnet werden und nicht, wie bei Slibar die Spitzen der Auslaufimpulse. Diese Darstellung ermöglicht es, Toleranzen leichter zu berücksichtigen und eine zusätzliche grafische Verknüpfung mit dem Drallsatz durchzuführen.

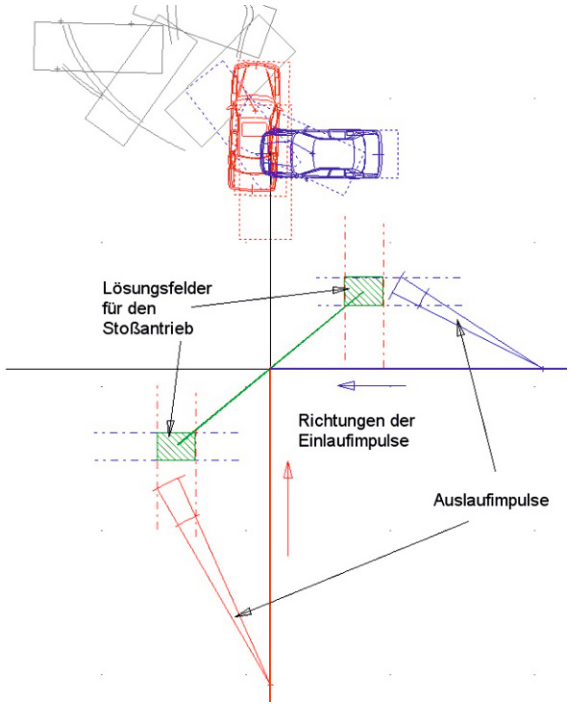
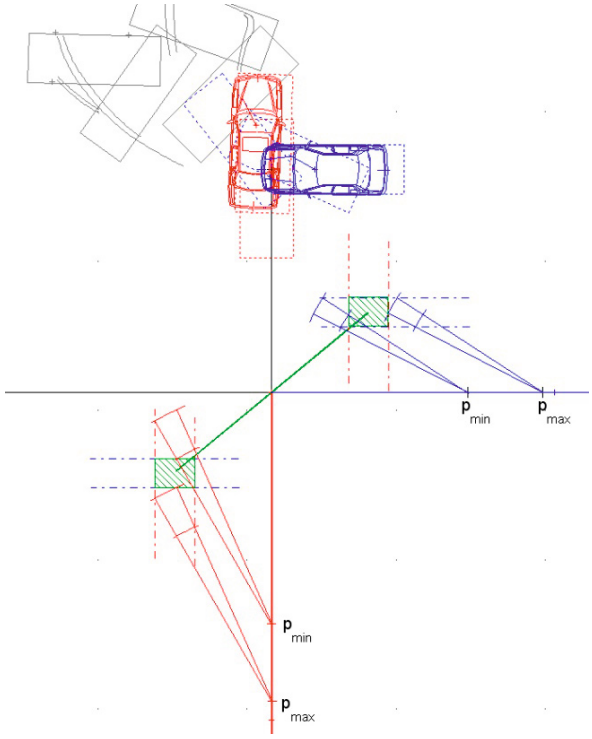


Bild A9-19 veranschaulicht die Entstehung von Lösungsfeldern, in denen die Spitzen der Stoßimpulse liegen müssen. Die Auslaufimpulse von jedem Fahrzeug bilden einen Fächer. Dieser wird parallel zur jeweiligen Einlaufrichtung verschoben. Für jedes Fahrzeug entsteht so ein Band. Durch Spiegelung um die jeweilige Einlaufrichtung und durch Überlagerung der ursprünglichen und der gespiegelten Bänder erhält man zwei Schnittfelder. In diesen Feldern liegen die Spitzen der Stoßimpulse. Man kann sie daher auch als Stoßimpulsfelder bezeichnen.

Bild A9-19 Ermittlung des kleinsten und des größten Einlaufimpulses durch Verschiebung der Fächer der Auslaufimpulse



Aus **Bild A9-20** geht hervor, wie die minimalen und maximalen Kollisionsgeschwindigkeiten ermittelt werden: Die Fächer werden an das jeweilige Schnittfeld herangeführt. Bei der Interpretation der Ergebnisse sind folgende Überlegungen zu beachten: Im Allgemeinen lässt sich die maximale Geschwindigkeit des einen Fahrzeugs nicht mit der maximalen Geschwindigkeit des anderen verknüpfen. Dies gilt auch für die minimalen Kollisionsgeschwindigkeiten.

Zu der maximalen bzw. minimalen Kollisionsgeschwindigkeit gehört nicht unbedingt der größte bzw. kleinste Stoßimpuls.

Bild A9-20 Konstruktion des Impuls-Spiegelverfahrens bis zur Ermittlung des Lösungsfeldes für den Stoßantrieb

Drehimpuls-Spiegel-Verfahren

Das Drehimpuls-Spiegel-Verfahren baut auf den Drallsatz auf. Der Drallsatz ist eine spezielle Formulierung des Satzes von der Drehimpuls-Erhaltung des Gesamtsystems. Wendet man den Drallsatz an, so geht man davon aus, dass die Kräfte kurzzeitig in einem Punkt gewirkt haben. Diese Modellvorstellung trifft auf die Pkw/Pkw-Kollision zwar nicht genau zu; es lässt sich aber ein idealisierter Kontaktpunkt angeben, dessen Bestimmung in einzelnen Fällen schwierig sein kann. Auf dieses Problem soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, da es nicht typisch für das Drehimpuls-Spiegel-Verfahren ist, sondern immer dann auftritt, wenn Berechnungen oder Kontrollen auf dem Drallsatz beruhen.

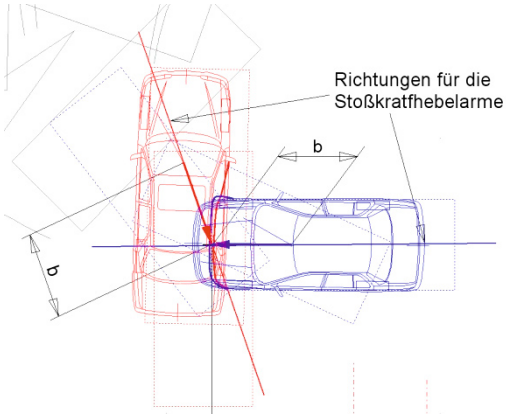


Bild A9-21 Stoßkrafthebelarme

Wie man das Drehimpuls-Spiegel-Verfahren anwendet, ist in **Bild A9-21** und **Bild A9-22** beschrieben. Zunächst werden die Schwerpunkte mit dem idealisierten Kontaktpunkt verbunden. Es sind das die Hebelarme an denen die Stoßkraft $S = F(t)dt$ angreift. Diese Linien sind im **Bild A9-22** zur besseren Anschauung etwas verlängert und sind als Wirkungslinien der Hebelarme zu verstehen. Die Hebelarme haben die Länge *b*.

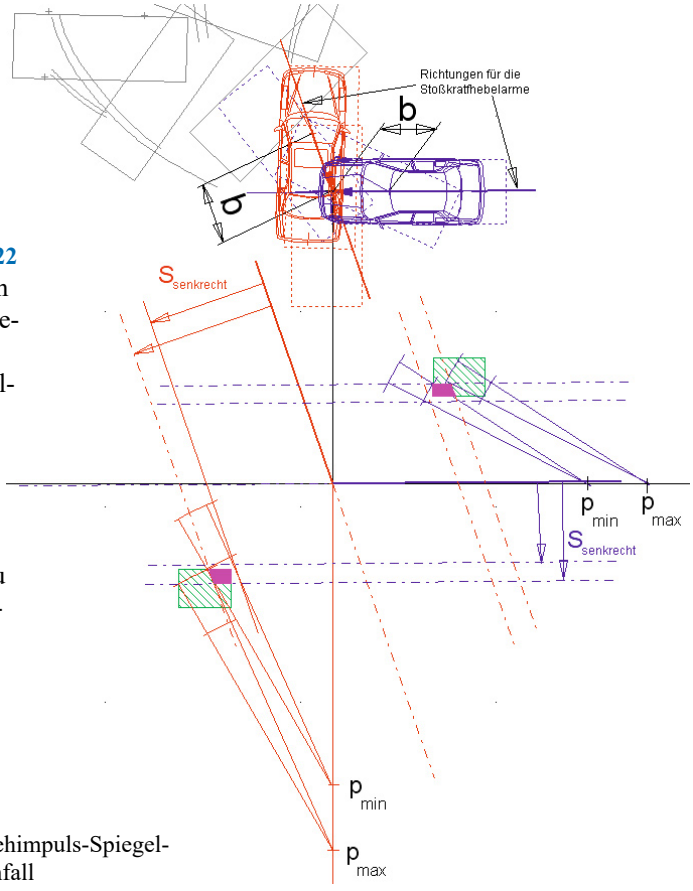


Bild A9-22 Anwendung des Drehimpuls-Spiegel-Verfahrens auf den Kreuzungsunfall

Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass an diesen Stoßkrafthebelarmen die dazu senkrechten (rechtwinkligen) Komponenten des Stoßantriebs wirken. Diese können berechnet werden aus: $S_{\text{senkrecht}} = \frac{J \cdot \Delta\dot{\psi}}{b}$.

Tabelle A9.4 Berechnungsdaten für die senkrechten Komponenten des Stoßantriebs

	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2
Fabrikat und Typ	Ford Sierra	Mitsubishi Lancer
Trägheitsmoment in kgm^2	1.688	1.460
Giergeschwindigkeit nach Kollision in Grad/s in 1/s	–365 +/– 37 –5,72 bis –7,01	–256 +/– 26 4,01 bis 4,92
Stoßkrafthebelarme *b* in m	1,58	1,44
Senkrechte Komponente von *S* in Ns	6.111 bis 7.489	4.066 bis 4.988

Die senkrechten Komponenten des Stoßantriebs werden nun an beliebiger Stelle der Richtungen der Stoßkrafthebelarme so angetragen, dass die Drehung der Fahrzeuge korrekt erzeugt wird. Durch diese senkrechten Komponenten werden Parallelen der Stoßkrafthebelarme gezeichnet und gespiegelt. Dadurch entstehen weitere Schnittflächen für die Lage des Stoßantriebs. Diese Felder lassen sich nun mit den Feldern aus dem Impuls-Spiegel-Verfahren überlagern.

Die Kollisionsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge erhält man nun, wenn man die Fächer der verschiedenen Auslaufimpulse an die Stoßimpulsfelder heranführt. Da die Flächen kleiner geworden sind, lassen sich auch zwangsläufig die Kollisionsgeschwindigkeiten in engeren Grenzen bestimmen.

Energie-Ring-Verfahren

Durch Anwendung des Impuls- und des Drallsatzes konnte das Ergebnis schon relativ eng eingegrenzt werden. Man kann daher nicht unbedingt erwarten, dass mit dem Energiesatz weitere Verbesserungen möglich sind. Da bei Gegenverkehrsunfällen die Energiebetrachtung eine größere Rolle spielt, wird das Energie-Ring-Verfahren bei der Erläuterung des zweiten Beispiels beschrieben.

4.3 Gegenverkehrsunfall

Impuls-Spiegel-Verfahren

Bei parallelen oder antiparallelen oder auch insgesamt bei sehr spitzwinkligen Kollisionen lässt sich allein mit Hilfe des Impulssatzes keine Lösung erarbeiten. Im Impuls-Spiegel-Verfahren äußert sich das so:

Für den Stoßimpuls erhält man kein abgeschlossenes Feld mehr, sondern ein mehr oder weniger lang gezogenes Band, das bei parallelen oder antiparallelen Kollisionen nicht mehr geschlossen ist. Bei dem gezeigten Fall ergibt sich ein Lösungsfeld für den Stoßimpuls, das so lang gestreckt ist, dass die Kollisionsgeschwindigkeiten nicht sinnvoll bestimmt werden können (**Bild A9-23**).

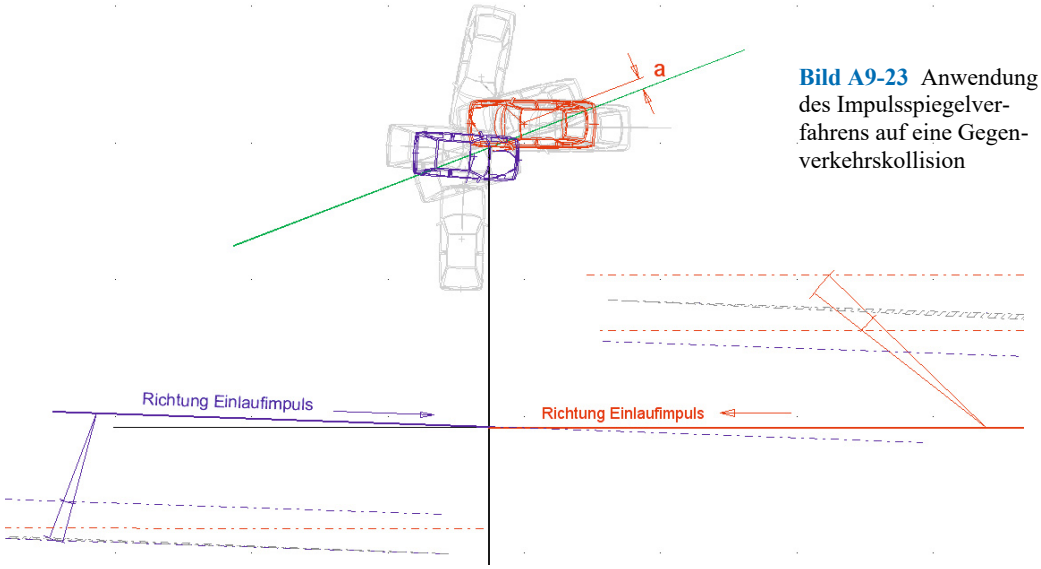


Bild A9-23 Anwendung des Impulsspiegelverfahrens auf eine Gegenverkehrskollision

Letztendlich zeigen diese Konstruktionen, dass bei Gegenverkehrsunfällen nur mit Hilfe des Impulssatzes keine befriedigenden Resultate erzielt werden können, auch wenn der Kollisionswinkel von 180 Grad verschieden ist. Bei der Berechnung von Kollisionsgeschwindigkeiten bei Unfällen im Gegenverkehr muss daher der Drall und/oder Energiesatz auf jeden Fall mitberücksichtigt werden.

Drehimpuls-Spiegel-Verfahren

Bild A9-25 zeigt die Anwendung des Drehimpuls-Spiegel-Verfahrens auf den Gegenverkehrsunfall. Auf die Beschreibung der einzelnen Schritte wird verzichtet, da sie der Vorgehensweise beim Kreuzungsunfall entsprechen. Man erkennt, dass eine Lösung erarbeitet werden kann. Allerdings muss der Kontaktpunkt sehr sorgfältig ermittelt werden (**Bild A9-24**).

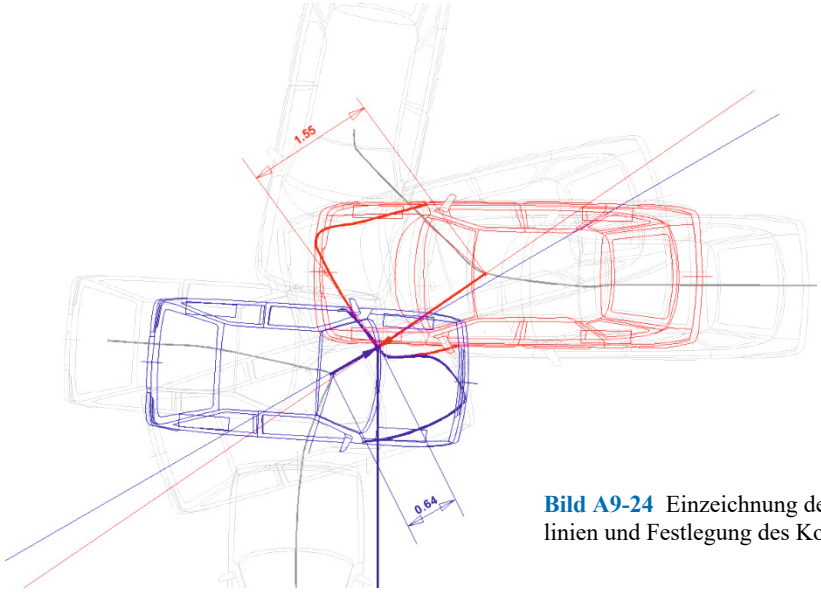


Bild A9-24 Einzeichnung der Verformungslinien und Festlegung des Kontaktspunkts

Tabelle A9.5 Berechnungsdaten für die senkrechten Komponenten des Stoßantriebs bei dem Beispiel der Gegenverkehrskollision

	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2
Fabrikat und Typ	Ford Scorpio	Mitsubishi Colt
Trägheitsmoment in kgm^2	2.274	1.061
Giergeschwindigkeit nach Kollision in Grad/s in 1/s	150 +/– 15 2,36 bis 2,88	90 +/– 9 1,41 bis 1,73
Stoßkrafthebelarme *b* in m	1,55	0,64
Senkr. Komp. von *S* in Ns	3.462 bis 4.225	2.338 bis 2.868

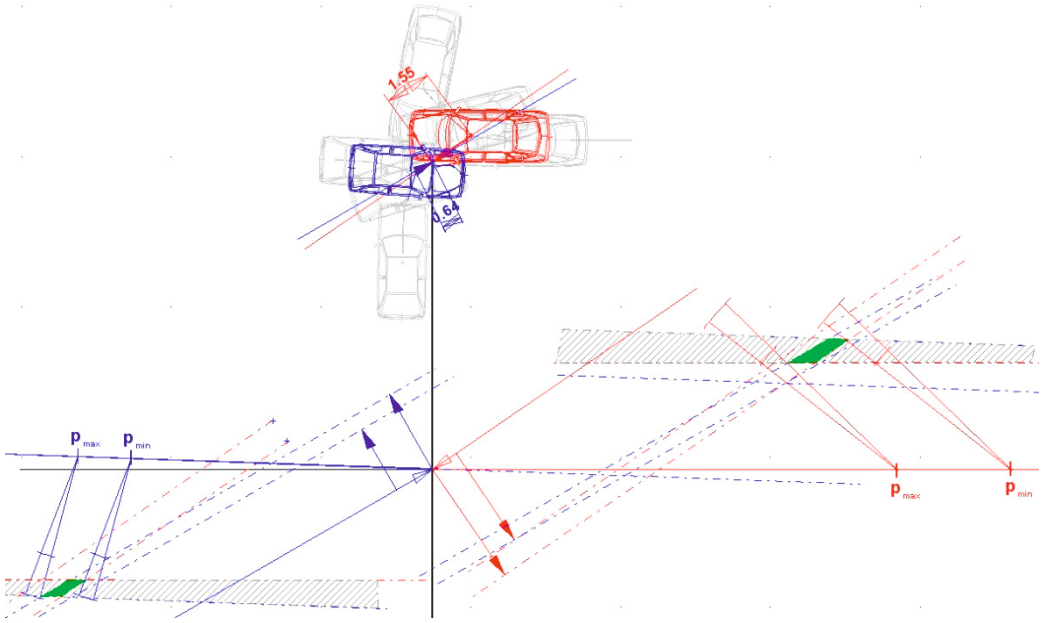


Bild A9-25 Anwendung des Drehimpuls-Spiegel-Verfahrens auf den Gegenverkehrsunfall

Energie-Ringverfahren

Es gelten folgende Grundgleichungen:

$$S = \sqrt{2 \cdot \Delta E \cdot m^*_{red} \cdot \frac{1+k}{1-k}} \tag{A9-39}$$

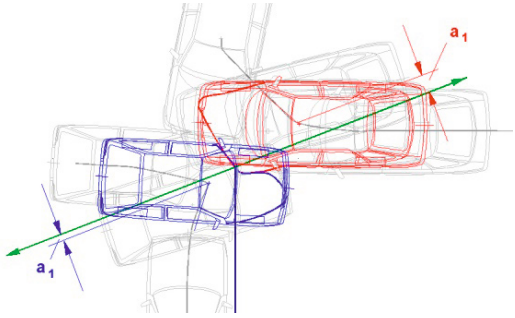
$$|v_1 - v_2| = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta E}{1-k^2} \cdot \frac{1}{m^*_{red}}} \tag{A9-40}$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}(m_1 \cdot EES_1^2 + m_2 \cdot EES_2^2) \tag{A9-41}$$

$$m^*_{red} = \frac{m_{red1} \cdot m_{red2}}{m_{red1} + m_{red2}} \tag{A9-42}$$

Die Gleichungen werden nach folgendem Schema angewendet: Man legt zunächst, wie beim Drehimpuls-Spiegel-Verfahren, einen idealisierten Kontaktpunkt fest. Zusätzlich wird eine mittlere Richtung des Stoßimpulses in das Impulsdiagramm eingezeichnet (**Bild A9-26**). Stellt man im weiteren Verlauf der Bearbeitung fest, dass die Richtung nicht durch das Stoßimpulsfeld läuft, so muss eine Korrektur durchgeführt werden. Bei Gegenverkehrsunfällen ist das aber im Allgemeinen nicht notwendig, da die Richtung des Stoßimpulses durch die Auslaufbewegungen der Fahrzeuge sehr stark eingegrenzt wird.

Als Nächstes bestimmt man die reduzierten Massen. Von Plankensteiner [5] wurde die dazu notwendige Formel (**A9-42**) abgeleitet. Ihre Herleitung ist unabhängig von der Art des Stoßes:



$$m_{red1} = m_1 \frac{i_1^2}{i_1^2 + a_1^2}$$

$$m_{red2} = m_2 \frac{i_2^2}{i_2^2 + a_2^2}$$

$$i^2 = \frac{J}{m}$$

Bild A9-26 Bestimmung der Abstände *a* zwischen mittlerem Stoßantrieb und Schwerpunkt

Eine weitere relevante Größe ist der Restitutionskoeffizient k. Dieser Faktor ist vom Unfalltyp abhängig und wird nach den Regeln festgelegt, die im Kapitel 4b erläutert werden. Außerdem müssen die EES-Werte für beide Fahrzeuge in sinnvollen Grenzen durch Vergleich mit Unfallversuchen oder durch Berechnung festgelegt werden. Nach Gl. (**A9-41**) kann die gesamte Deformationsenergie ermittelt werden.

Nun kann nach Gl. (**A9-39**) der maximale und minimale Stoßimpuls berechnet werden. Dann zeichnet man Kreisringe um den Kontaktpunkt, deren Radien der Größe der Stoßimpulse entsprechen (**Bild A9-27**).

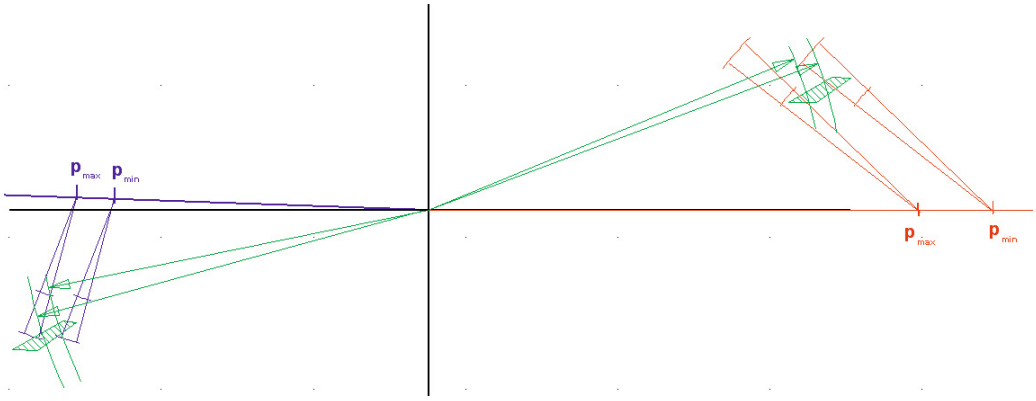


Bild A9-27 Kreisring nach Gl. (**A9-39**)

Bild A9-27 veranschaulicht, dass die Stoßimpulsfelder aus dem Drehimpuls-Spiegel-Verfahren auf dem Kreisring liegen. Dann ermittelt man die maximalen und minimalen Kollisionsgeschwindigkeiten durch Heranschieben der Auslaufimpulsfächer an das Lösungsfeld wie weiter oben erläutert.

Literatur

[1] Slibar, A.: Das Antriebsbalance-Diagramm als optimales Hilfsmittel der Unfallanalyse. der Verkehrsunfall 1973, Heft 2

[2] Schimmelpfennig et al.: Rhomboid-Schnittverfahren und Energiering-Verfahren. der Verkehrsunfall 11/1980 und 09/1982

[3] Campbell, K. L.: Energy Basis for Collision Severity. 3th International Conference on Occupant Protection, 1974

[4] Burg, H. Zeidler, F.: EES – Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkungen auf die Unfallforschung. der Verkehrsunfall 1980, Heft 4

[5] Plankensteiner: Mathematische Grundlagen für die Rekonstruktion von Fahrzeugstößen. Dissertation 1975, TU Graz

5 Rechnerische Verfahren

5.1 Zweidimensionaler exzentrischer Stoß

Ein zweidimensionaler Stoß muss ganz allgemein den exzentrischen Stoß zulassen. Für diesen Fall kommt an der Kontaktstelle ein weiterer bedeutsamer Effekt hinzu: Die Körper können an der Kontaktstelle während der Kollision aneinander haften bleiben (sticking case) oder sie können aneinander abgleiten (sliding case) oder es können sich Haften und Gleiten während der Kollision abwechseln.

Um diese Effekte beschreiben zu können, wird im Kontaktpunkt ein Koordinatensystem errichtet, dessen eine Achse als Berührtangente bezeichnet wird, die andere ist die Berührnormale. Der Ursprung des Koordinatensystems bezeichnet den Punkt, an dem die resultierende Kollisionskraft während der Stoßdauer (Stoßantrieb $S = \int F(t) \cdot dt$) angreift.

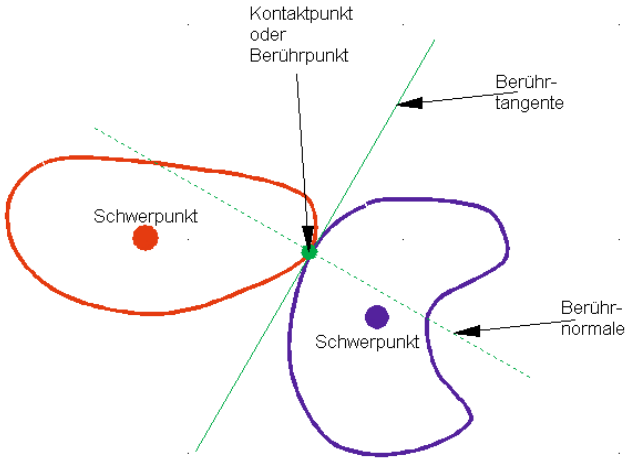


Bild A9-28 Erläuterung Kontaktpunkt

Wie schon weiter oben erwähnt, gelten die Stoßbetrachtungen nur für starre, nicht verformbare Körper. Tatsächlich sind die Fahrzeuge, mit denen man es bei der Unfallrekonstruktion zu tun hat, verformbar. Deshalb ist eine notwendige Zusatzannahme die, dass der Stoß dann angesetzt wird, wenn die Körper maximal ineinander eingedrungen sind.

Das macht die Bestimmung der Lage der Berührtangente teilweise schwierig, weil es bei den realen Unfällen nur selten so ist, dass die verformte Struktur exakt in einer Zeichnung in Draufsicht vorliegt oder erzeugt werden kann.

Gerade deshalb muss bei der Analyse einer Kollision viel Wert darauf gelegt werden, die Verformung der Fahrzeuge so genau wie möglich zu rekonstruieren.

Außerdem ist die Lage des Kontaktpunkts im verformten Bereich festzulegen, wofür es kein exaktes mathematisches Verfahren gibt. Hier muss unter Berücksichtigung der Struktursteifigkeiten in der Verformungszone eine vernünftige, ingenieurmäßig begründbare Annahme getroffen werden.

In dem Kontaktpunkt müssen möglicherweise an beiden Körpern Tangenten an die verformte Struktur angelegt werden. Die Winkelhalbierende beider Tangente ist dann die gesuchte Berührtangente.

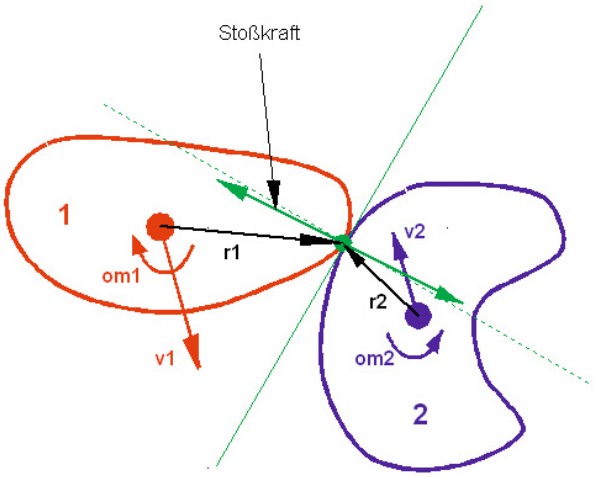


Bild A9-29 Geschwindigkeiten des Körpers

Die Körper stoßen im Bild links mit bestimmten linearen Geschwindigkeiten $v1$ und $v2$ (auch Schwerpunktsgeschwindigkeiten genannt) und bestimmten rotatorischen Geschwindigkeiten ω_1 und ω_2 (auch Giergeschwindigkeiten genannt) zusammen. Damit und unter Berücksichtigung der Massen der Körper können die Newton-Euler-Gleichungen angewandt werden. Diese können mit Hilfe der Zusatzbedingungen über Reibung in der Kontaktzone und über den Restitutionskoeffizient für eine geschlossene Lösung zur Berechnung aller Geschwindigkeiten und Kräfte verknüpft werden. Zu beachten sind die Newton'schen Grundgleichungen der Mechanik:

Jeder Körper bleibt in Ruhe oder gleichförmiger geradliniger Bewegung, wenn er nicht durch äußere Kräfte gezwungen wird, diesen Zustand zu ändern. Die Änderung der Bewegungsgröße ist proportional der aufgeprägten bewegenden Kraft und geschieht in Richtung der geraden Linie, in welcher die aufgeprägte Kraft wirkt.

Zu jeder Einwirkung gibt es immer eine entgegengesetzte und gleiche Gegenwirkung, oder: Die wechselseitigen Beeinflussungen zweier Körper aufeinander sind immer gleich und entgegengerichtet. Bei der Stoßhypothese wird angenommen, dass der Kraftaustausch während der Kollision in einer unendlich kurzen Zeit erfolgt. In diesem Fall können alle äußeren Kräfte, die außer der Kollisionskraft noch auf den Körper wirken, während der Kollisionsdauer vernachlässigt werden.

Dann können durch einmalige Anwendung von Impulssatz und Drehimpulssatz in einer geschlossenen Lösung die Bewegungsänderungen der Körper während der Kollision berechnet werden: Der Impulssatz lautet:

$$\int F(t)dt = m\int a(t)\cdot dt = S = p - p' \qquad \text{(A9-43)}$$

Das Integral a(t)dt wird nicht gelöst, sondern als Stoßantrieb $S = p - p' = m\,\Delta v$ aufgefasst.

Der **Drehimpulssatz** gilt dann, wenn die Stoßkraft exzentrisch an dem Körper angreift. Dabei ist der Abstand des Kontaktpunkts vom Schwerpunkt bedeutsam. Er wird durch den Ortsvektor r beschrieben.

$$\vec{r}\times S = J\cdot\Delta\vec{\omega} \qquad \text{(A9-44)}$$

oder, wenn r und S senkrecht zueinander stehen:

$$r\cdot S = J\cdot\Delta\omega \qquad \text{(A9-45)}$$

Darin sind J das Trägheitsmoment des Körpers und $\Delta\omega$ die Änderung der Drehgeschwindigkeit des Körpers während der Kollision.

5.2 Dreidimensionaler exzentrischer Stoß

Beim dreidimensionalen Stoß gilt alles, was zum zweidimensionalen Stoß gesagt wurde in gleicher Weise. Lediglich wird die räumliche Ausdehnung der Körper berücksichtigt. Dadurch wird die Berührtangente zur Berührebene. Es ist ein zusätzlicher Winkel zu berücksichtigen, unter dem diese Berührebene im Raum orientiert ist.

Was sich prinzipiell unkompliziert anhört, ist in Wirklichkeit alles andere als unkompliziert. Das fängt damit an, dass nun die Trägheitsmomente um alle drei Hautachsen des Fahrzeugs bekannt sein müssen und kann damit aufhören, dass die Auswirkung der Kollisionskraft auf alle beweglichen oder beweglich gelagerten Einzelteile des Fahrzeugs berücksichtigt werden muss. Ein anschauliches Beispiel ist der Anprall eines Pkw gegen das Rad eines großen Lkw.

5.3 Vorwärtsrechnung

5.3.1 Physikalische Grundlagen

In der Unfallrekonstruktion ist in Europa die Stoßrechnung nach Impuls- und Drallerhaltung das am weitesten verbreitete und angewendete Berechnungsverfahren. Die Stoßmodelle beschreiben den Ablauf einer Kollision zwischen zwei Fahrzeugen (Körpern) mit mathematischen Formeln, um diesen physikalischen Vorgang berechenbar zu machen. Die verschiedenen Stoßmodelle gehen je nach Detaillierungsgrad und Art der Nachbildung von unterschiedlichen Eingabeparametern aus und von unterschiedlichen erforderlichen Informationen über die beteiligten Fahrzeuge. Jedes Stoßmodell hat auf Grund der getroffenen Annahmen zur Modellerstellung Einschränkungen, wodurch Vereinfachungen bei der Modellierung des realen Stoßvorgangs getroffen werden.

Bei der Impulsrechnung wird der Verlauf der Stoßkraft über der Zeit mathematisch nicht aufgelöst. Der tatsächliche Verlauf der Stoßkraft F über der Zeit ist für verschiedene Stoßarten im **Bild A9-30** prinzipiell gezeigt und würde sich wie folgt berechnen:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} F(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} m\cdot a(t)dt$$

Lässt man aber die Stoßzeit gegen Null gehen (Stoßhypothese), dann kann das Integral als Stoßantrieb $S = m \cdot \Delta v$ berechnet werden.

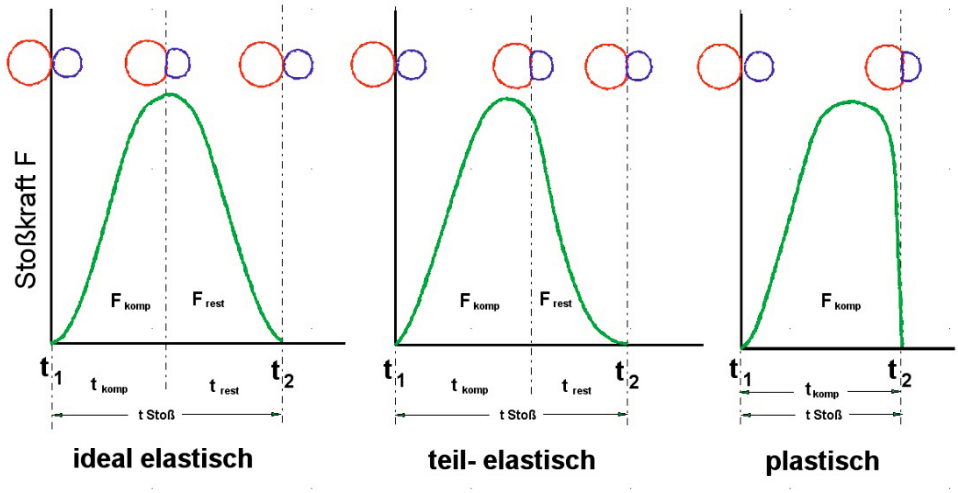


Bild A9-30 Verlauf der Kontaktkraft zeitlich aufgelöst für verschiedene Stoßarten. Für die Stoßrechnung ist das Ende der Kompressionsphase der zeitliche Referenzpunkt.

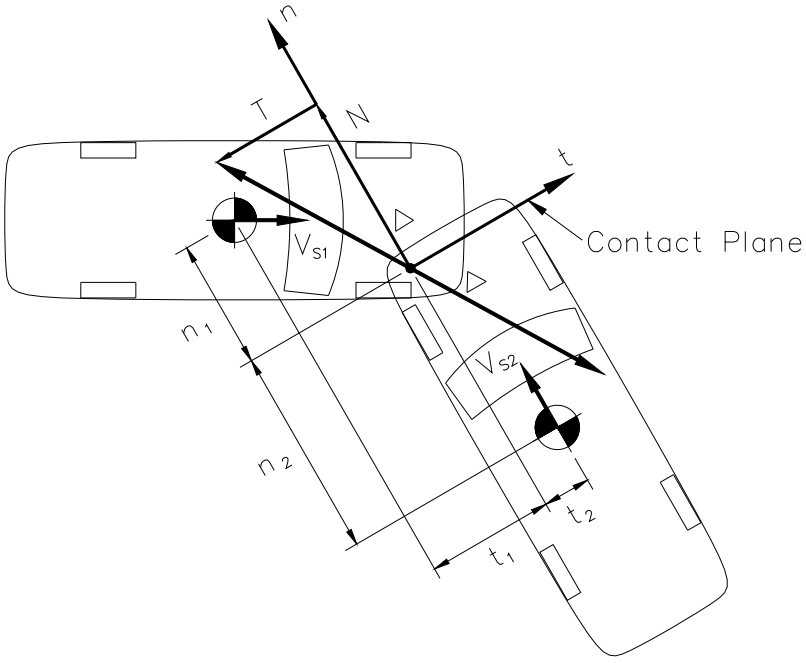


Bild A9-31 Koordinatensystem für die Stoßrechnung

5.3.2 Stoßrechnung nach der Impuls- und Drallerhaltung

Dieses Stoßmodell basiert auf den Erhaltungssätzen für Impuls und Drall der beiden Fahrzeuge vor und nach der Kollision. Im zweidimensionalen Fall liefert die Impulserhaltung 4 Gleichungen und die Drallerhaltung 2 Gleichungen. Somit entsteht ein Gleichungssystem mit 6 Gleichungen und 8 Unbekannten. Es sind 2 Zusatzgleichungen erforderlich. Diese werden durch die Stoßhypothese geliefert, wodurch das Gleichungssystem lösbar wird. Im dreidimensionalen Fall liefert die Impulserhaltung 6 Gleichungen und die Drallerhaltung ebenfalls 6 Gleichungen. Somit entsteht ein Gleichungssystem mit 12 Gleichungen und 15 Unbekannten. Zur Lösung des Gleichungssystems sind hier 3 Zusatzgleichungen erforderlich, die ebenfalls aus der Stoßhypothese folgen. Für die zweidimensionale Betrachtungsweise gelten die folgenden Gleichungen:

5.3.3 Impulserhaltung

$$m_1(V'_{Tcg1} - V_{Tcg1}) = T \tag{A9-46}$$

$$m_1(V'_{Ncg1} - V_{Ncg1}) = N \tag{A9-47}$$

$$\mathrm{m}_2(V'_{Tcg2} - V_{Tcg2}) = -T \tag{A9-48}$$

$$m_2(V'_{Ncg2} - V_{Ncg2}) = -N \tag{A9-49}$$

5.3.4 Drallerhaltung

$$I_{1z}(\omega'_{1z} - \omega_{1z}) = T \cdot n_1 - N \cdot t_1 \tag{A9-50}$$

$$I_{2z}(\omega'_{2z} - \omega_{2z}) = T \cdot n_2 + N \cdot t_2 \tag{A9-51}$$

5.3.5 Kontaktpunktgeschwindigkeiten

Bei der Untersuchung des Stoßvorgangs sind die Relativgeschwindigkeiten an der Stoßstelle am Ende der Kompressionsphase in Tangential- und in Normalrichtung von Bedeutung. Diese können wie folgt berechnet werden:

$$V'_T = V_T + c_1 T - c_3 N \tag{A9-52}$$

$$V'_N = V_N - c_3 T + c_2 N \tag{A9-53}$$

$$c_1 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{n_1^2}{I_{1z}} + \frac{n_2^2}{I_{2z}} \tag{A9-54}$$

$$c_2 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{t_1^2}{I_{1z}} + \frac{t_2^2}{I_{2z}} \tag{A9-55}$$

$$c_3 = \frac{t_1 n_1}{I_{1z}} + \frac{t_2 n_2}{I_{2z}} \tag{A9-56}$$

5.3.6 Zusatzgleichungen, Stoßhypothesen

5.3.7 Restitution, Stoßziffer

Über die Stoßziffer kann der elastische Anteil in der Kollision vorgegeben werden. Die Stoßziffer kann entweder über das Verhältnis der Stoßantriebe in der Restitutions- und Kompressionsphase (Poisson) vorgegeben werden oder durch das Verhältnis der Kontaktpunktsgeschwindigkeiten in Normalenrichtung nach und vor der Kollision (Newton). Beide Darstellungen sind einander äquivalent.

$$\varepsilon = \frac{\vec{S}_{\text{rest}}}{\vec{S}_{\text{komp}}} \tag{A9-57}$$

$$\vec{S} = \vec{S}_{\text{komp}} + \vec{S}_{\text{rest}} = \vec{S}_{\text{komp}} \cdot (1 + \varepsilon) \tag{A9-58}$$

5.3.8 Kollision ohne Abgleiten

Die Kontaktpunkte erreichen mit dem Ende der Kompressionsphase eine gemeinsame Geschwindigkeit, d. h., die Relativgeschwindigkeiten in Normal- und Tangentialrichtung sind dort Null.

$$V_T^{'} = 0 \tag{A9-59}$$

$$V_N^{'} = 0 \tag{A9-60}$$

5.3.9 Abgleitkollision

Bei Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen treten Abgleitvorgänge immer dann auf bzw. spricht man von Abgleitkollisionen, wenn die Kontaktpunkte der beiden Fahrzeuge während des Stoßvorgangs keine gemeinsame Geschwindigkeit erreichen. Hierbei können zwei Fälle unterschieden werden:

- Am Ende der Kompressionsphase wird eine gemeinsame Geschwindigkeit in Normalrichtung zur Berührebene erreicht, nicht aber in Tangentialrichtung.
- Eine gemeinsame Geschwindigkeit am Ende der Kompressionsphase wird weder in Normal- noch in Tangentialrichtung zur Berührebene erreicht (Strukturversagen).

Der Grund für das nicht Erreichen einer gemeinsamen Geschwindigkeit der Stoßpunkte während der Kollision kann eine nicht ausreichende Reibung in der Berührebene sein. Es kann aber auch sein, dass die Struktur in der Kontaktzone zu schwach ist und reißt oder bricht, so dass der Stoß schon vor Erreichen einer gemeinsamen Geschwindigkeit beendet ist (Strukturversagen); hierbei kann man auch von einer Art Abgleitkollision sprechen.

$$V_T^{'} = 0 \tag{A9-61}$$

$$T = \pm \mu \cdot N \tag{A9-62}$$

5.3.10 Reibungstheorie

Reibung wird mit dem Gesetz von Coulomb beschrieben, wonach die Reibkraft gleich der Normalkraft multipliziert mit dem Reibungskoeffizienten ist. Das scheint ein ziemlich einfaches Gesetz zu sein. Bei näherem Hinsehen ist es aber eine höchst komplizierte Sache, wenn Kollisionen von Körpern untersucht werden sollen. Grundsätzlich sind die folgenden Fälle zu unterscheiden:

Coulomb'sche Reibung	
Dynamische Reibung (Kollision mit Abgleiten)	Die Körper gleiten an der Kontaktstelle. Es existiert eine genau definierte Reibkraft $F_R = \mu \cdot F_N$, die entgegen der Relativgeschwindigkeit der Kontaktpunkte vor Kollision orientiert ist.
Statische Reibung (Kollision ohne Abgleiten)	*a) Stabile statische Reibung:* Die Reibkraft hat eine Richtung, die entgegen der Relativgeschwindigkeit der Kontaktpunkte vor der Kollision orientiert ist. Der Betrag der Reibkraft ist nicht definiert, sondern folgt aus der Berechnung, ist aber in dem Bereich: $0 \le F_R \le \mu \cdot F_N$. Es tritt kein Gleiten in der Kontaktfläche auf, weil die Reibkraft groß genug ist, die Körper während des Stoßes an der Kontaktstelle festzuhalten. *b) Instabile statische Reibung:* Die Richtung der Reibkraft ist nicht eindeutig definiert, sie hängt von verschiedenen Randbedingungen (äußeren und inneren Kräften des Systems) ab, es gilt aber $0 \le F_R \le \mu \cdot F_N$. Die Richtung der Reibkraft kann sich während des Stoßes (sogar mehrfach) verändern.

In der Impulsrechnung ist der Reibungsfaktor eine integrale Größe, die alle Abhängigkeiten während der Stoßdauer einschließt, weil die Stoßdauer gegen 0 geht. Es ist somit auch gleichgültig, ob sich Gleiten und Haften während der Stoßdauer abwechseln oder ob sich die Richtung der Reibkraft während der Stoßdauer ändert. Der reale Vorgang kann durch die Wahl des (gegebenenfalls resultierenden) Reibwertes beschrieben werden. Lediglich taucht das Problem der richtigen Festlegung der Eindringung der Fahrzeuge, des Kontaktpunkts und der Berührebene auf. Dafür gibt es aber Regeln aus der Nachrechnung von Versuchen, die sich seit vielen Jahren bewährt und als richtig erwiesen haben.

Bei der (hier nicht besprochenen) Kraftrechnung sind dagegen der zeitliche Verlauf Normal- und Tangentialkraft und gegebenenfalls die Abhängigkeit der Reibung von der Relativgeschwindigkeit bedeutsam. Deshalb muss dort ein plausibler Ansatz gefunden bzw. berücksichtigt werden.

5.3.11 Festlegung der Berührtangente bzw. -ebene, des Reibungsfaktors und der Stoßziffer in der Praxis

Der Stoßpunkt ist mit idealisierten Annahmen entsprechend der Stoßhypothese verbunden. Tatsächlich sind unendlich viele Kräfte vorhanden, die an unendlich vielen Punkten in der Kontaktfläche zwischen den Fahrzeugen wechselwirken. Als Näherung dafür stellt man sich einen resultierenden Kraftvektor vor, der an einem Punkt, dem Stoßpunkt angreift. Nach dem Prinzip „Kraft = Gegenkraft" wirkt der eine Kraftvektor auf das eine Fahrzeug, der andere auf das andere Fahrzeug. Es ist durchaus schwierig und diskussionsfähig, die richtige Lage des Stoßpunkts zu finden. Zu beachten ist auch noch, dass bei der Anwendung der Stoßhypothese

die Stoßdauer gegen Null geht, was bei Kollisionen mit Abgleiten eine zusätzliche Schwierigkeit bei der Festlegung des Stoßpunkts bedeutet. Unter Umständen müssen deshalb mehrere Stoßvorgänge berechnet werden, um einen zeitlich ausgedehnten Abgleitvorgang richtig zu beschreiben.

Wenn man bei der Rekonstruktion so verfährt wie oben geschildert, dann liefert bei genauer Arbeit die relative Kollisionsposition eine Stellung der Fahrzeuge, wie sie nach Ablauf der Kompressionsdauer erreicht war. Während der Kompressionsdauer kommt es zu Lageänderungen der Fahrzeuge im Vergleich zu den Positionen bei Erstberührung. Sowohl translatorische Lageänderungen sind zu beachten wie auch rotatorische. Die translatorischen Lageänderungen in der ursprünglichen Fahrtrichtung werden meist zutreffend zu berücksichtigen sein, weil man sich an Spurenknicken oder an Kratzspuren orientieren kann. Die senkrecht zur Fahrtrichtung eintretenden Lageänderungen sind schwieriger zu beurteilen. Auch die Drehung der Fahrzeuge während der Kompressionsphase ist nur in Grenzen zu beurteilen, weil diese von Fahrzeug- und Kollisionsparametern abhängt, davon, ob und wie lange Räder der Fahrzeuge in der Luft sind usw. Bisher gibt es keine allgemein anwendbaren Regeln dafür, es wäre das aber ein lohnendes Forschungsfeld. Nach einem Vorschlag von Becke anlässlich der Nachrechnung eines Versuchs an der TU-Berlin im Jahr 1984 kann diese Stellung der Fahrzeuge am Ende der Kompressionsphase als Kompensationsstellung bezeichnet werden.

An einem Unfallversuch von AREC 1999 wird der Sachverhalt erläutert. Das **Bild A9-32** zeigt die Fahrzeuge bei Berührbeginn, das **Bild A9-33** zeigt sie bei maximaler dynamischer Eindringung. Der von unten nach oben fahrende Ford Sierra wurde verschoben und gedreht. Der von rechts nach links fahrende Mitsubishi Lancer behielt seine Fahrtrichtung während der Kompressionsphase weitgehend bei.

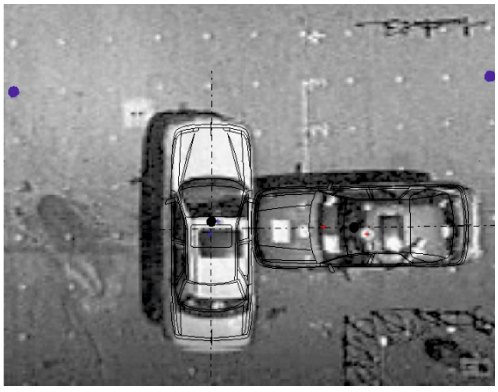


Bild A9-32 Berührbeginn

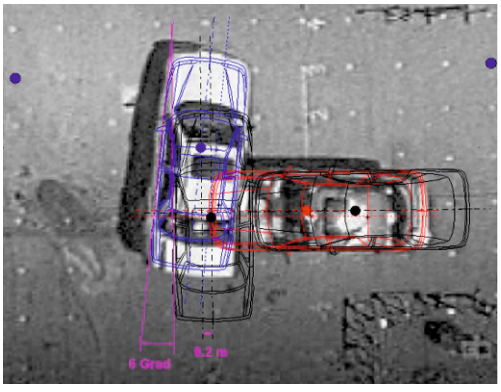


Bild A9-33 Ende der Kompressionsphase. Verschiebung des Ford 0,2 m, Drehung 6 Grad

Eine hinreichend exakte und begründbare Vorgehensweise ist es, die Schadenlinien in beide Fahrzeuge einzuzeichnen (**Bild A9-34**). Danach werden die Fahrzeuge entsprechend der Schadenlinien zusammen geschoben (**Bild A9-35**).

Dabei ist zu beachten, dass alleine mit den verbleibenden Verformungen noch nicht der Zustand am Ende der Kompressionsphase erreicht ist, weshalb die Eindringung um den Rückfederungsanteil zu erhöhen ist. Eine Abschätzung kann durch Vergleich mit passenden Versuchsauswertungen erfolgen.

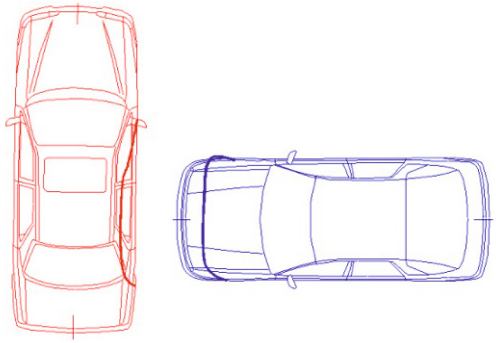


Bild A9-34 Fahrzeuge ungefähr positioniert, Schadenlinien eingezeichnet

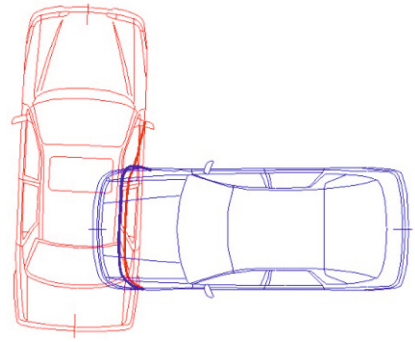


Bild A9-35 Fahrzeuge etwa 20 % mehr zusammen geschoben, als es der statischen Eindringung entspricht

Dann wird überlegt, wo der Angriffspunkt der resultierenden Stoßkraft sein wird.

Die beiden schwarzen Pfeile zeigen auf die besonders harten Stellen, an denen hohe Kräfte übertragen werden können (**Bild A9-36**).

Der Stoßangriffspunkt könnte dann näherungsweise in der Mitte der beiden harten Stellen angenommen werden (**Bild A9-37**).

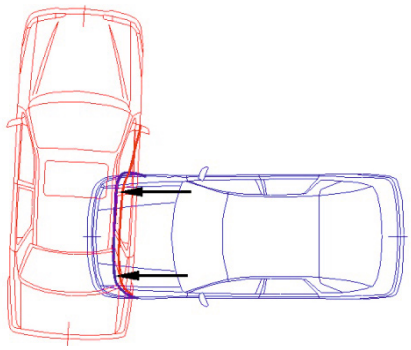


Bild A9-36 Hohe Kraftübertragung an den harten Stellen

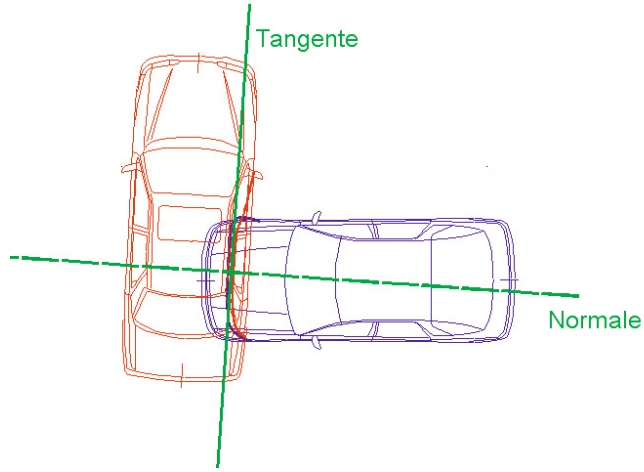


Bild A9-37 Festlegung von Berührtangente bzw. -ebene und Berührnormale

In Rekonstruktions-Programmen wird oft der Flächenschwerpunkt der überdeckten Fläche der eingedrungenen Fahrzeuge als wahrscheinliche Lage des Stoßangriffspunktes berechnet und verwendet. Diese Art der Berechnung ist verbunden mit der Annahme einer homogenen Kraftverteilung in der Kontaktzone. In den meisten Fällen ergibt diese Annahme auch ein sehr plausibles Ergebnis.

Ist der Stoßangriffspunkt festgelegt, so müssen die Richtung der Berührtangente und die mittlere Reibung in der Kontaktzone festgelegt werden.

Die Richtung der Berührtangente (oder der Berührebene beim dreidimensionalen Stoß) kann an der zuvor eingezeichneten Schadenlinie orientiert werden. Sie ist die Tangente an diese Schadenlinie am Stoßpunkt.

Die mittlere Reibung in der Kontaktzone ist der Wert, ab dem Abgleiten in der Kontaktzone eintritt. Der typisch anzunehmende Reibungs-Grenzwert liegt bei $\mu = 0{,}5 +/- 0{,}1$.

5.3.12 Zerreißung von Strukturen

Es kann sein, dass während einer Kollision Teile von Fahrzeugen abgerissen werden. Um solche Vorgänge korrekt zu berechnen, müssten die Körper aus mehreren Teilkörpern bestehen. Die Teile, die abreißen können, müssten so modelliert sein, dass dies möglich ist. Derzeit sind die gängigen Fahrzeugmodelle noch nicht so detailliert, dass eine solche Berechnung möglich ist.

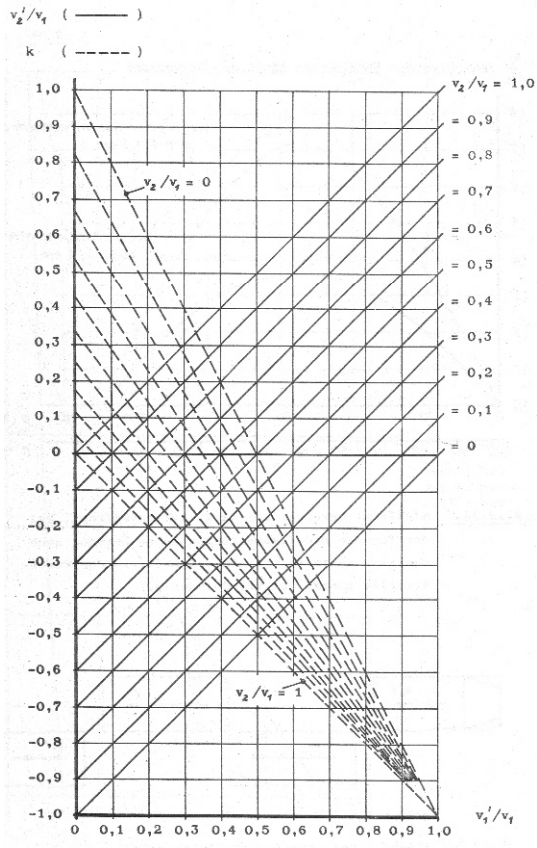


Bild A9-38 Geschwindigkeitsverhältnisse und Werte der Stoßzahl *k* beim streifenden Zusammenstoß von gegeneinander fahrenden Wagen gleicher Masse

„Die Linien für *k*, abhängig von v_1' / v_1, bei verschiedenem v_2 / v_1 sind in dem **Bild A9-38** (gestrichelt) eingezeichnet. Es zeigt sich, dass hier auch negative Werte von *k* auftreten. Diese zunächst überraschende Tatsache (weil bei den klassischen Stoßvorgängen k zwischen 0 und +1 liegt) lässt sich folgendermaßen erklären:
$k = -1$: Berührung (gerade noch) nicht vorhanden, Wagen fahren ohne Geschwindigkeitsänderung und keinen (oder unbedeutenden) Beschädigungen aneinander vorbei.
k zwischen –1 und 0: Streifender Zusammenstoß; Verminderung der Geschwindigkeiten. Je mehr k gegen 0 geht, desto heftiger die Berührung, desto größer der Impulsaustausch und desto stärkere Verminderung der Geschwindigkeiten. Aus Gleichung (87) ist ersichtlich, dass Wagen 2 zum Stillstand kommen kann ($v_2' = 0$), wenn seine Anfangsgeschwindigkeit $v_2 = v_1 - v_1$ ist, gleich große Massen vorausgesetzt; ist v_2 kleiner, dann fährt Wagen 2 nach dem Streifen rückwärts, aber langsamer als Wagen 1 vorwärts fährt.
$k = 0$: Der „unelastische Stoß“ der Mechanik. Beide Wagen erleiden den maximalen Energieverlust und haben an ihren Berührungsstellen eine gemeinsame Geschwindigkeit *u*, deren Größe und Richtung vom Verhältnis der Anfahrgeschwindigkeiten abhängt.
k zwischen 0 und +1: Teilelastischer Stoß; kommt bei Personenwagen höchstens in Spuren (*k* kaum größer als 0) vor.“

Eine hilfsweise Berücksichtigung dieser Effekte kann derzeit nur durch Annahme einer negativen Stoßzahl erfolgen. Eine negative Stoßzahl ist physikalisch nicht korrekt, trotzdem kann mit dieser Hilfsgröße eine Berechnung erfolgen.

Erstmals wurde dieses Verfahren, nach Kenntnis der Verfasser, in der Dissertation von *Hagen* [22] im Jahr 1965 vorgeschlagen. Aus dessen Untersuchungen resultieren die Definitionen, die im Kasten auf der vorhergehenden Seite dargestellt sind.

Von *Plankensteiner* wird in seiner Dissertation aus dem Jahre 1975 das Thema der negativen Stoßzahl wieder aufgegriffen [23] und Folgendes angemerkt:

> „Beim Zusammenstoß zweier Kraftfahrzeuge trifft man gelegentlich auch eine weitere Stoßform an, die man am treffendsten als Durchschuss bezeichnet. Wenn nämlich ein Geschoss gegen eine Fensterscheibe stößt, so wird der Stoß vorzeitig beendet, das Geschoss durchdringt das Hindernis. Anders ausgedrückt war in diesem Beispiel die Scheibe nicht in der Lage, die Stoßenergie voll aufzunehmen, der Stoß endet innerhalb der ersten Stoßphase, wobei die Stoßzahl negativ ist:
>
> Durchschuss: $-1 \le \varepsilon \le 0$.
>
> Bei Fahrzeugstößen tritt diese Stoßform beispielsweise dann auf, wenn einer der Stoßpartner entzwei bricht oder, wenn ein Pkw unter der Deichsel eines Lkw-Zuges hindurch fährt und dabei sein Dach verliert.“

Wiederum etwa 10 Jahre später haben sich *Schimmelpfennig et al*. erneut dem Problem der Unfälle zugewendet, die nur mit Hilfe eines negativen Stoßfaktors zu rekonstruieren sind. In dem Beitrag [24] wird vorgeschlagen, die Stoßzahl auf den Bereich $-1 < k < 1$ zu erweitern und dann zur Kennzeichnung dieser Erweiterung den Begriff „Geschwindigkeits-Differenz-Faktor“ zu verwenden. In der Veröffentlichung werden auch Hinweise zur Eingrenzung des k-Faktors in Abhängigkeit von bestimmten Unfalltypen gegeben. Die Auswertung der zu diesem Zeitpunkt bekannten Versuche führte zu dem in **Bild A9-39** gezeigten Zusammenhang. Die Untersuchung der damals vorliegenden Versuche mit Abgleiten lieferte sogar erste Erkenntnisse zu der Frage, ab welcher Überdeckung und Differenzgeschwindigkeit vor Kollision ein negativer Stoßfaktor zu vermuten ist (**Bild A9-40**).

Besonders wichtig an dieser Publikation ist der Hinweis, dass die Trenngeschwindigkeit der Fahrzeuge nach Kollision für ein großes Kollektiv von Fahrzeugstößen annähernd konstant ist (**Bild A9-39**).

Bei den Vorschlägen in den drei Veröffentlichungen wird der reale Stoßvorgang immer auf den geraden zentralen Stoß bzw. die Rückführung des zweidimensionalen Stoßes auf den geraden zentralen Stoß durch Massenreduktion durchgeführt. Diese Vereinfachung war sinnvoll in der Zeit, als die Kollisionsanalyse noch manuell oder überwiegend manuell durchgeführt wurde. Mit zunehmendem Einsatz der Computer konnten zwei- und dreidimensionale Berechnungsmodelle zum Einsatz gebracht werden. Dabei hat die Stoßzahl eine etwas andere mathematische Definition erhalten als es bei der eindimensionalen Berechnung der Fall ist, die Vorgabe eines negativen Stoßfaktors führt hierbei zu einer Reduktion des Stoßantriebs. Insgesamt wird die negative Stoßzahl aber ein Übergangsproblem sein, bis die Berechnungsmodelle eine physikalisch korrekte Beschreibung erlauben. Bis dahin könnte für die bisher übliche zwei- und dreidimensionale Stoßberechnung auch der Begriff „Stoßantriebs-Reduktions-Faktor (SRF)“ verwendet werden ($0 > \mathrm{SRF} \ge -1$), sofern ein negativer Stoßfaktor zur Berechnung erforderlich wird.

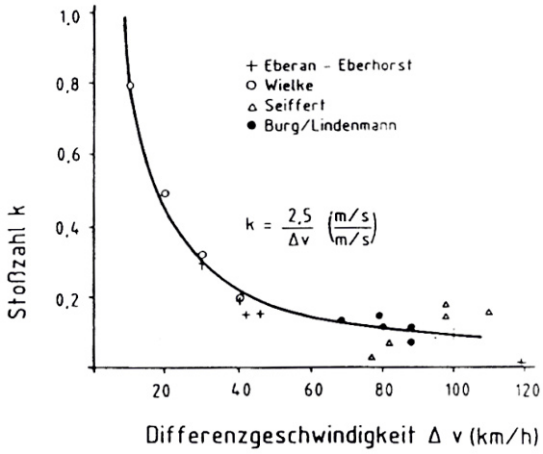


Bild A9-39 Abhängigkeit der Stoßzahl von der Differenzgeschwindigkeit

Bei Fällen ohne Strukturversagen können die Erkenntnisse nach **Bild A9-39** zur Eingrenzung der Stoßzahl problemlos verwendet werden. Bei den Fällen mit Strukturversagen und negativer Stoßzahl gibt es noch keine Regeln über deren konkreten Wert in Abhängigkeit von irgendwelchen anderen Kennzahlen. Somit kann der Wert der negativen Stoßzahl nur indirekt aus den Auslaufbedingungen und den EES-Werten sowie weiteren Daten eingegrenzt werden.

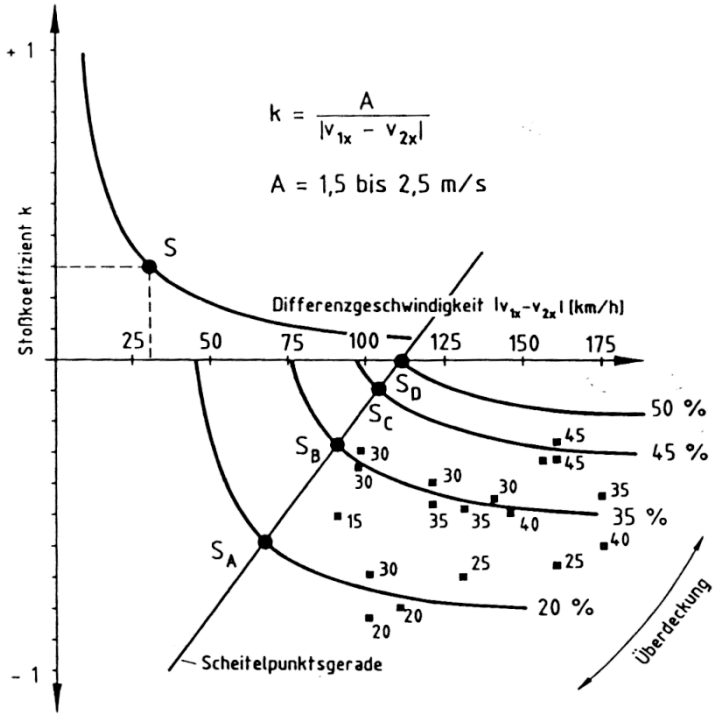


Bild A9-40 Abhängigkeit der kritischen Geschwindigkeit (ab welcher die Stoßzahl negativ werden kann) von dem Überdeckungsgrad

Zur Verdeutlichung wird darauf hingewiesen, dass eine negative Stoßzahl bei den Programmen PC-Crash und Carat, die mit dem Kudlich-Slibar-Verfahren arbeiten, dann ihre Berechtigung hat, wenn es tatsächlich und nachweisbar zu einem Strukturversagen gekommen ist. Zwei Beispiele werden nachstehend gezeigt.



Bild A9-41 Vorderrad abgerissen

Bei einem Pkw wurde das linke Vorderrad aus der Aufhängung herausgerissen. Zur Rekonstruktion wird die Berührtangente etwa senkrecht zur Fahrzeuglängsachse gestellt, der SRF (Stoßantriebs-Reduktions-Faktor) wird negativ gewählt (negative Stoßzahl) und zwar so, dass der Einstufungsbereich für die EES-Werte bei ausreichend genauer Simulation des Auslaufverhaltens der Fahrzeuge zutreffend berechnet wird.



Bild A9-42 Maueranprall

Wird eine Mauer, ein Zaun oder ein anderes Hindernis angefahren und brechen diese partiell, dann wird die Berührtangente entsprechend der Kontaktfläche eingestellt, der SRF wird negativ gewählt und zwar so, dass der Einstufungsbereich für den EES-Wert und das Auslaufverhalten der Fahrzeuge zutreffend berechnet werden.

Ist ein Strukturversagen nicht vorhanden, dann hat es sich um einen Fall mit Abgleiten (dynamische Reibung) gehandelt, bei dem die Berührtangente bzw. Berührebene und der Reibwert entsprechend dem Schadenbild einzustellen sind. Das folgende Beispiel zeigt einen Fall mit Abgleiten, bei dem eine negative Stoßzahl keine Anwendung finden kann.



Bild A9-43 Fahrzeug 1



Bild A9-44 Fahrzeug 2

Nachdem an den Fahrzeugen nichts abgerissen ist, besteht kein Raum für die Annahme eines negativen Stoßfaktors. Es ist auch nicht zu vermuten, dass das Abgleiten zeitweise unterbrochen wurde. Somit handelt es sich um einen Fall mit Abgleiten, der grundsätzlich ohne Probleme zu berechnen ist. Möglicherweise könnte der Reibwert wegen des hohen Kraftaustauschs an den Rädern etwas höher sein als der Standardbereich 0,5 +/– 0,1.

5.3.13 Schlussfolgerung

In dem Modell von Kudlich-Slibar sind die beiden Reibungsfälle für dynamische und statische Reibung (Fälle mit und ohne Abgleiten) exakt vorhanden. Zur Durchführung der Stoßrechnung müssen durch den Anwender der Stoßpunkt, die Lage der Berührebene, die an der Kontaktfläche vorherrschende Reibung und die Stoßzahl bestimmt werden. Da diese Festlegungen das Ergebnis der Berechnung ganz bedeutsam beeinflussen, ist eine exakte Kenntnis der Zusammenhänge erforderlich. Sich diese Kenntnisse zu verschaffen ist eine originäre Aufgabe der Sachverständigen für Verkehrsunfallrekonstruktion.

5.4 Kontrollgrößen

Nachdem mit einem der oben genannten Verfahren alle fehlenden Geschwindigkeiten berechnet wurden, ist es für die Kollisionsanalyse notwendig weitere Größen zu berechnen. Manche Größen sind für die Kollisionsanalyse nicht unbedingt erforderlich, doch zur Kontrolle anderer Werte recht sinnvoll. Die im Folgenden vorgestellten Größen werden jeweils für beide Fahrzeuge im ortsfesten *X*, *Y*-Koordinatensystem berechnet:

5.4.1 Geschwindigkeitsänderung

Für die Komponenten der Geschwindigkeitsänderung eines Fahrzeugs gilt:

$$\begin{aligned} \Delta v_x &= v' \cdot \cos(\nu') - v \cdot \cos(\nu) \\ \Delta v_y &= v' \cdot \sin(\nu') - v \cdot \sin(\nu) \end{aligned} \qquad \text{(A9-63)}$$

Der Betrag der Geschwindigkeitsänderung lautet

$$\Delta v = \sqrt{\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2} \qquad \text{(A9-64)}$$

und für den Richtungswinkel der Geschwindigkeitsänderung gilt

$$\Delta \nu = \arctan \frac{\Delta v_y}{\Delta v_x} \qquad \text{(A9-65)}$$

5.4.2 Gierwinkel

Der Gierwinkel eines Fahrzeugs ist die Summe aus Schwimmwinkel und Kurswinkel

$$\psi = \beta + \nu \qquad \text{(A9-66)}$$

5.4.3 Berührpunktsgeschwindigkeit

Stoßkrafthebelarm r und Richtungswinkel ρ des Stoßkrafthebelarms sind nach Eingabewerte. Die Komponenten im ortsfesten X,Y-Koordinatensystem lauten:

$$\begin{aligned} r_x &= r \cdot \cos(\psi + \rho) \\ r_y &= r \cdot \sin(\psi + \rho) \end{aligned} \tag{A9-67}$$

Für die Geschwindigkeit im Berührpunkt **vor** der Kollision gilt:

$$\vec{v}_B = \vec{v} + \vec{\omega} \times \vec{r} \tag{A9-68}$$

Das Ausrechnen des Skalarproduktes ergibt für diese Gleichung:

$$\begin{aligned} v_{B_x} &= v \cdot \cos(\nu) + \omega \cdot r_y \\ v_{B_y} &= v \cdot \sin(\nu) + \omega \cdot r_x \end{aligned} \tag{A9-69}$$

Der Betrag der Geschwindigkeit im Berührpunkt **vor** der Kollision lautet

$$v_B = \sqrt{v_{B_x}^2 + v_{B_y}^2} \tag{A9-70}$$

und für den Richtungswinkel der Geschwindigkeit gilt

$$v_B = \arctan \frac{v_{B_y}}{v_{B_x}} \tag{A9-71}$$

Für die Geschwindigkeit im Berührpunkt **nach** der Kollision gilt:

$$\vec{v}'_B = \vec{v}' + \vec{\omega}' \times \vec{r} \tag{A9-72}$$

Das Ausrechnen des Skalarproduktes ergibt für diese Gleichung:

$$\begin{aligned} v'_{B_x} &= v' \cdot \cos(\nu') + \omega' \cdot r_y \\ v'_{B_y} &= v' \cdot \sin(\nu') + \omega' \cdot r_x \end{aligned} \tag{A9-73}$$

Der Betrag der Geschwindigkeit im Berührpunkt **nach** der Kollision lautet

$$v'_B = \sqrt{v'^2_{B_x} + v'^2_{B_y}} \tag{A9-74}$$

und für den Richtungswinkel der Geschwindigkeit gilt

$$\Delta\nu'_B = \arctan \frac{v'_{B_y}}{v'_{B_x}} \tag{A9-75}$$

Aus den berechneten Werten lassen sich weitere Größen berechnen:

5.4.4 Differenz der Berührpunktsgeschwindigkeiten nach der Kollision

$$\Delta v'_B = v'_{B_2} - v'_{B_1} \tag{A9-76}$$

5.4.5 Der k-Faktor

Vor der Berechnung des k-Faktors ist die Transformation der Berührpunktsgeschwindigkeiten in das t,n-Koordinatensystem notwendig. Zur Berechnung des *k*-Faktors sind die Komponenten der Geschwindigkeiten im Berührpunkt in Normalenrichtung erforderlich (siehe auch Abschnitt „Impuls“):

$$\begin{aligned} v_{B_{1_n}} &= v_{B_1} \sin\left(\tau - \nu_{B_1}\right) \\ v_{B_{2_n}} &= v_{B_2} \sin\left(\tau - \nu_{B_2}\right) \\ v'_{B_{1_n}} &= v'_{B_1} \sin\left(\tau - \nu'_{B_1}\right) \\ v'_{B_{2_n}} &= v'_{B_2} \sin\left(\tau - \nu'_{B_2}\right) \end{aligned} \tag{A9-77}$$

Wobei τ der Winkel zwischen der *x*-Achse des *X,Y*-Koordinatensystems und der *T*-Achse des *t,n*-Koordinatensystems ist.

Aus diesen Gleichungen lässt sich der *k*-Faktor errechnen:

$$k = \frac{v'_{B_{1_n}} - v'_{B_{2_n}}}{v_{B_{2_n}} - v_{B_{1_n}}} \tag{A9-78}$$

5.4.6 Der Stoßantrieb

Es gilt für die Komponenten des Stoßantriebs von Fahrzeug 1:

$$\begin{aligned} S_{1_x} &= S_x = m_1 \cdot \left(v'_1 - v_1\right) \cdot \cos\left(\Delta\nu_1\right) \\ S_{1_y} &= S_y = m_1 \cdot \left(v'_1 - v_1\right) \cdot \sin\left(\Delta\nu_1\right) \end{aligned} \tag{A9-79}$$

Der Stoßantrieb für Fahrzeug 2 ist

$$\begin{aligned} S_{2_x} &= -S_x \\ S_{2_y} &= -S_y \end{aligned} \tag{A9-80}$$

5.4.7 Die induzierten Giergeschwindigkeiten

Für die induzierten Drehgeschwindigkeiten gilt:

$$\omega_1' = \frac{S_y r_{1x} - S_x r_{1y}}{J_1} + \omega_1$$
$$\omega_2' = \frac{-S_x r_{2y} + S_y r_{2x}}{J_2} + \omega_2 \qquad \text{(A9-81)}$$

5.4.8 Die Differenz der Giergeschwindigkeiten

Wurden Drehgeschwindigkeiten **nach** der Kollision schon zur Berechnung als Eingabewerte ω_1^*, ω_2^* herangezogen, so bietet sich nun die Möglichkeit die Eingabewerte mit den berechneten Werten zu vergleichen. Dazu werden als Kontrollvariablen die Differenzen der Giergeschwindigkeiten berechnet:

$$\Delta\omega_1' = \omega_1^* - \omega_1'$$
$$\Delta\omega_2' = \omega_2^* - \omega_2' \qquad \text{(A9-82)}$$

Diese Differenzen sollten möglichst gering sein.

5.4.9 Der Reibwert

Aus Gl. (A9-59) folgt nach Umformungen und der Verwendung trigonometrischer Beziehungen:

$$\mu = \frac{S_t}{S_n} = \tan\left(\tau + 90° - \Delta\nu_1\right) \qquad \text{(A9-83)}$$

mit:

0.4 bis 0.6:	Stoß ohne Abgleiten
<< 0.6:	Stoß mit Abgleiten

Diese Werte stellen keine scharfen Grenzen dar. Die vorhandenen Übergänge müssen berücksichtigt werden.

5.4.10 Die Deformationsenergie

Nach dem Energiesatz ist die Deformationsenergie E_D die Differenz aus dem Energieinhalt **vor** der Kollision und dem Energieinhalt **nach** der Kollision:

$$E_D = E_{vK} - E_{nK} \qquad \text{(A9-84)}$$

$$E_{vK} = \frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2 + \frac{1}{2}J_1\omega_1^2 + \frac{1}{2}J_2\omega_2^2$$
$$E_{nK} = \frac{1}{2}m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2'^2 + \frac{1}{2}J_1\omega_1^{*2} + \frac{1}{2}J_2\omega_2^{*2} \qquad \text{(A9-85)}$$

Diese Differenz muss immer positiv sein.

5.4.11 EES-Werte nach Massen- und Eindringtiefenverhältnis

Wurden EES-Werte schon zur Berechnung als Eingabewerte EES_1, EES_2 herangezogen, so bietet sich nun die Möglichkeit die Eingabewerte mit berechneten Werten zu vergleichen.

Nach [1] und Gl. (A9-39) gilt für E_D:

$$E_{D_1} = \frac{1}{2} F_{\max} \cdot s_{D_1} = \frac{1}{2} m_1 EES_1^2$$
$$E_{D_2} = \frac{1}{2} F_{\max} \cdot s_{D_2} = \frac{1}{2} m_2 EES_2^2 \qquad \text{(A9-86)}$$

mit: $F_{\max}$: maximale Deformationskraft
s_D: Deformationsweg

Statt den Deformationswegen s_{D1}, s_{D2} werden die relative Steifigkeiten st_{rel1}, st_{rel2} verwendet. st_{rel1}, st_{rel2} sind Eingabewerte.

Aus dem Massen- und Eindringtiefenverhältnis gilt für die EES-Werte EES_1, EES_2:

$$EES_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot E_D}{m_2}\left(\frac{st_{rel1}}{st_{rel2}} + 1\right)}$$
$$EES_2 = EES_1 \sqrt{\frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{st_{rel1}}{st_{rel2}}} \qquad \text{(A9-87)}$$

Die relativen Steifigkeiten st_{rel1}, st_{rel2} müssen dabei > 0 sein.

5.4.12 Das „Verhältnis von Geschwindigkeitsänderung zu EES“ GEV

Eine weitere Kontrollgröße ist nach Burg [1] das Verhältnis von Geschwindigkeitsänderung zu EES:

$$GEV = \frac{\Delta v}{EES^*} \qquad \text{(A9-88)}$$

mit:

$$\frac{EES_1^*}{EES_2^*} = \frac{m_2}{m_1} \qquad \text{(A9-89)}$$

und

$$EES_2^* = \sqrt{\frac{2 \cdot \sum W_D}{\frac{m_2^2}{m_1} + m_2}} \qquad \text{(A9-90)}$$

Für zentrale Stöße müsste theoretisch $EES^* = \Delta v$ gelten. Für Teilstöße muss $EES^* > \Delta v$ sein. Es lässt sich also Folgendes sagen:

$0{,}9 < GEV < 1{,}2$:	ohne Abgleiten der Fahrzeuge
$0{,}75 < GEV < 0{,}9$:	beginnendes Abgleiten Fahrzeuge
$GEV < 0{,}75$:	deutliches Abgleiten der Fahrzeuge

Diese Werte stellen ebenfalls keine scharfen Grenzen dar. Die vorhandenen Übergänge müssen berücksichtigt werden.

Literatur

[1] Brüderlin, A.: Die Mechanik des Verkehrsunfalls. Verlag zum Elsässer AG, Zürich 1941

[2] Slibar, A.: Das Antriebsbalance-Diagramm als optimales Hilfsmittel der Unfallanalyse. der Verkehrsunfall 1973, Heft 2

[3] Schimmelpfennig et al.: Rhomboid-Schnittverfahren und Energiering-Verfahren. der Verkehrsunfall 11/1980 und 09/1982

[4] Campbell, K. L.: Energy Basis for Collision Severity. 3th International Conference on Occupant Protection, 1974

[5] McHenry, R.: Mathematical Reconstruction of Highway Accidents. DOT HS-800 801, 1973

[6] Burg, H. Zeidler, F.: EES – Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkungen auf die Unfallforschung. der Verkehrsunfall 1980, Heft 4

[7] CRASH 3 Technical Manual, NHTSA

[8] Stronge, W. J.: Energy dissipated in planar collision, Univ of Cambridge, Cambridge, England, Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME Volume 59, Issue 3, September 1992, Pages 681–682 ISSN 0021-8936

[9] Gilardi, G., Sharf, I.: Literature survey of contact dynamics modelling. Mechanism and Machine Theory, 37 (2002) Pergamon

[10] Handbuch PC-Crash

[11] Handbücher und Onlinehilfen Carat-3 und Carat-4

[21] Kudlich, Hans: Beitrag zur Mechanik des Kraftfahrzeug-Verkehrsunfalls, Dissertation an der TU Wien 1966

[22] Hagen, Hans: Stoßvorgänge bei Verkehrsunfällen von Personenwagen, untersucht an Modellfahrzeugen, TU München, 1965

[23] Plankensteiner, Karl: Mathematische Grundlagen für die Rekonstruktion von Fahrzeugstößen, TU Graz, 1975

[24] Schimmelpfennig und Schmedding: Geschwindigkeits-Differenz-Faktor, eine erweiterte Betrachtung der Stoßtheorie, ATZ 91 (1989), Heft 1

6 Berechnung der Deformationsenergie aus Versuchen

Aus einer Untersuchung von Crash-Tests gegen eine starre undeformierbare Barriere leitet Campbell einen linearen Zusammenhang zwischen bleibender Deformation und Anprallgeschwindigkeit ab und stellt eine Geradengleichung für diesen Zusammenhang basierend auf den Versuchergebnissen her. [12], [13]

Der Zusammenhang zwischen Anprallgeschwindigkeit und Deformationstiefe kann über

$$v = EBS = b_0 + b_1 \cdot C \qquad \text{(A9-91)}$$

dargestellt werden. Hierbei kann der Parameter b_0 als die Anprallgeschwindigkeit betrachtet werden bei der noch keine bleibende Verformung hervorgerufen wird.

Dieser lineare Ansatz wird auch in **Bild A9-45** veranschaulicht.

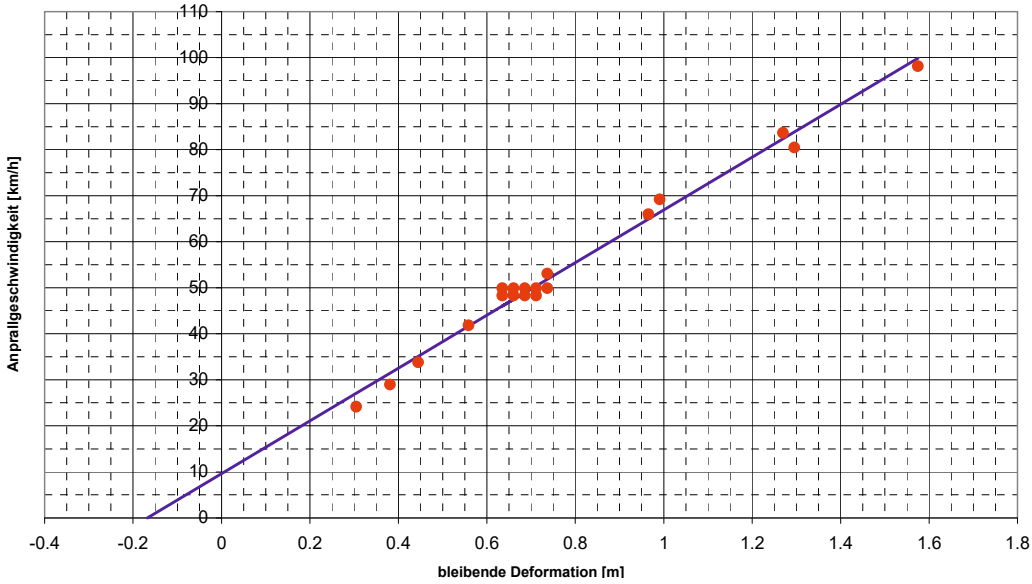


Bild A9-45 Zusammenhang zwischen bleibender Deformation und Anprallgeschwindigkeit [17]

Die Steifigkeit der gesamten Fahrzeugfront bzw. Deformationsbreite sowie vertikal im Bereich der Deformationszone wird als konstant angenommen.

Somit kann auch die Kontaktkraft

$$F = a_0 + a_1 \cdot C \qquad \text{(A9-92)}$$

als Funktion der Deformation dargestellt werden.

Um unabhängig von der Breite des Deformationsbereichs zu sein, werden die Konstanten a und b pro Deformationsbreite normiert angegeben.

Die Deformationsenergie kann anschließend durch die Integration der Kontaktkraft über die Deformationstiefe und die Deformationsbreite bestimmt werden.

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = \int_0^{w_0} \left(\int_0^{C} F \cdot dC + \text{const} \right) \cdot dw \tag{A9-93}$$

mit: *C:* Deformationstiefe
w: Deformationsbreite
const: Energie, die nicht in Deformationsenergie umgewandelt wurde

Unter der Annahme eines vollplastischen Stoßes kann Gl. (A9-93) wie folgt angeschrieben werden.

$$\frac{m}{2} \cdot \left(b_0 + b_1 \cdot C\right)^2 = \int_0^{w_0} \left(\int_0^{C} \left(a_0 + a_1 \cdot C\right) \cdot dC + \text{const} \right) \cdot dw \tag{A9-94}$$

$$\frac{m}{2} \cdot \left(b_0^2 + 2 \cdot b_0 \cdot b_1 \cdot C + b_1^2 \cdot C^2\right) = a_0 \cdot C \cdot w_0 + \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot C^2 \cdot w_0 + \text{const} \cdot w_0$$

Durch Koeffizientenvergleich erhält man anschließend:

$$a_0 = \frac{m}{w_0} \cdot b_0 \cdot b_1 \tag{A9-95}$$

$$a_1 = \frac{m}{w_0} \cdot b_1^2 \tag{A9-96}$$

$$\text{const} = \frac{m}{2 \cdot w_0} \cdot b_0^2 \tag{A9-97}$$

Mit Hilfe dieser Berechnung können die Steifigkeitsparameter der Fahrzeugstruktur bestimmt werden basierend auf einem durchgeführten Anprallversuch gegen eine starre Barriere mit der Anprallgeschwindigkeit b_1 unter Vorgabe der Anprallgeschwindigkeit bei der noch keine bleibende Verformung auftritt (b_0). Anschließend ist es möglich mit Hilfe der Steifigkeiten den EBS Wert für ein vorgegebenes Deformationsprofil zu berechnen. In der Literatur finden sich auch häufig die Bezeichnungen *A*, *B* und *G* für die Parameter a_0, a_1 und const.

$$\text{EBS} = \sqrt{\frac{2}{m} \int_0^{w_0} \left(\int_0^{C} F \cdot dC + \text{const} \right) \cdot dw} \tag{A9-98}$$

6.1 EBS (Equivalent barrier speed)

1968 wurde von Mackay der Begriff EBS (equivalent barrier speed) eingeführt um die Deformationen von Fahrzeugen in Realunfallsitutationen mit den Deformationen in Crash-Tests vergleichen zu können. Neben der Abkürzung EBS sind auch die Abkürzung EEBS (energy equivalent barrier speed) und BEV (barrier equivalent velocity) unter den gleichen Annahmen gebräuchlich. Hierbei gibt der EBS-Wert die Anprallgeschwindigkeit gegen eine starre undeformierbare Barriere an bei der das gleiche Beschädigungsbild wie am Unfallfahrzeug hervorgerufen wird. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die gesamte kinetische Energie im Test in Deformation umgewandelt wird, tatsächlich wird jedoch nur ein Teil der kinetischen Energie

beim Anprall gegen eine starre Barriere in bleibende plastische Deformation umgewandelt. Durch die Elastizität des Fahrzeugs verfügt das Fahrzeug auch noch nach dem Anprall gegen die Barriere über eine kinetische Restenergie, die durch die elastische Rückverformung des Fahrzeugs zurückgewonnen wird. Daher entspricht der EBS-Wert nur im Falle eines vollplastischen Anpralls gegen die Barriere dem EES-Wert. Für den geraden zentralen Stoß kann der EES-Wert durch Vorgabe eines *k*-Wertes aus dem EBS-Wert berechnet werden.

$$\frac{m \cdot \mathrm{EBS}^2}{2} = W_{\mathrm{plastisch}} + W_{\mathrm{elastisch}} \tag{A9-99}$$

$$W_{\mathrm{plastisch}} = \frac{m \cdot \mathrm{EES}^2}{2} \tag{A9-100}$$

$$\mathrm{v} = \mathrm{EBS} \tag{A9-101}$$

$$\mathrm{v}' = -k \cdot \mathrm{EBS} \tag{A9-102}$$

$$W_{\mathrm{elastisch}} = \frac{m \cdot \mathrm{v}'^2}{2} = \frac{m \cdot \left(k \cdot \mathrm{EBS}\right)^2}{2} \tag{A9-103}$$

$$W_{\mathrm{plastisch}} = \frac{m \cdot \mathrm{EBS}^2}{2} - \frac{m \cdot (k \cdot \mathrm{EBS})^2}{2} = \frac{m \cdot \mathrm{EES}^2}{2} \tag{A9-104}$$

$$\mathrm{EES} = \mathrm{EBS} \cdot \sqrt{1 - k^2} \tag{A9-105}$$

6.2 EES (Energy equivalent speed)

Die Abkürzung EES steht für energy equivalent speed und wurde von Burg/Zeidler 1980 geprägt. Der EES-Wert beschreibt die Deformationsenergie als kinetische Energie des Fahrzeugs und berücksichtigt nur die plastische bleibende Verformung des Fahrzeugs. Über den EES-Wert wird die Deformationsenergie ähnlich wie durch den EBS-Wert leichter quantifizierbar. [6]

$$W_{\mathrm{Def}} = \frac{m \cdot \mathrm{EES}^2}{2} \tag{A9-106}$$

6.3 Beispiel AREC 2003 – WH0327

Aus Anprallversuchen gegen eine starre undeformierbare Barriere können über obige Modellannahmen die Steifigkeitsparameter für die Deformationszone aus den bleibenden Verformungen und der Anprallgeschwindigkeit bestimmt werden. Als Beispiel wird hier ein Crash-Test der AREC 2003 verwendet. Bei diesem Versuch fuhr das Fahrzeug (Opel Astra F14I CVAN, BJ 1999) mit einer Anprallgeschwindigkeit von 45,1 km/h und einer Überdeckung von 50 % gegen die Barriere.

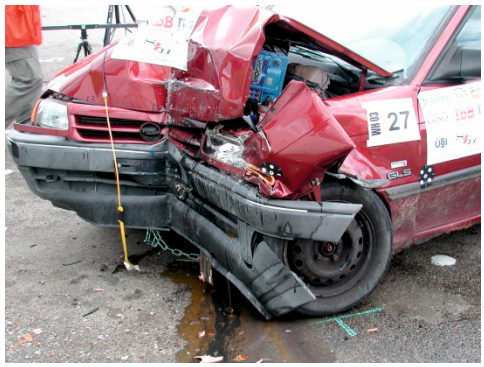


Bild A9-46 Versuchfahrzeug nach Kollision



Bild A9-47 Versuchfahrzeug nach Kollision

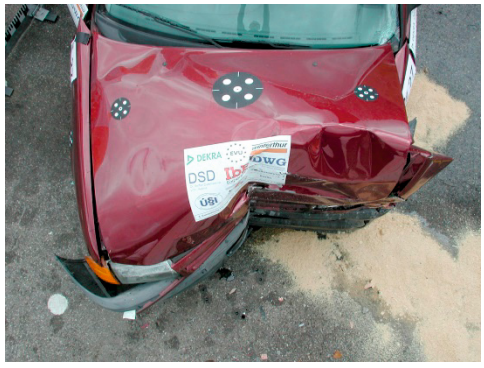


Bild A9-48 Versuchfahrzeug nach Kollision

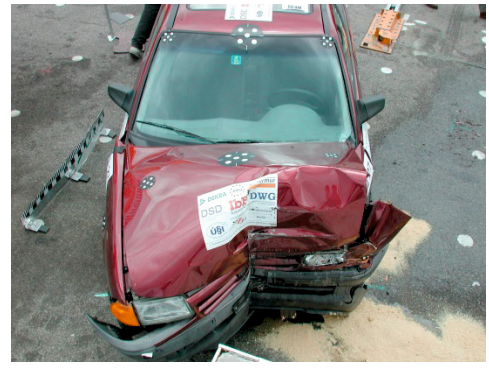


Bild A9-49 Versuchfahrzeug nach Kollision

6.4 Deformationsprofil

Zur Vermessung des Deformationsprofiles wird der Deformationsbereich in der Deformationsbreite in 6 äquidistante Abschnitte unterteilt, in jedem Abschnitt wird die Deformationstiefe ausgehend von der undeformierten Fahrzeugkontur in Normalenrichtung vermessen.

Aus den Einzeldeformationstiefen wird zunächst eine mittlere Deformationstiefe berechnet, weiterhin muss noch die Anprallgeschwindigkeit bis zu der keine bleibende Verformung auftritt vorgegeben werden.

Deformationsbreite w_0:	1,4 m
Breite des Fahrzeugs:	1,7 m
Fahrzeugmasse:	966 kg
Anprallgeschwindigkeit ohne Deformation b_0:	12 km/h
Versuchsgeschwindigkeit v_f:	45,1 km/h

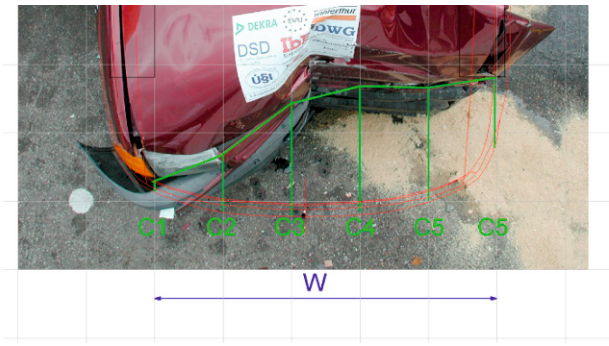


Bild A9-50 Messung des Deformationsprofiles

Tabelle A9.6 Deformationstiefen

Messpunkt	Deformationstiefe
C1	0,04 m
C2	0,23 m
C3	0,47 m
C4	0,51 m
C5	0,46 m
C6	0,29 m

$$C_{\text{mittel}} = \frac{\frac{C_1}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} C_i + \frac{C_n}{2}}{n-1} \qquad = 0{,}367 \text{ m} \qquad [12], [19]$$

$$b_1 = \frac{v_t - b_0}{C_{\text{mittel}}} \qquad = 25{,}05 \text{ 1/s}$$

$$A = a_0 = \frac{m}{w_0} \cdot b_0 \cdot b_1 \qquad = 57{,}6 \text{ kN/m}$$

$$B = a_1 = \frac{m}{w_0} \cdot b_1^2 \qquad = 433{,}1 \text{ kN/m/m}$$

$$G = \text{const} = \frac{m}{2 \cdot w_0} \cdot b_0^2 \qquad = 3{,}8 \text{ kN}$$

Umgerechnet auf die gesamte Fahrzeugbreite ergibt sich somit eine Steifigkeit von

$$S = B \cdot \textit{Fahrzeugbreite} \qquad = 433{,}1 \text{ kN/m/m} \cdot 1{,}7 \text{ m} = 736 \text{ kN/m}$$

In der Unfallrekonstruktion ist die Fragestellung meist umgekehrt. Die Deformationstiefen des verunfallten Fahrzeugs sind bekannt oder können bestimmt werden, aus diesen soll anschließend die Deformationsenergie berechnet werden.

Hierbei werden im ersten Schritt die Steifigkeiten für das Fahrzeug aus einer Versuchsdatenbank (z. B. Datenbank der NHTSA [18] mit Barriereversuchen gegen eine undeformierbare Barriere) entnommen, dabei wird nach Möglichkeit ein identisches oder vergleichbares Fahrzeug benutzt.

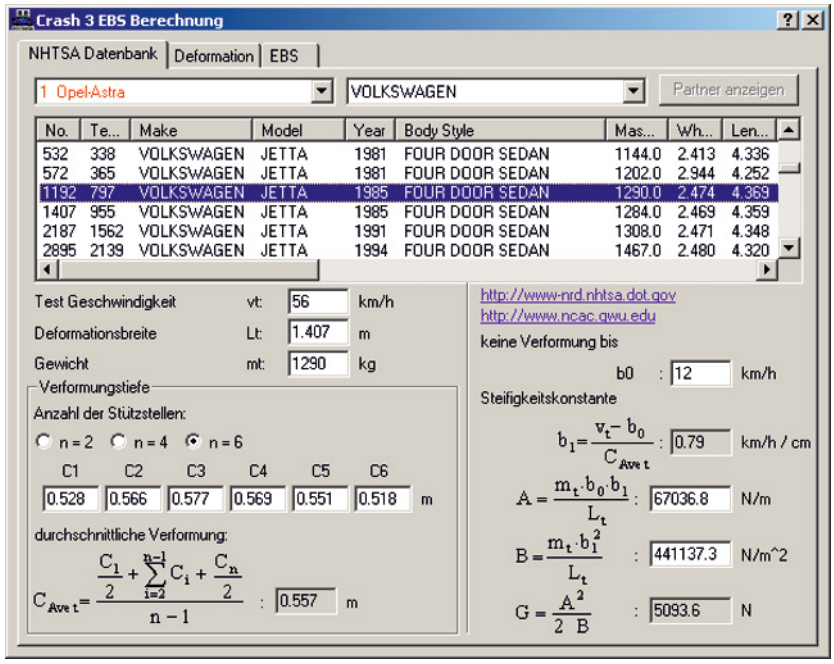


Bild A9-51 Auswahl eines Vergleichsfahrzeugs zur Bestimmung der Karosseriesteifigkeiten (PC-Crash)

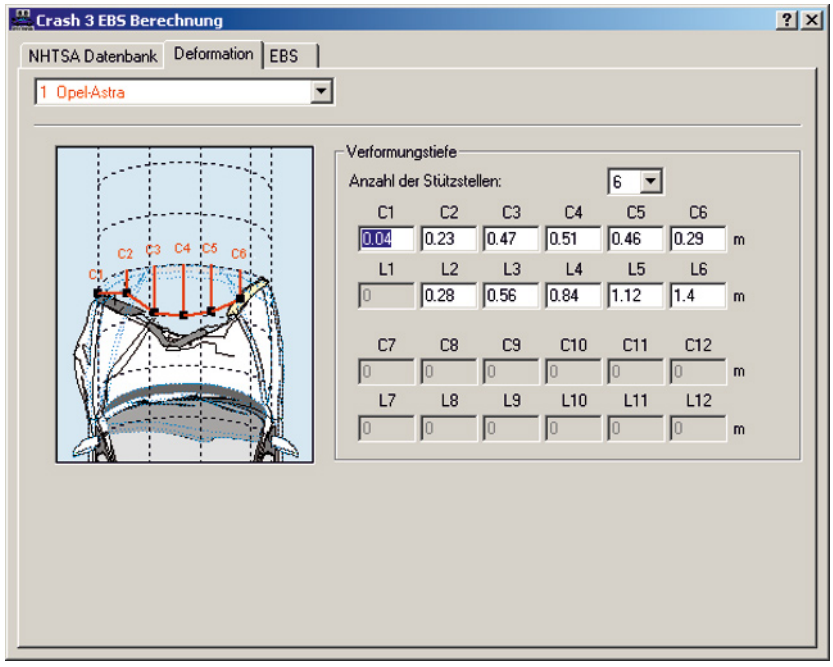


Bild A9-52 Vorgabe der Deformationen des Unfallfahrzeugs (PC-Crash)

Anschließend werden die am Unfallfahrzeug gemessenen Deformationen eingegeben und daraus wird die Deformationsenergie berechnet. Hierbei ist es bei geeigneter Berechnung nicht mehr erforderlich, dass eine bestimmte Anzahl von Messpunkten mit äquidistanten Abständen verwendet wird.

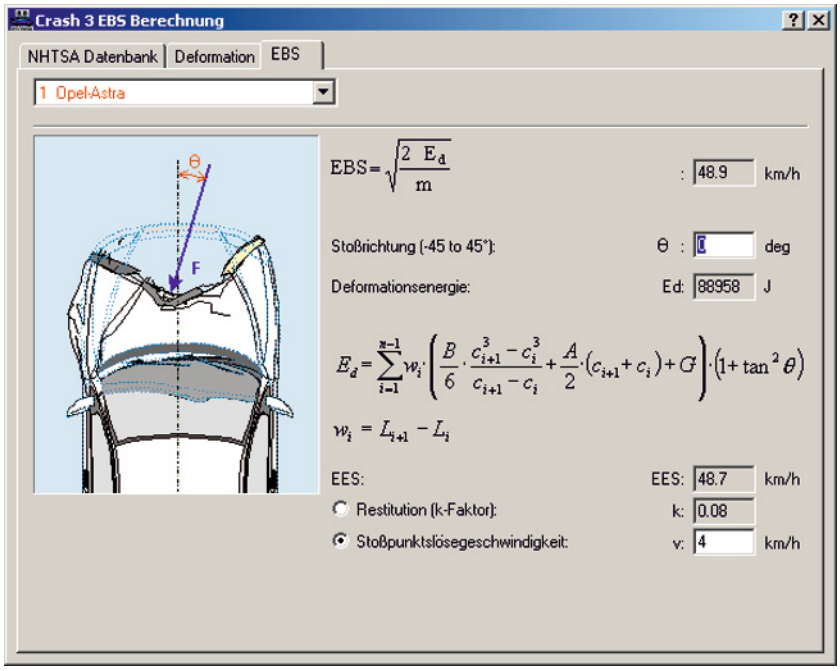


Bild A9-53 Berechnung der Deformationsenergie (PC-Crash)

Bei der Berechnung der Deformationsenergie kann die Kraftrichtung und damit die Deformationsrichtung berücksichtigt werden. Erfolgt die Deformation des Fahrzeugs nicht in Richtung der Vermessung so ergeben sich effektiv höhere oder geringere Deformationstiefen, die in der Berechnung der Deformationsenergie berücksichtigt werden müssen.

Aus dem EBS-Wert kann dann durch die Vorgabe eines *k*-Faktors oder einer Stoßpunktslösegeschwindigkeit der zugehörige EES-Wert bestimmt werden.

Bei der Anwendung dieser Berechnungen ist zu beachten, dass durch die Modellannahme eine mittlere Karosseriesteifigkeit für den gesamten Deformationsbereich aus Versuchsdaten mit voller Überdeckung ermittelt wurde. Im konkreten Anwendungsfall ist zu beurteilen ob diese Steifigkeit mit der Steifigkeit des am Unfallfahrzeug deformierten Bereichs vergleichbar ist. Insbesondere bei geringen Überdeckungen oder schiefwinkeligem Anstoß kann es erforderlich sein, dass die ermittelten Steifigkeiten korrigiert werden müssen.

Dabei ist auch zu bedenken, dass die Daten aus der NHTSA-Steifigkeitsdatenbank für Fahrzeuge, die auf dem amerikanischen Markt verkauft werden gelten. Da die Sicherheitsvorschriften auf dem amerikanischen Markt anders sind als in Europa, sind die Fahrzeuge in manchen Details anders konstruiert als Fahrzeuge für Europa. Detaillierte Informationen über diese Unterschiede und die genaue Auswirkung auf die Steifigkeit sind derzeit nicht verfügbar.

Literatur

[4] Campbell, K. L.: Energy Basis for Collision Severity. 3th International Conference on Occupant Protection, 1974

[5] McHenry, R.: Mathematical Reconstruction of Highway Accidents. DOT HS-800 801, 1973

[6] Burg, H., Zeidler, F.: EES – Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkungen auf die Unfallforschung. der Verkehrsunfall 1980, Heft 4

[7] CRASH 3 Technical Manual, NHTSA

[8] Stronge, W. J.: Energy dissipated in planar collision, Univ. of Cambridge, Cambridge, England, Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME Volume 59, Issue 3, September 1992, Pages 681-682 ISSN 0021-8936

[9] Gilardi, G., Sharf, I.: Literature survey of contact dynamics modelling. Mechanism and Machine Theory, 37 (2002) Pergamon

[10] Handbuch PC-Crash

[11] Handbücher und Onlinehilfen Carat-3 und Carat-4

[12] Campbell, K.: „Energy as a Basis for Accident Severity“, Paper 74056, SAE International, Warrendale, PA, 1974

[13] Danne, Anja: Vergleich und Bewertung von computergestützten Verfahren zur Rekonstruktion von Fahrzeugkollisionen, Diplomarbeit Nr. 7/99 (FG 7), TU-Berlin April 1999

[14] Brach, Raymond M., Brach, Matthew R.: Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods, SAE International, Warrendale, PA, 2005

[16] Crash3 User's Guide and Technical Manual, National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transporation, Washington, DC, USA, 1982

[17] Cheng, P. H., Sens, M. J., Weichel, J. F., Guenther, D. A.: An Overview of the Evolution of Computer Assisted motor Vehicle Accident Reconstruction, SAE Paper 871991, Reconstruction of Motor Vehicle Accidents: A Technical Compendium, PT-34, SAE International, Warrendale, PA, 1987

[18] NTHSA Versuchsdatenbank http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/, http://www.ncac.gwu.edu/

[19] Prasad, A. K.: CRASH3 Damage Algorithm Reformulation for Front and Rear Collisions, Paper 900098, SAE International, Warrendale, PA, 1990

[20] Prasad, A. K.: Energy Absorbed by Vehicle Structures in Side Impacts, Paper 910599, SAE International, Warrendale, PA, 1991

[21] Prasad, A. K.: Energy Absorbing Properties of Vehicle Structures and Their Use in Estimating Impact Severity in Automobile Collisions, Paper 925209, SAE International, Warrendale, PA, 1992

7 Kraftrechnung – Steifigkeitsbasierte Stoßmodelle

Bei den steifigkeitsbasierten Stoßmodellen werden die Kontaktkräfte zwischen zwei Fahrzeugen oder zwischen Fahrzeugen und dem Untergrund über eine Steifigkeitsfunktion (Kraft-Weg-Zusammenhang) berechnet. [10] Die Kontaktkraft ergibt sich hierbei aus der Steifigkeitsfunktion für jedes Fahrzeug und der aktuellen Deformation zu jedem Zeitschritt der Simulation. Im Folgenden wird das Ellipsoid Modell und das Mesh (Netz-)Modell in PC-Crash besprochen.

7.1 Ellipsoid Modell

Bei diesem Modell wird das Fahrzeug durch eine Reihe von Ellipsoiden modelliert. Für jedes Ellipsoid kann eine Steifigkeitsfunktion, eine Kontaktreibung und ein Restitutionskoeffizient bzw. eine Kontakthysterese vorgegeben werden. Die Bestimmung der Kontaktpunkte im Raum erfolgt automatisch ebenso die Unterscheidung zwischen Abgleitkollision und Kollision ohne Abgleiten. Reibungskräfte wirken hierbei entgegen der Relativgeschwindigkeit der Kontaktpunkte.

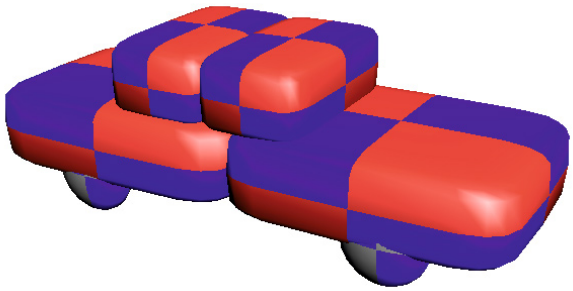


Bild A9-54 Modellierung eines Fahrzeugs durch Kontaktellipsoide

7.1.1 Kompression – Restitution

Die Unterscheidung zwischen Kompressions- und Restitutionsphase erfolgt über die Richtung der Relativgeschwindigkeiten der Kontaktpunkte in Normalenrichtung zur Berührebene.

$$\vec{F}_{n\,\text{Kompression}} = \lambda \cdot S \qquad \text{(A9-107)}$$

$$\vec{F}_{n\,\text{Restitution}} = \varepsilon^2 \cdot \lambda \cdot S \qquad \text{(A9-108)}$$

mit:

$\vec{F}_{n\,\text{Kompression}}$	Normalkontaktkraft in der Kompressionsphase
$\vec{F}_{n\,\text{Restitution}}$	Normalkontaktkraft in der Restitutionsphase
S	Steifigkeit
λ	Deformation
ε	Restitutionskoeffizient

7.1.2 Ellipsoid-Ellipsoid-Kontakt (Fahrzeug-Fahrzeug)

Zur Berechnung des Kontaktpunktes für den Ellipsoid-Ellipsoid-Kontakt wird die Annahme getroffen, dass der Kontaktpunkt auf der Verbindungslinie zwischen zwei Punkten liegt, deren Tangentialebenen parallel sind und deren Abstand minimal ist. Die genaue Lage des Kontaktpunktes ergibt sich anschließend über die Steifigkeiten der beiden Ellipsoide wie folgt. Die folgenden Gleichungen werden numerisch für λ mit Hilfe einer zweidimensionalen Simplex-Methode gelöst. [6]

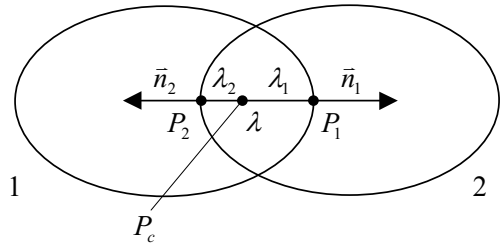


Bild A9-55 Ellipsoid-Ellipsoid-Kontakt

$$\vec{n}_1 = -\vec{n}_2 \tag{A9-109}$$

$$\lambda = \left|P_1 - P_2\right| = \lambda_1 + \lambda_2 \tag{A9-110}$$

$$\lambda \rightarrow \min \tag{A9-111}$$

$$\vec{F}_{n1} = -\vec{F}_{n2} \tag{A9-112}$$

$$\vec{F}_{n1} = -\lambda_1 \cdot S_1 \cdot \vec{n}_1 \tag{A9-113}$$

$$\vec{F}_{n2} = -\lambda_2 \cdot S_2 \cdot \vec{n}_2 \tag{A9-114}$$

$$P_c = P_1 - \vec{n}_1 \cdot \lambda_1 = P_2 - \vec{n}_2 \cdot \lambda_2 \tag{A9-115}$$

$$\mu_c = \min\left(\mu_1, \mu_2\right) \tag{A9-116}$$

$$\vec{F}_{t1} = \left|\vec{F}_{n1}\right| \cdot \mu_c \cdot \left\|\vec{v}_{Pc2} - \vec{v}_{Pc1}\right\| \tag{A9-117}$$

$$\vec{F}_{t2} = \left|\vec{F}_{n2}\right| \cdot \mu_c \cdot \left\|\vec{v}_{Pc1} - \vec{v}_{Pc2}\right\| \tag{A9-118}$$

mit:

$\vec{F}_{n1}, \vec{F}_{n2}$	Normalkontaktkraftkomponenten für Ellipsoid 1 und 2
$\vec{F}_{t1}, \vec{F}_{t2}$	Tangentialkontaktkraftkomponenten für Ellipsoid 1 und 2
μ_c	Kontaktreibung

Als Kontaktreibung wird das Minimum der vorgegebenen Reibungskoeffizienten für Ellipsoid 1 und 2 verwendet, die Richtung der Reibungskraft ist durch die Richtung der Relativgeschwindigkeiten der Kontaktpunkte definiert.

7.1.3 Ellipsoid-Ebenen-Kontakt (Fahrzeug-Untergrund)

Für Kontaktberechnungen mit dem Untergrund wird der Untergrund über Flächenelemente modelliert. Hierbei wird für den Untergrund keine Deformation berücksichtigt und es ergibt sich keine Bewegung des Untergrunds unter Krafteinwirkung.

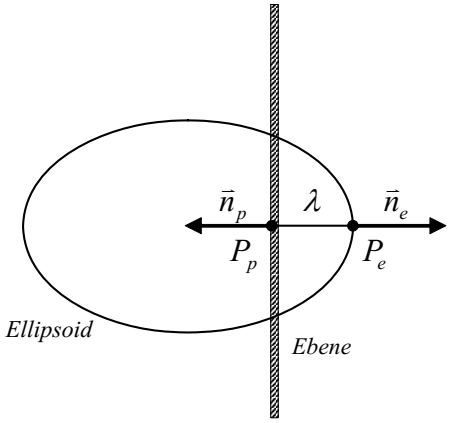


Bild A9-56 Ellipsoid-Ebenen-Kontakt (Untergrund)

$$\vec{n}_e = -\vec{n}_p \tag{A9-119}$$

$$\lambda = \left| P_e - P_p \right| \tag{A9-120}$$

$$\vec{F}_{ne} = -\lambda \cdot S_e \cdot \vec{n}_e \tag{A9-121}$$

$$\vec{F}_{np} = -\vec{F}_{ne} \tag{A9-122}$$

$$\vec{F}_{te} = \left| \vec{F}_{ne} \right| \cdot \mu \cdot \left\| \vec{v}_{Pcp} - \vec{v}_{Pce} \right\| \tag{A9-123}$$

$$\vec{F}_{tp} = \left| \vec{F}_{np} \right| \cdot \mu \cdot \left\| \vec{v}_{Pce} - \vec{v}_{Pcp} \right\| \tag{A9-124}$$

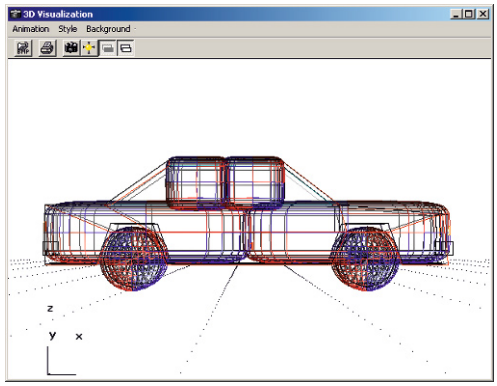
mit:

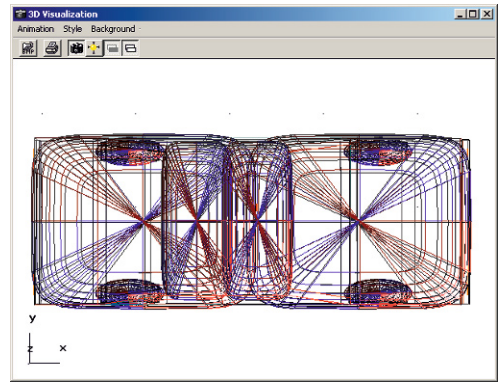
$\vec{F}_{ne}, \vec{F}_{np}$	Normalkontaktkraftkomponenten
$\vec{F}_{te}, \vec{F}_{tp}$	Tangentialkontaktkraftkomponenten
μ	Kontaktreibung

7.1.4 Grundmodelle für Kontaktberechnungen

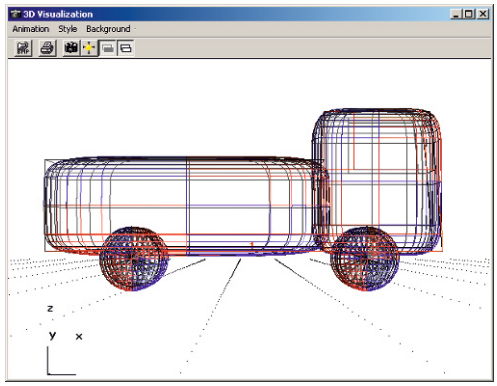
Die Modellierung der verschiedenen Fahrzeugtypen durch Kontaktellipsoide ist in den folgenden Bildern dargestellt. Insbesondere für die Überschlagssimulation ist die Modellierung der Räder wichtig.

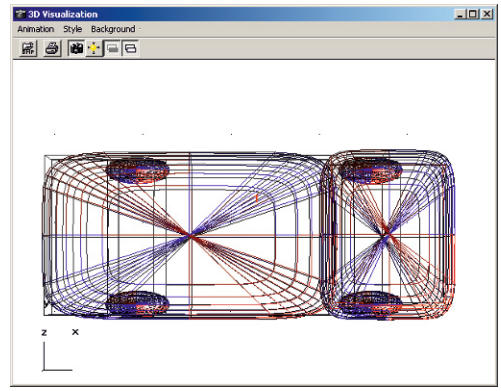
Pkw



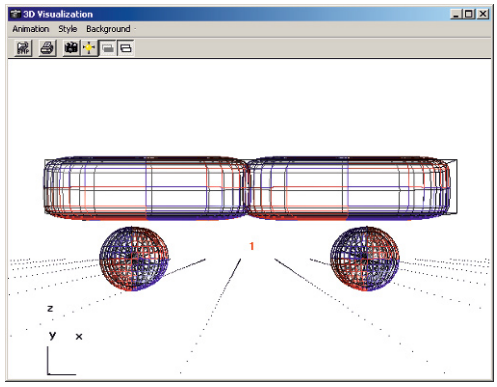


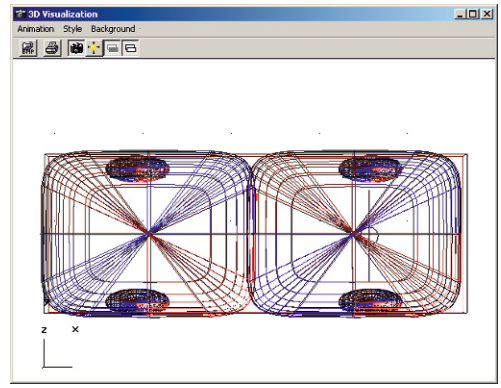
Lkw





Anhänger





Motorrad

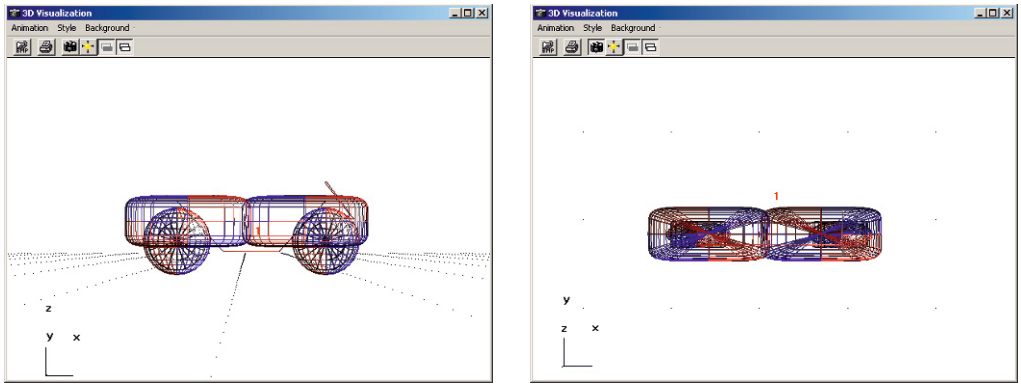


Bild A9-57 Grundmodelle für Kontaktberechnung

7.2 Mesh-Modell

Beim Mesh-Kontakt-Modell werden die Fahrzeug als Netze bestehend aus Knoten und Flächen modelliert. Als Kontaktnetz können auch 3-dimensionale Fahrzeugzeichnungen verwendet werden.

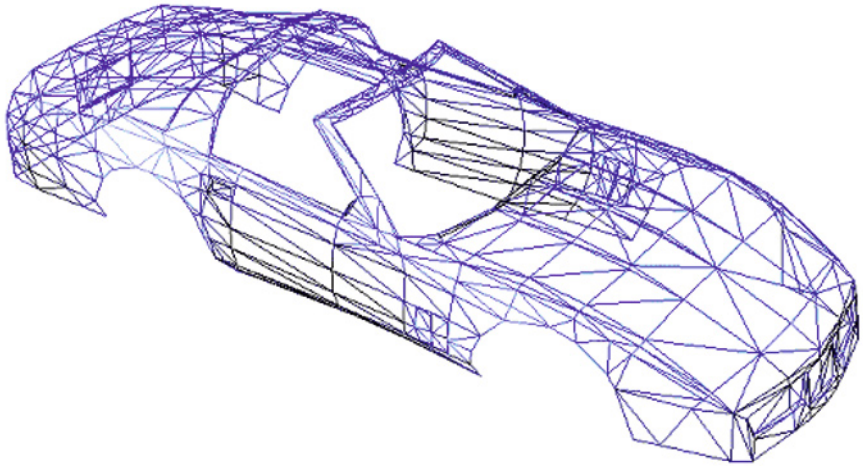


Bild A9-58 Kontaktnetz eines Fahrzeugs

Die Kontaktkraft wird beim Netzmodell für jeden Knoten des Netzes berechnet, diese ergibt sich in der Berechnung aus der Deformation jedes Knotens. Die Knoten des Netzes bilden die möglichen Kontaktpunkte, die Flächen definieren die Kontaktflächen. Durch die Vorgabe einer Kontaktreibung für die einzelnen Knoten und Flächenelemente können auch Abgleitvorgänge simuliert werden.

7.2.1 Knoteneigenschaften

Jeder Knoten des Netzes verfügt über individuelle Eigenschaften wie Steifigkeit, Restitution und Reibung. Die Steifigkeiten der einzelnen Knoten werden über die Fläche der angrenzenden Flächen berechnet. Mit Hilfe des Netz Modells ist es möglich bleibende Verformungen des Fahrzeugs durch Verformungen der Netzoberfläche (Knotenverschiebungen) zu berücksichtigen.

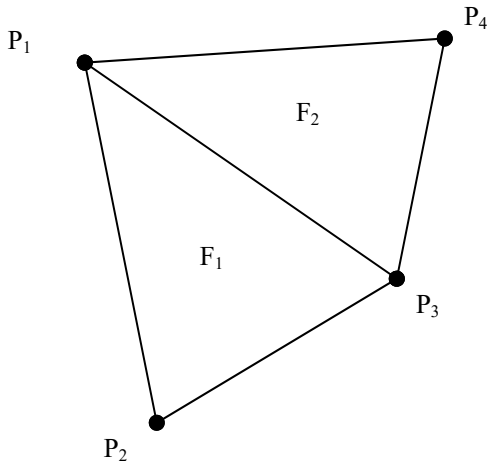


Bild A9-59 Ein einfaches Netz mit vier Punkten und zwei Flächen

Die Knotensteifigkeit kann wie folgt berechnet werden:

$$c_1 = S \cdot \frac{A_1}{3} + S \cdot \frac{A_2}{3} \tag{A9-125}$$

$$c_2 = S \cdot \frac{A_1}{3} \tag{A9-126}$$

$$c_3 = S \cdot \frac{A_1}{3} + S \cdot \frac{A_2}{3} \tag{A9-127}$$

$$c_4 = S \cdot \frac{A_2}{3} \tag{A9-128}$$

mit:

c_i Steifigkeit von Knoten i
A_j Flächeninhalt von Fläche j
S Netzsteifigkeit als Steifigkeit pro Fläche

7.2.2 Kontakte zwischen Netz und Untergrund

Die Kontaktkraft jedes einzelnen Knotens wird über die Deformation des Knotens berechnet.

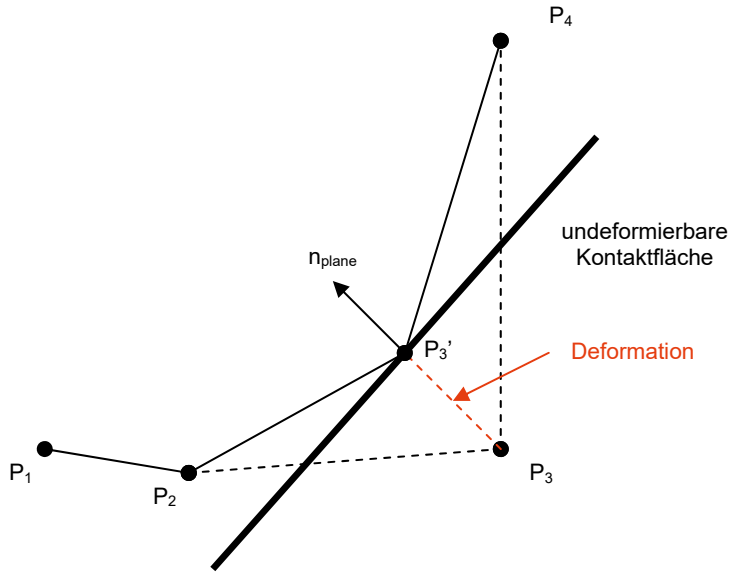


Bild A9-60 Netzverformung an einer undeformierbaren Kontaktfläche

Berechnung der Kontaktkräfte:

$$\lambda = \left| P_3' - P_3 \right| \tag{A9-129}$$

$$\vec{F}_n = \lambda \cdot c_3 \cdot \vec{n}_{plane} \tag{A9-130}$$

$$P_c = P_3' = P_3 + \vec{n}_{plane} \cdot \lambda \tag{A9-131}$$

$$\vec{F}_t = -\left| \vec{F}_n \right| \cdot \mu_c \cdot \left\| \vec{v}_{P_3'} - \vec{v}_{Pc_{plane}} \right\| \tag{A9-132}$$

mit:

$\vec{F}_n$ Normalkontaktkraft
$\vec{F}_t$ Tangentialkontaktkraft
μ_c Kontaktreibung
λ Deformation

7.2.3 Fahrzeug-Fahrzeug-Kontakte

Die Kontaktberechnung zwischen 2 Netzen erfolgt ähnlich wie die oben beschriebene Kontaktberechnung mit undeformierbaren Flächen. Für jeden Integrationsschritt bildet ein Fahrzeug die Kontaktknoten (Slave-Fahrzeug) und das andere Fahrzeug (Master-Fahrzeug) die Kontaktflächen aus dem Netzmodell. Die Kontaktkräfte werden aus den so definierten Knoten und Flächen berechnet und auf beide Fahrzeuge angewandt. Beim Master-Fahrzeug entstehen in dieser Berechnung keine Deformationen. Im nächsten Integrationsschritt werden die Fahrzeuge vertauscht, d. h.: Das Master-Fahrzeug des vorangegangenen Integrationsschritt ist nun das Slave Fahrzeug und erfährt somit ebenfalls Deformationen.

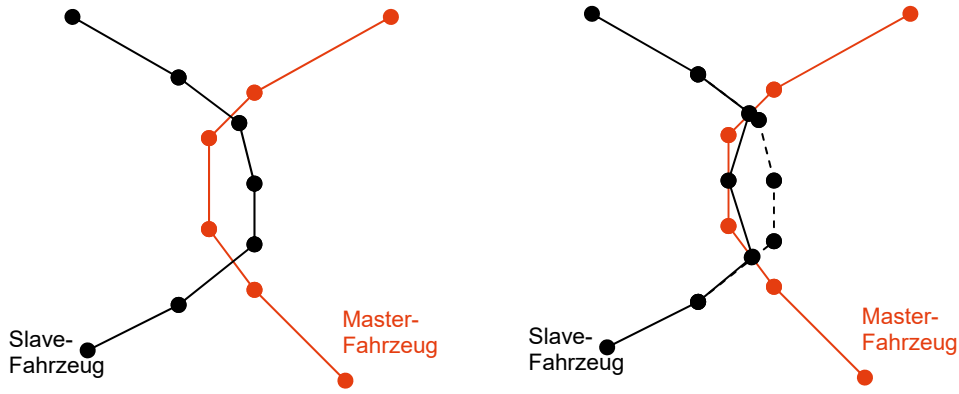


Bild A9-61 Master- und Slave-Netz vor Deformation (links) und nach Deformation (rechts)

8 Finite-Elemente-Berechnung

8.1 Einleitung

Derzeit können die meisten in der Unfallrekonstruktion verwendeten Programme keine detaillierten Informationen über die Deformation von Fahrzeugen und anderen Objekten liefern. Daher kann eine Vorhersage der zu erwartenden Deformationsenergie in Verbindung mit Deformationen nur sehr eingeschränkt berechnet werden.

Finite-Elemente(FE)-Berechnungen können diese Lücke schließen.

Durch die Verwendung von FE-Berechnungsmethoden können Kontaktkräfte, Deformationen sowie die Deformationsenergie u. a. für eine vorgegebene Geometrie, Materialeigenschaften und Belastungssituation in einer hohen Genauigkeit berechnet werden [12]. In PC-Crash 10.0 stehen damit auch FE-Berechnungsmethoden für die Analyse von Verkehrsunfällen zur Verfügung und die Lücke in den Berechnungsmethoden kann somit geschlossen werden [16].

Im Folgenden werden die verschiedenen FE-basierten Berechnungsmodelle in PC-Crash 10.0 beschrieben sowie deren Anwendung und Validierung.

Durch die Integration von FE-Methoden in PC-Crash werden die Möglichkeiten in der Analyse von Verkehrsunfällen in Bereiche erweitert, die mit den bisher zur Verfügung stehenden Möglichkeiten nicht abgedeckt werden konnten. Durch diese Funktionalität können sehr detaillierte Analysen durchgeführt und Fragestellungen beantwortet werden, wie etwa die Energieaufnahme einer bestimmten Struktur, Kontaktkräfte in der Kollision zwischen 2 Objekten (z. B.: Deformation einer Anhängerkupplung oder eines Pfahls (**Bild A9-62** bis **Bild A9-65**)). Damit ergeben sich eine Vielzahl neuer Möglichkeiten bei der Analyse eines spezifischen Verkehrsunfalls oder Unfalltyps.

In der Unfallrekonstruktion stehen häufig detaillierte Informationen über die Geometrie, das Material und die Deformation von Objekten und Fahrzeugteilen zur Verfügung oder können bestimmt werden (**Bild A9-62** bis **Bild A9-65**). Es ist aber unbefriedigend, dass diese Informationen in den meisten gängigen Unfallrekonstruktionsprogrammen nur sehr eingeschränkt berücksichtigt werden können.



Bild A9-62 Deformierte Pfahl und Fahrzeug nach einem Crashtest (AREC 2011.09 Anprallgeschwindigkeit 10.8 km/h) [14]



Bild A9-63 Deformierter Frontstoßstangen Querträger nach einer Kollision gegen eine Anhängerkupplung[1]



Bild A9-64 Deformierte Anhängerkupplung[2]

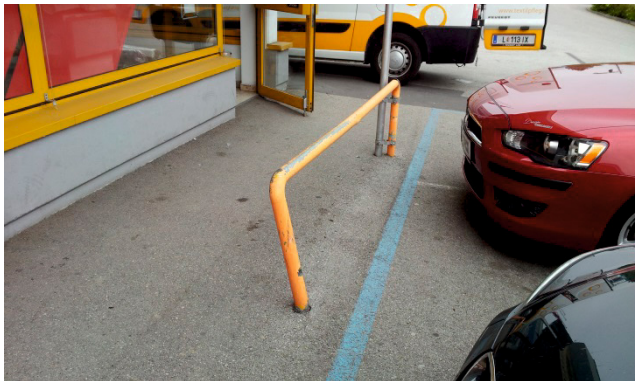


Bild A9-65 Deformierte Struktur nach einer Kollision

Crash Tests wie in **Bild A9-62** können als Vergleichsdaten für einen realen Unfall herangezogen werden, um Informationen über die Kollisionsgeschwindigkeit, die Geschwindigkeitsänderung und die zu erwartenden Beschleunigungen des realen Fahrzeugs im Unfall zu bestimmen.

[1] Quelle: Förtig GbR, Ingenieur-Büro für Kfz-Technik

[2] Quelle: Ingenieurbüro für Fahrzeugtechnik von der Wehd

Die so bestimmten Werte sind aber nur dann zuverlässig wenn die reale Stoßkonstellation (Durchmesser des Pfahls, Wandstärke, Material, Stoßstangenstruktur) mit dem Crashtest übereinstimmt.

Obwohl Crashtests sehr detaillierte und genaue Informationen liefern kann eine Extrapolation eines Crashtests auf andere Anstoß Konstellationen nur sehr eingeschränkt erfolgen. In manchen Fällen sind zusätzliche Crashtests erforderlich. Dieses Verfahren ist kostspielig und zeitaufwendig.

Crashtests sind aber natürlich extrem hilfreich, um die einzelnen Phasen der Kollision zu verstehen und das Verhalten der Kollisionspartner und die Schadensentstehung in allen Details zu untersuchen. Darüber hinaus sind Crashtests für die Validierung mathematischer Modelle unumgänglich. Mit Hilfe validierter Modelle können anschließend verschiedene Crashtests simuliert und analysiert werden.

8.2 FE-Modell-Beschreibung

Das finite Elemente Modell in PC-Crash verwendet ein explizites Verfahren zur Berechnung von Spannungen, Dehnungen und Verschiebungswerten. Dieses Verfahren kann zur Berechnung linearer und nichtlinearer transienter Vorgänge sowie Kontaktsituationen verwendet werden. Die einzelnen Schritte der Berechnung sind in **Bild A9-66** dargestellt.

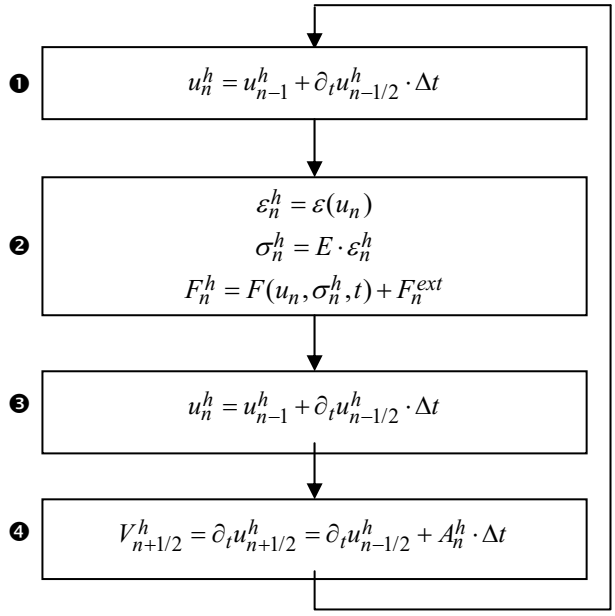


Bild A9-66 Berechnungsschritte eines expliziten FE-Verfahrens [13]

Nachdem die Knotenverschiebungsvektoren u_n^h zu einem bestimmten Zeitschritt berechnet wurden (Schritt ❶) werden die Dehnungen ε_n^h für die einzelnen Knoten berechnet. Das Materialmodell beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung und damit können die Knotenspannungen aus den Dehnungen berechnet werden (Schritt ❷). Anschließend kön-

nen die Knotenbeschleunigungen A_n^h als Funktion der inneren und äußeren Kräfte berechnet werden (Schritt ❸). Die Geschwindigkeiten V_n^h und Verschiebungen der Knoten warden anschliessend über Integration berechnet (Schritt ❹). Diese Schritte werden anschließen für alle Integrationsschritte (z. B. über das gesamte Zeitintervall von Interesse) durchgeführt.

8.3 Finite-Elemente-Berechnung

Die Finite-Elemente-Methode beruht auf der einfachen Idee dass die Lösung eines komplexen Problems im Kontinuum durch eine große Anzahl (aber endlich/finit) von Einzelösungen basierend auf einer einfachen Geometrie und Materialbeschreibung approximiert werden kann. Dabei muss natürlich gewährleistet sein, dass die einzelnen Lösungen aller geometrischen Elemente miteinander verbunden sind, um ein Ergebnis zu erhalten das die physikalische Realität wiederspiegelt. Geometrische Elemente in Verbindung mit der Beschreibung wie sich bestimmte Größen über die Elementausdehnung ändern werden als Finite Elemente (FE) bezeichnet. Finite Elemente müssen bestimmte Eigenschaften aufweisen:

- genaue Beschreibung einer komplexen Geometrie
- Möglichkeit bestimmte physikalische Phänomene innerhalb des Elements zu beschreiben
- Kombination der Ergebnisse/Lösungen innerhalb jedes Elements zu einer Lösung über alle Elemente, die gültige Ergebnisse für den Gesamtbereich liefert

Der Diskretisierungsprozess des Gesamtbereiches in Teilbereiche ist dabei vor großer Bedeutung für die Qualität des Modells. Im Diskretisierungsprozess werden die einzelnen Knotenkoordinaten und Verbindungen zwischen den Knoten bestimmt. Im Raum bilden die Knoten und Verbindungen eine spezifische Geometrie (**Bild A9-67** und **Bild A9-68**), die als Finite Elemente Geometrie bezeichnet wird. Zusätzlich muss in jedem Element eine Approximationsfunktion definiert werden, welche die physikalischen Gegebenheiten innerhalb des Elements beschreibt (z. B. Verlauf der Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Temperatur etc.). Bei der Untersuchung von kinematischen und kinetischen Problemen der Kontinuums Mechanik können die Finiten Elemente aus einer unterschiedlichen Anzahl von Knoten und Freiheitsgraden an der Oberfläche und im inneren des zu untersuchenden Bereichs bestehen. Jedes Element kann dann unterschiedliche Materialeigenschaften sowie Modellparameter wie Reibung, Kontaktberechnung aufweisen.

In PC-Crash 10.0 sind folgende Finite Elemente Typen implementiert:

- Shells (Schalenelemente) werden zur Modellierung von dünnwandigen Strukturen verwendet, bei denen die Wandstärke unter ca. 10 % der Elementausdehnung liegt. 3 Knoten Schalenelemente entsprechend der klassischen C_0 Formulierung (Shell_C0_3) und 4 Knoten Schalenelemente nach der Belytschko-Tsai Formulierung (Shell_BT_4) sind verfügbar 0, 0, 0 (**Bild A9-67**). Schalenelemente können bis zu 6 (üblicherweise 5) Freiheitsgrade in den Knoten aufweisen und verfügen über integrierte Kontaktelemente.
- Solids werden zur Volumens Modellierung verwendet. Diese Elemente bestehen aus 4–8 Knoten (**Bild A9-68**), jeder Knoten hat 3 Freiheitsgrade (nur Verschiebung).
- Stäbe sind 2 Knotenelemente zur Modellierung einer Fachwerkstruktur oder zur Verbindung von Baugruppen (z. B. als Schweißpunkte). Diese Elemente verfügen über integrierte Kontaktelemente, jeder Knoten hat 3 Freiheitsgrade.

- Feder-/Dämpferelemente dienen als Verbindungselemente zwischen verschiedenen Baugruppen. Eine translatorische und rotatorische Steifigkeit und Dämpfung kann definiert werden.

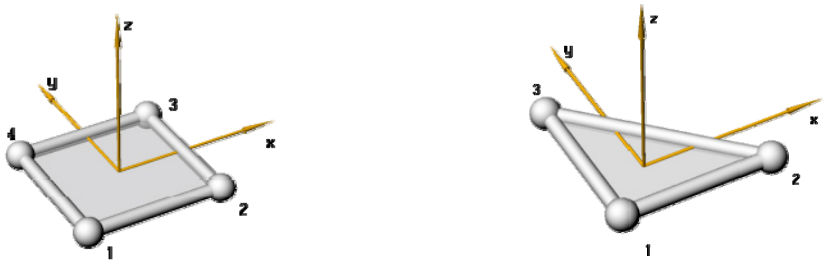


Bild A9-67 Shell (Schalen) Elemente

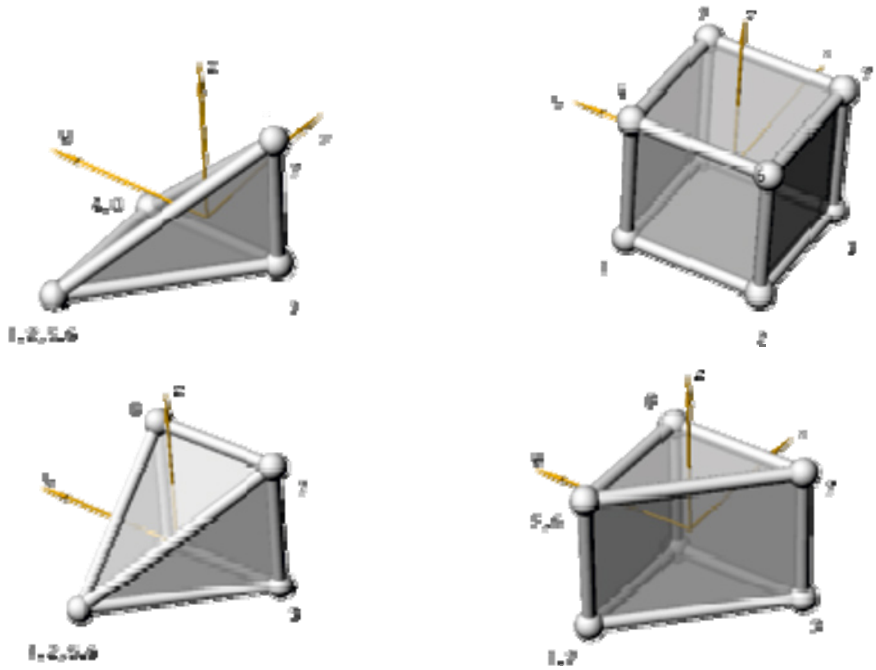


Bild A9-68 Verschiedene Solid Elemente

8.4 Knoten

In dem verwendete Finite Elemente Modell wird die Masse und das Trägheitsmoment eines Elementes auf den Knoten konzentriert. Zusätzlich kann die Masse und das Trägheitsmoment für einen Knoten vorgegeben werden. Externe Kräfte, Randbedingungen und Zwangsbedingungen wirken an den Knoten.

8.5 Randbedingungen/Zwangsbedingungen

An den Knoten können Randbedingungen und Zwangsbedingungen definiert werden:

- Randbedingungen definieren Startwerte wie die Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung von Knoten. Translatorische und rotatorische Beschleunigungen und Geschwindigkeiten können wahlweise im globalen Koordinatensystem oder in einem lokalen Koordinatensystem vorgegeben werden. Ein zeitabhängiger Verlauf der vorgegebenen Werte kann definiert werden. Damit können einzelnen Knoten eine Geschwindigkeit zugewiesen werden und andere Knoten durch Vorgabe einer Geschwindigkeit 0 fixiert werden.
- Starrkörperbedingungen werden zum Zusammenfassen einer Reihe von Knoten und Elementen zu einem Starrkörper verwendet, die einzelnen Knoten werden dabei mit einem Master Knoten verbunden.

8.6 Externe Lasten

Über externe Lasten können externe Kräfte, Momente, translatorische und rotatorische Beschleunigungen und Drücke, die auf Knoten und Elemente wirken definiert werden.

8.7 Kontaktberechnung

In PC-Crash wird ein Penalty Verfahren zur Kontaktberechnung verwendet. Oberflächen- und Kantenkontakte können berechnet werden. Einige Elemente haben integrierte Kontaktelemente (Schalten, Stäbe) für andere (Solids) müssen Kontaktelemente explizit definiert werden (z. B. beim Motorblock bestehend aus Solid Elementen soll nur ein Teil der Oberfläche als Kontakt definiert werden, innere Flächen sollten keine Kontakte berechnen)

8.8 Diskretisierungsprozess – Netzgenerierung

Der räumliche Diskretisierungsprozess bzw. die Netzgenerierung ist für die Erstellung eines Finite Elemente Modells von entscheidender Bedeutung. Die Netzgenerierung basiert auf der geometrischen Beschreibung des zu untersuchenden Bauteils, abhängig von der vorgegebenen Geometrie müssen verschiedene Elementtypen verwendet werden. Die Netzqualität beeinflusst maßgeblich die Genauigkeit der Ergebnisse und die Effektivität der Berechnung. Finite Elemente sind numerisch effektiv wenn die Proportionen der einzelnen Elemente möglichst gleich sind (die Längen der einzelnen Kanten sind gleich, lange und schmale Elemente sind numerisch ineffektiv). Um ein qualitativ hochwertiges Netz zu erhalten können daher Oberflächenelemente mit 3 oder 4 Knoten, Volumenselemente und Stabelemente verwendet werden.

Zur Netzgenerierung stehen verschieden Programme zur Verfügung, auch frei verfügbare Programme wie gmsh [17] können zur Netzgenerierung verwendet werden (**Bild A9-69**). Viele Netzgenerierungsprogramme wie gmsh verwenden Parameter zur Beschreibung der Geometrie eines Bauteils, daher können Änderungen in den Abmessungen einfach durchgeführt werden, ohne die gesamte Geometrie neu zu erstellen.

Der Finite-Elemente-Präprozessor in PC-Crash kann gmsh und GID [20] Mesh Dateien direkt importieren, Materialdefinitionen und Elementeigenschaften sowie Randbedingungen und Zwangsbedingungen werden anschließend in PC-Crash zugewiesen.

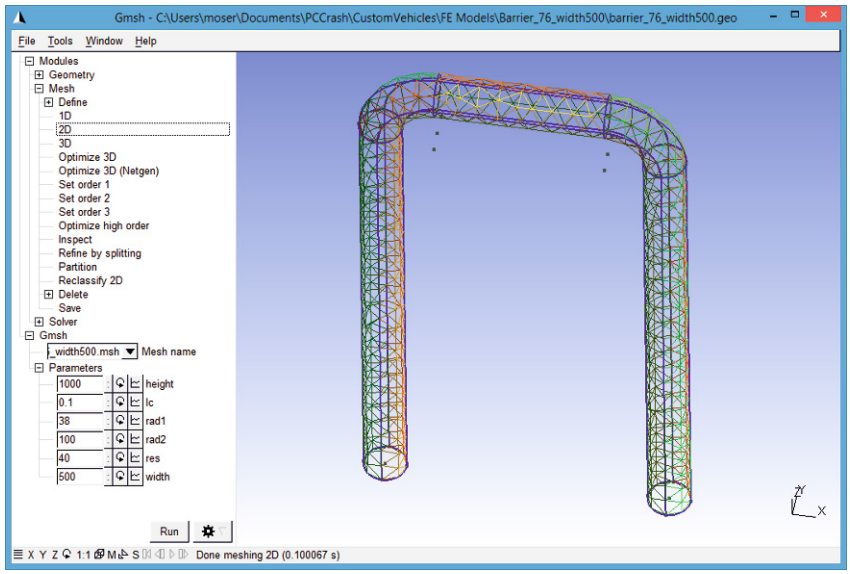


Bild A9-69 Mesh-Generierung eines Bauteils in gmsh [17]

8.9 Material Modelle

Drei verschiedene isotropische Materialmodelle (Materialeigenschaften sind richtungsunabhängig/in allen Richtungen gleich) mit den folgenden Parametern stehen zur Verfügung:

- Elastisches Materialmodell:
  - E: Elastizitätsmodul
  - ρ: Dichte
  - v: Querkontraktionszahl, Poissonrate
  - σ_F, ε_F: Versagenspannung und Versagensdehnung
- Elastoplastisches Materialmodell: Zusätzlich zu den obigen Parametern kann das plastische Verhalten über ein der drei folgenden Parameter beschrieben werden
  - σ_Y, EP: Fließgrenze und Kaltverfestigungskoeffizient
  - $\sigma = f(\varepsilon)$: Spannungs-, Dehnungsdiagramm (wie in **Bild A9-70**)
  - $\sigma = f(\varepsilon,\dot{\varepsilon})$: Dehnratenabhängiges Spannungs-, Dehnungsdiagramm
- Thermoelastoplastisches Materialmodell: Zusätzlich zu den elastoplastischen Materialparametern können noch folgende Parameter vorgegeben werden
  - α: Thermischer Expansionskoeffizient
  - T: Knotentemperatur

Abhängig vom verwendeten Materialmodell müssen alle obigen Parameter oder nur ein Teil vorgegeben werden. In PC-Crash steht eine Materialdatenbank zur Verfügung sodass die einzelnen Materialeigenschaften nicht für jedes Bauteil neu beschafft werden müssen.

Über die Vorgabe der Versagensspannung oder -dehnung kann auch Materialversagen simuliert werden. Wenn die Grenzwerte für ein Element überschritten werden, dann wird dieses Element in der Simulation deaktiviert.

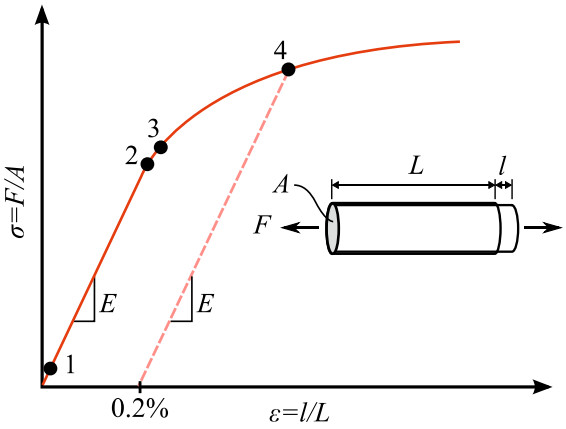


Bild A9-70 Spannungs-/Dehnungsdiagramm für ein typisches plastisches Materialverhalten mit Elastizitätsgrenze (1), Proportionalitätsgrenze (2), Streckgrenze (3) und Streckgrenze mit 0.2% plastischer Verformung (4) [21]

8.10 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen können in PC-Crash auf verschiedene Arten visualisiert (Postprozessor) werden. Die Ergebnisse werden auch im GID-Format [20] zur externen Weiterverarbeitung gespeichert.

Das gesamte Modell mit farbkodierter Darstellung von Elementdaten wie Spannung, Dehnung und Verschiebung kann für jeden Simulationsschritt in der 3D-Darstellung dargestellt werden, Animationen können ebenfalls erstellt werden, um die Dynamik der Simulation besser darzustellen (**Bild A9-71**).

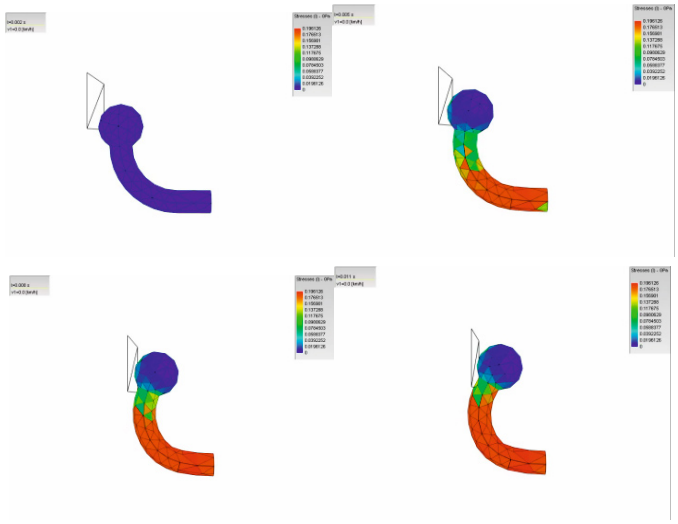


Bild A9-71 Farbkodierte Elementspannungen und Knotenverschiebungen für eine Kollision zwischen einer Kontaktfläche und einer Anhängerkupplung zum Zeitpunkt 0, 3, 6 und 9 ms nach Erstkontakt

8.11 Berechnungszeit

Da die Anzahl der erforderlichen Berechnung für das finite Elemente Modell wesentlich höher ist als bei der Starrkörpersimulation eines Fahrzeuges ist natürlich die Berechnungszeit wesentlich höher. Die Rechenleistung moderne Computer mit Multi-Core und Multi-Prozessor Architektur ist jedoch so hoch dass die Berechnungen wie im Abschnitt Validierung beschrieben in ca. 400 s bei einer Simulationsdauer von 600 ms durchgeführt werden können (Intel i7 Prozessor). In PC-Crash stehen auch eine Stapelverarbeitung sowie eine Unterstützung von Multi-Core- und Multi-Prozessor-Systemen zur Verfügung. Durch die Verwendung der Stapelverarbeitung kann eine Reihe von Simulationen zuerst konfiguriert werden (z. B. verschiedene Initialgeschwindigkeiten, Materialparameter etc.) und anschließend werden alle diese unterschiedlichen Simulationen automatisch ohne Benutzerinteraktion durchgeführt. Sobald die Berechnungen fertiggestellt sind können die Ergebnisse importiert und visualisiert werden. Dadurch kann der Arbeitsablauf optimiert werden.

Literatur

[1] Brüderlin, A.: Die Mechanik des Verkehrsunfalls. Verlag zum Elsässer AG, Zürich 1941

[2] Slibar, A.: Das Antriebsbalance-Diagramm als optimales Hilfsmittel der Unfallanalyse. der Verkehrsunfall 1973, Heft 2

[3] Schimmelpfennig et al.: Rhomboid-Schnittverfahren und Energiering-Verfahren. der Verkehrsunfall 11/1980 und 09/1982

[4] Campbell, K. L.: Energy Basis for Collision Severity. 3th International Conference on Occupant Protection, 1974

[5] McHenry, R.: Mathematical Reconstruction of Highway Accidents. DOT HS-800 801, 1973

[6] Press, William H., Teukolsky, Saul A., Veterling, William T., Flannery, Brian P.: Numerical Recipies in C, 2nd Edition, Cambridge University Press 1992

[7] CRASH 3 Technical Manual, NHTSA

[8] Stronge, W. J.: Energy dissipated in planar collision, Univ of Cambridge, Cambridge, England, Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME Volume 59, Issue 3, September 1992, Pages 681–682 ISSN 0021-8936

[9] Gilardi, G., Sharf, I.: Literature survey of contact dynamics modelling. Mechanism and Machine Theory, 37 (2002) Pergamon

[10] Handbuch PC-Crash

[11] Handbücher und Onlinehilfen Carat-3 und Carat-4

Nasdala L., FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik, 2. Auflage 2012, Springer Vieweg

Shen R. Wu, Lei Gu, Introduction to the explicit finite element method for nonlinear transient dynamics, John Wiley & Sons, Inc. 2012

AREC – Accident reconstruction conference group, www.arecgroup.info

NCAC – National Crash Analysis Center, 45085 University Drive, Ashburn, VA 20147, www.ncac.gwu.edu

PC-Crash 10.0 operating and technical manual, DSD Linz, Austria

Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities (www.geuz.org/gmsh/)

Ted Belytschko, Wing Kam Liu, Brian Moran, Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, 2009, John Wiley & Sons Ltd.

Klaus Jürgen Bathe, Finite Element Procedure, 2005, Prentice Hall

GiD: a universal, adaptive and user-friendly pre and postprocessor (www.gidhome.com)

Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Stress%E2%80%93strain_curve

9 Zusammenhang zwischen EES, bleibender Deformation, Kollisionsdauer und Struktursteifigkeit

Dr. Werner Gratzer

9.1 Einleitung

Für die Unfallrekonstruktion im Speziellen für die Kollisionsanalyse sind energetische Betrachtungen oft notwendig. Im Falle einer Kollision nach dem Muster einer Serienkollision ist die Anwendung des Energieerhaltungssatzes unumgänglich notwendig. Um diesen anwenden zu können, muss die Deformationsenergie von den beteiligten Fahrzeugen ermittelt werden.

Diese kann durch einen Vergleich mit bekannten ähnlich gelagerten Fällen meist Crash-Tests abgeschätzt, oder mittels eines Energierasters oder ähnlicher Methoden ermittelt werden.

Wie im Folgenden gezeigt, besteht aber über die Struktursteifigkeit ein Zusammenhang zwischen der Deformation und der dafür aufzubringenden Kraft, sodass daraus Formeln herleitbar sind, aus welchen die Deformationsenergie aus der bleibenden Deformation und der Struktursteifigkeit berechnet werden kann. In Fällen, in welchen die Deformationsenergie als Ergebnis resultiert – etwa bei der Vorwärtsanalyse, kann die Struktursteifigkeit als Kontrollparameter berechnet werden.

9.2 EES-Wert-Berechnung

Beim Zusammenstoß von zwei Fahrzeugen wirken einerseits die Stoßkräfte, idealisiert durch Federn wie in **Bild A9-72** gezeigt, und andererseits jeweils Trägheitskraft und Reibkraft der Räder.

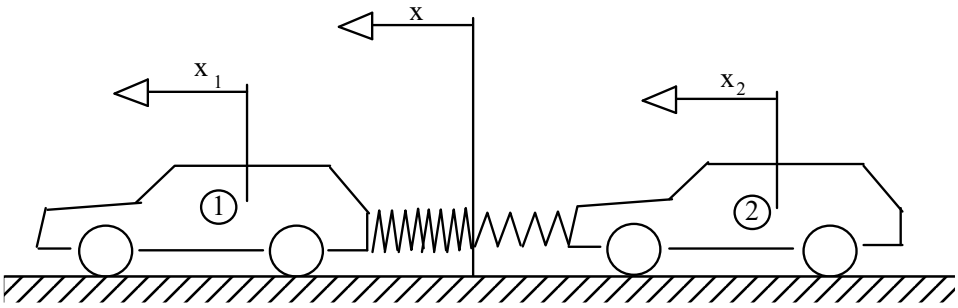


Bild A9-72 Idealisiertes mathematisches Modell zur Berechnung der Geschwindigkeitsänderungen

Für z. B. eine Schraubenfeder gilt Folgendes: Je mehr man die Feder zusammendrücken will, desto mehr Druckkraft muss man aufbringen. Solche Federn haben meist ein lineares Verhalten, das dem Gesetz

$$F = c\,\Delta x \qquad \text{(A9-133)}$$

folgt. Dabei ist F die Druckkraft, c ist die Federkonstante und Δx ist die Längenänderung (Verformungsweg). In einem Diagramm F über Δx entspricht c der Steigung der Kurve.

Wenn das Deformationsverhalten einer Fahrzeugstruktur durch eine lineare Funktion idealisiert werden kann, lässt sich diese Gesetzmäßigkeit als Näherung auch für die Struktursteifigkeit von Fahrzeugen anwenden.

Während bei einer Schraubenfeder meist ein linearer Kraft-Weg-Zusammenhang besteht, ist dies bei einer Fahrzeugstruktur meist nicht der Fall. Je nach Tiefe der Eindrückung ergibt sich eine andere angenäherte Steigung der Kurve $F(\Delta x)$ und damit eine andere Struktursteifigkeit. In geringem Ausmaß ist der Kraft-Weg-Zusammenhang auch von der Verformungsgeschwindigkeit, d. h. von der Kollisionsgeschwindigkeit, abhängig. Daraus sieht man, dass sogar die Beaufschlagung der gleichen Fahrzeugstruktur je nach Eindringtiefe unterschiedliche mittlere Struktursteifigkeiten erzeugen kann.

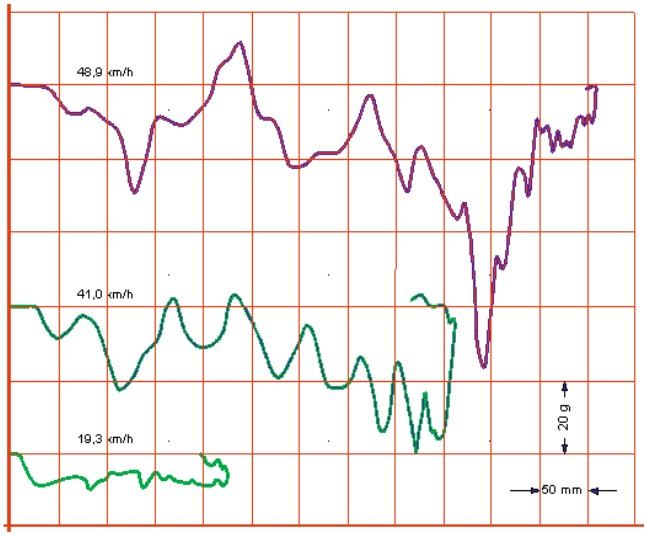


Bild A9-73 Beschleunigung (a) bzw. Kraft über der Fahrzeugdeformation (m = 1.835 kg)

Die Masse der Fahrzeuge wirkt sich in mehrfacher Weise auf die Struktursteifigkeit aus. Zum einen gilt $ma = c\Delta x$ und zum anderen sind konstruktive Einflüsse zu beachten. Die Hersteller der Fahrzeuge sind bestrebt, bei dem gesetzlich vorgeschriebenen Wandaufprall mit 100 % Überdeckung eine ganz bestimmte Verzögerung für die Insassen zu erzielen. Das hat zu ähnlichen Verformungswegen bei Kleinwagen wie bei Fahrzeuge der Oberklasse geführt. Diese schweren Fahrzeuge müssen damit eine größere Struktursteifigkeit aufweisen als die kleineren, leichteren.

Aus älteren Crash-Tests folgte, dass man bei dem 100 % Wandaufprall mit guter Näherung sagen konnte, dass 10 cm bleibende Verformung 10 km/h Aufprallgeschwindigkeit entsprechen. Ist ein solcher Wagen an der gesamten Front um 50 cm verformt, dann war die Aufprallgeschwindigkeit etwa 50 km/h. Aus diesem Zusammenhang lässt sich eine Struktursteifigkeit von rund 750 kN/m ermitteln.

Moderne Fahrzeuge weisen besondere Philosophien hinsichtlich innerer Sicherheit, Fahrzeugstruktur und Struktursteifigkeit auf. Fahrzeuge der Miniklasse werden häufig mit einer besonders steifen Karosserie hergestellt, damit sich der Innenraum nicht verformt. Der Bremsweg (früher Knautschzone) für die Insassen wird in den Innenraum verlegt. Große Fahrzeuge sollen sich leichter verformen, damit dadurch mehr Bremsweg für die kleineren Fahrzeuge entsteht.

Einheitliche Regeln oder Verfahrensweisen bei der Auslegung der Struktursteifigkeit von Fahrzeugen am gesamten Umfang gibt es bisher nicht.

Der Grundgedanke ist der, dass für die Eindringung der Fahrzeuge ein linearer Kraft-Deformations-Zusammenhang angenommen wird, sodass an der Stoßstelle an jedem Fahrzeug ersatzweise eine lineare Feder (**Bild A9-74**: rote Linien) wirkt. Nachdem die Fahrzeuge ihre maximale Eindringung erreicht haben, gibt es noch eine geringe Rückfederung.

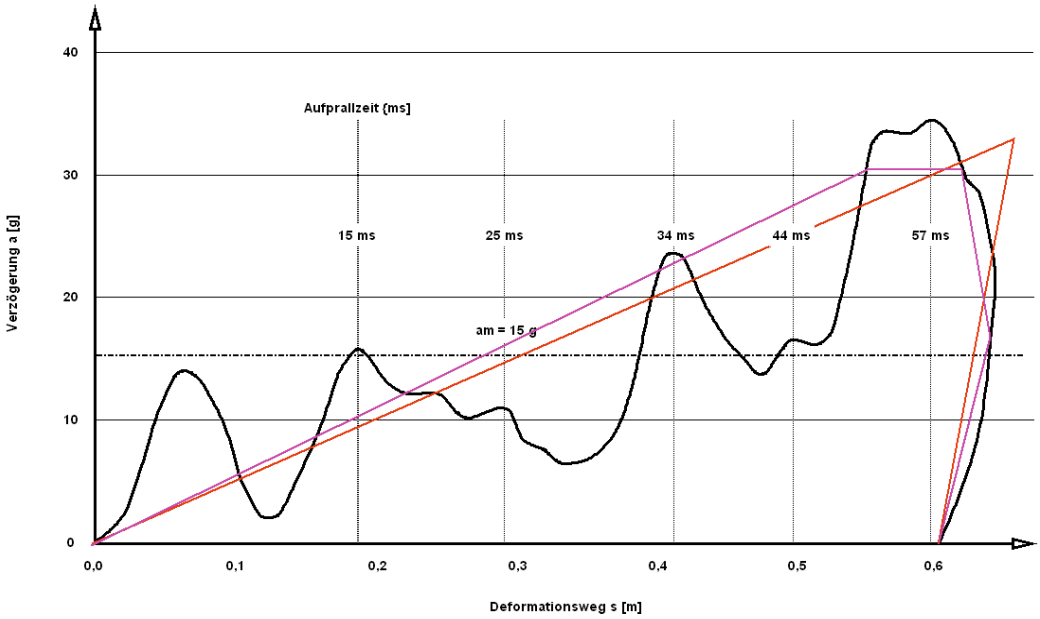


Bild A9-74 Mögliche Idealisierung des Kraft-Deformations-Zusammenhangs

Wie kann nun dies auf die Kollision zweier Fahrzeuge angewendet werden?

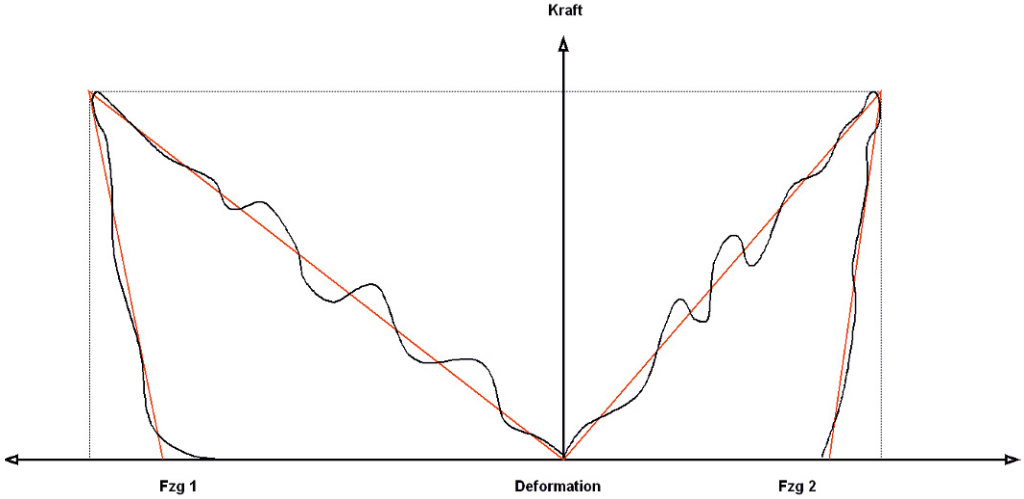


Bild A9-75 Kraft-Deformations-Zusammenhang für zwei Fahrzeuge

9.3 Berechnung der Kollisionsdauer

Die zwingende Folgerung aus einem linearen Zusammenhang von Kraft und Weg ist eine Sinusfunktion für Beziehung zwischen Deformation und Zeit. Aus dieser Überlegung heraus lässt sich die Kollisionsdauer berechnen.

Die Dauer bis zum Erreichen der maximalen Eindringung berechnet sich aus einem Viertel der Periode der vollständigen Schwingung. Die Periodendauer ist

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{m/c} \qquad \text{(A9-134)}$$

Daraus folgt für die Dauer der Kompressionsphase:

$$t_K \cong \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{m/c} \qquad \text{(A9-135)}$$

In dieser Formel bedeutet m die Masse eines an einer Feder mit der Steifigkeit c schwingenden Körpers. Für die Restitutionsphase gilt der gleiche Zusammenhang. Für c muss nur die Steifigkeit während der Rückverformung ermittelt werden. Die Herleitung wurde im zitierten Artikel beschrieben.

m und c können so im allgemeinen Fall nicht verwendet werden. Erstens muss die Fahrzeugmasse auf die Stoßnormale reduziert werden (reduzierte Masse), und zweitens muss berücksichtigt werden, dass zwei Fahrzeuge beteiligt sind. Vergleichbar wäre dies mit zwei Massen, die sich an den Enden einer Feder befinden.

Die gemeinsame Federsteifigkeit ergibt sich aus der Reihenschaltung von zwei Federn unterschiedlicher Steifigkeit. Dabei ist an eine Situation bei Kollision zu denken, wie in **Bild A9-76** gezeigt wird.

Bei dem hier verwendeten Modell treffen zwei masselose Federn aufeinander. Die Kräfte, die an den Enden der Federn wirken, sind gleich groß, weshalb die beiden Federn als eine Feder mit einer resultierenden Federsteifigkeit betrachtet werden können. Diese berechnet sich nach der Formel:

$$c_{res} = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_1 + c_2}$$

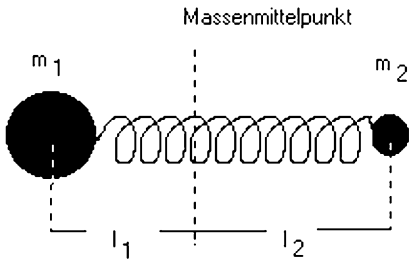


Bild A9-76 Masse-Feder-Modell allgemein

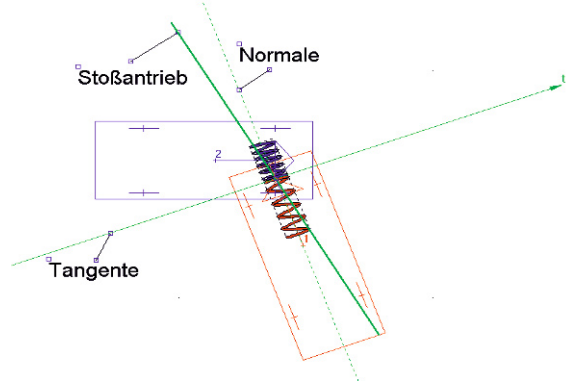


Bild A9-77 Federmodell für Steifigkeitsberechnungen

Man sieht aus dem Bild, dass die Federn in Richtung der Berührnormalen wirken. Das hat mehrere Bedeutungen: Die Fahrzeugmasse wirkt bei Fahrzeug 1 vollständig auf die Feder, bei Fahrzeug 2 aber nur teilweise. Das heißt, die Fahrzeugmassen müssen auf die Berührnormale reduziert werden. An Stelle der Fahrzeugmasse tritt jeweils deren reduzierte Masse.

Berechnung der reduzierten Masse:

$$m_{\text{red}} = m\frac{i^2}{i^2 + a^2}$$

mit:

m Masse des Fahrzeugs
a Abstand des Schwerpunktes vom Stoßantrieb
i Trägheitsradius: $i = \sqrt{\frac{J}{m}}$ (J .... Trägheitsmoment)

Die Kollisionsdauer wird nur dann richtig berechnet werden, wenn es sich um einen Stoß ohne Abgleiten handelt. Bei einem Stoß mit Abgleiten wird zwar die Struktursteifigkeit aus der Eindringung in Normalenrichtung im Rahmen der Idealisierungen richtig berechnet, nicht jedoch die Stoßdauer.

Die weiteren Überlegungen gehen wieder von einem Koordinatensystem aus, das im Kontaktpunkt liegt, das ist gleichzeitig der Massenmittelpunkt des Systems der beiden Federn. Der Massenmittelpunkt soll sich während des Stoßvorgangs in Ruhe befinden und die Fahrzeuge prallen mit ihrem reduzierten Massen gegeneinander. Die Lage des Massenmittelpunkts folgt aus: $m_1 \cdot l_1 = m_2 \cdot l_2$. Wenn der Massenmittelpunkt in Ruhe bleibt, dann kann man sich an dessen Stelle auch eine starre Wand denken, gegen die jedes Fahrzeug für sich stößt. Allerdings hat das Einzelfahrzeug eine Ersatzmasse und eine Ersatzfeder mit größerer Federsteifigkeit. Für diese Situation gilt beispielsweise für Fahrzeug 1:

$$c_{1E} = c_{\text{res}}\frac{l_1 + l_2}{l_1} = c_{\text{res}}\frac{m_{1\text{red}} + m_{2\text{red}}}{m_{2\text{red}}} \qquad \text{(A9-136)}$$

c_{1E} und $m_{1\text{red}}$ für c und m in Gl. (A9-135) eingesetzt ergibt die Dauer der Kompressionsphase:

$$t_K = \pi \cdot \sqrt{m_{\text{res}} / c_{\text{res}}} \qquad \text{(A9-137)}$$

mit:

$$m_{\text{res}} = \frac{m_{1\text{red}} + m_{2\text{red}}}{m_{1\text{red}} \cdot m_{2\text{red}}}$$

Analog ist für die Restitutionsphase vorzugehen.

Eine Alternative für die Berechnung der Stoßdauer ergibt sich aus der nachstehenden Formel:

$$t_K + t_{\text{Re}} = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{s_1 + s_2}{|v_{B1} - v_{B2}|} + \frac{s_1 - l_1 + s_2 - l_2}{|v'_{B1} - v'_{B2}|} \right) \qquad \text{(A9-138)}$$

v_B bzw. v'_B sind die Werte der Berührpunktsgeschwindigkeiten in Richtung der Stoßnormalen vor bzw. nach der Kollision. Die Formel (A9-138) folgt auch aus dem Federmodell und liefert im Fall einer linearen Kennlinie auch denselben Wert. Sie kann aber auch für den Fall einer selbst definierten Struktur angewendet werden. Der Faktor $\pi/2$ ist eine Folge der linearen

Kennlinie und wird im nichtlinearen Fall vermutlich zu vergrößern sein. Wird der Faktor $\pi/2$ verwendet, so bedeutet dies eine Änderung der Geschwindigkeit entsprechend einer Cosinus-Funktion: zu Beginn etwas weniger gegen Ende etwas mehr. Wird der Faktor 2 verwendet, so bedeutet dies eine Änderung der Geschwindigkeit entsprechend einer linearen Funktion also eine gleichmäßige Änderung.

Im Fall einer nicht linearen Deformation kann Formel (A9-139) näherungsweise verwendet werden, eine exakte Lösung ergibt sich jedoch nur, wenn die Kompressionsphase in die einzelnen Abschnitte unterteilt wird und die Dauer für jeden einzelnen berechnet wird. Für den Abschnitt mit negativer Steigung muss ein Iterationsverfahren angewendet werden.

Sofern eine Kollisionsdauer berechnet werden konnte, wird auch die mittlere Schwerpunktsbeschleunigung berechnet.

9.4 Strukturformeln

Es wurden drei Modelle entwickelt.

Das erste Modell kann unter der Bezeichnung massenproportionale Rückverformung verwendet werden. Der Grundgedanke ist der, dass die Rückfederungsrate weitgehend indirekt proportional zur Masse ist. Dies hätte zu Folge, dass die Berührfläche im mit dem Massenmittelpunkt mitbewegten Koordinatensystem relativ in Ruhe bleibt. Wird in einem solchen System der Energiesatz angewendet, so wird während der Kompression die gesamte kinetische Energie in Deformation umgewandelt und ist am Ende der Kompressionsphase dann 0. Anschließend fließt während der Rückverformung wieder Energie in das System zurück.

Die Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Körper am Ende der Restitutionsphase entspricht der aus der Kollisionsanalyse berechneten Trenngeschwindigkeit der Berührpunkte in Normalenrichtung ($\Delta v'_{Bn} = v'_{Bn\,1} - v'_{Bn\,2}$).

Wird ein linearer Kraft-Weg-Zusammenhang angenommen, so gilt:

Die Federkräfte im Kontaktbereich müssen zu jedem Zeitpunkt gleich groß sein (*actio = reactio*). Somit müssen die Reaktionskräfte (Trägheitskraft und Reifenkraft) an den anderen Enden der Federn gleich groß, entgegengesetzt wirkend und gleich den Federkräften sein. Für die Beträge gilt:

$$F = c_1 \cdot s_1 = m_1 \cdot a_{1\max} = c_2 \cdot s_2 = m_2 \cdot a_{2\max} \qquad \text{(A9-139)}$$

mit:

s	dynamische Deformation (Deformation am Ende der Kompressionsphase vor der Rückverformung)
l	bleibende Deformation
$a_{\max}$	maximal erreichte Beschleunigung

Die Deformationsarbeit aus der bleibenden Verformung folgt aus der Fläche, die durch die Federkennlinien eingeschlossen wird:

$$E_D = \frac{1}{2} c\, s\, l = \frac{1}{2} m\, \mathrm{EES}^2 \qquad \text{(A9-140)}$$

Die Restitutionsenergie ergibt sich aus:

$$E_{\mathrm{Re}} = \frac{1}{2} c\, s(s - l)$$

Aus (A9-139 und A9-140) folgt die maximale Beschleunigung am Ende der Kompressionsphase für jedes der beiden Fahrzeuge:

$$a_{\max 1} = \frac{EES_1^2}{l_1} \qquad \text{(A9-141)}$$

$$a_{\max 2} = \frac{EES_2^2}{l_2} \qquad \text{(A9-142)}$$

Aus (A9-140), (A9-141) und (A9-142) ergibt sich die bekannte Formel:

$$\frac{m_1 \; EES_1^2}{m_2 \; EES_2^2} = \frac{l_1}{l_2} \qquad \text{(A9-143)}$$

Aus der Gl. (A9-140) könnte die Federsteifigkeit berechnet werden, wenn die dynamische Deformation bekannt wäre. Die Abweichung zwischen dynamischer und bleibender Deformation kann gerade bei geringen Kollisionsgeschwindigkeiten erheblich sein und darf auf keinen Fall vernachlässigt werden.

Zur Berechnung der dynamischen Deformation wird von Bild A9-78 ausgegangen. Zur Ableitung der Gleichung wird ein, im gemeinsamen Massenmittelpunkt angebrachtes Koordinatensystem verwendet. Es wird dazu eine Transformation durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass gesagt werden kann:

Die kinetische Energie des Systems ist am Ende der Kompressionsphase gleich Null.

Die kinetische Energie am Ende der Restitutionsphase entspricht der Fläche unter der zur Restitutionsphase gehörenden Federkennlinie.

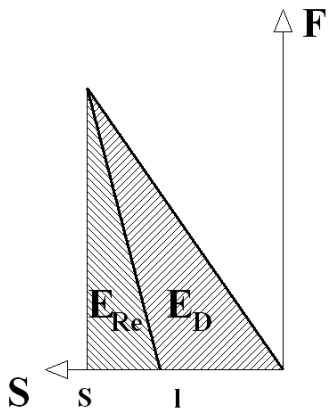


Bild A9-78 Deformations- und Restitutionsarbeit

Es gelten folgende Gleichungen, wobei für die Geschwindigkeiten im neuen Bezugssystem der Buchstabe *u* verwendet wird.

Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes:

$$v_m = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} \qquad \text{(A9-144)}$$

Schwerpunktsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge:

$$u_1 = v_1 - vm; \qquad u_2 = v_2 - vm \tag{A9-145}$$

$$u_1' = v_1' - vm; \qquad u_2' = v_2' - vm$$

Die Geschwindigkeitsdifferenzen bleiben von der Transformation unbeeinflusst.

9.4.1 Massenproportionale Rückverformung

Der Energiesatz lautet für die Restitutionsphase:

$$E_1 = \tfrac{1}{2}\, c_1\, s_1\, (s_1 - l_1) = \tfrac{1}{2}\, m_1\, u_1'^2 \tag{A9-146}$$

Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die Rückverformung der beiden Fahrzeuge so erfolgt, dass die Struktursteifigkeiten im Verhältnis zu den Massen stehen. Im Allgemeinen wird man dies wohl annehmen können. Eine Ausnahme könnte bei sehr niedrigen Kollisionsgeschwindigkeiten vorhanden sein, wenn ein Fahrzeug bereits teilplastisch und das andere aber noch elastisch deformiert wird.

Setzt man die Gln. (A9-144) und (A9-145) in (A9-146) ein, so erhält man nach einigen Umformungen folgende Formelvarianten zur Bestimmung der dynamischen Verformung und der Federsteifigkeit:

Dynamische Verformung:

$$s_1 = l_1 \left(\frac{m_2^2\, \Delta v'^2}{(m_1 + m_2)^2\, EES_1^2} + 1 \right) \tag{A9-147}$$

Federsteifigkeiten:

$$c_1 = \frac{(m_{red1} + m_{red2}) m_1^2 EES_1^4}{l_1^2 \left(m_{res} m_{red2} v_{Bn1}'^2 + (m_{red1} + m_{red2}) m_1 EES_1^2 \right)} \tag{A9-148}$$

Wenn, wie dies beim Impulsverfahren der Fall ist, die gesamte Deformationsenergie bekannt ist, so kann Formel (12) entsprechend umgeformt werden.

$$c_1 = \frac{(m_{red1} + m_{red2})\, (2\, E_D)^2}{(m_{res} m_{red2} v_{Bn1}'^2 (l_1 + l_2)^2 + (m_{red1} + m_{red2}) l_1 (l_1 + l_2) 2 E_D} \tag{A9-149}$$

Die Struktursteifigkeit von Fahrzeug 2 kann durch Austausch der Indices berechnet werden.

Die Anwendung der Formel bewirkt, dass von den Größen $\Delta v'_{Bn}$ und den sechs „Strukturgrößen“ nämlich EES_1, EES_2, l_1, l_2, c_1, c_2 zusätzlich zu $\Delta v'_{Bn}$ nur noch drei gegeben sein müssen, die zwei restlichen können berechnet werden.

9.4.2 Nicht massenproportionale Rückverformung

Lineare Kennlinie:

Wenn die Struktursteifigkeiten in der Restitutionsphase nicht zu den Massen der Fahrzeuge proportional sind, so können die einfachen Gln. (A9-146 und A9-147) nicht angewendet werden. Sie sind dann unter Umständen nicht mehr genau genug.

An Stelle von (A9-146) gilt dann:

$$E = ½\ c_1 s_1\ (s_1 - l_1) + ½\ c_2 s_2\ (s_2 - l_2) = ½\ m_1 u_1'^2 + ½\ m_2\ u_2'^2 \qquad \text{(A9-150)}$$

Wird der Impulssatz für die Auslaufphase $m_1\ u_1' = m_2\ u_2'$
und die Gleichung $\Delta v' = u_1' - u_2'$ angewendet, so gilt

$$½\ m_1\ u_1'^2 + ½\ m_2\ u_2'^2 = ½\ m_{res}\ \Delta v'^2$$

daraus folgt:

$$c_1 s_1\ (s_1 - l_1) + c_2 s_2\ (s_2 - l_2) = m_{res}\ \Delta v'^2 \qquad \text{(A9-151)}$$

aus (A9-140) folgt:

$$c_1\ s_1\ l_1 = m_1\ EES_1^2 \quad \text{und} \quad c_2\ s_2\ l_2 = m_2\ EES_2^2 \qquad \text{(A9-152a,b)}$$

außerdem gilt noch die Gl. (A9-140): $c_1 s_1 = c_2 s_2$

Mit den Gln. (A9-151), (A9-152a), (A9-152b) und (A9-140) stehen also vier Gleichungen für die acht Variablen c_1, s_1, l_1, EES_1, c_2, s_2, l_2, EES_2 zur Verfügung. Das heißt, für die Lösung müssen vier Variablen gegeben sein. Im Allgemeinen werden die dynamischen Deformationen (s) nicht gegeben sein, sodass von den übrigen sechs Variablen vier gegeben sein müssen, d. h. um eine mehr als im vorigen Modell. Außerdem ergibt sich aus den Gln. (A9-152a) und (A9-152b) mit Gl. (A9-140) die Beziehung (A9-142), sodass sich aus drei der vier Variablen m_1, EES_1, m_2, EES_2 die vierte berechnen lässt. Es dürfen somit nicht alle vier dieser Variablen gegeben sein, sondern muss immer zusätzlich eine Struktursteifigkeit gegeben sein.

Für die Berechnung ist es günstig, wenn aus Gl. (A9-151) die Variable s eliminiert wird:

$$\frac{m1^2\ EES1^4}{l1^2}\left(\frac{1}{c1} + \frac{1}{c2}\right) - m1\ EES1^2\left(1 + \frac{l2}{l1}\right) - m_{res}\ \Delta v'^2 = 0 \qquad \text{(A9-153a)}$$

In dieser Gleichung und analog als (A9-153b), die durch Vertauschen der Indizes entsteht, kommen fünf Variable vor, sodass wenn vier gegeben sind die fehlende berechnet werden kann, wobei wie oben erläutert zumindest eine Struktursteifigkeit gegeben sein muss. c_1 und c_2 können z. B. aus der Gl. (A9-154) berechnet werden.

$$c_1 = \frac{1}{\dfrac{\left(m_{res}\ \Delta v'_{Bn}{}^2 + m_1\ EES_1^2\left(1 + \dfrac{l_2}{l_1}\right)\right) l_1^2}{m_1^2\ EES_1^4} - \dfrac{1}{c_2}} \qquad \text{(A9-154)}$$

Eine nicht massenproportionale Rückverformung liegt z. B. dann vor, wenn sich ein Fahrzeug elastisch verhält und das andere aber verformt wird. Zu bedenken ist dann, dass auf Grund der elastischen Rückverformung des einen Fahrzeugs viel Bewegungsenergie in die Auslaufphase einfließt. Es ist daher dann zu prüfen, ob die in die Rechnung eingegebene Geschwindigkeitsdifferenz nach der Kollision $\Delta v'$ auch ausreichend groß gewählt wurde. Vor allem ist dies der Fall, wenn die Struktursteifigkeit des elastischen Fahrzeugs klein sein sollte. Wie Unfallversuche zeigten, sind aber selbst bei kleinen Geschwindigkeitsunterschieden kleine Deformationen zu erwarten. Auch zeigte es sich, dass, wenn die Deformation bei der Kollision zweier Fahrzeuge unterschiedlich war, bei dem wenig deformierten Fahrzeug die Struktursteifigkeit groß

war. Weil die Struktursteifigkeit während der Rückverformung ohnehin immer relativ groß ist, kann vermutet werden, dass die Annahme einer massenproportionalen Rückverformung meist zutreffend ist.

Die Anwendung der Formel bewirkt, dass von den Größen $\Delta v'_{Bn}$ und den sechs „Strukturgrößen“ zusätzlich zu $\Delta v'_{Bn}$ nur noch zwei gegeben sein müssen, die zwei restlichen können berechnet werden. Allerdings muss eine Struktursteifigkeit gegeben sein. Interessant ist aber, dass auf Grund der Nebenbedingungen, dass die dynamische Deformation nicht kleiner als die bleibende werden kann, für die mögliche Struktursteifigkeit ein relativ kleiner möglicher Bereich resultiert. Dieser Bereich ist umso kleiner, je kleiner $\Delta v'$ ist.

9.4.3 Definition einer Struktur mit nichtlinearer Kennlinie

In Fällen, wo sehr unterschiedliche Stoßpartner vorhanden sind, etwa bei Crash-Versuchen gegen eine starre Barriere, wird es notwendig sein, für ein Fahrzeug eine nicht lineare Kennlinie zu definieren. Dann kann aber nicht in jedem Fall von einem massenproportionalen Rückverformungsverhalten ausgegangen werden.

Bei einigen Crash-Tests wurde eine Beschleunigung (Kraft)-Zeit-Kurve gemessen, bei welcher auffällt, dass die Dauer bis zum Erreichen der maximalen Kraft nur wenig größer als die Dauer vom Maximum bis zum Erreichen des Wertes 0 ist. Da aus dem Schadensumfang ein weitgehend plastisches Verhalten anzunehmen ist, kann am höchsten Punkt das Ende der Kompressionsphase noch nicht erreicht worden sein. Der Flächeninhalt unter der Beschleunigung-Zeit-Kurve entspricht der Geschwindigkeitsänderung. Bei einer plastisch verlaufenden Kollision ist die Geschwindigkeitsänderung während der Kompressionsphase größer als während der Restitutionsphase. Die Restitutionsphase beginnt daher gegen Ende der Beschleunigung-Zeit-Kurve also in einem Punkt wo das Maximum bereits überschritten wurde. Dies kann nur erklärt werden durch einen Bereich der Kraft-Deformations-Kurve mit negativer Steigung beginnend am Maximum (**Bild A9-69**, **Bild A9-70**).

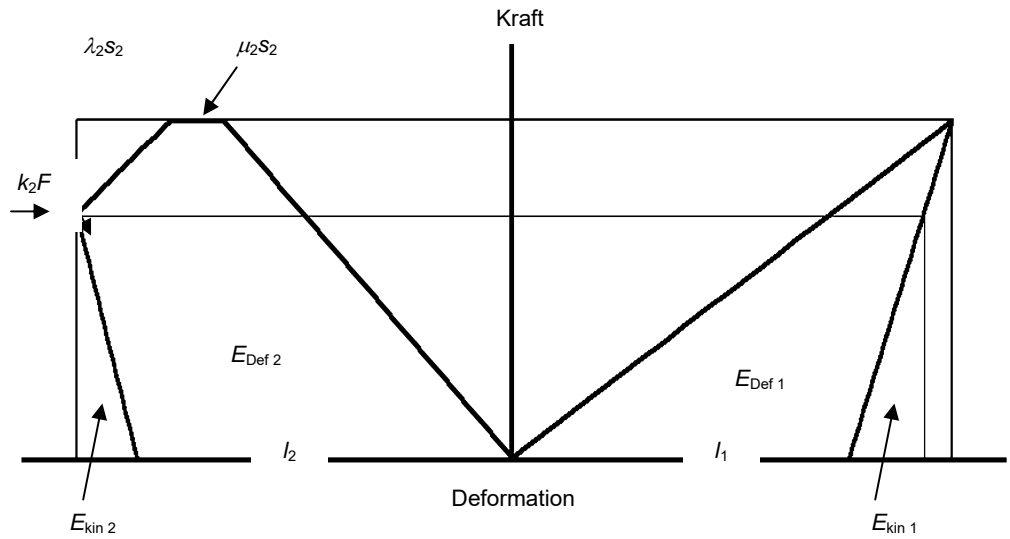


Bild A9-79 Kraft-Deformations-Zusammenhang für zwei Fahrzeuge

Während sich Fahrzeug „normal“ verhält, wird angenommen, dass Fahrzeug 2 am Ende der Kompressionsphase in einen Bereich kommt, wo die Struktur zusammenbricht. Es erscheint weitgehend unwahrscheinlich, dass genau bei der gleichen Kraft dies auch beim Kollisionspartner eintritt. Aus diesem Grund ist es vernünftig anzunehmen, dass der Kraftanstieg dieses Fahrzeugs durch eine lineare Funktion beschrieben werden kann. Auch bei diesem Fahrzeug kann es während der Deformation zu einem teilweisen Zusammenbruch der momentan beteiligten Struktur gekommen sein. Im Verlauf der weiteren Deformation wird jedoch wieder eine feste Struktur erreicht werden. Die lineare Funktion stellt als Approximation den durchschnittlichen Verlauf dar.

Bei einem Fahrzeug kann am Ende der Kompressionsphase ein Bereich erreicht werden, der durch eine lineare Funktion nur ungenau zu approximieren ist.

Für eine kurze Phase kann näherungsweise die Kraft konstant bleiben ($\mu_2 s_2$) und im Anschluss daran die Struktur instabil werden. Das bedeutet, die Kraft-Weg-Kennlinie bekommt eine negative Steigung (Abfall der Kurve bis k_2F). k_2F ist die Kraft am Ende der Kompressionsphase. Während des Abschnittes mit konstanter Kraft bei Fahrzeug 2 verweilt Fahrzeug 1 im höchsten Punkt der Kraft, dann tritt bei Fahrzeug 1 eine Rückverformung bis k_2F ein, während gleichzeitig Fahrzeug 2 sich weiter verformt. Da dies auf Kosten von Fahrzeug 2 erfolgt, wird die bei Fahrzeug 1 frei werdende Energie nicht in kinetische umgewandelt sondern für die Deformationsenergie von Fahrzeug 2 verwendet. Daher hat die Rückverformung bis k_2F keine Auswirkung auf die kinetische Energie nach der Kollision (Geschwindigkeitsdifferenz der Berührpunkte). In das System fließt daher nur die Energie zurück, die dem Flächeninhalt des kleinen rechtwinkeligen Dreiecks unterhalb von k_2F entspricht.

Bild A9-70 zeigt den Verlauf der Kraft als Funktion von der gesamten Deformation.

Die gesamte maximale Deformation ist etwas kleiner als die Summe der maximalen Deformation jedes einzelnen Fahrzeugs.

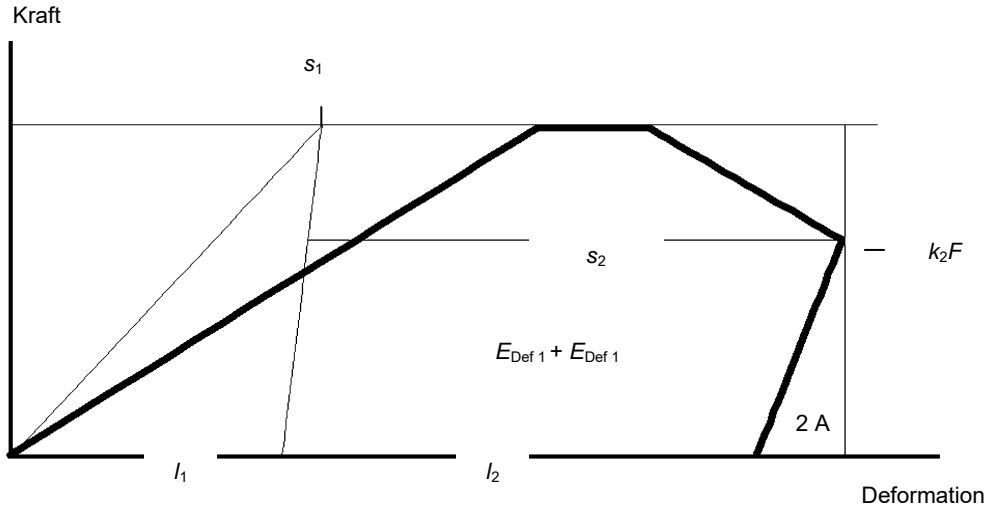


Bild A9-80 Resultierender Kraft-Deformations-Zusammenhang

Die Struktursteifigkeit von Fahrzeug 2 muss definiert werden. Möglich wäre der Anstieg vom Nullpunkt bis in die linke obere Ecke von **Bild A9-70**. Dies würde der durchschnittlichen Struktursteifigkeit entsprechen. Diese Definition entspricht aber nicht der Kraftzunahme bis zum Maximum der Kraft. Empfehlenswert ist daher als Definition der Anstieg an der Vorderseite der Kurve. In den nachstehenden Formeln entspricht c_2 dieser Definition. Der Unterschied liegt im nachstehend definierten Faktor d_2.

Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Beziehungen aufstellen:

Abkürzungen: $A = m_{\text{res}} \Delta v'_{Bn}{}^2$

$$d_2 = 1 - \lambda_2 - \mu_2$$

$$b_2 = 1 + \mu_2 + \lambda_2 k_2 - k_2$$

$$g_2 = 1 + \mu_2 + \lambda_2 k_2$$

Es gilt:

$$\boxed{E_{D1} = \frac{1}{2} c_1 s_1 l_1 = \frac{1}{2} m_1 \text{EES}_1{}^2 E_1 = c_1 s_1 l_1} \qquad \text{(A9-155)}$$

$$\boxed{E_{D2} = \frac{1}{2} c_2 s_2 d_2 (k_2 l_2 + b_2 s_2) = \frac{1}{2} m_2 \text{EES}_2{}^2 E_2 = c_2 s_2 d_2 (k_2 l_2 + b_2 s_2)} \qquad \text{(A9-156)}$$

$$c_2 d_2 s_2 = c_1 s_1 \quad \text{(Kräftegleichgewicht)} \qquad \text{(A9-157)}$$

$$A = k_2 c_1 s_1 (s_2 - l_2 + k_2 (s_1 - l_1)) \qquad \text{(A9-158)}$$

daraus folgt:

$$\boxed{\frac{E_1}{E_2} = \frac{m_1 \text{EES}_1{}^2}{m_2 \text{EES}_2{}^2} = \frac{l_1}{k_2 l_2 + b_2 s_2}} \qquad \text{(A9-159)}$$

zusätzlich muss gelten: $s_1 > l_1$ (analoge Bedingung für Fahrzeug 2)

daraus ergibt sich folgende Bedingung:

$$\frac{E_1 \; l_2 \; (k_2 + b_2)}{l_1} \le E_2 \le \frac{E_1 \; g_2 \; l_2 \; k_2 + A \; l_1 b_2}{l_1 \; (g_2 - b_2)} \qquad \text{(A9-160)}$$

Es gelten für jedes Fahrzeug weitere Bedingungen:

$$0 < (s_1 - l_1) \cdot c_1 \cdot s_1 < A$$

$$\frac{E_1{}^2}{l_1{}^2 \cdot c_1} - E_1 < A$$

Mit Hilfe der Gln. (A9-155) bis (A9-159) kann eine Gleichung aufgestellt werden, in welcher s_1 und s_2 eliminiert sind und zusätzlich noch eine der sechs Variablen c_1, l_1, E_1, c_2, l_2, E_2. Aus dieser Gleichung kann weiter aus vier bekannten Größen eine berechnet werden. Wenn l_1, E_1, l_2, E_2 gegeben sind, muss mit (A9-153) noch geprüft werden. Wenn E_2 auf den minimalen Wert gestellt wird, so erfolgt bei Fahrzeug 2 keine Rückverformung, wird der größtmögliche eingestellt, so erfolgt bei Fahrzeug 1 keine Rückverformung.

Zum Beispiel kann E_2 eliminiert werden:

$$A = k_2 \frac{E_1}{l_1}\left(\frac{E_1}{c_2\ l_1\ d_2} - l_2 + k_2\left(\frac{E_1}{c_1\ l_1} - l_1\right)\right) \qquad \text{(A9-161)}$$

oder c_2:

$$A = k_2 \frac{E_1}{l_1}\left(\frac{d_2 l_1 E_2 - k_2 l_2 E_1}{E_1 b_2} - l_2 + k_2\left(\frac{E_1}{c_1\ l_1} - l_1\right)\right) \qquad \text{(A9-162)}$$

Wird dieser Formelsatz in Zusammenhang mit dem Impulsverfahren verwendet, so ist zu berücksichtigen, dass das Impulsverfahren die gesamte Deformationsenergie *ED* liefert. Es ist somit $E_1 + E_2 = 2\ ED$ als Gleichung vorhanden. Es muss zusätzlich zu den Deformationen noch eine Struktursteifigkeit gegeben sein. Auch hier ist für die Struktursteifigkeit nur ein relativ kleiner Bereich möglich.

9.5 Berechnung des EES-Wertes aus Unfallversuchen

Ist von einem Fahrzeug aus Crash-Versuchen der Kraftverlauf bekannt, so kann, wenn die reale Unfallsituation mit der Testsituation hinsichtlich des Schadensbildes einigermaßen übereinstimmt, mit Vorsicht die daraus abzuleitende lineare Approximation (Federmodell) verwendet werden. Mit Hilfe der obigen Formeln kann aus der Testgeschwindigkeit die Struktursteifigkeit berechnen und aus der Deformation der EES-Wert ausgerechnet werden.

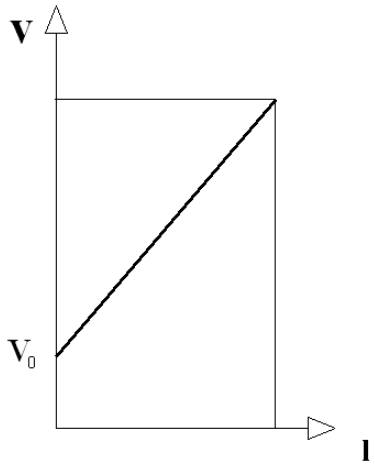


Bild A9-81 Zusammenhang Kollisionsgeschwindigkeit-Deformation

Ein anderer Weg wird nachstehend dargestellt:

Ausgehend von realen Unfallversuchen mit verschiedenen Kollisionsgeschwindigkeiten gegen eine starre Barriere, wo ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen dieser Geschwindigkeit und der bleibenden Deformation festgestellt werden kann, ergibt sich folgender Ansatz:

Ist von der Rückverformung nichts bekannt, dann kann aus v und *l* nicht die Struktursteifigkeit und auch nicht der EES-Wert berechnet werden.

Bei einer hohen Anprallgeschwindigkeit ist der EES-Wert nur wenig kleiner als die Anprallgeschwindigkeit. Wenn die dynamische Deformation (*s*) aus der Rückfederungsrate abgeschätzt werden kann, so lassen sich beide Werte berechnen.

$$v(l) = v_0 + c_1\ l \qquad \text{(A9-163)}$$

mit:

v_0 Geschwindigkeit ohne bleibende Deformation
c_1 Steigungsfaktor
l bleibende Deformation

Ist durch einen Crash-Versuch ein Wertepaar v_{test}, l_{test} festgestellt worden, so lässt sich c_1 ausrechnen:

$$c_1 = \frac{v_{test} - v_0}{l_{test}} \qquad \text{(A9-164)}$$

Der Zusammenhang Kraft – bleibende Deformation kann, wenn (1) linear ist, ebenfalls linear approximiert werden:

$$F(l) = F_0 + c_2\, l \qquad \text{(A9-165)}$$

Für die dynamische Deformationsenergie gilt:

$$E = \int_0^s F(l)\, ds = m_{test}\, v^2 \qquad \text{(A9-166)}$$

substituiert:

$$ds = \frac{d}{dl} s(l)\, dl$$

Für s und v werden später die Testergebnisse eingesetzt.

Nimmt man für $s(l)$ eine lineare Funktion an, so kann Letzteres ersetzt werden durch

$$s = c_3\, l + s_0 \qquad \text{(A9-167)}$$

$$\Rightarrow \quad ds = c_3\, dl$$

mit:

s_0 elastische Grenze der Verformung
c_3 Steigungsfaktor

Somit ergibt sich mit (A9-165):

$$E = \int_{-s_0/c_3}^{(s-s_0)/c_3} F(l)\, c_3\, dl = c_3\, (F_0\, l + \frac{1}{2} c_2\, l^2)\Big|_{-s_0/c_3}^{(s-s_0)/c_3} = \frac{1}{2} m v^2$$

Somit ergibt sich:

$$c_3(F_0((s - s_0) / c_3 + s_0 / c_3) + ½\, c_2\, (((s - s_0) / c_3)^2 - (s_0 / c_3)^2) =$$
$$= ½\; m_{test}\; (v_0^2 + 2\, v_0\, c_1\, l + c_1^2\, l^2) \qquad \text{(A9-168)}$$

s ersetzt durch (A9-167) und ein durchgeführter Koeffizientenvergleich liefert:

$$F_0 = \frac{m_{test}\; c_1\; v_0}{c_3} \qquad \text{(A9-169)}$$

$$c_2 = \frac{m_{test}\; c_1^2}{c_3} \qquad \text{(A9-170)}$$

$$F_0\, s_0 - ½\, c_2 / c_3\, s_0^2 = ½\, m_{test}\, v_0^2 \qquad \text{(A9-171)}$$

(A9-169) und (A9-170) eingesetzt in (A9-171) liefert die quadratische Gleichung für s_0:

$$c_1^2\, s_0^2 - 2\, v_0\, c_1\, c_3\, s_0 + c_3^2\, v_0 = 0$$

mit der einzigen Lösung

$$s_0 = \frac{c_3\ v_0}{c_1} \qquad \text{(A9-172)}$$

Für c_3 gilt wegen (A9-167):

$$c_3 = \frac{s_{test}}{l_{test}\ v_0 / c_3} = \frac{s_{test}}{l_{test}} (1 - \frac{v_0}{v_{test}}) \qquad \text{(A9-173)}$$

Als Richtwert gilt für v_0 etwa 4 bis 6 km/h, wenn die Stoßstange getroffen wurde.

Bei einer Rückfederungsrate von 5 % bis 10 % und einem Wert von v_0 von 4 km/h, einer Testgeschwindigkeit von 50 km/h ergibt sich für $c_3 = 0{,}97 - 1{,}01$.

$$s_0 = s_{test}\ \frac{v_0}{v_{test}} \qquad \text{(Größenordnung: 4 bis 5 cm)}$$

$$c_2 = \frac{m_{test}\ (v_{test} - v_0)\ v_{test}}{l_{test}\ s_{test}} \qquad \text{(Größenordnung: 750 kN/m)}$$

$$F_0 = \frac{m_{test}\ v_0\ v_{test}}{s_{test}} \qquad \text{(Größenordnung: 35 kN)}$$

Die tatsächlichen Werte der obigen Größen können von der angegebenen Größenordnung mitunter deutlich abweichen. Es ist die Fahrzeugkonstruktion im deformierten Bereich von entscheidender Bedeutung.

Mit Hilfe der daraus bestimmten Koeffizienten lässt sich die Kraftfunktion in Abhängigkeit von l aufstellen.

$$F(l) = \frac{m_{test}\ v_0\ v_{test}}{s_{test}} + \frac{m_{test}\ (v_{test} - v_0)\ v_{test}}{l_{test}\ s_{test}}\ l = \frac{m_{test}\ v_{test}}{s_{test}}\ (v_0 + \frac{(v_{test} - v_0)}{l_{test}} l)$$

Für die bleibende Deformationsenergie gilt nach (A9-140)

$$E_{Def} = ½\ F\ l = ½\ m\ EES^2$$

und somit

$$EES^2 = \frac{F\ l}{m} \qquad \text{(A9-174)}$$

Für F eingesetzt:

$$EES^2 = \frac{l}{m_G} (\frac{m_{test}\ v_{test}}{s_{test}} (v_0 + (v_{test} - v_0) \frac{l}{l_{test}}) \qquad \text{(A9-175)}$$

9.6 Crash-Tests

9.6.1 Aus ams

Aus ams wurden einige Crash-Tests herausgesucht, bei denen die Fahrzeuge mit rund 55 km/h und 50 % Überdeckung gegen einen Betonblock gefahren wurden. Die Daten sind nachfolgend zusammengestellt:

Tabelle A9.7 Versuchsdaten

	VW Sharan	BMW 528 i	Fiat Bravo	Ford Escort
ams Heft Nr.	18/96	14/96	8/96	8/96
Crash-Gewicht in kg	2030	1830	1275	1281
Aufprallgeschwindigkeit in km/h	54,6	55,1	54,7	54,5
Deformationsweg gesamt in cm	70	66	77	65
Radstandsverkürzung links in cm	21	30	32	26
Mittlere Struktursteifigkeit in kN/m	860	900	450	620

9.6.2 Eigene Versuche zur HWS-Problematik

Nachdem 1994 und 1995 ein Verfahren zur Berechnung und Beurteilung von HWS-Verletzungen entwickelt und in der Fachzeitschrift Verkehrsunfall + Fahrzeugtechnik veröffentlicht worden war, wurden zur Absicherung von Randbereichen von Dr. Burg und Dr. Gratzer fünf Versuche mit Kollisionsgeschwindigkeiten unterhalb von 10 km/h durchgeführt. Nach sorgfältiger Datenerfassung konnten auch hier die Struktursteifigkeiten berechnet werden. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Die gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Werten der Beschleunigungen und Stoßzeiten mit den berechneten bestätigen die Richtigkeit des Modells.

Tabelle A9.8 Versuchsdaten

Nr.	Fahrzeug	v_{Koll} (km/h)	l_{def} (cm)	c (kN/m)	$a_{berechnet}$ (m/s²)	$a_{gemessen}$ (m/s²)	$t_{berechnet}$ (s)	$t_{gemessen}$ (ms)
	BMW 325i	0	2,5	200	6,8	7,0		
	BMW 525i	4,2	0	750	–9,5	–		
	VW Scirocco	0	0,5	920	12,0	–		
	BMW 325i	4,20	2,3	400	–14,0	–23,0		
	Ford Escort	0	1,1	250	5,0	5,3		
	Opel Kadett C	2,20	0,4	350	–5,5	–5,5		
	Ford Escort	0	5,5	420	26,0	27,0		
	Opel Kadett C	8,30	1,4	1.040	–30,0	–		
	Opel Kadett C	0	0,3	300	2,9	3,2		
	Opel Omega A	1,05	0,2	470	–2,1	–2,0		

Wie die Ergebnisse zeigen, liegen die Struktursteifigkeiten auch im extrem niedrigen Geschwindigkeitsniveau in einem Bereich von 200 bis 1.000 kN/m. Die großen Werte traten dort auf, wo sich ein Fahrzeug relativ stark elastisch verhielt.

9.6.3 Dekra-Versuche

Es wurde eine Reihe von Versuchen durchgerechnet. Mit freundlicher Genehmigung der DEKRA Automobil GmbH wird hier ein Versuch vorgestellt.

Tabelle A9.9 Versuchsdaten

Marke:	VOLKSWAGEN	JETTA	
Art:	Pkw		
Länge:	4.315 m	Leermasse:	960,0 kg
Breite:	1.665 m	Gesamtmasse:	1.045,0 kg
Radstand:	2.460 m	EES-Masse:	970,0 kg
Überhang:	0,800 m		
v_{Koll}	0 km/h	v_{Ausl}	11 km/h

Tabelle A9.10 Versuchsdaten

Marke:	VOLKSWAGEN	JETTA	
Art:	Pkw		
Länge:	4.330 m	Leermasse:	918,0 kg
Breite:	1.665 m	Gesamtmasse:	1.036,0 kg
Radstand:	2.475 m	EES-Masse:	1.036,0 kg
Überhang:	0,810 m		
v_{Koll}	19 km/h	v_{Ausl}	6 km/h

Das Ergebnis der UDS-Messung ist aus **Bild A9-82** zu entnehmen.

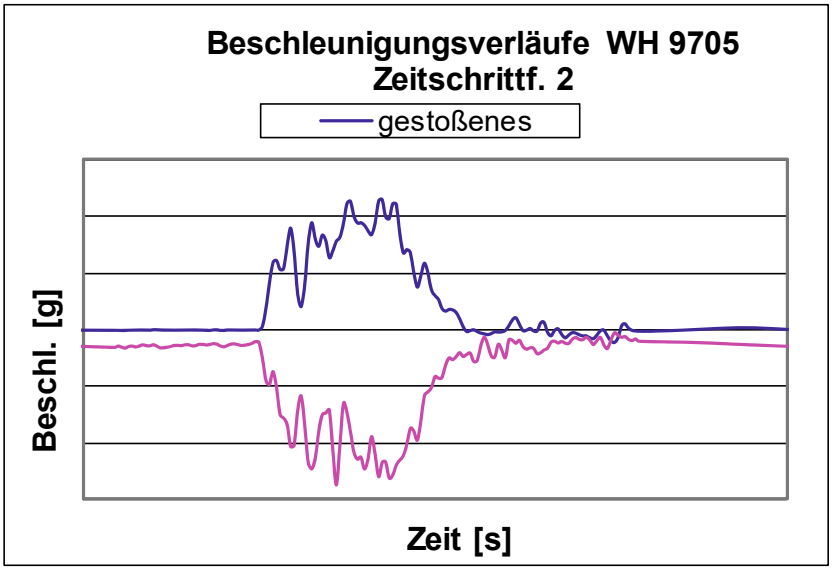


Bild A9-82 Aus der Filmauswertung wurde die gesamte dynamische Deformation mit rund 24 cm herausgemessen

Das Ergebnis der Berechnung zeigt mit den Messungen eine gute Übereinstimmung.

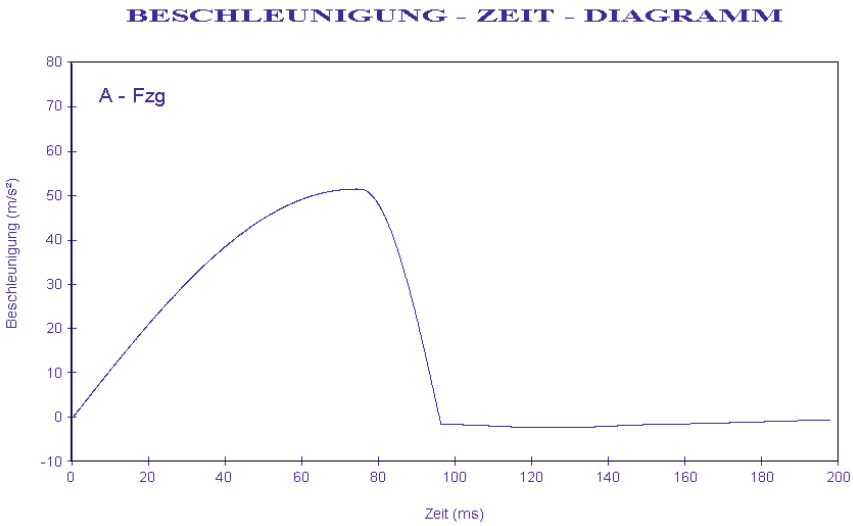


Bild A9-83 Berechneter Beschleunigungsverlauf des gestoßenen Fahrzeugs

SV-Büro Gratzer — GA-Nr.: WH9705n1

Serienkollision

<< 2 1 3 4 5 6 7 8 >>

Vor Koll.Daten

Fahrzeug: 2 1 3 4

Bremsverz.(Kol.):	0,56	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	m/s²
Auslaufverz:	0,56	3,20	0,00	0,00	0,00	0,00	m/s²
Geschw.Diff. nach Koll:	5,00		0,00		0,00		km/h
Endabstand:	**7,72**		0,00		0,00		m
	Heck	Front	Heck	Front	Heck	Front	
EES-Wert:	**7,84**	**9,74**	0,00	0,00	0,00	0,00	km/h
bleibende Def.:	9,00	13,00	0,00	0,00	0,00	0,00	cm
Strukturhärte:	550,0	**392,2**	0,0	0,0	0,0	0,0	kN/m
Koll.Geschw.:	0,00	**18,99**	0,00	0,00	0,00	0,00	km/h
Auslaufgeschw.:	**11,00**	**6,00**	0,00	0,00	0,00	0,00	km/h
Geschw.Änd.:	**11,00**	**-12,99**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	km/h
max.Koll.Beschl.:	**52,12**	**-57,73**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	m/s²
max. Deform.:	**9,92**	**13,92**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	cm
Geschw.Diff. vor Koll:	**18,99**		**0,00**		**0,00**		km/h
K-Wert:	**0,26**		**0,00**		**0,00**		
Kollisionsdauer:	**96**		**0**		**0**		ms

Bild A9-84 Berechnungsmaske für Serienkollisionen (Die Ergenisse der Rechnung sind fett gedruckt. Die übrigen Werte sind in Normalschrift dargestellt.)

Tabelle A9.11 Weitere Versuche lieferten als Ergebnis für die Struktursteifigkeiten (kN/m)

Fahrzeug 1	Fahrzeug 2
430	275
550	475
900	745
620	265
550	760
360	900

9.6.4 Schlussbemerkung

Es kann also für Pkws angenommen werden, dass die Struktursteifigkeit normalerweise in einem Bereich von 200 bis 1.200 kN/m liegt, wobei in wenigen und begründbaren Fällen auch höhere Werte anzutreffen sind. Der Mittelwert liegt bei rund 700 kN/m. Die untere Grenze wird bei einer sehr weichen Struktur und Teilüberdeckung, die obere Grenze bei einer sehr harten Struktur und voller Überdeckung anzunehmen sein.

Der rechnerische Einfluss einer definierten Struktur gegenüber der rein linearen ist nicht besonders groß, deutlich ist aber die Auswirkung auf die Kollisionsdauer.

A10 Fußgängerunfälle

Jörg Ahlgrimm, Dr. Heinz Burg, Jürgen Dettinger, Dr. Andreas Moser

1 Einleitung

1.1 Unfallarten

Fußgänger können auf sehr verschiedene Arten verunfallen. Fußgänger können ohne Beteiligung anderer Verkehrsteilnehmer stürzen, sie können wegen Unebenheiten stolpern oder gegen Hindernisse laufen. Auch Fußgänger/Fußgänger-Kollisionen oder Fußgänger/Fahrrad-Kollisionen haben unter Umständen ernsthafte Folgen. Meistens sind jedoch von den Sachverständigen die Kollisionen von Fußgängern mit Kraftfahrzeugen zu rekonstruieren. Allgemein kann unter einem Fußgängerunfall jeder Körperkontakt eines Fußgängers mit unbewegten oder bewegten Hindernissen verstanden werden. Dabei können verschiedenste Formen auftreten, die durch die in der **Tabelle A10.1** aufgeführten Merkmale beschrieben werden können:

Tabelle A10.1 Merkmale von Fußgängerunfällen

	Fußgänger/-in	**Kontaktpartner**
Bewegungsart	– Stillstand – stationäre Bewegung – Beschleunigung – Verzögerung	– Verzögerung – stationäre Bewegung – Beschleunigung – Stillstand
Bewegungsrichtung	– Zum Hindernis hin – Vom Hindernis weg	– Stillstand – Vorwärtsfahrt – Rückwärtsfahrt – Schleudern – Überschlag
Kontaktart, Kollisionsart, Ort des Kontakts	– Körper voll getroffen – Körper teilweise getroffen – Streifkollision – Überrollen – Überfahren	– frontal – hinten – seitlich – unten – oben

Grundlegende Aufgabe bei der Rekonstruktion eines Fußgängerunfalls ist seine genaue Einordnung in das nachstehende Schema, da die verschiedenen Arten von Fußgängerunfällen auch nach verschiedenen Rekonstruktionsmethoden verlangen. Hierzu muss jedoch erwähnt werden, dass die Grenzen nicht scharf sind, so dass eine klare Zuordnung in Einzelfällen erschwert sein kann oder manchmal sogar unmöglich.

Anfahren an der Front

Beim Anfahren an der Front wird zwischen dem vollen Frontalzusammenstoß und dem teilweisen Frontalzusammenstoß bzw. Streifstoß unterschieden.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_10

Voller Frontalzusammenstoß

Der gesamte Körper des Fußgängers befindet sich innerhalb des Fahrzeugumrisses vor dem Fahrzeug und wird beim Zusammenstoß auf dessen Geschwindigkeit beschleunigt.

Teilweiser Frontalzusammenstoß, Streifstoß

Beim teilweisen Frontalzusammenstoß befindet sich der Körper des Fußgängers im Gegensatz zum vollen Frontalzusammenstoß nicht vollständig innerhalb des Fahrzeugumrisses. Die Grenzen zwischen einem teilweisen Frontalzusammenstoß und einem Streifstoß sind fließend. Beim Streifstoß ist in den sich in den Fahrzeugumriss hineinbewegenden und in den sich herausbewegenden Fußgänger zu unterscheiden.

Gebremster Vollstoß

Unterscheidung in Kontakt-, Transport-, Flug- und Rutschphase mit der Möglichkeit von Folgekollisionen.

Ungebremster Vollstoß

Folgende Konstellationen sind möglich:

1. Der Fußgänger wird aufgeladen, fährt den ungebremsten Weg mit, löst sich bei Beginn der Bremsung und wird nach vorne geschleudert. Die Gesamtwurfweite ist damit größer als beim gebremsten Stoß.
2. Der Fußgänger wird aufgeladen und fällt dann seitlich vom Fahrzeug herunter. Seine Endlage ist meist hinter der Endstellung des Fahrzeugs. Hier kann die Wurfweite keine Aussage über eine mögliche Kollisionsgeschwindigkeit machen, wenn die Endlage vor Bremsbeginn liegt.
3. Wird der Fußgänger über das Dach geworfen, so ist die Wurfweite nahezu mit der des gebremsten Anstoßes identisch.
4. Beim Stoß des Fußgängers gegen die Außenkante des Fahrzeugs erfolgt keine Mitnahme des Fußgängers, sondern ein Stoß zur Seite, so dass Aussagen über die Kollisionsgeschwindigkeit kaum möglich sind.

Sich hineinbewegender Fußgänger

Der seitlich auf das Fahrzeug zukommende Fußgänger wird beim Anstoß entweder im Randbereich der Fahrzeugfront getroffen oder er bewegt sich gegen den seitlichen Bereich des Fahrzeugs. Oft wird er nur an dem Bein getroffen, mit dem er den letzten Schritt gemacht hat. Die beim Anstoß auf den Fußgänger übertragene Energie wandelt sich überwiegend in Rotationsenergie um, was zu einer Drehung um seine Längsachse führt. Aufgrund der Eigenbewegung des Fußgängers zum Fahrzeug hin, ist ein Entlanggleiten an der Fahrzeugseite die Folge, was zu weiteren Fahrzeugschäden und Fußgängerverletzungen führt. Ferner beugt sich sein Oberkörper, auch infolge der Eigenbewegung über den Kotflügel und die Motorhaube, so dass die oberen Körperteile während des Entlanggleitens an der Fahrzeugseite häufig noch in Kontakt mit dem Rahmen der Windschutzscheibe, der Scheibe selbst oder mit der vorderen Ecke des Fahrzeugdaches kommen.

Der Körperschwerpunkt fällt nach dem Anstoß der Schwerkraft folgend nach unten, so dass die Intensität des Aufpralls auf die Fahrbahn, wegen der geringeren Fallhöhe, gegenüber dem vollen Frontalzusammenstoß geringer ist.

Sich herausbewegender Fußgänger

Bei dieser Art des Zusammenstoßes gelingt es dem Fußgänger fast vollständig den Gefahrenbereich zu verlassen. Häufig befindet sich nur noch ein Bein innerhalb der Fahrzeugkontur. Durch den Anstoß erhält der Fußgänger eine Drehung um seine Längsachse. Aufgrund der Eigenbewegung des Fußgängers vom Fahrzeug weg, kommt es nicht zu weiterem Kontakt mit dem Fahrzeuge.

Achsparallel gehender Fußgänger

Fußgänger, der sich parallel zur Fahrtrichtung bewegt, das kann in Fahrtrichtung oder entgegengesetzt zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs sein.

Beim teilweisen Frontalzusammenstoß mit einem achsparallel gehenden Fußgänger ist die Aufprallkinematik ähnlich wie beim teilweisen Frontalzusammenstoß mit einem hineingehenden Fußgänger Die Besonderheit liegt darin, dass er hier auf das Fahrzeug aufgeworfen werden kann. Jedoch kommt es nicht zu einer Anhebung des Körpers. Auch hier fällt der Körperschwerpunkt nach dem Anstoß eher nach unten.

Seitliches Streifen

Beim seitlichen Streifen kommt der Fußgänger allein mit der Fahrzeugseite in Kontakt. Man unterscheidet ein typisches und ein atypisches seitliches Streifen.

Seitliches Streifen liegt vor, wenn der Fußgänger hinter der Fahrzeugfrontlinie mit der Fahrzeugseite in Kontakt kommt. Er kann sich aus beliebiger Richtung auf das Fahrzeug zu bewegen oder sogar stehen. Dauer und Intensität des Kontakts hängen primär von seiner Bewegungsgeschwindigkeit ab. Infolge des seitlichen Streifens wird der Fußgänger zur Seite und nach vorne geschleudert, wo er hinter der Fahrzeugfrontlinie zum Liegen kommt.

Zum atypischen seitlichen Streifen kommt es, wenn ein stehender oder sich parallel zur Fahrtrichtung bewegender Fußgänger nur von seitlich herausragenden Fahrzeugteilen (Spiegel, Ladung u. a.) getroffen wird und durch diese vom Fahrzeug weggestoßen wird, so dass es nicht zu weiteren Kontakten mit der Fahrzeugseite kommt.

Überfahren/Überrollen

Überfahren oder Überrollen hat im Grunde die gleiche Bedeutung. In der Fachliteratur findet sich der Vorschlag von Überfahren dann zu sprechen, wenn der Fußgänger unter das Fahrzeug gerät, aber von keinem Rad überrollt wird. Überrollen wird dann gebraucht, wenn der Fußgänger tatsächlich von mindestens einem Rad überrollt wird.

Fährt ein Fahrzeug mit wenigstens einem Rad über den Körper eines Fußgängers hinweg, so spricht man von überrollen.

Unterschieden wird ferner in einfaches und kompliziertes Überfahren/Überrollen: Wird ein auf der Fahrbahn liegender Fußgänger, der nicht durch vorherigen Kontakt mit einem Fahrzeug zum Liegen kam, überfahren, so spricht man von einfachem Überfahren.

Kommt dagegen ein Fußgänger durch den Anstoß mit einem Fahrzeug zum Liegen und wird danach von demselben oder einem anderen noch überfahren, so handelt es sich um ein kompliziertes Überfahren.

Der Fall, dass der Fußgänger durch dasselbe Fahrzeug umgestoßen und überfahren wird ist selten. Überwiegend tritt er bei kastenförmigen Fahrzeugen mit geringer Bremsverzögerung auf bzw. wenn kleine Kinder auf voller Körperhöhe erfasst werden.

1.2 Definitionen

Für die Rekonstruktion von Fußgängerunfällen werden Ergebnisse aus Versuchsreihen mit Dummys oder aus der Auswertung realer Unfälle verwendet. Eine der wichtigsten Größen ist die „Wurfweite“. Sie ist als Abstand zwischen der Kollisionsstelle und der Endlage des Fußgängers definiert.

Der Begriff „Wurfweite“ ist ein terminus technicus, der einen Vorgang beschreibt, der mit dem **Bild A10-1** erläutert wird. Die Wurfweite setzt sich zusammen aus der Kontaktphase (Berührbeginn mit Aufladen und Abschleudern bis Kontaktende), der Flugphase, eventuell aus einer Transportphase und der Rutschphase. Da es kein Wort in der deutschen Sprache für diesen komplexen Vorgang gibt, hat man sich auf das Wort „Wurfweite“ geeinigt, wohl wissend, dass dieses von seiner Bedeutung her nur für die Flugphase angewendet werden dürfte.

Im so genannten Wurfweitendiagramm wird die Wurfweite über der Kollisionsgeschwindigkeit aufgetragen. Die ersten in der Literatur veröffentlichten Diagramme stammen von Elsholz aus dem Jahr 1969 sowie von Kühnel und Rau, die in den 1970er Jahren publiziert wurden. Später folgten diverse weitere Publikationen, mit denen die Fortschritte bei den Erkenntnissen von verschiedenen Autoren mitgeteilt wurden (z. B. [11, 12]). Die Wurfweitendiagramme werden in der Unfallforschung und in der forensischen Gutachterpraxis genutzt, um bei bekannter Kollisionsstelle und Endlage des Fußgängers die Kollisionsgeschwindigkeit einzugrenzen. Außer diesen sehr bedeutsamen Wurfweitendiagrammen wurden und werden aus den Versuchen diverse weitere Erkenntnisse über den Ablauf von solchen Unfällen gewonnen. Diese Ergebnisse sind mit spezifischen Bezeichnungen und Definitionen behaftet; einige besonders häufig vorkommende werden nachstehend erläutert.

Längswurfweite

Abstand zwischen der Schwerpunktsposition des Fußgängers bei Kollision und in der Endlage, gemessen in Fahrtrichtung des Fahrzeugs (Bezugspunkt ist der Schwerpunkt des Fußgängers).

Querwurfweite

Abstand zwischen der Position des Fußgängers bei Kollision und in der Endlage, gemessen quer zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs (Bezugspunkt ist der Schwerpunkt des Fußgängers).

Längsrutschweite

Abstand zwischen der Position des Fußgängers beim Auftreffen auf der Fahrbahn und seiner Endlage, gemessen in Fahrtrichtung des Fahrzeugs (Bezugspunkt ist der Schwerpunkt des Fußgängers).

Querrutschweite

Abstand zwischen der Position des Fußgängers beim Auftreffen auf der Fahrbahn und seiner Endlage, gemessen quer zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs (Bezugspunkt ist der Schwerpunkt des Fußgängers).

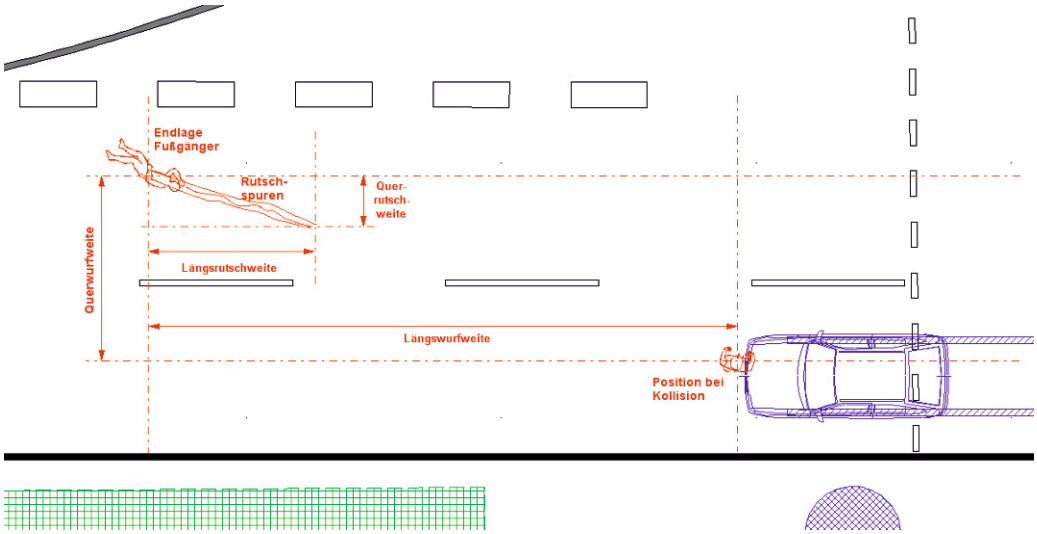


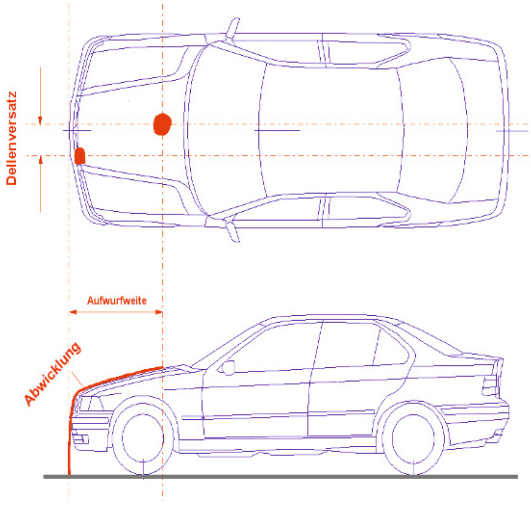
Bild A10-1 Definition der Wurf- und Rutschweiten

Dellenversatz (oft auch Beulenversatz genannt)

Abstand zwischen einer deutlichen Eindellung an der Fahrzeugfront (vorzugsweise Motorhaube vom Kontakt mit Bein oder Hüfte) und der Kopfaufprallstelle (auf der Motorhaube, der Frontscheibe oder dem oberen Dachrahmen), gemessen quer zur Fahrzeugslängsachse.

Aufwurfweite

Abstand zwischen der Erstkontaktstelle an der Fahrzeugfront und der Mitte der Kopfaufschlagstelle, gemessen in horizontaler Richtung.



Abwicklung:
Längenmaß, das mit einem Maßband von der Fahrbahnoberfläche, senkrecht unter der Erstkontaktstelle an der Fahrzeugfront, und der Mitte der Kopfaufschlagstelle gemessen werden kann.

Transportstrecke:
Distanz, über die ein Fußgänger auf dem Fahrzeug transportiert wird, wenn der Fahrzeuglenker nach der Kollision nicht bremst.

Bild A10-2 Definition Dellenversatz, Aufwurfweite und Abwicklung

2 Kinematik

Der Bewegungsablauf bei Kollisionsgeschwindigkeiten von Fußgängern mit Pkw oder Pkw-ähnlichen Fahrzeugen wurde ausführlich in [2] und in anderen Publikationen beschrieben und wird allgemein in vier Phasen gegliedert:

Tabelle A10.2 Phasen eines Fußgängerunfalls

Kontaktphase:	Reicht vom Beginn des Anstoßes bis zu der Situation, bei welcher der Fußgänger entweder in etwa die Fahrzeuggeschwindigkeit angenommen hat oder es zum Ablösen des Fußgängers vom Fahrzeug kommt. Die Phase kann unterglie-dert werden in:
	– Anstoß Beine/Becken (1. Beschleunigung), – Aufschaufeln, Aufschlag Rumpf/Kopf (2. Beschleunigung) und eventuell sich anschließende Transportstrecke.
Transportphase:	Falls der Fahrzeuglenker nach der Kollision nicht bremst, dann kann es bei manchen Fahrzeugtypen sein, dass der Fußgänger auf der Motorhaube oder auf dem Dach mittransportiert wird, bis der Fahrzeuglenker doch bremst oder bis das Fahrzeug aus anderer Ursache zum Stillstand kommt oder bis der Fußgänger aufgrund der Schwerkraft vom Fahrzeug herunterfällt.
Flugphase:	Reicht vom Ablösen des Fußgängers bis zum Aufprall auf oder neben der Fahrbahn, oder: freier Flug, Fahrzeugberührung durch einzelne Körperteile während des Flugs möglich und schließlich Aufprall auf oder neben der Fahrbahn.
Rutschphase:	Reicht vom Aufprall auf oder neben der Fahrbahn bis zur Endlage des Fußgängers.

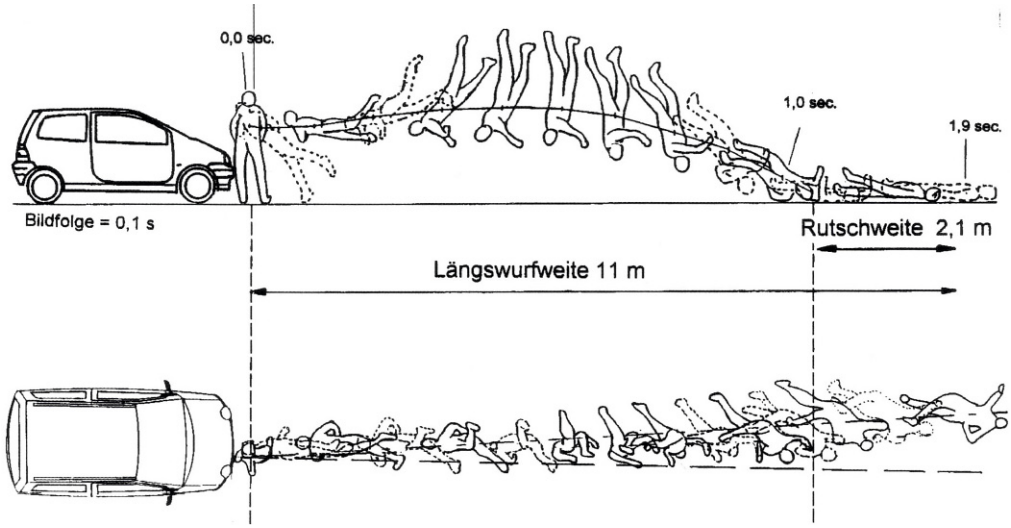


Bild A10-3 Bewegungsablauf des Fußgängerdummys bei einem Versuch in drei Phasen (ohne Transportphase)

2.1 Kontaktphase

Die Kontaktphase wird in einzelne Bereiche untergliedert. Unterschiedliche Anstoßkonstellationen und deren Einflüsse auf die nachfolgenden Bewegungsphasen können damit besser diskutiert werden:

- Primäranstoß mit Anprall des Unterschenkels,
- Unterzieheffekt des Fußes und Unterschenkels mit Rotation im Fußgelenk,
- Rotationsbewegung des Gesamtkörpers über die Fahrzeugfrontfläche und Belastung des Kniegelenkes,
- Anlage von Oberschenkel/Becken mit Aufschöpfen des Fußgängers,
- Oberkörper- und Kopfanprall auf der Fronthaubenfläche bzw. Windschutzscheibe,
- Aufschlag auf dem Fahrzeugdach mit dem ganzen Körper oder nur mit einzelnen Körperteilen,
- Ablösen des Fußgängers vom Fahrzeug.

2.2 Primärkontakt/Erstkontakt

Der Primärkontakt (bei $t = 0$ ms) findet meist an der Stoßstange statt (bei ins Fahrzeug hineinlaufenden Fußgängern kann das anders sein). Der Fußgänger wird im Bereich der Unterschenkel getroffen. Wo genau, hängt von der Art und Form der Frontkontur des Fahrzeugs ab und auch von der Größe des Fußgängers (z. B. Kind oder Erwachsener).

Bei einem sehr flachen Fahrzeug (z. B. Sportwagen) wird der Unterschenkel getroffen, danach beginnt bereits der Aufladevorgang. Beim Primärkontakt wird in diesem Fall nur ein Teil der Bewegungsenergie des Fahrzeugs auf den Fußgänger übertragen.

Bei einem pontonförmigen Pkw erfolgt bei einem Erwachsenen der Primärkontakt zwischen der Mitte des Unterschenkels und dem Knie. Die genaue Position ist von der konkreten Fahrzeugkontur und von der eventuellen Abbremsung des Fahrzeugs abhängig.

Fast zeitgleich kommt es auch zu einem Kontakt im Bereich des Oberschenkels durch die Haubenvorderkante. In diesem Fall wird schon deutlich mehr Bewegungsenergie als beim Primärkontakt übertragen.

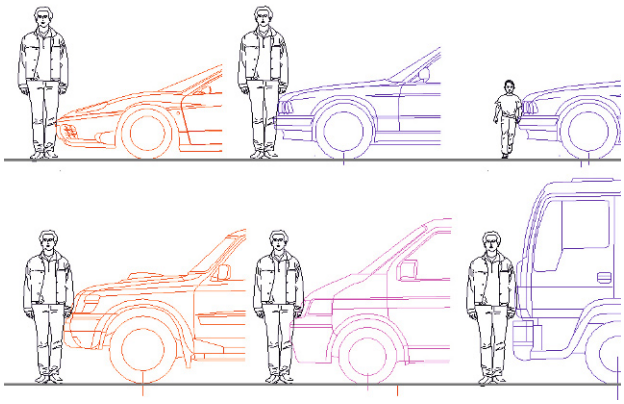


Bild A10-4 Kollisionskonfigurationen

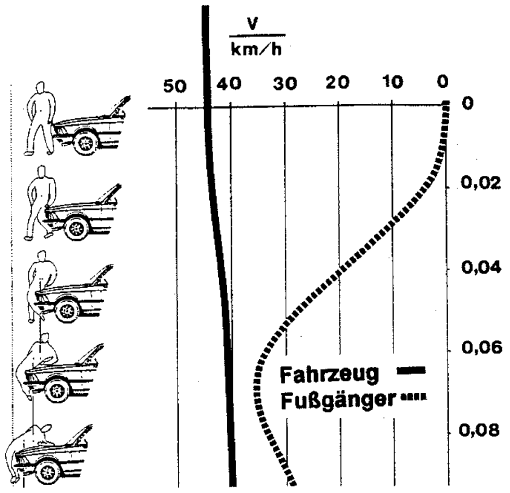


Bild A10-5 Beispielhafter Geschwindigkeitsverlauf während Primärkontakt

Bei Kindern kann bereits jetzt der ganze Körper erfasst werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die Bewegungsenergie des Pkw bereits beim Erstkontakt auf den Fußgänger überträgt.

Bei Geländewagen, Transportern und erst recht bei Nutzfahrzeugen wird der gesamte Körper von Fußgängern beim Primärkontakt getroffen.

Die erste Beschleunigung während des Primärkontakts dauert 0,06 bis 0,18 s je nach der Kollisionskonfiguration (Fahrzeugkontur, Fußgängerabmessungen).

2.3 Unterzieheffekt

Weil die Füße oder ein Fuß das Körpergewicht des Fußgängers auf der Fahrbahn abstützen, können die Beine unterhalb der Knie unter das Fahrzeug gezogen werden. Das führt zu erheblichen Biegebeanspruchungen der Unterschenkelknochen sowie zu Verdrehungen der Fuß- und der Kniegelenke. Die Beine können sich an der Frontschürze, am Kennzeichen oder an anderen geeigneten Blechteilen verhaken, wodurch die Füße mitgeschleift werden. In der Folge kann es zu entsprechenden Verletzungen kommen.

2.4 Rotationsbewegungen

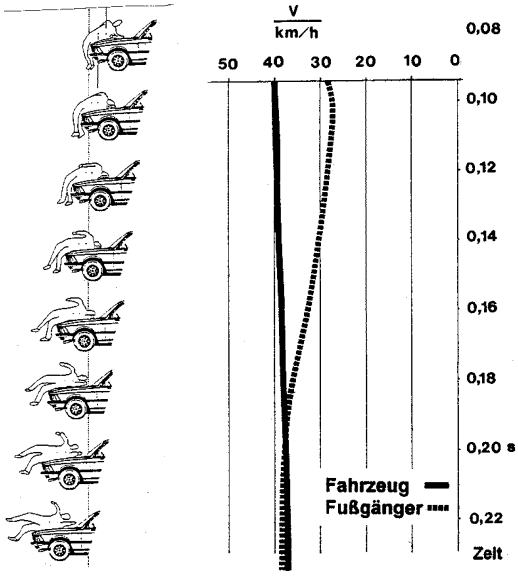
Sofern der Anstoß unterhalb des Schwerpunkts erfolgt, kommt es zu einer Rotation des Fußgängerkörpers, die von dem Hebelarm zwischen Kontaktkraft und Körperschwerpunkt, der Reibkraft an den Füßen des Fußgängers und von der Kollisionsgeschwindigkeit abhängt.

Wegen der Massenträgheit und der Elastizität der getroffenen Körperteile setzt die Drehbewegung einige Millisekunden nach der Erstberührung ein. Der Fußgänger kann sich um die Kontaktstelle und die horizontalen Achsen durch Drehgelenke der Körperteile drehen, er kann auch auf die Frontstruktur aufgleiten und schlägt schließlich auf die Fronthaube, die Windschutzscheibe oder gegen den oberen Dachrahmen.

Abhängig davon, an welchem Bein der Fußgänger zuerst berührt wird, wie dieses Bein gerade orientiert ist (vorne, mittig oder hinten) und ob es sich um das Spielbein oder das Standbein handelt, wird auch eine Drehung um die Körperhochachse eingeleitet. Dadurch kann sich der Oberkörper nach vorne oder nach hinten verlagern. Da diese Drehung die translatorische Bewegung des Fußgängers überlagert, kann es sein, dass z. B. die Vorwärtsbewegung verstärkt oder auch reduziert/neutralisiert oder sogar in eine Rückwärtsbewegung umgewandelt werden. Dieser Umstand bedeutet, dass die in [2] u. a. vorgeschlagenen Diagramme, mit denen die Bewegungsgeschwindigkeit des Fußgängers von dem Versatz zwischen Hüft- und Kopfaufschlagstelle abgeleitet werden können soll, nicht mehr als zutreffend angesehen werden kann.

2.5 Aufschöpfen oder Aufladen

Beim Aufschöpfen oder Aufladen wirkt die Kontaktkraft auf den Rumpf und den Kopf des Fußgängers beim Aufprall auf die Motorhaube und/oder auf den Windschutzscheibenbereich. Es findet eine Bewegung relativ zur Fronthaube in Richtung Frontscheibe statt.



Diese zweite Beschleunigungsdauer beträgt abhängig von der Fahrzeugkontur und Anstoßgeschwindigkeit und der daraus resultierenden Rotationsgeschwindigkeit 80 bis 280 ms.

Den Zeitraum zwischen Erstanstoß des äußeren Verkehrsteilnehmers und dem Lösen vom Fahrzeug nennt man Kontaktdauer. Während dieser Kontaktdauer legt das Fahrzeug den so genannten Kontaktweg zurück (DIN 75 204).

Am Ende der Kontaktphase hat der Fußgänger in etwa die Geschwindigkeit des Fahrzeugs erreicht.

Bild A10-6 Aufladen bei einem Unfallversuch, Dauer 80 bis 280 ms

Bei gebremsten Anstößen ist die Fußgängergeschwindigkeit ca. 0,2 s nach der Kollision meist höher als die Fahrzeuggeschwindigkeit (**Bild A10-7**). Bei ungebremsten Anstößen oder bei sehr geringer Verzögerung ist es möglich, dass die Fußgängergeschwindigkeit nicht die Fahrzeuggeschwindigkeit erreicht und der Fußgänger sich relativ zum Fahrzeug über das Dach nach hinten bewegt (**Bild A10-8**). Es kann dann auch sein, dass der Fußgänger über eine längere Strecke (Transportstrecke) mitgenommen wird (**Bild A10-9**).

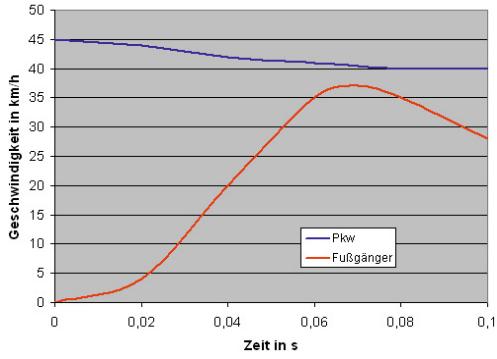


Bild A10-7 Geschwindigkeitsverlauf bei ungebremstem Anstoß

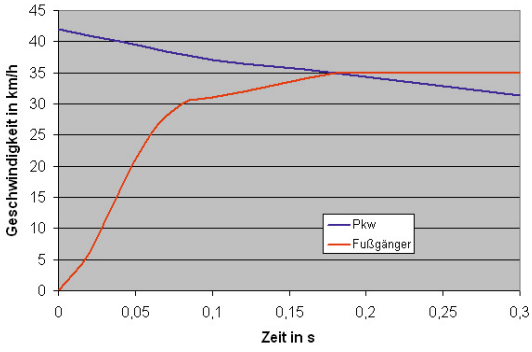


Bild A10-8 Geschwindigkeitsverlauf bei gebremstem Anstoß



Bild A10-9 Fußgänger wird etwa 120 ms lang auf dem Dach des Pkw transportiert, weil der Pkw nach der Kollision nicht sofort abgebremst wird

2.6 Flugphase

Die Flugphase beginnt mit dem Lösen des Fußgängers vom Fahrzeug am Ende des Aufschaufelns und endet mit dem Beginn der Rutschphase. Der Beginn der Rutschphase kann im realen Unfallgeschehen nur mit Hilfe von Spuren, die der Fußgänger auf der Fahrbahn hinterlässt, bestimmt werden. Bei der Filmauswertung von Crash-Versuchen ergibt sich im Geschwindigkeitsverlauf des Fußgängers eine abrupte Änderung durch den Aufprall des Fußgängers auf der Fahrbahn (**Bild A10-8**). Wie der Steigung dieses Kurvenverlaufs zu entnehmen ist, findet wegen der dynamischen Normalkrafterhöhung ein kurzzeitig stärkerer Geschwindigkeitsabbau statt.

Die Flugdauer und die Flugweite sind im Wesentlichen abhängig von der Abwurfgeschwindigkeit und dem Abwurfwinkel. Versuchsauswertungen bei Kollisionsgeschwindigkeiten von 33 bis 49 km/h ergaben Flugdauern von 0,45 bis 0,7 s. Während des Fluges war eine Verzögerung von 0,75 bis 1,8 m/s^2 für den Fußgänger auswertbar.

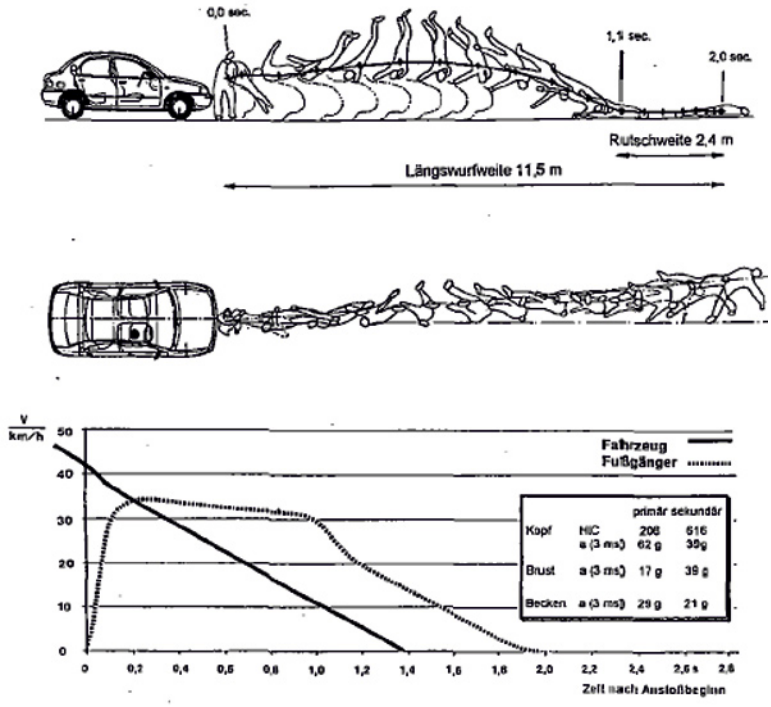


Bild A10-10 Bewegungs- und Geschwindigkeitsverlauf des Fußgängers

Wird das Fahrzeug abgebremst, so kann sich der Fußgänger während der Flugphase vom Fahrzeug nach vorne entfernen. Ab Geschwindigkeiten von 75 km/h konnte bei Versuchen beobachtet werden, dass der Dummy über das Dach von Pkw geschleudert wurde und hinter dem Pkw zur Endlage kam [12]. Bei anderen Versuchen mit bis zu 90 km/h wurde kein Überfliegen des Dachs durch den Dummy festgestellt [13]. Bei nach der Kollision nicht gebremsten Fahrzeugen kann ein Fliegen oder Rutschen über das Dach schon ab 50 km/h beobachtet werden.

2.7 Rutschphase

Die Rutschphase beginnt mit dem Aufprall eines Körperteils auf der Fahrbahn und erstreckt sich bis zur Endlage des Fußgängers (Bezugspunkt ist der Schwerpunkt). Während der Rutschphase können weitere kurzzeitige Flugphasen auftreten.

Die Dauer der Rutschphase ist abhängig von der Fußgängergeschwindigkeit beim Auftreffen auf der Fahrbahn, vom Abwurfwinkel und der Art des Auftreffens auf der Fahrbahn. In welcher Körperhaltung der Dummy auf der Straße aufschlägt, unterliegt keiner erkennbaren Systematik.

Die Auswertung von sieben Versuche mit demselben Dummy bei ähnlichen Kollisionsgeschwindigkeiten ergaben Rutschweiten von 2,0 bis 5,9 m mit zugehörigen Rutschdauern von 0,71 bis 1,24 s, was einer mittleren Rutschverzögerungen von 7,2 bis 8,2 m/s^2 entspricht.

Offenbar kommt es je nach Art des Aufpralls des Dummys auf die Fahrbahn zu unterschiedlichen Rutschverzögerungen und dadurch bedingt zu unterschiedlichen Rutschweiten bei gleicher Aufprallgeschwindigkeit.

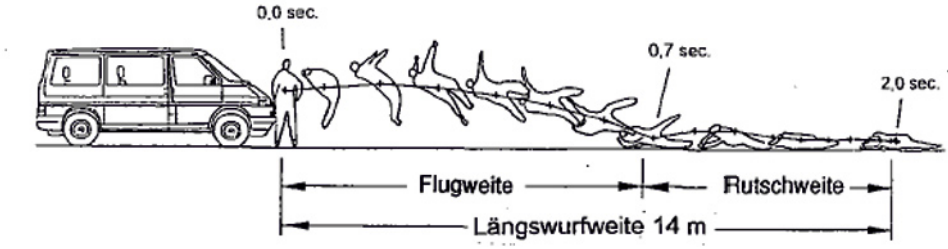


Bild A10-11 Flug- und Rutschweite bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h

Bei realen Unfällen lassen sich erste Aufprallspuren des Fußgängers auf der Fahrbahn (z. B. Blutspuren, Hautabschürfungen, Kleidungsspuren) nur schwer ermitteln, so dass die Rutschweite zur Rekonstruktion oft nicht zur Verfügung steht. Trotzdem gibt es Ergebnisse aus den Dummyversuchen und auch aus der Auswertung realer Unfälle. Die beiden folgenden Diagramme zeigen Ergebnisse über Rutschweiten und über Rutschverzögerungen.

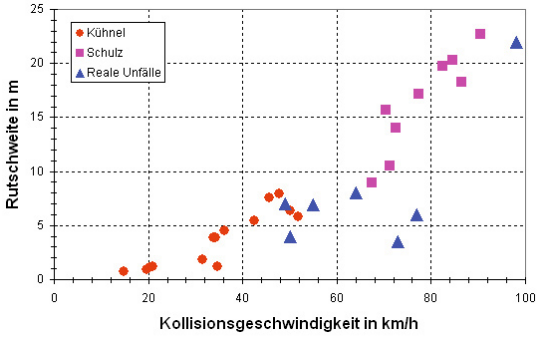


Bild A10-12 Längsrutschweiten aus Dummyversuchen [12] und realen Unfällen (IbB)

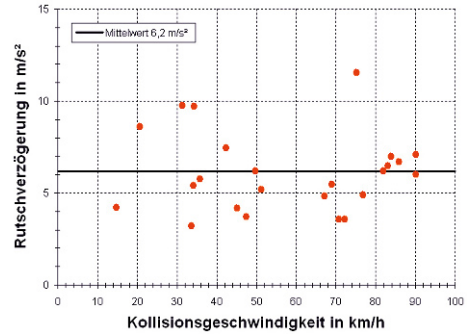


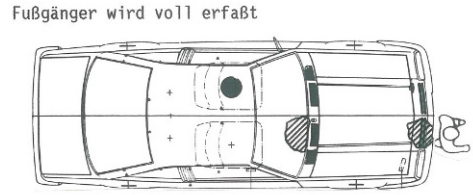
Bild A10-13 Rutschverzögerung von Dummys über der Kollisionsgeschwindigkeit nach [12]

2.8 Wurfweite

Die Längswurfweite ist die wichtigste und zuverlässigste Kennzahl zur Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeit. Sie ist von Körpermerkmalen des Fußgängers offenbar unabhängig, d. h., Größe und Gewicht des Fußgängers beeinflussen die Gesamtwurfweite nur wenig, es ändert sich lediglich die Aufteilung in Flug- und Rutschweite, die bei realen Unfällen aber ohnehin meist nicht ermittelt werden kann.

2.9 Längswurfweite beim vollen Frontalzusammenstoß

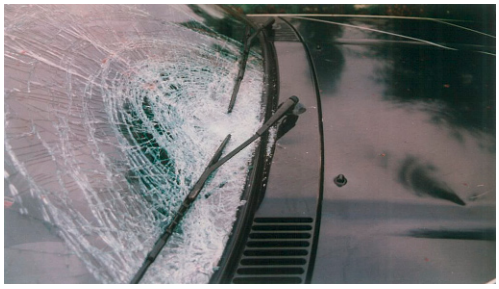
Der volle Frontalzusammenstoß zeigt Merkmale, wie aus den folgenden Bildern aus einem realen Unfall zu entnehmen:



Pkw Opel Manta, Gewicht beim Unfall 1.115 kg, Fahrer unverletzt.
Fußgängerin 52 Jahre alt, Kontaktmerkmale an der Hose hinten, Verletzungen am Hinterkopf mit Todesfolge.
Anstoßstelle durch Unstetigkeit in der Bremsspur definiert.







Längswurfweite	26,5 m
Querwurfweite	3,5 m
Längsrutschweite	8,2 m
Querrutschweite	1,8 m
Kollisionsgeschwindigkeit ca.	64 km/h
Bremsverzögerung ca.	7 m/s^2

Bild A10-14 Beispiel eines Fußgängerunfalls mit voll erfasstem Fußgänger

Über Untersuchungen zu diesem Unfalltyp mit Dummys wird z. B. in [11, 12, 14] berichtet. Dort findet man auch weiterführende Literaturangaben. Bei der Anwendung dieser Versuchsergebnisse ist darauf zu achten, dass die Bedingungen beim realen Unfall hinreichend genau den Versuchsbedingungen entsprechen. Folgende Randbedingungen müssen erfüllt sein:

- Der Fußgänger muss voll getroffen sein.
- Der Anstoß erfolgt nicht im Außenbereich der Fahrzeugfront.
- Der Anstoß erfolgt mit einem Pkw oder einem Transporter.
- Die Verzögerung des Fahrzeugs muss größer als 4,5 m/s^2 sein.
- Der Anstoß muss mit einem vor oder unmittelbar nach Kollision gebremsten Fahrzeug erfolgen und die Bremsung muss durchgehend bis zum Stillstand fortgesetzt worden sein.
- Bei sehr kleinen Kindern, die von Fahrzeugen mit hoher Stoßstange und hohem Stoßpunkt getroffen werden, ergeben sich geringere Wurfweiten.
- Die Endlage des Fußgängers muss vor der Front des zum Stillstand gekommenen Fahrzeugs sein.

Sind diese Bedingungen erfüllt, kann nach [12] für Kollisionsgeschwindigkeiten bis 90 km/h die folgende Regressionsgleichung zur Berechnung der Längswurfweite angewendet werden:

$$s_{W\,\text{–längs}} = 0,0052 \cdot v^2 + 0,0783 \cdot v$$

mit:

s Längswurfweite in m
v Anstoßgeschwindigkeit in km/h mit einer Toleranz von +/–5 km/h

Diese Regressionsgleichung liefert eine gute Annäherung an die Versuche mit Dummys. Die Kollisionsgeschwindigkeit lässt sich damit bei bekannter Wurfweite über den Geschwindigkeitsbereich von 10 bis 90 km/h mit einer Genauigkeit von ± 5 km/h bestimmen. Wahrscheinlich gilt diese Regressionsgleichung auch für noch höhere Kollisionsgeschwindigkeiten (bisher aber nicht untersucht).

Nachstehend sind die meisten bisher publizierten Versuche mit Dummys in einem Diagramm (**Bild A10-15**) zusammengestellt.

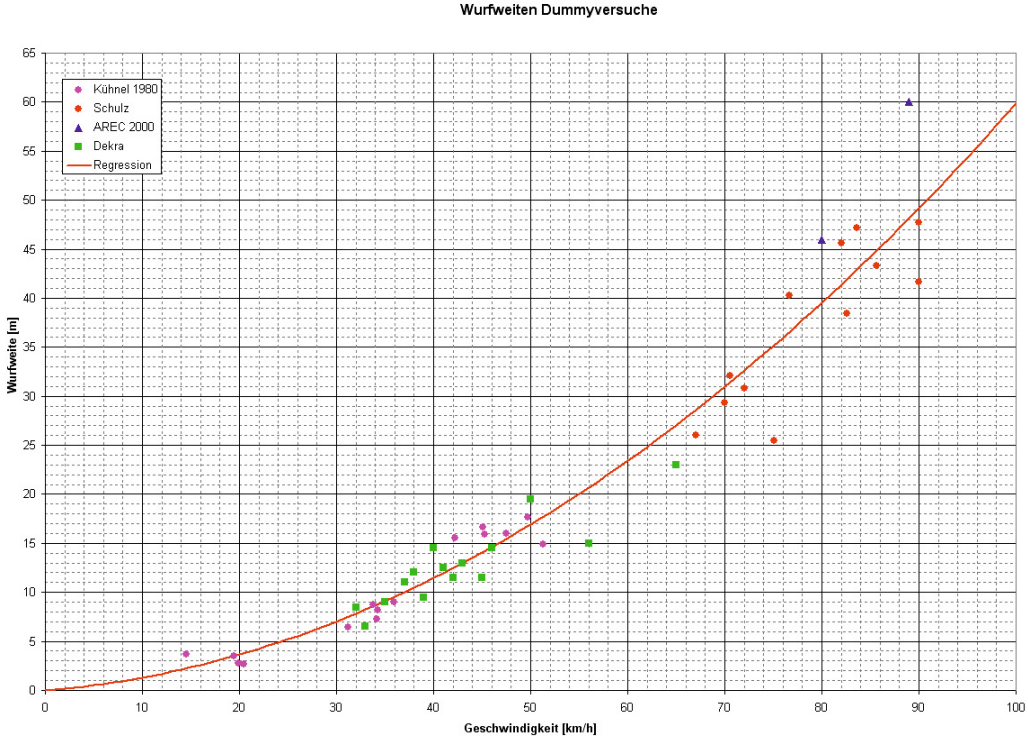


Bild A10-15 Längswurfweiten aus Dummyversuchen nach verschiedenen Quellen und Regressionsgleichung eingezeichnet

Nicht nur Versuche liefern Erkenntnisse über die Längswurfweiten, sondern auch die Auswertung hinreichend gut dokumentierter realer Unfälle. Hinreichend gut bedeutet, dass der Ort der Kollision bekannt sein muss, die Kollisionsgeschwindigkeit, die Verzögerung des Fahrzeugs, die Endlage des Fußgängers und gegebenenfalls die Aufschlagstelle auf der Fahrbahn sowie

Daten über das Fahrzeug und den Fußgänger. Solche realen Unfälle liegen den Autoren von DEKRA und IbB Forensic vor. Die Auswertungsergebnisse aus den realen Unfällen wurden in die Ergebnisse aus den Dummy-Versuchen eingetragen (**Bild A10-16**). Dabei zeigt sich, dass beide Datenquellen ähnliche Werte liefern, so dass die oben erwähnte Regressionsgleichung auch dafür angewendet werden kann. Man kann auch sagen, dass bei der Wurfweite ein Unterschied zwischen Dummy und Mensch nicht feststellbar ist.

Von IbB-Forensic wurden auch reale Unfälle ausgewertet, bei denen die Fußgänger in das Fahrzeug hineinliefen und die aus dem Fahrkanal herausliefen als es zur Kollision kam.

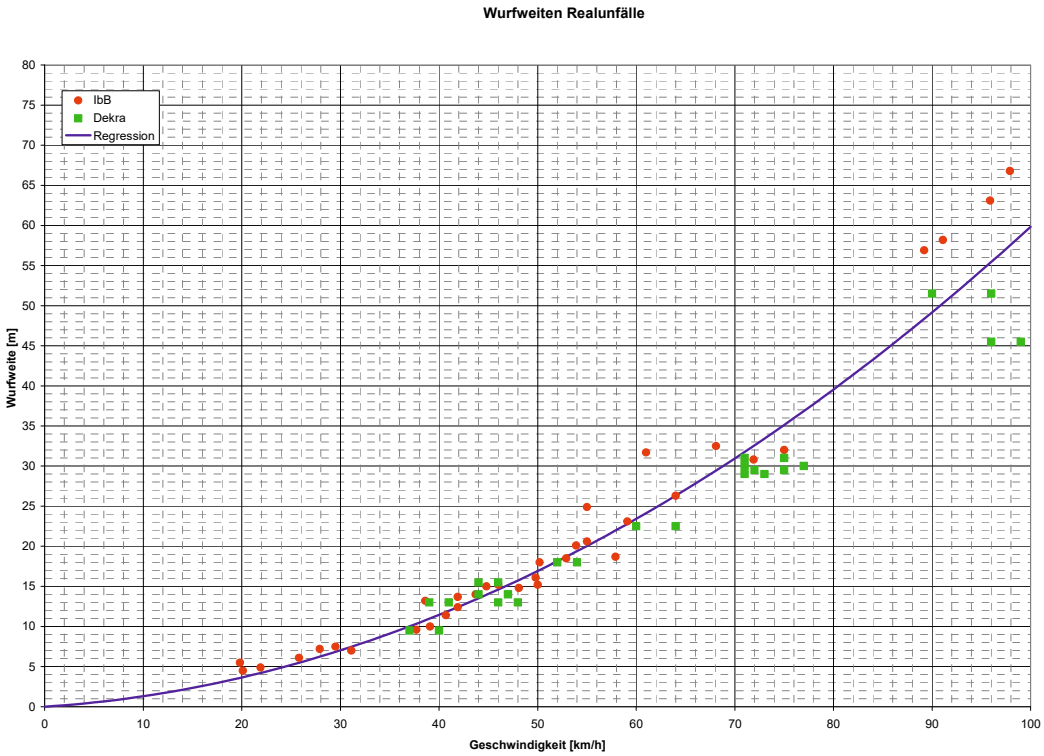


Bild A10-16 Längswurfweiten aus realen Unfällen nach verschiedenen Quellen und Regressionsgleichung eingezeichnet

Die Validierung des Fußgängermodells in PC-Crash [14] hat gezeigt, dass die Dummy-Versuche mit hinreichender Genauigkeit nachgerechnet werden konnten. Somit steht ein Werkzeug zur Verfügung, das Parametervariationen für alle entscheidenden Einflussfaktoren erlaubt. Insbesondere können die unterschiedlichen Karosserieformen, der Einfluss des Bremsnickens und der Einfluss seitens des Fußgängers untersucht werden. Das folgende **Bild A10-17** zeigt die Ergebnisse der Dummy-Versuche, der realen Unfälle und der Simulationsergebnisse für ausgewählte Fahrzeugformen. Es ist ersichtlich, dass die Berechnungsergebnisse die richtigen Tendenzen und Werte für die Längswurfweite liefern.

Insbesondere Einzelzeiten wie z. B. die Zeit bis zum Schulteraufschlag oder bis zum Kopfaufschlag auf der Motorhaube oder der Windschutzscheibe können durch Simulationsberechnung sehr gut ermittelt werden.

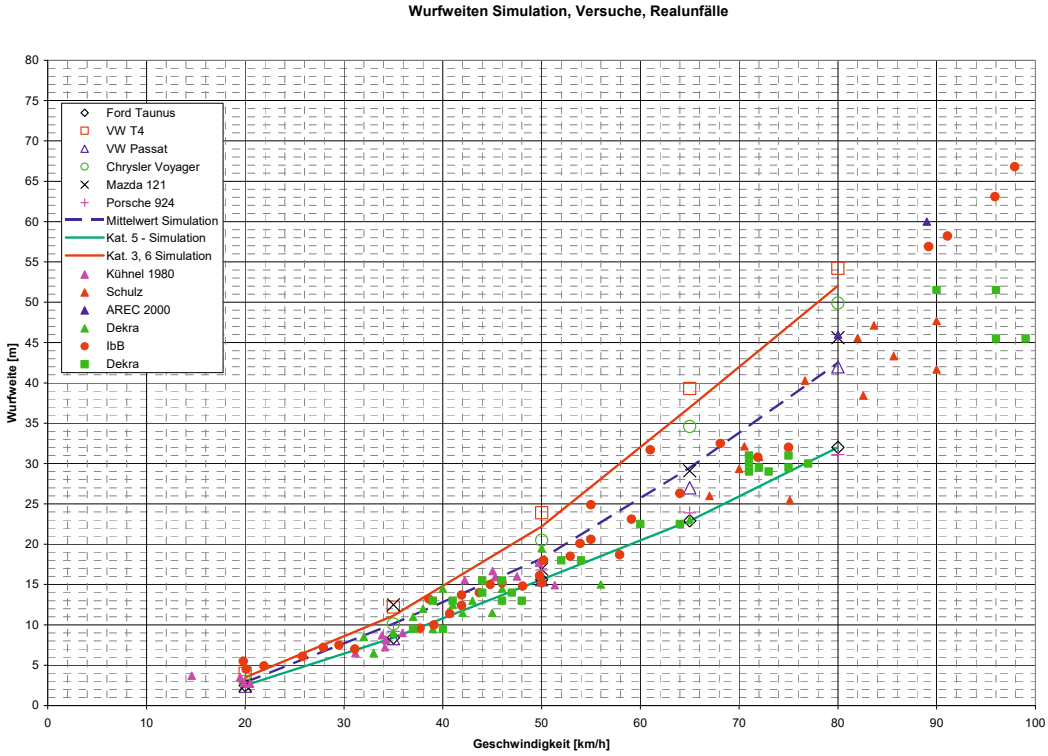
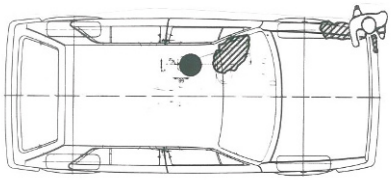


Bild A10-17 Längswurfweiten aus Dummyversuchen und aus realen Unfällen im Vergleich zu Simulationsergebnissen mit PC-Crash

2.10 Längswurfweite bei hinein- oder herauslaufendem Fußgänger

Bei diesen Unfalltypen werden die Fußgängerkörper nur teilweise erfasst, ohne dass bisher angegeben werden kann, wie sich das mit der anteiligen getroffenen Masse des Fußgängers auswirkt. Die entsprechenden Ergebnisse müssen deshalb mit Vorbehalten angewendet werden. Nachstehend werden je ein Beispiel für einen hineinlaufenden Fußgänger und für einen hinauslaufenden Fußgänger gezeigt.

Fußgänger läuft ins Fahrzeug hinein



Pkw VW Golf II, Gewicht beim Unfall 990 kg, Fahrer schwer verletzt.
Fußgänger 69 Jahre alt, Kontaktmerkmale rechte Kopfseite, Ellenbogen rechts, Knie rechts.
Anstoßstelle durch Unstetigkeit in der Bremsspur definiert.







Längswurfweite	22,5 m
Querwurfweite	2,2 m
Längsrutschweite	
Querrutschweite	
Kollisionsgeschwindigkeit ca.	65 km/h
Bremsverzögerung ca.	6 m/s^2

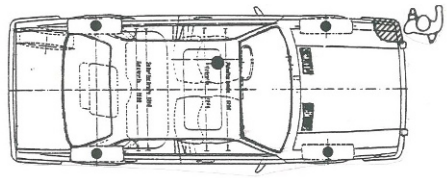
Bild A10-18 Beispiel eines Unfalls mit einem sich ins Fahrzeug hinein bewegenden Fußgängers

Es ist bei Grenzfällen sicher nicht unproblematisch zu unterscheiden, ob es sich noch um einen Frontalzusammenstoß handelt oder ob das nicht mehr der Fall ist. Möglicherweise hilft in Zweifelsfällen die Simulation mit geeigneten Programmen weiter. Im Allgemeinen zeigt die Längswurfweite sowohl beim sich hineinbewegenden bzw. sich achsparallel bewegenden Fußgänger, als auch beim sich herausbewegenden Fußgänger eine erheblich größere Streuung der Längswurfweite als bei den voll getroffenen Fußgängern, was aufgrund der komplizierten Anstoßgeometrie nicht anders zu erwarten ist.

In beiden Fällen ist mit zunehmender Kollisionsgeschwindigkeit ein Anstieg der Längswurfweite festzustellen, der jedoch beim sich herausbewegenden Fußgänger deutlich flacher ausfällt als beim sich hinein- bzw. achsparallel bewegenden Fußgänger. Das lässt sich aber aus den zwei gezeigten Fällen recht gut erkennen.

So ist in der Regel bei einem sich hinein- bzw. achsparallel bewegenden Fußgänger der Kontakt mit dem Fahrzeug viel intensiver als bei einem sich herausbewegenden Fußgänger, der oft nur noch an einem Bein getroffen wird und sich aufgrund seiner Eigengeschwindigkeit vom Fahrzeug wegbewegt.

Fußgänger läuft aus Fahrzeug heraus



Pkw Audi 80, Gewicht beim Unfall 1.015 kg, Fahrer unverletzt.
Fußgänger 8 Jahre alt, Kontaktmerkmale am linken Oberschenkel, Schädel-Hirn-Trauma.
Anstoßstelle durch örtliche Besonderheiten und Zeugen definiert.







Längswurfweite	0,8 m
Querwurfweite	1,4 m
Längsrutschweite	
Querrutschweite	
Kollisionsgeschwindigkeit ca.	55 km/h
Bremsverzögerung ca.	5 m/s^2

Bild A10-19 Beispiel eines Unfalls mit einem sich aus dem Fahrzeug heraus bewegenden Fußgängers

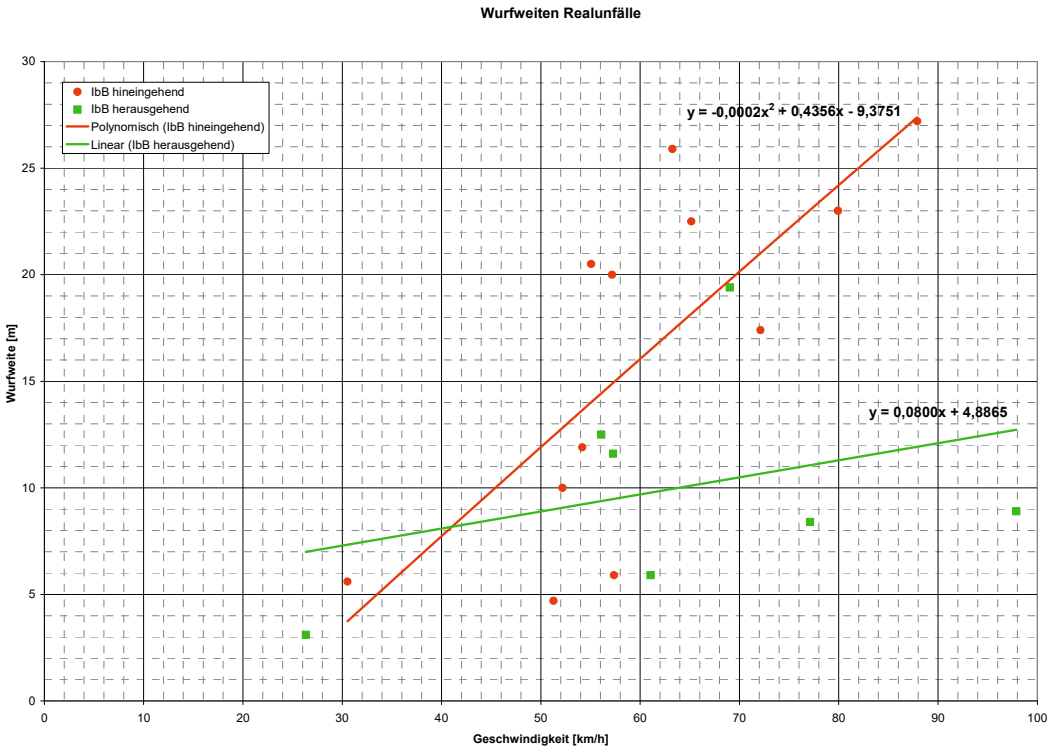


Bild A10-20 Längswurfweiten aus realen Unfällen für sich hinein- und herausbewegende Fußgänger und Regressionsgleichungen

2.11 Querwurfweite

Die in [12] beschriebenen Versuche mit stehendem Dummy lieferten Querwurfweiten in beiden Richtungen (**Bild A10-21**). Von den Autoren wird aus den Versuchen geschlossen, dass es wenig geeignet zu sein scheint, aus der Querwurfweite auf die Gehrichtung des Fußgängers zu schließen.

Die aus der Auswertung von realen Unfällen erhaltenen Werte für die Querwurfweite sind in dem **Bild A10-22** dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Querwurfweite mit erheblicher Streuung behaftet ist, weshalb auch diese Ergebnisse darauf hinweisen, dass die Querwurfweite zur Bestimmung der Bewegungsrichtung und der Geschwindigkeit des Fußgängers vor Kollision eher ungeeignet ist.

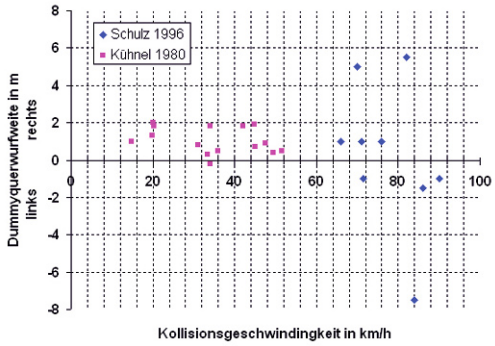


Bild A10-21 Querwurfweiten bei Versuchen mit stehenden Dummys [12]

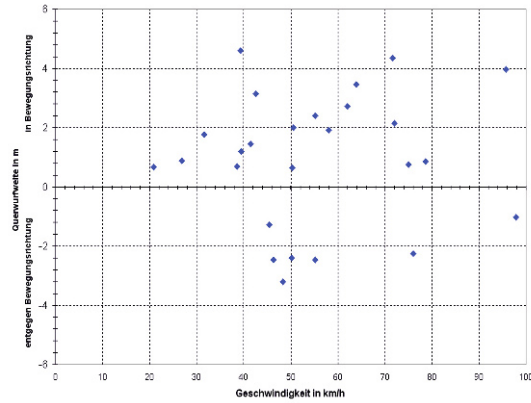


Bild A10-22 Querwurfweite aus realen Unfällen (IbB-Forensic)

2.12 Überfahren/Überrollen

Überfahren/Überrollen nach vorangegangenem Anstoß kann wie folgt unterschieden werden:

- Fußgänger, die vom ungebremsten oder teilgebremsten Fahrzeug angefahren werden, können vor das Fahrzeug geworfen werden. Ist dann die Verzögerung des Fußgängers hoch und die des Fahrzeugs gering, dann kann der Fußgänger vom selben Fahrzeug überfahren werden.
- Ein Fahrzeug, das vor oder zumindest beim Zusammenstoß mit einem Fußgänger gebremst wird, verkleinert die Möglichkeit des Überfahrens des Fußgängers. Abruptes Bremsen nach dem Zusammenstoß kann dazu führen, dass sich der Fußgänger von der Motorhaube ablöst.
- Die Mitte der Fahrzeugfront ist beim Anfahren eines Kindes die gefährlichste Stelle. Die Stoßkräfte und die Wahrscheinlichkeit für ein Kind, überfahren zu werden, sind in Fahrzeugmitte höher als links und rechts außen.
- Nach dem Stoß durch ein Fahrzeug wird ein Kind eher überfahren als ein Erwachsener, da das Kind häufiger direkt vor das Fahrzeug auf die Fahrbahn gestoßen wird.
- Auf der Fahrbahn kniende oder sitzende Personen können umgestoßen und danach überfahren werden.
- Auf der Fahrbahn liegende Personen (Alkohol, Dunkelheit) werden überfahren oder überrollt und unter Umständen über große Strecken mitgeschleift.

2.13 Beispiel eines Unfalls durch Überfahren

Wenn eine auf dem Boden liegende Person von einem Fahrzeug überfahren wird, ohne dass es zu einem Kontakt zwischen Rad und Person kommt, so liegt ein Überfahren vor. In solchen Fällen kann es zu Verhakungen der Personen mit dem Fahrzeugunterboden, wodurch diese über große Wegstrecken von Fahrzeugen mitgeschleift werden können. An der mitgeschleiften Person sind Schleifspuren an der Kleidung und am Körper zu beobachten. Manchmal sind Brandflecke durch den Auspuff am Körper vorhanden.

Das folgende Beispiel zeigt einen solchen Unfall. Er ereignete sich bei Dunkelheit und trockener Fahrbahn auf einer Straße außerorts. Auf der Fahrbahn wurden Schleifspuren festgestellt, die Erstkontaktstelle konnte einigermaßen zuverlässig ermittelt werden. Die vermutliche Transport- oder Schleifstrecke war rund 19 m.

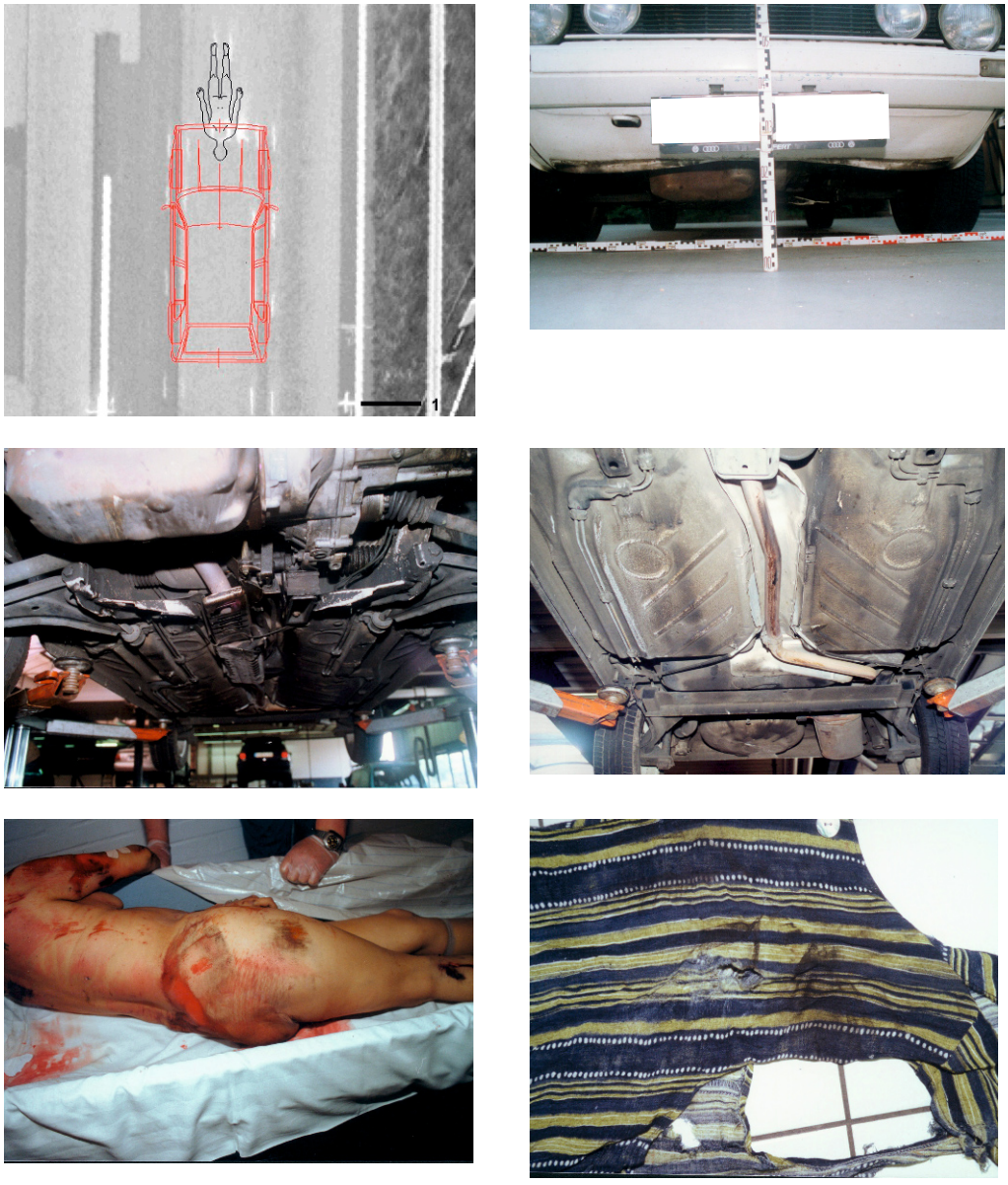


Bild A10-23 Fallbeispiel einer überfahrenen und mitgeschleiften Fußgängerin

2.14 Unfälle mit Überrollen

Wenn mindestens ein Rad mit einer auf dem Boden liegenden Person in Kontakt kommt, dann liegt ein Überrollen vor. Man kann mehrere Fälle unterscheiden:

1. Ein Fahrzeug fährt vergleichsweise langsam, z. B. Rückwärtsfahrt oder Rangieren, dabei rollt ein Rad oder rollen zwei Räder gegen die Person, quetschen die getroffenen Körperregionen aber nur ein, ohne über die Person zu rollen.
2. Ein Fahrzeug fährt mit eher geringer Geschwindigkeit gegen eine Person. Diese wird überfahren, möglicherweise geringfügig verschoben.
3. Ein Fahrzeug fährt mit höherer Geschwindigkeit gegen eine Person. Diese wird gewälzt, verschoben und gegebenenfalls rotiert.

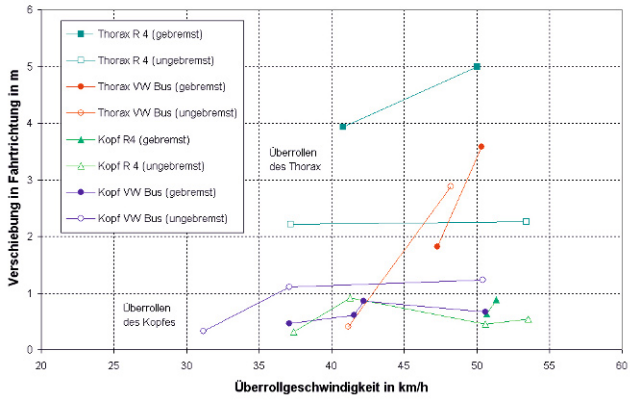


Bild A10-24 Verschiebung beim Überrollen nach [2]



Bild A10-25 Reifenspur auf einem Bekleidungsteil

In **Bild A10-24** wird über die Ergebnisse von Überrollversuchen mit zwei Fahrzeugen berichtet, bei denen acht mal der Thorax und zwölf mal der Kopf eines Dummys überrollt wurde. Davon waren elf Fahrten ungebremst und neun gebremst. Diese Versuchsreihe brachte die folgenden Ergebnisse:

- Beim Überrollen des Thorax ist die Mitnahmestrecke größer als beim Überrollen des Kopfes.
- Beim gebremsten Überrollen ist die Mitnahmestrecke größer.
- Eine einheitliche Zuordnung zwischen Überrollgeschwindigkeit und Mitnahmestrecke ist nicht festzustellen
- Beim Überrollen des Thorax trat immer eine Berührung mit dem Hinterrad auf. Es traten Drehungen um die Hochachse bis 360° auf. Außerdem war häufig ein Anschlagen des Kopfes an Radkappen und Außenfelge zu beobachten.
- Beschädigungen an der Fahrzeugunterseite traten nur selten beim Überrollen des Thorax auf.
- Das Überrollen wurde vom Fahrer der Versuchsfahrzeuge in allen Fällen deutlich wahrgenommen. (Bei schweren Lkw kann das nach Ansicht der Autoren möglicherweise anders beurteilt werden.)

2.15 Geschwindigkeitsverlust des Kraftfahrzeugs

Aufgrund des großen Massenunterschiedes zwischen Kraftfahrzeug und Fußgänger ist der Geschwindigkeitsverlust des Kraftfahrzeugs durch den Anstoß an den Fußgänger relativ gering. In erster Näherung liegt er bei 1 bis 3 km/h und kann deshalb oft vernachlässigt werden.

Bei einer genauen Berechnung ist er jedoch zu berücksichtigen. Dazu muss die Geschwindigkeit des Fahrzeugs nach der Kollision bekannt sein. Ferner muss eine Annahme dazu getroffen werden, ob der Fußgänger nach der Kollision gegenüber dem Fahrzeug schneller oder langsamer war. Das hängt von der Karosserieform und von der Körperhöhe des Fußgängers ab. Außerdem kommt es darauf an, ob sich der Fußgänger dem Fahrzeug entgegen dessen Fahrtrichtung nähert oder ob er vom Fahrzeug wegläuft.

Wenn das Fahrzeug nach der Kollision die Geschwindigkeit $v'_{\text{Fzg.}}$ hat, dann kann die angefahrene Person unmittelbar nach der Kollision schneller oder langsamer gewesen sein. Dieser Unterschied wird durch den Anstoßfaktor AF ausgedrückt, so dass gilt: $v'_{\text{Fußg.}} = AF \cdot v'_{\text{Fzg.}}$.

Nach dem **Bild A10-26** kann für das Fahrzeug der Impulssatz in x-Richtung angeschrieben werden. Die Geschwindigkeit des Fußgängers vor der Kollision wird auf die x-Achse projiziert und mitberücksichtigt.

$$m_{\text{Fzg.}} \cdot v_{\text{Fzg.}} + m_{\text{Fußg.}} \cdot v_{\text{Fußg.}} \cdot \cos\varphi = m_{\text{Fzg.}} v'_{\text{Fzg.}} + m_{\text{Fußg.}} \cdot v'_{\text{Fzg.}} AF$$

und daraus

$$v_{\text{Fzg.}} = v'_{\text{Fzg.}} \left(1 + \frac{m_{\text{Fußg.}}}{m_{\text{Fzg.}}} AF\right) - \frac{m_{\text{Fußg.}}}{m_{\text{Fzg.}}} v_{\text{Fußg.}} \cdot \cos\varphi$$

Die Geschwindigkeitsänderung des Fahrzeugs infolge der Kollision ist damit

$$\Delta v_{\text{Fzg.}} = v_{\text{Fzg.}} - v'_{\text{Fzg.}}$$

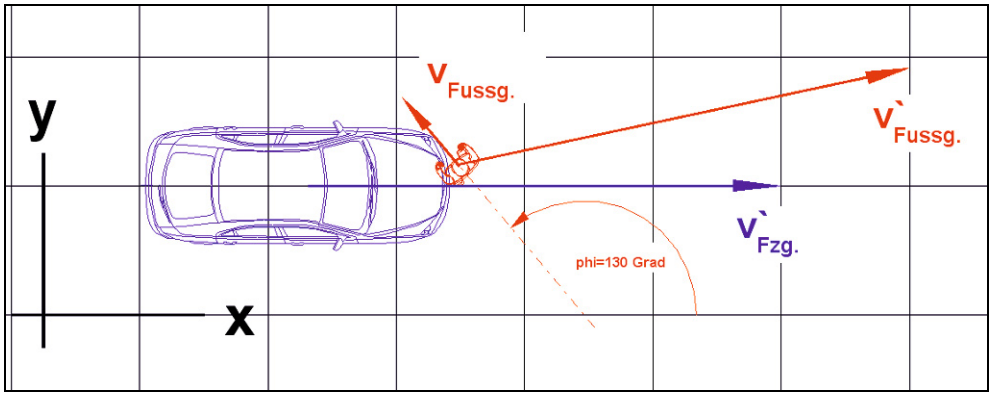


Bild A10-26 Zeichnung zur Herleitung der Gleichungen für die Berechnung des Anstoßverlustes des Fahrzeugs

0,6	0,75	0,95	1,0	Anstoßfaktor AF

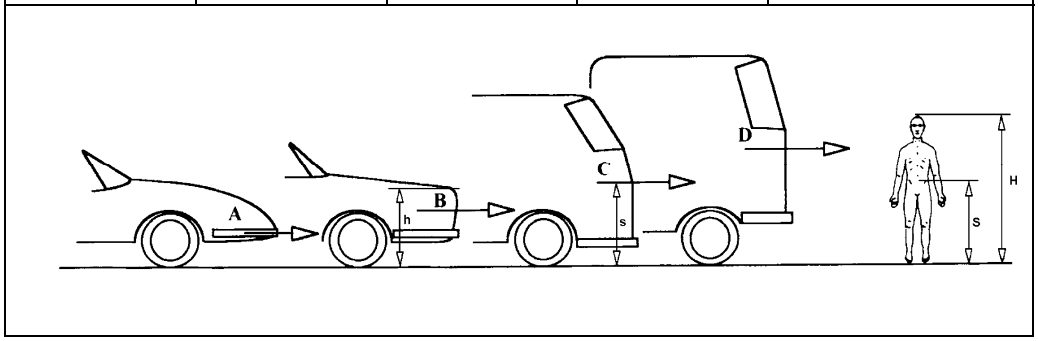


Bild A10-27 Anhaltswerte zur Bestimmung des Anstoßfaktors nach [2]

3 Bestimmung des Kollisionspunkts

Das weitere Vorgehen bei der Unfallanalyse hängt davon ab, ob vom beteiligten Fahrzeug Bremsspuren gesichert wurden. Ist dies der Fall, so ist zu prüfen, ob im Verlauf der Bremsspuren Spurenunregelmäßigkeiten vorhanden sind oder ob der Kollisionspunkt durch Schuhabriebspuren zweifelsfrei festliegt.



Bild A10-28 Spurenunregelmäßigkeiten bei Fußgängerunfallversuchen

Bei Spurenunregelmäßigkeiten ist zunächst die Frage zu klären, ob diese durch Fahrbahnunebenheiten, Lenkbewegungen oder durch Erhöhung der Radlast beim Aufprall des Fußgängers auf der Fahrzeugfront entstanden sind. Es wurde festgestellt, dass Spurunregelmäßigkeiten nicht etwa beim Erstkontakt zwischen Fahrzeug und Fußgänger entstehen, sondern dann, wenn die Person mit der Schulterpartie auf das Fahrzeug aufschlägt. Das ist dann sehr stark von der

Fahrzeugfrontgestaltung abhängig, aber auch von der Kollisionsgeschwindigkeit. Bei den in **Bild A10-28** gezeigten Versuchen war z. B. bei einem Renault Twingo die Kollisionsgeschwindigkeit 38 km/h und die Spurenunregelmäßigkeit 1,05 m hinter dem Ort des Berührbeginns. Zwischen Berührbeginn und Spurenunregelmäßigkeit lag eine Zeitspanne von 0,11 s. Bei einem Versuch mit einem Fiat Uno und einer Kollisionsgeschwindigkeit von 41 km/h betrug die Distanz zwischen Spurenunregelmäßigkeit und dem Ort des Berührbeginn 1,7 m, die Zeitspanne betrug 0,14 s.

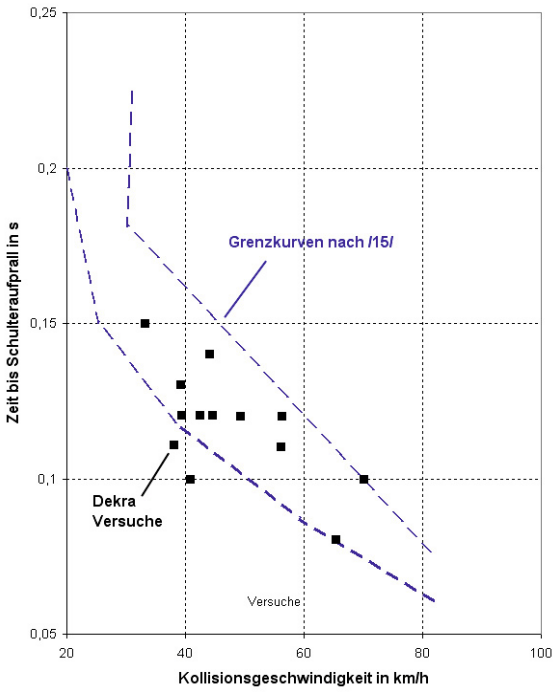


Bild A10-29 Zeitspanne von Erstberührung bis Schulteraufprall bzw. bis Spurverdickung in Abhängigkeit der Kollisionsgeschwindigkeit

Mit zunehmender Kollisionsgeschwindigkeit nimmt die Rotationsgeschwindigkeit des Fußgängers zu und dadurch die Zeitdauer bis zum Aufschlag des Oberkörpers auf dem Fahrzeugvorbau ab. Das **Bild A10-29** zeigt diese Zusammenhänge.

Unter Berücksichtigung des Fahrzeugvorbaus und der Kollisionsgeschwindigkeit liegt der Ort der Erstberührung überschlägig 0,5 bis 1 m vor der Spurenunregelmäßigkeit.

Schuhabriebspuren, nach DIN 75204 als Anriebspuren (Substanzübertragung von Schuhen auf die Fahrbahn) bezeichnet, bieten die genauesten Hinweise auf den Kollisionspunkt. Solche Spuren entstehen durch die vertikale Belastung, wenn der Unterschenkel beim Anstoß unter den Stoßfänger bzw. die Frontschürze gerät.

3.1 Schrankenverfahren

Zur Ermittlung des Kollisionsbereichs wurde in [16], [2] eine grafische Methode vorgeschlagen, die unter dem Begriff Schrankenverfahren in die Fachliteratur eingegangen ist. Bei dieser Methode werden folgende Anknüpfungspunkte verwendet:

- Endlage des Fußgängers,
- Fußgängerwurfparabel, ausgehend von der Endlage des Fußgängers,
- Endstand des Pkw,
- Bremsparabel, ausgehend vom Endstand des Fahrzeugs,
- Lage der ersten und letzten Lacksplitter,

- Örtliche Schranken: Ortsangaben, z. B. Lücken zwischen geparkten Fahrzeugen, Hauseingängen, Überwegen, „Fortsetzung“ von Gehsteigen und Zeugenaussagen. Lage mitgeführter Gegenstände,
- Geschwindigkeits-Schranken: Einstufung der Kollisionsgeschwindigkeit nach Fahrzeugschäden, Zeugenaussagen (Plausibilitätsprüfung).

Bisher noch nicht besprochen sind Ergebnisse über die Wurfweite von Lack- und Glassplittern. Diese Wurfweiten sind eher ungenau, jedoch in Summe mit allen anderen Einflussgrößen zur Bestimmung des Kollisionsbereichs in manchen Fällen doch hilfreich. Bei den Lacksplittern ist zu beobachten, dass bei manchen Versuchen Lacksplitter bereits vor der Erstberührstelle zu finden sind. Worauf das genau zurückzuführen ist, wurde bisher nicht untersucht, möglich wäre Windeinfluss. Bedeutsam ist aber, dass bei Versuchen und auch realen Unfällen erste Lacksplitter dicht an der Erstberührstelle zu finden sind. **Bild A10-30** und **Bild A10-31** zeigen solche Ergebnisse.

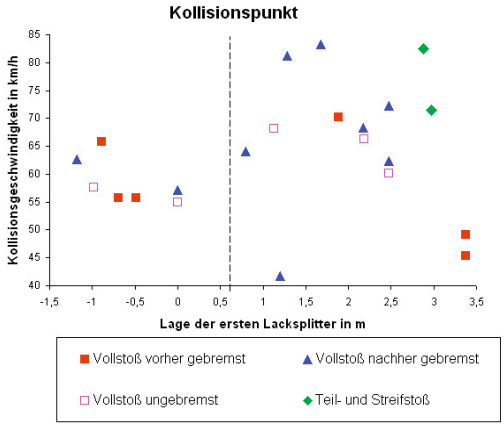


Bild A10-30 Lage der ersten Lacksplitter, abhängig von der Kollisionsgeschwindigkeit (Dekra)

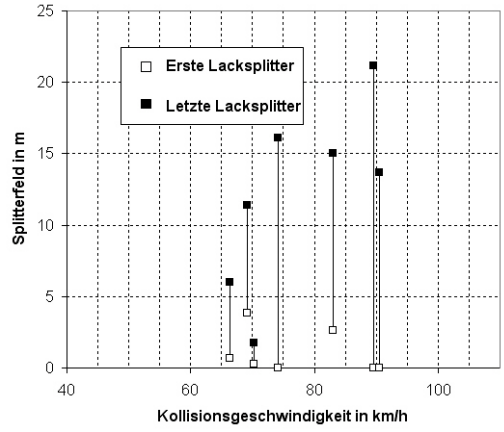


Bild A10-31 Lage erste und letzte Glassplitter nach [12]

Wurfweiten von Glassplittern sind bisher nur für ältere Fahrzeuge versuchsmäßig ermittelt worden. Bei neueren Fahrzeugen entstehen kaum noch Glassplitter. **Bild A10-32** und **Bild A10-33** zeigen Ergebnisse aus verschiedenen Quellen.

Das Schrankenverfahren ist eine grafische Methode zur Berechnung der Anprallgeschwindigkeit und der Anprallposition bei Fahrzeug/Fußgängerunfälle, das auf Reifenspuren, dem Anhalteweg des Fahrzeugs und der Wurfweite des Fußgängers basiert. Bei dieser Methode können sowohl Distanz-Schranken oder Korridore als auch Geschwindigkeits-Schranken oder Korridore definiert werden, um auf die tatsächliche Anprallposition schließen zu können. Die Berechnung basiert auf dem Anhalteweg des Fahrzeugs und der Endlage des Fußgängers.

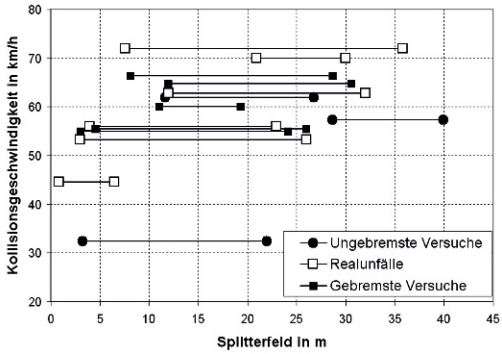


Bild A10-32 Erste und letzte Glassplitter (Dekra)

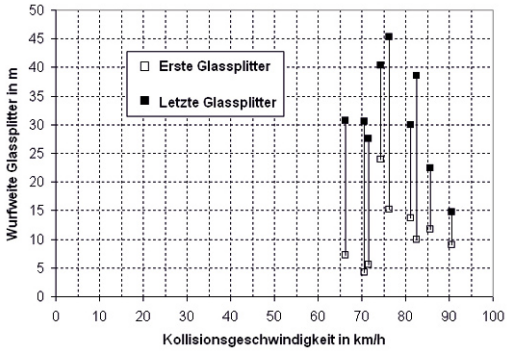


Bild A10-33 Erste und letzte Glassplitter nach [12]

Wichtig:

- Der Diagrammursprung ist die Endlage des Fahrzeugs.
- Durch Vorgabe einer Wegschranke (möglicher Übergangsbereich für den Fußgänger-Kollisionsbereich) kann die Kollisionsgeschwindigkeit bestimmt werden.
- Bei Vorgabe von Geschwindigkeitsschranken (z. B.: erlaubte Geschwindigkeit) kann der Kollisionsort eingeschränkt werden.
- Ergibt sich bei der Konstruktion des Diagramms kein Schnittbereich, so passen die Eingaben für die Fahrzeugverzögerung und das Wurfweitendiagramm für den Fußgänger noch nicht zusammen.

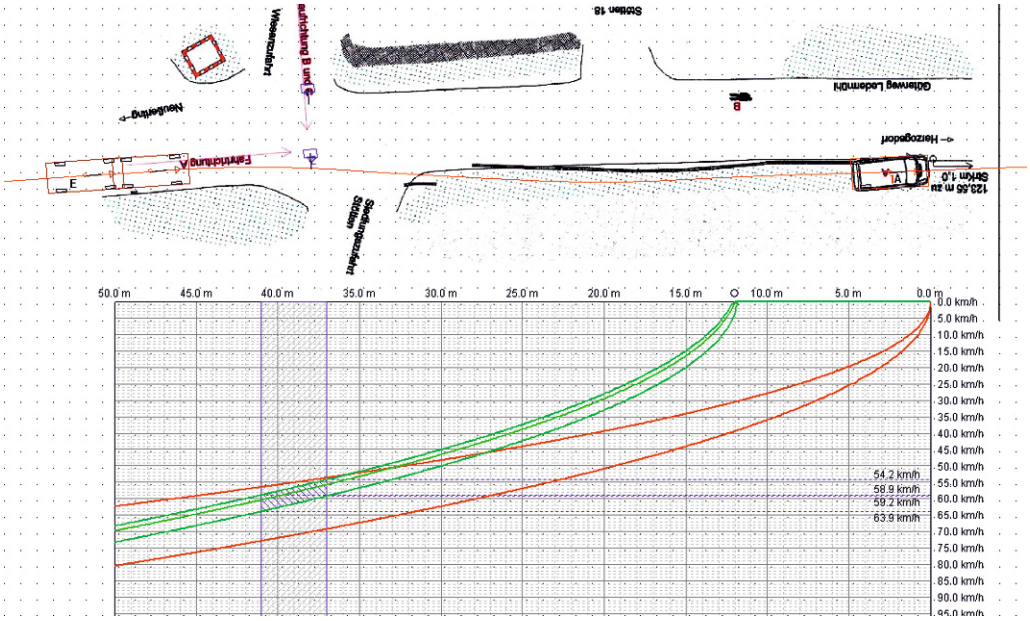


Bild A10-34 Unfallskizze und Diagramm nach dem Schrankenverfahren, Fahrzeug Weg/Geschwindigkeitsdiagramm (rot), Fußgängerwurfweite (grün), Wegschranken (blau), Schnittmenge schraffiert

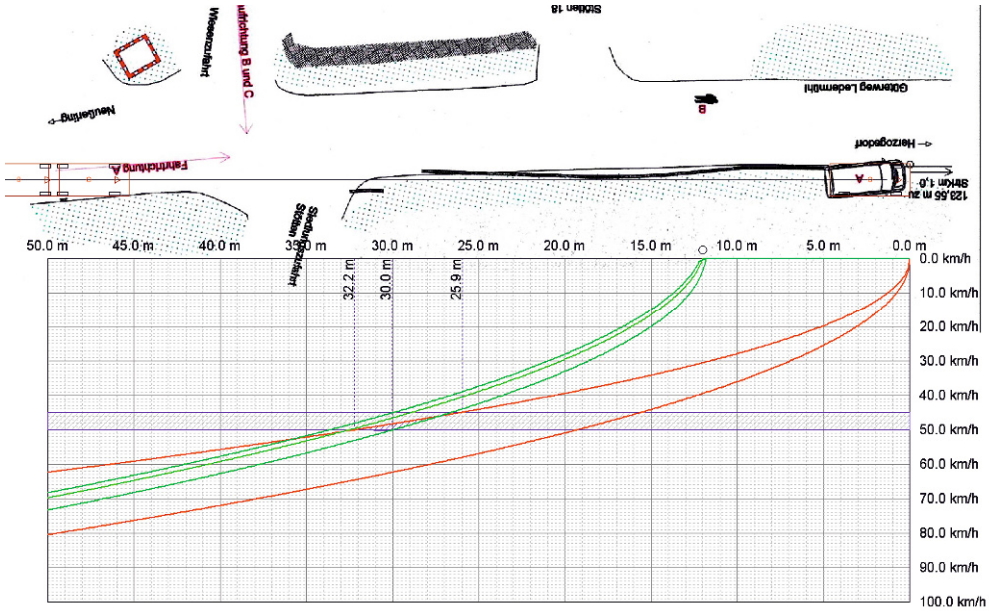


Bild A10-35 Unfallskizze und Diagramm nach dem Schrankenverfahren, Fahrzeug Weg/Geschwindigkeitsdiagramm (rot), Fußgängerwurfweite (grün), Geschwindigkeitsschranke (blau), Schnittmenge schraffiert

Literatur

[1] Elsholz, J.: Fußgängerunfälle, Information Nr. 69, Lahr 1969

[2] Kühnel, A.: Der Fahrzeug-Fußgänger-Unfall und seine Rekonstruktion, Diss. TU Berlin 1980

[3] Stcherbatcheff, G., Tarriere, C., Duclos, P., Fayon, A., Got, C., Patel, A.: Simulation of Collisions between Pedestrians and Vehicles using Adult and Child Dummies, Paper 751167, 19th Stapp Car Conference, San Diego 1975

[4] Rau, H.: Möglichkeiten und Grenzen der Übernahme von Versuchsergebnissen in Computerprogramme der Unfallrekonstruktion, EVU-Jahrestagung, Zürich 1993

[5] Niederer, P., Schlumpf, M.: Bewegungsmuster angefahrener Fußgängersurrogate, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 2,1986

[6] Burg/Rau: Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion, Verlag Information Ambs GmbH, 1981

[7] Braun, H.: Splitterwurfweiten – Eine experimentelle Untersuchung – Der Verkehrsunfall, Heft 2, 1980

[8] Schimmelpfennig, K. H., Becke, M.: Rutschweite von Fußgängern, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 10 und 12, 1981

[9] Otte, D.: Bedeutung und Aktualität von Wurfweiten, Kratzspuren und Endlagen für die Unfallrekonstruktion, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 11, 294–300, 1989

[10] Schroeder G., Eidam, J., Tröger H. D.: Die Kollisionsmechanik des Pkw-Fußgängerunfalls in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Fahrzeugfront, Unfall- und Sicherheitsforschung im Straßenverkehr, Nr. 82 (1991)

[11] Dettinger J.: Beitrag zur Verfeinerung der Rekonstruktion von Fußgängerunfällen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik Heft 12 (1996) und Heft 1 (1997)

[12] Rau, H., Otte, D., Schulz, B.: Pkw-Fußgängerkollisionen im hohen Geschwindigkeitsbereich, Ergebnisse von Dummyversuchen mit Kollisionsgeschwindigkeiten zwischen 70 und 90 km/h. AREC 2003 in Neumünster
[13] AREC-Versuche 2003
[14] Moser, Andreas. Validation of the PC-Crash Pedestrian Model. SAE-Paper 2000-01-0847
[15] Schimmelpfennig K. H., Golder U.: Die Bedeutung einer Blockierspurverdickung bei Fußgängerunfällen – Erstkonkaktverlagerung, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 5 (1989)
[16] Silbar A.: Zur Analyse der Kollision Fußgänger/Pkw: Das „Streuungsdreieck nach Slibar“ als Grundlage der Bestimmung von Kollisionsort und Kollisionsgeschwindigkeit, Der Verkehrsunfall, Heft 3 (1976)

4 Daten für Berechnungen

Die bei den Menschen interessierenden Daten sind solche über die Bewegung und solche über Abmessungen und Gewichte.

Bei der Bewegung geht es meist um die Frage, wie schnell eine Person eine Fahrbahn überquert hat bzw. sich aufrecht bewegt hat. Diese Bewegung kann vorwärts oder rückwärts vonstatten gegangen sein, Personen können sich umgedreht haben, sie beschleunigen und verzögern. Bei der Bewegung vorwärts geht es zunächst um die Begriffsbestimmung. Zeugen oder Beteiligte werden oft gefragt, wie schnell sich denn eine Person bewegt hat. Dazu kann man sich Filme anschauen und Einstufungen vornehmen oder man kann die eigene Erfahrung auf eine Beobachtung übertragen. Es ist eine solche Bewertung aber eine sehr subjektive Angelegenheit. Nachstehend werden zunächst einige Fotomontagen gezeigt, die man für die Bewertung von Geschwindigkeiten anhand von Bewegungsmustern verwenden kann. Danach folgt ein Auszug aus einer subjektiven Bewertung.

4.1 Gehen

Unter Gehen versteht man die „normale“ Fortbewegungsgeschwindigkeit, die eine Person zur längerfristigen Fortbewegung ohne Eile einhält. In **Bild A10-36** ist dazu ein Bewegungsablauf dargestellt [2].



Bild A10-36 Gehende Person

4.2 Schnell Gehen

Hierunter versteht man einen schnellen, eiligen Gang, bei dem zu jedem Zeitpunkt mindestens ein Fuß Kontakt zum Boden hat. Das Abrollen des Fußes muss noch gewährleistet sein. Der Bewegungsablauf, welcher in **Bild A10-37** dargestellt ist, ähnelt dabei stark dem des gehenden Menschen [1].



Bild A10-37 Schnell gehende Person

4.3 Laufen

Laufen ist der gewöhnliche Schritt eines Ausdauerläufers, bei dem, wie in **Bild A10-38** zu sehen, kurzzeitig kein Fuß den Boden berührt. Das Abrollen der Fußsohle auf dem Boden erfolgt nur noch begrenzt [1].



Bild A10-38 Laufende Person

4.4 Rennen

Dies ist die schnellste, aus eigener Kraft mögliche, Fortbewegungsart des Menschen. Dabei besitzt, für kurze Zeit, keiner der beiden Füße Bodenkontakt. Wie in **Bild A10-39** zu sehen, ist auch kein Abrollen der Fußsohle auf dem Boden mehr vorhanden. Dazu kommt eine deutliche Neigung des Oberkörpers nach vorn [1].



Bild A10-39 Schaubild eines rennenden Menschen

In [6] wurden unterschiedlichen Personen (Alter, Geschlecht) Filme von Fußgängern vorgespielt, die z. B. Fahrbahnen überquerten u. a. Diese Personen sollten verbal bestimmen, wie sich die Menschen in den Filmen bewegten und wie hoch sie deren Geschwindigkeiten einschätzten. Diese Daten sollten in einen Fragebogen eingetragen werden. Auf diese Weise kamen 189 Fragebogen zusammen, die ausgewertet wurden und unter anderem folgende Ergebnisse lieferten (**Bild A10-40**):

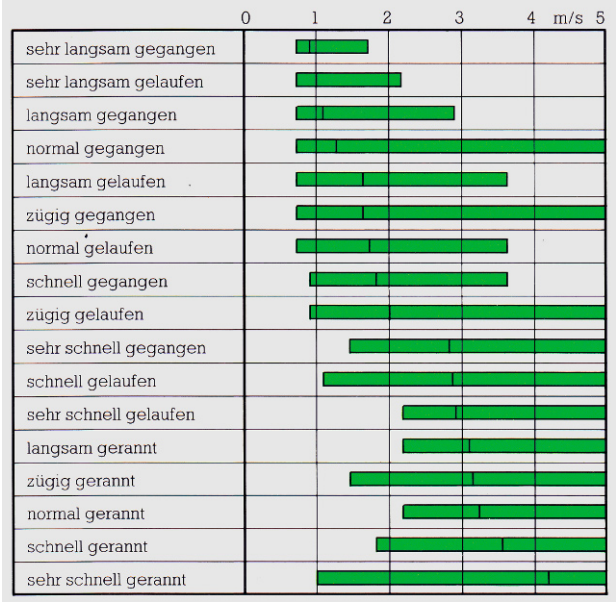


Bild A10-40 Gesamtstreubereich und Mittelwerte für alle Beurteilungen der Beobachter

Welche Geschwindigkeiten von Menschen tatsächlich erreicht werden können, wurde in [7] sehr detailliert untersucht. Wegen der Datenvielfalt wird nur ein Auszug daraus wiedergegeben.

Tabelle A10.3 Bewegungsgeschwindigkeiten von Fußgängern in m/s nach [7] aus [1]

		Alter der Fußgänger in Jahren											
		6–7		14–15		20–30		30–50		50–60		70–80	
		m	w	m	w	m	w	m	w	m	w	m	w
Gehen		1,5	1,5	1,7	1,6	1,2	1,4	1,5	1,3	1,4	1,4	1,0	1,1
Schnell gehen		2,0	2,0	2,2	1,9	2,2	2,2	2,0	2,0	2,0	2,0	1,4	1,3
Laufen	A	3,4	2,8	4,0	3,0	3,0	4,0	3,6	3,6	3,5	3,3	2,0	1,7
	B	3,1	2,8	3,4	3,0	3,0	3,2	3,2	3,2	3,0	3,0	2,0	1,7
Rennen	A	4,2	4,0	5,4	4,8	7,4	6,1	6,5	5,5	5,3	4,6	3,0	2,3
	B	3,6	3,4	4,2	3,9	4,9	5,0	5,0	4,7	4,0	4,1	2,5	2,1

Laufen = normaler Dauerlauf — A = stehender Start, nach 10 m Wegstrecke
Rennen = schnellstmögliche Bewegungsart — B = fliegender Start

In der Arbeit von Hein [3] wurden auch Beschleunigungswerte für Fußgänger gemessen. Bei der Bewegungsform „gehen“ wurden Werte von 1,5 bis 3 m/s^2 gemessen, bei der Bewegungsform „schnell gehen“ Werte von 2 bis 5 m/s^2.

Weitere Ergebnisse aus diesem Bericht von Eberhardt und Himbert [7] sind in der folgenden Tabelle in verkürzter Form zusammengestellt:

Tabelle A10.4 Bewegungsgeschwindigkeiten unter besonderen Bedingungen (Mittelwerte)

	Bewegungsgeschwindigkeiten in km/h	
	langsam	schnell
Personen mit Achselkrücken	2,0	4,5
Personen mit Armkrücken	1,9	6,0
Personen im Rollstuhl	3,0	6,5
Gehbehinderte (Stock, Prothese)	2,6	3,0
Rückwärtsgehen	2,6	9,0
Kinder mit Rollschuhen 5 bis 6 Jahre alt	6,0	8,0
Kinder mit Rollschuhen 11 bis 12 Jahre alt	9,0	15,0
Kinder mit Dreirad 3 bis 4 Jahre alt	2,4	3,6
Kinder mit Traktor 3 bis 5 Jahre alt	2,9	4,5
Kinder mit kleinem Tretroller	8,0	10,0
Kinder mit Kettcar	8,5	13,0

In [7] wurden ferner Zeitspannen gemessen, die für das Umdrehen im Stand benötigt werden. Diese Zeitspannen sind abhängig davon, um welchen Drehwinkel der Körper gedreht wird und von dem Alter der Personen, welche die Drehung ausführen. Es liegt nahe, dass ältere Personen länger für die Ausführung von Körperdrehungen benötigen. Allerdings hängt das alles sehr von der körperlichen Verfassung der einzelnen Person ab.

Tabelle A10.5 Zeitbedarf für die Ausführung von Körperdrehungen

Ausführungsart der Drehbewegung	Zeitbedarf für die Drehung in s, Toleranz +/–10 %			
	0–45°	0–90°	0–135°	0–180°
Maximal	0,14	0,18	0,30	0,45
Schnell	0,18	0,35	0,54	0,73
Normal	0,25	0,55	0,88	1,28
Ältere Personen	0,42	0,9	1,45	2,04

Anthropometrische Daten

Der Körperschwerpunkt: Der Körperschwerpunkt ist abhängig von der Körperposition und der Masseverteilung im Körper. Bei einem aufrecht stehenden Menschen befindet er sich etwa im Bereich des Bauchnabels zentral im Körper. Je nach Körperhaltung kann der Körperschwerpunkt auch außerhalb des Körpers liegen.

Daten der Deutschen Bevölkerung: Vom Statistischen Bundesamt wurde im Jahr 2003 eine schriftliche Befragung von rund 370.000 Menschen durchgeführt. Die Daten liefern einen Überblick über die Verteilung der Körpergröße und Körpermasse bezogen auf das Alter der in Deutschland lebenden Deutschen. (Körpermaße nach DIN 33402-2, Stand 12/2005)

Tabelle A10.6 Anthropometrische Daten der männlichen in Deutschland wohnenden Bevölkerung [8]

Alter von ... bis unter ... Jahren	Körper-größe	Körper-gewicht	Body-Mass-Index	Davon mit einem Body-Mass-Index von			
				unter 18,5	18,5 bis 25	25 bis 30	30 und mehr
	im Durchschnitt						
	m	kg	kg/m²	Prozent[1]			
Männlich							
18–20	1,81	73,9	22,7	5,5	76,9	14,9	2,7
20–25	1,81	76,8	23,5	3,3	71,2	21,2	4,3
25–30	1,80	80,1	24,6	1,3	60,0	32,0	6,8
30–35	1,80	82,5	25,5	0,6	50,8	38,5	10,1
35–40	1,80	83,6	25,8	0,5	45,7	42,3	11,5
40–45	1,79	84,1	26,2	0,4	40,5	45,7	13,4
45–50	1,78	84,7	26,6	0,4	35,6	47,7	16,3
50–55	1,77	85,0	27,0	0,4	31,3	48,9	19,4
55–60	1,76	84,6	27,2	0,4	29,0	50,0	20,6
60–65	1,76	84,4	27,3	0,4	27,9	51,1	20,6
65–70	1,75	83,6	27,4	0,4	25,9	53,0	20,7
70–75	1,74	82,3	27,3	0,4	26,1	52,9	20,5
75 und mehr	1,72	77,7	26,2	1,1	37,2	48,7	13,0
Zusammen	**1,78**	**82,4**	**26,1**	**0,9**	**41,2**	**43,5**	**14,4**

Tabelle A10.7 Anthropometrische Daten der weiblichen in Deutschland wohnenden Bevölkerung [8]

Alter von ... bis unter ... Jahren	Körpergröße	Körpergewicht	Body-Mass-Index	Davon mit einem Body-Mass-Index von			
				unter 18,5	18,5 bis 25	25 bis 30	30 und mehr
	im Durchschnitt						
	m	kg	kg/m²	Prozent[1]			
Weiblich							
18–20	1,67	60,5	21,6	13,7	74,0	9,5	2,8
20–25	1,68	62,0	22,1	10,8	73,1	11,9	4,1
25–30	1,68	64,2	22,9	6,9	70,0	16,7	6,4
30–35	1,67	65,6	23,5	4,8	68,0	19,2	8,0
35–40	1,67	66,4	23,8	4,3	65,9	21,3	8,5
40–45	1,66	67,0	24,2	3,0	62,7	24,4	9,8
45–50	1,66	68,2	24,8	2,5	57,3	27,5	12,7
50–55	1,65	69,3	25,5	2,0	50,3	31,8	15,8
55–60	1,64	70,2	26,0	1,6	45,5	35,3	17,6
60–65	1,65	70,7	26,1	1,5	43,3	37,6	17,6
65–70	1,64	71,5	26,6	1,4	37,6	40,3	20,7
70–75	1,63	71,1	26,8	1,3	35,0	42,3	21,5
75 und mehr	1,61	66,3	25,4	3,4	45,5	37,2	13,8
Zusammen	**1,65**	**67,5**	**24,8**	**3,8**	**54,7**	**28,7**	**12,8**

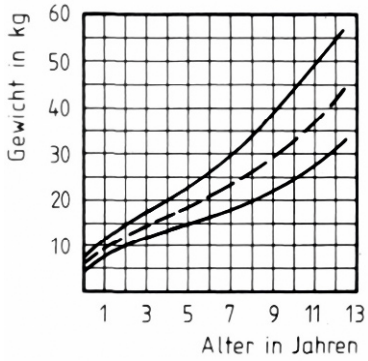
Die in **Tabelle A10.6** und **Tabelle A10.7** enthaltenen Daten charakterisieren ebenfalls die Bürger der Bundesrepublik Deutschland. Jedoch wurde hier nicht nach Staatsangehörigkeit unterschieden, um die steigende Migration mit zu berücksichtigen. Die Definitionen der zusammengestellten Körpermaße beruht auf der europäischen Norm EN ISO 7250. Für die DIN 33402-2 wurden Personen im Alter von 18 bis 65 Jahren untersucht, da diese die arbeitende Bevölkerung repräsentieren. Gewichte und Körpergrößen von Kindern sind **Bild A10-41** und **Bild A10-42** und zu entnehmen [1].

Tabelle A10.8 Körpermasse in kg der in Deutschland wohnenden Bevölkerung [15]

Altersgruppen in Jahren	Körpermasse (Körpergewicht) in kg					
	Männer			Frauen		
	Perzentil					
	5	50	95	5	50	95
18–65	63,5	79,0	100,0	52,0	66,0	87,0
18–25	59,5	72,5	95,0	49,0	60,0	78,5
26–40	63,5	78,5	101,0	50,5	63,5	86,5
41–60	65,0	82,0	102,5	54,0	69,5	90,5
61–65	64,0	81,0	97,5	54,5	70,5	89,0

Tabelle A10.9 Körperhöhe in mm der in Deutschland wohnenden Bevölkerung [15]

Alters-gruppen in Jahren	Körperhöhe in mm					
	Männer			Frauen		
	Perzentil					
	5	50	95	5	50	95
18–65	1.650	1.750	1.855	1.535	1.625	1.720
18–25	1.685	1.790	1.910	1.560	1.660	1.760
26–40	1.665	1.765	1.870	1.545	1.635	1.725
41–60	1.630	1.735	1.835	1.525	1.615	1.705
61–65	1.605	1.710	1.805	1.510	1.595	1.685



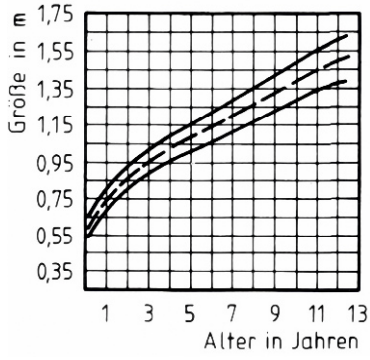


Bild A10-41 Gewicht von Kindern (links)

Bild A10-42 Körpergröße von Kindern (rechts)

Vereinzelt werden bei der Rekonstruktion von Fußgängerunfällen auch Informationen über Schwerpunktshöhe und über Trägheitsmomente benötigt. Diese Daten sind in den zu geeigneten Simulationsprogrammen gehörenden Datenbanken enthalten (Gebod in ATB oder eigene Datenbank in PC-Crash). Die Gewichte von Körperteilen können in Einzelfällen ebenso von Interesse sein. Eine Übersicht zu diesen Daten zeigen **Bild A10-43** bis **Bild A10-45** aus [1], weitere Informationen sind den Kapiteln A19 und C11 zu entnehmen.

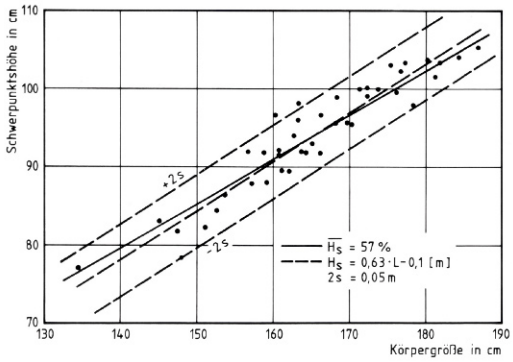


Bild A10-43 Schwerpunktshöhen von Personen in cm abhängig von der Körpergröße

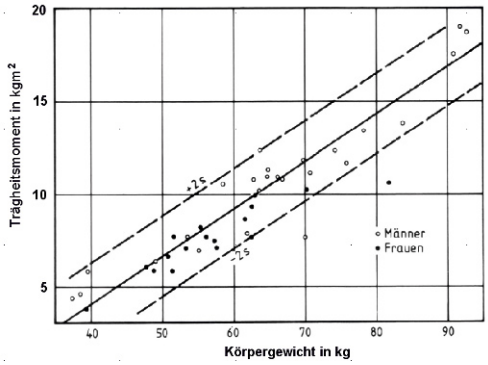


Bild A10-44 Trägheitsmomente um eine horizontale Achse im Schwerpunkt

Schwerpunktlage (±2,5%)		Werte in cm
Kopf	(von hinten)	14,2
Kopf	(von oben)	11,9
Schultern	(von hinten)	9,6
Schultern	(von Scheitelhöhe)	35,8
Bauch	(von hinten)	12,4
Bauch	(von Scheitelhöhe)	53,0
Becken	(von hinten)	13,4
Becken	(von Scheitelhöhe)	79,4
Kopf und Rumpf	(von hinten)	11,9
Kopf und Rumpf	(von Scheitelhöhe)	57,7

Teilgewichte (±2%)		kg
Kopf und Hals		5,0
Oberarm	einzeln	2,44
Unterarm	einzeln	1,54
Hand	einzeln	0,63
Oberschenkel	einzeln	7,9
Unterschenkel	einzeln	3,1
Fuß	einzeln	1,27
Schultern und Brustkorb		7,8
Bauch, Becken und Oberschenkel		17,0
Gesamtgewicht		74,4

Umfangswerte (±2,5%)		
Kopf		57,3
Hals		38,2
Brust		95,9
Taille	(sitzend)	83,9
Becken	(sitzend)	105,6
Oberschenkel		57,0
Unterschenkel		44,0
Knie	(sitzend)	39,2
Wade		36,6
Knöchel		22,6
Unterarm		31,5
Ellenbogen	(gebeugt)	31,0
Handgelenk		17,3

Bild A10-45 Zusammenstellung von Schwerpunktlagen in cm, Teilgewichten in kg und Umfangswerten in cm für einzelne Körperteile

Literatur

[1] Burg/Rau: Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion: Kapitel 4 – Fußgängerunfälle. Erstauflage. Kippenheim: Verlag INFORMATION Ambs GmbH, 1981

[2] Reinhardt, Ingo: Ermittlung kinematischer Daten von in Bewegung befindlichen Personen, Studienarbeit an der FH Zwickau, 2006

[3] Hein, H.: Messungen von Fußgängergeschwindigkeiten und -beschleunigungen. München. Fachhochschule, Diplomarbeit, März 1994

[4] Greuß, H.: Entwicklung eines anthropometrischen Meßverfahrens für das CAD – Menschmodell RAMSIS. München. Technische Universität, Dissertation, aus FAT Schriftenreihe Nr.123, ISSN 0933-050X

[5] Norm DIN 33402 Teil 1, 1978-01. Körpermaße des Menschen – Begriffe, Messverfahren

[6] Rau, Kühnel, Burg: Fußgängergeschwindigkeiten und Zeugenaussagen. Forschungsbericht der TU Berlin, veröffentlicht als DEKRA-Fachschrift 0/76

[7] Eberhardt, Himbert: Bewegungsgeschwindigkeiten, Ergebnisse nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer. Eigenverlag, 1977

[8] http://www.destatis.de/basis/d/gesu/gesutab8.php, 21.08.2006, Statistisches Bundesamt

[9] Norm DIN 33402 Teil 2, 2005-12. Körpermaße des Menschen – Werte

Danksagung

Bei der Ausarbeitung dieses Kapitels haben folgende Studenten durch Hinweise, Mithilfe bei der Datenbeschaffung und der Anfertigung von Bildern und Tabellen mitgeholfen: Ingo Reinhardt, Steve Frankenstein, Maik König. Der Autor bedankt sich an dieser Stelle recht herzlich.

A11 Unfälle mit Zweirädern

Dr. Johannes Priester, Dr. Gustav Kasanicky

1 Einleitung

Das Fahren mit Zweiradfahrzeugen ist sehr stark mit den fahrerischen Fähigkeiten und mit fahrpraktischer Übung verbunden. Eine solch starke Abhängigkeit zwischen Fahrzeug und Mensch ist bei keinem anderen Fahrzeug vorhanden. Es ist deshalb wichtig, die wissenschaftliche Erklärung des Phänomens zu kennen und bei der Unfallanalyse zu beachten.

Nach Spiegel [35] gewinnt der Begriff des Mesokosmos in der evolutionären Erkenntnistheorie immer mehr an Bedeutung. Mit Mesokosmos wird die „kognitive Nische" der Menschen bezeichnet, in der Anschaulichkeit, spontane Verstehbarkeit und „angeborene Nachvollziehbarkeit" herrschen. Das Überschreiten der Grenzen seines Mesokosmos ist uns Menschen zwar nicht grundsätzlich verwehrt, aber bei der Überschreitung entstehen erhebliche Anpassungsprobleme.

Der Begriff Mesokosmos geht auf Vollmer [41] zurück und wird als jener Ausschnitt der Welt definiert, den wir Menschen mit unseren genetisch bedingten, evolutiv entstandenen Wahrnehmungs- und Erfahrungsstrukturen kognitiv bewältigen.

Die Geschwindigkeiten beispielsweise, die Menschen auch sensorisch problemlos unter nahezu allen Bedingungen beherrschen, liegen nicht viel über 6 m/s oder 20 km/h. Blicken wir bei diesem Tempo zur Seite, um irgend etwas wahrzunehmen, so werden wir für diesen Blick mit Kopfdrehung mindestens 0,8 s brauchen. In dieser Zeit legen wir etwas mehr als 4 m zurück. Diese kurze Strecke war bereits vorher im Gesichtsfeld und während dieser 0,8 s wird sich in den 4 m voraus kaum etwas Wesentliches ereignen.

Auf dem Motorrad aber kann dieser gleiche Blick zur Seite leicht 20, 30 oder auch 50 m bedeuten. Manchmal dauert ein Blick zur Seite 2 oder 3 s, dann sind das 60, 90 oder 150 m im Blindflug.

Unser Gehirn wurde im Laufe der Stammesgeschichte auf den durch unseren Körper begrenzten Mesokosmos geprägt. Betrachtet man einen Menschen, der auf einer geneigten Fläche mit ständig zunehmender Steigung nach oben geht: Wenn genügend Reibung vorhanden ist, dann wird er an einen Punkt kommen, wo er aufrecht nicht mehr weitergehen kann. Der ist aufgrund unseres Körperbaus bei etwa 20 Grad erreicht. Vierbeinige Wesen haben beispielsweise einen anderen Mesokosmos. Es ist nun sicher nicht so, dass Menschen auf größere Schräglagen als 20 Grad überhaupt nicht eingerichtet sind, wir müssen aber zuerst unseren persönlichen Mesokosmos ausweiten. Ein Motorradfahrer, der schräglagenscheu fährt, lebt in höchstem Maße gefährlich. Viele Unfallursachen lassen sich aus dieser Problematik heraus verstehen und erklären.

Damit die genannten 20 Grad überschritten werden können, bedarf es nicht nur gewisser technischer Voraussetzungen, sondern einer langen Zeit fortgesetzter Übung. Das ist die Zeit, die gebraucht wird, um solche verhaltenssteuernden Programme neu aufzubauen, die über die

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_11

Grenzen, die der Mesokosmos vorgibt, hinausführen. Was im Übrigen nicht nur für die Schräglage gilt.

2 Einteilung der Zweiräder

Eine sinnvolle Unterscheidung der Zweiräder erfolgt zunächst nach der Art des Antriebs:

- muskelbetriebene Zweiräder
- motorisierte Zweiräder
- Während mit der ersten Gruppe sämtliche Fahrräder definiert sind, fallen unter die motorisierten Zweiräder alle Mofas, Kleinkrafträder und Krafträder. Die motorisierten Zweiräder werden in Deutschland entweder nach dem Fahrerlaubnisrecht (**Tabelle A11.1**) oder nach Versicherungsklassen unterteilt.

Tabelle A11.1 Einteilung der motorisierten Zweiräder nach FeV

Kraftfahrzeugart	Technische Bestimmungen	Fahrerlaubnis § 6 FeV		Mindestalter
		Alt	Neu	
Mofa	Fahrrad mit Hilfsmotor bis 25 km/h bbH, einsitzig	Prüfbesch. § 4 FeV		15
Kleinkraftrad (Moped, Mokick)	Zweirad mit $V_{H\,max} \leq 50$ cm³ und bis 45 km/h bbH	4	M	16
Leichtkraftrad	Zweirad mit $V_{H\,max} \leq 125$ cm³ und bis 80 km/h bbH und $P_{Nenn\,max} \leq 11$ kW	1b	A1	16
	Zweirad mit $V_{H\,max} \leq 125$ cm³ und $P_{Nenn\,max} \leq 11$ kW	1b	A1	18
Kraftrad/Kraftroller (auch mit Beiwagen)	Krafträder der Klasse 1 (A), jedoch mit $P_{Nenn\,max} \leq 25$ kW und Leistungsgewicht ≤ 0,16 kW/kg	1a	A	18
	Zweirad mit $V_{H\,max} > 50$ cm³ und bbH > 45 km/h	1	A	20 (2 J. im Besitz der Klasse A); sonst 25

In der amtlichen Unfallstatistik werden die motorisierten Zweiräder nach der Art der Verkehrsbeteiligung in Anlehnung an die Regelungen der StVZO und der Fahrerlaubnis – Verordnung in folgenden Gruppen zusammengefasst:

- Fahrräder
- Mofas
- Mopeds (inkl. Mokicks, Kleinkrafträder)
- Motorräder (inkl. Leichtkrafträder, Kraftroller)

In der Unfallanalyse ist es sinnvoll die Krafträder nach weiteren Parametern, insbesondere Bauform (z. B. Enduro, Chopper, Sport etc.), Masse, Abmessungen weiter zu differenzieren. Ähnliche Unterscheidungen können auch bei Fahrrädern sinnvoll sein.

3 Statistik/Unfallforschung

Im Jahr 2004 wurden durch die Polizei in Deutschland insgesamt 2,26 Millionen Unfälle im Straßenverkehr registriert [39]. Hierbei wurden über 5 800 Menschen getötet.

Erfreulicherweise geht die Anzahl der bei Verkehrsunfällen Getöteten trotz ständig steigendem Bestand an Kraftfahrzeugen in der Gesamtheit zurück. So ist seit 1970 ein stetiger Rückgang der Verkehrstoten in Deutschland zu verzeichnen, so dass die Zielvorstellung der Kommission der Europäischen Gemeinschaften, die Zahl der Verkehrstoten bis 2010 zu halbieren [13], in Deutschland greifbar nahe kommt.

Diese Entwicklung ist einerseits auf gesetzliche Vorschriften (Einführung von Richt- und Höchstgeschwindigkeiten, Gurtanlegepflicht, Helmtragepflicht etc.), andererseits auf die Erhöhung der aktiven und passiven Sicherheit der Fahrzeuge und nicht zuletzt auch auf eine verbesserte Ausbildung und vor allem die Fortschritte in der medizinischen Versorgung zurückzuführen. Auch bei den getöteten Fahrradfahrern ist ein deutlicher Rückgang festzustellen.

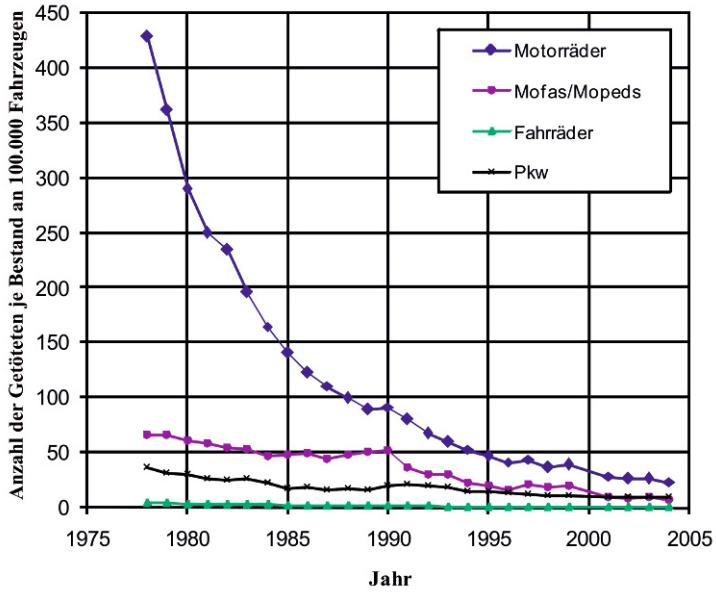


Bild A11-1 Getötete je 100.000 Fahrzeuge in Deutschland

Leider ist dies bei Unfällen mit motorisierten Zweirädern nicht dokumentiert. 2004 wurden in Deutschland 980 Benutzer von motorisierten Zweirädern getötet. Bezieht man die Anzahl der Getöteten auf den Bestand an Fahrzeugen, so wird die Gefährdung der Motorradfahrer deutlich – mit 23 Getöteten je 100.000 Fahrzeuge sind Motorradfahrer/-Beifahrer (Mofa/Moped 7,4 je 100.000) deutlich gefährdeter als Pkw-Insassen (7,2 Getötete je 100.000 Pkw). [39]

Fast ein Drittel (31 %) der Motorradbenutzer kamen bei Alleinunfällen ums Leben. [40] Bei den übrigen Unfällen ist in den meisten Fällen ein Pkw der Unfallgegner. [19]

In der überwiegenden Mehrheit aller registrierten Pkw-Motorradunfälle wird der Pkw-Fahrer als (Haupt-)Verursacher angesehen.

Bei der polizeilichen Unfallaufnahme werden die Verkehrsunfälle nach Unfallart und Unfalltyp unterschieden. Diese Angaben gehen als Datenbasis in die Statistiken des Statistischen Bundesamtes ein. Für eine Klärung der Schuldfrage kann die Einteilung nach Unfallart und -typ ausreichend und sinnvoll sein, jedoch ist diese für die Unfallforschung ungenügend. Für forensische Zwecke der Unfallforschung erfolgt daher eine weitere Strukturierung des Unfallgeschehens in Kollisionsart und Kollisionstyp sowie Aufprallart und Aufpralltyp.

Die Unfallart beschreibt den Unfallablauf, also die Bewegungsrichtung der Unfallbeteiligten. Es werden dabei zehn Unfallarten unterschieden. Zum Beispiel kann es sich dabei um einen Zusammenstoß mit einem Fahrzeug handeln, das entgegenkommt (Unfallart 4), das vorausfährt bzw. wartet (Unfallart 2) oder einbiegt und kreuzt (Unfallart 5). Ferner werden auch Alleinunfälle, wie das Abkommen von der Fahrbahn nach rechts (Unfallart 8) oder links (Unfallart 9), erfasst.

Der Unfalltyp beschreibt hingegen die Konfliktsituation (Verkehrssituation), die zum Unfall führte. Hierzu erfolgt die Einteilung in Fahrunfall (1), Abbiegeunfall (2), Einbiege-Kreuzen-Unfall (3), Überschreiten- Unfall (4), Unfall durch ruhenden Verkehr (5), Unfall im Längsverkehr (6) sowie sonstige Unfälle (7).

Diese relativ grobe Einteilung wurde nach [38] weiter untergliedert. Anhand von 506 Unfällen aus dem Datenbestand der Versicherungen zwischen Motorrad und Pkw, bei denen der Motorradfahrer als 02 eingetragen war, wurden folgende hauptsächlich auftretenden Unfallbeschreibungen herausgearbeitet:

- Kreuzung, Motorrad als Bevorrechtigter
- linksabbiegender Pkw, entgegenkommendes Motorrad
- Pkw wendet
- Motorrad überholt

Nach [22] und [15] lassen sich 95 % der untersuchten Unfälle mit fünf gefährlichen Situationen beschreiben (**Bild A11-2**).

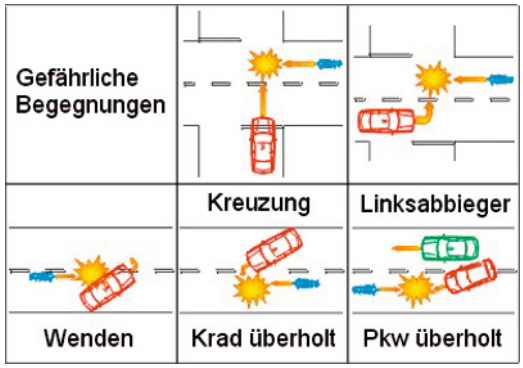
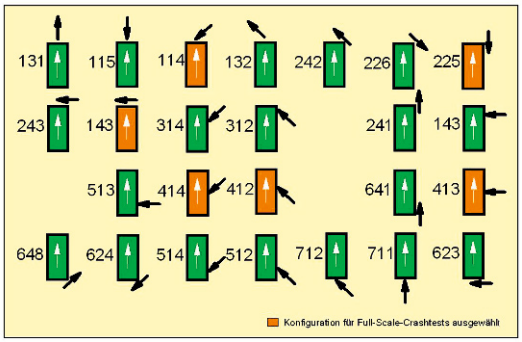


Bild A11-2 Gefährliche Situationen nach [15]

Neben den Datenbanken der Versicherungswirtschaft können auch aufwändige Einzelfallerhebungen (In-Depth-Studies) zur Eingrenzung der Unfallabläufe und Unfallursachen herangezogen werden.



Nach Analyse von 501 Motorradunfällen aus den USA (Los Angeles) und Deutschland (Hannover) wurden bei der Erarbeitung der Norm ISO 13232 25 Anstoßkonstellationen von Motorrädern gegen Pkw in Abhängigkeit vom Anstoßpunkt am Pkw, dem Anstoßpunkt am Motorrad und dem Anstoßwinkel definiert (**Bild A11-3**).

Bild A11-3 ISO 13232-Positionen

In [5] wurden die Unfälle der ISO 13232 Daten und weitere Unfälle der DEKRA-Datenbank in die Anstoßkonfigurationen nach ISO 13232 eingeordnet.

Die Analysen machen deutlich, dass dem Anprall des Kraftrades an die Pkw-Front und Seite die höchste Bedeutung zukommt. Diese Unfallkonstellation wird in der Rekonstruktion oft als Unfall im Querverkehr bezeichnet. Hingegen werden Unfälle bei denen das Zweirad vom Pkw mit der Front angestoßen wird als Unfälle im Längsverkehr bezeichnet.

Aus der Vielzahl weiterer interessanter Ergebnisse der Unfallstatistik und Unfallforschung soll nun noch die Unfallursache angesprochen werden. So genannte allgemeine Ursachen (Glätte, Nebel, Wild auf der Fahrbahn) werden in weniger als 2 % aller registrierten Unfälle notiert. Technische Mängel wurden 2004 in weniger als 0,2 % der Unfälle als Ursache angesehen. Bei einer speziellen Studie im Saarland [6] wurde bei über 15 % der von Rollern (50 cm³) verursachten Unfälle, ein technischer Mangel oder Tuning als Ursache angesehen.

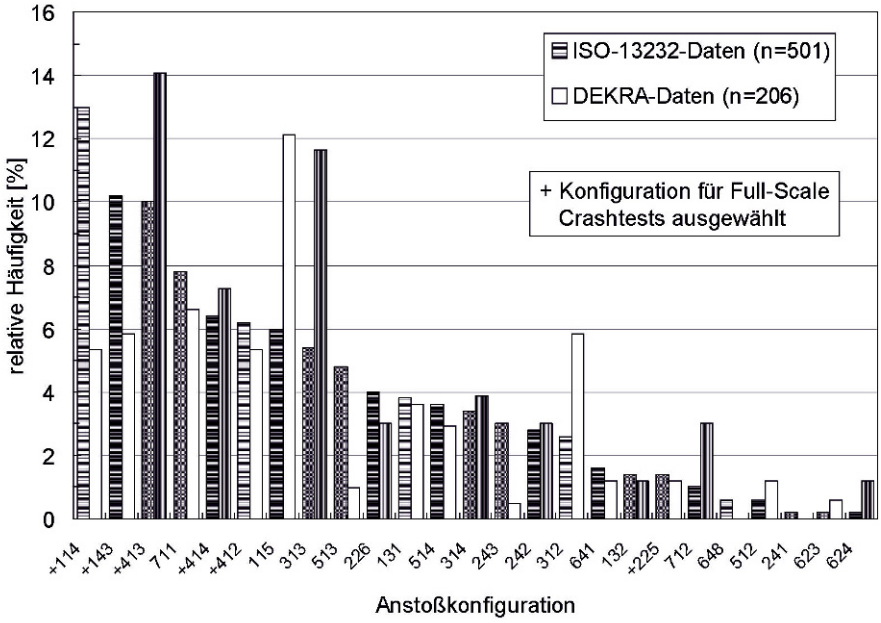


Bild A11-4 Einordnung der Kollisionen in die Positionen nach ISO 13232

4 Einlaufphase

4.1 Grundlagen zur Dynamik

Zweiräder unterscheiden sich in der Fahrdynamik grundlegend von mehrspurigen Fahrzeugen. Um einen stabilen Fahrzustand zu erreichen, muss die Resultierende aller im Schwerpunkt angreifenden Kräfte, durch eine Fläche gehen, die von den idealisierten Kraftangriffspunkten der Reifen mit der Fahrbahn begrenzt wird.

Bei Zweirädern besteht diese Stabilitätsfläche eigentlich nur aus einer Geraden zwischen den Rädern.

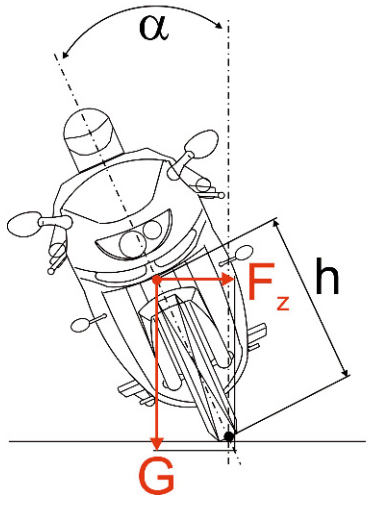
Im Stand oder bei geringen Geschwindigkeiten ist das Zweirad daher instabil. Bei Geschwindigkeiten ab ca. 20 km/h wird das Zweirad durch die wirkenden Kreiselkräfte stabil.

Von hoher Bedeutung sind die bei höheren Geschwindigkeiten bei Zweirädern teilweise auftretenden Eigenschwingungen und Stabilitätsstörungen. (siehe auch [4]) Hier ist zunächst die Eigenschwingung des Lenksystems zu nennen. Dieses Flattern tritt meist ab ca. 50 bis 70 km/h auf [4] und verläuft in der Regel unkritisch. In höheren Geschwindigkeitsbereichen kann es auch zu der gefährlicheren Form des „Lenkerschlagens“ kommen. Die Frequenz beträgt ca. 9 bis 10 Hz.

Von großer Gefahr ist jedoch das Pendeln von Motorrädern im hohen Geschwindigkeitsbereich. Es handelt sich um eine gekoppelte Schwingung um Lenk-, Gier- und Rollachse mit einer Frequenz von etwa 1 bis 4 Hz. Diese ab ca. 160 km/h auftretende Schwingung des gesamten Motorrad-Systems kann bei zu geringer Eigendämpfung zu einer sehr gefährlichen Instabilität und letztendlich auch zum Sturz oder zum Verlassen der Fahrlinie mit anschließender Kollision führen.

4.2 Kurvenfahrt

Beim Durchfahren einer Kurve tritt die Fliehkraft auf, welche durch die Schräglage (Rollwinkel) kompensiert werden muss.



Die Fliehkraft ergibt sich aus:

$$F = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

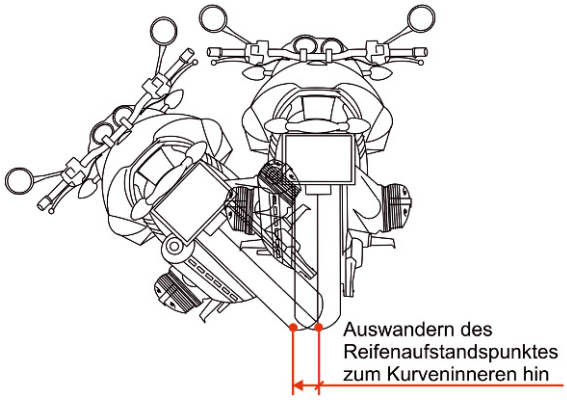
Aus dem Momentengleichgewicht im Schwerpunkt

$$G \cdot h \cdot \sin\alpha = F \cdot h \cdot \cos\alpha$$

folgt dann

$$v = \sqrt{r \cdot g \cdot \tan\alpha}$$

Bild A11-5 Kräfte in der Kurvenfahrt



Bei der Kurvenfahrt von Zweirädern wandert der Reifenaufstandspunkt nach innen. Da gewöhnlich beim Motorrad vorne und hinten stark unterschiedliche Reifenbreiten vorliegen, führt dies letztendlich auch zu einer veränderten Bahnkurve.

Bild A11-6 Auswandern des Reifenaufstandspunktes

Ferner wird durch dieses Auslenken des Reifenaufstandspunktes bei Einleitung von Umfangskräften (Beschleunigen – Bremsen) ein Moment um die Rollachse erzeugt.

Theoretisch sind bei heutigen Motorrädern sowohl unter Berücksichtigung der Bauform als auch der Kraftschlusspotenziale der Reifen Schräglagen von ca. 50 Grad kein Problem. Ebenso wie die erreichbare Verzögerung hängt jedoch auch die Beschleunigung in der Praxis stark von den Fähigkeiten des Fahrers ab.

4.3 Beschleunigung

Physikalisch ist die Beschleunigung einerseits durch das Drehmoment des Motors, andererseits auch durch das Anheben des Vorderrades und den Kraftschluss des Hinterrades mit der Fahrbahn begrenzt. Die beim Beschleunigen am Schwerpunkt angreifenden Kräfte sind in **Bild A11-7** dargestellt.

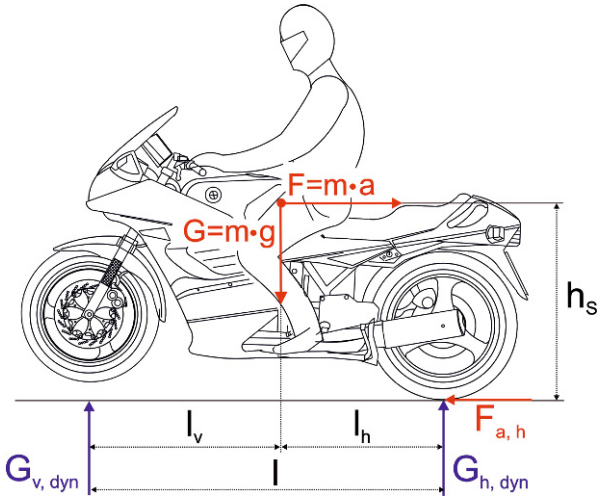


Bild A11-7 Kräfte beim Beschleunigen

Es gilt: $G_{h,\mathrm{dyn}} = G\frac{l_v}{l} + m \cdot a \cdot \frac{h_s}{l}$

$$G_{v,\mathrm{dyn}} = G\frac{l_h}{l} - m \cdot a \cdot \frac{h_s}{l}$$

Die Grenze ist dann erreicht, wenn das Vorderrad abhebt und somit die Vorderradnormalkraft zu Null wird.

Dieser Grenzwert ist also dann erreicht, wenn:

$$a = g \cdot \frac{l_h}{h_s}$$

Eine weitere Grenze ist durch den Schlupf am Hinterrad gegeben. Die heutigen Reifen für Krafträder ermöglichen jedoch Kraftschlussbeiwerte beim Bremsen von 1,2 auf trockener Straße [31]. Bei der Beschleunigung liegen diese noch etwa 10 % höher, so dass in Verbindung mit den bei heutigen Motorrädern möglichen Leistungsgewichten Beschleunigungen im Bereich von 10 m/s² möglich sind. Eine Auswertung von Beschleunigungsmessungen aus [23] ist in **Bild A11-8** dargestellt.

Dieses Leistungspotenzial dürfte jedoch in der Praxis selten ausgeschöpft werden, so dass im Straßenverkehr gegebenenfalls mit wesentlich geringeren Beschleunigungen der Krafträder gerechnet werden kann. Einige Vergleichswerte wurden in **Tabelle A11.2** dargestellt.

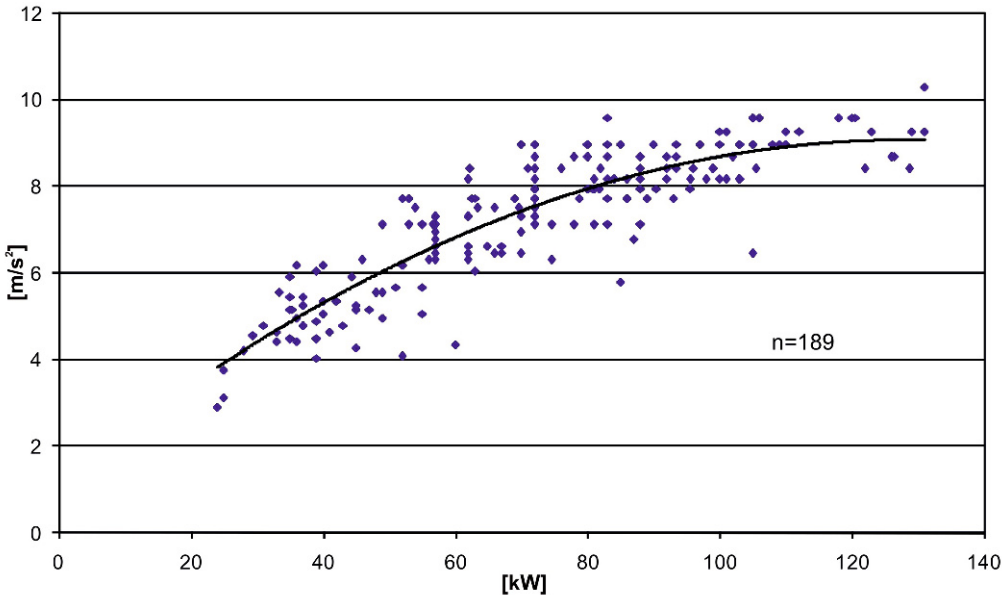


Bild A11-8 Beschleunigung moderner Krafträder bezogen auf die Motorleistung

Tabelle A11.2 Mittlere Anfahrbeschleunigungen

Fahrzeugart	Normal/Zügig	Schnell/Maximal
Fahrrad	1,5–2,5 m/s²	3,0–4,0 m/s²
50 cm³	1,5–3,0 m/s²	2,0–5,0 m/s²
Motorrad	2,0–3,5 m/s²	5,0–7,0 m/s²

Bei Mofas, Kleinkrafträdern etc. liegen die maximalen Beschleunigungen deutlich unter den Werten von Krafträdern. Dennoch wurden auch hier bereits Beschleunigungswerte bei getunten Fahrzeugen über 4 m/s² gemessen. Aufgrund der Motorleistung und den abweichenden Schwerpunktslagen ist auch hier die maximale Beschleunigung eher durch das Drehmoment des Motors und das Anheben des Vorderrades als durch den Kraftschluss der Reifen begrenzt.

4.4 Höchstgeschwindigkeit

Moderne Motorräder mit Motorleistungen über 144 kW können durchaus Höchstgeschwindigkeiten von 300 km/h und darüber erreichen. Eine Auswertung der in Fachzeitschriften erläuterten Messungen von Höchstgeschwindigkeiten moderner Motorräder ist in **Bild A11-9** dargestellt.

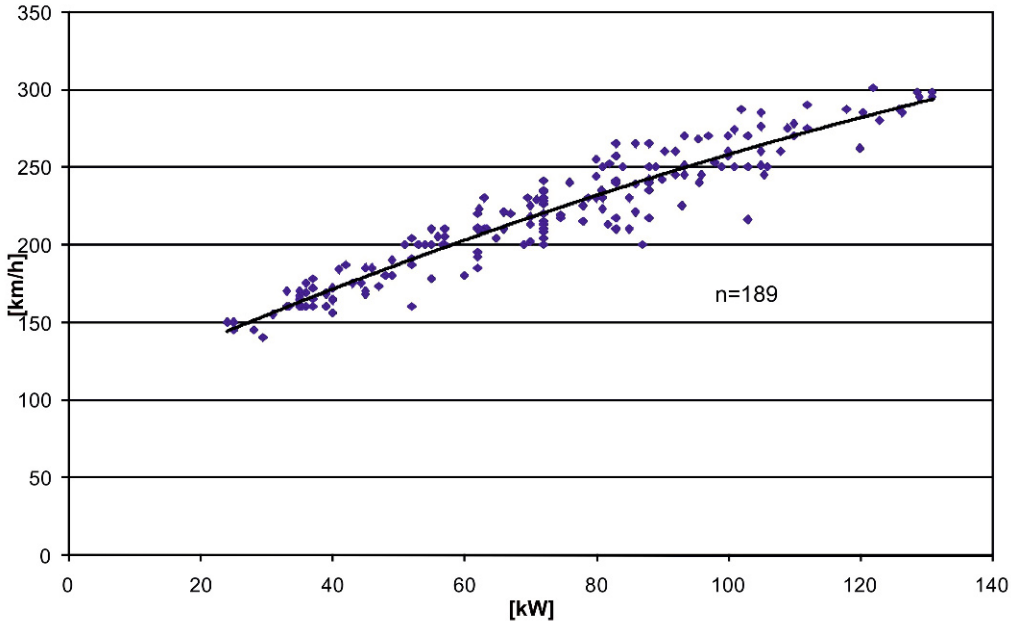


Bild A11-9 Höchstgeschwindigkeit moderner Krafträder

Die Verteilung verdeutlicht das Leistungspotenzial heutiger Motorräder. Die Höchstgeschwindigkeit ist entweder durch die Fahrwiderstände oder eventuell auch (seltener) durch bauliche Maßnahmen begrenzt.

Bei motorisierten Zweirädern für Fahrzeugführer, welche das 18. Lebensjahr noch nicht vollendet haben, liegen gesetzliche Regelungen zur Höchstgeschwindigkeit vor.

In diesem Zusammenhang ist jedoch auf das Problem „Tuning“ insbesondere von Mofas, Kleinkrafträdern oder allg. Rollern hinzuweisen. Während es früher nur mit aufwändigen Methoden möglich war die bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeugs im 50 cm^3 Bereich deutlich zu erhöhen, kann dies bei einer Vielzahl der Roller trotz der Regelungen des § 30a StVZO durch einfache Änderungen erfolgen.

Einerseits kann z. B. einfach eine Drossel in Form eines Distanzringes aus dem automatischen Getriebe entnommen werden. Dies führt in der Regel bereits zu einer deutlichen Erhöhung der Höchstgeschwindigkeit in den Bereich oberhalb von 60 km/h. Eine zusätzliche Änderung der elektronischen Drehzahlbegrenzung führt zu einer Erhöhung der Motordrehzahlen, so dass es allein mit diesen beiden Änderungen bei einer Vielzahl von Rollern möglich ist, hier bereits Geschwindigkeiten oberhalb von 100 km/h zu erreichen. Im Einzelfall sind hier Fahrzeuge polizeilich auffällig geworden, welche theoretische Höchstgeschwindigkeiten auf ebener Fahrbahn von über 140 km/h erreicht haben (trotz erlaubter 45 km/h).

Bei der Rekonstruktion eines Unfalls mit einem entsprechenden Kraftfahrzeug ist daher auch die Möglichkeit einer über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit möglichen Ausgangsgeschwindigkeit gegebenenfalls in Betracht zu ziehen.

Angaben zu möglichen Fahrgeschwindigkeiten nicht motorisierter Zweiräder sind in **Tabelle A11.3** zusammengefasst.

Tabelle A11.3 Mögliche Bewegungsgeschwindigkeiten von Fahrrädern

Bauform	Normal/Mittel	Schnell/Maximal
Kinder-Rad – 16″	1,5–4,0 m/s	4,0–6,0 m/s
Fahrrad 18″–20″	2,5–4,5 m/s	5,0–7,0 m/s
Fahrrad 26″–28″	3,5–6,5 m/s	ab 7,0 m/s

4.5 Bremsen

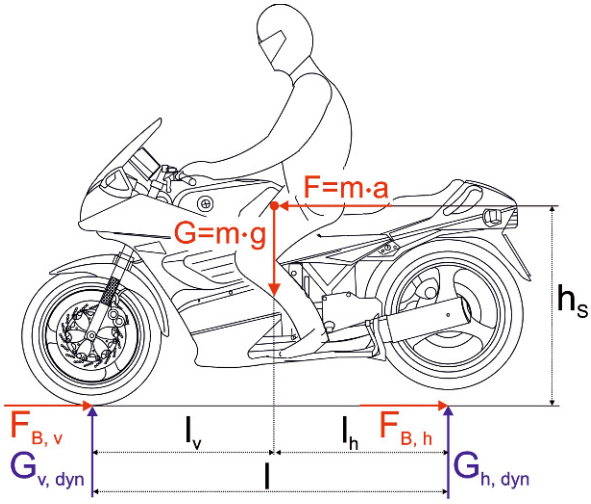


Bild A11-10 Kräfte beim Bremsen

Während die Beschleunigung und sogar das Erreichen der Höchstgeschwindigkeit eines Kraftrades auch für einen Fahranfänger problemlos realisiert werden kann, stellt eine Abbremsung wesentlich höhere Anforderungen an das System Mensch/Maschine. Einerseits besteht bei Stabilitätsverlust die Gefahr des Sturzes, andererseits erfolgt bei der Mehrzahl der im Verkehr befindlichen Zweiräder die Verteilung der Bremskraft durch den Fahrer.

Daher besteht bei falscher Abbremsung nicht nur die Gefahr des Blockierens eines Rades, sondern auch die Gefahr des Überschlages. Bei Motorrädern kommt noch eine ausgeprägte Aufstellneigung bei Abbremsung in Kurvenfahrt durch das Auswandern des Reifenaufstandspunktes nach Innen hinzu.

Die Neigung zum Überschlag wird beim Kraftrad durch die Lage des Schwerpunktes und den kurzen Radstand begünstigt. Zum anderen ermöglichen die modernen Motorradreifen hohe Kraftschlussbeiwerte über 1,0.

Mit den Gleichungen in 4.3 „Beschleunigung“ kann dieser kritische Überrollpunkt (Normalkraft des Hinterrades geht zu Null) bestimmt werden. Trotz hoher Kraftschlussbeiwerte heutiger Reifen besteht auch gerade bei schneller Betätigung der Vorderradbremse die Gefahr des dynamisch überbremsten Vorderrades. In diesem Fall steigt die Bremskraft am Vorderrad schneller an als die Normalkraft und es kann unerwartet zum Erreichen der Haftgrenze kommen.

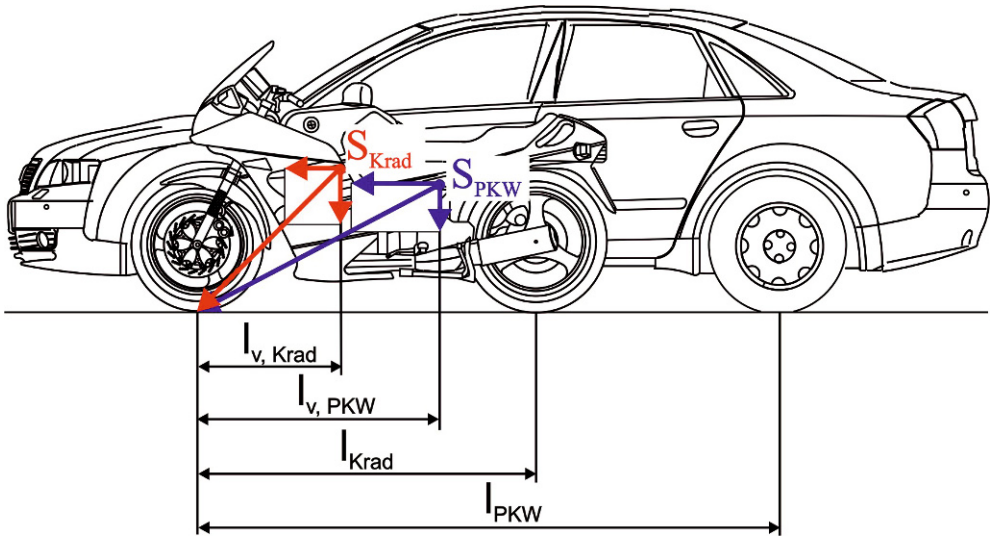


Bild A11-11 Schwerpunktlage Kraftrad/Pkw

Da auch bei genau aufrechter Fahrt Seitenführungskräfte und Kreiselmomente am Vorderrad für die Stabilisierung eines Zweirades erforderlich sind führt ein überbremstes Vorderrad oft unmittelbar zum Sturz.

Oft kann daher bereits aus der Länge einer Blockierspur entschieden werden, ob es sich um eine Spur des Vorder- oder Hinterrades handelt. Eine eindeutige Entscheidung anhand der Spurenbreite ist trotz deutlich unterschiedlicher Reifenbreiten nicht immer möglich. Eine verstärkte Kantenzeichnung kann jedoch auf eine Vorderradspur hindeuten.



Bild A11-12 Vorderrad-Blockierspur

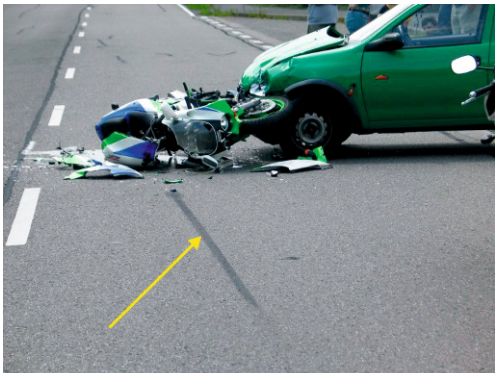


Bild A11-13 Hinterrad-Blockierspur

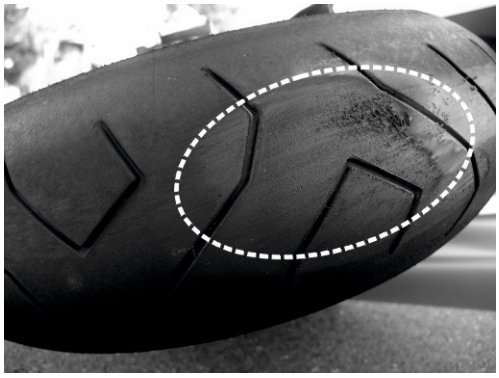


Bild A11-14 Brems-Platten-Bildung

Eine sichere Zuordnung ist jedoch oft nur über das Spurenbild am Reifen (Bremsplatten?) selbst oder zumindest bei eigener Besichtigung der Spur möglich. Durch die dynamische Radlastverlagerung beim Bremsen verändert sich oft das Spurenbild. Wird ein Kraftrad allein über das Hinterrad blockierend verzögert, ist die Zeichnungsbreite oft größer als bei zusätzlicher Abbremsung des Vorderrades. [17]

Die unter idealen Bedingungen erreichbaren Vollbremsverzögerungen von Krafträdern sind relativ hoch. Im nachfolgenden Diagramm ist eine Auswertung von Verzögerungsmessungen aus [23] dargestellt.

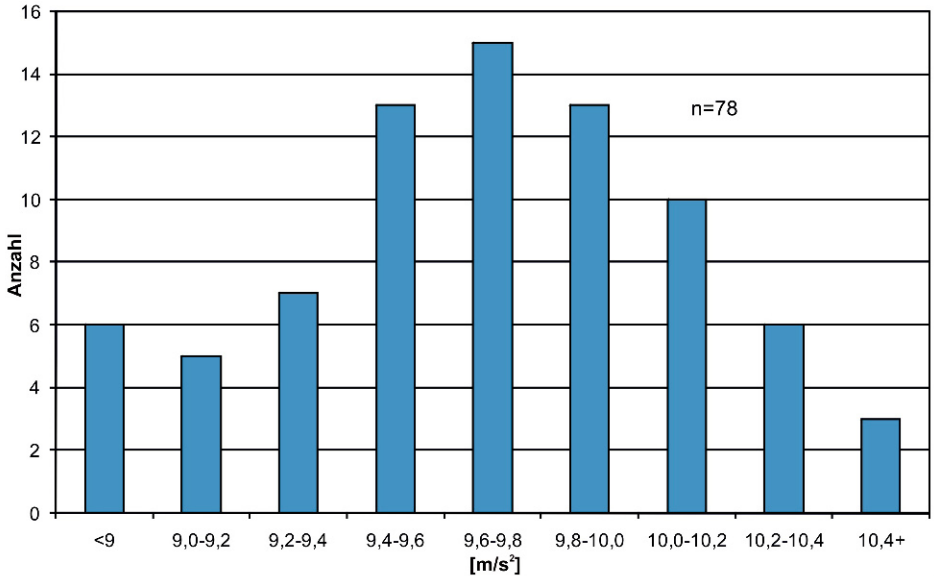


Bild A11-15 Maximalverzögerungen moderner Krafträder

Es wird ersichtlich, dass die häufigsten Werte im Bereich von 9,4 bis 10,0 m/s^2 (teilweise auch über 10 m/s^2) erreicht werden. Das relative Maximum liegt im Bereich von 9,6 bis 9,8 m/s^2.

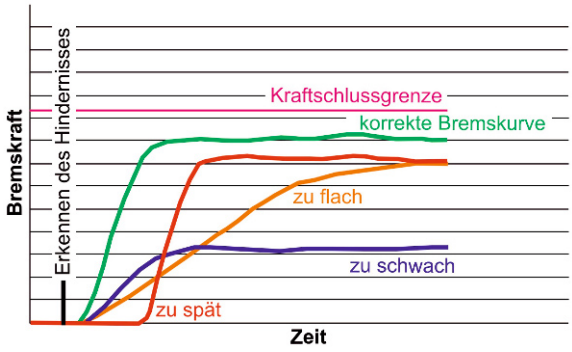


Bild A11-16 Bremskurven von Motorradfahrern

Bei nicht ABS-gebremsten Krafträdern sind diese hohen Werte jedoch nur bei großer Erfahrung und Fähigkeit des Fahrers erreichbar. Tatsächlich wird die Güte der Abbremsung des Zweirades von zwei wesentlichen Faktoren bestimmt: Der Höhe der maximalen Verzögerung und dem zeitlichen Verzug (entspricht einer menschlichen Schwellzeit) bis zum Erreichen des Maximalwertes. Gerade Anfänger bremsen hier zu „schwach“, zu „flach“ oder zu „spät“, so dass die technisch mögliche Verzögerungswirkung selten ausgenutzt wird (**Bild A11-16**).

Neben der zu geringen maximalen Verzögerung, ist auch noch der verzögerte Anstieg der Bremsverzögerung zu berücksichtigen.

Die tatsächlichen mittleren Verzögerungen im Straßenverkehr liegen daher oft wesentlich unter den technisch möglichen Maximalverzögerungen der Motorräder.

Bei ABS-gebremsten Motorrädern konnten auch von Fahranfängern im Schnitt Verzögerungen in den oberen Bereichen der Werte erreicht werden. [2]

Bei Bremsversuchen mit Probanden wurden bereits vielfach Bremsverzögerungen in der Praxis eingegrenzt. Eine Auswahl häufig vorkommender Bremsverzögerungen ist in **Tabelle A11.4** dargestellt. Für Fahrräder ergeben sich z. B. aus [11] Maximalwerte.

Ergänzend ist anzumerken, dass bei ausschließlicher Verzögerung des Kraftrades mit dem Hinterrad oft nur Verzögerungswerte von 3,0 bis 4,5 m/s^2 erreicht werden.

Tabelle A11.4 Realistische mittlere Verzögerungen im Straßenverkehr

Fahrer	Verzögerungen
Anfänger	4,5–7,5 m/s^2
Fortgeschrittene	6,5–8,5 m/s^2
Experten	8,0–10,0 m/s^2

Eine „falsche“ Verzögerung des Kraftrades vor dem Unfall – und hier im Wesentlichen ein dynamisch überbremstes Vorderrad – führt meistens zum Sturz. Nach [6] wurde festgestellt, dass 24 % der Krafträder und 16 % der Roller bei den untersuchten Unfällen (die von Sachverständigen begutachteten Verkehrsunfälle mit Beteiligung motorisierter Zweiräder) bereits vor der Kollision gerutscht waren. Da durch das Rutschen des Zweirades vor der Kollision die Wahrscheinlichkeit schwerer Verletzungen (MAIS 4+) um nahezu das Doppelte ansteigt [36], handelt es sich hier um einen für den Zweiradfahrer sehr gefährlichen Bewegungsablauf.

Hier wird der enorme Vorteil eines ABS beim Kraftrad ersichtlich. Neben der Möglichkeit die Maximalabbremsung sicher und vor allem bereits ohne deutlichen Zeitverzug zu erreichen (steiler Anstieg der Verzögerung und schnelles Erreichen der maximalen Verzögerung) liegt der wesentliche Vorteil somit auch in einer Erhaltung der Stabilität des abgebremsten Kraftrades. Nach [19] wurde nach Analyse von 200 Schwerstunfällen mit Motorradbeteiligung festgestellt, dass etwa 8 bis 17 % der schweren Motorradunfälle durch ABS zu vermeiden gewesen wären. In [6] wurde sogar festgestellt, dass 20 % der Unfälle bei Einsatz von ABS bei motorisierten Zweirädern zu vermeiden gewesen wären. Der wesentliche Unterschied beider Untersuchungen besteht darin, dass in [6] alle motorisierten Zweiradunfälle (auch mit Leichtverletzten und Alleinunfälle) für die Beurteilung herangezogen wurden.

Von Sachverständigen soll oft anhand einer Brems- oder Blockierspur eines Kraftrades beurteilt werden, welche Verzögerung möglicherweise vorgelegen haben kann. Handelt es sich um eine einzige Brems- bzw. Blockierspur, so ist zunächst zu entscheiden, ob die Bremsung vom Vorder- oder Hinterrad oder gemeinsam von beiden Bremsen durchgeführt wurde. Darüber hinaus ist die Möglichkeit ungünstiger Bremskraftverteilung in der Unfallsituation zu berücksichtigen.

Um genaue Ergebnisse zu erhalten, sind in Einzelfällen sicherlich Bremsversuche mit vergleichbarem Kraftrad und vergleichbarer Bereifung an der Unfallstelle sinnvoll. Bei Einsatz eines Bremsverzögerungsmessgerätes (z. B. MAHA VZM 100) ist dann darauf zu achten, dass

der Nickwinkel des Kraftrades während der Abbremsung ausgeglichen wird. Bedingt durch das Abbremsen steigt die Radlast am Vorderrad. Das Kraftrad erfährt ein Bremsnickmoment um die Querachse. Im Beschleunigungssensor des Messgerätes wird die Erdbeschleunigungskomponente durch das Einnicken des Kraftrades zusätzlich gemessen. Diese Eintauchbewegung der Vorderradgabel ist verzögerungsabhängig und kann je nach Kraftrad teilweise auch über 50 mm betragen.

Bei der Bestimmung der relevanten Verzögerung ist daher dieser Nickwinkel entsprechend zu berücksichtigen.

4.6 Kippen

Der Kippvorgang eines Kraftrades aus stabiler Fahrbewegung heraus (z. B. nach blockiertem Vorderrad) kann in der Regel nicht allgemeingültig rechnerisch bestimmt werden. Der Kippvorgang hängt im Wesentlichen von dem Stabilitätsbereich ab, in welchem sich das Kraftrad befindet und somit auch von der Geschwindigkeit.

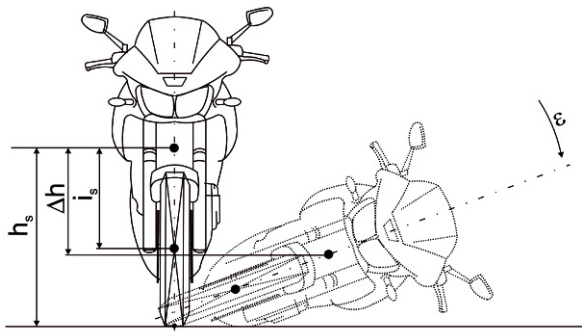


Bild A11-17 Kippvorgang

Hohe Kreiselkräfte führen letztendlich zu einer Stabilisierung des Kraftrades auch in vertikaler Fahrposition, so dass ohne blockiertes Rad relativ große Wegstrecken auch in Form einer Rollbewegung ohne Kippen des Kraftrades zurückgelegt werden können.

In [17] wurden hier Versuche vorgestellt mit blockiertem Vorderrad. Hierbei konnten Kippzeiten von 0,35 bis 0,7 s festgestellt werden.

In [8] wurde ein Berechnungsweg für die Untergrenze des Kippens beim Kraftrad vorgestellt. Die Kippzeit ergibt sich aus der Auswertung einer Energiebilanz der potenziellen und Rotationsenergie mit

$$t = \pi \cdot \sqrt{\frac{i_s^2 + h_s^2}{2 \cdot g \cdot \Delta h}}$$

Für handelsübliche Krafträder ermittelt sich hier eine Kippzeit um ca. 0,6 bis 0,8 s.

Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass es sich hierbei um die Kippzeit eines Kraftrades theoretisch ohne weitere äußere Kräfte (insbesondere kreiselstabilisierende Kräfte) handelt. Darüber hinaus ist in der Fahrbewegung auch die Umfangs- und Seitenführungskraft der Reifen nicht zu vernachlässigen. So kann es gerade aus Schräglagen heraus zum blitzartigen Kippen des Kraftrades auf die abgewandte Seite kommen. Hierdurch können auch wesentlich geringere Kippzeiten erreicht werden.

Eine Verlängerung der Kippzeiten ist durch stabile Rollbereiche des Kraftrades durchaus denkbar.

4.7 Ausweichen

Bereits mehrfach wurde versucht, das Ausweichen eines einspurigen Fahrzeugs entweder mit dem Verfahren der schrägen Sinuslinie oder dem Kreisbogenverfahren anzunähern. Es hat sich jedoch bei den bisher durchgeführten Fahrversuchen gezeigt, dass beide Verfahren nicht zu einem befriedigenden Ergebnis bei der Beschreibung des tatsächlichen Ausweichvorganges eines Zweirades führen.

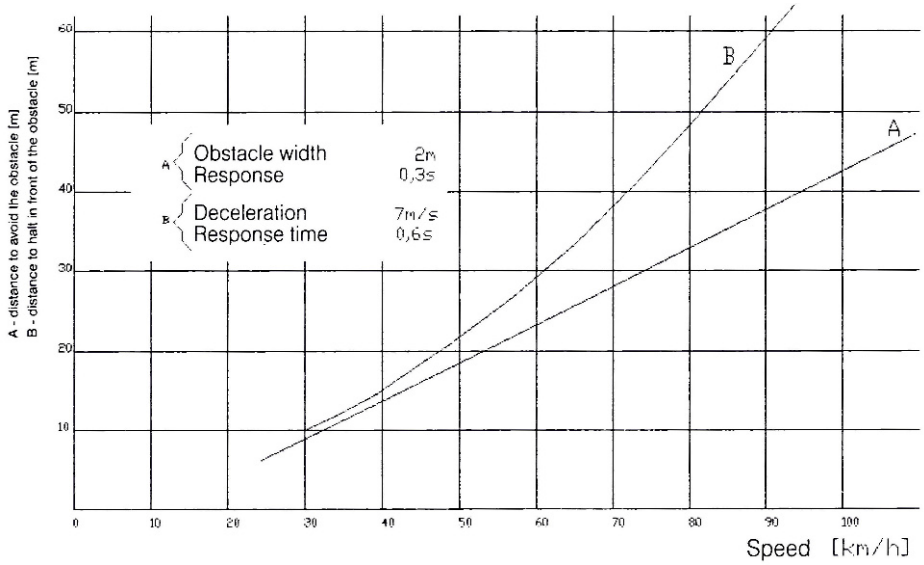


Bild A11-18 Vergleich Bremsen/Ausweichen [8]

Erste Ausweichversuche wurden unter anderem in [8] beschrieben. Hier wurde das Ausweichen vor einem 2,0 m breiten Hindernis mit Probanden eingegrenzt. Es zeigten sich Ausweichzeiten um ca.1,2 bis 1,5 s.

Diesbezüglich ist noch anzumerken, dass offensichtlich kein vollständiger Fahrspurwechsel, d. h. mit dem Erreichen einer parallel zur vorhergehenden Fahrlinie verlaufenden Endposition des Zweirades, vorgenommen wurde.

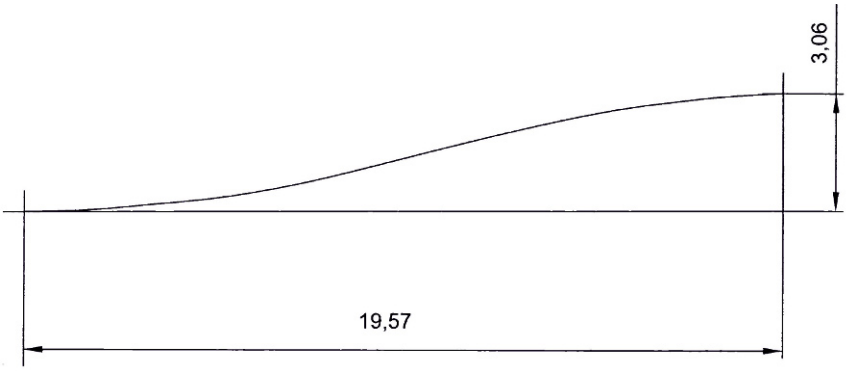


Bild A11-19 Beispiel Ausweichversuch 30 km/h [20]

Ähnliche Versuche wurden auch von der Universität Zilina durchgeführt und sind in [20] beschrieben. Hier wurden normale und schnelle Spurwechsel mit Geschwindigkeiten von 20, 30 und 35 km/h um Spurabstände von 1 bis 4 m durchgeführt.

Bei schnellen Spurwechseln wurden hier Querbeschleunigungen in der Schräglage bis 2,5 m/s^2 gemessen und die Spurwechselzeiten lagen um ca. 2,5 s.

Bei normalem Spurwechsel konnten Spurwechselzeiten in ca. 3 s ermittelt werden. Bei sehr schnellem Spurwechsel mit hohen Schräglagewinkeln und Querbeschleunigungen wurden auch reine Ausweichzeiten unter 2 s ermittelt.

Ein weiterer Ansatz ergibt sich aus der Studie [27]. Hier wurde der Spurwechsel empirisch untersucht, wobei der Fahrtvorgang des Zweirades in insgesamt drei Bereiche aufgeteilt wurde. Der erste Bereich begann bei bewusstem Einleiten des Ausweichvorganges durch den Fahrer und endete mit dem sichtbaren Verlassen der geraden Fahrspur. Der zweite Bereich endete mit dem Erreichen des vorgegebenen Seitenversatzes (B). Der dritte Bereich endet dann nach Abschluss der Regelbewegung zum Einlenken in eine stabile Fahrposition nach Erreichen des Seitenversatzes.

Für den ersten Bereich konnten bei den durchgeführten Versuchen Zeiten von 0,7 bis 1,0 s ermittelt werden. Bei geringen Geschwindigkeiten (50 km/h) lagen die Zeiten bei etwa 1 s, bei höheren Geschwindigkeiten bei 0,7 bis 0,8 s. Im letzten Bereich des Spurwechsels konnten Zeiten von 0,9 bis 1,2 s ermittelt werden. Hohe Zeiten wurden wiederum bei geringen Geschwindigkeiten (50 km/h) und geringe Zeiten bei hohen Geschwindigkeiten ermittelt.

Der mittlere Bereich des eigentlichen Spurwechsels wird durch den seitlichen Abspann (Querversatz B) und die erreichte Querbeschleunigung (a_{quer}) bestimmt.

Hieraus ergaben sich folgende Näherungen:

$$t_{ges} = t_1 + t_2 + t_3$$

mit:

$$t_1 = 0{,}7 - 1{,}0 \text{ s} \qquad t_2 = 2\sqrt{\frac{B}{4 \cdot a_{quer}}} \qquad t_3 = 0{,}9 - 1{,}2 \text{ s}$$

Der Ausweichweg ergibt sich dann entsprechend aus der zeitlichen Berechnung.

Diese Wertebereiche lassen sich somit weitestgehend auch mit den Versuchen in [20] in Einklang bringen. Beim Vergleich der in [8] veröffentlichten Versuche ist zu beachten, dass hier kein vollständiger Spurwechsel, sondern nur ein Ausweichvorgang vor einem Hindernis (kein Abschluss der Fahrbewegung in eine parallele Fahrlinie) vorgelegen hat.

5 Kollisionsphase



Bild A11-20 Deutliche Anhebung des gesamten Systems im Stoß

Wenn schon die Bestimmung der Einlaufphase beim einspurigen Fahrzeug einen erheblich höheren Aufwand erfordert, als beim mehrspurigen Fahrzeug, so trifft dies auch in noch höherem Maße für die Kollisionsphase zu. Einerseits ist zu berücksichtigen, dass bei Pkw-Zweirad-Unfällen nicht mehr von einem ebenen Stoß ausgegangen werden kann. (Stoßmodelle für ebene Stöße sind hier meist nicht mehr anwendbar).

Andererseits kommt es zu einer Massentrennung von Zweirad und Aufsaßen, in der Regel in der Kollisionsphase (teilweise auch bereits vor der Kollision), was die Anwendung von Modellbetrachtungen weiterhin erschwert. Der sich vom Kraftrad trennende Fahrer oder Beifahrer hat gegenüber der Zweiradmasse und auch der Gesamtmasse einen nicht zu vernachlässigenden Anteil. Darüber hinaus können Aufsaßen und Zweirad nach der Kollision unterschiedliche Auslaufrichtungen aufweisen. Zum anderen liegen hohe Massenunterschiede des Zweirad-/Fahrer-Systems in Bezug auf den Stoßpartner (Pkw) vor. All diese Parameter erschweren gerade beim Pkw-Zweirad-Unfall die Rekonstruktion und Analyse.

Grundsätzlich sind daher die Bandbreiten bei der Rekonstruktion von Pkw-Zweirad-Unfällen wesentlich größer als bei Pkw-Pkw-Unfällen. [28]

5.1 Crash-Versuche

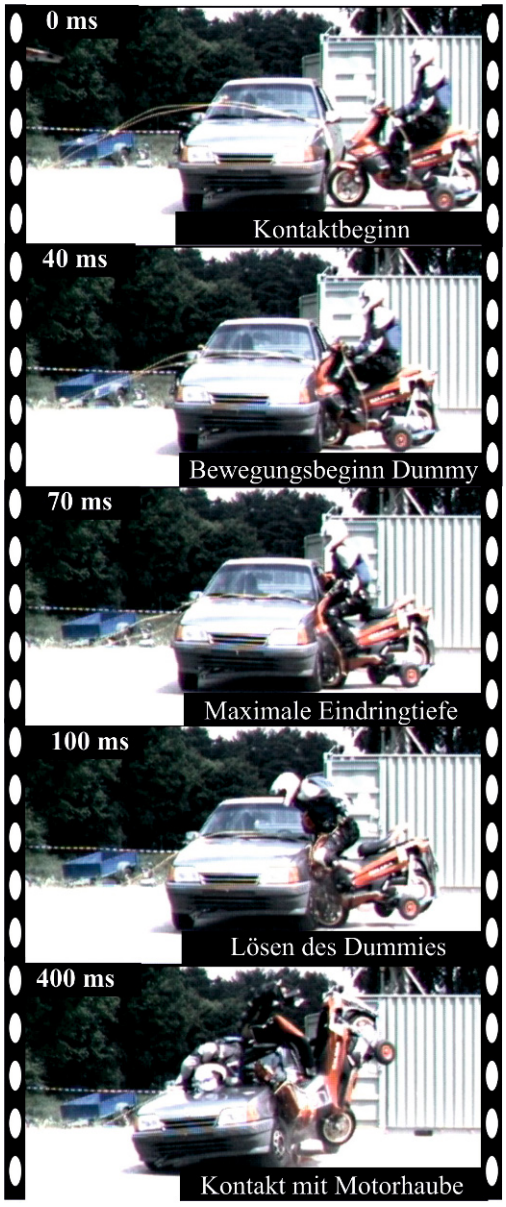
Während für Pkw-Pkw-Kollisionen bereits seit Jahrzehnten Crash-Versuche in der Automobilindustrie zum Standard gehören und diese auch von unabhängigen Institutionen permanent durchgeführt und teilweise veröffentlicht werden, wurden entsprechende Unfallversuche für Zweiräder verhältnismäßig selten realisiert. Neben einigen bei Fahrzeugherstellern und Institutionen durchgeführten Crash-Tests sollen nachfolgend im Besonderen nur einige Versuchsreihen erwähnt werden:

Severy [34]

Diese Versuche wurden um 1970 veröffentlicht, wobei insgesamt sieben Crash-Versuche verschiedener Honda-Motorräder (CL 90 bis CB 750) mit Kollisionsgeschwindigkeiten von 32,3 bis 64,4 km/h in die Seiten von Pkw Plymouth gefahren wurden. Die Radstandsverkürzung wurde für alle Versuche über die Geschwindigkeit aufgetragen, wobei bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von ca. 48 km/h jeweils eine Radstandsverkürzung von ca. 20 bis 25 cm sowie bei 64 km/h eine Radstandsverkürzung von ca. 33 cm gemessen wurde.

Burg/Dekra [10]

Bei dieser Versuchsreihe wurden insgesamt zehn Crash-Versuche mit Zweirädern gegen stehende oder in Bewegung befindliche Pkw durchgeführt. Die Kollisionsgeschwindigkeiten der Zweiräder lagen bei 30 bis 69 km/h, die Kollisionsgeschwindigkeiten der Pkw bei 0 oder 24 km/h. Für die Beschleunigung der Krafträder wurde eine Schlittenkonstruktion verwendet.



Die höchste Kollisionsgeschwindigkeit wurde mit einer Yamaha XS 850 (Leergewicht 236 kg) bei einer Geschwindigkeit von 69 km/h auf einen stehenden Ford Granada erreicht. Die Radstandsverkürzung wurde mit 24 cm ermittelt. Die Wurfweite des Dummy (Kradfahrer) wurde mit ca. 13 m ermittelt.

EVU Jahrestagung 1997 [20]

Vom Institut für Gerichtsingenieurwesen der Universität Zilina wurden im Rahmen der EVU Jahrestagung 1997 verschiedene Crash-Tests durchgeführt. Unter anderem wurde auch eine Kraftrad-Pkw-Kollision realisiert, bei der das Kraftrad Kawasaki Z 750 mit einer Geschwindigkeit von 60,4 km/h in die Seite eines mit 17 km/h fahrenden Pkw aufprallte. Die Längswurfweite des Dummy wurde mit 9,6 m gemessen, der verbliebene Radstand nach dem Crash mit 1,35 m ermittelt.

Bild A11-21 Crash-Versuch Roller/Pkw

Versuche Priester/Weyde 2000/2001 [25]

Seit 2000 werden von den Ing.-Büros Priester und Weyde Crash-Versuche mit Zweirädern realisiert. Bisher wurden ca. 80 Versuche mit Kollisionsgeschwindigkeiten ab ca. 30 km/h bis 125 km/h durchgeführt.

Die vorstehenden Crash-Versuchsreihen wurden nur beispielhaft erläutert. Darüber hinaus soll auch auf die Versuchsreihen gemäß [14], und [45] hingewiesen werden. Bezüglich nicht motorisierter Zweiräder wird insbesondere auf die Versuchsreihe, welche in [43] beschrieben wurde, verwiesen. Insgesamt wurden sicherlich weit über 150 Pkw-Zweirad-Crash-Versuche oder Zweirad-EES-Versuche durchgeführt. Die Anzahl gegenüber den durchgeführten Pkw-Crash-Versuchen, welche dem Sachverständigen als Vergleichsfälle zur Rekonstruktion zur Verfügung stehen, ist dennoch verschwindend gering. Darüber hinaus ist insbesondere darauf hinzuweisen, dass bei den meisten Crash-Versuchen die Bewegung des Dummy bei und nach der Kollision nur bedingt mit dem realen Bewegungsverhalten eines Zweiradaufsassen verglichen werden kann. Auch der Umstand, dass bei einer Vielzahl von Crash-Versuchen Krafträder älterer Bauart verwendet wurden, erschwert die Anwendung und Übertragung auf moderne Krafträder. Dennoch ist festzustellen, dass mit der Vielzahl der durchgeführten Crash-Versuche zumindest eine weitere Eingrenzung der Rekonstruktionsgrundlagen geschaffen wurde und die Anwendung des Energieerhaltungssatzes (EES-Verfahrens) für Pkw-Zweiradunfälle überhaupt erst ermöglicht hat.

Anhand einiger von [25] und des DEKRA durchgeführten Crash-Versuche wurden Abhängigkeiten zwischen dem Deformationsverhalten der Fahrzeuge und der Kollisionsgeschwindigkeit erarbeitet. Hierbei wurde festgestellt, dass die einfache Abbildung der Radstandsverkürzung des Zweirades über der Kollisionsgeschwindigkeit nicht zu sinnvollen Ergebnissen führt. Eine wesentliche Verbesserung ergibt sich bei Abbildung der Gesamtdeformationstiefen (Deformationstiefe des Pkw + Gesamtdeformation des Zweirades) über der kinetischen Einlaufenergie des Zweirad-/Fahrersystems. Bei der Vielzahl der durchgeführten Versuche wurde festgestellt, dass die beste Annäherung dann zu erreichen ist, wenn die Fahrermasse in den Fällen zu 100 % eingerechnet wird, bei denen sich der Kradfahrer mit dem Pkw verhakt und an dem Pkw zur Endlage kommt. Tritt dagegen ein Abgleitvorgang des Kradfahrers über die Karosserie des Pkw ein (Wurfbewegung des Zweiradfahrers), so kann in der Regel nicht mit der gesamten Masse des Kradfahrers gerechnet werden. Die Masse ist entsprechend zu reduzieren, wobei die besten Ergebnisse mit einer Massenreduktion auf 30 % bei Überfliegen des Pkw durch den Kradfahrer erzielt wurden.

Bei Kenntnis der Gesamtdeformationstiefen kann somit anhand der durchgeführten Crash-Versuche der kinetische Einlaufenergiebereich des Zweirades abgeschätzt werden. Mit Kenntnis der Masse des Zweirades ist damit eine Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeit in Grenzen möglich. Für die Anwendung des EES-Verfahrens wurde ebenfalls eine Vielzahl von EES-Versuchen durchgeführt. Eine Auswertung ausgewählter Versuchsreihen ist in dem nachfolgenden Diagramm dargestellt. Hierbei wurde die Radstandsverkürzung oder Gesamtlängenverkürzung des Zweirades über dem EES-Wert eingetragen. Zu beachten ist, dass die Radstandsverkürzung stets als Differenz der Achsabstände vor und nach der Kollision ermittelt wurde. Die Gesamtlängenverkürzung ergibt sich durch zusätzliche Addition der Deformation des Vorderrades vor der Radmitte.

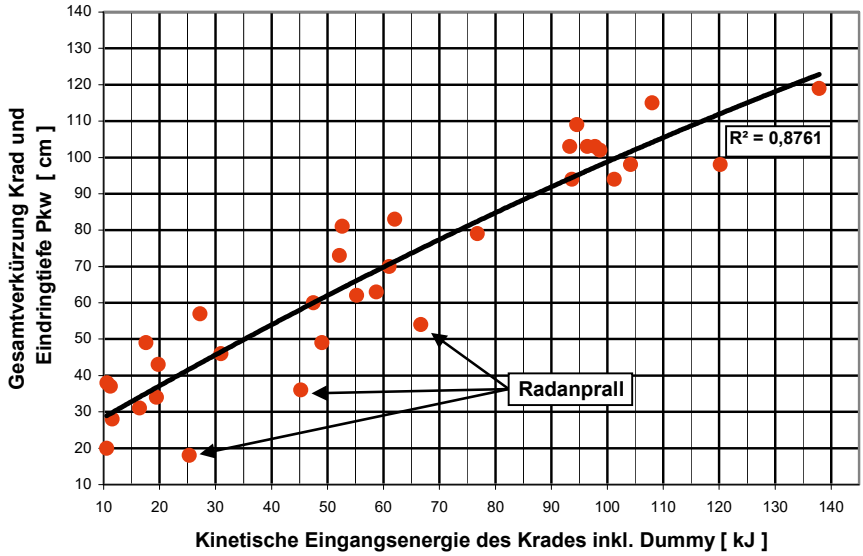


Bild A11-22 Abhängigkeit der Gesamtdeformationen von der kinetischen Energie im Einlauf für Krad-Unfälle im Querverkehr (Die eingezeichnete Kurve ist die Darstellung des Bestimmungsmaßes; bei den zusätzlich gekennzeichneten Versuchen erfolgte der Anprall direkt auf das Rad des Pkw.)

Mit Anwendung dieses Diagramms ist somit die EES-Ermittlung des Zweirades anhand bekannter Zweiraddeformationen möglich.

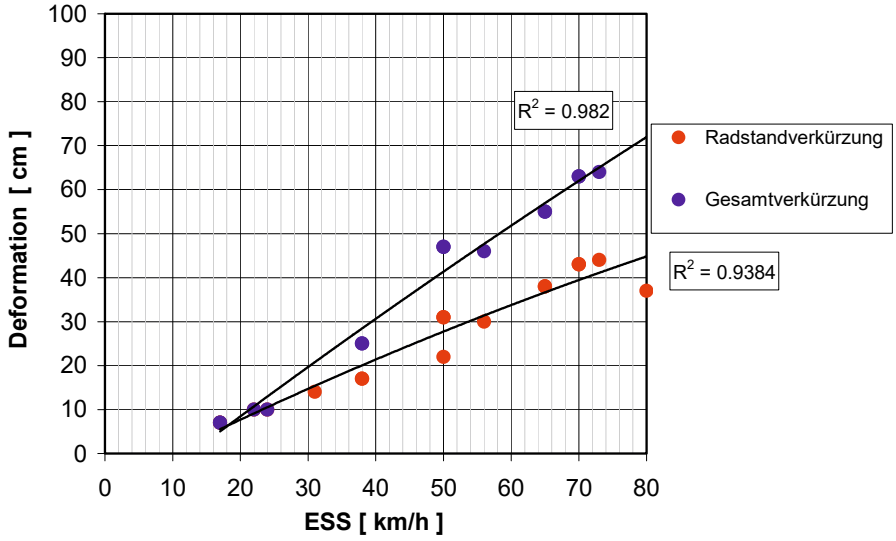


Bild A11-23 Radstandsverkürzung und Gesamtlängenverkürzung von Krafträdern bei EES-Versuchen (mit Bestimmungsmaß)

5.2 Impulserhaltungssatz

Für die Anwendung in der Unfallrekonstruktion wird meist die vektorielle Form des Impulserhaltungssatzes verwendet, so dass der Vektorcharakter der Geschwindigkeiten (Richtungsabhängigkeit) gewahrt bleibt.

Die Anwendung der vektoriellen Form des Impulssatzes bei Pkw-Zweirad-Unfällen stößt jedoch auf Grenzen. Liegen die Auslaufrichtungen von Pkw und Zweirad nahe beieinander oder ist eine Richtungsänderung des Pkw nicht erkennbar, so führt die Anwendung des Impulserhaltungssatzes in vektorieller Form hier sicherlich nicht zu einem befriedigenden Ergebnis. Es würde sich ein extrem spitzwinkliges Dreieck bei der Konstruktion der Impulsdreiecke oder der Anwendung des Antrieb-Balance-Diagramms ergeben.

In diesem Fall könnte gegebenenfalls der Stoß zwischen Zweirad und Pkw noch vereinfachend als nahezu gerader zentrischer Stoß betrachtet werden, so dass der Impulserhaltungssatz in skalarer Form eine Lösungsmöglichkeit bietet.

Aufgrund der dann vorliegenden einzigen Gleichung zur Bestimmung von zwei erforderlichen Größen (Ausgangsgeschwindigkeit v_p des Pkw sowie v_z des Zweirades) ist es erforderlich, dass zumindest eine der Größen ansatzweise über ein anderes Verfahren eingegrenzt werden kann.

Bei Pkw-Zweirad-Unfällen könnte dann der Impulserhaltungssatz in der nachfolgend dargestellten Form verwendet werden:

$$m_{Z+F} \cdot v_{Z+F} + m_P \cdot v_P = m_Z \cdot v'_Z + m_F \cdot v'_F + m_P \cdot v'_P$$

P = Pkw
Z = Zweirad
F = Fahrer

Dennoch ist darauf hinzuweisen, dass mit alleiniger Anwendung des Impulserhaltungssatzes nur in wenigen Fällen ein sinnvoller Ergebnisbereich für eine Pkw-Zweirad-Kollision ermittelt werden kann. Die vorliegenden Massenunterschiede und die dadurch resultierenden, nur geringen Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen des Pkw erschweren eine korrekte Anwendung des Impulssatzes.

Es bietet sich daher an, den Energieerhaltungssatz zu verwenden oder beide Erhaltungssätze gemeinsam anzuwenden.

5.3 Energieerhaltungssatz

Allgemein ist der Energieerhaltungssatz wie folgt zu definieren:

$$\left(\sum E\right)_{System} = \text{const.}$$

bzw.

$$\left(\sum E - \sum E'\right)_{Stoßsystem} = 0$$

Für Fahrzeugstöße sind im Wesentlichen folgende Energiearten relevant:

$$E_{KinTrans} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$E_{\text{KinRot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

$$E_{\text{Pot}} = m \cdot g \cdot h$$

$$E_{\text{Def}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \text{EES}^2$$

Die Deformationsenergie bzw. die in den Fahrzeugen als Deformation gespeicherte Verformungsarbeit wird bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen in Form einer „kinetisch ähnlichen“ Energie durch den EES-Wert (Energy Equivalent Speed) zum Ausdruck gebracht. Dieses Verfahren bietet enorme Vorteile gegenüber der pauschalen quantitativen Bestimmung der Deformationsenergie in [Nm] bzw. [J]. Nicht nur für die Abgrenzung der Insassenbelastungen, sondern auch für die rechnergestützte Rekonstruktion bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, die Deformationsenergien durch plastisch vorstellbare Geschwindigkeiten bzw. die daraus resultierenden Verformungen auszudrücken.

Für Pkw-Zweiradunfälle mit stehendem Pkw könnte dann vereinfachend die folgende Form des Energieerhaltungssatzes verwendet werden:

$$E_{\text{Kin Z+F}} = E'_{\text{Kin Z}} + E'_{\text{Kin F}} + E'_{\text{Kin P}} + E_{\text{Def P}} + E_{\text{Def Z}} + E'_{\text{Rot P+Z}} + E'_{\text{Pot Z}}$$

Während die kinetischen Energien aus der Translation und der Rotation nach dem Stoß relativ leicht eingegrenzt werden können (über eine detaillierte Auslaufanalyse), bereitet die Abschätzung der Deformationsenergien erhebliche Probleme. Hierzu ist letztendlich eine genaue Abschätzung der EES-Werte des Pkw und des Zweirades erforderlich.

Bei den Versuchen nach [25] bzw. [20] wurde festgestellt, dass die kinetische Einlaufenergie des Kraftrad-Fahrer-Systems bei Kollisionen mit relativ hohen Kraftradgeschwindigkeiten und geringen Pkw-Geschwindigkeiten zu annähernd 70% in Deformationsenergie des Kraftrades und des Pkw umgewandelt wird. Dies bedeutet letztendlich, dass der Bestimmung der Deformationsenergien bei der Rekonstruktion der Ausgangsgeschwindigkeit des Kraftrades die höchste Bedeutung zukommt.

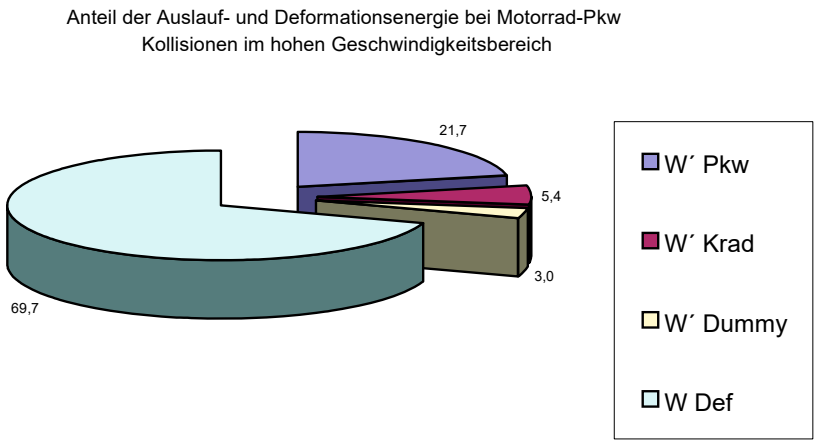


Bild A11-24 Circa 70 % der kinetischen Energie des Kraftrades gehen beim Anprall an quer stehende Pkw in Deformationsarbeit über.

Bei Kenntnis eines EES-Wertes (z. B. des Pkw) könnte z. B. der EES-Wert des Kraftrades auch nach der Gleichung des einfachen Masse-Feder-Systems berechnet werden:

$$\frac{S_{\mathrm{Def1}}}{S_{\mathrm{Def2}}} = \frac{m_1 \cdot \mathrm{EES_1}^2}{m_2 \cdot \mathrm{EES_2}^2}$$

Bei einer Überprüfung [21] wurde jedoch festgestellt, dass hier für Pkw-Zweirad-Kollisionen im hohen Geschwindigkeitsbereich deutliche Abweichungen festzustellen sind.

Eine Erklärung ergibt sich aus einem modifizierten Masse-Feder-System des Pkw und des Zweirades. Demnach würde bei einer Aufteilung der EES-Werte nach der üblichen Gleichung dem Kraftrad eine Deformationsenergie zugeordnet werden, welche der unter der Geraden befindlichen Fläche (Verbindung des Koordinatenursprungs mit der maximalen Deformationstiefe) entspricht.

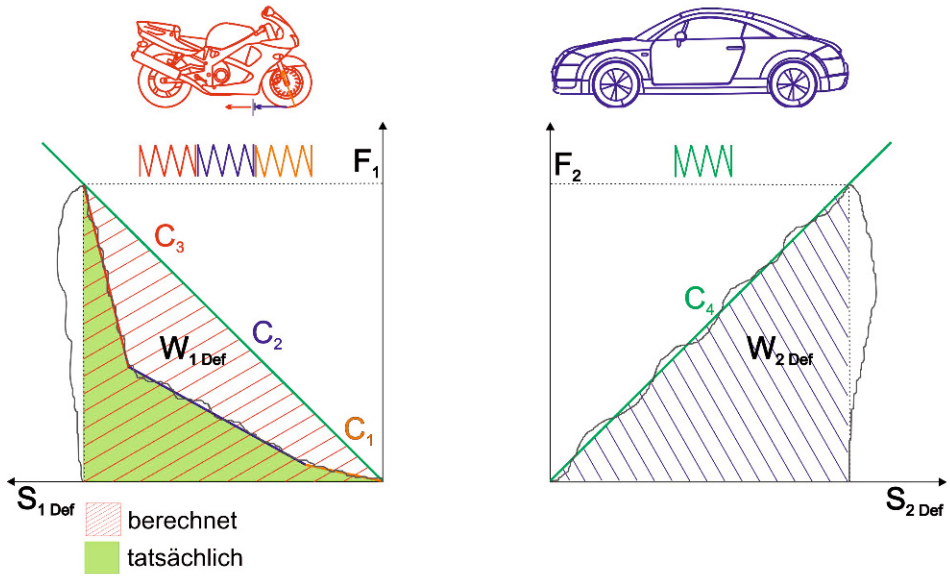


Bild A11-25 Masse-Feder-Modell

Da das Kraftrad jedoch zweifelsfrei an der Front Bereiche stark unterschiedlicher Gestaltfestigkeit (Struktursteifigkeit) aufweist, würde sich hier eine klassische Fehlermittlung der Deformationsenergie bzw. des EES-Wertes ergeben. Tatsächlich kommt es bei der Deformation des Zweirades an der Fahrzeugfront zunächst zu einer Deformation der Vorderradgabel bis zum Anlegen des Vorderrades am Motor oder Rahmen.

Danach steigt die Struktursteifigkeit des deformierten Zweirades sprunghaft an, da nun ein schwer kompressibler Körper (Motor, Zylinderblock bzw. Rahmenkopf) deformiert wird. Aus diesem Grunde liegen bei gleichen Kontaktkräften des Zweirades und des kontaktierten Pkw ungleiche Deformationsenergieaufnahmen vor.

6 Auslauf

Die Auslaufbewegung des Kradfahrers bei Unfällen im Querverkehr wird im Wesentlichen durch die Wurfweite des Zweiradfahrers bestimmt. Diese Wurfweite setzt sich wiederum aus der Flugweite (ohne Kontakt mit der Fahrbahn zurückgelegte Wegstrecke) ab dem Lösen vom Fahrzeug und der Rutschweite zusammen.

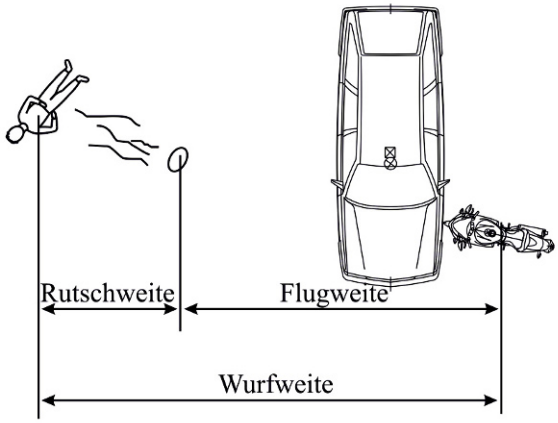


Bild A11-26 Wurfweite des Zweiradfahrers



Bild A11-27 Verhakung des Fahrers in der Kollision

In der Vergangenheit wurden mehrfach Wurfweitendiagramme von Zweiradfahrern bei Unfällen im Querverkehr veröffentlicht. Bei diesen Wurfweitendiagrammen wurden dann tendenziell bei höheren Geschwindigkeiten auch relativ hohe Wurfweiten vorgegeben. Bei den zwischenzeitlich durchgeführten Versuchen im höheren Geschwindigkeitsbereich (80 bis 120 km/h) konnte jedoch festgestellt werden, dass es in einer Vielzahl der Fälle zu einer Verhakung des Zweiradfahrers am Pkw aufgrund der sehr hohen Eindringtiefe in den Pkw kommt. Als Resultat dieser Verhakung liegt nur eine sehr kurze Wurfweite vor. Die Wurfweite eines Zweiradfahrers kann daher nur in seltenen Fällen, nämlich nur dann, wenn es tatsächlich zu einem weitgehend freien Lösen des Zweiradfahrers vom Zweirad gekommen war, für die Eingrenzung der Kollisionsgeschwindigkeit herangezogen werden. Gelingt es jedoch auf der Fahrbahn den eigentlichen Rutschweg des Zweiradfahrers einzugrenzen, so sind zumindest Eingrenzungen anhand bekannter Rutschverzögerungen möglich.

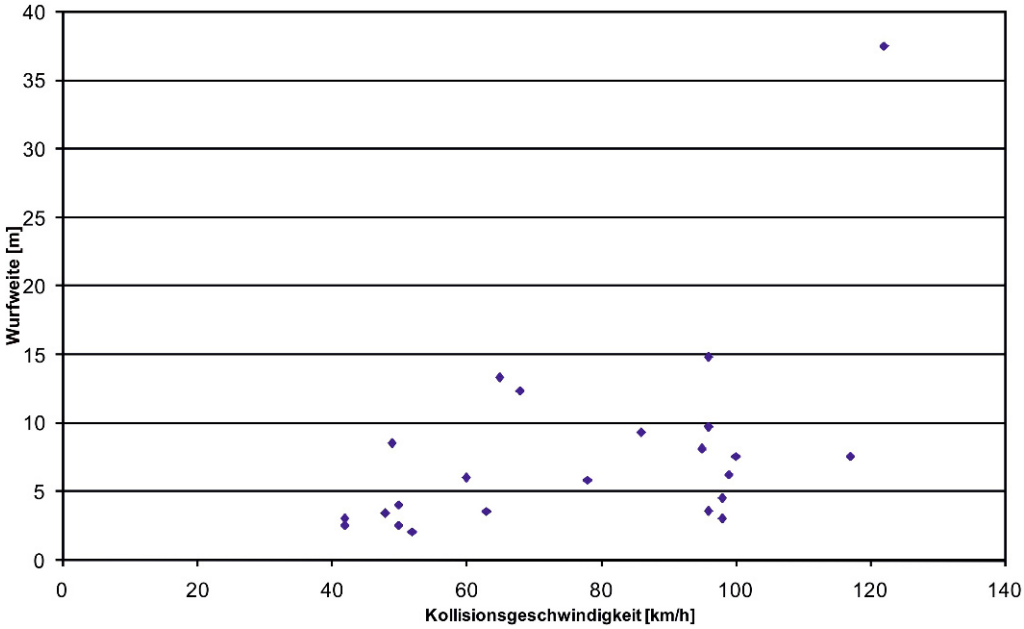


Bild A11-28 Wurfweiten von Dummys bei Crash-Versuchen

Bei trockener Fahrbahnoberfläche (Beton oder Asphalt) konnten hier Verzögerungswerte von Zweiradfahrern (Bekleidung mit Textil, Leder oder Jeans) im Bereich von 5,5 bis 8,0 m/s² ermittelt werden. Die höheren Werte wurden meist auf Betonfahrbahnen ermittelt.

Bei nasser Fahrbahnoberfläche wurden durchgehend Werte zwischen 4,0 bis 6,0 m/s² ermittelt.

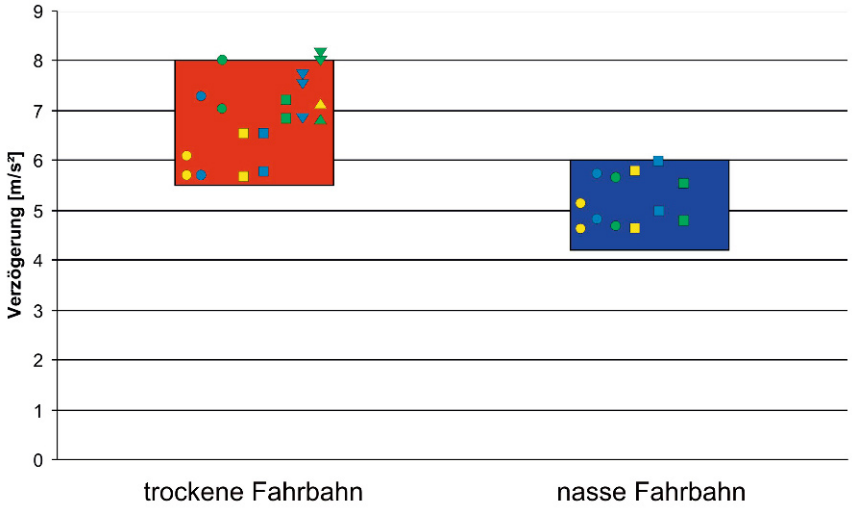


Bild A11-29 Rutschverzögerungen von Dummys

Auch das Zweiradfahrzeug führt gewöhnlich nach der Kollision bei Unfällen im Querverkehr eine Wurfbewegung durch. Da auch hier die Phase der Flugbewegung schwer rekonstruierbar ist, erhält man in der Regel wesentlich bessere Ergebnisse für die Rekonstruktion, wenn ausschließlich die Rutschweite betrachtet wird. Mit Kenntnis der Rutschverzögerung ist es nun möglich, zumindest die Geschwindigkeit des Zweirades bei Rutschbeginn weiter einzugrenzen.

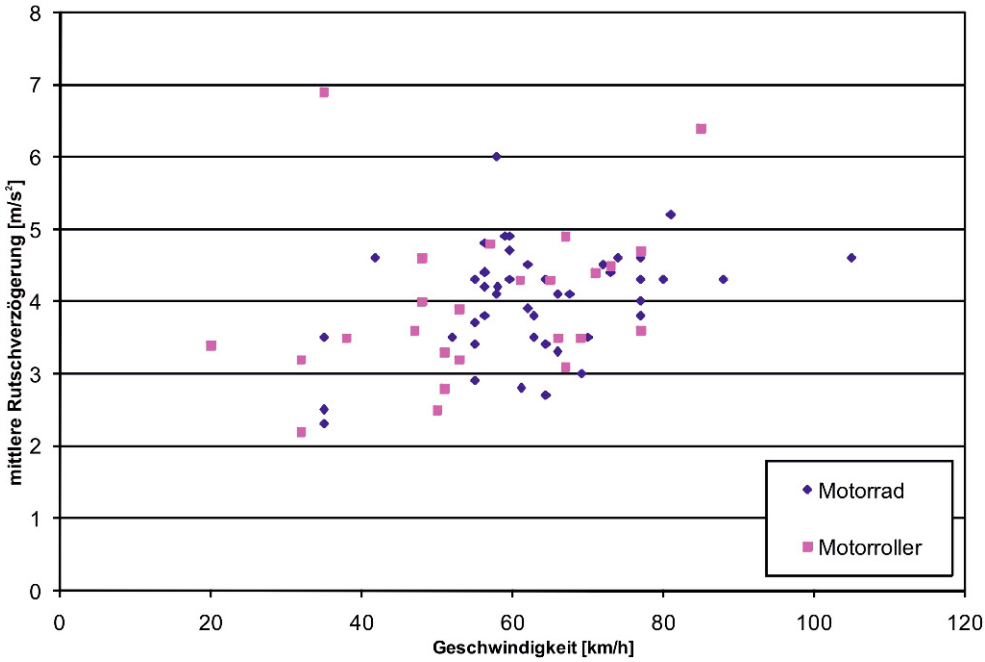


Bild A11-30 Rutschverzögerungen von motorisierten Zweirädern

Bei den durchgeführten Versuchen zeigten sich auffällige niedrige Werte für die Rutschverzögerung (unterer Wert 2,2 m/s²) von Rollern. Dies lässt sich durch die Bauform des Fahrzeugs in Verbindung mit dem flächigen Aufliegen auf der Fahrbahn beim Rutschvorgang erklären. Darüber hinaus kommt es bei Fahrzeugen geringer Masse seltener zu einer kurzzeitigen Verhakung beim Aufschlagen auf die Fahrbahn. Jedoch wurden auch bereits mit rollerähnlichen Fahrzeugen auf trockenen Fahrbahnen relativ hohe Rutschverzögerungen (oberer Wert 6,9 m/s²) [44] gemessen.

Literatur

[1] Adamson, K. S. u. a.: Seventeen Motorcycle Crash Tests into Vehicles and a Barrier, SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2002-01-0551, SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan March 4–7, 2002

[2] Agouridis, P.: Bremsdynamik und die Bremsverzögerungen von Zweirädern, Diplomarbeit, FH Esslingen, Jan. 2003

[3] Assing, K.: Schwerpunkte des Unfallgeschehens von Motorradfahrern, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M 137, Mai 2002

[4] Bayer, B.: Das Pendeln und Flattern von Krafträdern, Forschungshefte Zweiradsicherheit, Institut für Zweiradsicherheit e. V. Bochum, Hrsg. Hubert Koch, 2. Auflage 1987, ISBN 3-923994-07-9

[5] Berg, F. A. u. a.: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder, Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen/Fahrzeugtechnik Heft F 49 Sept. 2004, Wirtschaftsverlag NWISBN
3-86509-146-6

[6] Brutscher, B., Priester, J.: Bericht Unfallforschungsprojekt Zweiradunfälle 2005, Landespolizeidirektion Saarbrücken

[7] Bürkle, H., Berg, F. A.: Anprallversuche mit Motorrädern an passiven Schutzeinrichtungen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 90, Sept. 2001

[8] Burg, H., Rau, H.: Handbuch der Unfallrekonstruktion, Verlag Information Ambs, Kippenheim

[9] Burg, H.: Rechnerunterstützte Rekonstruktion von Pkw/Pkw – Unfällen, Dissertation 1984, Technische Universität Berlin

[10] Burg, H., Lindemann, M., Maier, J.: Unfallversuche Zweiradfahrzeuge gegen Personenwagen, DEKRA Unfallforschung, Sonderdruck Teil 1und Teil 2

[11] Burg, H., Kiehnle, G.: Bremsverzögerung von Fahrrädern, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2/91

[12] DEKRA Unfallforschung: Rutschversuche Zweiräder 1999

[13] „Die Europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft“ (KOM (2001)370 endg. vom 12. September 2001)

[14] DSD – Seminar, Zweirad Unfälle, Linz 1999

[15] Forke, E., Schuh, K., Sporner, A., Polauke, J.: Gefährliche Begegnungen, Institut für Zweiradsicherheit, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), Essen 1996

[16] Godesberger wiss. Arbeitskreis: Anfahrbeschleunigungen für die Praxis Zweiräder, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 12/1993

[17] Golder, U.: Bremsverzögerungen von Motorrädern, Sturzeinleitung, Kippen und Rutschen von Zweirädern, Vortrag AREC-Tagung 2001 Wildhaus, Schweiz

[18] Grandel, J., Zeisberger, H.: Rekonstruktion von Pkw-Zweirad-Unfällen unter Einbeziehung der Fahrzeugdeformationsenergien, DEKRA Seminar Zweiradunfälle 1988

[19] Gwehenberger, J., Schwaben, I., Sporner, A., Kubitzki, J.: Schwerstunfälle mit Motorrädern – Analyse der Unfallstruktur und der Wirksamkeit von ABS, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 01/2006

[20] Kasanicky, G., Kohut, P., Priester, J.: Analysis of single track vehicle accidents, Universität Zilina, ISBN 80-7100-599-1

[21] Koch, H., Sporner, A.: Besser Bremsen, Broschüre, GDV, Berlin 2004

[22] Kramlich, T.: Noch immer gefährliche Begegnungen – Die häufigsten Gefahrensituationen für Motorradfahrer und die resultierenden Verletzungen, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), September 2002

[23] MOTORRAD, Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG, Leuschnerstraße 1, 70174 Stuttgart

[24] Nitsche, K., Bolzli, A.: Krad-Bremsversuche Zürich September 2001, Vortrag: IbB Partner Meeting 01.–03. Okt. 2002/Bernkastel-Kues

[25] Priester, J., Weyde, M., Kasanicky, G.: Motorrad-Kollisions-Versuche, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2002

[26] Rau, H., Leser, H.: Geschwindigkeit v. Radfahrern im Stadtverkehr, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 7/ 8 1990
[27] Rauscher, H.: Empirische Untersuchung des Spurwechsels/Ausweichen von einspurigen Fahrzeugen, Ing.-Büro Plöchinger, Tiefenbach 2001
[28] Schlosser, S.: Unvermeidbare Bandbreiten bei der Rekonstruktion von Motorradunfällen, Vortrag 3. Europäische Fachtagung für Unfallrekonstruktion, 2001
[29] Schmedding, K., Büscher, W.: Anfahrbeschleunigungen von motorisierten Zweirädern, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 03/1994
[30] Schmedding, K., Weber, M.: Verzögerungswerte von Zweirädern, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 12/1990
[31] Schmieder, M. u. a.: Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft F 9 September 1994
[32] Schüler, F. u. a.: Der Körperanprall gegen Schutzplanken beim Verkehrsunfall motorisierter Zweiradbenutzer, Forschungshefte Zweiradsicherheit, Hrsg. Koch H., Institut für Zweiradsicherheit e.V. 1984, ISBN 3-88314-344-8
[33] Seiniger, P.: Bremsvermögen und Bremsstabilität von motorisierten Zweirädern und ausgewählte Kapitel der Motorradfahrdynamik, DEKRA Grundlehrgang Unfallanalytische Gutachten 2005
[34] Severy, D. M. u. a.: Motorcycle Collisions Experiments, 14. Stapp Car Crash Conference 1970
[35] Spiegel, B.: Was hat der Mesokosmos-Begriff auf einer Motorradtagung zu suchen. in: Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft, Fahrzeugtechnik Motorrad, 3. Fachtagung, VDI-Berichte 779, Düsseldorf 1989, S. 1–12
[36] Sporner, A.: Das Zusammenspiel von aktiver und passiver Sicherheit beim Motorrad am Beispiel ABS, Fahrzeugtechnisches Seminar, TU Darmstadt 2000
[37] Sporner, A.: Experimentelle und mathematische Simulation von Motorradkollisionen im Vergleich zum realen Unfallgeschehen, Dissertation 1982
[38] Sporner, A., Polauke, J.: Pkw/Motorradkollisionen Ansatzpunkte für die Bewertung der Risikoexponierung, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), März 1996
[39] Unfallgeschehen im Straßenverkehr 2004, erschienen am 22. August 2005, Artikelnummer: 5462401059004, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2006
[40] Verkehr, Zweiradunfälle im Straßenverkehr, 2004, erschienen am 23. Januar 2006, Artikelnummer: 5462408047004, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2006
[41] Vollmer, G.: Was können wir wissen? Die Natur der Erkenntnis. Hirzel Verlag, Stuttgart 1986
[42] Weber M., Hugemann W.: Die Geschwindigkeitsrückrechnung bei Motorradbremsungen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 10–11/1990
[43] Wegner, C., Otte, D., Rau, H.: Deformationscharakteristik und Einflußparameter von Fahrrädern bei Kollisionen mit der Pkw-Front, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2–3/2000
[44] Wiek, A.: Motorroller-Rutschverzögerungen auf trockener Asphaltfahrbahn, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 02/1998
[45] 3. Europäische Fachtagung für Unfallrekonstruktion 2001, Wildhaus

A12 Pkw-Pkw-Unfälle

Klaus-Dieter Brösdorf, Dr. Heinz Burg, Dr. Andreas Moser, Matthias Martinsohn

1 Zum Straßenverkehr in Deutschland und in Europa

Den Pkw-Pkw-Unfällen ist der Hauptumfang dieses Buches gewidmet. Was nur in geringem Maße besprochen wird, das ist der Straßenverkehr mit allen seinen Facetten, insbesondere aber das Unfallgeschehen auf unseren Straßen. Es werden deshalb hier einige wichtige Daten und Fakten aus der Amtlichen Unfallstatistik und aus anderen Quellen wiedergegeben. Die jeweils aktuellen Daten der Unfallstatistik sind per Internet unter www.destatis.de abrufbar.

Der Vergleich der Bevölkerungszahlen von 2004 mit 2005 zeigt, dass praktisch keine Veränderung eingetreten ist (**Tabelle A12.1**). Die Prognosen gehen davon aus, dass die Bevölkerung abnehmen wird und dass es zunehmend mehr ältere Leute als jüngere geben wird.

Tabelle A12.1 Bevölkerungszahlen in Deutschland nach www.destatis.de

Land	Bevölkerung nach Bundesländern			
	Bevölkerung in 1.000			
	am 31.12.04	am 31.12.05	Veränderung in %	
Deutschland	82.501	82.438	– 63	– 0,1
Baden-Württemberg	10.717	10.735	18	0,2
Bayern	12.444	12.469	25	0,2
Berlin	3.388	3.395	7	0,2
Brandenburg	2.568	2.559	– 8	– 0,3
Bremen	663	663	0	0,0
Hamburg	1.735	1.744	9	0,5
Hessen	6.098	6.092	– 5	– 0,1
Mecklenburg-Vorpommern	1.720	1.707	– 12	– 0,7
Niedersachsen	8.001	7.994	– 7	– 0,1
Nordrhein-Westfalen	18.075	18.058	– 17	– 0,1
Rheinland-Pfalz	4.061	4.059	– 2	– 0,1
Saarland	1.056	1.050	– 6	– 0,6
Sachsen	4.296	4.274	– 23	– 0,5
Sachsen-Anhalt	2.494	2.470	– 25	– 1,0
Schleswig-Holstein	2.829	2.833	4	0,1
Thüringen	2.355	2.335	– 21	– 0,9

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_12

Nach der letzten Shell-Studie von 2001 ist eine Sättigung des Pkw-Marktes in den nächsten 20 Jahren nicht in Sicht: Der Bestand der Fahrzeuge in Deutschland wird bis zum Jahr 2020 weiter steigen, von 43,8 (2001) auf dann 48 bis 52 Millionen Pkw. Zu diesem Ergebnis kommt die Pkw-Markt-Studie der Deutschen Shell, die auf zwei Szenarien beruht. Die Gründe für den Anstieg der Motorisierung sind: Der Anteil der weiblichen und älteren Autofahrer nimmt kräftig zu. Im Jahr 2020 werden allein die Frauen bis zu 19,6 Millionen Autos besitzen, knapp 60 % mehr als heutzutage. Besonders überraschend: Trotz des Auto-Booms geht es nach dieser Studie mit dem Kraftstoffverbrauch (minus 30 bis 40 Prozent) und den Schadstoffemissionen abwärts. Sparsame Neufahrzeuge mit einem Praxisverbrauch von durchschnittlich weniger als vier Liter je 100 km, abnehmende Fahrleistungen und neue Antriebskonzepte sorgen bis zum Jahr 2020 dafür, dass Ressourcen und Umwelt deutlich weniger beansprucht werden.

Tabelle A12.2 Neuzulassungen und Bestand von Pkw in Deutschland nach www.destatis.de

Neuzulassungen und Bestand von Pkw in Deutschland					
Gegenstand der Nachweisung	Einheit	2003	2004	2005	2006
Neuzulassungen von Pkw	Anzahl in 1.000	3.236,9	3.266,8	3.342,1	...
Bestand an Verkehrsmitteln					
Kraftfahrzeuge (Stand: 1.1.)	Anzahl in 1.000	53.655,8	54.082,2	54.519,7	54.909,9
darunter:					
– Personenkraftwagen	Anzahl in 1.000	44.657,3	45.022,9	45.375,5	46.090,3
– Lastkraftwagen	Anzahl in 1.000	2.619,3	2.586,3	2.572,1	2.573,1
– Triebfahrzeuge[1]	Anzahl	14.463,0	...	...	...
– Reisezugwagen	Anzahl	12.269,0	...	...	...
– Güterwagen (bahneigen)	Anzahl	107.031,0	...	...	...
– eingestellte Güterwagen	Anzahl	57.107,0	...	...	...

1 Lokomotiven und Triebwagen.
Aktualisiert am 04. April 2006

Eine der Shell Szenarien geht sogar von einem Rückgang der Gesamtfahrleistungen aller in Deutschland zugelassenen Pkw aus – von 528 auf 494 Milliarden km pro Jahr in 2020. Mehr Autos müssen nicht zwangsläufig zu mehr Fahrleistung führen. Shell zufolge entfallen auf den maximalen Bestandszuwachs von 8,5 auf 52,3 Millionen Autos 7,1 Millionen Fahrzeuge auf Frauen. Die Gruppe der Senioren mit Pkw, also der über 60-jährigen Frauen und Männer, wächst ähnlich stark um 6,8 auf 15,2 Millionen Menschen. Die Folge: 2020 ist jeder dritte Autofahrer älter als 60 Jahre alt sein.

Diesel-Pkw gewinnen weiter an Bedeutung, denn der geringe Kraftstoffverbrauch, die Preisvorteile und der wachsende Fahrkomfort erhöhen die Nachfrage. Laut Shell-Szenarien klettert der Dieselanteil am Fahrzeugbestand von heute rund 15 auf 30 bis 40 % im Jahr 2020.

Die Zukunft der alternativen Antriebsformen sieht Shell gemischt. Sie werden sich einen Anteil von 3 bis 10 % erobern. Otto- und Dieselmotoren, die noch erhebliche Optimierungspotenziale bieten, bleiben noch für lange Zeit die Nr. 1 im Straßenverkehr. Die Shell Studie erwartet für das Jahr 2020 – je nach Szenario – einen durchschnittlichen Verbrauch der gesamten Flotte von 5,5 bis 5,8 Liter, gegenüber 8,5 Liter im Jahr 2000. Abnehmen wird auch die Fahrleistung.

Legten Pkw in den 1960er Jahren über 16.000 km pro Jahr zurück, sind es heute nur noch 12.300 km. Der Abwärtstrend wird anhalten und sich auf 10.300 bis 11.300 km einpendeln. Ursache dafür ist die Motorisierung der Frauen und Senioren, die ihre Autos weniger nutzen; ferner nimmt der Anteil langer geschäftlicher Fahrten ab, die Nutzung des Pkw in der Freizeit aber zu. Darüber hinaus spielen Zweit- und Dritt-Pkw zukünftig eine größere Rolle – auch dies reduziert die Fahrleistung pro Fahrzeug. Mehr Autos bedeuten nicht mehr Emissionen. Auch zukünftig wird die Fahrzeugtechnologie voranschreiten und einen weiteren Rückgang der Schadstoffemissionen bewirken. Der Gipfel der Abgasemissionen (Benzol, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid, Stickoxide sowie Dieselpartikel) wurde bereits Ende der 1980er Jahre erreicht. Seitdem ist der Ausstoß um über 60 % gefallen. In 20 Jahren dürfte der Schadstoffgipfel um rund 90 % unterschritten sein. Auch die durch die Verbrennung von Benzin und Diesel entstehenden Kohlendioxidemissionen werden zurückgehen. Shell zufolge fällt der Benzin- und Dieselkonsum im Individualverkehr um 30 bis 40 %: Der sinkende Kraftstoffverbrauch und neue Antriebstechniken überkompensieren den Anstieg des Autobestandes.

Betrachtet man das Unfallgeschehen, so ist es sehr erfreulich, dass die Anzahl der im Straßenverkehr getöteten Personen immer mehr abnimmt (**Tabelle A12.3**). Die insgesamt der Polizei pro Jahr gemeldeten Unfälle blieben über die letzten Jahre nahezu konstant (**Tabelle A12.4**).

Tabelle A12.3 Anzahl der im Straßenverkehr in Deutschland getöteten Personen

Gegenstand der Nachweisung	Einheit	2003	2004	2005
Getötete[1]	Anzahl	6.613	5.842	5.361
darunter: Im Alter von ... bis unter ... Jahren				
– unter 15	Anzahl	208	153	159
– 15–18	Anzahl	316	264	224
– 18–25	Anzahl	1.392	1.269	1.076
– 25–65	Anzahl	3.367	2.950	2.734
– 65 und mehr	Anzahl	1.329	1.201	1.162
Getötete Benutzer von:				
– Fahrrädern	Anzahl	616	475	575
– Mofas, Mopeds	Anzahl	134	122	107
– Motorrädern	Anzahl	946	858	875
– Personenkraftwagen	Anzahl	3.774	3.238	2.833
– Bussen	Anzahl	17	16	9
– Güterkraftfahrzeugen	Anzahl	236	233	213
Fußgänger	Anzahl	812	838	686

1 Einschließlich innerhalb von 30 Tagen Getötete.
Aktualisiert am 13. Juli 2006

Tabelle A12.4 Polizeilich erfasste Unfälle pro Jahr in Deutschland

Gegenstand der Nachweisung	Einheit	2003	2004	2005
Polizeilich erfasste Unfälle	Anzahl	2.259.567	2.261.689	2.253.992
davon:				
– mit nur Sachschaden	Anzahl	1.905.033	1.922.379	1.917.373
– mit Personenschaden	Anzahl	354.534	339.310	336.619
davon:				
– innerorts	Anzahl	230.521	223.314	225.875
– außerorts ohne Autobahn	Anzahl	101.367	94.538	89.801
– auf Autobahnen	Anzahl	22.646	21.458	20.943
Aktualisiert am 13. Juli 2006				

Über spezielle Unfallursachen informieren die Angaben in **Tabelle A12.5**. Die allgemeinen Unfallursachen betreffen das Fehlverhalten der Fahrer, das aber durch widrige Umwelteinflüsse beeinträchtigt worden sein kann. Interessant sind auch die Feststellungen über die technischen Mängel als Unfallursachen.

Tabelle A12.5 Ursachen von Unfällen in Deutschland

Gegenstand der Nachweisung	Einheit	2003	2004	2005
Ursachen von Unfällen mit Personenschaden				
Allgemeine Ursachen	Anzahl	34.230	44.651	40.136
darunter:				
– Glätte durch Regen	Anzahl	6.940	9.388	8.598
– Glätte durch Schnee, Eis	Anzahl	9.598	9.444	12.359
– Sichtbehinderung durch Nebel	Anzahl	477	380	597
– Wild auf der Fahrbahn	Anzahl	2.788	2.520	2.291
Technische Mängel	Anzahl	4.763	4.342	4.402
darunter:				
– Bereifung	Anzahl	1.359	1.316	1.233
– Bremsen	Anzahl	862	706	784
Aktualisiert am 13. Juli 2006				

Die Anzahl der bei Straßenverkehrsunfällen getöteten Personen pro 1 Million Einwohner in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Europa Union ist dem **Bild A12-1** zu entnehmen.

Mit der Grafik werden die Unfälle aus dem Jahr 2000 und aus dem Jahr 2004 verglichen. Nicht bei allen Staaten ist ein Rückgang der Unfälle mit Getöteten festzustellen.

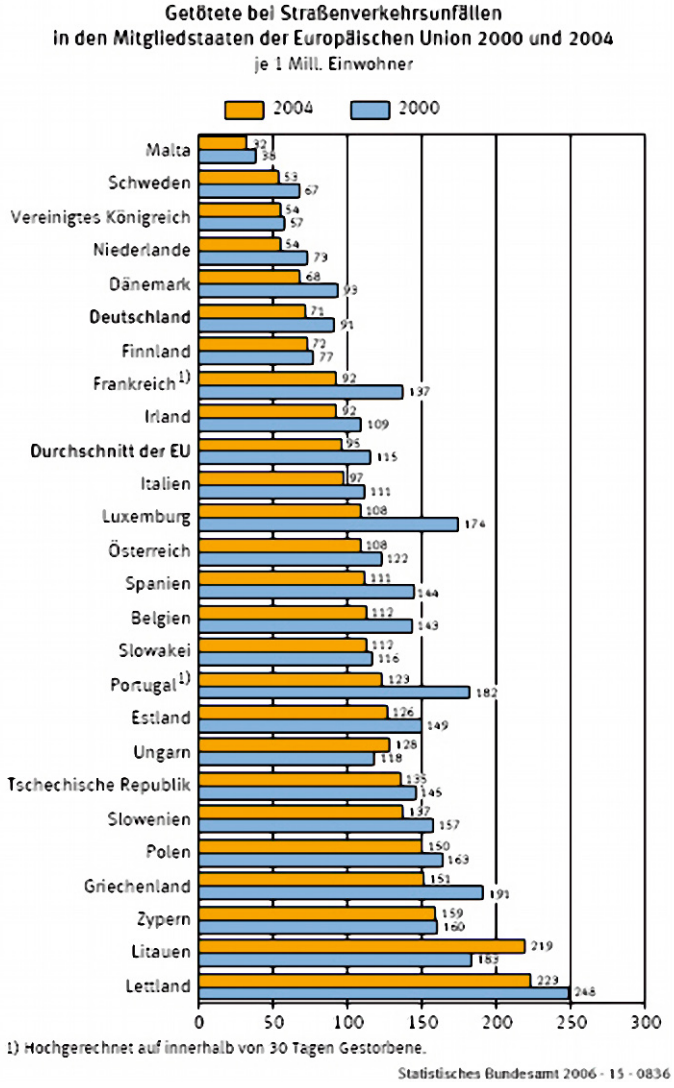


Bild A12-1 Getötete bei Straßenverkehrsunfällen

2 Qualitätssicherung durch Ringtests

Bei IbB werden regelmäßig Ringtests durchgeführt mit dem Ziel, für die Gruppe einen repräsentativen Querschnitt zur Qualität der Rekonstruktion im Sinne der Qualitätssicherung zu erhalten. Im Jahr 2005 wurde ein Kollisionsversuch durchgeführt, der als Ringtest diente. In beiden Versuchsfahrzeugen, einem Opel Ascona und einem Ford Sierra, waren Messgeräte vom Typ PocketDAQ [2] (siehe hierzu auch Kapitel A03) eingebaut. **Bild A12-2** und **Bild A12-3** zeigen die Versuchsfahrzeuge vor der Versuchsdurchführung. In **Bild A12-4** ist der Bewegungsablauf des Kollisionsversuchs dargestellt.



Bild A12-2 Opel Ascona vor dem Versuch



Bild A12-3 Ford Sierra vor dem Versuch

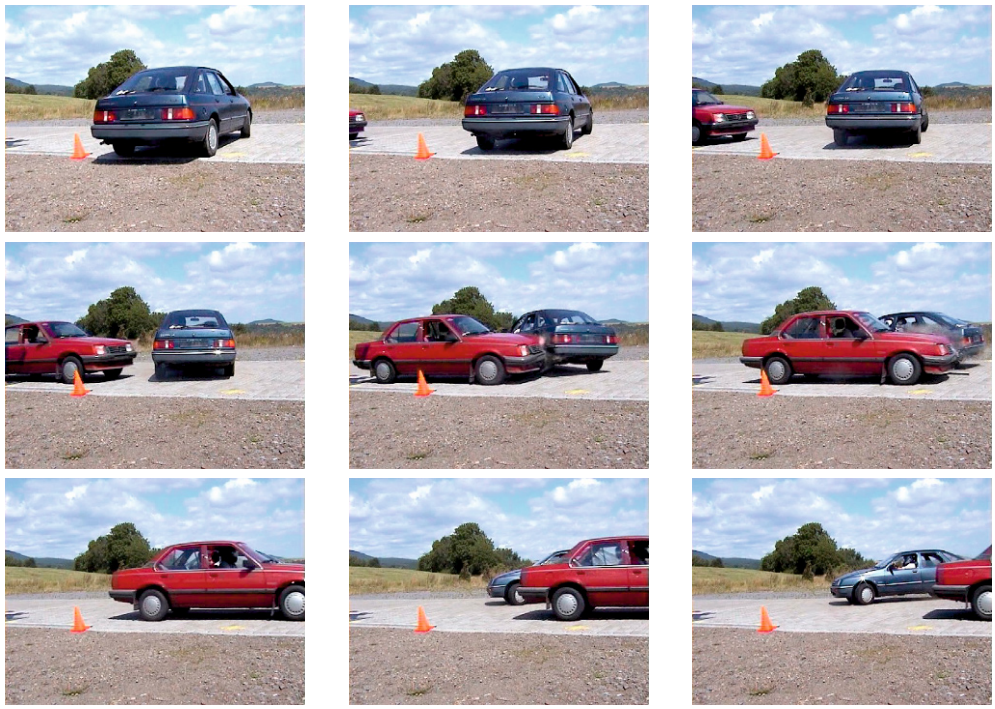


Bild A12-4 Kollisionsablauf zum IbB-Ringtest 2005

Bild A12-5 und **Bild A12-6** zeigen die Schäden und Spuren an dem Opel Ascona sowie **Bild A12-7** und **Bild A12-8** die Beschädigungen und Spurzeichnungen an dem Ford Sierra.



Bild A12-5 Opel Ascona nach dem Versuch



Bild A12-6 Opel Ascona nach dem Versuch



Bild A12-7 Ford Sierra nach dem Versuch



Bild A12-8 Ford Sierra nach dem Versuch

Durch Analyse der PocketDAQ-Daten mit dem Programm PocketDAQAnalyzer wurden die Geschwindigkeiten der Versuchsfahrzeuge unmittelbar vor Kollision mit 37 km/h für den Opel Ascona (**Bild A12-9**) und 15 km/h für den Ford Sierra (**Bild A12-10**) ermittelt.

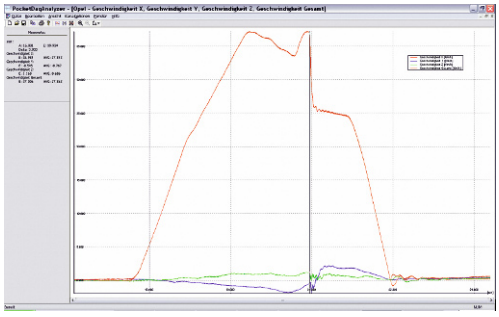


Bild A12-9 Auswertung zum Opel Ascona

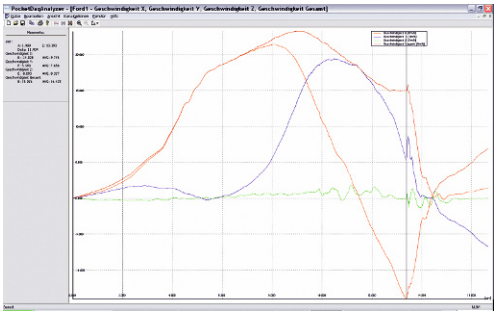


Bild A12-10 Auswertung zum Ford Sierra

Den Teilnehmern am Ringtest wurden verschiedene Unterlagen zur Verfügung gestellt, so die Daten zu den Versuchsfahrzeugen, Fotos von den Beschädigungen und Spurzeichnungen an den Versuchsfahrzeugen nach Kollision, Fotos von verschiedenen Spuren an der Kollisionsstelle (**Bild A12-10**) sowie eine maßstabsgerechte Orthogonalansicht von der Kollisionsstelle in Form einer photogrammetrischen Bildentzerrung (**Bild A12-12**). Die Teilnehmer hatten die Aufgabe, anhand der ihnen zur Verfügung gestellten Informationen die Geschwindigkeiten der Versuchsfahrzeuge unmittelbar vor Kollision zu ermitteln. Bezüglich der Rekonstruktionsverfahren gab es keine Einschränkungen. Wesentlich war jedoch, dass die Ergebnisse in nachvollziehbarer und prüffähiger Form geliefert wurden.



Bild A12-11 Spurenlage an der Kollisionsstelle

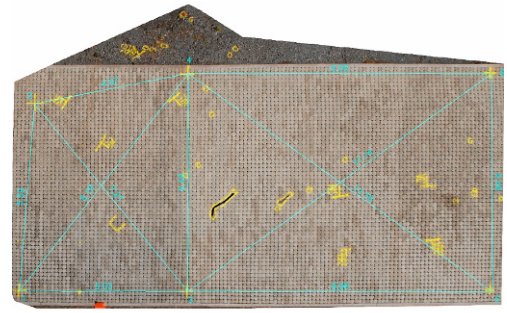


Bild A12-12 Photogrammetrische Bildentzerrung

Zum Ringtest 2005 wurden insgesamt 32 Ergebnisse eingereicht. Von den eingereichten Berechnungsergebnissen lagen 37,5 % innerhalb von ±3 km/h der aus den Beschleunigungssignalen berechneten Geschwindigkeiten. Insgesamt 59,4 % der eingereichten Berechnungsergebnisse lagen innerhalb einer Toleranzgrenze von ±6 km/h der Berechnungsergebnisse (**Bild A12-13**).

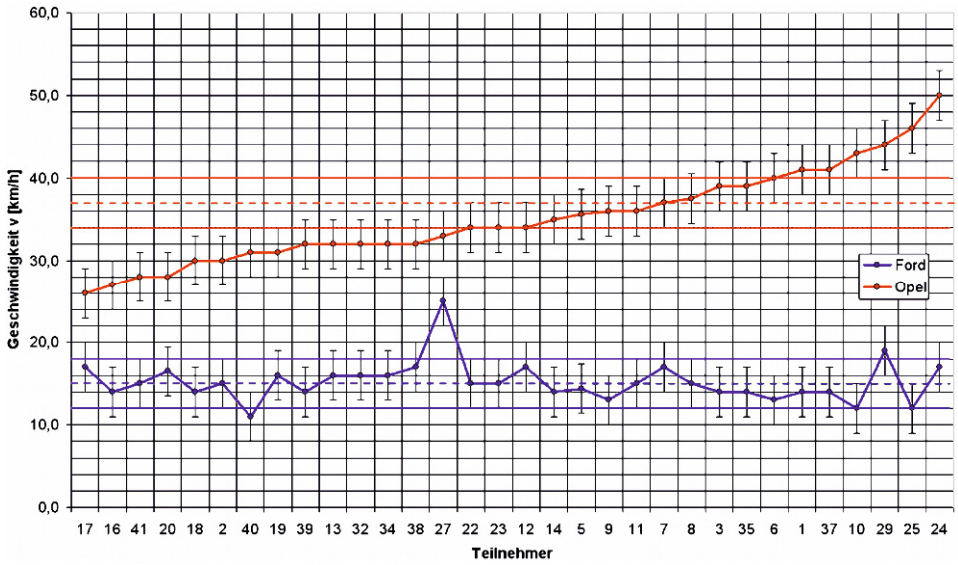


Bild A12-13 Von den Teilnehmern am Ringtest ermittelte Kollisionsgeschwindigkeiten im Vergleich mit den tatsächlichen Werten

Qualitätssicherung kann nicht damit beendet sein, die Ergebnisse darzustellen und festzustellen, wie gut oder schlecht diese sind. Im Sinne der Nachhaltigkeit müssen folgende Schritte zur Qualitätssteigerung durchgeführt werden:

1. Identifikation aller Abweichungen zu den Versuchsergebnissen,
2. Bewertung der Abweichungen hinsichtlich der Ursachen für die Abweichungen,
3. Definition von Korrekturmaßnahmen (Weiterbildung, Verhinderung von auffälligen Fehlern durch Verbesserung der Analyse- und Rekonstruktionsverfahren), um zukünftig die Abweichungen zu minimieren und
4. Überprüfung der Wirksamkeit der Korrekturmaßnahmen.

3 Validierung/Verifikation von Rekonstruktionsprogrammen

Validierung oder Validation (von lat. validus: stark, wirksam, gesund) ist die Prüfung einer These, eines Plans oder Lösungsansatzes in Bezug auf das zu lösende Problem, die mit der Verifizierung, Falsifizierung oder unklar endet. Mit Validität (von lat. validus: stark, wirksam, gesund) wird in erster Linie das argumentative Gewicht einer (vornehmlich wissenschaftlichen) Feststellung bzw. Aussage, Untersuchung, Theorie oder Prämisse bezeichnet. Sie gilt vor allem für empirische Untersuchungen als Inbegriff des Vorhandenseins exakter methodisch-logischer Qualitätskriterien und wird neben der Reliabilität (Messgenauigkeit) und der Objektivität (Beobachterübereinstimmung) als Maßstab für die Gültigkeit einer wissenschaftlichen Feststellung verstanden.

Als Verifizierung oder Verifikation (von lat. veritas, Wahrheit) wird der Vorgang bezeichnet, einen vermuteten oder behaupteten Sachverhalt als wahr zu belegen.

In der Computersimulation wird in der Verifikation oder Verifizierung untersucht in wie weit sich die Ergebnisse der Simulation mit der Realität decken. Hierfür werden Crash-Versuche durchgeführt bei denen alle für die Simulation bzw. Beschreibung des Vorgangs erforderlichen Daten möglichst genau dokumentiert bzw. gemessen werden. [5], [6], [8], [9], [10], [11], [12]

Im Gegensatz dazu prüft die Validierung die Anwendbarkeit eines bestimmten Modellansatzes zur Lösung eines Problems (Rekonstruktion eines bestimmten Unfalltyps) und die Aussagefähigkeit des Modells.

Wichtig für die Verifizierung und Validierung ist, dass Parameter, die für die Simulation erforderlich sind verfügbar sind, also gemessen oder bestimmt wurden, und damit in der Benutzung der Simulationsprogramme möglichst wenig Interpretationsspielraum für den Programmbediener bleibt, wodurch eine Verfälschung der Ergebnisse möglich wäre.

In der Verifikation von Simulationsprogrammen gibt es zwei Fragestellungen, die untersucht werden:

1. Welche Ergebnisse liefert das Simulationsprogramm bei Vorgabe der gemessenen und dokumentierten Werte? Welche Unterschiede treten zwischen Realität und Modell auf?
2. Welche Eingabeparameter führen zu der bestmöglichen Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität?

Die Verifikation bildet in der Modellerstellung einen wichtigen Schritt zur Überprüfung der Modellannahmen und zur Überprüfung und Verbesserung der Modellparameter. Des Weiteren ist die Verifikation ein wichtiges Hilfsmittel um die Akzeptanz von Simulationsprogrammen

und deren Ergebnissen für Laien nachvollziehbar zu machen. In der Verifikation können auch Grenzen des jeweiligen Simulationsmodells veranschaulicht werden. Auch kann die zu erwartende erzielbare Genauigkeit der Simulation angegeben werden.

Vereinfacht kann man also sagen, dass die Anwendung eines Simulationsprogramms, das mit einer Unfallkonstellation verifiziert wurde, die dem realen Unfall ähnlich ist, zu ähnlichen Ergebnissen hinsichtlich Genauigkeit führen wird.

In Nordamerika ist es üblich, dass Simulationsprogramme erst dann vor Gericht akzeptiert werden, nachdem diese Verifiziert und Validiert wurden. Hierfür stehen ein Reihe von gut dokumentierten Crash Tests zur Verfügung, deren Durchführung teilweise von staatlicher Seite zum Zweck der Validierung finanziert wurde. Zur Verifizierung und Validierung werden diese Crash Tests mit den Programmen simuliert und die Anwendbarkeit der Programme für verschiedene Unfallkonstellationen sowie die Genauigkeit bei der Rekonstruktion bzw. Simulation untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung müssen in einem allgemein akzeptierten Kreis (z. B.: SAE Konferenz) veröffentlicht werden, nach dieser Prozedur kann sich der einzelne Sachverständige vor Gericht auf diese Studie berufen.

4 Daten für Berechnungen

Bei Pkw sind Daten über das Anfahren, das Beschleunigen, und das Verzögern von Interesse.

4.1 Anfahren und Beschleunigen

Beim Anfahren wurde in verschiedenen Untersuchungen festgestellt, dass dieses vom Fahrzeugtyp und der Motorleistung weitgehend unabhängig ist und eher mit der Örtlichkeit, der Verkehrsbelastung und der Fahrbahnführung in Zusammenhang steht. Beim Anfahren mit gleichzeitiger Bogenfahrt ist auch zu prüfen, ob schnell genug das Lenkrad gedreht werden kann und ob die mögliche oder angemessene Querbeschleunigung nicht überschritten wird.

In [21] werden Werte für die Anfahrbeschleunigung bis etwa 30 km/h von 1,7 bis 2,3 m/s^2 als Ergebnis einer Versuchsreihe mitgeteilt.

In [22] wird über Anfahrversuche mit neun verschiedenen Fahrzeugen und 16 Fahrern berichtet. Sie hatten die Aufgabe, in drei verschiedenen Fahrsituationen unterschiedlich schnell anzufahren. Die Ergebnisse wurden tabellarisch zusammengefasst (**Tabelle A12.6**).

Tabelle A12.6 Beschleunigungsmittelwerte und Toleranzen bei unterschiedlichem Anfahrverhalten bei Geradeausfahrt

Fahrstrecke in m	Mittlere Beschleunigung und Streubreite in m/s^2		
	langsam	normal	schnell
10	1,0 (0,8 bis 1,1)	1,8 (1,6 bis 2,1)	3,0 (2,6 bis 3,8)
20	1,4 (1,1 bis 1,7)	1,8 (1,3 bis 2,6)	3,1 (2,8 bis 3,4)
30	2,0 (1,8 bis 2,4)	2,8 (2,1 bis 3,1)	3,9 (3,5 bis 4,5)

Tabelle A12.7 Beschleunigungsmittelwerte und Toleranzen bei unterschiedlichem Einbiegeverhalten

Fahrstrecke in m	Mittlere Beschleunigung und Streubreite in m/s²		
	langsam	normal	schnell
10	0,9 (0,8 bis 1,1)	1,3 (1,1 bis 1,6)	3,0 (2,7 bis 3,2)
20	1,7 (1,2 bis 1,9)	2,0 (1,7 bis 2,4)	3,0 (2,6 bis 3,2)

Tabelle A12.8 Beschleunigungsmittelwerte und Toleranzen bei unterschiedlichem Einbiegeverhalten mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 5 km/h

Fahrstrecke in m	Mittlere Beschleunigung und Streubreite in m/s²		
	langsam	normal	schnell
20	1,6 (0,7 bis 1,8)	2,0 (1,4 bis 2,5)	3,3 (2,4 bis 3,7)

Für die Beurteilung von den verschiedensten Fahrvorgängen, wie beispielsweise den Überholvorgängen, sind auch Informationen über die maximale Beschleunigung von Pkw von Interesse. Nach einer Auswertung von Tests in Automagazinen konnten die Daten in den folgenden Tabellen zusammengestellt werden.

Tabelle A12.9 Daten für die mittlere Beschleunigung in m/s² für Minicars

Minicars	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
Citroen C2 1.6i 16V Sensodrive	3,27	2,92	2,35	2,03
Fiat Panda 1.2 8V Emotion	2,82	2,31	1,76	1,31
Ford Ka 1.3i	2,98	2,34	1,88	1,39
Kia Picanto	3,09	4,24	1,89	1,43
MCC Smart Pulse	2,19	1,87	1,45	1,04
Seat Arosa 1.0	2,56	2,02	1,56	1,17
Seat Arosa 1.7 SDI Electron	2,69	2,12	1,69	1,30
Suzuki Wagon R+	3,09	2,50	2,00	1,49
VW Lupo 1.0	2,65	2,06	1,59	1,17

Tabelle A12.10 Daten für die mittlere Beschleunigung in m/s² für Kleinwagen

Kleinwagen	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
Citoen C3 1.4 Exclusive	2,87	2,29	1,84	1,43
Citroen Saxo 1.1 SX	2,78	2,31	1,85	1,46
Citroen Saxo 1.5 D SX	2,25	1,76	1,4	1,02
Dacia Logan	3,47	2,89	2,39	1,81
Ford Fiesta 1.6 16V Trend	3,4	3	2,44	2,06
Ford Fusion 1.6 16 V Trend	3,62	2,78	2,57	2,1
Lancia Y 1.4 LX	3,27	2,61	2,1	1,72

Kleinwagen	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
Lancia Ypsilon 1.3 Multijet 16 V Platino	2,82	2,22	1,8	1,36
Mazda 2 MZI 1.6 Top	3,88	3,27	2,6	2,12
Mitsubishi Colt 1.5 Instyle	3,88	3,27	2,75	2,35
Nissan Micra 1.2 Acenta	3,55	3,04	2,42	1,92
Opel Corsa 1.0 12 V Swing	2,38	1,93	1,53	1,13
Peugeot 206 1.4 Style		2,55	2,09	1,72
Peugeot 206 SW HDi éco 90 Tendance	3,14	2,53	2,14	1,66
Renault Clio V6	5,95	5,42	4,71	4,02
Smart Forfour 1.5 Pulse	3,88	3,42	2,86	2,45
VW Polo 64 Diesel	2,92	2,24	1,82	1,36

Tabelle A12.11 Daten für die mittlere Beschleunigung in m/s^2 für Pkw der unteren Mittelklasse

Untere Mittelklasse	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
Audi A3 2.0 TDI Attraction	4,07	3,42	2,99	2,43
Audi A3 Sportback 2.0 TFSI	5,05	4,44	3,86	3,33
BMW 120d	4,39	3,7	3,23	2,69
BMW 323 ti Compact	4,5	3,97	3,39	2,92
Citroen C4 2.0 L 16 V Exclusive	4,07	3,47	2,99	2,54
Citroen Xsara 1.8i Exclusive	3,09	2,61	2,14	1,8
Citroen Xsara Coupé 1.8i 16 V	3,88	3,32	2,78	2,4
Daihatsu Gran Move CXS	2,98	2,55	2,09	1,69
Ford Focus 1.6 16 V Trend	3,7	2,92	2,37	1,95
Ford Focus 1.6i 16 V Trend	3,4	2,89	2,35	1,97
Ford Focus ST 170	4,39	3,77	3,35	2,87
Mazda 3 Sport 1.6 Exclusive	3,55	2,96	2,44	2,02
Mercedes A 170 Elegance	3,21	2,78	2,26	1,89
Mitsubishi Colt 1300 GLX	3,03	2,55	2,09	1,69
Opel Astra 1.8 16 V Sportive	4,27	3,7	3,09	2,62
Opel Astra Caravan 1.9 CDTI Cosmo	4,07	3,42	2,99	2,49
Peugeot 306 XR Break dt	3,4	2,74	2,28	1,86
Peugeot 307 SW HDi 110 Prémium	3,03	2,65	2,14	1,82
Renault Mégane 1.9 DCI Luxe Dynamique	3,79	3,17	2,7	2,16
Renault Mégane RT 1.9 dTi	3,7	2,96	2,48	
Seat Toledo 1.9 TDI Sport	3,4	2,81	2,44	1,98
Toyota Corolla 1.4	3,27	2,71	2,26	1,85
Toyota Corolla Compact 1.4 Linea terra	3,33	2,78	2,26	1,86
VW Bora 2.3 V5 Highline		3,22	2,78	2,38

Untere Mittelklasse	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
VW Golf 1.4 16 V Trendline	2,98	2,27	1,83	1,41
VW Golf 1.4 16 V Comfortline	2,82	2,34	1,89	1,47
VW Golf 1.6 FSI Comfortline	3,55	3,13	2,48	2,14
VW Golf 1.9 TDI Comfortline	3,88	3,04	2,53	1,98
VW Golf 2.3 V5	4,17	3,53	3,05	2,58
VW Golf GTI	5,21	4,44	3,81	3,40
VW Golf R32	5,56	4,83	4,08	3,75
VW New Beetle 2.0		3,17	2,67	2,15
Mini Cooper S	4,63	4,04	3,61	3,14

Tabelle A12.12 Daten für die mittlere Beschleunigung in m/s^2 für Pkw der Mittelklasse

Mittelklasse	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
Alfa Romeo 156 1.8 Twin Spark	4,27	3,7	3,16	2,65
Alfa Romeo 156 3.2 V6 24 V GTA	5,38	4,63	4,15	3,7
Audi A4 2.0 TFSI	4,63	4,27	3,91	3,37
Audi S4	5,95	4,94	4,87	4,07
BMW 318i		3,09	2,55	2,15
BMW 320d		3,32	2,78	2,35
BMW M3 CSL	7,25	6,35	5,67	4,83
Citroen C5 HDi 135 Exclusive	3,79	3	2,53	2,08
Fiat Marea 1.8 16 V ELX	3,55	3,09	2,6	2,21
Ford Mondeo 1.8i GT	3,62	3,17	2,6	2,22
Ford Mondeo ST 220	4,5	3,79	3,65	3,17
Honda Accord 1.8i LS	3,14	2,78	2,31	1,96
Honda Accord 2.2 i-CDTi Sport	4,27	3,47	2,99	2,51
Honda Accord 2.4 Type S	4,63	3,9	3,56	3,06
Jaguar S-Type R	5,56	5,05	4,71	4,12
Jaguar X-Type V6 2.0	3,55	3	2,6	2,16
Mazda 6 2.3 L	4,76	3,97	3,39	2,9
Mazda 626 2.0	4,17	3,42	2,92	
Mercedes C55 AMG	6,41	5,7	5,24	4,63
Mercedes C 200 Kompressor T	3,79	3,42	2,83	2,43
Mitsubishi Galant Kombi 2500 V6-24	3,79	3,47	3,12	
Nissan Primera 2.0 SE	3,55	3,13	2,7	2,27
Nissan Primera 2.2 Di Tekna	3,79	3,13	2,67	2,18
Opel Signum 2.0 Turbo Cosmo	4,39	3,83	3,16	2,8
Opel Vectra 2.2 16 V Elegance	3,47	3,09	2,62	2,24

Mittelklasse	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
Opel Vectra Caravan 3.0 CDTI Cosmo	3,7	3,17	2,78	2,38
Peugeot 407 HDi 135 Tendance	3,97	3,17	2,67	2,21
Saab 9-3 2.0t Vector	4,07	3,58	3,23	2,71
Skoda Octavia 1.8 SLX	3,62	3,77	2,6	2,15
Skoda Octavia 1.9 TDI Ambiente	3,79	2,96	2,5	2,02
Skoda Oktavia Combi TDI	2,82	2,34	1,94	1,53
Subaru Forester 2.0 GX	3,47	2,92	2,44	2,06
Volvo S40 1.8 16V	3,27	2,92	2,42	2,07
Volvo S40 T5	4,9	4,19	3,75	3,21
Volvo S70 T-5	4,5	4,27	3,97	2,73
VW Passat 1.8 T Trendline	3,88		2,99	2,47
VW Passat Variant TDI	3,47	2,78	2,39	
BMW Alpina B3 3.2		5,17	4,71	4,07
Volvo V70 Cross Country		4,19	3,52	2,95

Tabelle A12.13 Daten für die mittlere Beschleunigung in m/s^2 für Pkw der oberen Mittelklasse

Obere Mittelklasse	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
Alfa Romeo 166 2.0 Twin Spark		3,09	2,60	2,24
Audi A6 2.4	4,27	3,70	3,31	
Audi A6 3.0 TDI Quattro	4,90	4,04	3,52	2,98
Audi A6 Avant 2.7 T Quattro		4,73	4,15	
Audi RS6 Avant	6,94	6,17	5,56	4,90
BMW 520i	3,88	3,32	2,81	2,43
BMW 530d Touring	4,63	4,12	3,39	2,98
BMW 530d		3,70	3,27	2,8
BMW 530i	5,05	4,12	3,61	3,03
BMW M5		5,7	5,05	4,57
Cadillac CTS 3.2 V6	3,97	3,58	3,16	2,75
Jaguar S-Type 2.7 V6 Diesel Executive	4,27	3,53	3,05	2,58
Lancia Thesis 3.0 Emblema	3,55	3,17	2,92	2,6
Mercedes CLS 350	5,21	4,63	3,97	3,55
Mercedes E 55 AMG	6,94	6,73	6,04	5,56
Mercedes E 200 Kompressor T Classic	3,40	3,13	2,70	2,33
Mercedes E 220 CDI Elegance	3,97	3,37	2,75	2,31
Mercedes E 320 Elegance	4,50	3,83	3,31	2,82
Mercedes E 430	4,50	4,12	3,75	3,40
Mercedes E 500 T Elegance	5,38	4,73	4,15	3,70

Obere Mittelklasse	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
Renault Vel Satis 3.5 V6 24 V Initiale	4,39	3,77	3,39	2,78
Saab 9-5 2.0 SE	3,55	3,09	2,65	2,24
Skoda Superb V6 2.8 30 V Elegance	3,62	3,00	2,70	2,43
Toyota Camry 3.0 V6 Executive	4,17	3,53	3,09	2,58
Volvo S80 D5 Premium	3,62	3,13	2,86	2,58
Volvo S80 T6	4,76	4,27	3,61	
Audi RS6 Plus	8,33	6,94	6,04	5,29
BMW Alpina B10 3.2	5,83	4,73	4,27	3,66
BMW Alpina B10 V8 S Switch-Tronic	6,41	5,56	5,14	4,50

Tabelle A12.14 Daten für die mittlere Beschleunigung in m/s^2 für Pkw der Luxusklasse

Luxusklasse	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
Audi A8 4.2 Quattro	5,56	4,54	4,21	3,58
Audi A8 L 6.0 Quattro	5,95	5,29	4,96	4,39
Audi A8 TDI	3,97	3,32	2,89	
Bentley Arnage T	5,75	5,29	4,63	4,17
Bentley Continental GT	6,67	6,01	5,56	4,90
BMW 730 d	4,63	4,04	3,35	2,92
Chrysler 300C 5.7 Hemi	4,90	4,36	3,91	3,51
Chrysler 300M 3.5 V6		3,64	3,14	2,71
Jaguar XJ6	4,39	3,58	3,16	2,71
Jaguar XJ Sovereign 4.0	4,76	4,12	3,70	3,33
Jaguar XJR	5,75	5,05	4,71	4,17
Lexus LS 430	5,05	4,44	3,97	3,47
Maserati Quattroporte	6,41	5,29	4,87	4,17
Maserati Quattroporte V8	5,95	5,56	4,87	
Maserati Quattroporte V8 Evoluzione		5,56	4,79	
Maybach 62	5,75	5,29	4,71	4,39
Mercedes S 320	4,07	3,58	3,02	2,62
Mercedes S600 L	7,25	6,54	6,17	5,65
Rolls-Royce Phantom	5,95	5,17	4,71	4,02
Rolls-Royce Silver Seraph	4,27	3,77	3,47	3,03
VW Phaeton W12 4Motion 4-sitzig	5,21	4,54	4,15	3,62
BMW Alpina B7	6,67	6,54	5,79	5,38
BMW Alpina B12 5.7	4,90	4,73	4,34	3,88

Tabelle A12.15 Daten für die mittlere Beschleunigung in m/s^2 für Sportwagen

Sportwagen	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
Alfa Romeo GT 3.2 V6 Distinctive	5,05	4,83	4,21	3,83
Aston Martin DB9 Touchtronic	5,95	5,56	5,14	4,69
BMW 645 Ci	5,95	5,29	4,71	4,17
BMW M Coupé		5,56	5,05	4,27
Chevrolet Corvette	5,95	5,7	4,96	4,57
Chrysler Crossfire 3.2	5,21	4,63	4,03	3,55
Ferrari 575 Maranello F1	7,58	6,54	6,46	5,65
Ferrari 612 Scaglietti F1	7,94	6,54	6,31	5,46
Ford Puma	3,55	3,22	2,81	
Honda Prelude 2.2 VTi	3,40	3,37	3,16	2,73
Jaguar XKR Coupé	6,41	5,7	5,05	4,57
Lamborghini Diablo SV	6,17	6,35	5,91	
Lamborghini Gallardo	6,94	6,73	6,61	5,95
Lotus Esprit V8		6,17	5,91	5,13
Mazda RX-8 Revolution	5,56	4,83	4,34	3,75
Mercedes CL 65 AMG	7,25	6,94	6,46	6,06
Mercedes CLK 55 AMG		5,7	5,24	4,63
Mercedes CLK 320	4,90	4,27	3,75	3,17
Mercedes CLK 430		4,36	3,97	3,47
Mercedes CLK 500	5,75	5,05	4,63	4,07
Mercedes CLK DTM AMG	7,58	7,17	6,94	6,54
Mercedes SLR McLaren	7,94	7,66	7,31	6,94
Nissan 350 Z	5,75	5,05	4,55	3,88
Porsche 911 Carrera	7,58	6,35	5,67	4,9
Porsche 911 Carrera 4S	7,25	6,35	5,79	5,21
Porsche 911 Carrera (1997)		6,35	5,67	4,90
Porsche 911 Carrera S	7,94	6,35	5,91	5,13
Porsche 911 GT3	7,25	6,54	6,04	5,75
Porsche Carrera GT	8,33	7,66	7,31	7,09
Volvo C70 T5	4,76	4,19	3,91	3,44
Ferrari Challenge Stradale	7,94	6,73	6,31	5,56

Tabelle A12.16 Daten für die mittlere Beschleunigung in m/s² für Geländewagen

Geländewagen	0–60 km/h	0–80 km/h	0–100 km/h	0–120 km/h
BMW X3 3.0i	5,05	4,27	3,56	3,06
BMW X5 4.6is	5,21	4,54	4,08	3,44
Daihatsu Terios	3,09	2,53	2,07	1,59
Honda CR-V	3,47	2,74	2,33	1,93
Hummer H2	3,62	3,04	2,53	2,18
Land Rover Discovery V8 HSE	3,7	3,17	2,75	2,33
Land Rover Freelander Station Wagon 1.8i	3,55	2,81	2,33	1,83
Mercedes ML 320	3,97	3,27	2,78	2,33
Porsche Cayenne Turbo	6,17	5,42	5,05	4,33
Range Rover 4.4	3,79	3,22	2,81	2,31
Toyota Landcruiser 3.0 D-4D	3,47	2,85	2,26	1,84
Volvo XC 90 D5 Premium (Siebensitzer)	3,03	2,5	2,09	1,72
VW Touareg V8	4,50	3,97	3,43	3,03
VW Touareg V10 TDI	5,75	4,54	4,03	3,33

4.2 Bremsverzögerung

Am meisten werden bei den Berechnungen die maximal möglichen Bremsverzögerungen gebraucht. Diese werden bei den Autotests ebenfalls gemessen und stellen die maximal erreichbaren mittleren Vollverzögerungen dar. Es ist im Einzelfall zu überlegen, ob diese Werte, die auf trockener und besonders griffiger Fahrbahn gemessen worden sind, anwendbar sind oder ob Abschläge von diesen Werten zu machen sind. Die nachstehenden Daten zeigen aber, dass zwischen den einzelnen Fahrzeugen doch erhebliche Unterschiede bei der erreichbaren maximalen Verzögerung vorhanden sind. Deshalb sind Kenntnisse über diese Unterschiede sehr wichtig. Immer mehr Fahrzeuge haben Bremsassistenten, so dass eine optimale Vollbremsung eingeleitet wird, was früher bei etwas zaghafter Bremspedalbetätigung oft nicht der Fall war.

Tabelle A12.17 Daten für die mittlere Verzögerung in m/s² für Minicars

Minicars	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Citroen C2 1.6i 16V Sensodrive VTR	8,77	9,19	8,97
Fiat Panda 1.2 8V Emotion	8,21	8,02	8,02
Ford Ka 1.3i		8,70	7,20
Kia Picanto	8,97	8,77	8,57
MCC Smart Pulse	8,50	8,50	7,70
Seat Arosa 1.0	6,60	6,20	6,50
Seat Arosa 1.7 SDI Electron	9,20	9,00	8,90
Suzuki Wagon R+	8,70	8,40	8,50
VW Lupo 1.0	9,40	9,60	9,20

Tabelle A12.18 Daten für die mittlere Verzögerung in m/s² für Kleinwagen

Kleinwagen	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Citoen C3 1.4 Exclusive	9,70	9,40	9,20
Citroen Saxo 1.1 SX		9,10	8,40
Citroen Saxo 1.5 D SX		9,00	8,50
Dacia Logan	8,04	8,04	8,21
Ford Fiesta 1.6 16V Trend	10,00	9,90	9,80
Ford Fusion 1.6 16 V Trend	10,10	10,00	9,80
Lancia Y 1.4 LX		8,60	6,90
Lancia Ypsilon 1.3 Multijet 16 V Platino	8,97	8,77	8,77
Mazda 2 MZI 1.6 Top	10,20	9,80	9,60
Mitsubishi Colt 1.5 Instyle	9,41	9,41	9,41
Nissan Micra 1.2 Acenta	10,40	10,30	10,10
Opel Corsa 1.0 12 V Swing	7,80	6,90	6,90
Peugeot 206 1.4 Style	9,40	9,70	8,70
Peugeot 206 SW HDi éco 90 Tendance	9,40	9,20	8,80
Renault Clio V6	10,70	11,00	10,90
Smart Forfour 1.5 Pulse	9,65	9,89	9,19
VW Polo 64 Diesel		8,60	8,00

Tabelle A12.19 Daten für die mittlere Verzögerung in m/s² für die untere Mittelklasse

Untere Mittelklasse	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Audi A3 2.0 TDI Attraction	10,40	10,40	10,40
Audi A3 Sportback 2.0 TFSI	10,15	9,65	9,41
BMW 120d	9,89	9,65	9,65
BMW 323 ti Compact	10,70	10,40	10,20
Citroen C4 2.0 L 16 V Exclusive	9,89	9,65	9,65
Citroen Xsara 1.8i Exclusive	9,10	9,50	7,10
Citroen Xsara Coupé 1.8i 16 V	10,10	10,10	9,70
Daihatsu Gran Move CXS	8,30	7,60	7,00
Ford Focus 1.6 16 V Trend	9,41	9,41	9,41
Ford Focus 1.6i 16 V Trend	9,70	9,60	9,30
Ford Focus ST 170	10,80	10,10	10,20
Mazda 3 Sport 1.6 Exclusive	8,97	8,77	8,57
Mercedes A 170 Elegance	9,65	9,41	9,19
Mitsubishi Colt 1300 GLX		8,80	7,70
Opel Astra 1.8 16 V Sportive	9,10	9,00	9,10
Opel Astra Caravan 1.9 CDTI Cosmo	9,19	9,19	9,19

Untere Mittelklasse	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Peugeot 306 XR Break dt	9,10	9,40	8,70
Peugeot 307 SW HDi 110 Prémium	9,70	9,50	8,60
Renault Mégane 1.9 DCI Luxe Dynamique	10,50	10,30	10,30
Renault Mégane RT 1.9 dTi	8,70	8,20	7,50
Seat Toledo 1.9 TDI Sport	9,50	9,20	9,30
Toyota Corolla 1.4	9,70	9,50	9,60
Toyota Corolla Compact 1.4 Linea terra	9,60	9,50	8,10
VW Bora 2.3 V5 Highline	10,40	10,10	9,60
VW Golf 1.4 16 V Trendline	8,97	9,19	9,19
VW Golf 1.4 16 V Comfortline	9,10	9,50	9,20
VW Golf 1.6 FSI Comfortline	9,70	9,50	9,30
VW Golf 1.9 TDI Comfortline	9,19	9,19	9,19
VW Golf 2.3 V5	9,70	10,80	9,50
VW Golf GTI	9,65	9,65	9,65
VW Golf R32	10,80	10,60	10,10
VW New Beetle 2.0	10,10	9,60	9,90
Mini Cooper S	9,90	9,80	8,50

Tabelle A12.20 Daten für die mittlere Verzögerung in m/s^2 für die Mittelklasse

Mittelklasse	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Alfa Romeo 156 1.8 Twin Spark	9,40	9,40	9,00
Alfa Romeo 156 3.2 V6 24 V GTA	9,80	9,70	9,40
Audi A4 2.0 TFSI	9,65	9,65	9,41
Audi S4	10,80	10,50	10,40
BMW 318i	10,50	10,30	10,40
BMW 320d	10,50	10,40	10,20
BMW M3 CSL	11,70	11,80	11,90
Citroen C5 HDi 135 Exclusive	9,41	9,19	9,19
Fiat Marea 1.8 16 V ELX		9,80	6,80
Ford Mondeo 1.8i GT		9,60	9,50
Ford Mondeo ST 220	10,50	10,40	10,40
Honda Accord 1.8i LS		9,30	5,70
Honda Accord 2.2 i-CDTi Sport	9,19	8,97	8,77
Honda Accord 2.4 Type S	10,10	10,00	10,10
Jaguar S-Type R	10,30	10,40	10,30

Mittelklasse	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Jaguar X-Type V6 2.0	9,80	9,80	9,80
Mazda 6 2.3 L	10,40	10,30	10,10
Mazda 626 2.0	8,40	8,40	7,50
Mercedes C55 AMG	9,19	8,97	9,19
Mercedes C 200 Kompressor T	9,90	9,90	9,80
Mitsubishi Galant Kombi 2500 V6-24	9,20	9,20	8,80
Nissan Primera 2.0 SE		9,30	8,90
Nissan Primera 2.2 Di Tekna	10,10	9,90	9,50
Opel Signum 2.0 Turbo Cosmo	10,50	10,20	10,30
Opel Vectra 2.2 16 V Elegance	9,30	9,40	9,00
Opel Vectra Caravan 3.0 CDTI Cosmo	8,97	8,97	8,77
Peugeot 407 HDi 135 Tendance	9,41	9,19	8,97
Saab 9-3 2.0t Vector	9,90	10,00	9,90
Skoda Octavia 1.8 SLX	9,40	9,60	9,40
Skoda Octavia 1.9 TDI Ambiente	9,19	9,19	9,19
Skoda Oktavia Combi TDI	8,80	8,80	8,40
Subaru Forester 2.0 GX	9,00	9,00	7,70
Volvo S 40 1.8 16V		9,60	8,10
Volvo S40 T5	9,41	9,19	8,77
Volvo S70 T-5	9,50	9,30	8,80
VW Passat 1.8 T Trandline		10,10	9,50
VW Passat Variant TDI	10,00	10,00	9,70
BMW Alpina B3 3.2		9,90	10,20
Volvo V70 Cross Country	10,00	9,20	7,50

Tabelle A12.21 Daten für die mittlere Verzögerung in m/s² für die obere Mittelklasse

Obere Mittelklasse	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Alfa Romeo 166 2.0 Twin Spark	9,00	9,50	9,30
Audi A6 2.4	9,20	9,00	8,70
Audi A6 3.0 TDI Quattro	9,89	9,89	9,41
Audi A6 Avant 2.7 T Quattro	10,00	9,90	10,10
Audi RS6 Avant	10,60	10,10	10,30
BMW 520i		9,70	9,60
BMW 530d Touring	9,89	9,41	9,19
BMW 530d	10,00	10,00	9,50

Obere Mittelklasse	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
BMW 530i	10,70	10,40	10,80
BMW M5	10,20	10,20	10,10
Cadillac CTS 3.2 V6	10,20	9,90	9,50
Jaguar S-Type 2.7 V6 Diesel Executive	9,65	9,41	8,77
Lancia Thesis 3.0 Emblema	9,60	9,50	9,80
Mercedes CLS 350	9,65	9,65	9,65
Mercedes E 55 AMG	10,70	10,20	10,30
Mercedes E 200 Kompressor T Classic	10,50	10,80	10,60
Mercedes E 220 CDI Elegance	10,30	10,20	10,00
Mercedes E 320 Elegance	10,50	10,00	9,90
Mercedes E 430	9,60	9,60	9,50
Mercedes E 500 T Elegance	8,97	9,19	8,97
Renault Vel Satis 3.5 V6 24 V Initiale	9,90	9,70	9,20
Saab 9-5 2.0 SE	9,10	9,50	9,40
Skoda Superb V6 2.8 30 V Elegance	10,10	9,90	9,60
Toyota Camry 3.0 V6 Executive	9,90	9,80	10,00
Volvo S80 D5 Premium	10,00	9,60	9,70
Volvo S80 T6	10,30	10,10	9,40
Audi RS6 Plus	9,89	9,65	9,65
BMW Alpina B10 3.2	10,20	10,00	10,20
BMW Alpina B10 V8 S Switch-Tronic	10,80	10,10	10,10

Tabelle A12.22 Daten für die mittlere Verzögerung in m/s^2 für die Luxusklasse

Luxusklasse	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Audi A8 4.2 Quattro	10,60	10,50	10,00
Audi A8 L 6.0 Quattro	9,41	9,41	9,41
Audi A8 TDI	9,70	9,70	9,00
Bentley Arnage T	10,10	10,00	10,20
Bentley Continental GT	8,77	8,77	8,77
BMW 730 d	9,90	9,90	9,90
Chrysler 300C 5.7 Hemi	9,19	9,19	8,77
Chrysler 300M 3.5 V6	10,10	9,70	9,40
Jaguar XJ6	10,50	10,10	9,30
Jaguar XJ Sovereign 4.0	9,30	9,00	8,70
Jaguar XJR	10,50	10,40	10,40

Luxusklasse	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Lexus LS 430	9,19	9,19	9,19
Maserati Quattroporte	9,65	9,65	9,89
Maserati Quattroporte V8	9,90	9,90	9,90
Maserati Quattroporte V8 Evoluzione	10,00	10,20	9,90
Maybach 62	10,50	10,20	9,90
Mercedes S 320	9,70	9,50	9,40
Mercedes S600 L	10,50	10,50	10,30
Rolls-Royce Phantom	10,20	9,90	9,80
Rolls-Royce Silver Seraph	9,30	9,00	9,00
VW Phaeton W12 4Motion 4-sitzig	10,00	9,70	9,60
BMW Alpina B7	8,97	8,97	9,19
BMW Alpina B12 5.7		10,30	10,10

Tabelle A12.23 Daten für die mittlere Verzögerung in m/s^2 für Sportwagen

Sportwagen	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Alfa Romeo GT 3.2 V6 Distinctive	9,65	9,41	9,41
Aston Martin DB9 Touchtronic	9,89	9,65	9,41
BMW 645 Ci	9,65	9,65	9,41
BMW M Coupé	10,40	10,20	10,30
Chevrolet Corvette	10,30	10,00	10,40
Chrysler Crossfire 3.2	10,90	10,90	10,80
Ferrari 575 Maranello F1	10,20	10,20	10,10
Ferrari 612 Scaglietti F1	9,89	9,89	9,89
Ford Puma	9,10	9,80	9,70
Honda Prelude 2.2 VTi	9,10	9,00	9,30
Jaguar XKR Coupé	9,80	10,10	10,00
Lamborghini Diablo SV	8,60	8,60	9,80
Lamborghini Gallardo	9,65	9,89	9,89
Lotus Esprit V8		10,20	9,30
Mazda RX-8 Revolution	9,41	9,41	9,41
Mercedes CL 65 AMG	9,41	9,19	8,97
Mercedes CLK 55 AMG	10,20	10,10	10,10
Mercedes CLK 320	9,70	9,90	10,10
Mercedes CLK 430	10,20	9,40	10,10
Mercedes CLK 500	10,30	10,20	10,00

Sportwagen	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
Mercedes CLK DTM AMG	11,35	11,35	11,35
Mercedes SLR McLaren	10,72	11,02	10,72
Nissan 350 Z	10,50	10,30	10,60
Porsche 911 Carrera	10,72	10,72	10,72
Porsche 911 Carrera 4S	10,80	10,80	10,80
Porsche 911 Carrera (1997)	10,50	10,60	10,60
Porsche 911 Carrera S	10,72	10,72	10,72
Porsche 911 GT3	11,10	11,00	11,30
Porsche Carrera GT	10,43	10,43	10,43
Volvo C70 T5	9,50	10,00	8,60
Ferrari Challenge Stradale	11,00	10,90	10,90

Tabelle A12.24 Daten für die mittlere Verzögerung in m/s² für Geländewagen

Geländewagen	Kalt, leer	Kalt, beladen	Warm, beladen
BMW X3 3.0i	9,41	9,65	9,19
BMW X5 4.6is	10,30	10,10	10,10
Daihatsu Terios	7,90	8,20	7,30
Honda CR-V	8,90	8,60	8,60
Hummer H2	7,28	7,28	5,08
Land Rover Discovery V8 HSE	9,19	8,97	8,04
Land Rover Freelander Station Wagon 1.8i	9,40	9,20	6,10
Mercedes ML 320	8,40	8,10	8,20
Porsche Cayenne Turbo	10,30	10,10	10,00
Range Rover 4.4	9,10	9,30	9,30
Toyota Landcruiser 3.0 D-4D	9,90	9,20	9,00
Volvo XC 90 D5 Premium (Siebensitzer)	10,20	9,90	9,80
VW Touareg V8	10,60	10,50	10,20
VW Touareg V10 TDI	10,00	9,90	9,70

4.3 Ausrollen von Pkw

In dem SAE-Paper 980368 wird über umfangreiche Ausrollversuche berichtet, die zu folgenden Ergebnissen führten:

1. Bei Geschwindigkeiten von 2 m/s wurden mit frei rollenden Rädern und normaler Fahrzeugbeladung Verzögerungen von 0,07 bis 0,15 m/s² für verschiedene Pkw-Typen gemessen. Die Werte stiegen an auf 0,17 bis 0,24 m/s² bei einer Geschwindigkeit von 12 m/s.

2. Fahrzeuge mit konventionellen Schaltgetrieben wiesen Verzögerungen von 0,35 bis 0,64 m/s² im 5. Gang und 0,95 bis 3,57 m/s² im 1. Gang auf.
3. Bei Fahrzeugen mit Automatik-Getrieben wurden Werte 0,34 bis 0,82 m/s² im 3. Gang und 1,41 bis 2,78 m/s² im 1. Gang jeweils bei einer Geschwindigkeit von 12 m/s gemessen.
4. Rollwiderstandsbeiwerte bei luftleeren Reifen schwankten zwischen 1,2 bis 2,1 m/s².
5. Auslaufverzögerungen nach Unfällen können durch Anwendung von Simulationsprogrammen berücksichtigt werden.
6. Ausrollvorgänge nach Unfällen können mit Simulationsprogrammen nur dann richtig berechnet werden, wenn die Rollwiderstandsbeiwerte bekannt sind.

Quelle: SAE-Paper 980368. The Measured Rolling Resistance of Vehicles for Accident Reconstruction. William E. Cliff, James J. Bowler, MacInnis Engineering Associates (MEA), Richmond, BC, Canada.

4.4 Reibungskoeffizienten

Tabelle A12.25 SAE 830612: C. Y. Warner, G. C. Smith, M. B. James, G. J. Germane; Friction Applications in Accident Reconstructions (Reference: J. S. Baker; Traffic Accident Investigation Manual, Northwestern University, Evanston, I.U. 1975)

Beschreibung der Straßenoberfläche	Trocken unter 48 km/h	Trocken über 48 km/h	Nass unter 48 km/h	Nass über 48 km/h
Portlandzement				
neu, griffig	0,80–1,20	0,70–1,00	0,50–0,80	0,40–0,75
befahren	0,60–0,80	0,60–0,75	0,45–0,70	0,45–0,65
abgefahren	0,55–0,75	0,50–0,65	0,45–0,65	0,45–0,60
Asphalt, Teer				
neu, griffig	0,80–1,20	0,65–1,00	0,50–0,80	0,45–0,75
befahren	0,60–0,80	0,55–0,70	0,45–0,70	0,40–0,65
abgefahren	0,55–0,75	0,45–0,65	0,45–0,65	0,40–0,60
Teer-Überschuss	0,50–0,60	0,35–0,60	0,30–0,60	0,25–0,55
Schotter				
verdichtet, geölt	0,55–0,85	0,50–0,80	0,40–0,80	0,40–0,60
in loser Schüttung	0,40–0,70	0,40–0,70	0,45–0,75	0,45–0,75
Schlacke				
verdichtet	0,50–0,70	0,50–0,70	0,65–0,75	0,65–0,75
Steine				
zerbrochen	0,55–0,75	0,55–0,75	0,55–0,75	0,55–0,75
Eis				
Glatteis	0,10–0,25	0,07–0,20	0,05–0,10	0,05–0,10
Schnee				
verdichtet	0,30–0,55	0,35–0.55	0,30–0,60	0,30–0,60
unverdichtet	0,10–0,25	0,10–0.20	0,30–0,60	0,30–0,60

Tabelle A12.26 SAE 830612: C.Y. Warner, G.C. Smith, M.B. James, G.J. Germane; Friction Applications in Accident Reconstructions (Reference: J.C. Collins; Accident reconstruction, C.C. Thomas, Springfield, Illinois, 1979)

Beschreibung der Straßenoberfläche	Pkw-Reifen	Lkw-Reifen
Trockener Beton	0,85	0,65
Trockener Asphalt	0,80	0,60
Nasser Beton	0,70–0,80	0,50
Nasser Asphalt	0,45–0,80	0,30
Verdichteter Schnee	0,15	0,15
Eis	0,05	0,11 (trocken)
		0,07 (nass)
Trockener Schmutz	0,65	
Schlamm	0,40–0,50	
Gravel or sand	0,55	
Nasser, öliger, glatter Beton		0,25
Verdichteter Schnee mit Ketten		0,60
Trockenes Eis mit Ketten		0,25

Tabelle A12.27 SAE 830612: C.Y. Warner, G.C. Smith, M.B. James, G.J. Germane; Friction Applications in Accident Reconstructions (Reference: J.C. Collins; Accident reconstruction, C.C. Thomas, Springfield, Illinois, 1979)

Geschwindigkeits-Abschlagswerte	
Geschwindigkeit in km/h (mph)	**Abnahme des Reibungskoeffizienten (%)**
64 (40)	3
80 (50)	7
97 (60)	9
113 (70)	11
129 (80)	14
145 (90)	18

Tabelle A12.28 SAE 960657: D. P. Martin, G. F. Schaefer; Tire-Road Friction in Winter Conditions for Accident Reconstruction

Reifen/Untergrund Klassifikation	Beschreibung (Testtemperatur von –42 bis –4°C)	Bereiche μ-Werte
Eis	Eine feste Auflage aus gefrorenem Wasser, dick genug, dass sie nicht durch Spikes oder Ketten durchbrochen wird, Erscheinungsbild wie Glas, am Schmelzpunkt mit einer Wasserschicht überzogen	0,054–0,19
Eis, Winterreifen mit Spikes	Eisfläche wie oben, Winterreifen mit Spikes auf den Hinterrädern, reduzierte Werte für alle Räder	0,092–0,16

Reifen/Untergrund Klassifikation	Beschreibung (Testtemperatur von –42 bis –4°C)	Bereiche μ-Werte
Eis, Winterreifen mit Stahlschneeketten	Eisfläche wie oben, Winterreifen mit Stahlschneeketten	0,12–0,18
Eis, reduzierter Reifendruck	Eisfläche wie oben, Reifendruck von 83 to 221 kPa (0,83 bis 2,21 bar)	0,13–0,15
Dickes, schwarzes Eis	Eine durchgehende Eisschicht auf Asphalt oder Beton, die vom durchschnittlichen Fahrer nicht klar erkannt werden kann, die Eisschicht wird durch blockierende Räder nicht durchbrochen	0,12–0,26
Dünnes, schwarzes Eis	Eine durchgehende Eisschicht auf Asphalt oder Beton, die vom durchschnittlichen Fahrer nicht klar erkannt werden kann, die Eisschicht wird durch blockierende Räder teilweise durchbrochen	0,17–0,49
Schnee und Eis	Eine durchgehende Schneeschicht, der Schnee so verdichtet, dass er eine eisige Oberfläche besitzt	0,12–0,39
Schnee und Eis mit einer glänzenden Oberfläche	Kompakte Schnee und Eisfläche, durch die Motorwärme und Feuchtigkeit der Fahrzeuge wurde eine glänzende Eisschicht gebildet	0,09–0,22
Schnee und Eis mit Sand	Kompakte Schnee und Eisfläche mit Sandstreuung (splittähnlich), Korndurchmesser 3 bis 6 mm	0,15–0,45
Schnee und Eis mit Sand in Furchen	Kompakte Schnee und Eisfläche mit Furchen, Sandstreuung, Korndurchmesser 3 bis 6 mm, Sand in Furchen festgefahren, Untergrund nicht freigelegt	0,20–0,29
Schnee und Eis mit Neuschnee	Kompakte Schnee und Eisfläche mit einer frischen 3 bis 100 mm Schicht aus Neuschnee oder gefrorenem Nebel, noch keine Spurbildung	0,18–0,45
Schnee und Eis mit einer älteren Schneeschicht	Kompakte Schnee und Eisfläche mit einer 100 bis 200 mm dicken Auflage aus rauem, krustigem Schnee, noch keine Spurbildung	0,43–0,45
Schnee und Eis mit 20 % ausgefahrenen Furchen	Kompakte Schnee und Eisfläche, welche derart abgefahren ist, dass sich Furchen gebildet haben in denen zu 20 % der Asphalt freigelegt ist	0,20
Verdichteter Schnee	Schnee auf der Fahrbahnoberfläche, der durch Fahrzeuge verdichtet wurde, aber nicht als Schnee und Eis bezeichnet werden kann	0,24–0,37
Unverdichteter Schnee	Neuschnee auf der Fahrbahnoberfläche, der noch nicht durch Fahrzeuge verdichtet wurde	0,15–0,42
Tiefer unverdichteter Schnee	Große Schneemenge, Fahrzeug stützt sich nicht auf Räder auf	0,92–0,95
Starker Frost	Eis-ähnliche Bedingungen. Markante weiße Schicht, für den Fahrer leicht zu erkennen	0,37–0,48
Frost	Weiße Schicht auf der ganzen Fahrbahn, für den Fahrer leicht als Frost identifizierbar	0,48–0,58
Teilweise Frost	Leichte oder partielle Frostschicht, kann vom Fahrer nur zeitweise als Frost erkannt werden	0,61–0,64
Trockene Asphaltfläche ohne Auflage	Trockene Asphaltfläche ohne Auflage. Auswirkung von tiefen Temperaturen auf das Reibungsverhalten Reifen – Asphalt	0,59–0,72

Literatur

[1] Verkehrsunfälle 2005, Statistisches Bundesamt, Fachserie 8 Reihe 7, www.destatis.de
[2] www.dsd.at
[5] Shoemaker, Norris E.: „Research Input for Computer Simulation of Automobile Collisions, Volumes II and III: Staged Collisions“, U.S. Department of Transportation Report Nos. DOT HS-805 038 and DOT HS-805 039, National Highway Traffic Safety Administration
[6] Jones, Ian S., Baum, A. S.: „Research Input for Computer Simulation of Automobile Collisions, Volume IV: Staged Collision Reconstructions“, DOT HS 805 040, National Highway Traffic Safety Administration
[8] Bailey, M. N., Lawrence, J. M., Fowler, S. J., Williamson, P. B., Cliff, W. E., Nickel, J. S.: „Data from Five Staged Car to Car Collisions and Comparison with Simulations“, SAE 2000-01-0849
[9] Smith, R. A., Noga, J. T.: „Examples of Staged Collisions in Accident Reconstruction“, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, 1980
[10] Ishikawa, Hirotoshi: „Computer Simulation of Automobile Collision – Reconstruction of Accidents“, SAE 851729
[11] Ishikawa, Hirotoshi: „Impact Model for Accident Reconstruction – Normal and Tangential Restitution Coefficients“, SAE 930654
[12] Ishikawa, Hirotoshi: „Impact Center and Restitution Coefficients for Accident Reconstruction“, SAE 940564
[21] Becke, Nackenhorst: Anfahrbeschleunigungen von Personenwagen. V+F 1986, Heft 5
[22] GWAK, Anfahrbeschleunigungen für die Praxis. V+F 1992, Heft 10
[23] Automagazin wie auto motor und sport, Auto-Zeitung u. a.

A13 Unfälle mit Nutzfahrzeugen

Dr. Heinz Burg

1 Allgemeines

Die Rekonstruktion von Nutzfahrzeugunfällen ist eine sehr komplizierte Angelegenheit. Nutzfahrzeuge haben eine aufwändigere Technik als Personenwagen, sie haben eine Ladung, die sehr verschieden sein kann und sehr unterschiedliche Effekte erzeugen kann. Die Reifenspuren, sofern es welche gibt, sind schwer zu deuten, Verzögerungen sind nur in großen Toleranzen abzuschätzen. Kollisionen sind mit den derzeit vorhandenen Modellen nicht besonders gut zu analysieren.

Sehr wertvolle Informationen für die Unfallrekonstruktion liefern die Aufschriebe der Geschwindigkeit über der Zeit in den Tachographen. Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 7,5 to müssen mit Tachographen ausgerüstet sein. Diese dienen zwar in erster Linie der Überwachung der Lenk- und Ruhezeiten, bieten aber auch genügend Informationen zur Ermittlung von Geschwindigkeiten. Ab 2006 werden Nutzfahrzeuge mit digitalen Tachographen ausgerüstet. Auch bei diesen Geräten werden Geschwindigkeiten mitgeschrieben. Wie sich diese Informationen für die Unfallrekonstruktion nutzen lassen werden, kann derzeit nicht beurteilt werden.

2 Tachographen

Es gibt verschiedene Designs von Tachographen, deren innerer Aufbau ist aber grundsätzlich gleich. **Bild A13-1** zeigt einen als Rundinstrument ausgeführten Tachographen. **Bild A13-2** zeigt einen geöffneten Tachographen mit eingelegter Diagrammscheibe. **Bild A13-3** zeigt die Schreibstifte, die sich in dem Schlitz hin- und herbewegen können. Der gelb eingekreiste Stift schreibt die Geschwindigkeit auf, der links davon befindliche die Betriebsdauer und der ganz links sichtbare die zurückgelegte Wegstrecke. Das **Bild A13-4** zeigt genauer, wie solch ein Stift aussieht.



Bild A13-1 Tachograph als Rundinstrument

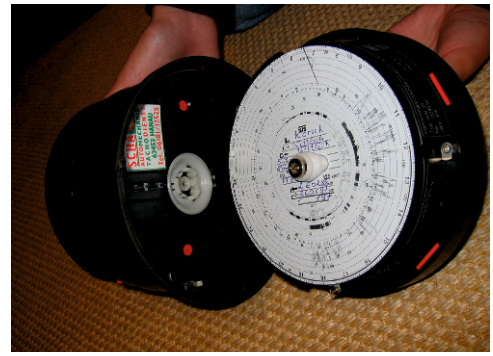


Bild A13-2 Geöffneter Tachograph mit Diagrammscheibe

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_13

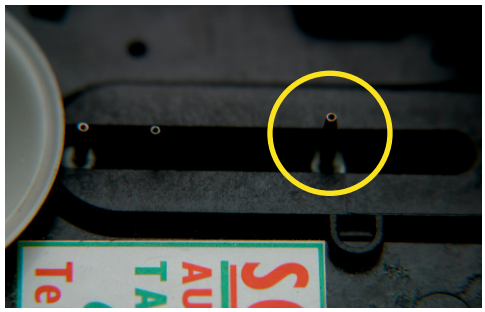


Bild A13-3 Schreibstifte

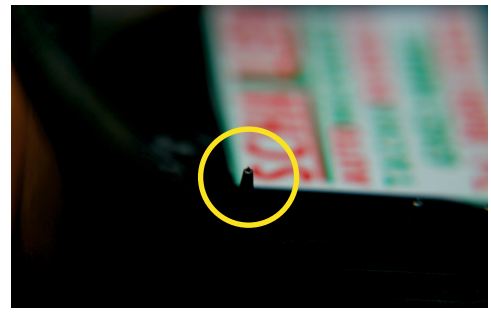


Bild A13-4 Schreibstift in Vergrößerung

Vor dem Losfahren mit einem Fahrzeug wird der Tachograph geöffnet, die Diagrammscheibe wird eingelegt und der Deckel wird geschlossen. Nun liegt die Diagrammscheibe an den drei Schreibstiften an. Die Stifte haben eine Spitze, die sehr dünn und deshalb schlecht zu sehen ist.

Wenn infolge einer Kollision der Tachograph erheblich erschüttert wird, dann kommt es zu Schwingungen der Schreibstifte (Auslenkungen). Diese machen sich als Verwackelungen in der regulären Schreibspur bemerkbar. Da es solche Auslenkungen bei den normalen fahrtbedingten Erschütterungen des Lkw nicht geben soll, muss es sich schon um erhebliche Krafteinwirkungen in der Nähe des Tachographen handeln, damit es dann tatsächlich zu solchen Auslenkungen kommen kann.

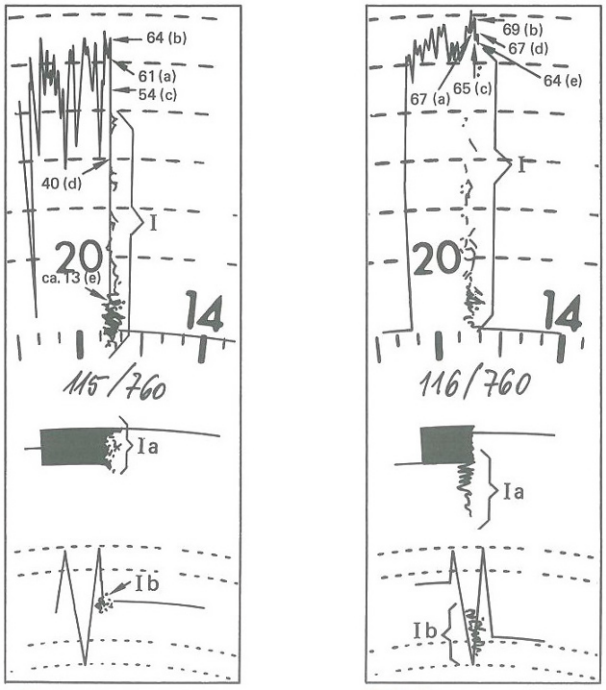
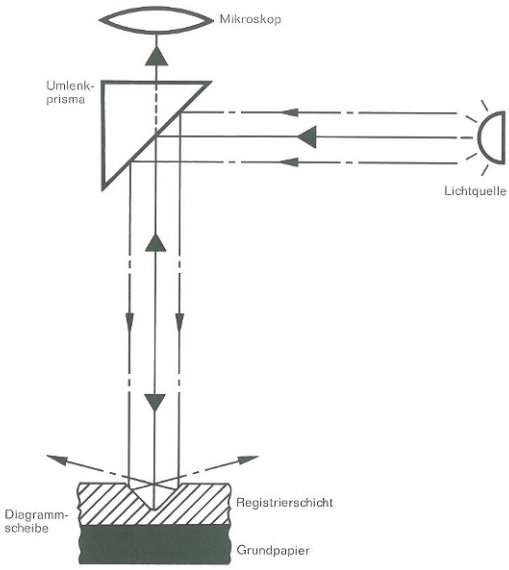


Bild A13-5 Schreibstiftauslenkungen aus [1]

Wie solche Auslenkungen aussehen können, ist in den beiden Bildern links dargestellt. Die Auslenkungen können sich im Geschwindigkeitsaufschrieb (oberer Teil der Diagramme) oder im Wegaufschrieb (unterer Teil) bemerkbar machen. In den beiden gezeigten Fällen handelt es sich um schwere Kollisionen im Geschwindigkeitsbereich von 50 bis 60 km/h.

Bei Kleinkollisionen, möglicherweise noch in großer Entfernung zum Tachographen, ist es eher nicht zu erwarten, dass es zu einer bedeutsamen Erschütterung im Fahrerhaus bzw. am Armaturenbrett, wo der Tachograph eingebaut ist, kommen wird. Trotzdem könnte in einem Ausnahmefall durch besondere Umstände doch eine Schreibstiftauslenkung aufgetreten sein, so dass eine Auswertung von Diagrammscheiben grundsätzlich sinnvoll sein kann.

Die Auswertung von Diagrammscheiben ist ein Fachgebiet, das besonderer Erfahrung des Auswerters bedarf. Es ist zu bedenken, dass ein ganzer Tag mit 24 Stunden auf eine solche Diagrammscheibe passt. Der Geschwindigkeitsverlauf soll zumindest mit einer Auflösung von 1 s ausgewertet werden. Das bedeutet, dass 86.400 s bei Radien von ca. 40 bis 60 mm auf einen Durchmesser von 252,8 bis 376,8 mm unterzubringen sind. Die Zeitspanne von 1 s ist damit 2,93 bis 4,36 µm groß.



Solch geringe Abstände können mit einem Mikroskop und einem sehr genau arbeitenden Drehteller für die Diagrammscheibe ausreichend genau gemessen werden. Dabei ist zu beachten, dass der Umstand, dass nach [2] die Breite der Spur, die der Schreibstift in der Registrierschicht hinterlässt, etwa 55 µm beträgt. Diese Breite hängt ziemlich stark von der Qualität der Registrierschicht auf der Diagrammscheibe ab. Der Auswerter hat zu entscheiden, ob er sich auf die linke oder rechte Flanke oder auf die Mitte der Spur des Schreibstifts beziehen will.

Bild A13-6 Prinzipskizze für die Auswertung nach dem Auflichtverfahren [1]

In [1] werden zu den Möglichkeiten und Grenzen der Auswertung und zur Genauigkeit folgende Angaben gemacht:

Der Aufzeichnungsbeginn für die Geschwindigkeit ist abhängig vom Messbereich der Diagrammscheibe (**Tabelle A13.1**). Nachdem Geschwindigkeiten unterhalb des Anfangswertes nicht registriert werden, können Fahrzeugbewegungen mit entsprechend geringen Geschwindigkeiten nicht festgestellt werden. Sind die Fahrtstrecken mehr als ca. 30 m, dann können diese anhand der Wegstreckenaufzeichnung festgestellt werden. Bei Standardgeräten kann eine Fahrtbewegung anhand des Zeitgruppenschreibers ab ca. 10 m bemerkt werden.

Tabelle A13.1 Anfangswerte für den Geschwindigkeitsaufschrieb bei Diagrammscheiben

Aufzeichnungsbereich auf der Diagrammscheibe in km/h	Anfangswert für den Geschwindigkeitsaufschrieb in km/h
100	5,0
125	6,5
140	11,5
160	8,0
180	20,0

Bei mechanisch angetriebenen Tachographen (Tachowelle) können Rückwärtsfahrten von Vorwärtsfahrten unterschieden werden, da im Wegstreckenaufschrieb eine Umkehr der Schreibrichtung erfolgt. Dies ist jedoch nur bei Wegstrecken ab etwa 30 m möglich. Geschwindigkeiten werden während der Rückwärtsfahrt nicht aufgezeichnet. Bei elektronischen Impulsgebern werden Vorwärts- und Rückwärtsfahrten in gleicher Weise aufgezeichnet, sind somit nicht zu unterscheiden. Bei Fahrzeugen, deren Fahrtschreiberanlage regelmäßig nach den gesetzlichen Vorgaben untersucht worden sind, wird eine Fehlergrenze von +/– 3 km/h für die Geschwindigkeit angegeben. Die Fehlergrenze für die Zeit wird mit +/– 1 s angegeben. Dabei ist aber zu bedenken, dass diese Fehlergrenze für den gesamten Auswertebereich gilt, weil die Diagrammscheibe auf dem Drehteller der Auswerteeinrichtung immer nur in einer Richtung gedreht wird.

In [3] wird über Bremsversuche mit Nutzfahrzeugen berichtet. Dabei wurden die Ergebnisse von UDS-Auswertungen mit denen von Tachoscheibenauswertungen verglichen. Dadurch, dass bei der Tachoscheibenauswertung nur eine Auflösung von 1 s verwendet wird, kann es bei kurzen Bremsvorgängen zu deutlichen Fehlern bei der Angabe von Wegstrecken und von Verzögerungen kommen.

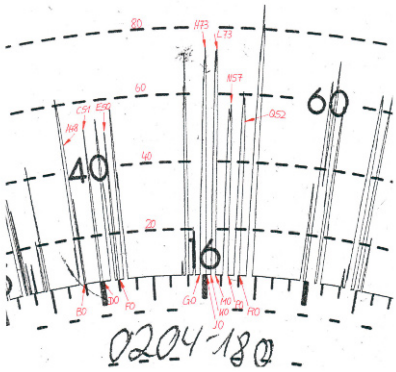


Bild A13-7 Beispiel für eine Auswertung

In [4] wird ebenfalls über Bremsversuche mit Nutzfahrzeugen berichtet. Referenzgerät war hier ein Peiseler-Rad. Das Ergebnis war, dass bei der Tachoscheibenauswertung die Anzahl der Vollbremsung richtig erkannt wurden. Bei einem Bremsversuch aus 73 km/h wurde zunächst eine geringe Verzögerung bis 56 km/h ermittelt, dann eine Vollbremsung bis zum Stillstand. Tatsächlich handelte es sich aber um eine durchgehende Vollbremsung. Ein weiterer Versuch wurde in drei Abschnitte unterteilt, wodurch sich eine deutlich zu geringe mittlere Verzögerung ergab. Die Verzögerungen wurden bei der Tachoscheibenauswertung insgesamt zu niedrig ermittelt. Die Geschwindigkeitsangaben lagen innerhalb der Toleranz von +/– 3 km/h.

Die digitalen Tachographen stehen am Beginn ihrer Einführung. Nach der Verordnung EWG Nr. 3821/85 müssen alle Fahrzeuge, die ab dem 01.05.2006 zugelassen werden mit digitalen Tachographen ausgerüstet werden. Daten zur Überwachung der Lenk- und Ruhezeiten werden ca. 365 Tage lang in dem Gerät gespeichert. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird im 1-s-Abstand über einen Zeitraum von 24 Stunden Fahrtzeit gespeichert. Danach werden die älteren Daten überschrieben. Bei Tachographen von Siemens VDO werden Daten mit 4-Hz-Auflösung bei auffälligen Ereignissen (z. B. Vollbremsung) für einen Zeitraum von 1 min vor und 1 min nach dem Ereignis gespeichert. Bei diesen digitalen Aufzeichnungen kommt es darauf an, diese sofort nach dem Unfall zu speichern oder auszudrucken. Über Erfahrungen aus der Praxis kann noch nichts berichtet werden.

Literatur

[1] Leitfaden für die Auswertung und Nutzung der Original Kienzle-Diagrammscheibe. Siemens VDO
[2] Hugemann, Lehmann: Die zeitpräzise Auswertung von Diagrammscheiben. V+F 1994, Heft 9
[3] Becke, Saat, Bührmann: Grenzen der Tachoscheiben-Auswertung bei Nutzfahrzeugen. AREC 2002
[4] Heinz Burg, Zsolt Szalay, Jürgen Burg: Bremsvermögen von Nutzfahrzeugen. AREC 2002
[5] Reusch: Der digitale Tachograph. EVU-Tagung 2006

A14 Unfälle mit land- oder forstwirtschaftlichen Fahrzeugen

Dr. Heinz Burg

1 Unfallursachen

Unfälle mit land- oder forstwirtschaftlichen (lof-) Fahrzeugen im Straßenverkehr sind eher selten. Die Folgen solcher Unfälle sind dagegen meist erheblich. Das liegt auch an der aggressiven äußeren Gestaltung, an der sich allerdings kaum etwas ändern lassen wird, denn es handelt sich um Arbeitsmaschinen, bei denen auf Partnerschutz und Unfallsicherheit auf der Straße nur wenig Rücksicht genommen werden kann. Welchen Entwicklungsstand diese Maschinen im Sinne der Sicherheit beim Arbeitseinsatz haben, wird hier nicht behandelt.

Das **Bild A14-1** zeigt einen Auszug aus der Amtlichen Unfallstatistik in Deutschland [1]. Im Jahr 2005 ereigneten sich 238.331 Unfälle mit Personenschaden. Bei nur 1.066 Unfällen waren landwirtschaftliche Zugmaschinen die Hauptverursacher von Unfällen mit zwei Beteiligten. Die meisten Unfälle ereigneten sich durch Kollisionen mit Pkw (559), danach folgten Kollisionen mit Motorrädern (201).

3 Beteiligte an Straßenverkehrsunfällen 2005
3.1 Alleinunfälle und Unfälle mit zwei Beteiligten nach Ortslage
3.1.1 Nach Unfallverursacher und Unfallgegner

Der zweite Beteiligte war ein(e)	Der erste Beteiligte (Hauptverursacher) war ein(e)													Unfälle insgesamt
	Mofa, Moped	Motorrad	Personenkraftwagen	Kraftomnibus Obus	Liefer- und Lastkraftw.	Sattelschlepper	Landwirt. Zugmaschine	andere Zugmaschine	Lkw mit Spezialaufbau	Fahrrad	anderes Fahrzeug	Fußgänger	sonstige Person	
Innerhalb und außerhalb von Ortschaften														
Alleinunfälle	3 209	8 376	37 208	397	1 967	596	217	36	74	11 628	526	·	1	64 235
Unfälle zwischen zwei														
Beteiligten insgesamt	5 293	7 353	168 026	1 501	14 375	2 458	1 066	105	347	23 526	3 014	10 565	702	238 331
Mofa, Moped	175	115	6 949	47	499	60	50	2	10	258	142	170	40	8 517
Motorrad	127	530	13 378	92	891	100	201	12	20	538	289	334	98	16 610
Personenkraftwagen	3 863	5 286	86 108	553	7 624	1 517	559	51	170	13 142	1 152	7 408	102	127 535
Kraftomnibus, Obus	40	69	1 746	33	156	22	12	1	7	276	55	428	26	2 871
Liefer-,Lastkraftwagen	255	385	5 257	56	937	240	46	9	28	697	91	358	8	8 367
Sattelschlepper	31	61	1 350	11	304	157	5	3	8	64	21	29	3	2 047
Landw. Zugmaschine	22	98	417	6	39	6	10	1	2	47	11	10	2	671
andere Zugmaschine	4	3	63	·	14	1	1	4	1	5	1	1	1	99
Lkw mit Spezialaufbau	6	10	195	2	28	9	1	·	7	14	1	4	·	277
Fahrrad	388	397	34 404	227	2 474	240	100	14	53	5 525	682	1 443	415	46 362
anderes Fahrzeug	61	92	1 585	19	150	29	18	1	6	300	58	380	6	2 705
Fußgänger	312	286	16 297	420	1 225	71	56	7	34	2 617	495	·	1	21 821
sonstige Person	9	21	277	35	34	6	7	·	1	43	16	·	·	449

Bild A14-1 Straßenverkehrsunfälle mit Personenschaden in Deutschland im Jahr 2005

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_14

2 Allgemeine Bemerkungen zur Technik von lof-Fahrzeugen

Im Begleitheft zur Agritechnika 2003 wurden folgenden Tendenzen der Entwicklung der Landtechnik aufgezeigt:

2.1 Allgemeine Tendenzen

In Westeuropa hat sich das Marktvolumen für Traktoren in den zurückliegenden Jahren pro Jahr in der Größenordnung von 10 % auf 150.000 Einheiten pro Jahr reduziert. In Deutschland blieben die Verkaufszahlen aufgrund der Marktentwicklung in Ostdeutschland auf dem Niveau von 30.000 Einheiten vergleichsweise stabil, es zeichnet sich jedoch für dieses Jahr ein Einbruch im Bereich von 15 % ab. Trotz des sehr kleinen Marktsegmentes für Großtraktoren von etwa 2.000 Einheiten/Jahr in Westeuropa wurden Traktorenmodelle von verschiedenen europäischen Herstellern neu entwickelt, die diesen Leistungsbereich abdecken. Die weit verbreitete Gliederung der europäischen Produktion in drei „Traktoren-Familien“ ist vielfach einer viergliedrigen Teilung gewichen, was auch bei weitgehender Verwendung gleicher Teile erheblicher finanzieller Anstrengungen bedarf. Der Markt verlangt in kleinen Stückzahlen spezialisierte Maschinen, und die Hersteller haben versucht, ihre Produktionsmöglichkeiten an die veränderte Situation anzupassen. Die Konzentration in der Traktorenindustrie nimmt weltweit zu.

Neben verlustarmen, leistungsstarken Hydrauliksystemen, deren Fördervolumen und Förderdruck an den Bedarf angepasst wird, sind die Teil- und Volllastschaltgetriebe in der mittleren und oberen Leistungsklasse wesentliche, in die Serienproduktion eingeflossene, innovative Elemente der Traktorentechnologie. An die Bedürfnisse des Landwirtes angepasste elektronische Ausrüstungen zur Erleichterung der Bedienung und Fahrerinformation sind weit verbreitet.

2.2 Traktorenkonzepte

In den zurückliegenden Jahren wurde versucht, die charakteristischen Eigenschaften des Systemtraktors auf den Traktor in Standardbauweise zu übertragen. Dazu gehören die Einrichtung des Frontanbauraums in Verbindung mit einer großzügig bereiften Vorderachse, die Verbesserung der Sicht auf den Frontanbauraum, eine größere Vorderachsbelastung und ein höherer Fahrkomfort. Bis auf den dritten Anbauraum hinter dem Fahrerplatz wurden nahezu alle Impulse aufgegriffen. Verschiedene, meist kleinere Anbieter, versuchen vor allem in der mittleren Leistungsklasse, wo die Anforderungen an die Vielseitigkeit des Traktors am größten sind, vom Standardtraktor abweichende Konzepte am Markt zu platzieren. Große Zugtraktoren mit Knicklenkung und einfacher Ausstattung haben in der Großflächenlandwirtschaft Ostdeutschlands ihre Bedeutung behalten. Ein Rahmen, der sich entweder von der Hinterachse bis zur Vorderachse oder nur über den Motorenbereich erstreckt, hat wieder den Einzug in den Traktorenbau gefunden. Er erlaubt den Zugriff auf das weite Angebot von Nutzfahrzeugmotoren.

Der Trend zu höheren Einspritzdrücken, auch in Verbindung mit kostengünstigen Verteilereinspritzpumpen, setzt sich bei Dieselmotoren für Traktoren fort. Die Erfüllung der Abgasvorschriften und die Senkung des Verbrauchs sind dabei die Vorgaben, zu deren Einhaltung auch Turbolader und Ladeluftkühler gerne genutzt werden. Eine kompakte Bauform vor allem der Nebenaggregate ist Voraussetzung für eine akzeptable Sicht nach vorn, zumal der Aufwand zur Luftfilterung und Abgasgeräuschdämpfung zugenommen hat. Die Verlagerung der Abgasanlage aus dem Sichtbereich entweder durch die Abgasführung nach unten oder vor allem in den

oberen Leistungsklassen seitlich an der Kabine vorbei findet zunehmend Verbreitung. Der Vorteil des kompakten Volumens eines Turboladermotors geht zu großen Teilen aufgrund der Vergrößerung der Nebenaggregate wieder verloren.

Auch wenn noch vor einigen Jahren Drehmomentanstiege von 15 bis 20 % als sehr gut galten, so sind heute bei neuen Motoren Drehmomentanstiege in der Größenordnung von 25 % weit verbreitet, und dies bei Drehzahlabfällen von 30 bis 40 %. Dies ist dann häufig mit einer Konstant-Leistungscharakteristik in einem Drehzahlbereich von mehr als 20 % verbunden. Die für Zugarbeiten folglich vertretbare gröbere Abstufung des Getriebes findet mit Rücksicht auf die an die Motordrehzahl gebundene Zapfwellendrehzahl keinen Anklang.

Sollten sich stufenlose Fahrgetriebe mit den unübersehbaren Vorteilen bei Pflegearbeiten bei Traktoren in der mittleren Leistungsklasse durchsetzen, so wird der hohe Drehmomentanstieg sicherlich zu Gunsten der bei gleichem Motor dann höheren Leistung aufgegeben werden.

Innerhalb weniger Jahre haben nahezu alle für den deutschen Markt bedeutenden Hersteller ein teillast- oder volllastschaltbares Getriebe im Angebot. Dabei werden schon 4-Zylinder-Modelle serienmäßig mit 4-stufigem-Lastschaltgetriebe angeboten. Gerade beim kostenintensiven Getriebe versuchen die Hersteller ihr Angebot flexibel zu gestalten, um auch hier den weit gefächerten Wünschen der Landwirte weltweit entsprechen zu können. Wendeschaltungen, die die Produktivität des Traktors bei Frontladerarbeiten und am Vorgewende deutlich erhöhen, setzen sich zunehmend durch. Die damit meist verbundene feinere Abstufung der Rückwärtsgänge verbessert auch die Eignung des Traktors für den Rückfahrbetrieb. Durch die elektrische Ansteuerbarkeit der Lastschaltgruppen konzentriert sich die Bedienung des Schaltgetriebes auf einen Hebel.

Nach wie vor sind Traktoren niederer Leistungsklassen und einfacher Bauart interessant und auf dem Markt.

Die elektrohydraulische Schaltung der Zapfwellenkupplung mit Drehzahlsensoren bietet die Voraussetzung für einen lastabhängig gesteuerten Kupplungsvorgang. Dieser ist leicht unter Einbeziehung von Sicherheitsaspekten auch automatisierbar. Dieser Vorteil wird auch verstärkt bei der elektrohydraulischen Schaltung von Allradantrieb und Differentialsperre genutzt.

Bei der Gestaltung der Kabine spielt neben den ergonomischen Anforderungen und klimatischen Bedingungen der Lärmschutz eine entscheidende Rolle. Leicht gewölbte Scheiben und dicht schließende Rahmentüren sowie eine Minimierung der mechanischen Betätigungselemente ermöglichen Geräuschwerte, die dem Automobilbau ebenbürtig sind. Weichere Lagerelemente bis hin zur Teilfederung mit Auswirkung auf die Schwingungsbelastung werden durch den weitgehenden Wegfall mechanischer Betätigungen möglich und wurden teilweise auch eingeführt. Die Bedienteile konzentrieren sich ergonomisch gut an der rechten Fahrerseite und werden für die Hydraulikventil-Betätigung häufig in einem Griff zusammengefasst (Kreuzhebelschaltung). Zur Fahrerinformation setzen sich übersichtliche Anzeigen mit integriertem Bordrechner durch.

Die Bemühungen zur Senkung der Verluste in Hydrauliksystemen führten bei nahezu allen neuen Modellen der oberen Leistungsklasse zu druck- und volumenstromgeregelten Systemen (Load-Sensing-Systems). Der Antrieb der Hydraulikpumpe wird verlustarm meist in Verbindung mit neuen Getrieben am Fahrzeugheck angeordnet. Auf der Basis von Rapsöl erzeugte, biologisch leicht abbaubare Öle sind jetzt auch für Hydraulikanlagen geeignet, die mit dem Getriebe einen gemeinsamen Ölkreislauf haben.

Beim Anbau schwerer Geräte vor allem zur Bodenbearbeitung behält der Heckkraftheber mit Hubkräften, die oft durch die Tragfähigkeit der Hinterachsbereifung begrenzt sind, seine Bedeutung. Gleichzeitig findet auch der Frontkraftheber immer stärkere Verbreitung. Dieser ist mittlerweile ein integriertes Bauteil, er erlaubt neben dem Frontgeräteanbau auch eine flexible Ballastierung der im Leistungsgewicht wieder günstiger gewordenen Traktorenmodelle. Die Regelung von Front- und Heckkraftheber mit elektronischen Systemen erleichtert die Bedienung vor allem beim Geräteanbau und wird auch erfolgreich zur Schwingungsdämpfung der angebauten Geräte genutzt. Diese Doppelnutzung elektronischer Hardware-Komponenten ist beispielhaft für weitere Bereiche der Elektronikanwendung am Traktor, wie sie auch bei der Automatisierung von Schaltvorgängen Anwendung findet.

Mit dem Ziel, mit bodenschonenden Fahrwerken auch hohe Zugkräfte zu übertragen und gleichzeitig den schnellen Straßentransport mit 40 km/h zu ermöglichen, wurden neue großvolumige Antriebsreifen entwickelt. Sie erlauben bei niedrigem Luftdruck noch diese hohen Fahrgeschwindigkeiten und Achslasten. Dem Zielkonflikt des angestrebten niedrigen Luftdruckes auf dem Acker und des höheren Luftdruckes bei der Transportfahrt kann konsequent nur durch eine automatische Anpassung des Luftdruckes im Reifen entsprochen werden, was verschiedene Hersteller mit unterschiedlichem Aufwand realisieren.

2.3 Ausblick

Die Vernetzung von bereits bestehenden elektronischen Insellösungen erschließt neue Möglichkeiten zur kostengünstigen Einführung eines Motor-Getriebe-Fahrwerk-Managementsystems. Dieses informiert nicht nur den Fahrer, sondern stellt selbständig unter Berücksichtigung der Vorgaben des Fahrers produktivitätssteigernde und/oder kostensenkende Betriebszustände ein. In der Maschinentechnik ist mit einer weiteren Verbreitung der vorher schon beschriebenen innovativen Lösungen zu rechnen. Dies gilt vor allem für produktivitätssteigernde Lösungen unter Einbeziehung des Fahr- und Bedienungskomforts. Die gesetzlichen Vorgaben zum Umweltschutz und zur Betriebssicherheit werden den Rahmen für die Weiterentwicklung bilden.

3 Rekonstruktionsgrundlagen

Bei den lof-Fahrzeugen bzw. Arbeitsmaschinen gibt es eine schier unübersehbare Vielfalt von Geräten und Herstellern. Das bedeutet, dass für die Unfallrekonstruktion vielfach die Fahrzeuge besichtigt und die Bedienungsanleitungen beigezogen werden müssen. In manchen Fällen sind auch Fahrversuche unumgänglich.

Die Fahrzeugvielfalt macht es auch schwer, allgemein gültige Kennwerte zu erarbeiten. Für die Anfahrbeschleunigung und die Bremsverzögerung wurden in [2] entsprechende Daten ermittelt.

Bei der Anfahrbeschleunigung wurde eine primäre Abhängigkeit vom Leistungsgewicht und eine sekundäre von der Zylinderzahl des Motors festgestellt:

Tabelle A14.1 Beschleunigungsdaten abhängig vom Leistungsgewicht

Leistungsgewicht (kg/PS)	Beschleunigung (m/s²)	2-Zylinder	3-Zylinder
40	1,35	−0,45	−0,25
50	1,15	−0,40	−0,25
60	0,95	−0,30	−0,20
80	0,75	−0,25	−0,15
100	0,60	−0,20	−0,15
150	0,45	−0,15	−0,15
200	0,35	−0,15	−0,10

Bei der Bremsverzögerung war eine starke Abhängigkeit von der Bremsanlage feststellbar. Außerdem handelte es sich um Traktoren, die überwiegend nur an den Hinterrädern Bremsen hatten. Moderne Großtraktoren mit Allradantrieb erreichen Verzögerungen im Bereich von 7 m/s².

Bremsenbauart	Bremsenschwellzeit [s]		Bremsverzögerung [m/s²]	
	beide	li./re.	beide	li./re.
Trommelbr. mech.	0,7 ± 0,4	0,5 ± 0,2	2,6 ± 0,6	2,2 ± 0,7
Trommelbr. hydr.	1,0 ± 0,7	1,0 ± 0,6	3,1 ± 1,9	2,3 ± 0,8
Scheibenbr. hydr. trocken	0,9 ± 0,3	0,7 ± 0,3	3,2 ± 1,8	1,9 ± 0,2
Scheibenbr. hydr. naß	0,6 ± 0,2	0,6 ± 0,2	4,9 ± 2,1	2,2 ± 0,8
Trommelbr. pneum.-hydr. [6,7]	0,4		5,6	
Scheibenbr. pneum.-hydr. [6,7]	0,4		5,4	
Bandbr. [6,7]	0,5		3,5	

[6] Bei diesem Fahrzeug war es nicht möglich die Bremsen einzeln zu betätigen
[7] Bei dieser Bremsenbauart lag jeweils nur ein Fahrzeug vor

Bild A14-2 Bremsverzögerungsdaten für verschiedene Bremsenarten

Nach den gesetzlichen Vorschriften müssen Traktoren mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h eine mittlere Vollverzögerung von 3,5 m/s² erreichen, liegt die zulässigen Höchstgeschwindigkeit über 25 km/h, dann muss eine mittlere Vollverzögerung von 5 m/s² erreicht werden. Traktoren, die eine EG-Betriebserlaubnis haben dürfen bei einer Vollbremsung einen Bremsweg nicht überschreiten, der sich aus der Formel

$$s \le 0{,}15 \cdot v + \frac{v^2}{116} \qquad (v \text{ in km/h}, s \text{ in m})$$

berechnet [3].

Zu bedenken ist auch, dass die Reifen und der aktuelle Luftdruck eine wesentliche Rolle spielen. Je nach Arbeitseinsatz wird mit teilweise erheblichem Luftdruckunterschied gefahren. Manchmal wird zur Traktionsverbesserung auch Wasser in die Reifen gefüllt. Für genaue Berechnungen müssen somit Fahrversuche bei vergleichbaren Bedingungen durchgeführt werden.



Reifentyp	Tragfähigkeit (kg) bei Luftdruck (bar)	
	1,6 bar	1,0 bar
Super 9 16,9 R 38	2.575 kg	1.980 kg
Super 9L 480/70 R 38	2.900 kg	2.230 kg
Super 8 13,6 R 28	1.550 kg	1.190 kg
Super 8L 380/70 R 28	1.750 kg	1.350 kg

Bild A14-3 Reifentragfähigkeit abhängig vom Reifendruck

3.1 Sicherheitsvorschriften

Über landwirtschaftliche Fahrzeuge gibt es verschiedene Unfallverhütungs-Vorschriften, von denen die über Bremsen und Kippsicherheit für den Unfallsachverständigen von Bedeutung sind [4], [5].

3.2 Crash-Tests

Bei der AREC 2003 wurden zwei Crash-Tests gefahren, deren Ergebnisse auf CD erhältlich sind oder bei crashtest-servive.com herunter geladen werden können.

Eine kurze Übersicht zu den zwei Versuchen ist **Bild A14-4** und **Bild A14-5** zu entnehmen.



Bild A14-4 Opel Astra mit einem Versuchsgewicht von 1.004 kg fährt mit 34 km/h gegen den stehenden Traktor



Bild A14-5 Opel Astra mit einem Versuchsgewicht von 1.216 kg fährt mit 44 km/h gegen den stehenden Traktor

Literatur

[1] Verkehrsunfälle 2005, Statistisches Bundesamt, Fachserie 8 Reihe 7
[2] Ermittlung von Beschleunigungs- und Bremsverzögerungswerten bei landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen mittel eines Unfalldatenspeichers. Mörder, M., Diplomarbeit Uni Karlsruhe, 1994
[3] DLG Merkblatt 326
[4] Broschüre Fahrzeuge, BLB Kassel
[5] Unfallverhütungsvorschriften der Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften
[6] AREC 2003. www.arecgroup.info

A15 Überschlagsunfälle

Dr. Heinz Burg, Jürgen Gugler, Dr. Andreas Moser, Dr. Hermann Steffan

1 Einleitung

Als Überschlag (Rollover) wird jede Fahrzeugrotation um die Längs- oder Querachse bezeichnet, bei der ein Rotationswinkel von 90 Grad oder mehr erreicht wird. Die Rotationsbewegung des Fahrzeugs führt insbesondere bei nicht angegurteten Insassen zu einer wesentlichen Relativbewegung der Insassen zum Fahrzeug, was bis zum Herausschleudern (Ejection) der Insassen aus dem Fahrzeug führen kann. Eine Untersuchung der ursprünglichen Insassenpositionen ist vielfach nur dann möglich, wenn die Fahrzeugbewegung rekonstruiert werden kann.

Beim Fahrzeugüberschlag tritt ein sehr komplexer Bewegungsablauf des Fahrzeugs auf, der durch verschiedene Vorbedingungen ausgelöst werden kann. In der Überschlagsbewegung befindet sich das Fahrzeug zeitweise vollständig in der Luft, so dass auch das Spurenbild nach dem Unfallablauf nicht durchgehend ist, und die Zuordnung einzelner Spurenstücke zu Fahrzeugregionen schwierig ist. Daher ist eine genaue Betrachtung der verschiedenen Überschlagstypen notwendig, um den Bewegungsablauf und die Ursachen eines Überschlages besser beurteilen zu können. [1]

2 Allgemein

Bei der Untersuchung von Fahrzeugüberschlägen sind 2 Fahrzeugparameter von Bedeutung der Rollwinkel und die Rollwinkelgeschwindigkeit. Daraus ergeben sich 2 Überschlagskriterien die statische Überschlagsbedingung und die dynamische Überschlagsbedingung. Bei der statischen Überschlagsbedingung ist der Rotationswinkel des Fahrzeugs so groß, dass der Schwerpunkt außerhalb des Radaufstandspunktes liegt und damit die Drehung des Fahrzeugs bis zum Überschlag auch ohne zusätzliche externe Kräfte fortgesetzt wird. Bei der dynamischen Überschlagsbedingung wird um die Längs- oder Querachse eine ausreichend große Winkelgeschwindigkeit aufgebaut, die dann zu einer Rotation bis über die statische Überschlagsbedingung führt. Diese beiden Bedingungen entscheiden ob es zu einem Fahrzeugüberschlag kommt oder nicht. Beide Kriterien können einzeln oder in Kombination in einem Unfallablauf auftreten.

Über die beiden Überschlagskriterien können verschiedene Überschlagstypen unterschieden werden.

3 Überschlagsphasen

Ein Fahrzeugüberschlag kann in vier Phasen aufgeteilt werden:

- Fahrphase (Pre Roll Phase),
- Kritischer Punkt (Point of no return),
- Überschlagsbeginn (First phase of roll),
- Überschlagsphase (Rolling phase).

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_15

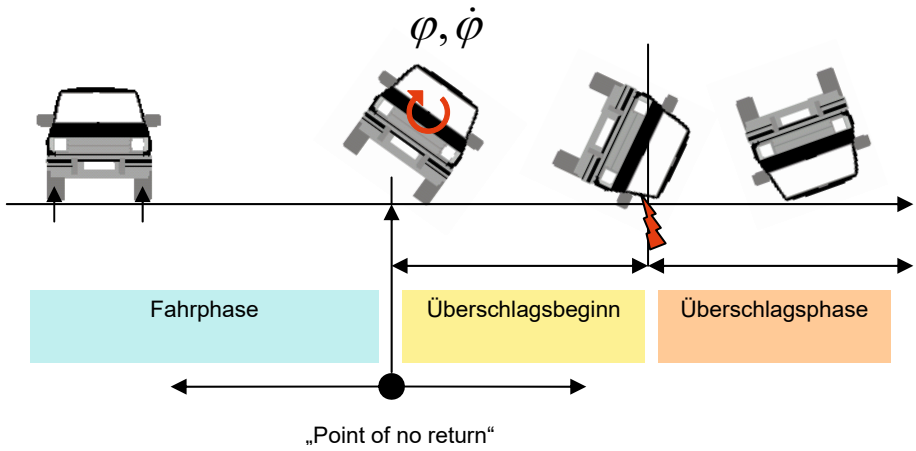


Bild A15-1 Überschlagsphasen

In der Fahrphase bewegt sich das Fahrzeug in einer Fahr- oder Schleuderbewegung, diese Phase bildet meist die Grundlage für einen möglichen Überschlag. Im Zuge der Fahrphase wird der kritische Punkt erreicht, zu diesem Zeitpunkt entscheidet sich ob es zu einem Überschlag des Fahrzeugs kommt. Sind im kritischen Punkt die Überschlagsbedingungen (statisch oder dynamisch) erfüllt ereignet sich ein Fahrzeugüberschlag. Anschließend folgt die Phase des Überschlagsbeginns, die Bewegung des Fahrzeugs steht in direktem Zusammenhang mit den Bedingungen in der kritischen Phase. Anschließend folgt die Überschlagsphase, in dieser Phase können sich mehrere Überschläge ereignen. Die Bewegung des Fahrzeugs hängt von den weiteren Kontakten zwischen Karosserie und Untergrund und dessen Beschaffenheit sowie möglichen Hindernissen ab. In dieser Phase kann sich die Rollgeschwindigkeit je nach Untergrund und Fahrzeuggeometrie stark ändern, die translatorische Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird in Deformation und Rotation umgewandelt. Diese Phasen sind für die Überschlagsbewegung maßgeblich und es ist besonders wichtig, diese Phasen auch im Detail zu untersuchen, da alle Phasen gemeinsam den Überschlag beeinflussen und erst ermöglichen. Auch in der Simulation eines Überschlags muss diesen Phasen Rechnung getragen werden, da sonst die Bewegung nicht nachvollzogen werden kann.

Aus dieser Aufteilung ist auch ersichtlich, dass ein Fahrzeugüberschlag ein sehr komplexer Bewegungsvorgang mit einer entsprechenden Vorgeschichte ist. Dies gestaltet auch die Simulation eines Überschlages schwierig, da alle Phasen berücksichtigt werden müssen und in die Berechnung eingehen. Wird beispielsweise die Fahrphase nicht richtig nachgebildet, dann wird sich auch in der Simulation der Überschlag nicht ergeben. Besonders im kritischen Punkt müssen die fahrdynamischen und umgebungsphysikalischen Bedingungen korrekt nachgebildet werden, um einen Überschlag zu erreichen. Diese Phase ist im Unfallablauf meist relativ kurz und sensibel. Geringe Parameterabweichungen in der Simulation führen hier zu großen Differenzen in den Ergebnissen (in der Regel wird sich kein Überschlag oder sich ein Überschlag mit zu hoher/zu niedriger Rollrate ergeben und die tatsächliche Endlage wird dann nicht erreicht).

Bei der Untersuchung von Fahrzeugüberschlägen sind die Fahrzeuggeometrie (besonders die Schwerpunktshöhe), die Fahrwerkseigenschaften (Feder-Dämpfercharakteristik) und der Reifenkontakt sowie die Untergrundmodellierung von entscheidender Bedeutung und beeinflussen die Überschlagskriterien für das zu untersuchende Fahrzeug.

4 Arten von Überschlägen

Durch eine Aufteilung der verschieden Überschlagstypen in Unterkategorien können typische Bewegungsabläufe und Ursachen isoliert werden. Daraus kann auch eine Vorgehensweise bei der Rekonstruktion und der Untersuchung des Fahrzeugs und der Unfallstelle abgeleitet werden. Die Untersuchung der zeitlichen Verläufe von Rotationswinkel und Winkelgeschwindigkeit um die Längs- oder Querachse des Fahrzeugs läßt eine Unterscheidung verschiedener Überschlagstypen zu.

Zur Kategorisierung eines Überschlages müssen nun die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wodurch wurde der Überschlag ausgelöst?
- Wo am Fahrzeug wurde die auslösende Kraft aufgebracht?
- Was war die ursprüngliche Richtung der Rollbewegung?

4.1 Rollover mit Zusammenstoß

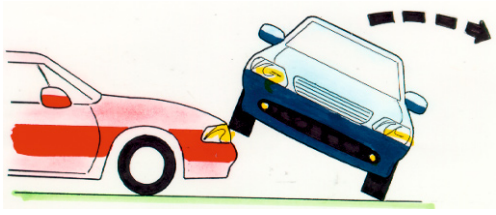


Bild A15-2 Überschlag durch Kollision mit anderem Fahrzeug

Durch den Zusammenstoß mit einem anderen Fahrzeug wird unmittelbar der Überschlag ausgelöst. Durch die seitliche Kollision bei einem Kreuzungsunfall wird beispielsweise der Überschlag des gestoßenen Fahrzeugs ohne weitere Krafteinwirkung ausgelöst, der Stoßimpuls reicht aus, um zum Überschlag zu führen.

Durch die Kollision wird eine sprunghafte Änderung der Winkelgeschwindigkeit (Wankgeschwindigkeit) des Fahrzeugs ausgelöst, die ausreicht, um die Rotation des Fahrzeugs bis zum Überschlag zu führen. Am Fahrzeug sind kollisionsbedingte Beschädigungen sowie Deformationen durch Kontakte mit dem Untergrund im Zuge der Überschlagsbewegung sichtbar.

4.2 Rampen-Rollover

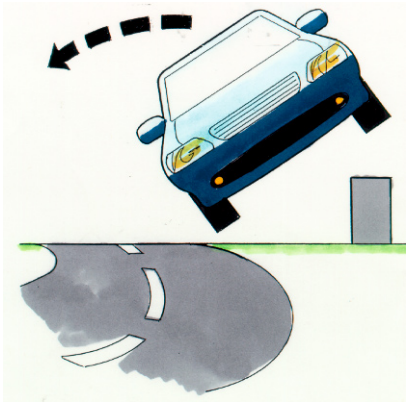


Bild A15-3 Überschlag durch Abweisung an der Leitplanke (Bounce over)

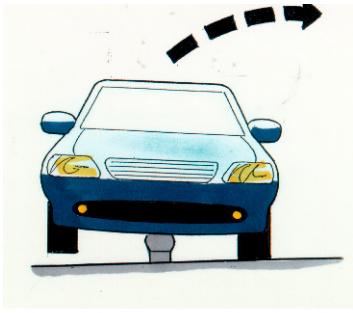


Bild A15-4 Überschlag durch Überqueren einer Leitplanke (Climb over)

Durch das Auffahren des Fahrzeugs auf eine Rampe (z. B.: Leitplanke, Mauer) wird eine Drehung des Fahrzeugs um die Längsachse eingeleitet. Wenn das Fahrzeug von der Rampe so stark abgewiesen wird, dass es auf die Fahrbahn zurückgeworfen wird, spricht man von einem „Bounce-over"-Überschlag, wenn das Fahrzeug die Rampe überquert, spricht man von einem „Climb-over"-Überschlag.

4.3 Verhakter Rollover (Trip over)

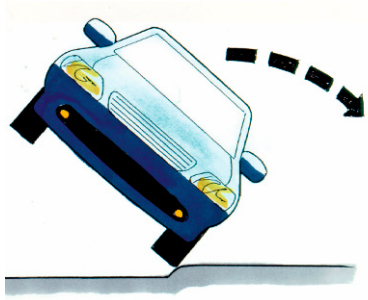


Bild A15-5 Überschlag durch Verhakung (Trip over)

Beim verhakten Überschlag wird die seitliche Bewegung des Fahrzeugs plötzlich durch eine Verhakung mit dem Untergrund gestoppt und eine starke Rotation in das Fahrzeug eingebracht. Die Verhakung tritt meist an den Rädern des Fahrzeugs durch einen Gehsteig, einen Kanaldeckel oder Unebenheiten auf der Fahrbahn auf. Durch die hohen Kontaktkräfte an den Rädern können Deformationen der Radaufhängung oder der Felgen beobachtet werden.

4.4 Fahrzeugdynamischer Rollover

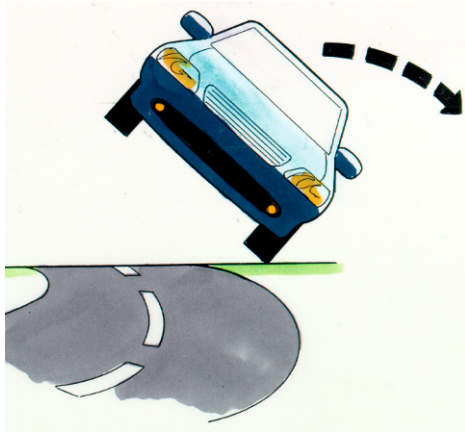


Bild A15-6 Fahrzeugdynamischer Überschlag (Turn over)

Die Überschlagbewegung wird durch den Fahrvorgang ausgelöst, die Fahrbahnreibung reicht aus, um zum Überschlag zu führen. Dieser Überschlagstyp tritt beispielsweise auf, wenn ein Fahrzeug mit einem hohen Schwerpunkt zu schnell um eine Kurve fährt bzw. sich durch ein Lenkmanöver aufschaukelt (z. B. Elchtest) oder wenn ein Fahrzeug die Fahrbahn verlässt und sich die Räder in einer Wiese eingraben, wodurch eine erhöhte Reibung zum Untergrund entsteht (Anm.: Beim Eingraben ist der Übergang zum Type „Trip Over" fließend).

Bei diesem Überschlagstyp wird die Rotationsbewegung um die Längsachse langsam aufgebaut, die auslösenden Kräfte, die in das Fahrzeug eingeleitet werden, sind relativ gering.

4.5 Absturz

Dieser Überschlagtyp tritt auf, wenn das Fahrzeug die Fahrbahn verlässt und sich im Bereich einer Böschung durch die vorherrschenden Neigungsverhältnisse überschlägt.

Die in das Fahrzeug eingebrachte auslösende Kraft ist sehr gering.

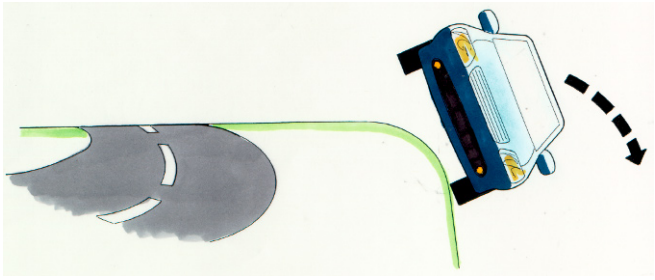


Bild A15-7 Überschlag beim Absturz über eine Böschung (Fall over)

4.6 Überschlag nach vorne

Dieser Überschlagstyp tritt unter Fahrbahnbedingungen nur bei hohem Schwerpunkt (ungünstigen Beladungsverhältnissen) und geringen Radstand auf bzw., wenn der Schwerpunkt sehr nahe an der Vorderachse liegt oder wenn das Fahrzeug die Fahrbahn verlässt und sich die Front in einer Böschung/Wiese eingraben kann.

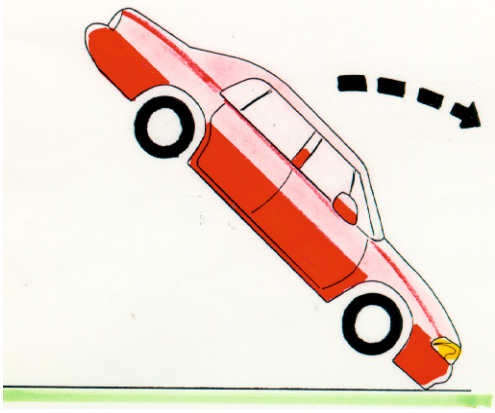


Bild A15-8 Überschlag nach vorne (End over)

5 Experimentelle Test- und Evaluierungsmethoden

5.1 SAE J2114 Dolly test (FMVSS 208)

Bei diesem Test wird das Fahrzeug auf einer schiefen Ebene mit einem Winkel von 23 Grad positioniert, die unteren Räder sind in Kontakt mit einer 10,16 cm (4″) hohen Kante und befinden sich ca. 22,86 cm (9″) über Fahrbahnniveau. Der Schlitten wird auf 50 km/h beschleunigt und anschliessend über eine Wegstrecke von weniger maximal 0,914 m (3 ft) auf 0 km/h verzögert, in dieser Phase muss eine Schlittenverzögerung von 20 g über 40 ms erreicht werden. Der Test wird mit 2-Hybrid-III-Dummys auf den Vordersitzen durchgeführt. Die dabei gemessenen Verletzungskriterien (Head Injury Criterion, Brusteindrückung, Nackenkräfte, -momente, Oberschenkelkräfte) müssen unter ihren zulässigen Grenzwerten liegen.

Durch die aufwändige Testprozedur und die Sensitivität der Überschlagsbewegung (Reibungseinflüsse, Reifenverformungen etc.) ist die Wiederholbarkeit dieses Tests eine große Herausforderung.

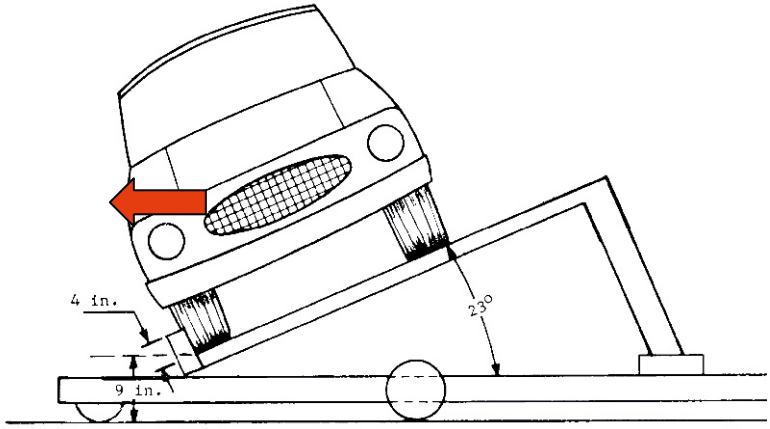


Bild A15-9 FMVSS 208 Dolly test

5.2 FMVSS 216 Roofcrush (Dacheindrückung)

Dieser Test dient der Evaluierung des Überlebensraums im Falle einer Dacheindrückung während des Überschlags. Bei diesem Test wird eine quasi-statische Belastung auf das Fahrzeugdach (vor allem auf die A-Säule) aufgebracht. Der relativ einfache Testaufbau ermöglicht eine gute Reproduzierbarkeit. Es können jedoch keine Aussagen über Fahrzeugdynamik und Insassenbewegung/-belastung getroffen werden. Der Testaufbau sieht vor, dass die Karosserie horizontal fixiert wird und eine meist hydraulische Testvorrichtung eine starre Prüfplatte (762 mm · 1.829 mm) mit einer Neigung von 5° nach vorne und 25° seitlich auf das Dach im Bereich der A-Säule drückt. Der Test gilt als bestanden, wenn die Eindrückung (Prüfplattenverschiebung) nicht mehr als 125 mm unter einer Belastung vom 1,5-fachen der Gewichtskraft der Fahrzeugmasse, die mit einer Geschwindigkeit von 13 mm/s aufgebracht wird, beträgt.

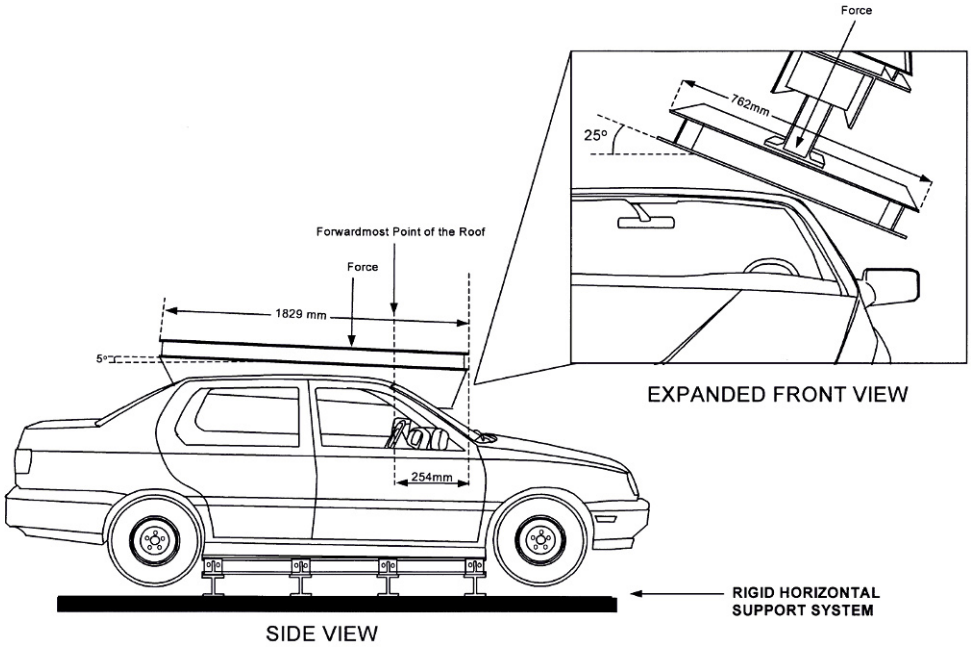


Bild A15-10 FMVSS 216 Dacheindrückungstest

5.3 FMVSS 201 Occupant protection in interior impact (Insassenschutz)

Diese Regulierung befasst sich mit der Evaluierung des Verletzungsrisikos beim Kontakt der Insassen mit dem Innenraum (Instrumententafel, Rückenlehnen, Seitenverkleidung, Sonnenblenden, Armlehnen, Dachverkleidung). Dabei wird ein Prüfkörper (Kopfform) auf die jeweilige Prüfstelle im Freiflug katapultiert und das Kopfverletzungskriterium (HIC) bewertet. Der Test zielt nicht primär auf die Bewertung von Verletzungsrisiken beim Überschlag ab.

Speziell kann es während der Abrollbewegung am Untergrund zu einer Versteifung der Dachstruktur kommen (Kontakt Fahrzeugdach-Untergrund) und die dämpfende Wirkung des sonst verformbaren Dachblechs ausfallen, was zu erhöhtem Verletzungsrisiko führt. Diese Umgebungsbedingungen werden in dieser Testvorschrifte nicht berücksichtigt. Untersuchungen für eine Testvorschrift mit unterstützter Dachstruktur wurden in [8] durchgeführt.

5.4 Inverted Drop Test (Inverser Dachfalltest)

Dieser Test stellt keinen standardisierten Test dar. Ziel des Tests ist es, das Verhalten der Dachstruktur bei dynamischer Krafteinwirkung zu evaluieren. Dabei wird das Fahrzeug verkehrt aufgehängt. Die Randbedingungen (Roll-, Gier-, Nickwinkel, Fallhöhe) werden aus Unfallanalysen bzw. aus Vorsimulationen mit Finite-Elemente-Modellen ermittelt. Der Test wird ohne Dummys durchgeführt. Der Überlebensraum wird durch eine spezielle Messvorrichtung evaluiert [9].

Der Test hat im Vergleich zum FMVSS-208-Test den Vorteil der Einfachheit und besseren Reproduzierbarkeit. Es können aber keine herkömmlichen Verletzungskriterien ermittelt werden.

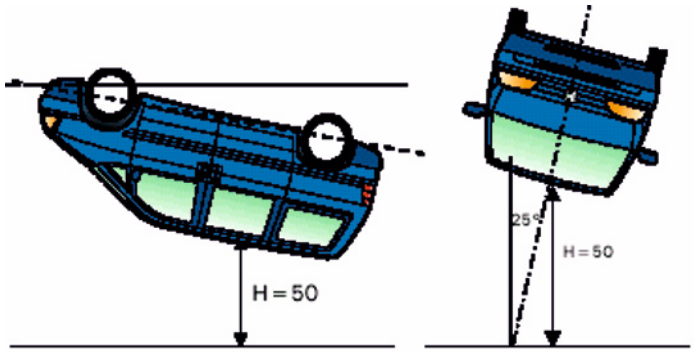


Bild A15-11 Schema des invertierten Dachfalltests

5.5 ADAC-Korkenzieher-(Corkscrew-)Test



Der „ADAC Corkscrew“ wurde als Konsumententest entwickelt. Dabei wird das Fahrzeug durch eine spezielle verdrehte Rampe („Korkenzieher“) beim Test in eine Rollbewegung versetzt, geht meist in eine kurze Freiflugphase über und schlägt dann am Dach auf. Der Test wird mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h und Dummys im Fahrzeuginneren durchgeführt.

Bild A15-12 Korkenzieher-Rampe für den ADAC-Test

5.6 Alternative Testprozeduren

Neben den oben erwähnten und am häufigsten vorkommenden Tests bei der Evaluierung des Fahrzeugüberschlags sollen noch alternative Tests erwähnt werden:



Bild A15-13 Sandbett-Test

Realtests (Full scale tests) – Bei diesen Tests wird eine Unfallkonfiguration annähernd dem realen Unfallgeschehen nachgestellt. Es werden notwendige Böschungen, Sandbette, Gräben u. Ä. aufgebaut und das Fahrzeug durch unterschiedliche Antriebsvarianten in diese Umgebung gefahren, wo es dann zum Überschlag kommt. Diese Tests dienen vorwiegend dem experimentellen Studium der unterschiedlichen Rollover-Typen.

Missbrauchstests (Miss-use-test) – Diese Tests dienen vorwiegend der Evaluierung der Rollover-Sensorik und -algorithmen. Dabei werden unterschiedliche Fahrmanöver zusammengestellt und die Erkennung bzw. Fehlerkennung eines Rollovereignisses durch die Sensorik bewertet und optimiert (z. B. Geländefahrten, …).

Verzögerungsschlitten (Low-g sled) – Zur Entwicklung von Rückhaltesystemen und der zugehörigen Sensorik kann für laterale Rollover-Konfigurationen eine spezielle Versuchsumgebung verwendet werden. Ein Schlitten trägt das Fahrzeug und wird analog zum seitlichen Eingraben definiert verzögert. Diese Testumgebung ist gut reproduzierbar und kann auch zur Optimierung der Sensorik im Bereich der Rollgrenze eingesetzt werden. [11]

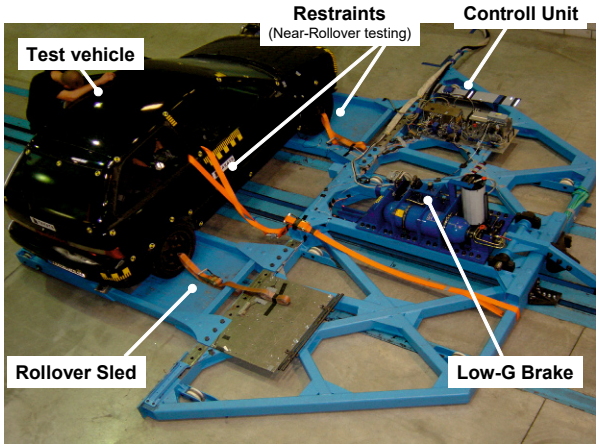


Bild A15-14 Verzögerungsschlitten (Quelle: DSD + Takata Petri)

Bordstein-Test (Curb trip test) – Für die Untersuchung der Rollover-Kategorie Trip-over werden zum Teil spezielle Schlittenanlagen mit Bordsteindummy eingesetzt. Dabei kann der Schlitten analog zum FMVSS-208-Test sehr rasch verzögert werden oder der Schlitten wird durch ein Katapulthohen Beschleunigungen ausgesetzt. Durch den Kontakt mit dem Bordstein wird dann die Rollbewegung eingeleitet. Es gibt auch Tests, bei denen das Fahrzeug vom Schlitten seitlich abgeworfen wird und dann auf einer speziellen Gleitfläche gegen den Bordstein prallt.

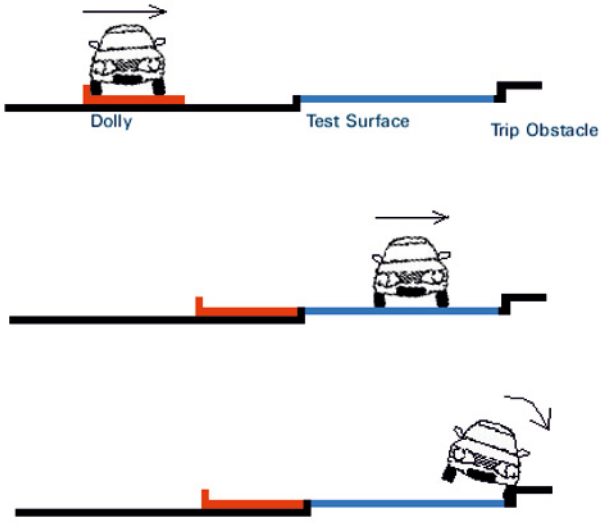


Bild A15-15 Testschema für Bordstein-Test

5.7 Schlussbemerkung

Beim Rollover-Unfall treten meist geringe Beschleunigungen im Vergleich zu Front-, Seiten- und Heckanprall auf. Die Dummys, die bei den ebenen Crash-Tests zum Einsatz kommen, geben bei diesen annähernd biofideles Verhalten wieder. Wie Untersuchungen gezeigt haben [12], weicht das Verhalten von Front- und Seitendummys beim Überschlag weit von den menschlichen Bewegungen ab (aktiver Muskeleinsatz, bestimmte Bewegungstendenzen bei Rollbewegung, …). Daher wird zunehmend die Untersuchung von Insassenbewegungen mittels Simulation und entsprechenden Menschmodellen und nicht mehr durch experimentelle Tests durchgeführt [13].

Literatur

[1] NASS Team Leader Workshop, Orlando FL, June 1998

[2] Asic, S.: Field Conditions Definitions – NASS-CDS Classification, Presentation, Delphi, 2002, European Community – R&TD-Project – 5th Framework-Programme „Growth“ – Project „Rollover“ G3RD-CT-2002-00802

[3] Sferco, R., Fay, P.: Vehicle Rollover in Europe – A Real World Overview, Presentation, Ford Motor Company, 2003, European Community – R&TD-Project – 5th Framework-Programme „Growth“ – Project „Rollover“ G3RD-CT-2002-00802

[4] Sferco, R., Fay, P., Asic, S.: Comparison of US and European Rollover Data, Report Work package 1 – Task 1.1, Ford Motor Company and Delphi, 2003, European Community – R&TD-Project – 5th Framework-Programme „Growth“ – Project „Rollover“ G3RD-CT-2002-00802

[5] Madana Gopal, Ken Baron, Minoo Shah: Simulation and Testing of a Suite of Field Relevant Rollovers, SAE 2004-01-0335, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA.

[6] Work package 2 – Report Task 2.4 Summary of Rollover scenarios (Classification & Description), Gerhard Lutter (Delphi), Jürgen Gugler (TUG), European Community – R&TD-Project – 5th Framework-Programme „Growth“ – Project „Rollover“ G3RD-CT-2002-008022003

[7] Dipl.-Ing. F. A. Berg, Dipl.-Ing. M. Egelhaaf, Dipl.-Ing. M. Krehl, Dipl.-Ing. W. Niewöhner: Rollover – Crashtests und Unfallanalysen, Dekra Automobil GmbH, Unfallforschung & Crash Test Center, Stuttgart, AREC 2004

[8] Schwinger, F.: Component Tests, work package 3 – Report Task 3,1, European Community – R&TD-Project – 5th Framework-Programme „Growth“ – Project „Rollover“ G3RD-CT-2002-00802, 2005

[10] Eichberger, A. (2005). Hardware demonstrator ROLLAND, work package 6, European Community – R&TD-Project – 5th Framework-Programme „Growth“ – Project „Rollover“ G3RD-CT-2002-00802

[11] J. Gugler, F. Feist, H. Steffan, E. Mayrhofer, A. Moser: Experimental Rollover Soil Trip Testing with a Low-G Sled, Proceedings iCrash conference, Athen 2006

[12] Adamec, J., Praxl, N.: Task 2.3: Reconstruction of occupant movement during first phase of roll using a motion base, work package 2, European Community – R&TD-Project – 5th Framework-Programme „Growth“ – Project „Rollover“ G3RD-CT-2002-00802, 2004

[13] F. Feist, J. Gugler, E. Mayrhofer, H. Steffan: Virtual Demonstration of Improvements to the Standard Restraint System with a Semi-Active Human-Body-Model for Rollover and Side-Impact, Proceedings of Ircobi conference, Madrid 2006

A16 Schienenfahrzeuge/Straßenbahnen

Dr. Heinz Burg, Jörg Arnold

1 Geschichte der Straßenbahnen

Die ersten Straßenbahnen wurden von Pferden gezogen. Sie waren das Mittel, um mit dem mit der Industrialisierung gestiegenen Personentransportbedarf fertig zu werden. Der geringe Rollwiderstand der Räder auf den Schienen erleichterte den Transport ganz erheblich. Berlin bekam 1865 eine Pferdebahn. Probleme entstanden in vielen Städten mit dem Pferdekot. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurden die Pferdeantriebe durch Elektroantriebe ersetzt. Etwa um 1925 wurde die Netzspannung für Straßenbahnen mit 550 bis 600 V festgelegt, für Überlandbahnen mit 750 bis 1.500 V. Die Spurweiten sind meist 1.000 mm (Meterspur) oder 1.435 mm (Regelspur).

2 Straßenbahntypen

Nahezu jede Stadt hat ihre eigenen Straßenbahntypen. Stellvertretend werden ein moderner Straßenbahnzug der Stadt Darmstadt und einer der Stadt Zürich vorgestellt.



Bild A16-1 Straßenbahnzug der Stadt Darmstadt



Bild A16-2 Straßenbahnzug der Stadt Zürich

2.1 Fahrerhaus

Beispielhaft wird der Straßenbahnzug der Stadt Darmstadt besprochen. Im Fahrerhaus befindet sich auf der linken Seite ein Hebel, der verschiedene Funktionen hat. Zum einen muss der Fahrer in geringen zeitlichen Abständen auf den Knopf drücken, um damit zu bestätigen, dass er sich in gutem physischem und psychischem Zustand befindet (so genannte „Totmann"-Schaltung). Tut er das nicht, wird automatisch eine Notbremsung eingeleitet.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_16

Zum anderen ist dieser Hebel der Fahrhebel. Schiebt der Fahrer den Hebel nach vorne, dann beschleunigt die Straßenbahn. In der Mittelstellung rollt das Fahrzeug. Wird der Hebel nach hinten geschoben, dann wirkt zunächst die generatorische Bremse. Bei weiterem Schieben nach hinten und Überwindung eines Widerstandes wird eine Gefahrenbremsung eingeleitet (automatischer Ablauf).



Bild A16-3 Fahrhebel



Bild A16-4 Übliche Armstellung des Fahrers auf dem Fahrhebel

Die drei Teilbilder unten zeigen die Instrumente am Armaturenbrett direkt vor dem Fahrer.



Bild A16-5 Fahrerarbeitsplatz, Störungsanzeigen und Heizung



Bild A16-6 Fahrdaten



Bild A16-7 Beleuchtung und Türen

Rechts seitlich vom Fahrer befindet sich ein Kontrollgerät, das Störungen anzeigt, beispielsweise auch, wenn die Datenkarte der Fahrdatenerfassung nicht eingeschoben ist (Bild A16-8). In einem solchen Fall leuchtet eine gelbe Lampe im Armaturenbrett auf (Bild A16-9), die dem Fahrer die Störung mitteilt. Beim Aufleuchten der Störungslampe kann die Straßenbahn nicht in Bewegung gesetzt werden.



Bild A16-8 Kontrollgerät



Bild A16-9 Störungslampe an

Andere Straßenbahntypen haben eine andere Anordnung der einzelnen Hebel und Schalter. Man muss sich bei einer Begutachtung im Detail darüber informieren. Grundsätzlich sind die Funktionen ähnlich.

Das Fahrerhaus ist gegenüber dem Fahrgastraum durch solide Wände und eine Tür zum Fahrerschutz abgetrennt. Die Sicht nach vorne und zur Seite ist sehr gut. Das Bild unten zeigt die Sicht vom Fahrersitz aus nach vorne und nach links.



Bild A16-10 Sicht aus dem Fahrerhaus der Straßenbahn

2.2 Bremsanlagen

Straßenbahnen haben in aller Regel drei voneinander unabhängige Bremsanlagen. Die Betriebsbremse oder Hauptbremse ist eine generatorische Bremse, die verschleissfrei arbeitet, indem mit den Antriebsmotoren (Elektromotoren) abgebremst wird.

Die 1. Zusatzbremse ist eine Druckluftbremse, die bei modernen Wagen als Scheibenbremsen ausgeführt sind, bei älteren Straßenbahnen als Grauguss-Bremsen, die auf die Laufflächen der Räder wirken. Diese Bremse wird als zusätzliche Bremse und als Feststellbremse verwendet.

Die 2. Zusatzbremse ist die Schienenbremse (Magnetbremse). Diese wird als Notbremse verwendet. Bei einer Notbremsung wird gleichzeitig Sand auf die Schienen gestreut. Dazu haben die Straßenbahnen Sandbehälter an Bord.

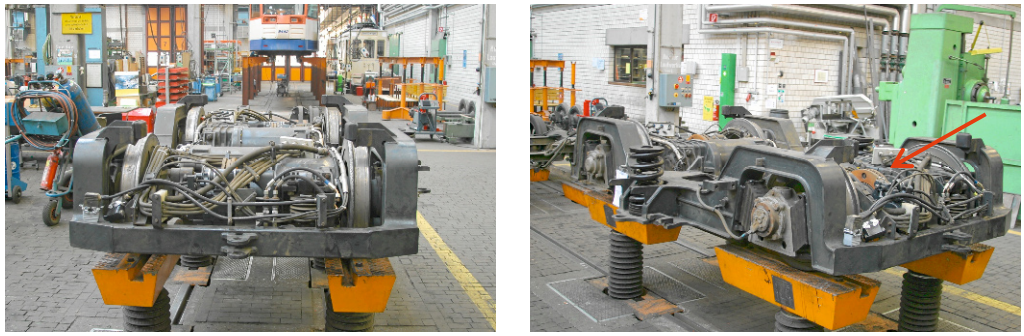


Bild A16-11 Straßenbahn-Fahrgestell, Pfeil zeigt auf die in Achsmitte angebrachte Scheibenbremse.



Bild A16-12 Magnetschienenbremse (siehe Pfeil)

Die beiden folgenden Diagramme zeigen Aufschriebe der Fahrdatenerfassung. Links ist eine Gefahrenbremsung bei nassen Schienen gezeigt, rechts eine bei trockenen Schienen.

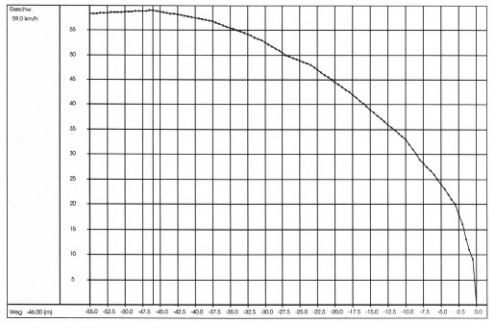


Bild A16-13 Bremsverzögerung bei einer Notbremsung auf nassen Schienen. Mittlere Bremsverzögerung 2,9 m/s^2

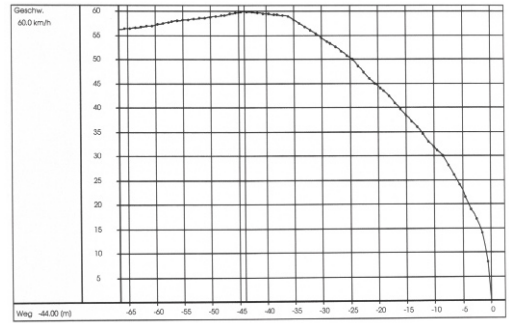


Bild A16-14 Bremsverzögerung bei einer Notbremsung auf trockenen Schienen. Mittlere Bremsverzögerung 3,2 m/s^2

2.3 Fahrdatenerfassung

Bei den Straßenbahnen der Stadt Darmstadt wird ein System zur Fahrdatenerfassung der Firma DAREC verwendet. Im Schaltschrank der Straßenbahnzüge ist ein Modul eingebaut, das die Sensoren und die Datentechnik zur Beschreibung einer Ringspeicherkarte enthält.

Die Ringspeicherkarte kann nur vom Werkstattpersonal eingelegt werden und bleibt bis zum Batteriewechsel im Wagen (etwa alle drei Jahre) es sei denn, dass ein Unfall passiert.

Der Schaltschrank kann nur vom Werkstattpersonal oder vom Leitstellenpersonal geöffnet werden. Dazu sind zwei Schlüssel erforderlich, mit dem einen Schlüssel kann die obere Klappe des Schaltschranks geöffnet werden, mit dem anderen auch die untere Klappe, hinter der sich die Fahrdatenerfassung befindet. Der Fahrer hat keinen Schlüssel zum Schaltschrank.

Nach der Entnahme der Datenkarte geht der Entnehmende umgehend zu dem Verantwortlichen für die Datenanalyse. Bei einem schweren Unfall wird er von einem Polizeibeamten begleitet, der einen Datenausdruck gleich mitnimmt.

Die Identifizierung der Datenkarte erfolgt über die Gerätenummer und das Datum. Die Gerätenummer wird automatisch in die Datenkarte geschrieben. Die Gerätenummer ist die Nummer des Straßenbahnwagens.



Bild A16-15 Öffnung der unteren Klappe und Griff zur Ringspeicherkarte

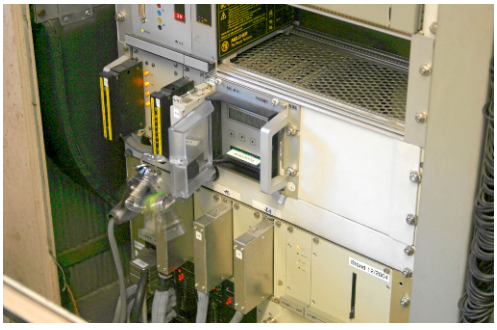


Bild A16-16 Schaltschrank Datenerfassung

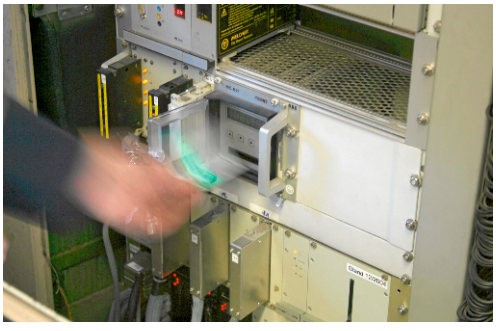


Bild A16-17 Entnahme der Ringspeicherkarte

In der Stadt Zürich sind in Fahrzeugen, welche ausschliesslich für Personentransporte im städtischen Linienverkehr verwendet werden, anstelle von Fahrtschreibern so genannte Restwegschreiber eingebaut.

In den älteren Straßenbahnen (Trams) sind die altbekannten elektromechanischen Restwegschreiber (Hasler-Fahrtschreiber) im Einsatz (**Bild A16-18**). Diese zeichnen den Geschwindigkeitsverlauf im Sekundentakt endlos auf einer – mit einer nicht trocknenden Farbschicht belegten – Scheibe auf (**Bild A16-19**), so dass immer die letzten ca. 600 m Fahrdaten verfügbar sind.

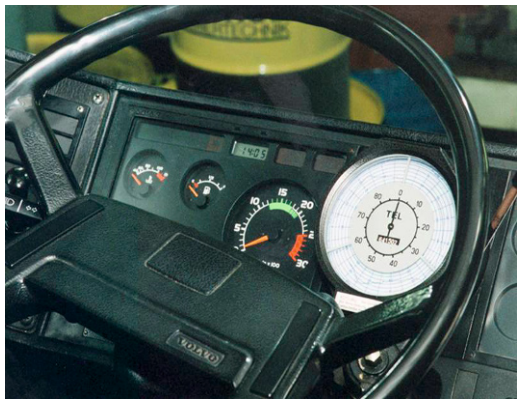


Bild A16-18 Elektromechanischer Restwegschreiber

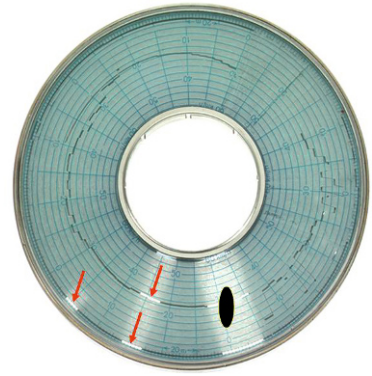


Bild A16-19 Scheibe im Restwegschreiber

Auf **Bild A16-19** sind die wegabhängigen Geschwindigkeitsaufzeichnungen (roter Pfeil am inneren Rand der Scheibe) und Zusatzregistrierungen wie z. B. Magnetschienenbremse oder Rasselglocke (rote Pfeile am äußeren Rand der Scheibe) ersichtlich. Im Bereich der schwarzen Markierung werden die ältesten Aufzeichnungen gelöscht, bevor die aktuellsten Aufzeichnungen in die nicht trocknende Farbschicht geschrieben werden.

In den neueren Trams 2000 und den neuen Auto- und Trolleybussen sind moderne elektronische Restwegaufzeichungsgeräte, „RAG-2000“ und „RAG 2000+“ der Firma W. Moser-Baer AG eingebaut.

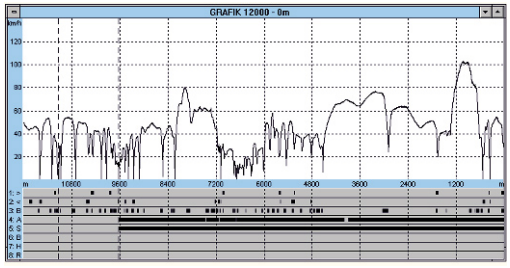


Bild A16-20 Übersichts-Grafik der wegabhängigen Geschwindigkeits- und Statusaufzeichnungen

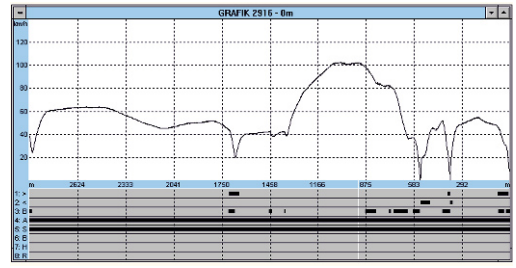


Bild A16-21 Detail-Grafik der wegabhängigen Geschwindigkeits- und Statusaufzeichnungen

TABELLE 2916 - 0m

Meter	Zeit	km/h	><BASBHR	0 20 40 60 80 100 120 140
30.80	20:19:47.3	30	>..AS...	######
29.70	20:19:47.4	30	>..AS...	######
28.60	20:19:47.5	30	>..AS...	######
27.51	20:19:47.7	30	>..AS...	######
26.41	20:19:47.8	30	>.BAS...	######
25.30	20:19:47.9	29	>.BAS...	#####
24.20	20:19:48.1	29	>.BAS...	#####
23.10	20:19:48.2	28	>.BAS...	#####
22.01	20:19:48.3	27	>.BAS...	#####
20.91	20:19:48.5	26	>.BAS...	#####
19.80	20:19:48.7	25	>.BAS...	#####
18.70	20:19:48.8	23	>.BAS...	####
17.60	20:19:49.0	22	>.BAS...	####
16.50	20:19:49.2	20	>.BAS...	####
15.39	20:19:49.4	18	>.BAS...	###
14.30	20:19:49.7	17	>.BAS...	###
13.19	20:19:49.9	15	>.BAS...	###
12.10	20:19:50.2	13	>.BAS...	##
11.00	20:19:50.6	11	>.BAS...	##
9.89	20:19:51.0	11	..BAS...	##
8.80	20:19:51.4	10	..BAS...	##
7.69	20:19:51.8	9	..BAS...	#
6.59	20:19:52.3	9	..BAS...	#
5.50	20:19:52.8	8	..BAS...	#
4.40	20:19:53.4	6	..BAS...	#
3.45	20:19:55.5	0	...AS...	2 sec
3.38	20:19:56.4	0	...AS...	1 sec
3.29	20:19:56.6	0	...AS...	<0.5 sec
2.20	20:19:57.7	4	...AS...	
1.10	20:19:58.3	6	..BAS...	#
0.00	20:19:59.0	5	..BAS...	Mo 13.09.99

Bild A16-22 Tabellenansicht der wegabhängigen Geschwindigkeits- und Statusaufzeichnungen



Bild A16-23 Übersichtsaufnahme Richtung Führerstand



Bild A16-24 Restwegaufzeichnungsgerät

In den neuen Cobra-Trams findet ein modernes Aufzeichnungsgerät der Firma Sécheron vom Typ TEL 1000 Verwendung. Die Fahrzeugdaten, die Fahrdaten und Fehler- respektiv Störungsmeldungen werden im Gerät und auf einer Memory-Card (2 MB) aufgezeichnet.

Neben der Aufzeichnung von Geschwindigkeit, zurückgelegtem Weg und Zeit erfolgt die Registrierung von weiteren bis zu 15 Funktionen während der Fahrt und auch im Stillstand des Fahrzeugs.

Die Aufzeichnungen des „TEL 1000“ erfolgen elektronisch im Gerät und in der Memory-Card. Sie können nicht mehr direkt abgelesen werden, sondern müssen mit einem Computerprogramm ausgewertet werden.

Nach Verkehrsunfällen muss die Memory-Card im Rahmen der Tatbestandaufnahme vor Ort sichergestellt werden. Sie kann vom Personal der Verkehrsbetriebe sehr einfach ausgebaut werden und ist durch den handelnden Polizisten mit den notwendigen Zusatzangaben zur Auswertung (Ort, Datum, Zeit, Tramlinie, Kursnummer, Name des Tramführers und von Unfallbeteiligten) sofort sicherzustellen.





Bild A16-25 Memory-Card zum TEL 1000

Mit der entsprechenden Hard- und Software kann die Auswertung durchgeführt werden. Dabei werden die registrierten Daten auf einem Auswertungs-Computer abgespeichert. Die Memory-Card wird nach dem Auslesen an die Verkehrsbetriebe retourniert.

Neben der Datensicherung können die folgenden Ausdrucke mit sehr wenig Aufwand erstellt werden:

- Übersichts-Protokoll (grafisch),
- Detail-Protokoll (grafisch),
- tabellarische Darstellung der unfallrelevanten Fahrphase.

Die Daten werden während mindestens zwei Jahren ab dem Unfalldatum archiviert.

3 Reaktion bei Notbremsvorgängen

In der umfangreichen Literatur zur Reaktion von Fahrzeuglenkern bei Notbremsvorgängen werden die Mechanismen der optischen Wahrnehmung speziell untersucht. Ein Fahrzeuglenker verarbeitet pro Sekunde ca. drei optische Eindrücke, die er in seinem zentralen Blickfeld scharf sieht. Der Bereich des zentralen Sehens umfasst einen Winkel von nur ca. ±1,5°. Alles außerhalb des zentralen Blickfeldes wird nur wahrgenommen und führt nur bei entsprechender Attraktivität (z. B. Bewegung, starker Kontrast etc.) zu einer Blickzuwendungsaufforderung. Eine Blickzuwendung dauert ca. 0,5 s.

Erst dann wird das Objekt scharf gesehen und kann dann innerhalb von weiteren ca. 0,6 s bis 1 s in seinem Gesamtzusammenhang erkannt und in eine adäquate Reaktion umgesetzt werden (0,6 s = Basisreaktionszeit).

Für die Straßenbahnführer besteht eine besondere Situation im Vergleich zu einem Pkw- oder Lkw-Fahrer. Mit einer Notstoppbremsung (Kontroller-Notbremsung) können mit einer Straßenbahn bei idealen Verhältnissen maximale Verzögerungswerte von ca. 3 m/s^2 erreicht werden.

Bei einem unverhofft einsetzenden Kontroller-Notstopp sind stehende Straßenbahnpassagiere, insbesondere ältere Menschen, welche auf eine solche Situation nicht gefasst sind, stark sturz- und verletzungsgefährdet.

Ob im konkreten Fall eine Gefahr für die Straßenbahninsassen bestanden hat, lässt sich im Nachhinein häufig nicht beurteilen. Wegen dieser Gefährdung der Straßenbahninsassen und wegen dem relativ geringen Bremsvermögen haben Bahnen Vorfahrt gegenüber allen anderen Verkehrsteilnehmern. Der Straßenbahnführer muss vor jeder Bremsung die Gefahrenlage auf der Straße und gleichzeitig die Gefährdung seiner Passagiere einschätzen. Er muss entscheiden, ob ihm der Vorrang genommen wird, oder ob eine latente Gefahrenlage sich noch rechtzeitig klären wird. Eine einfache und klare Reaktionsaufforderung liegt bei ihm meist nicht vor, weshalb bei Straßenbahnen im fahrplanmäßigen Verkehr von einer minimalen Reaktionszeit für den Straßenbahnführer von 2 s ausgegangen werden sollte.

Literatur

[1] Der Straßenbahner. Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). Beka Köln 2001
[2] Wikipedia: Suchbegriffe Bremsen Eisenbahn
[3] Reaktionszeiten bei Notbremsvorgängen, Verlag TÜV Rheinland, 1985, ISBN 3-88585-267-6, Burckhardt, Manfred

A17 Schadenaufklärung

Klaus-Dieter Brösdorf, Klaus Depré, Jörg Göritz

1 Einführung

Nicht jeder Schadenfall, bei dem verschiedene Aspekte für ein manipuliertes Schadenereignis sprechen, ist ein manipulierter Verkehrsunfall. Aber auch nicht jeder Schadenfall, der bei oberflächlicher Betrachtung als realer Schadenfall erscheint, ist auch tatsächlich ein realer Verkehrsunfall.

Die nachfolgende Abhandlung zum Thema Schadenaufklärung wird in den Zusammenhang zu Schadenfällen gestellt, bei denen der Verdacht auf einen Versicherungsbetrug besteht. Ziel der Schadenaufklärung ist es, Grundlagen zu liefern, auf deren Basis weitergehende Entscheidungen getroffen werden können: Regulierung, Ablehnung der Leistung, Aufnahme des Zivilprozesses, Strafanzeige. Damit liegt der Zeitpunkt der Beauftragung meist im vorprozessualen Bereich, und es wird somit ein Parteigutachten erstellt. Dennoch gibt der Inhalt dieser Abhandlung auch wichtige Hinweise für eine sachgerechte Auftragserledigung, soweit eine Beauftragung durch eine Ermittlungsbehörde oder durch eine Bestellung in einem gerichtlichen Verfahren erfolgt. Versicherungsbetrug wird zwar von der Mehrheit der Befragten abgelehnt, aber gleichzeitig ist für die Hälfte der Befragten Versicherungsbetrug nur ein Kavaliersdelikt [1]. Nach derzeitigen Schätzungen belaufen sich die Forderungen aus betrügerischen Schadenfällen allein in Deutschland jährlich auf etwa 4 Milliarden Euro. Hiervon entfallen etwa 1 bis 1,5 Milliarden Euro auf Manipulationen im Kraftfahrzeugbereich. Damit wäre etwa jeder zehnte Verkehrsunfall manipuliert. Hieraus abgeleitet, werden etwa 8 bis 10 % der Versicherungsprämien der Kraftfahrzeug-Versicherer für manipulierte Schadenfälle ausgezahlt [2]. Tatmotiv ist es, einen finanziellen Vorteil zu erzielen, wobei nach dem Grundsatz verfahren wird:

- Mit möglichst **geringem** Risiko und
- mit **minimalem** Einsatz
- innerhalb eines **überschaubaren** Zeitraums
- einen **maximalen** Gewinn zu erzielen.

Dieser Grundsatz bestimmt die Vorgehensweise und das Handeln der beteiligten Personen bei den verschiedenen Begehensformen. Soweit Verkehrsunfälle [3] nur nachgestellt werden, es somit an der Unfreiwilligkeit oder Unvorhersehbarkeit fehlt, ist es durchaus sinnvoll, typische Begriffe wie **Unfallort** oder **Verkehrsunfall** durch neutrale Begriffe, wie **Schadenereignis** oder **Schadenörtlichkeit** zu ersetzen. Der Auftragserteilung, die meist durch einen Versicherer erfolgt, geht eine Prüfung voraus, die zu einem Anfangsverdacht führt, der sich aus Erfahrungen des Sachbearbeiters, dem Einsatz von EDV-Systemen sowie Hinweisen durch Polizei, Zeugen, Anonyme u. a. ergeben kann.

Bislang wurden aus technischer Sicht bei der Untersuchung von Schadenfällen Betrachtungen zur **Kompatibilität** und **Plausibilität** angestellt. Diese Begriffe sind wie folgt definiert.

Die **Kompatibilität** umfasst die gegenseitige Zuordnung der Beschädigungen und Spurzeichnungen (u. a. Spuren markanter Form, Spuren mit Einmaligkeitscharakter) sowie der Beschä-

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_17

digungsintensitäten unter Beachtung der Struktursteifigkeiten der an der Kollision primär und sekundär beteiligten Fahrzeugzonen. Die **Plausibilität** umfasst die Betrachtungen zum Weg-Zeit-Geschwindigkeitsverhalten der beteiligten Fahrzeuge unter Beachtung von physikalisch-technischen Gesetzmäßigkeiten sowie auch der verwertbaren Schilderungen der an einem Verkehrsunfall bzw. Schadenfall beteiligten Personen zum Hergang eines Verkehrsunfalls bzw. Schadenereignisses.

Diese Definitionen vermischen jedoch technische und juristische Bewertungen, sind damit in ihrer gesamtheitlichen Beurteilung nicht Aufgabe des Technikers. Unter diesem Aspekt erscheint es also durchaus angebracht, die Begriffe Kompatibilität und Plausibilität und deren Anwendung zu überdenken.

Im Gegensatz zur Kompatibilität sind Beurteilungen zur Plausibilität eines Geschehensablaufs nicht Bewertungsraum des Technikers, sondern des Juristen. Um eine dem Geschehensablauf adäquate Differenzierung, auch zwischen technischen und juristischen Bewertungen, vornehmen zu können, sollte der Begriff „Kompatibilität“ wie folgt erweitert werden [4]:

- Die **geometrische** Kompatibilität behandelt die Frage der prinzipiellen Spurenzuordnung (u. a. Spuren markanter Form, Spuren mit Einmaligkeitscharakter) an den Fahrzeugen bzw. Kollisionsobjekten.
- Die **energetische** Kompatibilität behandelt die Frage der Beschädigungsintensitäten unter Beachtung der Struktursteifigkeiten der an der Kollision primär und sekundär beteiligten Zonen an den Fahrzeugen bzw. Kollisionsobjekten.
- Die **räumliche** Kompatibilität behandelt die Frage, ob sich das angegebene Schadenereignis bezüglich des Geschehensablaufes in den angegebenen Schadenort einordnen lässt.
- Die **zeitliche** Kompatibilität behandelt die Frage des angegebenen Geschehensablaufs bezüglich des Weg-Zeit-Geschwindigkeitsverhaltens sowie auch der Vermeidbarkeit.
- Die **biomechanische** Kompatibilität behandelt die Frage der Vereinbarkeit zwischen Verletzungsmustern an den beteiligten Personen bzw. Tieren und den Kontaktstellen in und an den beteiligten Fahrzeugen bzw. Kollisionsobjekten.

Diese Betrachtungsweise greift das derzeit übliche Verständnis der Begriffe Kompatibilität und Plausibilität in ihrer Gesamtheit auf. Es muss demzufolge zur Diskussion gestellt werden, ob der Begriff der Plausibilität überhaupt zwingend aus der Vollständigkeit der Einzelkompatibilitäten erwächst. Eventuell kann als Diskussionsgrundlage die Plausibilität eines angegebenen Schadenereignisses insgesamt bejaht werden, wenn die Einzelkompatibilitäten erfüllt sind.

Anzumerken ist noch, dass geometrische, energetische und räumliche Kompatibilitäten vom Techniker abschließend bewertet werden können. Dagegen liegt eine abschließende Bewertung der zeitlichen Kompatibilität nicht im Bewertungsraum des Technikers, da hier auch nichttechnische Fachgebiete, wie beispielsweise die Medizin, maßgeblich tangiert werden können.

Das bedeutet, dass der Techniker aufzeigen kann, dass Schadenbilder bezüglich der Beschädigungscharakteristika (geometrische Kompatibilität) und/oder bezüglich der Beschädigungsintensitäten (energetische Kompatibilität) nicht (gesamtheitlich) zueinander „passen“. Auch kann der Techniker darstellen, dass sich ein angegebenes Schadenereignis an einer angegebenen Schadenörtlichkeit nicht so ereignet haben kann, wie dies von den Beteiligten geschildert wurde. „Passen“ die Schäden und ist der geschilderte Bewegungsablauf am angegebenen Schadenort technisch möglich, kann es sich aber trotzdem um einen manipulierten Schadenfall handeln, mithin dann, wenn die zeitliche Kompatibilität nicht gegeben ist. Hierzu kann der Techniker

die Bewegungsabläufe und Vermeidbarkeiten aufzeigen. Die abschließende Bewertung bezüglich einer Unfallmanipulation liegt letztendlich beim Juristen.

Ergänzend zu den rein technischen Betrachtungen kann eine Kompatibilitätssystematik auch auf juristische Aspekte oder solche aus dem Umfeld erweitert werden.

2 Begehensformen

Nachfolgend werden die Definitionen manipulierter Schadenfälle dargestellt. Fließende Grenzen bzw. Schnittmengen zwischen den einzelnen Begehensformen sind häufig zu beobachten.

2.1 Das abgesprochene Schadenereignis

Beim abgesprochenen Schadenereignis handelt es sich um die verabredete, vorsätzliche Herbeiführung einer Kollision/Kollisionen zwischen den Fahrzeugen bzw. Kollisionsobjekten.

2.2 Das fingierte Schadenereignis

Eine Kollision zwischen den Fahrzeugen bzw. Kollisionsobjekten muss nicht stattgefunden haben. Das fingierte Schadenereignis wird von den Beteiligten an einer ausgewählten Örtlichkeit unter Verwendung bereits beschädigter Fahrzeuge bzw. Kollisionsobjekte „in Szene“ gesetzt.

2.3 Das fiktive Schadenereignis

Das fiktive Schadenereignis wird auch als „Papierunfall“ bezeichnet. Weder ist es in der geschilderten Art und Weise zur Kollision gekommen, noch waren die beteiligten Fahrzeuge und Personen in der geschilderten Art und Weise am angegebenen Schadenort.

2.4 Der provozierte Verkehrsunfall

Bei dem provozierten Verkehrsunfall werden vom Provozierer Fahrfehler anderer Verkehrsteilnehmer zur Herbeiführung einer Kollision ausgenutzt. Dies kann auch so weit gehen, dass der Provozierer das Opfer regelrecht in eine Kollisionssituation hineinlockt.

2.5 Der ausgenutzte Verkehrsunfall

Ein Verkehrsunfall hat tatsächlich stattgefunden. Bei der Schadenabwicklung bzw. -regulierung wird versucht, Schadenersatz für nicht unfallursächliche Beschädigungen zu erlangen.

3 Kollisionsanordnungen und wirtschaftliches Interesse

3.1 Das abgesprochene Schadenereignis

Bei abgesprochenen Schadenfällen werden die Beteiligten grundsätzlich bestrebt sein, das Beschädigungsbild so zu gestalten, dass bei der Kalkulation des Schadens ein Maximum erreicht wird, bei der nicht fachgerechten Reparatur zur Wiederherstellung der äußeren Form jedoch nur ein Minimum an finanziellem Aufwand notwendig wird. Dies lässt sich dadurch realisieren, dass die Beschädigungen über wesentliche Karosserieabschnitte flächig ausgeprägt, jedoch nur von geringer Strukturtiefe sind. Erhebliche Schäden an den Achsen sowie an Teilen des Antriebsstranges sind für eine Profitmaximierung kontraproduktiv. Dies deshalb, weil diese Fahrzeugteile zur Wiederherstellung der Verkehrssicherheit in der Regel nicht „instandgesetzt" werden können, sondern zumindest durch Gebrauchtteile ersetzt werden müssten. Dementgegen hat ein instandgesetztes, hierbei auch millimeterdick gespachteltes Karosserieteil in der Regel keinen signifikanten Einfluss auf die Verkehrs- und Betriebssicherheit.

Prädestiniert für die Verursachung von wirtschaftlich gut verwertbaren und auch reparablen Schäden sind Streifschäden über die gesamte bzw. nahezu die gesamte Fahrzeugseite, oder noch besser, über beide Fahrzeugseiten. Die einfachste Form ist das Anfahren von abgestellten Fahrzeugen (Haftpflichtschaden). Häufig werden auch Szenarien geschildert, bei denen der „Verursacher" mit seinem Fahrzeug aus allerlei Gründen zumindest teilweise auf die Fahrbahn des „Geschädigten" gerät. Hierbei kommt es nicht zur Frontalkollision, sondern zu leichten streifenden Kontakten der gesamten bzw. nahezu der gesamten Fahrzeugseiten. Regelmäßig kollidiert das Fahrzeug des „Geschädigten" mit der zweiten Fahrzeugseite dann noch mit einer an der angegebenen Schadenörtlichkeit befindlichen Leitplanke, auch dies vorzugsweise leicht streifend. Dies wird meist damit erklärt, dass man versucht habe, an der Vermeidbarkeit mitzuwirken. Aus welchem Grund aber nach einer derart leichten Streifkollision zwischen den Fahrzeugen durch einfache Bremsmanöver selbige nicht angehalten, sondern mit entsprechend notwendigen Lenkbewegungen oberflächliche Streifkontakte mit Leitplanken stattfinden, ist wenig verständlich. Hierbei setzen sich entsprechend notwendige Lenkmanöver zum Erreichen von kleinen Winkeln zwischen der Fahrzeuglängsachse und der Leitplanke aus einer Rechtslenkung sowie einer sich anschließenden Linkslenkung zusammen. Dabei stellt sich ebenfalls die Frage, weshalb nicht mit einer geringfügigen Lenkbewegung der Kontakt zwischen dem Fahrzeug und der Leitplanke verhindert bzw. abgebrochen wird. Sollte zudem das Fahrzeug des „Verursachers" vollkaskoversichert sein, kollidiert dies im Anschluss an die Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision häufig ebenfalls oberflächlich streifend mit einer Leitplanke. Solche Geschehensabläufe sind auch im Rahmen der Vollkaskoversicherung möglich. Hierbei kontaktiert das VN-Fahrzeug[3] mit einer Fahrzeugseite eine Leitplanke bzw. mit beiden Fahrzeugseiten verschiedene Leitplankenbereiche, dies auch wechselseitig (rechts und links).

Mit **Bild A17-1** und **Bild A17-2** wird die rechte Seite eines vollkaskoversicherten Mercedes-Benz W211 (VN-Fahrzeug) gezeigt. Der Versicherungsnehmer als Fahrzeugführer hatte angegeben, dass er auf einer schmalen Fahrbahn (**Bild A17-3**) aufgrund von Gegenverkehr sein Fahrzeug aus einer Annäherungsgeschwindigkeit im Bereich von 50 km/h leicht abgebremst habe. Hierdurch sei beim VN-Fahrzeug ein Schleudervorgang initiiert worden und das Fahrzeug dabei gegen die rechts neben der nassen Fahrbahn befindliche Leitplanke gestoßen. Der Versicherungsnehmer habe zwar versucht, zu bremsen sowie nach links, weg von der Leitplanke, zu lenken, das VN-Fahrzeug sei aber immer wieder gegen die Leitplanke gekommen.

3 Fahrzeug des Versicherungsnehmers



Bild A17-1 Schadenbereich am VN-Fahrzeug



Bild A17-2 Schadenbereich am VN-Fahrzeug



Bild A17-3 Blick auf die angegebene Schadenörtlichkeit in Fahrtrichtung des VN-Fahrzeugs

Nach einer Kontaktstrecke von etwa 28 m unter Hinterlassung diverser Radkontaktspuren an der Leitplanke sei das VN-Fahrzeug direkt an der Leitplanke zum Stillstand gekommen. **Bild A17-4** zeigt den entsprechend notwendigen Bewegungsablauf. Mit den Beschädigungen und Spurzeichnungen an der rechten Fahrzeugseite des VN-Fahrzeugs wird deutlich, dass im Zuge der streifend-kollisionären Kontakte der Winkel zwischen der Fahrzeuglängsachse und der Leitplanke gegen Null tendierte.

Bild A17-3 und **Bild A17-4** zeigen, dass der Fahrer des VN-Fahrzeugs zur Aufrechterhaltung der streifenden Kontakte mit der Leitplanke, um dem Rechtsbogen zu folgen, gelenkt haben musste. Die angegebene Endlage direkt an der Leitplanke lässt darauf schließen, dass der Versicherungsnehmer während des gesamten Bewegungsablaufes bis zum Stillstand keinen Versuch unternommen haben kann, nach links – weg von der Leitplanke – zu lenken. Das VN-Fahrzeug ist mit diversen fahrstabilisierenden Assistenzsystemen (z. B. ABS, ASR, ESP) ausgestattet, so dass die geschilderte Schleuderbewegung infolge eines leichten Bremsmanövers auf nasser Fahrbahn durchaus in Frage gestellt werden kann.

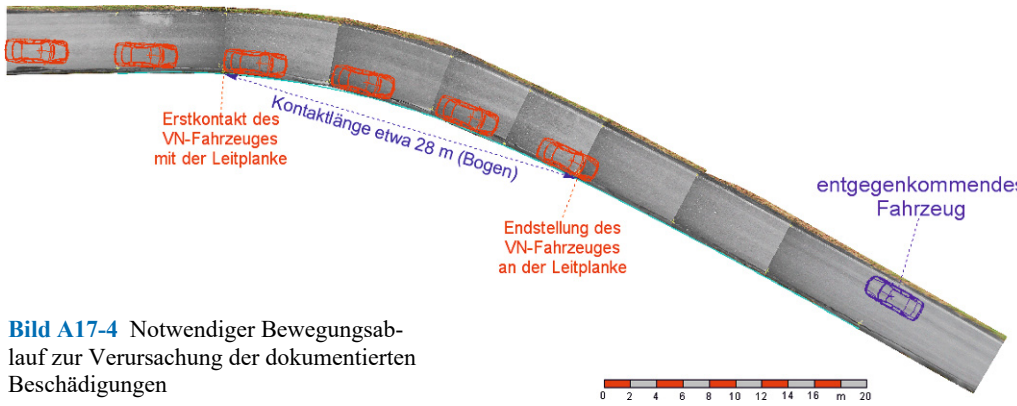


Bild A17-4 Notwendiger Bewegungsablauf zur Verursachung der dokumentierten Beschädigungen

Bild A17-5 und **Bild A17-6** zeigen beide Fahrzeugseiten eines Opel Astra (AST-Fahrzeug[4]). Mit den Angaben der Beteiligten zum Schadenhergang habe sich das angegebene Schadenereignis dergestalt ereignet, dass der Fahrzeugführer eines Fiat Fiorino (VN-Fahrzeug) – ein Firmenfahrzeug – beim Abstreifen von Zigarettenasche wohl kurzzeitig unaufmerksam gewesen und hierbei zumindest teilweise auf die Gegenfahrbahn gekommen sei. Im Rahmen dieses Bewegungsablaufes sei es zu einer Streifkollision mit geringer Intensität zwischen den jeweils linken Fahrzeugseiten der beiden Fahrzeuge gekommen. Am AST-Fahrzeug wurde hierbei nahezu die gesamte linke Seite beschädigt. Nach der Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision habe das AST-Fahrzeug noch die rechts neben der Fahrbahn befindliche Leitplanke mit geringer Intensität unter Hinterlassung von deutlichen Radkontaktspuren (**Bild A17-7** – Bewegungsrichtung von rechts nach links) kontaktiert. Hierbei wurde nahezu die gesamte rechte Seite beschädigt.



Bild A17-5 Schadenbild am Opel Astra links



Bild A17-6 Schadenbild am Opel Astra rechts



Bild A17-7 Radkontaktspuren an der Leitplanke

4 Fahrzeug des Anspruchstellers

In der Reparaturkostenkalkulation des Schadengutachtens sind alle vier Türen, die beiden vorderen Kotflügel sowie beide vorderen Reifen, vorn rechts auch die LM-Felge, zur Erneuerung vorgesehen. Beide hinteren Seitenteile sind jeweils mit umfangreichen Instandsetzungspositionen versehen. Dass keines der Karosserieteile zwangsläufig erneuert werden muss, ergibt sich schon aus den Beschädigungscharakteristika. Das oberflächliche Schadenbild an den zur Erneuerung kalkulierten Fahrzeugteilen lässt eine Instandsetzung als durchaus möglich erscheinen. Der wirtschaftliche Gewinn entsteht selbstverständlich nicht bei einer Reparatur gemäß Reparaturkostenkalkulation in einer autorisierten Fachwerkstatt (fachgerechte Reparatur). Zur Verursachung von Beschädigungen an (kompletten bzw. nahezu kompletten) Fahrzeugseiten sind weitere Kollisionsanordnungen bekannt, wie beispielsweise:

- Vorbeifahrt an ein-/ausparkenden Fahrzeugen,
- Ausweichbewegungen infolge entgegenkommender Fahrzeuge,
- Ausweichbewegungen infolge querender Fahrzeuge, Personen oder Tiere,
- Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge,
- Kollisionen bei Ein-/Ausparkvorgängen mit seitlich daneben stehenden Fahrzeugen,
- zu frühes Einscheren bei Überholvorgängen,
- Queranstöße gegen (nahezu) stehende Fahrzeuge,
- Fehleinschätzungen beim seitlichen Abstand zu parkenden Fahrzeugen u. a.

Zumindest ist allen diesen Streifkollisionen zu eigen, dass die Karosseriestruktur nicht in die Strukturtiefe gehend beschädigt werden soll. Geringe Kontaktspuren an den Fahrzeugrädern werden dazu genutzt, umfassenden Erneuerungen von Fahrwerkteilen mit Sicherheitsaspekten zu begründen. Das mehrt den Gewinn, da auf die Erneuerung verzichtet wird. Bei der Nachbesichtigung des reparierten Fahrzeugs ist oftmals der konsequente Verzicht auf den Einsatz von Neu- und/oder Gebrauchteilen festzustellen. Hierbei wird im Wesentlichen die äußere Form und Gestalt des Fahrzeugs restauriert, ohne dass die vom Fahrzeughersteller konstruktiv vorgesehenen Eigenschaften adäquat wiederhergestellt werden. Auch wird bei an mehreren Schadenereignissen beteiligten Fahrzeugen häufig darauf geachtet, dass die Karosserie rundum verwertet wird, bevor das Fahrzeug über ein letztes Schadenereignis final verwertet wird.

Das heißt, bei den einzelnen Schadenfällen wird versucht, jeweils vorher unbelastete Karosseriezonen zu beschädigen. Die finale Verwertung mit einer entsprechenden Anzahl von Vorschäden zeigt das Beispiel eines Mercedes-Benz S 500 (**Bild A17-8** bis **Bild A17-13**), bei dem einzelne Fahrzeugzonen auch mehrfach beschädigt, mithin verwertet wurden. Das Fahrzeug war innerhalb von knapp vier Jahren an mindestens sechs Schadenfällen beteiligt, wobei die drei letzten Schadenfälle in einem Abstand von jeweils etwa einem Monat stattfanden. Nachdem das Fahrzeug an der Fahrzeugfront, am Fahrzeugheck sowie an der rechten Seite mehrfach beschädigt wurde, sollte bei einem letzten Schadenfall die bislang unbeschädigte linke Fahrzeugseite in Mitleidenschaft gezogen werden. Hierbei wurde, möglicherweise auch aufgrund eines Fahrfehlers, das Fahrzeug in einen nahezu schrottreifen Zustand versetzt (**Bild A17-13**).



Bild A17-8 Schadenfall 1



Bild A17-9 Schadenfall 2



Bild A17-10 Schadenfall 3

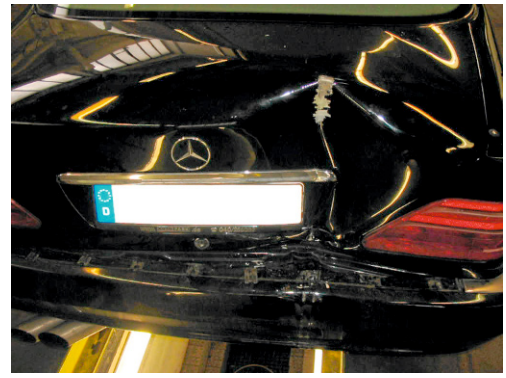


Bild A17-11 Schadenfall 4



Bild A17-12 Schadenfall 5



Bild A17-13 Schadenfall 6



Bild A17-14 Schadenbild 1 zu einer Streifkollision



Bild A17-15 Schaden 2 zu einer Streifkollision



Bild A17-16 Schadenbild 3 zu einer Streifkollision



Bild A17-17 Schaden 4 zu einer Streifkollision

Die geplante Schadenverursachung kann also auch misslingen. Folge ist, dass unbeabsichtigt intensivere Beschädigungen erzeugt werden, die wirtschaftlich weniger attraktiv sind. Dies betrifft beispielsweise massive Achsschäden. Ein intensiveres Beschädigungsbild schließt also nicht automatisch ein manipuliertes Schadenereignis aus. Mit **Bild A17-14** bis **Bild A17-17** werden vier sehr ähnliche geartete Beispiele gezeigt, bei denen jeweils der Fahrzeugführer des Verursacherfahrzeugs bei den beabsichtigten Streifkollisionen zu früh intensiv in Richtung des abgestellten AST-Fahrzeugs gelenkt hat. Hierbei kam es zu nicht beabsichtigten Verhakungen zwischen dem Vorderrad des Verursacherfahrzeugs und dem linken Hinterrad des AST-Fahrzeugs, somit auch zu massiven Beschädigungen an der linken Hinterachshälfte. Derartige Erkenntnisse konnten beispielsweise auch bei entsprechenden Versuchen festgestellt werden.

Untrennbar im Zusammenhang mit Fahrzeug-Fahrzeug-Streifkollisionen stehen Radkontaktspuren, die ausführlich im Kapitel A5, hier im Gliederungspunkt 8 „Radkontaktspuren“ behandelt werden. Bei abgesprochenen Schadenereignissen sind neben Streifkollisionen mäßige Anstöße gegen das Fahrzeugheck und/oder die Fahrzeugfront die Regel. Beschädigungen an der Karosserie sowie den Rahmenstrukturen, die im Rahmen einer fachgerechten Reparatur den Austausch erforderlich machen, werden zur Gewinnmaximierung bei einer nicht fachgerechten Reparatur anschließend nur instandgesetzt. Hinzu kommt, dass Reparaturen zu deutlich geringeren Kosten im Ausland durchgeführt werden können. Der abgebildete Mercedes-Benz der Baureihe W202 (**Bild A17-18** bis **Bild A17-24**) war in einem Jahr an drei Schadenfällen beteiligt, allesamt Anstöße gegen das Fahrzeugheck. Mit **Bild A17-18** wird der Rahmenlängsträger hinten rechts nach dem ersten Schadenfall dargestellt (Bildmaterial zum Schadengutachten). Der Rahmenlängsträger zeigt das konstruktiv vorgesehene Schadenbild des Faltbeulens.

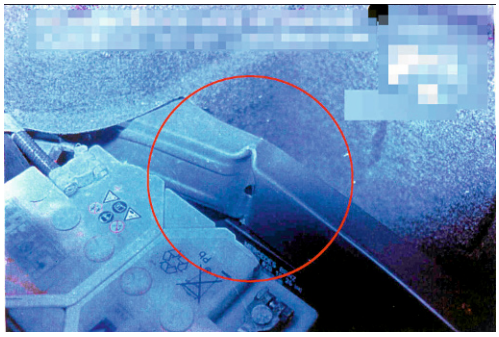


Bild A17-18 Rahmenlängsträger hinten rechts nach dem Schadenfall 1



Bild A17-19 Rahmenlängsträger hinten rechts nach dem Schadenfall 2



Bild A17-20 Reparierter Rahmenlängsträger hinten rechts nach dem Schadenfall 2



Bild A17-21 Schadenumfang am Fahrzeugheck nach dem Schadenfall 3

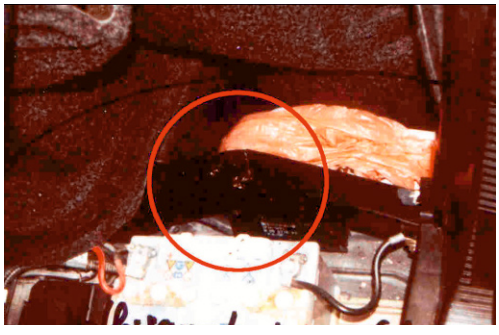


Bild A17-22 Rahmenlängsträger hinten rechts nach dem Schadenfall 3



Bild A17-23 Reparaturdurchführung nach dem Schadenfall 3

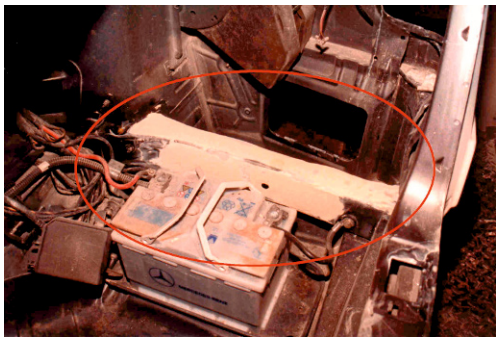


Bild A17-24 Reparaturdurchführung am Rahmenlängsträger hinten rechts im Zeitraum nach dem Schadenfall 3

Nach dem zweiten Schadenfall lässt der Rahmenlängsträger hinten rechts mit dem Bildmaterial zum Schadengutachten ein deutlich abweichendes Beschädigungsbild erkennen (**Bild A17-19**). Anstatt des typischen Faltbeulens sind Aufplatzungen von dickschichtig aufgetragenem Spachtelmaterial ersichtlich. Bei der Nachbesichtigung im Zeitraum nach dem zweiten Schadenereignis, jedoch nach Durchführung der Reparaturarbeiten, wurden am Rahmenlängsträger hinten rechts Schichtdicken von über 5 mm (5 mm = 5.000 µm) gemessen (**Bild A17-20**). Je nach Lackart liegen herstellerseitige Schichtdicken im Bereich von etwa 80 bis 130 µm, bei innenliegenden Rahmenteilen eher an der Untergrenze. Bei einem dritten Schadenfall zeigte das Fahrzeug nun ein Beschädigungsbild, bei dem die Karosseriestruktur trotz eines insgesamt mäßigen Anstoßes gegen das Fahrzeugheck regelrecht kollabierte (**Bild A17-21**). Der Rahmenlängsträger ließ ein Schadenbild erkennen, das dem nach dem zweiten Schadenfall sehr ähnlich war, wiederum Auf-/Abplatzungen von dickschichtig aufgetragenem Spachtelmaterial (**Bild A17-22**). Im Zuge von Nachbesichtigungen, die an mehreren, aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt wurden, wurde die Qualität und Quantität der Reparaturdurchführung dokumentiert. **Bild A17-23** zeigt das Fahrzeugheck während der Reparaturdurchführung in einer Übersichtsaufnahme. Erkennbar sind großflächige Auftragungen von Spachtelmaterial am Fahrzeugheck. Mit dem **Bild A17-24** wird nun der wiederum rückgeformte und massiv gespachtelte Rahmenlängsträger hinten rechts dargestellt, der unmittelbar vor dem Aufbringen der abschließenden Farbschicht fotografiert wurde. Mit den vorstehenden Darstellungen zur Qualität und Quantität der Reparaturdurchführungen wird deutlich, dass an dem Fahrzeug nach allen drei bekannt gewordenen Schadenereignissen alle Karosserieblechteile sowie alle Teile der tragenden Rahmen-Boden-Anlage am Heck entgegen den Reparaturkostenkalkulationen in den Schadengutachten lediglich rückgeformt, massiv gespachtelt und lackiert worden sind. In den Reparaturkostenkalkulationen wurden dreimal umfangreiche Erneuerungen an diesen Fahrzeugteilen kalkuliert. Auf die Verwendung von Neu- und/oder Gebrauchtteilen wurde konsequenterweise verzichtet. Gleichzeitig bleibt nach einer derartigen Reparatur die herstellerseitig vorgesehene Struktursteifigkeit erheblich beeinträchtigt.

3.2 Das fingierte Schadenereignis

Die vorstehenden Ausführungen müssen dann nicht zutreffen, wenn beispielsweise eine Doppelabrechnung von Schäden vorliegt, d. h. ein Vorschaden wurde vor dem neuerlichen Schadenereignis nicht bzw. nicht vollständig repariert. Da insbesondere dann, wenn aussagefähige Informationen zu dem Vorschaden vorliegen, der technische Nachweis geführt werden kann, werden derartige Fahrzeuge nach dem zweiten Schadenfall sehr häufig schnell an „Unbekannt“ verkauft oder repariert. Auch kann die Grenze zwischen einem abgesprochenen und einem fingierten Schadenereignis fließend sein, wie dies anhand des nachfolgenden Beispiels verdeutlicht wird. Im dargestellten Fall wurde das AST-Fahrzeug, ein Mercedes-Benz C200 der Baureihe W202, bei einem realen Verkehrsunfall am Fahrzeugheck (**Bild A17-25**) massiv sowie an

der Fahrzeugfront (Bild A17-26) mäßig beschädigt. Zehn Tage nach dem Verkehrsunfall wurde das beschädigte Fahrzeug weiterverkauft.



Bild A17-25 Schadenbild am Heck des Mercedes-Benz nach dem Schadenfall 1



Bild A17-26 Schadenbild an der Front des Mercedes-Benz nach dem Schadenfall 1

Weitere sechs Tage später war das Fahrzeug wiederum in einen Schadenfall involviert. Zu später Nachtstunde fuhr an einer ruhigen, außerorts gelegenen Örtlichkeit ein kurzzeitig angemieteter Pkw (Bild A17-27) auf den Mercedes-Benz (Bild A17-28) auf. Zu diesem Zeitpunkt befand sich an der Fahrzeugfront des Mercedes-Benz (fast) kein Schaden (Bild A17-29). Der Schaden an der Fahrzeugfront des Mercedes-Benz aus dem ersten Verkehrsunfall wurde also vor dem zweiten Schadenfall im Wesentlichen repariert. Als Grund für das Auffahren auf den Mercedes-Benz hatte die Fahrerin des Miet-Pkw gegenüber den Polizeibeamten angegeben, dass ihr etwas „unbekanntes festes“ gegen die Windschutzscheibe geschlagen sei. Hierauf habe sie sich derart erschrocken, dass sie das Lenkrad losgelassen und die Hände vor das Gesicht gerissen habe, so dass sie ungebremst aufgefahren sei. Die Polizeibeamten stellten bei der Unfallaufnahme zwar einen Einschlag an der Windschutzscheibe des Miet-Pkw auf der Fahrerseite fest, konnten aber nicht klären, was für ein Gegenstand diesen Schaden verursacht haben konnte. Die Professionalität, mit der diese „Unfälle“ in Szene gesetzt werden, wird auch daran deutlich, dass im Rahmen der polizeilichen Unfallaufnahme medizinisches Rettungspersonal hinzugezogen wurde und sich beide Fahrer medizinisch behandeln ließen (Bild A17-30).



Bild A17-27 Schadenbild an der Front des Miet-Pkw nach dem Schadenfall 2

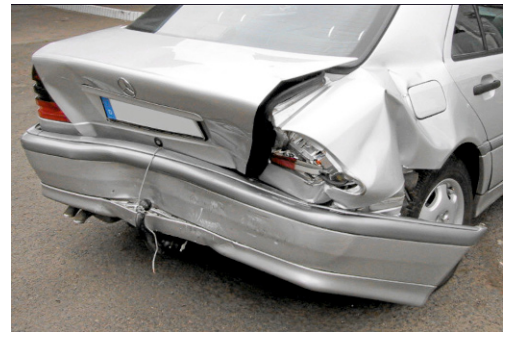


Bild A17-28 Schadenbild am Heck des Mercedes-Benz nach dem Schadenfall 2



Bild A17-29 Fahrzeugfront des Mercedes-Benz nach dem Schadenfall 2



Bild A17-30 Medizinische Betreuung der Fahrerin des Miet-Pkw nach dem Schadenfall 2

Werden nun die Beschädigungen am Fahrzeugheck des Mercedes-Benz aus den zwei Schadenfällen miteinander verglichen, zeigen sich signifikante Ähnlichkeiten in den Schadenbildern. Dies wird insbesondere anhand von übereinstimmenden Spuren mit Einmaligkeitscharakter sowie Spuren markanter Form und Ausprägung deutlich. Der Beschädigungsumfang aus dem zweiten Schadenfall ist etwas größer, da im Zuge des zweiten Schadenfalles mit dem Mietwagen gegen das noch aus dem ersten Verkehrsunfall vorbeschädigte Fahrzeugheck des Mercedes-Benz gefahren wurde (erster Verkehrsunfall: **Bild A17-31** und **Bild A17-33** sowie zweiter Schadenfall: **Bild A17-32** und **Bild A17-34**). Nach Angaben der Beteiligten sei der Mercedes-Benz vor dem zweiten Schadenfall fachgerecht repariert gewesen. Mit den in der Reparaturkostenkalkulation im Schadengutachten zum ersten Verkehrsunfall dargestellten Arbeitszeiten ergibt sich für eine fachgerechte Reparatur eine rechnerische Arbeitszeit von 2592 AW[5]. Mit 12 AW/Std. berechnet sich die Arbeitszeit zu 216 Stunden. Unter Ansatz von 8 Stunden Arbeitszeit pro Arbeitstag ergeben sich demzufolge 27 Arbeitstage als Reparaturdauer.



Bild A17-31 Schadenbild am Heck des Mercedes-Benz nach dem Schadenfall 1



Bild A17-32 Schadenbild am Heck des Mercedes-Benz nach dem Schadenfall 2

5 Arbeitswerte (AW)



Bild A17-33 Schadenbild am Heck des Mercedes-Benz nach dem Schadenfall 1



Bild A17-34 Schadenbild am Heck des Mercedes-Benz nach dem Schadenfall 2

Selbst dann, wenn 24 Stunden pro Tag an dem AST-Fahrzeug gearbeitet worden und beispielsweise die Ersatzteilbeschaffung problemlos gewesen wäre, ist eine fachgerechte Reparatur des Mercedes-Benz in einem Zeitraum von sechs Tagen nicht realisierbar. Die Laufleistung des Mercedes-Benz zwischen den beiden bekannten Schadenereignissen betrug ganze 28 km.

3.3 Das fiktive Schadenereignis

Ein rein fiktives Schadenereignis liegt dann vor, wenn an einem Fahrzeug Schäden (AST-Fahrzeug) geltend gemacht werden, ohne dass der Kollisionspartner (VN-Fahrzeug) auch nur ansatzweise Schäden zeigt, die zum Schadenumfang an dem AST-Fahrzeug kompatibel sind.

Bild A17-35 zeigt einen Opel Omega, der bei einem Schadenfall an der Front massiv beschädigt wurde. **Bild A17-36** zeigt nun dasselbe Fahrzeug etwa acht Monate später. Die Beschädigungen und Spurzeichnungen an der Fahrzeugfront des Opel Omega zu beiden Schadenereignissen sind vollkommen identisch. Bei einer Besichtigung ohne vorherige Terminvereinbarung zeigten sich am angeblichen Verursacherfahrzeug (**Bild A17-37** und **Bild A17-38**) zum Schadenfall 2 im angegebenen Anstoßbereich hinten rechts weder kompatible Beschädigungen und Spurzeichnungen noch Hinweise auf Reparaturarbeiten.



Bild A17-35 Beschädigungsumfang an der Fahrzeugfront des Opel zu Schadenfall 1



Bild A17-36 Beschädigungsumfang an der Front des Opel zu Schadenfall 2 etwa acht Monate nach dem Schadenfall 1



Bild A17-37 VN-Fahrzeug zum Schadenfall 2

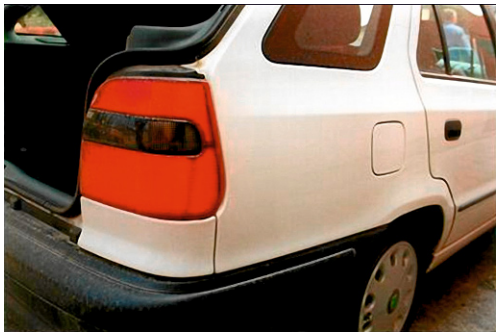


Bild A17-38 VN-Fahrzeug zum Schadenfall 2

Ein fiktives Schadenereignis kann aber auch dann vorliegen, wenn Beschädigungen an einem Fahrzeug geltend gemacht werden, ohne dass überhaupt Beschädigungen an dem Fahrzeug entstanden sind. Auch mit Hilfe Dritter, wie Werkstätten oder auch Sachverständigen, werden diese „Schäden“ geltend gemacht. So ist mindestens ein Fall bekannt, bei dem ein Streifschaden über eine komplette Fahrzeugseite mit Schlämmkreide auf das Fahrzeug „aufgemalt“ wurde. Die fotografischen Abbildungen von den „Beschädigungen“ wurden dann von dem in den Betrugsversuch involvierten Sachverständigen so „vorteilhaft“ angefertigt, dass mit dem Bildmaterial die Manipulation nicht auffällig wurde. Erst bei einer Nachbesichtigung wurde festgestellt, dass an dem Fahrzeug weder Beschädigungen noch Reparaturen nachvollziehbar waren.

Eine Methode ist auch, nicht existente Objekte als gestohlen zu melden. Mit einer professionell erstellten Rechnung (**Bild A17-39**) hat ein Versicherungsnehmer versucht, gegenüber seiner Versicherung den Kauf eines angeblich gestohlenen, hochwertigen Carbon-Rennrades nachzuweisen. **Bild A17-40** zeigt ein vergleichbares Fahrrad zum Preis von 4.700,00 Euro. Ein Besuch bei der Firma, die das Fahrrad an den Versicherungsnehmer verkauft haben soll, brachte schnell die Erkenntnis, dass der Versicherungsnehmer bei der Firma zwar als Kunde bekannt war, dieser jedoch ein solch hochwertiges Rennrad bei dieser Firma nie erworben hatte.



Rechnung

Datum: 06. Mai 2005

Rennrad: Scott CR 1 Team Issue Carbon
Gabel: Scott Carbone CR1 Team Issue
Felgen: Mavic Kysrium SL
Reifen: Continental Grand Prix 3000 700x23 C
Schaltwerk : Shimano Dura Ace FD 7600
Lenker: Ritchy WCS
Bremsen: Dura-Ace BR-7800 Super SLR Dual pivot
Farbton: Carbon black / Gelber Schriftzug
Größe: L
Gewicht: ca. 6,7 kg

Gesamtpreis: **4.700,-€**

Das Lieferdatum entspricht dem Rechnungsdatum.

Vielen Dank für die Bestellung. Wir wünschen Dir viel Spaß und Erfolg.
Das Team von

Bild A17-39 Vom Versicherungsnehmer eingereichte Kaufrechnung



Bild A17-40 Vergleichsfahrzeug zu dem angeblich gestohlenen Rennrad



Rechnung

7726580

Bild A17-41 Rechnungsvordruck der angeblichen Verkaufsfirma

Auch wurde vom Firmeninhaber ein Rechnungsvordruck vorgelegt (**Bild A17-41**), der von der vom Versicherungsnehmer eingereichten Rechnung über den „Kauf“ des Rennrades abwich.

Schäden an Kraftfahrzeugen über einen fiktiven Schadenfall mit Deckung über eine PHV (Privathaftpflichtversicherung) abzurechnen ist ein weiterer Problemkreis, der aber im Rahmen dieses Kapitels nicht weitergehend thematisiert wird. Das Motiv liegt hier meist in selbstverursachten Beschädigungen am Fahrzeug, für die kein Versicherungsschutz (z. B. Kaskoversicherung) besteht oder der tatsächliche Schädiger nicht bekannt ist. Als schadenverursachende Kollisionsobjekte werden dann häufig Fahrräder, Einkaufswagen, Schubkarren o. ä. angegeben. Bekannte und Verwandte stellen sich hierbei als Versicherungsnehmer zur Verfügung.

3.4 Der provozierte Verkehrsunfall

Unfallprovokationen sind aus technischer Sicht häufig nur sehr schwer bzw. nicht aufklärbar. Dagegen können nichttechnische Aspekte, wie eine signifikante Schadenhäufung im Zusammenhang mit preiswertesten Reparaturdurchführungen auf provozierte Verkehrsunfälle hinweisen. Besonders häufig sind bei provozierten Verkehrsunfällen Auffahrunfälle (Ausbremsen nachfolgender Fahrzeuge), Fahrspurwechsel und Rechts-vor-links-Situationen vorzufinden.

Über einige Jahre hinweg war ein Außendienstmitarbeiter einer Versicherung, Herr K., sehr häufig an Verkehrsunfällen beteiligt, zum Teil im Zwei- und Vierwochenabstand. Die folgenden Darstellungen reduzieren sich auf die Schadenfälle an einem Opel Astra des Herrn K., bei denen im Rahmen von Fahrspurwechselunfällen andere Verkehrsteilnehmer jeweils mit dem vorderen Abschnitt der linken Seite des Opel Astra kollidierten. **Bild A17-42** zeigt die Schäden aus Schadenfall 1. **Bild A17-43** stellt eine häufig anzutreffende Reparaturbestätigung dar, die Abbildung des Fahrzeugs mit einer mitfotografierten Tageszeitung. **Bild A17-44** bis **Bild A17-47** zeigen die Beschädigungen und Spurzeichnungen aus den Schadenfällen 2 bis 5. Nach dem Schadenfall 5 wurde das Fahrzeug weiterverkauft. In allen Fällen wurde das Fahrzeug vom selben Sachverständigen besichtigt, der jeweils ein Schadengutachten zum Fahrzeug erstellte.

Ab dem zweiten Gutachten wurde in allen Gutachten nur äußerst zurückhaltend von einem „behobenen Vorschaden links vorn“ berichtet, dies teilweise sogar mit dem Hinweis: „fachgerecht repariert“. Tatsächlich wurden die Reparaturen nach den Vorgaben von Herrn K. „so billig wie möglich“ ausgeführt, und das auch unter Inkaufnahme von Reparaturspuren und die Verkehrssicherheit beeinträchtigende Restbeschädigungen. So wurde beispielsweise die vordere Stoßfängerverkleidung in den Schadengutachten zwar fünfmal zur Erneuerung vorgesehen, erneuert wurde dieses Fahrzeugteil aber nicht ein einziges Mal. Damit wird deutlich, dass auch bei kleinen Schadenhöhen im Zusammenwirken mit Billigstreparaturen ein wirtschaftliches



Bild A17-42 Schadenfall 1



Bild A17-43 Reparaturbestätigung zu Schaden 1



Bild A17-44 Schadenfall 2



Bild A17-45 Schadenfall 3



Bild A17-46 Schadenfall 4



Bild A17-47 Schadenfall 5

Interesse darstellbar ist. Übriges war Herr K. von dem Tag an, als die Polizei begann, gegen ihn zu ermitteln, an keinem weiteren polizeilich gemeldeten Verkehrsunfall mehr beteiligt.

Deutlich bessere Ermittlungsansätze können provozierte Verkehrsunfälle in Rechts-vor-links-Situationen haben. In einem Schadenfall beabsichtigte die Fahrzeugführerin eines Mercedes-Benz der Baureihe W210 an einer von rechts einmündenden Straße geradeaus vorbeizufahren. Aus dieser Straße näherte sich der Fahrer eines Seat Cordoba mit seinem Fahrzeug. Im Einmündungsbereich kam es zur Kollision zwischen den beiden Fahrzeugen. **Bild A17-48** zeigt die Endlage sowie die kollisionsursächlichen Beschädigungen im hinteren und mittleren Abschnitt der rechten Fahrzeugseite des Mercedes-Benz. Mit **Bild A17-49** wird das Schadenbild an der Fahrzeugfront des Seat Cordoba dargestellt. Die Endlage des Mercedes-Benz nach dem Verkehrsunfall wurde polizeilich dokumentiert. Wird nun die Endlage des Mercedes-Benz (rotes Fahrzeug in **Bild A17-50**) im Zusammenhang mit einer zur Verursachung der Beschädigungen und Spurzeichnungen an beiden beteiligten Fahrzeugen notwendigen Anstoßanordnung in eine maßstabsgerechte Abbildung von der Unfallstelle eingebunden, wird deutlich, dass der Fahrzeugführer des Seat Cordoba (blaues Fahrzeug in **Bild A17-50**) keinesfalls nach rechts abbiegen konnte, wie er dies behauptet hatte. Wäre der Mercedes-Benz nicht an der Unfallstelle gewesen, bleibt nur die Vermutung, dass der Fahrzeugführer des Seat Cordoba über den Gehweg an der Unfallstelle hinweg gegen die Mauer der anliegenden Gärtnerei fahren wollte.



Bild A17-48 Beschädigungsumfang und Endlage des Mercedes-Benz



Bild A17-49 Beschädigungsumfang an der Fahrzeugfront des Seat Cordoba

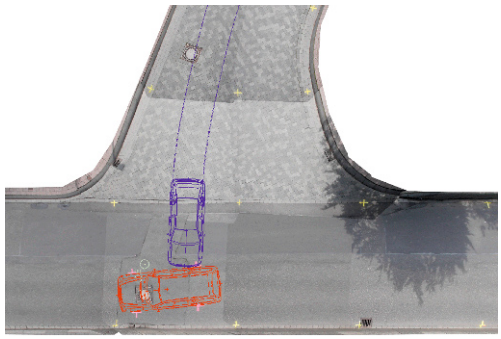


Bild A17-50 Erforderlicher Bewegungsablauf für den Seat Cordoba (blau) zum Erreichen einer nachvollziehbaren Kollisionsanordnung

3.5 Der ausgenutzte Verkehrsunfall

Beim ausgenutzten Verkehrsunfall sind alle Anstoßanordnungen möglich, die im allgemeinen Verkehrsgeschehen auftreten können. Die Manipulation wird erst nach dem Verkehrsunfall im Zuge der Regulierung des Schadens versucht. Dies reicht vom Verschweigen von (kleineren) Vorschäden, wie beispielsweise Lackverkratzungen aus mut- und böswilligen Handlungen, die im Schadenumfang zu dem Verkehrsunfall dann einfach mit „untergehen“, bis hin zu teuren Aggregateschäden und/oder auch dauerhaften Körperschäden, z. B. HWS-Distorsionen, Prellungen und Knochenbrüchen. Die Beschädigungen/Verletzungen waren entweder bereits vor dem Verkehrsunfall vorhanden oder werden danach durch Schadenausweitung erzeugt.

Bild A17-51 zeigt die Fahrzeugecke vorn rechts an einem Volkswagen Passat (AST-Fahrzeug). Dieses Bild wurde vom Versicherungsnehmer direkt nach dem Verkehrsunfall gefertigt. **Bild A17-53** zeigt einen Ausschnitt aus **Bild A17-51**, hier insbesondere den Übergang zwischen dem Kotflügel rechts vorn und der Motorhaube. **Bild A17-52** zeigt nun ebenfalls die Fahrzeugecke vorn rechts an dem Volkswagen Passat und **Bild A17-54** den entsprechenden Ausschnitt aus **Bild A17-52**. Bei **Bild A17-52** und **Bild A17-54** handelt es sich um Bildmaterial zum Schadengutachten, welches bei der Besichtigung durch den Sachverständigen gefertigt wurde.

Bereits ein oberflächlicher Vergleich des Bildmaterials lässt erkennen, dass sowohl am Kotflügel rechts vorn als auch an der Motorhaube Schadenausweitungen vorgenommen wurden, die in dem Schadengutachten dann auch zu entsprechenden Erneuerungspositionen führten. Mit diesen Manipulationen wurde der an sich geringe Schadenumfang in etwa verdoppelt.



Bild A17-51 Beschädigungsumfang unmittelbar nach dem Verkehrsunfall



Bild A17-52 Beschädigungsumfang gemäß des Bildmaterials zum Schadengutachten



Bild A17-53 Schadenumfang unmittelbar nach dem Verkehrsunfall (Ausschnitt aus **Bild A17-51**)



Bild A17-54 Schäden gemäß den Bildern zum Schadengutachten (Ausschnitt aus **Bild A17-52**)

Bild A17-55 zeigt zu einem weiteren Schadenereignis neben einem Streifschaden geringer Intensität über nahezu die komplette linke Seite eines Mercedes-Benz der Baureihe W202 (Abschnitt des Streifschadens siehe **Bild A17-55** – blaue Markierung) mehrere gleichartig strukturierte Schadenausweitungen (siehe **Bild A17-55** – rote Markierung). Diese Schäden weichen bezüglich Form und Ausprägung erheblich von einem Streifschaden ab und wurden offensichtlich mit einem entsprechend geeigneten Gegenstand zur Schadenausweitung erzeugt.



Bild A17-55 Spurenlage an der linken Fahrzeugseite des Mercedes-Benz

Bei einem Überholmanöver durch einen Volkswagen-Transporter sei ein Mercedes-Benz der Baureihe W202 nach rechts gegen eine Leitplanke abgedrängt worden. Das Bildmaterial zum Schadengutachten zeigt einen Streifschaden über nahezu die gesamte rechte Fahrzeugseite des Mercedes-Benz (**Bild A17-56**). Bei oberflächlicher Betrachtung ist die abgebildete Spurenlage einer Beschädigung aus Leitplankenkontakt nicht unähnlich. Bei näherer Analyse zeigen die Schäden jedoch einige Besonderheiten, die einer ausschließlichen Beschädigung des Fahrzeugs durch eine Streifkollision mit einer Leitplanke deutlich widersprechen. So zeigen **Bild A17-57** und **Bild A17-58** eine Vielzahl von sich gegenseitig überlagernden sowie auch in verschiedene Richtungen orientierten Einzelspurzeichnungen mit insgesamt unstetem Verlauf.



Bild A17-56 Schaden an der rechten Fahrzeugseite, angeblich aus Leitplankenkontakt



Bild A17-57 Spurenlage am Kotflügel rechts vorn sowie an beiden rechten Türen



Bild A17-58 Spurenlage an der Tür rechts vorn sowie am Kotflügel rechts vorn

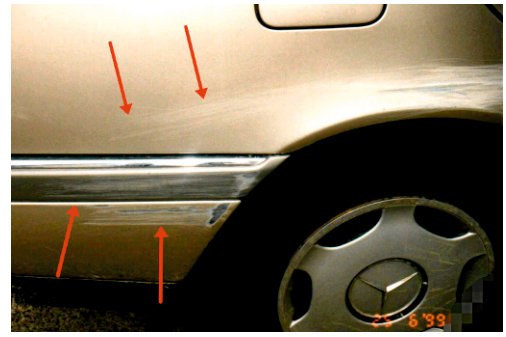


Bild A17-59 Spurenlage am Seitenteil rechts hinten sowie am hinteren Stoßfänger

Auch hätte mit den Spuren am Radlaufbogen rechts vorn (**Bild A17-57**) die Leitplanke die Form der Fahrzeugkarosserie annehmen müssen, was schon aufgrund erheblicher Struktursteifigkeitsunterschiede zwischen Fahrzeugkarosserien und Leitplanken nicht nachvollziehbar ist. Bemerkenswert war der Umstand, dass die beiden Einzelspuren aus Kontakten mit dem oberen und dem unteren Leitplankengurt am Seitenteil rechts hinten nicht einmal näherungsweise parallel verlaufen, sondern sich nach hinten zunehmend annähern (siehe rote Pfeilmarkierungen in **Bild A17-59**). Dies aus Kontakten mit einer Leitplanke konstanter Breite zu erklären, wie am angegebenen Schadenort vorhanden, wird nicht gelingen. Es kann bei dem angegebenen Schadenfall zwar zu einem wenig intensiven Leitplankenkontakt gekommen sein, die wesentlichen „Schäden“ wurden dann jedoch mit einem geeigneten Werkzeug erzeugt. Bemerkenswert ist,

dass die mit der Erstellung des Schadengutachtens beauftragte Person trotz deutlicher Auffälligkeiten alle Beschädigungen an dem Mercedes-Benz in seinem Gutachten berücksichtigte.

Wirtschaftlich interessant ist auch die wiederholte Verwendung von bereits beschädigten Fahrzeugteilen. Bei einer Auffahrkollision (Schadenfall 1) wurden an einem BMW 325i (Baureihe E36 - **Bild A17-60**) beide Scheinwerfer beschädigt, wobei sich die weiteren Betrachtungen auf den rechten Scheinwerfer (**Bild A17-61**) beziehen. Bei einem Schadenfall 2 etwa vier Monate später wurde ein BMW M3 (Baureihe E36) auch an der Front beschädigt (**Bild A17-62**).



Bild A17-60 Beschädigungen an der Fahrzeugfront des BMW 325i (Schadenfall 1)



Bild A17-61 Beschädigter rechter Scheinwerfer an dem BMW 325i (Schadenfall 1)



Bild A17-62 Beschädigungen an der Fahrzeugfront des BMW M3 (Schadenfall 2)



Bild A17-63 Beschädigter rechter Scheinwerfer an dem BMW M3 (Schadenfall 2)



Bild A17-64 Beschädigungen an der Fahrzeugfront des BMW 325i (Schadenfall 3)

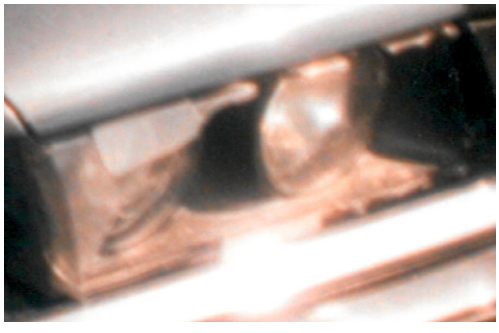


Bild A17-65 Beschädigter rechter Scheinwerfer an dem BMW 325i (Schadenfall 3)

In den Bildern zum Schadengutachten wird ein beschädigter rechter Scheinwerfer gezeigt (**Bild A17-63**), der exakt die selben Bruchlinien wie zum Schadenfall 1 aufweist (**Bild A17-61**), wobei beim Schadenfall 2 ein größerer Glassplitter von der Scheinwerferverglasung fehlt. Etwa zwei Wochen später wird nun wiederum der BMW 325i aus dem Schadenfall 1 bei einem Schadenfall 3 beschädigt, diesmal jedoch streifend an der rechten Fahrzeugseite (**Bild A17-64**).



Bild A17-66 Beschädigungen an der Fahrzeugfront des BMW 320i (Schadenfall 4)



Bild A17-67 Beschädigter rechter Scheinwerfer an dem BMW 320i (Schadenfall 4)

In der Reparaturkostenkalkulation zum Schadengutachten wird auch die Erneuerung des rechten Scheinwerfers berücksichtigt, der mit dem Bildmaterial zum Schadengutachten auch in beschädigtem Zustand gezeigt wird (**Bild A17-65**). Mit dem Bildmaterial zum Schadenfall 3 wird nun wiederum ein Schadenbild an dem rechten Scheinwerfer erkennbar, das exakt die selben Bruchlinien zeigt, wie bei den Schadenfällen 1 (**Bild A17-61**) und 2 (**Bild A17-63**).

Etwa fünf Monate später erleidet ein BMW 320i der Baureihe E36 einen Kleinstanstoß (Schadenfall 4) an der Fahrzeugfront (**Bild A17-66**). Die wesentliche Beschädigung findet sich hier am rechten Scheinwerfer des Fahrzeugs, wie mit dem Bildmaterial zum Schadengutachten dargestellt wird (**Bild A17-67**). Wird nun das Bildmaterial zu den bekannten Schadenfällen 1 bis 4 analysiert, wird schnell deutlich, dass die Bruchlinien an der Verglasung des rechten Scheinwerfers dieselben Merkmale zeigen. Auch ist zwischen den Schadenfällen 3 und 4 wiederum ein größerer Glassplitter abhandengekommen. Demzufolge wurde innerhalb eines Zeitraums von etwa zehn Monaten der aus dem Schadenfall 1 beschädigte rechte Scheinwerfer mindestens dreimal umgebaut und abgerechnet (Ersatzteilpreis ohne Ein- und Ausbau etwa 250 Euro netto), wobei drei verschiedene Fahrzeuge der Baureihe BMW E36 beteiligt waren.

4 Daten und Informationen

Die Vorgehensweise bei der Datenerhebung im Rahmen der Schadenaufklärung basiert auf der diesbezüglichen Vorgehensweise bei der klassischen Unfallrekonstruktion. Somit wird zur Vermeidung von Wiederholungen zunächst auf die Ausführungen im Kapitel A2 „Unfallaufnahme und Datenerhebung“ verwiesen. Aufbauend hierauf sind im Rahmen der Schadenaufklärung weitere, die Spezifik der Schadenaufklärung tangierende Vorgehensweisen relevant.

4.1 Auswertung der Unterlagen

Für die Fallbearbeitung ist von besonderer Bedeutung, dass der Auftraggeber eine vollständige Schadenakte mit Originalbildmaterial (konventionell oder digital) zur Verfügung stellt. Dies ermöglicht dem Techniker einen umfassenden Überblick über die Fallgestaltung.

4.2 Weitere Informationen zum Geschehensablauf

Ohne detaillierte Kenntnis zum Geschehensablauf sind technische Betrachtungen zu einem angegebenen Schadenereignis nicht möglich. In Schadenanzeigen, Fragebögen für Anspruchsteller, ergänzenden Fragebögen und ähnlichen Unterlagen werden Informationen meist nicht in ausreichendem Umfang wiedergegeben. Auch wird in der Versicherungswirtschaft zunehmend dazu übergegangen, Informationen zu einem angegebenen Schadenereignis nur noch telefonisch entgegenzunehmen, wobei auf das Ausfüllen schriftlicher Unterlagen dann gänzlich verzichtet wird (z. B. Schadenanzeige, Fragebogen für Anspruchsteller). Zur Beschaffung weiterer, insbesondere notwendiger Informationen haben sich Gespräche zum Schadenhergang mit den Beteiligten zeitnah nach dem angegebenen Schadenereignis am angegebenen Schadenort bewährt. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass sofort auch auf entsprechende Besonderheiten der Schadenörtlichkeit reagiert werden kann. Liegen Schadenort und Aufenthaltsort des/der Beteiligten und/oder Zeugen zu weit auseinander, kann ersatzweise unter Verwendung von aussagefähigem Bild- und/oder Videomaterial ein Gespräch zum Schadenhergang auch an einem anderen Ort durchgeführt werden. Eigene Erkenntnisse des Bearbeiters aus eigener Besichtigung der Schadenörtlichkeit sind notwendig. Sachverhalte, die erfragt werden sollten, sind Angaben:

- zum Wetter sowie zu den Fahrbahnverhältnissen,
- zu den Fahrtrichtungen der beteiligten Fahrzeuge bzw. Kollisionsobjekte,
- zu den unmittelbar vor der Kollision/den Kollisionen gefahrenen Geschwindigkeiten,
- zu den Reaktionen und Abwehrhandlungen vor der Kollision/den Kollisionen,
- zum engeren Kollisionsbereich,
- zu den Reaktionen und Abwehrhandlungen nach der Kollision/den Kollisionen,
- zu den Endlagen der Kollisionsobjekte,
- zu den technische Besonderheiten an den beteiligten Fahrzeugen/Kollisionsobjekten sowie
- zur Besetzung/Beladung der beteiligten Fahrzeuge.

Die Dokumentation dieser Informationen kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. So kann zusammen mit den Beteiligten ein Fragebogen ausgefüllt werden. Als sehr hilfreich haben sich beispielsweise Modellfahrzeuge erwiesen, mit denen die Beteiligten verschiedene Situationen des geschilderten Geschehensablaufs darstellen können. Von den einzelnen Situationen wird dann jeweils ein Foto bzw. eine Videosequenz gefertigt. Hierbei geht es vorrangig um prinzipielle Darstellungen [5]. Die Persönlichkeitsrechte der Beteiligten müssen beachtet werden.



Bild A17-68 Darstellung eines Versicherungsnehmers zur Fahrzeuganordnung bei Kollision und auch zu den kollisionsursächlichen Endlagen

Bild A17-68 verdeutlicht exemplarisch die Angaben eines Versicherungsnehmers, der mit seinem Fahrzeug, einem älteren und wenig wertigen Pkw (gelbes Fahrzeug in der Abbildung), gegen die rechte Seite eines hochwertigen Pkw (AST-Fahrzeug; grünes Fahrzeug in der Abbildung) gestoßen ist, der bei Kollision gefahren sein soll. Bei der dargestellten Situation soll es sich um die Kollisionsanordnung beider Fahrzeuge und gleichzeitig auch um die kollisionsursächlichen Endlagen der beteiligten Fahrzeuge handeln.

Im Rahmen der geschilderten Vorfahrtsverletzung lassen sich hier erste Widersprüche zu dem dargestellten Geschehen aufzeigen, da eine zur Kollisionsanordnung nahezu übereinstimmende Endlage des AST-Fahrzeugs einer signifikanten Eigengeschwindigkeit des AST-Fahrzeugs bei Kollision widerspricht. Diese Vorgehensweise erschwert späteres „Nachbessern" der Hergangsschilderung von Seiten der Beteiligten, z. B. im Rahmen eines Zivilprozesses. Um eine Abstimmung der Angaben der an einem angegebenen Schadenereignis beteiligten Personen vorzubeugen, sollten diese Gespräche mit den Beteiligten getrennt geführt werden.

Bei abgesprochenen Schadenereignissen besteht das geschilderte Geschehen regelmäßig aus einem Konglomerat aus Erlebtem und Fiktion. Dass es tatsächlich zur Kollision der Fahrzeuge bzw. Kollisionsobjekte kommt, ist meist eine Tatsache, die von den Beteiligten auch entsprechend geschildert werden kann. Da nun einerseits beherrschbare Situationen gefahren werden müssen und andererseits das Risiko hinsichtlich möglicher Körperverletzungen aber auch unbeabsichtigter Schäden minimiert werden soll, kommt es zu einer Konfliktsituation. Dies hat zur Folge, dass die Darstellungen zum Schadenhergang von Seiten der Beteiligten oftmals dramatisiert werden. Es muss schließlich ein Unfallgeschehen als Folge einer unvorhersehbaren und nicht beherrschbaren Verkehrssituation beschrieben werden. Einfachste Abwehrmechanismen – wie das Abbremsen – werden nur rudimentär geschildert. Dagegen werden drastische Lenkmanöver im Detail dargestellt. Da auf Seiten der Beteiligten regelmäßig die notwendigen mathematisch-physikalischen Kenntnisse fehlen, werden Widersprüche offenbar. Häufig wird es auch so sein, dass der bezeichnete Unfallort nicht ganzheitlich der Kollisionsort war. Es können an geeigneter Stelle Kollisionen in Vorbereitung der späteren Darstellung in der „Unfallstelle" vorbereitet werden. Nun ist es zudem so, dass fehlende Kenntnisse zu tatsächlichen Unfallabläufen auch zu Fehleinschätzungen bei der Kollisionsanordnung und den Geschwindigkeiten führen können. Dies mit der Folge, dass es zu unbeabsichtigten Schadenausweitungen kommt. Dies alles gilt es von Seiten des Technikers zu berücksichtigen.

So verdeutlicht **Bild A17-69** die Angaben der Fahrzeugführerin eines VN-Fahrzeugs, die aus einer Annäherungsgeschwindigkeit von etwa 50 bis 60 km/h durch ein von rechts erscheinendes Tier zu einer Ausweichbewegung nach links initiiert worden sei. Infolge dieser Ausweichbewegung sei es zu einer Streifkollision mit dem entgegenkommenden AST-Fahrzeug gekommen. Der Fahrzeugführer des AST-Fahrzeugs sei bei dem Versuch, dem entgegenkommenden VN-Fahrzeug nach rechts auszuweichen, streifend gegen die Leitplanke gestoßen.

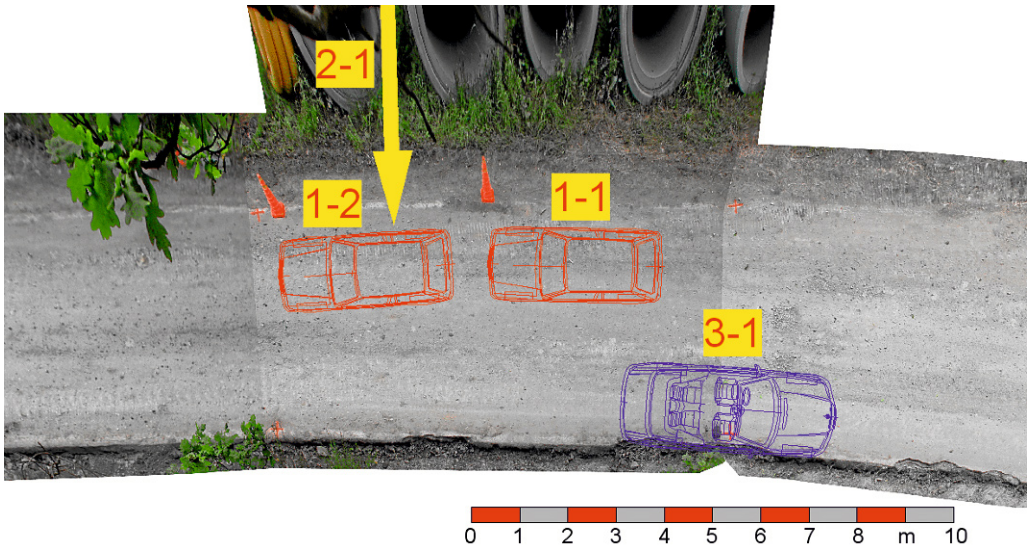


Bild A17-69 Angaben einer Versicherungsnehmerin zum Ablauf eines Schadenereignisses

Den Abstand zwischen ihrem Fahrzeug (**Bild A17-69** – Position **1-1**) und dem von rechts kommenden Tier (**Bild A17-69** – Position **2-1**) gab die Versicherungsnehmerin mit etwa 1,5 bis 2,0 m zu dem Zeitpunkt an, als sie das Tier erstmalig gesehen habe. Nach den Angaben der Versicherungsnehmerin erreichte das VN-Fahrzeug seine Endlage nach etwas mehr als einer Fahrzeuglänge (**Bild A17-69**– Position **1-2**), ohne dass die Fahrzeugführerin des VN-Fahrzeugs vor der Streifkollision mit dem AST-Fahrzeug habe eine Bremsung einleiten können. Gebremst habe die Fahrzeugführerin des VN-Fahrzeugs erst nach der Streifkollision mit dem AST-Fahrzeug. Allein das Abbremsen des VN-Fahrzeugs bis zum Stillstand aus einer Geschwindigkeit von 50 km/h würde über die Wegstrecke zwischen den Positionen **1-1** und **1-2** (**Bild A17-69**) einer mittleren Verzögerung von etwa 22 m/s² entsprechen. Das ist unrealistisch, zumal das VN-Fahrzeug zwischen dem Erkennen des von rechts kommenden Tieres und dem Erreichen der Endlage die gesamte linke Seite des AST-Fahrzeugs streifend kontaktiert haben soll.

Die Endlage des nicht mehr fahrfähigen AST-Fahrzeugs wurde von der Versicherungsnehmerin als direkt an der rechtsseitigen Leitplanke dargestellt (**Bild A17-69** – Position **3-1**). Die Fahrzeugführerin des VN-Fahrzeugs machte die vorstehenden Angaben zum Schadenhergang an der angegebenen Schadenörtlichkeit, in dem sie die entsprechenden Positionen jeweils mit entsprechender Deutlichkeit bezeichnete. Insbesondere wies sie darauf hin, dass sie mit ihrem Fahrzeug an der kompletten linken Fahrzeugseite des AST-Fahrzeugs entlanggefahren sei. Erlebtem Geschehen zuzuordnen sind sicherlich die Streifkollision zwischen den beiden beteiligten Fahrzeugen, die Streifkollision des AST-Fahrzeugs mit der Leitplanke sowie die Endlage des AST-Fahrzeugs an der Leitplanke. Die sonstigen Angaben zum Schadenhergang zeigen ausgeprägt fehlende Kenntnisse zu Unfallabläufen. Dieser Fall lässt die besondere Bedeutung erkennen, Untersuchungen direkt am Schadenort zu führen und sehr gut zu dokumentieren.

5 Bewertung der Daten und Anknüpfungsinformationen

Bei der Bewertung der Daten und Anknüpfungsinformationen werden aus technischer Sicht Betrachtungen zur Kompatibilität und Plausibilität, besser jedoch zu den Einzelkompatibilitäten angestellt. Die Reihenfolge der Fallbearbeitung sollte dann auch so sein, dass zuerst die Kompatibilität der Schäden untersucht wird. Im Weiteren können sich Betrachtungen zum Geschehensablauf anschließen. Dies auch deshalb, da bei den Untersuchungen zur Kompatibilität der Beschädigungen und Spurzeichnungen wesentliche Grundlagen für die Betrachtungen zum Geschehensablauf gelegt werden. Dies betrifft beispielsweise die Kollisionsanordnung.

6 Methoden zur Schadenaufklärung aus technischer Sicht

Prinzipiell können die Methoden der Schadenaufklärung aus technischer Sicht in **theoretische** und in **experimentelle** Untersuchungen unterteilt werden. Da im Rahmen der technischen Schadenaufklärung die modernen Methoden und Verfahren der Unfallrekonstruktion gleichwohl Anwendung finden, wird zur Vermeidung von Wiederholungen bezüglich der grundlegenden Betrachtungen und Darstellungen auf die entsprechenden Ausführungen im Kapitel A2 „Unfallaufnahme und Datenerhebung“ sowie im Kapitel A5 „Kinematik“ verwiesen.

6.1 Theoretische Untersuchungen

Theoretische Untersuchungen im Rahmen der Schadenaufklärung sind vorzugsweise die Anwendung verschiedenster Berechnungsverfahren, mit deren Hilfe Überlegungen zu den bekannten Daten und Anknüpfungsinformationen angestellt werden. Dies betrifft alle Verfahren der modernen Verkehrsunfallrekonstruktion.

6.2 Experimentelle Untersuchungen

Experimentelle Untersuchungen im Rahmen der Schadenaufklärung können in **prinzipielle** und **spezielle** Untersuchungen differenziert werden. **Prinzipielle** Untersuchungen werden durchgeführt, um allgemeine Erkenntnisse zu erlangen, die nicht zwangsläufig mit einem konkreten Schadenereignis im Zusammenhang stehen müssen. **Spezielle** Untersuchungen werden durchgeführt, um Betrachtungen zu einem speziellen, mithin konkreten Einzelfall anzustellen. Hierbei ist es für ein qualitativ hochwertiges Ergebnis von eminenter Bedeutung, dass der zu untersuchende Schadenfall in seiner Spezifik weitestgehend nachgebildet wird. Zur Vermeidung von Wiederholungen wird bezüglich der grundlegenden Betrachtungen und Darstellungen auf die entsprechenden Ausführungen im Kapitel A2 „Unfallaufnahme und Datenerhebung“, hier vornehmlich im Gliederungspunkt 8 „Experimentelle Untersuchungen“, verwiesen.

7 Gutachtenerstellung

Die technische Analyse muss bei der Auftragserteilung erkennbar im Vordergrund stehen. Also muss in einem ersten Schritt die Frage beantwortet werden, ob die Aufgabenstellung in das Fachgebiet des Bearbeiters fällt. Wird bereits innerhalb dieser Eingangsprüfung deutlich, dass eine technische Beweisführung nicht möglich sein wird, der Schwerpunkt damit möglicherweise im Umfeld der Beteiligten liegt, die z. B. mehrfach wechselseitig in kurzen zeitlichen Abständen an verschiedenen Schadenereignissen beteiligt waren, usw., sollte der Neigung, mit allen Mitteln auch eine technische Bewertung beizufügen, nicht nachgegeben werden.

Es ist zunächst unwesentlich, ob der Sachverständige vorprozessual und damit als „Privatgutachter“ tätig wird, und damit geneigt sein könnte, dem Auftraggeber und damit in der Regel dem Versicherer ein „genehmes“ Gutachten zu erstellen. Aspekte, die gegen die Beteiligten sprechen, besonders herauszuarbeiten und alle Aspekte, die für die Beteiligten sprechen zu unterschlagen, bietet dem Auftraggeber letztlich keine zuverlässige Entscheidungsgrundlage.

Gleiches gilt aber auch, wenn alle erdenklichen Eventualitäten in die Auswertungen einfließen, insbesondere dann, wenn diese durch die bekannten Anknüpfungsinformationen nicht gestützt werden. Da das Parteigutachten dem Auftraggeber eine verlässliche Grundlage zur Entscheidungsfindung sein soll, auf dessen Inhalt sich gegebenenfalls der Parteivortrag im Zivilverfahren gründet, müssen die Beweislastregeln eines Zivilprozesses bekannt sein und berücksichtigt werden. Hierbei muss auch hinsichtlich der einzelnen Begehensformen unterschieden werden.

Die Begehensformen abgesprochenes Schadenereignis, fingiertes Schadenereignis und fiktives Schadenereignis werden in der Rechtsprechung und der Literatur auch als „Gestellte Unfälle“ bezeichnet. Ob ein gestellter Unfall vorliegt, wird in der Regel über den Indizienbeweis geführt. Dazu hat der BGH (BGHZ 71, 339, [384] = VersR 78,862) entschieden, dass für die Überzeugungsbildung des Richters keine mathematisch lückenlose Gewissheit bestehen muss, die jeden möglichen Zweifel und jede denkbare Möglichkeit des Gegenteils ausschließt. Es reicht ein für das praktische Leben ausreichender Grad, der den Zweifeln Schweigen gebietet, ohne sie völlig auszuschließen.

Gerichtlich beauftragte Sachverständige lassen bisweilen die notwendige Sensibilität im Umgang mit diesen Besonderheiten in gestellten Unfällen innerhalb ihrer forensischen Aufarbeitung vermissen. Insbesondere dann, wenn es darum geht, den Geschehensablauf eines dargestellten Geschehens zu bewerten, werden über die Grenzen des Vertretbaren (Erträglichen) hinaus Zugeständnisse gemacht. Dies geht gelegentlich so weit, dass über den jeweiligen Parteivortrag hinausgehende Überlegungen angestellt werden, um den Fall „passend“ zu machen.

Für den provozierten Unfall muss die Beweislast differenzierter betrachtet werden, denn den Vorsatz, eine Kollision herbeizuführen, wird man dem Provozierer nicht beweisen können, außer er legt ein Geständnis ab. Auch die technische Analyse wird sich in diesen Fällen auf mögliche Differenzen hinsichtlich der Kompatibilität der Schäden beschränken, so denn das Fahrzeug aus (ähnlichen) Ereignissen vorgeschädigt wurde. Besondere Bedeutung erhält damit die Untersuchung des Geschehensablaufs. Hierdurch können über ein normales Maß hinausgehende Besonderheiten in der technischen Analyse herausgestellt werden, die letztlich zur Überzeugungsbildung des Richters ausreichen.

Bei der Beweisführung im ausgenutzten Unfall muss in aller Regel der Vollbeweis geführt werden. Zumindest bei Sachbeschädigungen ist das grundsätzlich Sache des Sachverständigen.

Grundsätzlich gilt, dass eine übermotivierte Begutachtung (hauptsächlich von Versicherern vorprozessual beauftragte Sachverständige) ebenso zu vermeiden ist, wie eine gegenüber der

besonderen Problematik manipulierter Schadenfälle wenig sensible Begutachtung (hauptsächlich von Gerichten beauftragte Sachverständige). Eine objektive und neutrale Begutachtung ist anzustreben, sowohl für vorprozessual als auch für gerichtlich beauftragte Sachverständige.

Es muss dennoch fast intuitiv die richtige Mischung zwischen rationaler Analyse – also nötiger Distanz – und subjektiver Einschätzung gefunden werden. Rein emotional ist eine Schadenaufklärung unmöglich, aber auch rein rational fehlt etwas. Um der komplexen Problematik der Schadenaufklärung gerecht zu werden, bedarf es durchaus einer Portion Einfühlungsvermögen.

Die unterschiedlichen Begehensformen aber auch Beweislastverhältnisse erfordern methodische Vorgehensweisen. Zunächst muss Klarheit geschaffen werden, welche Unterform der Beauftragung tendenziell zugrunde liegt, soweit sich dies nicht bereits aus dem Auftrag ergibt.

Die Begehensformen abgesprochenes Schadenereignis, fingiertes Schadenereignis und fiktives Schadenereignis setzen eine vorherige Abstimmung der beteiligten Personen untereinander voraus. Das Unfallopfer des provozierten Unfalls, also der Versicherungsnehmer oder der Fahrzeugführer des haftpflichtversicherten Fahrzeugs, ist nicht in das Geschehen eingeweiht, hat oftmals nicht einmal bemerkt, dass es in eine Falle gelockt wurde.

Auch bei dem ausgenutzten Unfall kann der Fahrer des haftpflichtigen Fahrzeugs gelegentlich eine wichtige Hilfestellung geben, wenn es um das Ausmaß der Beschädigungen geht. Selbst skizzierte Schadenmerkmale in einer Unfallmitteilung der Polizei können Lösungsansätze bieten, wenn der begutachtete Schaden deutlich darüber hinausgeht. Es sind aber auch Fälle bekannt geworden, in denen selbst der Anspruchsteller unwissend war, soweit über Abtretungen Rechungsbeträge zu nicht vollständig durchgeführten Reparaturen oder nicht erfolgten Anmietungen von Unfallersatzfahrzeugen direkt beim Versicherer eingefordert wurden.

Es zeigt sich damit, dass zunächst eine eingehende Aufarbeitung der vorgelegten Unterlagen erforderlich ist. Um sich in einen Verdachtsfall insbesondere bei gestellten Unfällen einzuarbeiten, haben sich auch Internetrecherchen als durchaus probates Mittel erwiesen, sei es, dass sich der Bearbeiter zunächst einmal ein Luftbild von der Unfallstelle beschafft und/oder zusätzlich Wohnorte der Beteiligten einbezieht. Erfahrungsgemäß hat sich bei der Schadenaufklärung die nachfolgende Vorgehensweise bewährt, wobei die Aufzählung keine zeitliche Reihenfolge der Bearbeitung beinhaltet:

- Besichtigung, Dokumentation und Vermessung aller Fahrzeuge bzw. Kollisionsobjekte sowie der Unfallstelle bzw. Schadenörtlichkeit,
- detaillierte und möglichst zeitlich getrennte Besprechung des Schadenhergangs mit allen Beteiligten, wenn möglich an der Unfallstelle bzw. Schadenörtlichkeit, sowie
- Beschaffung weiterer Informationen, z. B. Internetrecherche.

Tendenziell passen die Beschädigungen und Spurzeichnungen. Die Komplexität von manipulierten Schadenfällen erfordert aber, über die Frage nach der Schadenzuordnung hinausgehend, dem gesamten Geschehensablauf besondere Bedeutung beizumessen. Dabei gewinnt das nichttechnische Umfeld eines Schadenfalles zunehmend an Bedeutung. Bei der Erstellung von Gutachten im Bereich Schadenaufklärung sollte dennoch die technische Bewertung der Sachverhalte im Vordergrund stehen. Im Bereich der Schadenaufklärung ist es für den Auftraggeber aber ebenso unverzichtbar, Informationen zu erhalten, die außerhalb der technischen Bewertung liegen. Werden innerhalb der Sachverhaltsermittlung Informationen erlangt, die beispielsweise das Umfeld der Beteiligten betreffen, sollte dies als Sachdarstellung in einem gesonderten Abschnitt des Gutachtens weitergegeben werden. Allerdings dürfen daraus resultierende subjektive Bewertungen nicht mit einfließen. Sofern diesbezügliche eine Weitergabe gewünscht ist, muss diese separat erfolgen.

Bei den technischen Bewertungen ist der Stand der Technik zu berücksichtigen. Der Stand der Technik ist eine Technikklausel und stellt die technischen Möglichkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, basierend auf gesicherten Erkenntnissen von Wissenschaft und Technik dar [9].

Es sind die Methoden und Verfahren der modernen Verkehrsunfallrekonstruktion anzuwenden. Grundsätzlich sind Bewertungen in einem Gutachten nachvollziehbar und mit einer allgemein verständlichen Begründung vorzunehmen. Notwendig, aber in der anzutreffenden Gutachterpraxis noch lange nicht selbstverständlich, ist, dass sich in Gutachten folgende Angaben finden, mithin sich Gutachten also auch an den allgemein gültigen Anforderungen an wissenschaftliche Ausarbeitungen orientieren müssen:

- zu der verwendeten Literatur,
- zu der verwendeten Technik (z. B. Fotoausstattung und Messmittel) und
- zu den verwendeten Programmen (z. B. Photogrammetrie- und Simulationsprogramme).

Literatur

[1] Umfrage Versicherungsbetrug: Studie: durchgeführt von der GEWIS im Auftrag der Direct Line Versicherung: September 2004 (www.gewis.de)
[2] GDV (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.); Versicherung und Verkehr (www.versicherung-und-verkehr.de)
[3] http://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsunfall, 01.09.2014
[4] Kramer, Florian; Brösdorf, Klaus-Dieter; Leithold, Lutz; Jakubasch, Kurt Kompatibilität: eine Möglichkeit der Verifizierung von Anknüpfungsbedingungen bei Straßenverkehrsunfällen: VKU Verkehrsunfall + Fahrzeugtechnik: Heft 2/2006 (www.all4engineers.com)
[5] Danner, Max, Halm, Johannes: Technische Analyse von Verkehrsunfällen: Eurotax International AG: 1994
[6] Carat-Computer Aided Reconstruction of Accidents in Traffic, Computergestützte Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen, IbB Forensic Engineering Association, Burgen, Germany (www.ibb-forensic.de)
[7] PC-Crash-Programm zur Simulation von Verkehrsunfällen: DSD Dr. Steffan Datentechnik: Linz, Austria (www.dsd.at)
[8] Analyzer Pro-Software für die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen, DWG Dr. Werner Gratzer, Oberndorf, Austria (www.analyzer.at)
[9] http://de.wikipedia.org/wiki/Stand_der_Technik, 01.09.2014

Danksagung

Für die fachkundigen Hinweise der Kollegen Dipl.-Ing. Alexander Gerlach, Joachim Haut, Matthias Martinsohn, Dipl.-Ing. Jörg Schröder, Ing. Jürgen Veith, Dipl.-Ing. Andre Reichelt, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Sitterle, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Nolopp, Dipl.-Ing. (FH) Frank Hippe, Michael Weber (Trier) sowie Herrn Rechtsanwalt Dr. Werling, Herrn Rechtsanwalt Dr. Krischer, Herrn Klaus Prochorow, Herrn Bernd Krämer und Herrn Detlev Burgartz bei der Ausarbeitung dieses Kapitels bedanken sich die Autoren ganz herzlich.

A18 Insassensimulation

Dr. Andreas Moser, Dr. Hermann Steffan

1 Einleitung

Neben der Rekonstruktion der Bewegungen der Fahrzeuge vor und nach der Kollision sind in der Rekonstruktion eines Verkehrsunfalls oft weitere Fragestellungen hinsichtlich der Insassen zu beantworten. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen werden eigene Insassensimulationsmodule meist Mehrkörpersimulationsmodule wie Adams, Madymo, ATB und das Insassenmodul in PC-Crash eingesetzt. In der Automobilindustrie werden die Mehrköpersimulationsprogramme von der Finite-Elemente(FE)-Berechnung abgelöst (Nastran, PAM Crash, Radioss, Dyna3D u. a.), auf Grund der hohen Rechenzeit und der zeitaufwändigen Handhabung sind diese Modelle jedoch derzeit in der Unfallrekonstruktion noch nicht in der Praxis brauchbare Mittel.

Da die Insassenbewegung in erster Linie durch die Bewegung des Fahrzeugs und durch Kontakte im Fahrzeug bestimmt ist, wird die Insassensimulation meist nach der Simulation der Fahrzeugbewegung durchgeführt. Bei der Insassensimulation werden auch meist wesentlich aufwändigere Simulationsmodelle als bei der Fahrzeugsimulation verwendet, wodurch die Berechnungszeit für die Insassensimulation wesentlich länger ist als für die Fahrzeugsimulation. Für die Insassensimulation ist auch meist nur ein beschränkter Zeitbereich der Simulation der Fahrzeugbewegung von Interesse, so dass es sinnvoll ist, die beiden Simulationen getrennt voneinander durchzuführen. Damit kann die Berechnungszeit für die gesamte Untersuchung optimiert werden. Eine Rückwirkung des Insassen auf die Fahrzeugbewegung ist allerdings bei getrennter Simulation nicht möglich, kann jedoch in den meisten Fällen vernachlässigt werden.

2 Fragestellungen

Über die Insassensimulation können die folgenden Fragestellungen, die über die reine Bewegung der Fahrzeuge und deren Geschwindigkeiten hinausgehen beantwortet werden:

- ***Beurteilung von Verletzungsmechanismen:*** Durch Untersuchung des Bewegungsablaufes des Insassen werden Ursachen einer Verletzung mit einem Bewegungsablauf korreliert.
- ***Zuordnung von Verletzungen zum Unfallgeschehen:*** Hierbei wird untersucht in welcher Phase des Unfallablaufs die Verletzungen des Insassen verursacht wurden. Insbesondere bei Mehrfachkollisionen ist die Zuordnung von Verletzungen zu einem Unfallpartner von Interesse.
- ***Insassenbewegung:*** Der zeitliche Ablauf der Bewegung der Insassen wird untersucht.
- ***Insassenbelastung:*** Die Simulation der Insassenbewegung liefert Beschleunigungswerte von Einzelkörpern, Kontaktkräfte, Kontaktgeschwindigkeiten und Kräfte und Momente in den Gelenken. Über biomechanische Belastungsgrenzwerte kann das Verletzungspotenzial zeitlich und räumlich untersucht werden.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_18

- ***Wer war der Fahrer?*** Besonders bei nicht angegurteten und aus dem Fahrzeug geschleuderten Insassen können über die Insassensimulation Rückschlüsse auf die ursprüngliche Position der Insassen im Fahrzeug gezogen werden.
- ***Gurtbenutzung:*** Über die Insassensimulation kann die Insassenbewegung und Insassenbelastung mit und ohne Gurt simuliert werden, in weiterer Folge können tatsächliche Verletzungen der Insassen mit den Ergebnissen dieser Simulationen korreliert werden. Hiermit kann möglicherweise eine Entscheidung darüber getroffen werden, ob der Sicherheitsgurt benutzt wurde oder nicht.

3 Simulationsmodelle

Um die komplexe Bewegung des Insassen wiederzugeben, werden in der Simulation hauptsächlich Mehrkörpermodelle für die Modellierung des Insassen und des Sitzes verwendet. Damit ist es möglich den Insassen hinreichend detailliert darzustellen, um die komplexen Bewegungsvorgänge und Kontaktsituationen im Unfallablauf zu simulieren.



Bild A18-1 Insassenmodell in PC-Crash-Mehrkörpermodell

Als Kontaktmodelle zwischen Insassen und Fahrzeug sowie bei Kontakten zwischen Einzelkörpern des Insassen werden hauptsächlich steifigkeitsbasierte Kontaktmodelle verwendet. Bei diesen Kontaktmodellen ergibt sich die Kontaktkraft über die Eindringung eines Körpers in einen anderen oder eine Kontaktebene.

In der Mehrkörpersimulation können jedem Einzelkörper unterschiedliche Eigenschaften (Geometrie, Masse, Reibung, Kontaktsteifigkeit, Elastizität etc.) zugeordnet werden.

Einzelkörper können über Gelenke (kinematische Zwangsbedingungen) miteinander verbunden sein. Alle Körper, die über Gelenke miteinander verbunden sind, bilden ein System. In der Mehrkörpersimulation können beliebig viele Einzelkörper und Systeme simuliert werden. So bildet beispielsweise der Insasse ein System, ein weiteres System wird durch den Sitz gebildet und zusätzliche System können etwa den Innenraum nachbilden. [1], [2], [3], [4]

4 Simulation

Auf Grund der einfachen geometrischen Beschreibung werden die Einzelkörper üblicherweise als Hyperellipsoide mit den Hauptachsendimensionen a, b und c des Grades n dargestellt. Dies führt zu einer glatten Oberfläche jedes Einzelkörpers mit abgerundeten Kanten was die Kontaktberechnung vereinfacht.

$$P = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \tag{A18-1}$$

$$X(u,v) = a \cdot \cos^{\frac{2}{n}}(v) \cdot \cos^{\frac{2}{n}}(u) \tag{A18-2}$$

$$Y(u,v) = b \cdot \cos^{\frac{2}{n}}(v) \cdot \sin^{\frac{2}{n}}(u) \tag{A18-3}$$

$$Z(u,v) = c \cdot \sin^{\frac{2}{n}}(v) \tag{A18-4}$$

$$\vec{n}(u,v) = \frac{1}{a} \cdot \cos^{2-\frac{2}{n}}(v) \cdot \cos^{2-\frac{2}{n}}(u) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} +$$

$$\frac{1}{b} \cdot \cos^{2-\frac{2}{n}}(v) \cdot \sin^{2-\frac{2}{n}}(u) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \tag{A18-5}$$

$$\frac{1}{c} \cdot \sin^{2-\frac{2}{n}}(v) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$u \in [-\pi, \pi), \tag{A18-6}$$

$$v \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \tag{A18-7}$$

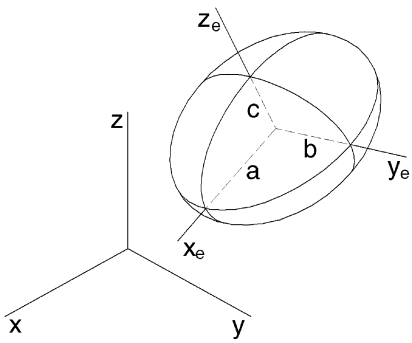


Bild A18-2 Einzelkörper mit lokalem und globalem Koordinatensystem (Inertialsystem)

Die Bewegungsgleichungen für jeden Einzelkörper ergeben sich aus dem Kräfte- und Momentengleichwicht zu jedem Zeitschritt der Simulation:

$$m_i \cdot \ddot{\vec{x}}_i = \sum_j \vec{F}_j \tag{A18-8}$$

$$\Theta_i \cdot \dot{\vec{\omega}}_i + \vec{\omega}_i \times \Theta_i \cdot \vec{\omega}_i = \sum_j \vec{M}_j \tag{A18-9}$$

$$\Theta_i = \begin{pmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{pmatrix} \tag{A18-10}$$

mit:

m_i	Masse des Einzelkörpers *i*
$\ddot{\vec{x}}_i$	Schwerpunktsbeschleunigung von Körper *i* im Inertialsystem
$\vec{F}_j$	Externe Kräfte die auf Körper *i* wirken (im Inertialsystem)
Θ_i	Trägheitstensor von Körper *i*
$\dot{\vec{\omega}}_i$	Winkelbeschleunigung von Körper *i* im Körperkoordinatensystem
$\vec{\omega}_i$	Winkelgeschwindigkeit von Körper *i* im Körperkoordinatensystem
$\vec{M}_j$	Externe Momente auf Körper *i* im Körperkoordinatensystem

In der Simulation wirken dann auf jeden Einzelkörper die externen Kräfte (Gravitation, Kontaktkräfte, Gelenkskräfte, Kräfte von Feder-/Dämpferelementen) und Momente, die sich aus den Kontaktkräften ergeben bzw. über Gelenke übertragen werden können, wodurch die Bewegung der Einzelkörper und des Systems bestimmt werden.

4.1 Gelenke

Über Gelenke können die Einzelkörper eines Systems miteinander verbunden werden. Für jedes einzelne Gelenk kann die geometrische Lage relativ zu den zwei zu verbindenden Körpern vorgegeben werden, weiter ist es möglich jedem Gelenk bestimmte Eigenschaften wie Freiheitsgrad (Kugelgelenk, Zylindergelenk, translatorisches Gelenk, fixe Verbindung), Reibung im Gelenkpunkt oder Rückstellmomente zuzuordnen.

Zusätzlich zu den Bewegungsgleichungen müssen in der Simulation auch die Gelenkgleichungen (kinematische Zwangsbedingungen) erfüllt sein.

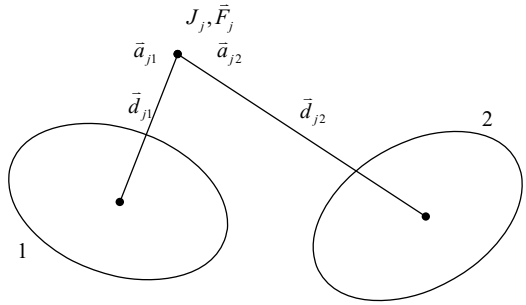


Bild A18-3 Gelenksdefinition

Die Gelenkgleichungen liefern dann die im Gelenk wirkenden Kräfte und Momente. Die folgenden Gleichungen zeigen die Gelenkgleichungen für ein System von Kugelgelenken ohne Momentenübertragung:

$$\begin{pmatrix} \vec{a}_{1,1} - \vec{a}_{1,2} \\ \vec{a}_{2,1} - \vec{a}_{2,2} \\ . \\ \vec{a}_{j,1} - \vec{a}_{j,2} \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} \vec{F}_1 \\ \vec{F}_2 \\ . \\ \vec{F}_j \end{pmatrix} \tag{A18-11}$$

mit:

$\vec{a}_{j,1}, \vec{a}_{j,2}$ Beschleunigung im Gelenkpunkt j
A $3j$ x $3j$ Matrix, die den Zusammenhang zwischen Gelenkkraft und Beschleunigung im Gelenkpunkt beschreibt
$\vec{F}_j$ Gelenkkraft im Gelenk j

4.2 Kontakte

In der Simulation können Kontakte zwischen Einzelkörpern eines Systems (z. B.: Unterarm mit Brust), zwischen zwei Systemen (Insasse – Sitz) oder mit Kontaktflächen (Insasse – Untergrund beim Verlassen des Fahrzeugs) auftreten.

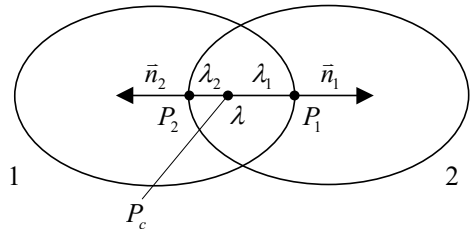


Bild A18-4 Ellipsoid-Ellipsoid-Kontakt

Die wirkende Kontaktkraft ergibt sich aus der Überdeckung der kontaktierenden Körper. Über die Einzelsteifigkeiten können die jeweilige Deformation und der Kontaktpunkt berechnet werden.

$$\vec{n}_1 = -\vec{n}_2 \tag{A18-12}$$

$$\lambda = \left| P_1 - P_2 \right| = \lambda_1 + \lambda_2 \tag{A18-13}$$

$$\vec{F}_{n1} = -\vec{F}_{n2} \tag{A18-14}$$

$$\vec{F}_{n1} = -\lambda_1 \cdot S_1 \cdot \vec{n}_1 \tag{A18-15}$$

$$\vec{F}_{n2} = -\lambda_2 \cdot S_2 \cdot \vec{n}_2 \tag{A18-16}$$

$$P_c = P_1 - \vec{n}_1 \cdot \lambda_1 = P_2 - \vec{n}_2 \cdot \lambda_2 \tag{A18-17}$$

Über die Kontaktreibung und die Relativgeschwindigkeit der Kontaktpunkte werden die Reibungskräfte zwischen den kontaktierenden Körpern berechnet. Somit kann auch ein Abgleiten zwischen zwei Körpern berechnet werden.

$$\mu_c = \min\left(\mu_1, \mu_2\right) \tag{A18-18}$$

$$\vec{F}_{t1} = \left|\vec{F}_{n1}\right| \cdot \mu_c \cdot \left\|\vec{v}_{Pc2} - \vec{v}_{Pc1}\right\| \tag{A18-19}$$

$$\vec{F}_{t2} = \left|\vec{F}_{n2}\right| \cdot \mu_c \cdot \left\|\vec{v}_{Pc1} - \vec{v}_{Pc2}\right\| \tag{A18-20}$$

mit:

$\vec{F}_{n1}, \vec{F}_{n2}$	Normalkontaktkraft auf Körper 1, 2
$\vec{F}_{t1}, \vec{F}_{t2}$	Tangentialkontaktkraft auf die Körper 1 und 2
μ_c	Kontaktreibung

Über die Relativgeschwindigkeit der Kontaktpunkte ist auch eine einfache Unterscheidung zwischen Kompressionsphase (die Kontaktpunkte bewegen sich aufeinander zu) und Restitutionsphase (die Kontaktpunkte entfernen sich voneinander) möglich.

Für die Steifigkeit *S* ist es vielfach auch möglich, eine Kurve für die Steifigkeit als Funktion des Deformationsweges vorzugeben. Man spricht in diesem Zusammenhang von Belastungs- bzw. Entlastungskurven als Materialeigenschaft. In der Kompressionsphase wirkt dann eine andere Steifigkeitsfunktion als in der Restitutionsphase. Damit können die elastischen und plastischen Eigenschaften der Kontaktkörper nachgebildet werden.

Bleibende Deformationen nach einem Kontakt werden in der Mehrkörpersimulation meist nicht berücksichtigt.

4.3 Crash-Puls

Bei der Verwendung der klassischen Stoßrechnung (Impuls- und Drallerhaltung) in der Fahrzeugsimulation liefert das Stoßmodell keine Informationen über die Beschleunigungen des Fahrzeugs während des Stoßes, da die Stoßzeit als unendlich klein angenommen wird. Dadurch ergibt sich eine Unstetigkeitsstelle im Geschwindigkeitsverlauf der an der Kollision beteiligten Fahrzeuge. Zur Bestimmung der Insassenbelastung durch die Kollision ist es hierbei sinnvoll eine Stoßdauer anzunehmen, um einen kontinuierlichen Verlauf der Geschwindigkeit zu erzielen.

Wird für die Stoßrechnung im Fahrzeugsimulationsprogramm ebenfalls ein steifigkeitsbasiertes Stoßmodell verwendet, dann ergibt sich das obige Problem nicht, da die Fahrzeugsimulation bereits Daten über die Dauer (Stoßdauer) und Größe (Beschleunigung) des Crash-Pulses liefert.

4.4 Rückhaltesysteme

Die Simulation von Rückhaltesystemen im Fahrzeug ist für die Insassensimulation meist von entscheidender Bedeutung.

Die Simulation des Sicherheitsgurtes erfolgt im einfachsten Fall über die Vorgabe eines Feder-/Dämpfersystems bei dem ein Teil mit dem Insassen und der andere Teil mit dem Fahrzeug verbunden ist. Komplexere Modelle (z. B.: Madymo) verwenden Finite-Elemente-Systeme für das Gurtband und modellieren auch die Umlenkpunkte des Gurtes. Damit können die Elastizi-

tät des Gurtes und auch die Reibung zwischen Gurt und Insassen besser nachgebildet werden. Über eine zeitabhängige Vorspannung kann der Gurtstraffer simuliert werden, ferner kann auch der Kraftbegrenzer über die Vorgabe einer maximalen Gurtkraft bis zum Maximalauszugsweg nachgebildet werden.

Die Simulation des Airbags ist nur mit komplexen FE-Modellen für den Airbag und Strömungsmodellen für die Entfaltung möglich (Madymo). Der Zündzeitpunkt sowie der Massenstrom in den Airbag können vorgegeben werden.

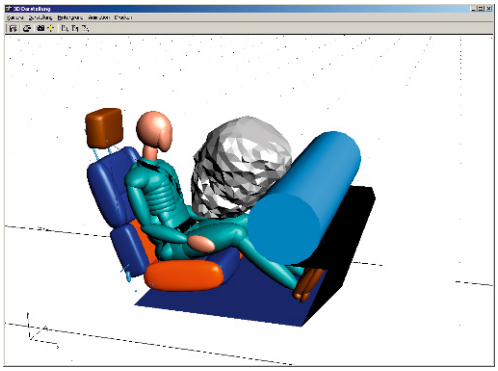


Bild A18-5 Madymo-Modell mit Insasse, Gurt und Airbag (Entfaltungsphase)

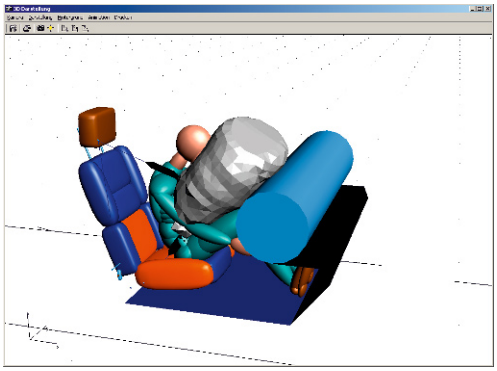


Bild A18-6 Madymo-Modell mit Insasse, Gurt und Airbag (Airbag entfaltet, Insassenkontakt)

4.5 Verfahrensschritte

Zur Simulation der Insassenbewegung in der Unfallrekonstruktion wird zuerst die Bewegung des Fahrzeugs rekonstruiert und simuliert. Diese Vorgehensweise hat sich in der Praxis wegen der geringen erforderlichen Rechenzeit in dieser Phase bewährt.

Nachdem die Bewegung der am Unfall beteiligten Fahrzeuge zufriedenstellend rekonstruiert wurde, wird die Insassenbewegung für den Zeitraum, der für die Insassenbelastung relevant ist, durchgeführt. Meist treten die höchsten Insassenbelastungen kurz nach dem Stoß (bis einige 100 ms) auf, in der weiteren Auslaufphase ist die Belastung der Insassen meist zu vernachlässigen.

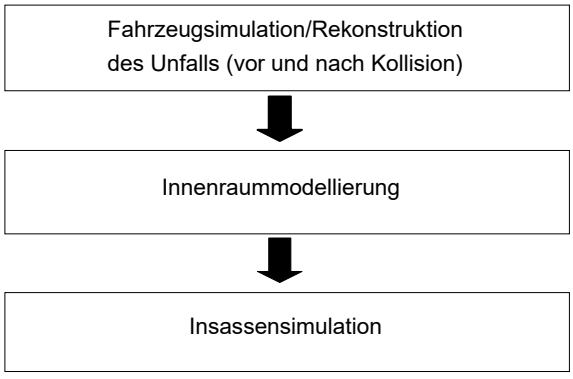


Bild A18-7 Verfahrensschritte für die Insassensimulation

Die Insassensimulation muss jedoch soweit vor der Kollision beginnen, dass Kontakte zwischen Insassen und Sitz einen stationären Zustand erreichen. In dieser Phase der Simulation sinkt ein Insasse, der zu Beginn der Simulation noch keinen Kontakt mit dem Sitz aufweisen darf, in den Sitz ein und ein stationärer Zustand zwischen Sitz und Insasse stellt sich ein. Erst wenn dieser Zustand erreicht ist, wird auch im Stoß die Kontaktreibung zwischen Sitz und Insassen richtig wiedergegeben.

Zu Beginn der Insassensimulation weisen Insasse, Sitz und Innenraum den gleichen Bewegungszustand (Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsrichtung, Rotation) wie das Fahrzeug auf. Sitz und Innenraum sind über Koppelelemente (Feder-/Dämpferelemente) oder starr mit dem Fahrzeug verbunden.

Bei der getrennten Simulation von Fahrzeug und Insassen kann die Rückwirkung der Insassen auf die Bewegung des Fahrzeugs nicht berücksichtigt werden, diese ist jedoch in den meisten Fällen zu vernachlässigen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt im effizienteren Bearbeitungsablauf (Zeitbedarf).

4.6 Innenraummodellierung

Die detailgetreue Modellierung des Innenraums ist für die Simulation der Bewegung des Insassen entscheidend. Bei der Innenraummodellierung kann der Innenraum entweder über Kontakt-Ellipsoide oder Kontaktflächen modelliert werden.

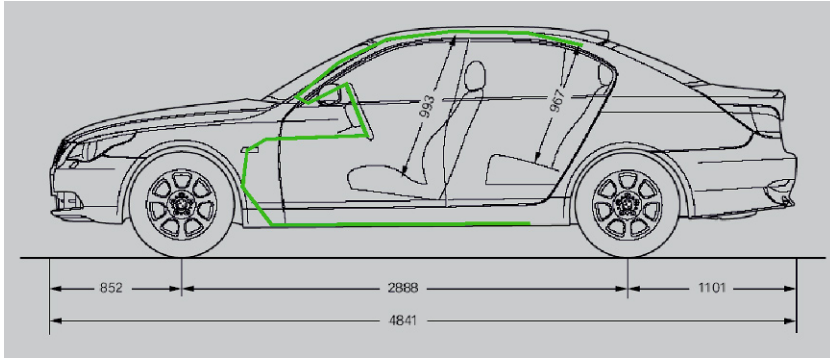


Bild A18-8 Innenraummodellierung über Kontaktflächen

Den Elementen des Innenraums können ebenfalls Kontaktparameter wie Steifigkeit, Reibung etc. zugeordnet werden. Wenn die genaue Bestimmung von Kontaktkräften und der Insassenbeschleunigungen beim Kontakt mit dem Innenraum gewünscht wird, müssen die Materialeigenschaften der Innenraumkomponenten bestimmt werden.

In vielen Fällen ist es in der Unfallrekonstruktion bei der Insassensimulation jedoch ausreichend Kontaktzonen und Kontaktgeschwindigkeiten zu bestimmen. In diesen Fällen müssen die Materialeigenschaften des Innenraums nicht detailliert bekannt sein. Die Bestimmung der Materialparameter ist für den Sachverständigen ein aufwändiger und schwieriger Vorgang und daher in der Praxis nur schwer durchführbar.

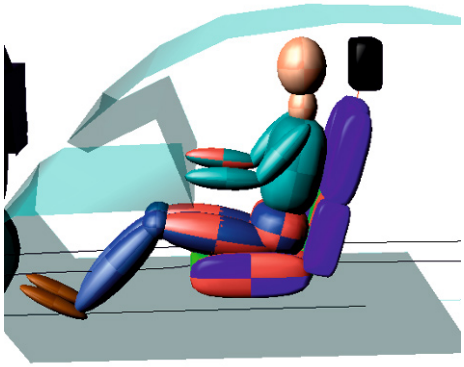


Bild A18-9 Innenraummodellierung über Kontaktflächen



Bild A18-10 Innenraummodellierung über Ellipsoide

5 Ergebnisse

Zusätzlich zur Bewegung des Insassen im Fahrzeug liefert die Insassensimulation auch detaillierte Daten (Wege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Winkel, Winkelgeschwindigkeiten, Winkelbeschleunigungen) jedes Einzelkörpers der Mehrkörpersysteme. Diese Daten können in Diagrammform dargestellt werden und liefern wichtige Informationen über die Belastungen der einzelnen Körperregionen. **Bild A18-11** zeigt einen Vergleich zwischen der Kopfbeschleunigung des Insassen bei einem Heckanprall gemessen in einem Versuch und den Ergebnissen der Insassensimulation mit Madymo.

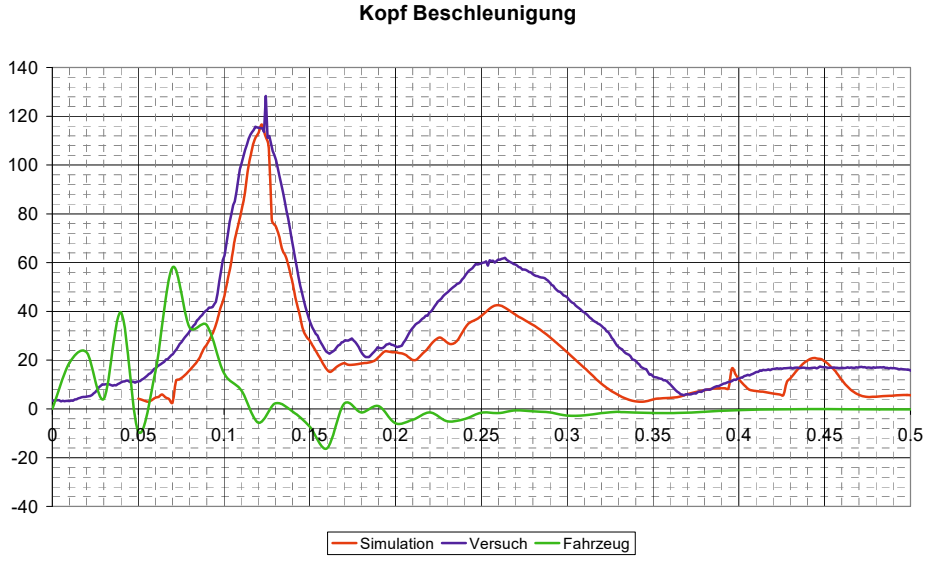


Bild A18-11 Vergleich Simulation und Versuch bei Heckanprall [2]

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe der Insassensimulation die reale Belastung sehr gut nachgebildet werden kann.

Literatur

[1] Moser, A., Steffan, H., Kasanicky, G.: The Pedestrian Model in PC-Crash – The Introduction of a Multi Body System and its Validation, SAE 1999-01-0445, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA

[2] Hermann Steffan, Andreas Moser, B. C. Geigl: A new approach to occupant simulation through the coupling of PC-Crash and MADYMO, SAE 1999-01-0444, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA

[3] H. Steffan, A. Moser, B. C. Geigl, Y. Motomiya: Validation of the coupled PC-CRASH-MADYMO occupant simulation model, SAE 2000-01-0471, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, USA

[4] MADYMO Users Manual V 5.3, TNO Road-Vehicles Research Institute 1997

A19 Biomechanik

Dr. Heinz Burg, Dr. Bertram C. Geigl, Dr. Florian Kramer, Dr. Andreas Moser, Dr. Hermann Steffan

1 Einleitung

Die Biomechanik befasst sich mit Funktionen und Strukturen von Bewegungsapparat und Belastungen von biologischen Systemen. Die Wahl der Methoden beschränkt sich hierbei nicht nur auf die Darstellung mechanischer Eigenschaften (äußere Biomechanik), sondern befasst sich auch zunehmend mit sensomotorischen Regelungsprozessen (innere Biomechanik).

Die Biomechanik für den Kraftfahrzeugingenieur beinhaltet die Kenntnis von den Belastungsgrenzen des menschlichen Körpers. Für den technischen Sachverständigen ist die Biomechanik ein Randgebiet der Unfallforschung. Bei der Konstruktion von Schutzeinrichtungen am und im Pkw zur Vermeidung von Verletzungen ist die Kenntnis von biomechanischen Zusammenhängen eine wichtige Grundvoraussetzung.

Prinzipiell unterscheidet man zwischen drei verschiedenen Verletzungsmechanismen durch „stumpfe Gewalt“:

- Kontaktverletzungen werden durch das punktuelle Einwirken von Kräften auf den Körper hervorgerufen,
- Beschleunigungsverletzungen sind Verletzungen, die durch das Auftreten von Beschleunigungen verursacht werden, und
- viskose Verletzungen resultieren aus plötzlich und sehr rasch einwirkenden mechanischen Beanspruchungen, z. B. Organkompressionen im Brust- und Abdominalbereich.

In der Biomechanikforschung unterscheidet man außerdem zwischen Verletzungs- und Schutzkriterien. Verletzungskriterien sind in aller Regel experimentell gewonnene mechanische Größen, wie Verzögerungen, Kräfte, Flächenpressungen, Drücke, Deformationen u. a., die Verletzungen an Körperregionen hervorrufen. Beim Überschreiten bestimmter Verletzungskriterien-Level sind dem entsprechende Verletzungsschwere-Grade am lebenden Körper die Folge, z. B. Knochenbrüche, Quetschung von Organen, Abriss von Blutgefäßen usf. Demgegenüber sind Schutzkriterien diejenigen Belastungsgrößen, die am Dummy gemessen bzw. am mathematischen Modell berechnet werden, und in Wechselbeziehung zu den Verletzungskriterien am lebenden menschlichen Körper stehen. Der Schutzkriterien-Level korrespondiert mit dem Verletzungskriterien-Level [1].

2 Grundlagen der Anatomie

Auch der Ingenieur, der sich mit Verkehrsunfällen befasst, sollte einige grundlegende anatomische Kenntnisse besitzen. Nicht zuletzt deswegen, um gegebenenfalls medizinische Gutachten (Verletzungsbeschreibungen, Diagnosen) lesen und verstehen zu können.

Die wichtigsten medizinischen Fachausdrücke und ihre Bedeutung sind in Teil D, Kapitel 3 zusammengestellt. Für den Ingenieur kann es sehr hilfreich sein, die beschriebenen Verletzun-

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_19

gen in grafische Darstellungen des menschlichen Körpers einzutragen. Dabei sollten die Knochenbrüche in ein Skelettbild aus Teil D, Kapitel 3 und die Weichteil- und Organverletzungen in einem sonstigen Bild des Körpers eingetragen werden, z. B. in einer Übersicht der Muskulatur. In den beiden genannten Bildern sind gleichzeitig die lateinischen Namen für die wichtigsten Skeletteile und Muskeln eingetragen.

3 Belastungsgrößen – Klassifizierung der Verletzungsschwere

Mit dem zunehmenden Wissen über den menschlichen Körper und mit der Zunahme von qualitativ hochwertigen empfindlichen Mess- und Berechnungswerkzeugen nimmt auch die Zahl der zu überprüfenden Parameter zu. Die heute gängigen Verletzungskriterien sind nachfolgend dargestellt:

- Kopfbeschleunigung (Wert mit einem Zeitfenster von 3 ms),
- Kopf-Schutzkriterium HIC bzw. HPC (Head Injury/Performance Criterion; gewichteter Zusammenhang zwischen Beschleunigungswert und Dauer der Einwirkung),
- Nackenbiegemoment (Flexion, Extension),
- Nackenkräfte (Scherkraft, Zugkraft),
- Brustbeschleunigung (Wert mit einem Zeitfenster von 3 ms),
- Brusteindrückung (gemessen am Sternum/Brustbein),
- Eindringung, Eindringgeschwindigkeit oder Beschleunigung der Brust- bzw. Rippeneindrückung,
- VC – Viskose-Kriterium (Viscious Criterion),
- TTI – Brust-Traumatisierungsindex (Thorax Trauma Index) beim Seitenaufprall,
- Kräfte und Momente an der Lendenwirbelsäule,
- Beckenbeschleunigung (Wert mit einem Zeitfenster von 3 ms),
- Oberschenkellängskraft (Normalkraft),
- Unterschenkelkraft (Biegung),
- NIC bzw. N_{ij} – Hals-Verletzungskriterium (Neck Injury Criterion).

3.1 Abbreviated Injury Scale (AIS)

Daten und Informationen über Unfälle und Verletzungen sind von herausragender Bedeutung für die Verkehrssicherheit, einerseits um Belastungsgrenzen aufzufinden und zu verstehen und andererseits um Fahrzeuge und deren Ausrüstung entsprechend ausstatten zu können und sie für die Insassen unfallsicher zu gestalten. Versuche, die mit Dummys durchgeführt werden, müssen immer wieder mit dem realen Unfallgeschehen verglichen werden. Um dies zu ermöglichen wird eine einfache, aussagekräftige Methode zur Klassifizierung der Verletzungen verwendet.

Zur Auswertung von Unfallereignissen wird jeder Verletzung ein Schweregrad nach der international gebräuchlichen Skala „AIS“ (Abbreviated Injury Scale [2]) zugeordnet.

Bereits 1952 veröffentlichte De Haven[6] eine Untersuchung über Flugzeugunfälle und versuchte, die Verletzungen zu bewerten. Er legte damit die Basis für weitere Untersuchungen und Erweiterungen einer Verletzungsskala. 1968 trafen sich Spezialisten aus dem Gebiet der Unfallverletzungen und beschlossen, ein Komitee für die Bewertung von Fahrzeugen und Verletzungen zu gründen. Daraus resultierte 1969 eine „Abbreviated injury scale". Diese wurde 1971 in der medizinischen Literatur veröffentlicht. Seit 1973 koordiniert die American Association for Automotive Medicine (AAAM) die Weiterentwicklung. Es folgte eine Veröffentlichung als Handbuch mit einer Beschreibung von über 200 Verletzungen und eine Reihe von Ergänzungen, Erweiterungen und Veränderungen. Den AIS-Werten ist in **Tabelle A19.1** der Verletzungsschwere-Grad zugeordnet.

AIS-Einteilung nach Körperregionen:

- Kopf (head),
- Hals (neck),
- Brust (thorax),
- Unterleib und Beckeninhalt (abdomen/pelvic contents),
- Wirbelsäule (spine),
- Gliedmaßen (extremities) sowie
- Körperoberfläche (external)

Tabelle A19.1 AIS-Definition

AIS	Verletzungsschwere-Grad
0	unverletzt (no injury)
1	gering, leicht, geringfügig (minor)
2	mäßig, mittelschwer (moderate)
3	schwer, nicht lebensgefährlich (serious)
4	bedeutend, lebensgefährlich, aber Überleben wahrscheinlich (severe)
5	kritisch (Überleben unsicher) (critical)
6	maximal, als praktisch nicht überlebbar gewertet (maximum injury virtually unsurvivable)
9	unbekannt (unknown)

Es sei hier darauf hingewiesen, dass die AIS-Werte einerseits als ein Maß für den Grad der wahrscheinlichen Lebensbedrohung der jeweiligen Verletzung aufgefasst werden können, diese Skalierung aber andererseits nichtlinear verläuft. Das bedeutet, dass eine Verletzungseinstufung mit dem Schweregrad AIS 3 bei weitem nicht halb so lebensbedrohend erscheint wie AIS 6 (vgl. **Bild A19-1** [1]).

Aus der Tatsache, dass Unfallopfer aufgrund mehrerer Verletzungen sterben, obwohl die einzelnen Verletzungen an sich nicht tödlich gewesen wären, wurde durch die Einführung des Maximum AIS (MAIS) und das ISS (Injury Severity Score) eingeführt. Der MAIS gibt die höchste Verletzungsschwere bei mehreren Einzelverletzungen an [1], während der ISS definiert ist als die Summe der Quadrate der höchsten AIS-Werte in jeder der drei am meisten verletzten Regionen des Körpers.

6 Hugh De Haven, M.D., Cornell University, Pionier der Unfallforschung

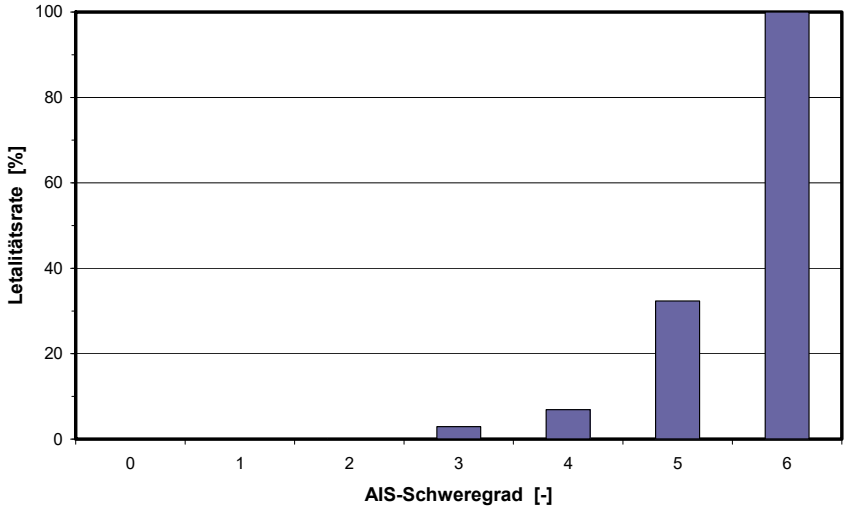


Bild A19-1 Zusammenhang zwischen AIS-Schweregrad und der Lebensbedrohung (nach [1])

Tabelle A19.2 AIS-Werte für typische Verletzungen einzelner Körperregionen

AIS	Kopf	HWS	Thorax	Extremitäten
1	Schädelprellung	Distorsion	Prellung	Hautabschürfung
2	Gehirnerschütterung	Dornfortsatzfraktur	einfache Rippenfraktur	Unterarmfraktur
3	Schädelbasisfraktur	Wirbelkörperfraktur	mehrfache Rippenfraktur	offene Schienbeinfraktur
4	Gehirnblutung (klein)	inkomplette Querschnittslähmung	Lungenriß mit Einblutung	Oberschenkelamputation
5	Gehirnblutung (ausgedehnt)	Querschnittslähmung unterhalb HWK 4	Herzperforation	
6	vollständige Zerstörung des Schädels	Querschnittslähmung oberhalb HWK 4	Thoraxzerquetschung	

3.2 Die Verletzungsbeeinträchtigungsskala IIS (Injury Impairment Scale)

Die AIS-Skala wird im Wesentlichen dazu verwendet, das Ausmaß und den Grad der Lebensbedrohung einer Verletzung einzuschätzen und zeigt weniger das Potenzial bzw. die Dauer einer solchen Verletzung für eine (sofern möglich) vollkommene Rekonvaleszenz oder mögliche Dauerschäden an.

Die IIS-Bewertung [3] wurde als ein Maßstab zur Einschätzung möglicher Beeinträchtigungen bzw. Langzeitschäden durch Unfallverletzungen eingeführt. Sie kann als Ergänzung zur AIS-Skala angesehen werden. Jede Verletzung muss, ausgehend von den Röntgenbildern und sonstigen Befunden, separat quantifiziert werden. Sehr viele Experten vertreten die Auffassung, dass dies der richtigere Weg ist, um die relative Bedeutung von verschiedenen Verletzungen im Fuß-, Knöchel- und Beinbereich einzuschätzen [4].

Für die IIS-Bewertung existieren folgende Beschreibungen:

IIS 0: Keine Beeinträchtigung bzw. Schaden

IIS 1: Leichte Beeinträchtigung: gewünschte Aktivitäten können mit geringen Einschränkungen durchgeführt werden

IIS 2: Mäßige Beeinträchtigung: sportliche Unternehmungen wie Tennis oder Basketball können nicht ausgeführt werden; Einschränkungen bei der Arbeit nur, wenn sie mit ständigem Stehen oder Gehen verbunden ist

IIS 3: Mittlere Beeinträchtigung der Gehfähigkeit (über längere Strecken); eventuell Schmerzmittel zur Behandlung notwendig; es kann zum überwiegenden Teil nur sitzende Arbeit bewältigt werden; es können nur sehr leichte Lasten getragen werden

IIS 4: Schwere Beeinträchtigung der Gehfähigkeit, die außerhalb der Wohnung nur mit Gehhilfen (Krücken) möglich ist; nur sitzende Arbeit möglich; regelmäßiger Schmerzmittelgebrauch zur Schmerzkontrolle

IIS 5: Sehr schwere Beeinträchtigung: Fortbewegung ohne Gehhilfen (Krücken) kaum möglich; Gebrauch schwerer Schmerzmittel, eingeschränkte Arbeitsfähigkeit

IIS 6: Totale Unfähigkeit das eigene Gewicht zu tragen (Rollstuhl); Arbeitsunfähigkeit; sehr starke Schmerzen über längeren Zeitraum

3.3 Der 3-ms-Wert

Der 3 ms-Wert gibt die maximale auf einen Körperteil wirkende Beschleunigung an, die für ein Zeitintervalls von 3 ms gemessen wird. Damit bleiben kurzzeitige Spitzen in der gemessenen Belastungskurve unberücksichtigt. Sie sind verletzungsmechanisch bis zu einem gewissen Grad vernachlässigbar.

3.4 Das Kopf-Verletzungskriterium HIC (Head Injury Criterion)

Im Allgemeinen wird der HIC-Wert angegeben, der die gemittelte resultierende Beschleunigung über einen Zeitraum von 36 ms (HIC_{36}) bzw. 15 ms (HIC_{15}) berücksichtigt:

$$\mathrm{HIC} = \max\left\{\left[\frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t1}^{t_2} a_{\mathrm{res}}(t)\,dt\right]^{2,5}(t_2 - t_1)\right\} \qquad \text{(A19-1)}$$

mit:

$a_{\mathrm{res}}(t)$ resultierende Kopf-Beschleunigung mit a [g] und

$t_{1/2}$ zeitliche Intervallgrenzen mit t [s], wobei $\Delta t = t_2 - t_1 \leq 0{,}015$ s bzw. 0,036 s

Bis zu einem Wert von etwa HIC = 1.000 sind noch keine schwerwiegenden Verletzungen zu erwarten. Dieser Wert ist heute als Schutzkriterium weit verbreitet. Er kann jedoch nur zur Beurteilung des Verletzungsrisikos infolge translatorischer Beschleunigungen herangezogen werden und ist daher nicht unumstritten. Einige Wissenschaftler sind der Auffassung, dass der Grenzwert der noch erträglich erscheinenden Belastung weit höher liegen müsste, z. B. bei HIC = 1.500. Darüber hinaus wird die alleinige Aussagekraft des HIC-Wertes angezweifelt. Rotationsgeschwindigkeit und -beschleunigung dürften eine ebenso wichtige Rolle spielen, da davon das Verhalten der Gehirnmasse abhängt. Bei zu hohen Winkelbeschleunigungen ist die Relativbewegung zwischen der trägen Gehirnmasse und dem Schädel für die Verletzung ausschlaggebend. Hierzu gibt es Angaben über Schutzkriterien für die Drehbeschleunigung zwi-

schen 7 und 25 krad/s² für eine Gehirnmasse von 1.300 g [1, 5]. Es lassen sich mit Einführung des GAMBIT (Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold) auch Aussagen darüber treffen, ob und in welchem Ausmaß ein Kontakt des Kopfes mit Fahrzeugkomponenten stattgefunden hat [1]. Das bei Seitenkollisionen angewandte Kopf-Schutzkriterium HPC (Head Performance Criterion) wird mit der gleichen Berechnungsvorschrift (A19-1) wie der HIC-Wert ermittelt.

3.5 Das Viskosekriterium VC (Viscous Criterion)

Das Viskosekriterium ist ein Verletzungskriterium für den Brustbereich. Der VC-Wert in m/s ist das Maximum des Momentanproduktes von Thorax-Eindrückung $D(t)$ und deren Eindrückgeschwindigkeit normalisiert auf die Brustabmessung SZ (beim Frontaufprall von vorne nach hinten gemessen und beim Seitenanprall die halbe Torsobreite).

$$VC = \max\left(\frac{\dot{D}(t)\cdot D(t)}{SZ}\right) \qquad \text{(A19-2)}$$

3.6 Das Hals-Verletzungskriterium NIC (Neck Injury Criterion)

Das Hals-Verletzungskriterium ist ein Verletzungskriterium für Halswirbelsäulen(HWS)-Verletzungen beim Frontal- und beim Heckanprall. Der NIC-Wert ergibt sich aus der Relativbeschleunigung a_{rel} der Beschleunigungen im oberen und im unteren Halsbereich (Kopf nahe dem ersten Halswirbel und am ersten Thorax-Wirbel) und der daraus integrierten Relativgeschwindigkeit v_{rel}. [23]

$$NIC = a_{rel}\cdot 0,2 + v_{rel}^2 \qquad \text{(A19-3)}$$

Der Schutzkriterien-Level liegt bei NIC = 15 m²/s².

4 Biomechanische Belastungsgrenzen

Die Kenntnis der biomechanischen Belastungsgrenzen bzw. der Schutzkriterien-Level ist für die Unfallrekonstruktion an sich von untergeordneter Bedeutung. Dennoch soll hier kurz darauf eingegangen werden. Es zeigt sich nämlich, dass Ergebnisse einer einzelnen Untersuchung als beweiskräftige Aussage herangezogen werden, z. B. von welcher Anprallgeschwindigkeit an, bei einem Fußgängerunfall mit Knochenbrüchen des Unterschenkels zu rechnen ist, oder bei welcher Kollisionsgeschwindigkeit für einen ungesicherten Pkw-Insassen bereits mit tödlichen Verletzungen gerechnet werden kann.

Beim Vergleich verschiedener Untersuchungen [6, 7 und 8] zeigt sich stets die große Streubreite der Belastungswerte. Die individuellen Aspekte wie Geschlecht, Alter, Konstitution spielen eine ebenso große Rolle wie die Art der Ermittlung der Grenzwerte.

Als Beispiel sei der Veröffentlichung von Barz et al. [9] entnommen, dass der Geschwindigkeitsgrenzwert für Unterschenkelfrakturen bei verschiedenen Autoren mit 10 km/h, 15 km/h, 25 km/h und über 30 km/h angegeben wird. Bei näherer Betrachtung der Untersuchungen erweisen sich z. B. unterschiedliche Anstoßrichtungen (frontal, seitlich, von hinten) als eine Ursache der unterschiedlichen Ergebnisse. Barz et al. kommen demnach in [9] zu folgendem

Schluss: „Bei Kenntnis der Ergebnisse dieser Untersuchungen lässt sich bei tödlich verletzten, jüngeren Fußgängern mit Unterschenkelfrakturen der untere Grenzwert der Anstoßgeschwindigkeit mit etwa 20 km/h einschätzen, wenn der Anstoß von hinten oder von hinten seitlich die Waden trifft.“ **Tabelle A19.3** zeigt eine Zusammenstellung der wesentlichen Belastungswerte.

Tabelle A19.3 Grenzbelastung des menschlichen Körpers bei teilweise direkter Fremdkörpereinwirkung [4, 8]

Körperteil	Mechanische Größe	Belastungsgrenzen
Ganzer Körper	a_x max a_x mittel	40 bis 80 g (3 ms) 40 bis 45 g (160 bis 220 ms)
Kopf/Gehirn	a_{res}	bis 300 g (sehr kurz) 80 g (> 3 ms) 60 g (> 45 ms)
	$\ddot{\alpha}$	1.800 bis 7.500 rad/s^2 7.500 bis 8.500 rad/s^2 bis 25.000 rad/s^2
	GAMBIT	1,0
Knöcherner Schädel	ax max, ay max	80 bis 300 g je nach Größe der Stoßfläche
Stirn	a_x max F_x	120 bis 200 g 4.000 bis 6.000 N
Halswirbelsäule	a_x max Thorax a_y max Thorax α_{max} Flexion α_{max} Extension M_b Flexion M_b Extension M_b F_{Scher} F_{Zug} F_{Druck}	30 bis 40 g 15 bis 18 g 80° bis 100° 80° bis 90° 190 Nm 57 Nm 370 Nm 1.800 bis 2.600 N 1.200 bis 2.600 N 1.100 bis 2.600 N 3.600 bis 5.700
Brustkorb	a_x max F_x s_x	40 bis 60 g (>3 ms) 60 g (< 3 ms) 4.000 bis 8.000 N 50 bis 76 mm
Becken	a_x max a_{res} max	50 bis 80 g (Becken) 80 g, falls α ≤ 20°
Oberschenkel	F_x	6.400 bis 12.500 N 9.070 N (0 ms) 7.560 N (>10 ms)
Knieverschiebung	s	15 mm
Schienbein	F_x Mx	2.500 bis 5.000 N 8.000 N 120 bis 170 Nm 225 Nm
Fußkontaktkraft	F	10 kN

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die großen Unterschiede in den Belastungswerten, vor allem bei der Abhängigkeit vom Alter, einen erheblichen juristischen Nebeneffekt haben: Ein Beschuldigter, der einen Radfahrer angefahren hat, wird in einem Verfahren z. B. nur wegen überhöhter Geschwindigkeit verurteilt, weil der Radfahrer ein junger Mann war, der außer ein paar blauen Flecken unverletzt blieb. Bei einem anderen Unfall wird ein alter Mann angefahren und erleidet erhebliche Verletzungen. Obwohl diese Verletzungen nicht einmal tödlich sein müssen, sind spätere Komplikationen, die zum Tod führen, nicht auszuschließen. Wenn dann die Kausalität zwischen dem Todeseintritt und dem Unfallereignis medizinisch festgestellt wird, wird der Beschuldigte wegen fahrlässiger Tötung verurteilt.

5 Beurteilung von Halswirbelsäulenverletzungen aus technischer Sicht

5.1 Allgemeine Ausführungen

Halswirbelsäulen-(HWS-)Verletzungen werden von Unfallopfern bei den verschiedensten Arten von Unfällen geltend gemacht. Durchaus häufig in der gerichtlichen Praxis ist die Beurteilung bei folgenden Kollisions- und Aufprallarten sowie den Fahrmanövern Frontal-, Seiten- und Heckkollision, Aufprall gegen feste Hindernisse sowie Brems- und Ausweichvorgänge oder Spurwechsel.

Ob eine HWS-Verletzung aus technischer Sicht erklärbar ist oder nicht, wird derzeit daran festgemacht, ob die Geschwindigkeitsänderung des Fahrzeugs, in dem die zu betrachtende Person sitzt, und die mittlere Beschleunigung des Fahrzeugschwerpunkts dieses Fahrzeugs eine bestimmte Größe überschritten haben. Diese Bewegungsgrößen sind ausreichend, wenn ein zentraler Stoß oder ein nahezu zentraler Stoß vorliegt, weil die dafür berechneten Werte auch in etwa für die Insassen gelten. Bei exzentrischen Stößen müssen die Geschwindigkeitsänderung und die mittlere Beschleunigung für die Sitzposition der Insassen berechnet werden, was ungleich komplizierter ist. Bei diesen Berechnungen kommen bestimmte physikalische Größen vor, die in **Tabelle A19.4** erläutert werden.

Tabelle A19.4 Physikalische Größen zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung beim Unfall

Bezeichnung	Formelzeichen	Erklärungen
Geschwindigkeiten vor der Kollision, translatorisch (v) und rotatorisch (ω)	v, ω	Vor der Kollision kann ein Fahrzeug stehen und das andere fährt, es können aber auch beide in Fahrt sein. Für die Berechnung spielen auch die Richtungen eine Rolle, unter denen sich die Fahrzeuge nähern. Fahrzeuge können vor der Kollision auch schleudern.
Geschwindigkeiten nach der Kollision, translatorisch und rotatorisch	v', ω'	Nach der Kollision haben beide Fahrzeuge Geschwindigkeiten, die sich von den Kollisionsgeschwindigkeiten unterscheiden. Die absolute Geschwindigkeit einer bestimmten Stelle des Fahrzeugs berechnet sich aus Überlagerung von translatorischer und rotatorischer Geschwindigkeit.

Geschwindigkeitsänderung	Δv	Die Geschwindigkeitsänderung beschreibt den Unterschied der absoluten Geschwindigkeit eines beliebigen Punkts des Fahrzeugs vor und nach der Kollision.
Energie Equivalent Speed	EES	Mit den EES-Werten wird das Ausmaß der Verformung der Fahrzeuge, also der Schadensumfang, beschrieben. Physikalisch betrachtet ist dies eine Kenngröße für die Verformungsenergie.
Trenngeschwindigkeit	$\Delta v_B'$	Vor der Kollision nähern sich die Stellen, an denen die Fahrzeuge kollidieren, einander an, nach der Kollision trennen sich diese Stellen mit einer bestimmten Geschwindigkeit, die als Trenngeschwindigkeit bezeichnet wird.
Mittlere Beschleunigung	$a_m = \Delta v / \Delta t$	Die Geschwindigkeitsänderung Δv kann berechnet werden, ebenso die Kollisionsdauer Δt. Die Kollisionsdauer ist auch aus Versuchen bekannt, hängt allerdings stark von der Unfallart ab. Aus dem Quotient $\Delta v/\Delta t$ berechnet sich die mittlere Beschleunigung.

5.2 Aufprallarten

5.2.1 Heckkollision

Wenn man das nachstehende Bild (Auffahrunfall) betrachtet, so wird deutlich, dass die Belastung des/der Insassen im gestoßenen Fahrzeug unter anderem von den Struktursteifigkeiten der Karosserien beider Fahrzeuge abhängen. Aus den Fahrzeugverformungen, die sich mit Hilfe der EES-Werte beschreiben lassen, werden die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge vor der Kollision, die Dauer des Stoßes und die mittlere Beschleunigung berechnet. Es gilt der allgemeine Zusammenhang „Kraft = Masse mal Beschleunigung“.

Durch die zeitlich veränderliche Kraft in der Kontaktzone der Fahrzeuge wird das vordere Fahrzeug beschleunigt. Der auf dem Sitz befindliche Insasse wird über die Rückenlehne und die Reibungskraft auf dem Sitzkissen „mitgenommen“. Die Eigenschaft der Rückenlehne, die sich wie eine Feder auswirkt, hat bedeutsamen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der auf die Insassen wirkenden Beschleunigung. Jeder Fahrzeugsitz hat unterschiedliche Eigenschaften, die man durch Messung der Kraft/Weg-Kennlinie ermitteln kann.

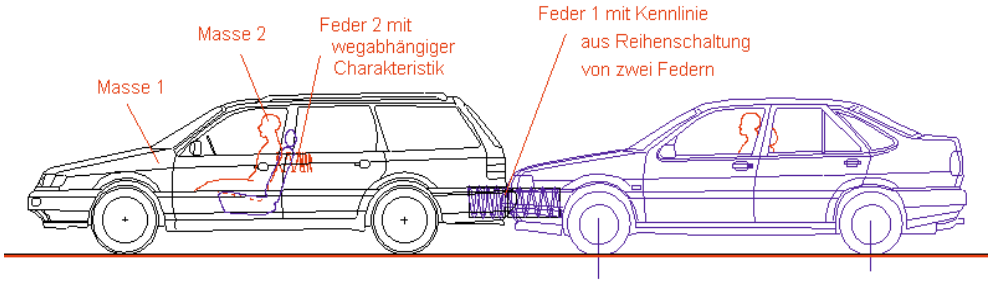


Bild A19-2 Physikalisches Modell eines Heckaufpralls

Die Oberkörperbewegung wird über die Halswirbelsäule und die Halsmuskeln auf den Kopf übertragen. Dabei kommt es aufgrund der Verschiebung (= Scherung) zwischen Oberkörper

und Kopf zunächst zu einer horizontalen Verschiebung der Halswirbelkörper. Danach erfolgt eine Biegung der HWS und eine daraus folgende Rotation des Kopfes. Schließlich prallt der Kopf gegen die Kopfstütze.

Dieser Vorgang ist in verschiedenen Arbeiten [19, 20] messtechnisch erfasst und mit Hochgeschwindigkeitskameras festgehalten worden. **Bild A19-3** zeigt die Bewegung eines Insassen zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei einem Versuch mit einer Geschwindigkeitsänderung von $\Delta v = 7{,}8$ km/h [21].

Aus dieser Darstellung ist deutlich ersichtlich, dass der Kopf bei etwa 120 ms gerade an der Kopfstütze anliegt und erst danach die Rotation des Kopfes einsetzt (die Kopfstütze sitzt dabei zu tief, was im Verkehrsgeschehen häufig beobachtet werden kann!). Nach 120 ms ist das Maximum der Oberkörperbeschleunigung bereits erreicht, meist sogar überschritten.

Bei schweren Unfällen mit Geschwindigkeitsänderungen von $\Delta v > 25$ km/h und mittleren Beschleunigungen über 10 g spielen die Hyperextension (Überstreckung) des Halses und das Hochrutschen an der Rückenlehne eine bedeutsame Rolle. In diesen Fällen haben Stellung und Festigkeit der Rückenlehne sowie Anordnung und Gestaltung der Kopfstütze einen bedeutsamen Einfluss auf die Verletzungsmechanik.

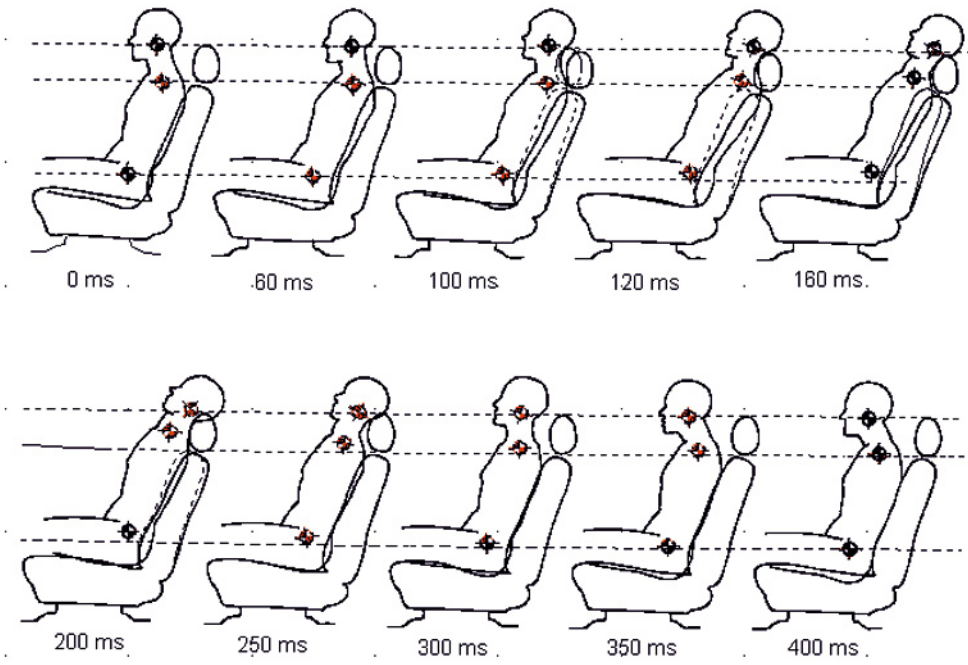


Bild A19-3 Kinematik des Oberkörpers bei Heckkollisionen

Bei Unfällen mit niedrigeren Geschwindigkeitsänderungen ($\Delta v < 25$ km/h) spielen Größe und Dauer des Stoßes eine große Rolle. Die Stoßdauer hängt primär von der Struktursteifigkeit der beteiligten Fahrzeuge (z. B. mit/ohne Anhängekupplung) und der Festigkeit der Sitzrückenlehne ab. Je härter die Fahrzeugstrukturen, desto kürzer wird die Stoßdauer und umso größer ist die wirksame Beschleunigung. Die im gefährdeten Bereich der HWS wirkenden Kräfte sind

umso größer, je größer die Beschleunigungsdifferenz zwischen Oberkörper und Kopf ist. HWS-Verletzungen können hier bereits eingetreten, bevor der Kopf die Kopfstütze erreicht hat. Bei Fahrzeugen, die ab etwa 1990 gebaut wurden, ist wegen steiferer Sitzrückenlehnen das Risiko von HWS-Verletzungen 2,7-fach höher ist als bei älteren Fahrzeugen [22]. Zudem wird dort festgestellt, dass bei Fahrzeugen mit Anhängerkupplung ein 22 % höheres Risiko für HWS-Verletzungen vorliegt.

5.2.2 Frontalkollision

Bei Frontalkollisionen, aber auch beim auffahrenden Fahrzeug bei Heckkollisionen können bei Insassen im verzögerten Fahrzeug ebenfalls Verletzungen der HWS auftreten. Für die HWS stellen sich grundsätzlich ein günstigerer Bewegungsablauf und eine prinzipiell geringere HWS-Belastung als bei Heckkollisionen ein.

Beim Frontalanprall wird die vorwärtsgerichtete Relativbewegung des Insassen im Wesentlichen durch die Gurte aufgefangen. Die indirekte Krafteinleitung unterhalb der Halswirbelsäule über den Thorax und die leichte Körperrotation aus dem Schultergurt ergibt – bei sonst gleichen Fahrzeugbelastungen – einen Bewegungsablauf, der mit geringeren Belastungen der einzelnen HWS-Wirbelkörper verbunden ist. Zudem ist die hintere Nackenmuskulatur, die den Kopf vor zu großer Vorwärtsbewegung schützt, wesentlich stärker ausgebildet als die vorderen Halsmuskeln. Der Harmlosigkeitsbereich für nicht unerhebliche HWS-Beschwerden nach frontalen Kollisionen liegt im „Normalfall“ bei Verwendung von Sicherheitsgurten bei etwa 15 km/h. „Normalfall“ heißt, dass die biomechanisch relevante Situation eines Insassen derjenigen Situation entsprechen muss, die bei der wissenschaftlichen Ermittlung dieses Bereichs vorgelegen hatte. Dies heißt im Wesentlichen, dass die betroffene Person nicht älter als etwa 50/55 Jahre sein darf, keine mehr als unerheblichen krankhaften oder traumatisch bedingten Veränderungen im Halswirbelsäulenbereich vorliegen und anlässlich der Kollision keine Körperposition relativ zum Fahrzeuginnenraum vorlag, die eine zusätzliche Belastung hätte ergeben können. Andernfalls ist die Harmlosigkeitsgrenze eventuell auch unterhalb von 15 km/h anzusetzen. Umgekehrt können Umstände, die das biomechanische Risiko verringern, wie z. B. eine besonders robuste Konstitution und/oder spezielle Sicherheitselemente wie beispielsweise der Airbag, die Harmlosigkeitsgrenze nach oben verschieben. Biomechanische Überlegungen sollten im Einzelfall nicht ohne medizinische Vorbildung vorgenommen werden; gegebenenfalls sind interdisziplinäre Gutachten unter Einbeziehung von Unfallmedizinern erforderlich.

5.2.3 Seitenkollision

Bei Seitenkollisionen ist zu beachten, dass die für sagittale Belastungen bei Auffahrunfällen bekannten und in vielen Gerichtsurteilen verwerteten Grenzen für den Eintritt einer HWS-Verletzung für laterale Belastungen bei seitlichen Kollisionen nicht gelten. Bei Seitenkollisionen können HWS-Verletzungen, insbesondere auf der stoßzugewandten Seite, bereits bei niedrigen Unfallschweren eintreten als bei Auffahrunfällen. Dies liegt primär daran, dass die translatorische Bewegungsmöglichkeit der HWS in seitlicher Richtung deutlich eingeschränkter ist.

In den in **Bild A19-4** und **Bild A19-5** dargestellten Bewegungsabläufen sind die Oberkörper-Bewegungen von Fahrer und Beifahrer während zweier Streifkollisionen in spitzem Winkel gegen die linke Seite des Versuchsfahrzeugs zu sehen. Es handelt sich um zwei Versuche zum Vergleich des Ausmaßes der Insassenbewegung. Im ersten Fall (**Bild A19-4**) ist die Geschwindigkeitsänderung in seitlicher Richtung etwa $\Delta v = 3$ km/h und im anderen (**Bild A19-5**) ungefähr $\Delta v = 9$ km/h.

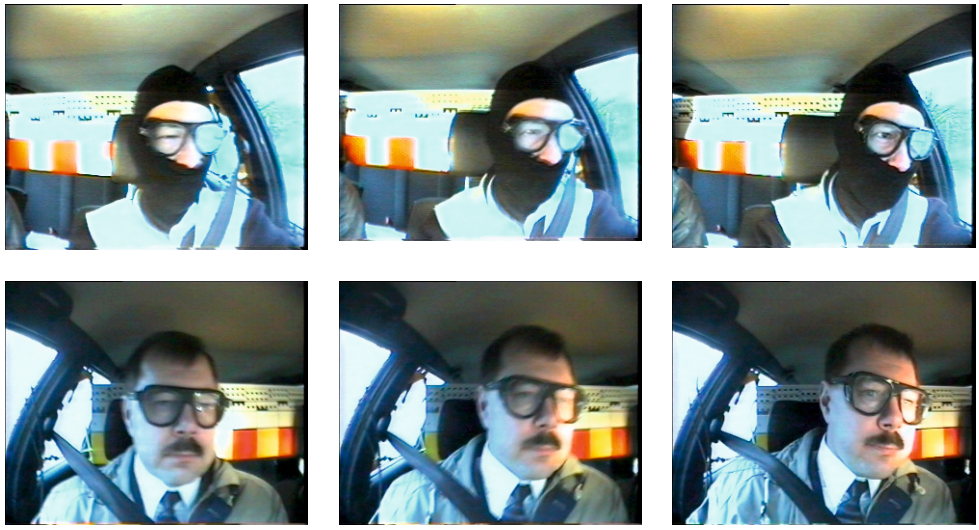


Bild A19-4 Bewegungsanlauf des Oberkörpers beim Fahrer (obere Bildreihe) und beim Beifahrer (untere Bildreihe) bei einer Seitenkollision $\Delta v = 3$ km/h

In der oberen Bildserie ist jeweils die Bewegung des Fahrers gezeigt, in der unteren die des Beifahrers. Die seitliche Bewegung des Fahrers wird durch das Anlegen der Schulter an der Fahrertür begrenzt, während sich der Kopf weiter bewegt. Er kann gegebenenfalls mit der Seitenscheibe in Berührung kommen, die gelegentlich dabei zerstört wird. Bei diesem Versuch wurden keine Beschwerden der Insassen beklagt.

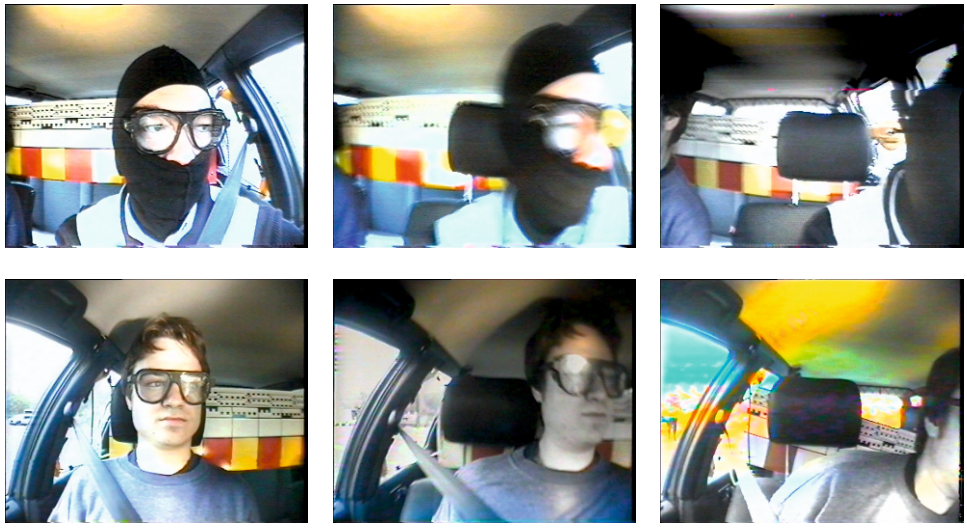


Bild A19-5 Bewegungsanlauf des Oberkörpers beim Fahrer (obere Bildreihe) und beim Beifahrer (untere Bildreihe) bei einer Seitenkollision $\Delta v = 9$ km/h

Bei dem in **Bild A19-5** dargestellten Versuch traten beim Fahrer keine Beschwerden auf. Dem gegenüber klagte der von der Kollision unvorbereitete Beifahrer über Kopfschmerzen und über drei Tage andauernde HWS-Beschwerden.

5.3 Belastungsgrenzen

Die Mechanismen, die zu HWS-Beschwerden oder HWS-Verletzungen führen, sind derzeit noch längst nicht vollständig aufgeklärt. Selbst bei dem am einfachsten zu betrachtenden Auffahrunfall ist nicht ganz klar, wie es zu den Beschwerden kommt. Zurzeit herrscht die Meinung vor, dass Druckwellen in den Blutgefäßen und in der Rückenmarksflüssigkeit kleinste, bisher durch Diagnosegeräte nicht nachweisbare Verletzungen erzeugen [23]. Es ist auch ein Bewertungskriterium (Neck Injury Criterion, NIC) vorgeschlagen worden, über dessen Höhe und Berechnungsweise aber noch Uneinigkeit besteht.

Hinzu kommt, dass Untersuchungen von Castro et al. [20] gezeigt haben, dass sogar Personen, denen man einen Auffahrunfall nur durch entsprechende Geräusche und Rollbewegung eines Fahrzeugs ohne Kollision vorgetäuscht hatte, über Beschwerden klagten. Daraus wurde geschlossen, dass alleine schon psychosomatische Reaktionen zu HWS-Beschwerden führen können. Aus der manuellen Medizin ist bekannt, dass eine „falsche“ (unphysiologische) Bewegung im täglichen Leben ausreicht, um HWS-Beschwerden zu erzeugen. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die bisherigen Untersuchungen von einer „normalen“ Kopfhaltung ausgegangen sind. Niemand weiß, was passiert, wenn z. B. ein Insasse zum Zeitpunkt des Auffahrunfalls den Kopf um 70 Grad zur Seite gedreht hat. Ob eine solche Kopfdrehung in einem konkreten Fall vorgelegen haben kann, muss vom Gericht, orientiert am allgemeinen Unfallablauf, entschieden werden.

Trotz alledem kann es nicht so sein, dass die bisherigen Untersuchungsergebnisse unbeachtet bleiben und weitere wissenschaftliche Ergebnisse abgewartet werden. Das bis heute Bekannte lässt jedoch die Aussage zu, dass die von einem Fahrzeuginsassen geklagten Beschwerden bei Überschreitung der weitgehend akzeptierten Grenzwerte auf den Unfall zurückgeführt werden können. Die Angabe einer Wahrscheinlichkeit, mit der dies der Fall ist, kann nicht erwartet werden, weil diese Wahrscheinlichkeit allenfalls die einzelne Person betrifft. Über deren Körperbau ist meist nichts Genaues bekannt und schon gar nicht sind mehrere Ereignisse bei dieser Person bekannt, aus denen eine Wahrscheinlichkeitsaussage ableitbar wäre.

Wenn es zur Aussage kommt, dass aus technischer Sicht eine HWS-Verletzung nicht zu erklären ist, weil die Grenzwerte nicht erreicht oder überschritten wurden, dann kann ein medizinisches Gutachten durchaus ein anderes Ergebnis liefern. Hierbei ist zu bedenken, dass alle Versuche der Sachverständigen zur Festlegung von Grenzwerten mit Versuchspersonen durchgeführt worden sind, die vorher wussten, dass sich eine Kollision ereignen würde. Außerdem ist zu bedenken, dass es sich bei der Beurteilung von Verletzungen nicht um ein technisches Problem handelt, sondern um ein medizinisches und dazu noch um eines aus einer speziellen medizinischen Fachrichtung. Wenn bei einem Unfall die Grenzwerte unterschritten wurden, dann ist primär der medizinische Sachverständige gefragt.

An sinnvollen Belastungsgrenzen, unterhalb denen bei europäischen Fahrzeugen HWS-Verletzungen aus technischer Sicht nicht mehr erklärt werden können, wurden unter den Randbedingungen normale Sitzhaltung, normale Körperkonstitution und keine krankhaften Veränderungen die in **Tabelle A19.5** dargestellten Unfallschwere-Kenngrößen definiert:

Tabelle A19.5 Zusammenhang zwischen HWS-Verletzungen und Unfallschwere-Graden

Aufprallart	Geschwindigkeitsänderung Δv	Mittlere Beschleunigung
Frontalkollision	15 km/h	40 m/s^2 bzw. 4 g
Heckkollision (Auffahrunfall)	HWS-Verletzung bei weniger als 11 km/h biomechanisch nicht erklärbar, Harmlosigkeitsgrenze bei 11 km/h	30 m/s^2 bzw. 3 g
Seitenkollision	Laterale Beweglichkeit der HWS ist am geringsten. Bei stoßzugewandten Insassen kommt es i. d. R. zu einem harten Stoß durch Kontakt zwischen Schulter des Insassen und Tür des Fahrzeugs; Kopfanprall bereits bei 5 km/h, bei stoßabgewandten Insassen ist zu prüfen, ob Rückschwingen erfolgen kann. Grenzwert unbekannt, vermutlich nicht wesentlich höher als bei stoßzugewandten Insassen.	Bisher keine Grenzwerte definiert. Der Grad des Überraschungeffekts bedeutsam.

5.4 Schweregrad der HWS-Verletzung und statistische Ergebnisse

Zum Schweregrad von HWS-Verletzungen werden in [19] Ausführungen zu deren Einstufung gemacht, die im medizinischen Fachbereich interdisziplinär untersucht und angewendet werden. Da in medizinischen Gutachten oftmals derartige Einstufungen vorgenommen werden und bei der technischen Begutachtung Berücksichtigung finden, sind sie in **Tabelle A19.6** zusammengefasst.

Tabelle A19.6 Schweregrade und Beschreibung von HWS-Verletzungen

Schweregrad	Verletzungsbeschreibung
I	Schmerzsymptomatik nicht über 72 bis 96 Stunden. Keine erfassbaren Veränderungen durch diagnostische Verfahren zu belegen.
II	Symptomdauer bis 3 Wochen nach Schadensereignis. Objektive Feststellung des muskulären Hartspannes und Schmerzauslösung unter physiotherapeutischer Behandlung.
III	Radiologisch objektivierbare Fehlstellung bis hin zum Ausmaß einer reversiblen Subluxation eines Bewegungssegmentes mit oder ohne neurologische Störungen.
IV a	Luxation oder Luxationsfraktur der HWS, gegebenenfalls kombiniert mit neurologischen Störungen.
IV b	Tödliches HWS-Beschleunigungstrauma.

HWS-Verletzungen, über die von betroffenen Personen berichtet bzw. die an ihnen beobachtet wurden [4], sind in **Tabelle A19.7** in absteigende Reihenfolge dargestellt.

Tabelle A19.7 Körperliche Beschwerden und Symptome bei HWS-Verletzungen

Körperliche Beschwerden	Psychische Beschwerden
Bewegungseinschränkung des Kopfes	Nervosität/Unruhe
Cephalgie (Kopfschmerzen)	Abnorme Müdigkeit
Nackenschmerzen	Frühes Erwachen wegen Schmerzen
Schulterschmerzen	Durchschlafschwierigkeiten
Schwindel	Innerlich gespannt und unruhig
Parästhesien (Gefühllosigkeit)	Schlafstörungen durch Schmerzen
Lichtempfindlichkeit	Einschlafschwierigkeiten
Benommenheit	Sozialer Rückzug
Sehstörungen	Weniger Initiative
Beklemmungsgefühle in der Brust	Tagsüber traurig/niedergeschlagen
Hörstörungen	Ängstlich/schreckhaft
Kreislaufstörungen	Seelische Schwere
Lärmempfindlichkeit	Plötzliches Weinen
Hitzeempfindlichkeit	Versagensängste
Schluckbeschwerden	Körperliche Schwere
Übelkeit	Suizidgedanken/Minderwertigkeitsgefühle

Literatur

[1] Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Vieweg-Verlag, Wiesbaden 2006

[2] Association for the Advancement of Automotive Medicine: The Abbreviated Injury Scale – AIS 2005. Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM), Des Plaine, IL (USA), 2005

[3] IIS, Injury Impairment Scale, Association of Advancement of Automotive Medicine, 1994.

[4] Steiner, K.: Neue Insassenschutzsysteme beim Frontalaufprall im Bereich der unteren Extremitäten, Dissertationsschrift, TU Graz 2001

[5] Fiala, E. et al.: Verletzungsmechanik der Halswirbelsäule, Forschungsbericht der Technischen Universität, Berlin 1970

[6] Färber, E., Gülich, H.-A., Heger, A., Rüter, G.: Biomechanische Belastungsgrenzen. Unfall- und Sicherheitsforschung, Heft 3, Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln 1976

[7] Biomechanik des Fußgängerunfalls, Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) Nr. 7

[8] Kramer, F.: Schutzkriterien für den Fahrzeug-Insassen im Falle sagittaler Belastung. Dissertation an der Technischen Universität Berlin. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 12, Nr. 137. Düsseldorf, Januar 1989

[13] Patrick, L.: Human Tolerance to Impact – Basis for Safety Design, SAE Paper No. 650171, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA. 1963

[14] BUROW, K.: …, 1974

[15] Appel, H., Färber, E., Heger, A.: Biomechanische Belastungsgrenzen. Forschungsbericht Nr. 194 im Auftrag der Volkswagenwerk AG, Technische Universität Berlin, 1975

[16] Mertz, J. M. et al.: Strength and Response of the Human Neck, Proceedings of the 15th Stapp Car Crash Conference, Coronado, CA, 1971
[18] Mertz, H. J.: Antropomorphic Test Devices. In Accidential Injury, Biomechanics and Prevention. Editors Nahum A.M., Melvin J.W. Springer-Verlag, 1993
[19] Moorahrend, U.: Die Beschleunigungsverletzung der Halswirbelsäule. Gustav Fischer Verlag, 1993.
[20] Becke, Castro, Hein, Schimmelpfennig: HWS-Schleudertrauma 2000 – Standortbestimmung und Vorausblick. NZV 2000, Heft 6
[21] Unfallversuche der AGU Zürich im Auftrag des SVV, EVU-Jahrestagung 2003 in Zürich
[23] Boström et al.: A Sled test Procedure Proposal to Evaluate the Risk of Neck Injury in Low Speed Rear Impacts using a new Neck Injury Criterion (NIC), Chalmers University Sweden, Paper Nr. 98-S7-O-07
[24] Bertram C. Geigl: „Whiplash“ Bewegung der Halswirbelsäule beim Heckaufprall, Dissertationsschrift, TU Graz 1997
[25] Appel, H., Krabbel, G.: Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion; Verlag Information Ambs GmbH; 1994
[26] Ulrich Seiffert, Lothar Wech: Automotive Safety Handbook, SAE International, Warrendale, Pa.
[27] Bernd Fachbach: Erhöhung der Fahrzeugsicherheit durch Bewegung der Sitzeinheit, Dissertationsschrift, TU Graz 1998
[28] Adomeit, D.: Neue Bewertungsgrößen für die Frontalaufprallsicherheit des gurtgesicherten Insassen, Dissertation TU Berlin 1980
[29] Walz, F.: Biomechanische Aspekte der HWS-Verletzungen, Orthopäde (1994) 23, 262–267
[30] Gratzer, W., Burg, H.: Analyse von Serienkollisionen und Berechnung der Insassenbeschleunigung im gestoßenen Fahrzeug, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1994, Heft 4 ff.
[31] Whitman, E. et al.: Analysis of Human Test Subject Kinematic Response to Low Velocity Rear End Impact. SAE SP-975, 1993
[32] Kallieris, Rizzetti, Mattern, Thunnissen, Philippens: Cervical Human Spine Loads During Traumatomechanical Investigations. IRCOBI Proceedings 1996
[33] Scientific Monograph of the Quebeck Task Force on Whiplash-Associated Disorders. International Journal for the Study of the Spine, 15. April 1995
[34] Das „Schleudertrauma“ der Halswirbelsäule. Castro, Kügelgen, Ludolph, Schröter. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1998
[35] Krafft, M. Folksam Research: A Comparison of Short- and Long-Term Consequences of AIS 1 Neck Injuries in Rear Impacts. July 1998

A20 Simulation und Animation

Dr. Heinz Burg, Dr. Andreas Moser, Dr. Hermann Steffan

1 Einleitung

In zunehmendem Maße werden bei der Rekonstruktion und Analyse von Straßenverkehrsunfällen komplexe Rechenprogramme eingesetzt. Damit in Verbindung stehen neue Fachbegriffe und Verständigungsprobleme zwischen den Experten und den Empfängern von Gutachten.

Technische Gutachten sollen verständlich und nachvollziehbar sein. Um dieser Forderung auch bei der neuen Technologie gerecht zu werden, muss bedacht werden, auf welchen Grundlagen die rechnerunterstützte Rekonstruktionstechnik basiert. Diese sind notwendigerweise:

1. Die Grundgesetze der Mechanik (Naturgesetze nach Newton, Impuls-, Drall- und Energiesatz).
2. Verschiedene Materialgesetze, welche z. B. die Eigenschaften von Reifen, das Deformationsverhalten von Fahrzeugen oder die Wirkung von Fahrtwind beschreiben.
3. Die im Rahmen eines Programms angewandten Approximationen, welche immer notwendig sind, da sich die Realität nicht in allen Details mathematisch vollständig wiedergeben lässt.
4. Der Computercode.

Während die mechanischen Grundgesetze gut formulierbar, seit langem bekannt und nachgewiesen zuverlässig sind, handelt es sich bei den verwendeten Materialgesetzen immer um pragmatische Näherungen unterschiedlicher Komplexität zur Beschreibung eines gemessenen oder beobachteten Materialverhaltens. Nicht immer basieren diese Näherungen auf physikalischen Herleitungen und sind eventuell sogar von Fall zu Fall anders zu beschreiben. Viele Approximationen sind erforderlich, um z. B. Bodenunebenheiten, Windeinwirkung und bewegliche Ladung zu behandeln. Weil auch bei komplexer Modellbildung viele Details während der Kollision nicht zu ermitteln sind (Temperatur, Beladungszustand, Reibungsverhältnisse in der Kontaktzone, Körperhaltung von Insassen oder Fußgängern etc.) sind auch hier Approximationen notwendig. Auf all diese Umstände und die sich daraus ergebenden Einschränkungen muss der Gutachter hinweisen, so dass auch ein weiterer Fachmann ohne weiteres in der Lage ist, den Überlegungen zu folgen und gegebenenfalls diese zu kritisieren. Die Fehlerfreiheit des Computercodes kann nur von vielen Benutzern durch Anwendung in einer Vielzahl von realen Fällen, durch Vergleich mit anderen Programmen und durch Nachrechnung von Versuchen erhärtet (nicht bewiesen!) werden.

Bei der rechnerunterstützten Rekonstruktion von Unfällen (jeder Art) handelt es sich demnach um eine äußerst komplexe Gesamtheit, auf welche in den folgenden Kapiteln eingegangen wird. Von entscheidender Bedeutung für den technischen Fortschritt einerseits und den Rechtsfrieden bzw. die Rechtssicherheit ist es aber, dass alle an einem juristischen Prozess beteiligten Personen, primär die Richter, in die Lage versetzt werden müssen, diese neue Technik in der richtigen Weise zu verstehen. Dabei ist es auch notwendig, Dichtung von Wahrheit zu unterscheiden. Auch dazu soll dieser Artikel beitragen. Es ist durchaus möglich, mit Computerhilfe

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_20

einen ganz bestimmten Vorgang in schönen Bildern plausibel darzustellen, der in der Wirklichkeit aber unmöglich ist. In diesem Zusammenhang gibt es zwei wichtige Begriffe, mit denen sich das Problem beschreiben lässt: Simulation und Animation.

2 Simulation

Simulation ist eine Vorgehensweise überwiegend zur Analyse dynamischer Systeme. Bei der Simulation werden Experimente an einem Modell durchgeführt, um Erkenntnisse über das reale System zu gewinnen. Im Zusammenhang mit Simulation spricht man von dem zu simulierenden System und von einem Simulator als Implementation oder Realisation eines Simulationsmodells. Letzteres stellt eine Abstraktion des zu simulierenden Systems dar (Struktur, Funktion, Verhalten). Der Ablauf des Simulators mit konkreten Werten (Parametrisation) wird als Simulationsexperiment bezeichnet. Dessen Ergebnisse können dann interpretiert und auf das zu simulierende System übertragen werden.

Ein Fahrzeug-Crash-Test beispielsweise ist ein Simulationsmodell für eine reale Verkehrssituation, in der ein Auto in einen Verkehrsunfall verwickelt war. Dabei wird die Vorgeschichte des Unfalls, die Verkehrssituation und die genaue Beschaffenheit des Unfallgegners stark vereinfacht. Auch werden keine Personen in den simulierten Unfall involviert, sondern es werden stattdessen Crashtest-Dummys eingesetzt, die mit realen Menschen gewisse mechanische Eigenschaften gemeinsam haben. Ein Simulationsmodell hat also nur ganz bestimmte Aspekte mit einem realen Unfall gemeinsam. Welche Aspekte dies sind, hängt maßgeblich von der Fragestellung ab, die mit der Simulation beantwortet werden soll. [1], [2], [3], [4]

In weiterer Folge kann ein Computerprogramm zur numerischen Simulation des Fahrverhaltens und der Kollision in einem Verkehrsunfall das Simulationsmodell für einen realen Verkehrsunfall darstellen. Über das Simulationsmodell können nun spezielle Aspekte des Unfallablaufes (Fahrzeugbewegung, Kollisionsgeschwindigkeiten, Spurenzeichnung, Vermeidbarkeit etc.) innerhalb der Limitationen des Simulationsmodells untersucht werden.

Unter Simulation wird in Bezug auf technische Vorgänge eine Nachahmung der Realität durch geeignete physikalisch-mathematische Verfahren verstanden. Zum Begriff Simulator ist beispielsweise im Duden-Fremdwörterbuch nachzulesen: „Gerät, in dem künstlich die Bedingungen und Verhältnisse der Wirklichkeit hergestellt werden“.

Die praktische Anwendung der Simulation im technischen Sinne ist erst durch die Entwicklung der Computer in größerem Umfang möglich geworden. Die mathematisch-physikalischen Grundlagen hierzu sind dagegen schon von Newton[7], Leibniz[8] und anderen Physikern und Mathematikern geschaffen worden. Es können sehr unterschiedliche technische Systeme durch Simulationsmodelle beschrieben werden. Dies können Materialien und deren Eigenschaften unter Belastung sein, es können aber auch unterschiedlichste Systeme mechanischer, elektrischer oder elektronischer Art mathematisch beschrieben und dann untersucht werden. An die Nachbildung können unterschiedlich hohe Anforderungen gestellt werden, die zu unterschiedlichen Genauigkeiten und Gültigkeitsbereichen führen.

7 Sir Isaac Newton (* 4. Januar 1643 in Woolsthorpe-by-Colsterworth in Lincolnshire, † 31. März 1727 in London), englischer Physiker, Mathematiker, Astronom, Alchemist, Philosoph und Theologe.

8 Gottfried Wilhelm Leibniz (* 1. Juli 1646 in Leipzig; † 14. November 1716 in Hannover), deutscher Philosoph und Wissenschaftler.

2.1 Grenzen der Simulation

Jeglicher Form von Simulation sind auch Grenzen gesetzt, die man stets beachten muss. Die erste Grenze folgt aus der Begrenztheit der Mittel, d. h. der Endlichkeit von Energie (z. B. auch Rechenkapazität), Zeit und nicht zuletzt Geld. Eine Simulation muss also auch wirtschaftlich gesehen Sinn ergeben. Aufgrund dieser Einschränkungen muss ein Modell möglichst einfach sein. Das wiederum bedeutet, dass auch die Ergebnisse der Simulation eine grobe Vereinfachung der Realität darstellen. Die zweite Grenze folgt daraus: Ein Modell liefert nur in einem bestimmten Kontext Ergebnisse, die sich auf die Realität übertragen lassen. In anderen Parameterbereichen können die Resultate schlichtweg falsch sein. Daher ist die Verifikation der Modelle für den jeweiligen Anwendungsfall ein wichtiger Bestandteil der Simulationstechnik. Als mögliche weitere Grenzen seien Ungenauigkeiten der Ausgangsdaten (z. B. Messfehler) und subjektive Hindernisse (z. B. mangelnder Informationsfluss über Produktionsfehler) genannt.

In der Unfallsimulation muss daher in der Modellbildung ein Kompromiss zwischen möglichst realitätsnaher Simulation und den zur Verfügung stehenden Anknüpfungstatsachen gefunden werden. Aus diesem Grund kommen vielfach unterschiedliche Simulationsmodelle zum Einsatz, die unterschiedliche Parameter verwenden. In der Praxis ist die Unfalldokumentation oft sehr unterschiedlich, wodurch im einen Fall bei detaillierter Dokumentation eine sehr genaue Rekonstruktion möglich ist, im anderen Fall ist die Genauigkeit bzw. Aussagesicherheit durch die zur Verfügung stehenden Daten begrenzt.

2.2 Verifikation

Als Verifizierung oder Verifikation (von lat. veritas, Wahrheit) wird der Vorgang bezeichnet, einen vermuteten oder behaupteten Sachverhalt als wahr zu belegen.

In der Computersimulation wird in der Verifikation oder Verifizierung untersucht in wie weit sich die Ergebnisse der Simulation mit der Realität decken. Hierfür werden Crash-Versuche durchgeführt bei denen alle für die Simulation bzw. Beschreibung des Vorgangs erforderlichen Daten möglichst genau dokumentiert bzw. gemessen werden. [5], [6], [8], [9], [10], [11], [12]

Wichtig ist hierbei, dass Parameter, die für die Simulation erforderlich sind verfügbar sind, also gemessen oder bestimmt wurden, und damit in der Benutzung der Simulationsprogramme möglichst wenig Interpretationsspielraum für den Programmbediener bleibt, wodurch eine Verfälschung der Ergebnisse möglich wäre.

In der Verifikation von Simulationsprogrammen gibt es zwei Fragestellungen, die untersucht werden:

1. Welche Ergebnisse liefert das Simulationsprogramm bei Vorgabe der gemessenen und dokumentierten Werte ? Welche Unterschiede treten zwischen Realität und Modell auf?
2. Welche Eingabeparameter führen zu der bestmöglichen Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität?

Die Verifikation bildet in der Modellerstellung einen wichtigen Schritt zur Überprüfung der Modellannahmen und zur Überprüfung und Verbesserung der Modellparameter. Des Weiteren ist die Verifikation ein wichtiges Hilfsmittel um die Akzeptanz von Simulationsprogrammen und deren Ergebnissen für Laien nachvollziehbar zu machen. In der Verifikation können auch Grenzen des jeweiligen Simulationsmodells veranschaulicht werden. Auch kann die zu erwartende erzielbare Genauigkeit der Simulation angegeben werden.

Vereinfacht kann man also sagen, dass die Anwendung eines Simulationsprogramms, das mit einer Unfallkonstellation verifiziert wurde, die dem realen Unfall ähnlich ist, zu ähnlichen Ergebnissen hinsichtlich Genauigkeit führen wird.

2.3 Ringversuche

Bei Ringversuchen wird ein Unfallgeschehen (Crash-Test oder Realunfall) durch mehrere Sachverständige unter Benutzung unterschiedlicher Simulationsprogramme rekonstruiert. Die zur Verfügung stehenden Informationen über den Unfall sind meist nicht vollständig.

Im Gegensatz zur Verifizierung liefern Ringversuche keine Informationen über die Anwendbarkeit und Qualität der Simulationsprogramme, da verschiedene Parameter für die Simulation vom Anwender vorgegeben werden müssen.

Als Ergebnis eines Ringversuches ergibt sich die Streubreite der Ergebnisse je nach Fragestellung (z. B.: Kollisionsgeschwindigkeit) bei der Bearbeitung durch verschiedene Sachverständige.

2.4 Simulationsmodelle

In der Unfallrekonstruktion werden hauptsächlich kinematische (Vorwärts- und Rückwärtsrechnung) und kinetische (Vorwärtsrechnung) Simulationsmodelle zur Simulation der Fahrzeugbewegung verwendet. Zur Simulation der Kollision werden verschiedene Stoßmodelle (siehe Kapitel Stoßrechnung) verwendet.

2.4.1 Kinematische Simulation

Bei diesem Bewegungsmodell werden die Fahrbewegungen durch numerische Integration der vorgegebenen Schwerpunktsbeschleunigungen über ein definiertes Zeitintervall berechnet.

$$v(t) = \int_{t_0}^{t} a(t)\ \mathrm{dt} + v(t_0) \qquad \text{(A20-1)}$$

$$s(t) = \int_{t_0}^{t} v(t)\ \mathrm{dt} + s(t_0) \qquad \text{(A20-2)}$$

Die Form der Bahnkurve wird entweder aus den Angaben über das Lenkverhalten berechnet oder direkt vorgegeben (Spurverfolgung).

Bei der Spurverfolgung wird die Bahnkurve des Fahrzeugschwerpunktes oder eines Radaufstandspunktes durch eine Splinekurve vorgegeben. Das Fahrzeug bewegt sich dann immer tangential zu dieser Bahn. Die Radkräfte werden bei diesem Modell nicht kontrolliert, der Benutzer muss also selbst überprüfen, ob die vorgegebene Bahnkurve unter den vorliegenden Reibungsverhältnissen eingehalten werden kann oder nicht. Mit diesem Modell können jedoch rasch und einfach zeitliche Abläufe und Positionszuordnungen untersucht werden.

Auf Grund der einfachen mathematischen Zusammenhänge bei diesem Modell kann die kinematische Simulation sowohl vorwärts (von der Kollision zur Endlage) als auch rückwärts (von der Endlage zur Kollision durchgeführt werden.

2.4.2 Kinetische Simulation

Die kinetische Simulation berücksichtigt die Bewegung der Fahrzeuge unter dem Einfluss von Kräften.

$$m \cdot \ddot{\vec{x}} = \sum_i \vec{F}_i \qquad \text{(A20-3)}$$

$$\Theta \cdot \ddot{\vec{\varphi}} = \sum_i \vec{M}_i \qquad \text{(A20-4)}$$

mit: $\vec{x}_x$ Schwerpunktsposition
Θ Trägheitstensor
$\vec{\varphi}$ Fahrzeugrotation um Längs-, Quer- und Hochachse

Bei diesem Modell wird das Fahrzeug als ebenes oder räumliches Starrkörpersystem betrachtet, auf das Schwerkraft und Radkräfte wirken. Soll mit diesem Modell das Fahrverhalten eines Anhängergespannes untersucht werden, so werden zusätzlich die Kupplungskräfte als externe Kräfte berücksichtigt. Die dynamische Radlastveränderung durch den Fahrvorgang kann in diesem Modell berücksichtigt werden, weiterhin können Fahrwerkseigenschaften und komplexe Reifenmodelle simuliert werden.

Im Reifenmodell werden die jeweils übertragenen Seitenführungs- und Bremskräfte aus der Radaufstandskraft, dem momentanen Schräglauf der Reifen sowie den vorgegebenen Teilbremsfaktoren berechnet. Die Erhaltungsgleichungen für Impuls und Drall werden über numerischische Integrationsverfahren gelöst. Somit kann das Fahrverhalten unter den vorgegebenen Brems-, Lenk- und Umgebungsbedingungen berechnet werden. Da die Antriebs- und Bremskräfte für jedes Rad individuell vorgegeben und berechnet werden können, wird auch der Unterschied im Fahrverhalten zwischen front-, heck- und allradangetriebenen Fahrzeugen berücksichtigt.

Selbst eine Regelung der Bremskräfte durch ABS oder ESP kann berechnet werden, da zu jedem Simulationsschritt der momentane Schlupf der Räder sowie die auf das Rad wirkenden Kräfte bekannt sind.

Auf Grund der starken Nichtlinearität der Differentialgleichungen ist es im Allgemeinen nicht möglich, die Differentialgleichungen numerisch zu invertieren, und damit eine Rückwärtsberechnung von der Endposition bis zum Kollisionsauslauf durchzuführen.

Die kinetische Simulation stellt jedoch sicher, dass der simulierte Fahrvorgang unter den vorherrschenden Reibungsbedingungen auch physikalisch möglich ist.

3 Animation

Animation (von lat. animare, „zum Leben erwecken“) ist im engeren Sinne jede Technik, mit der einzelbildweise Bewegung im Film geschaffen wird. Die Einzelbilder können gezeichnet sein, im Computer berechnet, oder sie können fotografische Aufnahmen sein. Bei der Wiedergabe mit 24 Bildern pro Sekunde entsteht beim Betrachter die Illusion von Bewegung. [7]

Dieser Definition kann man entnehmen, dass die erzeugten Bilder nicht unbedingt physikalische Realitäten darstellen müssen. Dieser Aspekt ist von großer Bedeutung, da bewegte Bilder eine hohe Suggestivwirkung haben. Bei der Herstellung von Trickfilmen handelt es sich um Animation, die mit der Wirklichkeit nichts gemeinsam haben muss und trotzdem oder gerade deshalb gefällt.



Bild A20-1 Originalphoto Truck-Rennen

Auf Grund des filmartigen bildhaften Charakters von Animationen steigt die Überzeugungskraft mit zunehmender photorealistischer Darstellung. Je besser die Qualität der Bilder und Darstellung von Objekten ist, umso eher ist der Betrachter davon überzeugt, dass die Animation die Realität widerspiegelt. Es muss jedoch zwischen 2 Arten von Animationen unterschieden werden:

1. Die Bewegung der Objekte beruht auf physikalischen Gesetzen und stammt beispielsweise von einem Simulationsprogramm. Die Bewegung der Objekte entspricht der Realität innerhalb der Grenzen des Simulationsmodells.
2. Die Bewegung der Objekte beruht nicht auf physikalischen Gesetzen und wurde durch den Animator vorgegeben. Die Bewegung der Objekte ist willkürlich vorgebbar.

In Simulationsprogrammen werden Animationen vom Typ 1 erzeugt, um die Ergebnisse der Simulation verständlicher darzustellen.



Bild A20-2 Animation Truck-Rennen Computerspiel

Die Ergebnisse von sehr genauen Berechnungen, die im Allgemeinen als unübersichtliche Zahlenkolonnen oder Diagramme nur den damit befassten Fachleuten etwas sagen, gewinnen durch die detailgenaue Darstellung in laufenden Bildern eine Qualität, die es auch Nichtfachleuten ermöglicht, einen guten Einblick in die Natur bestimmter Vorgänge zu gewinnen. Diese Art der Darstellung von Berechnungsergebnissen versteht man auch unter Animation. Die Grundlage der Animation bildet in diesem Fall jedoch die numerische Simulation, die Animation ist nur eine andere Darstellung der Ergebnisse, die als Zahlenkollonne, Skizze, Diagramm und eben auch als Videoanimation des Bewegungsablaufes dargestellt werden können.

Animationen vom Typ 2 werden in Trickfilmen aber auch in Nordamerika für so genannte „Witness animations“ vor Gericht eingesetzt. Bei dieser Anwendung wird die Aussage eines Zeugen unabhängig davon ob dies physikalisch möglich ist oder nicht in einer Animation veranschaulicht. Auf Grund der großen Suggestivwirkung von Animationen ist die Anwendung

von „witness animations“ rückläufig, da falsche Sachverhalte überzeugend dargestellt werden können. Die Betrachtung von Animationen sagt nur etwas darüber aus, ob die Animation gut oder weniger gut gemacht ist. Ob es sich bei der Animation um ein Geschehen handelt, das durch ein reales Experiment nachvollzogen werden kann, oder ob es sich um ein Phantasiegebilde handelt, kann nur dann beurteilt werden, wenn bekannt ist, wie es zu der Animation gekommen ist bzw. auf welchen Grundlagen sie beruht. Die Aufgabe z. B. eines Richters wird es deshalb sein, sich zu vergewissern, auf welcher Grundlage die ihm gegebenenfalls vorgelegte Animation erzeugt wurde.

4 Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von Simulationsprogrammen

Es muss davor gewarnt werden, zu glauben, dass mit der Anschaffung von Programmen die Unfallrekonstruktion plötzlich kein Problem mehr sei. Eher ist das Gegenteil der Fall, denn die richtige Anwendung von Simulationsprogrammen erfordert den gründlichen Erwerb zusätzlicher, sehr umfangreicher Kenntnisse. Bei der Verwendung von Simulationsprogrammen darf bei der Parametervariation der Bezug zur Realität nicht verloren gehen. Um eine bessere Übereinstimmung von Simulation und Realität zu erreichen, sind Parameteränderung vielfach notwendig. Bei jeder Änderung muss jedoch hinterfragt werden, ob diese Änderung auch durch in der Realität nachvollziehbare Argumente unterstützt werden kann.

Diese Warnung darf auf keinen Fall so verstanden werden, dass etwa gegen den Einsatz dieser Programme argumentiert werden soll. Im Gegenteil, dieses Hilfsmittel ist aus der gerichtlichen Praxis nicht mehr wegzudenken. Denn auch dem erfahrenen Praktiker können Irrwege einfallen, die er nur erkennt, wenn er seine Arbeitshypothesen mit einem geeigneten Simulationsprogramm überprüft. Durch den Einsatz von Computersimulationsprogrammen können verschiedenste Variationen der Eingangsparameter untersucht werden und damit kann die Aussagesicherheit bei unklaren Anknüpfungstatsachen gesteigert werden. Simulationsprogramme ermöglichen es auch, ein tieferes Verständnis des Bewegungsvorgangs im Zuge der Simulation zu erreichen, wie dies sonst nur in Fahrversuchen oder Crash-Tests möglich ist.

5 Nachvollziehbarkeit

Gutachten sollen nachvollziehbar sein. Diese Anforderung richtet sich darauf, dass ein anderer Sachverständiger genauso wie ein Nichtfachmann nachvollziehen können soll, wie es zu bestimmten Ergebnissen in einem Gutachten gekommen ist. In der einschlägigen Literatur [1] gibt es dazu verschiedene allgemeine Hinweise, die im Wesentlichen darauf hinauslaufen, dass Fachwissen allgemein verständlich vermittelt werden soll. Das ist ein ideales Einsatzgebiet für die Animation. Ein bestimmter Ablauf kann damit hervorragend allgemein verständlich dargestellt werden.

Hier muss aber bedacht werden, dass nicht nur einem Laien verdeutlicht werden soll, was man als Gutachter als richtig erachtet, sondern ein anderer Sachverständiger muss das erarbeitete Ergebnis auch nachvollziehen, nachprüfen und als richtig anerkennen oder es kritisieren können. Das erfordert umfangreiche technische Dokumentation von Eingabedaten und Ergebnissen. Es sollte sogar gefordert werden, dass dem Gutachten, bei dem Simulation und Animation angewandt worden sind, die berechneten Fälle auf einem elektronischen Datenträger beigefügt sein müssen.

Eine angemessene Verfahrensweise beim Einsatz von Simulationsprogrammen ist folgende:

1. Auflistung der vorliegenden objektiven Anhaltspunkte wie Endstellungen/Endlagen von Unfallbeteiligten und Gegenständen, Spuren auf der Fahrbahn, an Gegenständen und Fahrzeugen, Schäden.
2. Zusammenstellung der Ergebnisse, die mit Sicherheit aus den objektiven Anhaltspunkten gewonnen werden können. Dies sind beispielsweise die relative und die fahrbahnbezogene Kollisionsposition, die Einstufung von Schäden durch EES-Werte, die Ermittlung von Strecken, die vor oder nach einem Unfallereignis zurückgelegt wurden, usw.
3. Auflistung von Zusatzinformationen, die nicht durch objektive Anhaltspunkte belegbar sind: Beispiele dafür sind: Ein Fahrzeuglenker behauptet, er habe vor der Kollision noch einen Ausweichversuch gemacht; oder er habe an der Haltelinie angehalten, bevor er losfuhr und es zum Unfall kam.
4. Entwicklung einer ersten Hypothese über einen wahrscheinlichen Unfallablauf.
5. Verifikation mittels Simulationsprogramm.
6. Gegebenenfalls Entwicklung einer neuen Hypothese mit erneuter Prüfung.
7. Verfeinerung einer schließlich gefundenen Lösung unter Verwendung von Kontrollwerten oder Schranken, innerhalb derer die signifikanten physikalischen Größen liegen müssen. Angabe von Toleranzen.

Aus einem Gutachten sollte die Vorgehensweise bei der Bearbeitung erkennbar werden. Die Anknüpfungspunkte und die verwendeten Analysemethoden sollten ausführlich dargestellt werden. Nur so ist ein Gutachten nachvollziehbar und überprüfbar.

Literatur

[1] Zeigler, B. P., Praehofer, H., Kim, T. G.: Theory of Modeling and Simulation, 2nd Edition, Academic Press, San Diego 2000, ISBN 0-127-78455-1

[2] N. Gilbert, K. G. Troitzsch: Simulation for the social scientist, Open University Press 1999, ISBN 0-335-19744-2

[3] Fujimoto, R. M.: Parallel and Distributed Simulation Systems, Wiley-Interscience 1999, ISBN 0-471-18383-0

[4] Cellier, F. E.: Continuous system modeling. Springer-Verlag, New York, 1991, ISBN 0-387-97502-0

[5] Shoemaker, Norris E.: „Research Input for Computer Simulation of Automobile Collisions, Volumes II and III: Staged Collisions“, U.S. Department of Transportation Report Nos. DOT HS-805 038 and DOT HS-805 039, National Highway Traffic Safety Administration

[6] Jones, Ian S., Baum, A. S.: „Research Input for Computer Simulation of Automobile Collisions, Volume IV: Staged Collision Reconstructions“, DOT HS 805 040, National Highway Traffic Safety Administration

[7] „Timing for Animation“, Harold Whitaker, John Halas, ISBN 0240517148

[8] Bailey, M. N., Lawrence, J. M., Fowler, S. J., Williamson, P. B., Cliff, W. E., Nickel, J. S.: „Data from Five Staged Car to Car Collisions and Comparison with Simulations“, SAE 2000-01-0849

[9] Smith, R. A., Noga, J. T.: „Examples of Staged Collisions in Accident Reconstruction“, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, 1980

[10] Ishikawa, Hirotoshi: „Computer Simulation of Automobile Collision – Reconstruction of Accidents“, SAE 851729

[11] Ishikawa, Hirotoshi: „Impact Model for Accident Reconstruction – Normal and Tangential Restitution Coefficients“, SAE 930654

[12] Ishikawa, Hirotoshi: „Impact Center and Restitution Coefficients for Accident Reconstruction“, SAE 940564

Teil B:
Fallbeispiele

B1 Unfälle mit Tieren

Dr. Heinz Burg und Julia Caselitz

1 Allgemeines

Über Unfälle mit Tieren gibt es relativ wenige Unterlagen. Es sind solche Unfälle auch eher selten zu begutachten. Meist handelt es sich um Alleinunfälle mit Wildtieren, bei denen es dann um die Regulierung durch die Kaskoversicherung geht, also eher nicht um Unfallrekonstruktion. In solchen Fällen kann der Wildschadenkatalog von Kruse [1] helfen.

Manchmal besteht Betrugsverdacht durch vorgetäuschte Kollisionen mit Wildtieren, dann kann eine Unfallrekonstruktion erforderlich werden.

Die Notwendigkeit von detaillierten Rekonstruktionen besteht dann, wenn es sich um Tiere aus der Landwirtschaft oder aus dem Sportbereich handelt, die in Kollisionen mit Fahrzeugen verwickelt werden. Es ist dann oft der Tierhalter feststellbar, der vielleicht haftbar für die oft sehr hohen Schäden gemacht werden kann. Im Sportbereich sind meistens die Reiter mit betroffen, so dass auch in diesen Fällen rechtliche Bewertungen vorgenommen werden müssen. Aus diesem Bereich werden einige Fälle vorgestellt, von denen angenommen wurde, dass eine sinnvolle Rekonstruktion möglich war.

2 Daten für Berechnungen – Tiere

Aus einer Internetrecherche konnten für die Unfallrekonstruktion bedeutsame Daten zusammen getragen werden. Diese Daten sind teilweise nicht vollständig zu ermitteln gewesen. Über Beschleunigungen liegen den Autoren bisher keine Erkenntnisse vor. Unfälle mit Beteiligung von Pferden sind in durchaus nennenswertem Umfang zu bearbeiten. Deshalb wurde den Pferden ein größerer Raum eingeräumt.

Tabelle B1.1 Informationen über Tiere

	Schulterhöhe in cm	Körperlänge in cm	Gewicht in kg	Geschwindigkeit in km/h
(Feld)Hase	15	70	bis 6	50–70
Katze	26–30	44 bis	3,5–8,2	48
Fuchs	28–33	45–61	2,2 bis 14	60
Dachs	30	75	15–20	
Wildschwein [11]	bis 100	110-155	100-150	50
Rehwild	bis 75	bis 125	bis 16	65
Schaf	90	130	35–50	
Ziege	60–90	120–160	40–80	
Kuh	140–150		Kuh: 600–700 Stier: 1.000–1.200	
Elch	maximal 230	bis 300	bis 800	72
Hunde				
– Jack Russel	21–31	30–35	7–10	
– Retriever	65–57	75	34–37	
– Deutsche Dogge	70–80	60–75	50–80	bis zu 70
Wolf	50–80	bis 160	18–80	45–50

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_21

3 Pferde



Bild B1-1 Körperbau von Pferden und Bezeichnungen [8]

3.1 Grundlagen

Die wichtigsten Merkmale bei Pferden sind:

Geschlecht:

- Stute = weibliches Pferd
- Hengst = männliches Pferd
- Wallach = kastriertes männliches Pferd

Alter:

- (Saug)Fohlen = das Pferd ist noch sehr jung und läuft noch bei der Mutter
- Absetzer: das Pferd wurde gerade von der Mutter getrennt (meist geschieht dies mit 6 Monaten)

Nun wird oftmals der Geburtstag auf den 01.01. gelegt, so dass alle Pferde gemeinsam ein Jahr älter werden):

- Jährling (1 Jahr alt)
- Zweijährig (2 Jahre alt) usw.

Rasse:

Einige Rassenbeispiele befinden sich in Kapitel 3.3. Neben verschiedenen rassetypischen Farben (Grundlagen siehe **Bild B1-2**, weitere Variationen möglich) und Stockmaßen (Höhe vom

Boden bis zum Widerrist) wird besonderen Wert auf bestimmte Reiteigenschaften gelegt. Hierfür wird neben dem Charakter viel Wert auf ein korrektes Äußeres (Exterieur) gelegt. Jeder Zuchtverband hat allerdings seine eigenen Zuchtziele festgesetzt.

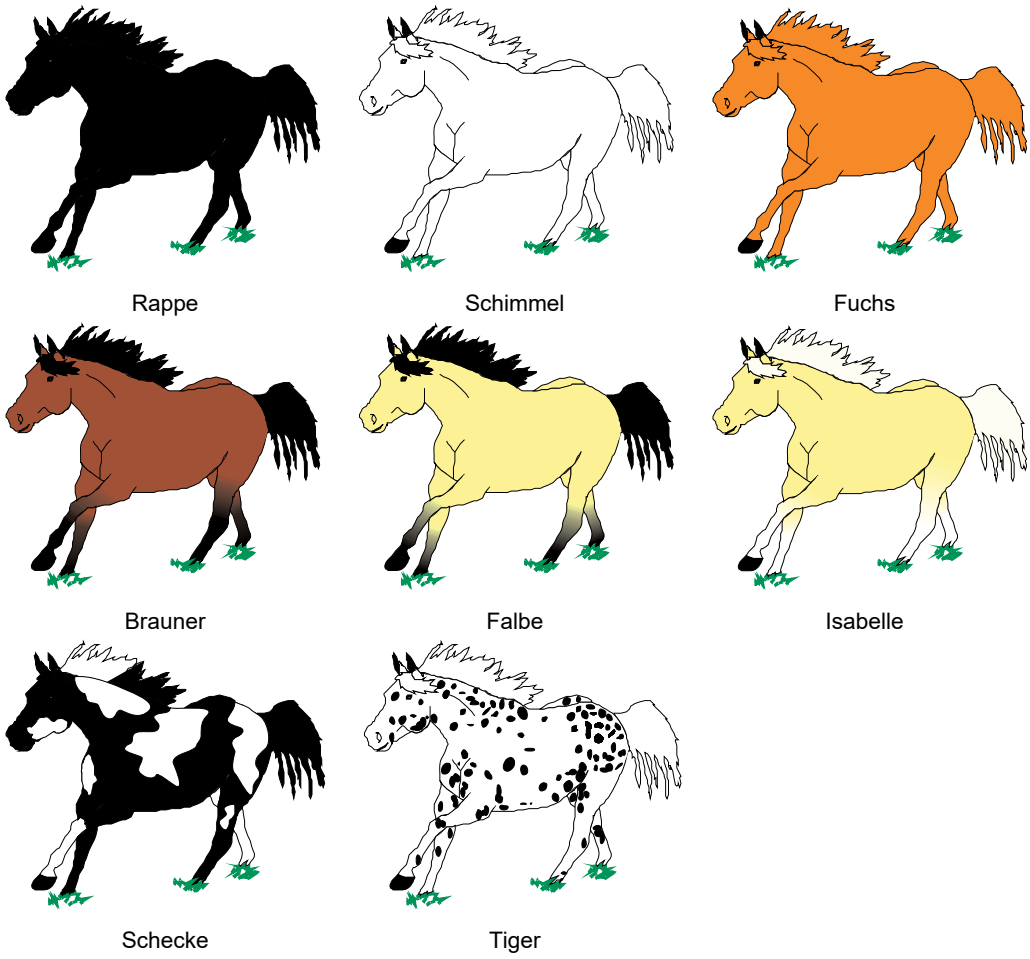


Bild B1-2 Die gängigsten Farben [8]

3.2 Die Gangarten der Pferde [8,9]

Jede Gangart kann in verschiedenen Tempi (Geschwindigkeiten mit unterschiedlichem Versammlungsgrad) geritten werden, die Entwicklung der Tempi hängt zum Teil auch von der Ausbildung von Pferd und Reiter ab. Die nachfolgenden Bilder spiegeln die Gangabfolge exakt wieder (beginnend oben links).

Durch die verschiedenen Tempi der Pferde ist es auch durchaus denkbar, dass z. B. ein langsamer Trab langsamer ist als ein starker Schritt. Je nach Pferd und dessen Größe variieren die Geschwindigkeiten nochmals.

3.2.1 Der Schritt

Der Schritt ist eine schreitende (schwunglose) Bewegung. Er ist ein Viertakt mit 8 Phasen. Hierbei ist immer mindestens ein Bein auf der Erde. Die Fußfolge lautet (beginnend mit hinten links): hinten links, vorne links, hinten rechts, vorne rechts usw.



Bild B1-3 Schritt

3.2.2 Der Trab

Der Trab ist eine schwunghafte Bewegung im Zweitakt mit 4 Phasen. Das Pferd huft diagonal auf, also z. B. hinten links und vorne rechts, Schwebephase, hinten rechts und vorne links, Schwebephase usw. Für den Reiter ist diese Gangart oft unbequem, weil das Pferd von einer Diagonalen auf die andere fällt.



Bild B1-4 Trab

3.2.3 Der Galopp (Canter)

Der (Arbeits-)Galopp ist eine schwunghafte Bewegung im Dreitakt mit 6 Phasen. Man unterscheidet zwischen Links-und Rechtsgalopp. Die Phasen sind dabei gleich, erfolgen aber seitenvertauscht. Die Beinfolge für einen Linksgalopp lautet (beginnend mit dem rechten Hinterbein): hinten rechts, vorne rechts und hinten links, vorne links, Schwebephase.

Zudem gibt es noch den Renngalopp, dies ist ein Viertakt, der keine Tempiunterschiede kennt, da ein Renngalopp „Vollgas“ bedeutet.



Bild B1-5 (Links-)Galopp

3.2.4 Der Pass und der Tölt [10]

Der Tölt ist ein genetisch fixierter Viertakt ohne Schwebephase. Das Pferd hat hierbei abwechselnd ein oder zwei Hufe am Boden, wobei die Phasen in denen sich zwei Hufe auf dem Boden befinden abwechselnd diagonal und lateral (seitlich) sind. Diese Gangart ist nahezu erschütterungsfrei für den Reiter.



Bild B1-6 Tölt

Beim Pass bewegen sich die lateralen Beinpaare (fast) gleichzeitig.



Bild B1-7 Pass

3.2.5 Rückwärtsrichten

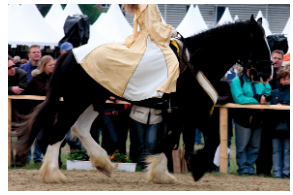
Die Gangfolge ist die Gleiche wie im Trab, nur ohne Schwebephase. Das Pferd tritt in diagonaler Fußfolge im Zweitakt zurück (nachfolgend ist ein Takt dargestellt).



Bild B1-8 Rückwärtsrichten

3.3 Pferderassen [7,9]

a) Kaltblüter

Beispiele für Sorten	Foto	Stockmaß in cm (ca.)	Mögliche Farben
Shire Horse		170–195	Braune, Rappen und Schimmel

b) Sportpferde (Rassendurchschnitt über 1,48 m Stockmaß)

Beispiele für Sorten	Foto	Stockmaß in cm (ca.)	Mögliche Farben
Andalusier		155–162	am häufigsten Schimmel, aber auch Braune, Falben und Rappen
Araber		145–155	alle Farben außer Schecken
Friese		Stuten mind. 150, Hengste 160, meist aber größer	lackschwarz, höchstens ein winziger Stern erlaubt

Knappstrubber		ca. 160	Tigerschecken
Lusitano		150–160	alle einfarbigen Varianten
Paint Horse		145–160	meist gescheckt
Quarter Horse		148–155	alle einfarbigen Varianten mög-lich, meist Fuchs
Traber		145–165	alle einfarbigen Varianten
Warmblut		je nach Zucht-gebiet ab ca. 160	alle Farben

c) Ponys (Rassendurchschnitt maximal 1,48 m Stockmaß)

Beispiele für Sorten	Foto	Stockmaß in cm (ca.)	Mögliche Farben
Camargue		135–150	Schimmel
Curly Horse/ Curly Bashkir		140–155	alle Farben
Haflinger		135–145	Fuchs mit hellem Langhaar
Isländer		130–145	alle Farben (auch Schecken)
Shetland Pony		ca. 100	alle Farben (auch Schecken)
Tinker		135–150	fast ausschließlich Platten-schecken
Welsh B		bis 137	alle Farben außer Schecken

Anmerkung:

Innerhalb einer Rasse variiert das Gewicht auf Grund von Fütterungseinflüssen und Größenunterschieden sehr stark.

3.4 Wert

Der Marktwert eines Pferdes setzt sich aus zahlreichen Faktoren zusammen. Je nachdem wie gut das ungerittene Tier z. B. schon den festgelegten Zuchtzielen entspricht, kann es innerhalb einer Rasse schon große Wertunterschiede geben. Zudem gibt es Modeerscheinungen, so dass manche Rassen gefragter sind und deshalb einen höheren Preis erzielen. Ein weiteres Kriterium für den Wert ist neben der Rasse auch die Ausbildung des Pferdes und etwaige Erfolge oder ob es eine „Rarität" ist (z. B. eine außergewöhnliche Farbe besitzt). Verletzte Pferde können einen rapiden Wertverlust erleiden, wenn sie z. B. weit ausgebildet wurden und nun unreitbar sind. Teils kann dieser Wertverlust abgemildert werden, wenn sie noch zur Zucht geeignet sind.

3.5 Ausbildung

Die Ausbildung eines Pferdes kann auch sehr unterschiedlich ausfallen. Traditionell denkt man hierbei an die Disziplinen Dressur, Vielseitigkeit und Springen. Aber durch die Einführung einiger Spezialrassen, hat auch ihre spezielle Ausbildung an Bedeutung gewonnen (und kann auch sehr wertvoll sein), so z. B. für Gangpferde (Pferde, die z. B. den Tölt beherrschen), Distanzpferde („Langstreckenläufer) oder auch Westernpferde (hier erfolgt wieder eine Unterteilung in zahlreiche Disziplinen, wie z. B. Reining, Cutting, Trail, Pleasure …)

Allen gemeinsam ist zunächst die Grundausbildung des Pferdes. Die geläufige Definition hierfür umfasst, dass der Reiter das Pferd in allen Gangarten lenken kann, dies dauert ca. 3 Monate. Die weitere, genauere Ausbildung dauert bedeutend länger, eine jahrelange Weiterbildung ist meist keine Seltenheit. Viele der so genannten Freizeitpferde haben „nur" eine Grundausbildung genossen.

Da alle Pferde von Natur aus Fluchttiere sind, ist neben der jahrlangen Domestizierung auch eine gute Ausbildung notwendig, damit sie auf vermeintliche Gefahren nicht mit Flucht reagieren. Ein Pferd sieht zudem viel ungenauer als ein Mensch, dafür aber fast mit einer Rundumsicht. Der Zweck dieses Sehvermögens ist es, schnelle Bewegungen zu erfassen, z. B. das hochspringende Raubtier, um mit einer Flucht reagieren zu können. Neben einer Gewöhnung an ungewöhnliche und alltägliche Situationen und Gegenstände, ist darauf zu achten, dass die Rangfolge geklärt ist, also der Reiter der Herdenführer ist und somit entscheidet, wann Flucht angebracht ist. Eine alte Reiterregel besagt deshalb „unerfahrenes Pferd- erfahrener Reiter und andersrum" um mögliche Defizite auszugleichen.

3.6 Ausrüstung

Man unterscheidet zwischen Trense (wird am Kopf befestigt) und Sattel (wird um den Bauch befestigt). Zudem kann man Gamaschen anlegen (meist Neopren oder Leder zum Schutz der Beine). Auch extra reflektierende Elemente oder Regenausreitdecken sind denkbar.

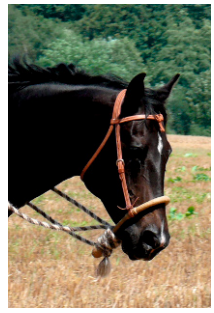
Je nach Ausbildungsstand und Zweck wählt man die Ausrüstung aus. Vor allem gibt es sehr viele unterschiedliche Trensen und Gebisse (meist Metall, das in das Maul gelegt wird) um das Pferd gezielt anzusprechen. Der Zügel bildet die Verbindung zwischen Trense (wird meist im

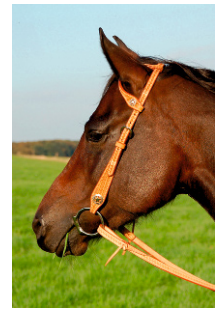
Gebiss eingehackt, also besteht eine direkte Verbindung zum Maul) und der Reiterhand. Das Ziel ist es, so sanft wie möglich einzuwirken, schärfere Gebisse bringen nicht zwangsläufig eine bessere Kontrolle.

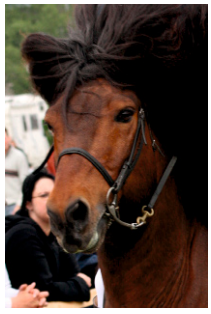
Mit Hilfe der Ausrüstung bestehen folgende Einwirkungsmöglichkeiten auf ein Pferd: Stimme, Zügel, Schenkeldruck, Gewichtsverlagerung, Sporen (Metall am Schuh, das die Ferse verlängert) und ggf. Zügelenden oder Gerte (Stab zum Touchieren). Reiten bedeutet dem Pferd beizubringen einem Druck zu weichen, so soll es z. B. wenn man die Zügel annimmt diesem Druck ausweichen und den Kopf entsprechend bewegen. Wenn man z. B. die Schenkel an den Pferdebauch andrückt, soll es einen Schritt vorwärts gehen. Reiten bedeutet ein Zusammenspiel der verschiedenen Hilfen.

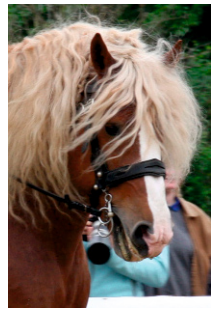
Zum Führen eines Pferdes wird meist ein Halfter verwendet. Das Halfter wird am Kopf befestigt, an dem meistens ein Führstrick befestigt wird, den der Mensch dann in der Hand hält.

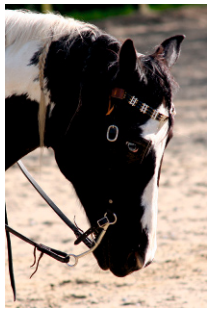

Sidepull


Bosal


Wassertrense


Isländerkandarre


Postkandarre


Stangengebiss


Kandarrengebiss mit Unterlegtrense

Bild B1-9 Zäumungen



Sicherheitshalfter/Weidehalfter mit Klettverschlüssen, die sich bei hohem Druck lösen, wird gerne auf der Weide verwendet, da es aufgeht, falls das Pferd an z. B. einem Pfahl hängen bleibt.



Spezielles Ausbildungshalfter, bei dem die über das Nasenbein gelegten „Schnüre“ gezielt Druck ausüben, hieran soll man ein Pferd nicht anbinden, denn wenn es sich erschreckt und zurückstürmt, könnte es sich das Nasenbein brechen.



Gängiges Halfter



So zu reiten erfordert ein hohes Vertrauen zwischen Pferd und Reiter. Aus Sicherheitsgründen empfiehlt es sich aber, dies nur auf eingezäunten Flächen zu betreiben.

Bild B1-10 Halfter

4 Falldarstellungen

Fall 1: Pkw Alfa Romeo Giulietta erfasst eine Kuh mit etwa 108 km/h. Wurfweite der Kuh etwa 24 m.

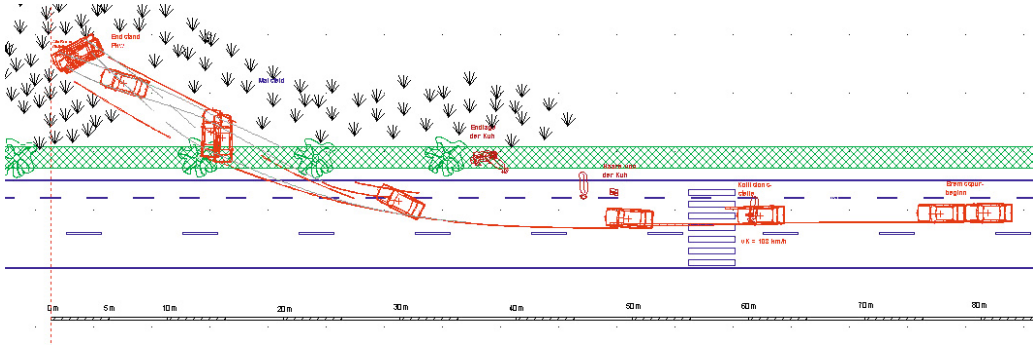


Bild B1-11 Unfallskizze mit Endlagen von Kuh und Pkw



Bild B1-12 Reifenspuren vom Pkw



Bild B1-13 Schäden am Pkw



Bild B1-14 Endlage der Kuh



Bild B1-15 Schäden am Pkw

Fall 2: Pkw VW Passat Kombi kollidiert mit entgegen kommendem Pferd, Kollisionsgeschwindigkeit Pkw 60 bis 65 km/h, Pferd läuft dem Pkw entgegen, verzögert aber noch. Gewicht Pferd 450 kg. Fahrer Pkw schwer verletzt.

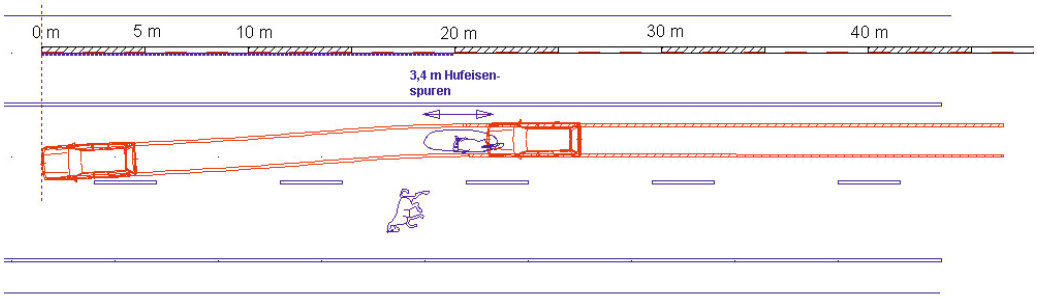


Bild B1-16 Unfallskizze mit Endlagen und Spuren

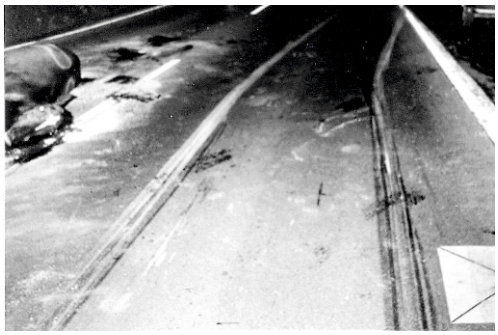


Bild B1-17 Reifenspuren vom Pkw



Bild B1-18 Schäden am Pkw



Bild B1-19 Endlage des Pferdes

Das schwer verletzte Pferd wurde im Beisein des Tierarztes und der Pferdeeigentümerin von der Polizei erschossen.

Fall 3: Pkw VW Sharan kollidiert mit einem in gleicher Richtung gehenden Pferd, Kollisionsgeschwindigkeit Pkw etwa 80 km/h. Pferd wird etwa 60 m weit geschleudert, flüchtet die Böschung hinab und verendet dort.

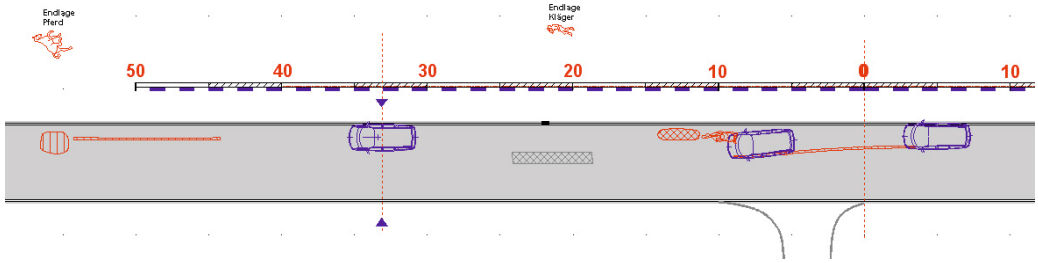


Bild B1-20 Unfallskizze mit Endlagen und Spuren



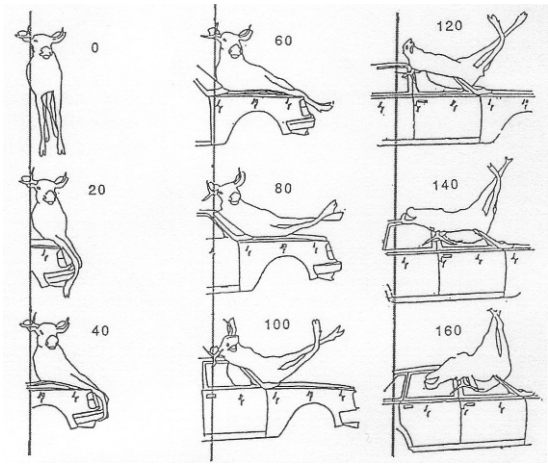
Bild B1-21 Schäden am Pkw



Bild B1-22 Endlage des Pferdes

5 Versuche

Versuche mit Tierkadavern oder Tierdummys sind verschiedentlich durchgeführt worden, insbesondere in den nordischen Ländern, wo Rentiere und Elche in großer Zahl in Freiheit leben.



Im Bild links sind Zeichnungen von einem Versuch mit einem Tierkadaver zu sehen [3], [4]. Es sind Zeitabstände in ms zu jedem Bild angegeben. Interessant ist die große Eindringung des Tierkadavers in den Innenraum des Pkw, der eine große Gefahr für Fahrer und Beifahrer darstellt.

Von Kruse sind einige Kadaverversuche mit Wildtieren durchgeführt worden [1].

Bild B1-23 Versuchsergebnis

Literatur

[1] Kruse, Adrian: Sachverständigenbüro. www.strassenverkehrsunfall.de
[2] Barfels: Bedeutsamkeit, Charakteristik und Schadenausmaß bei Wildunfällen. HTW Dresden, 2005.
[3] Nilson, Svensson: Simulation of moose-car collision with moosecadaver. Institut für Verkehrssicherheit in Göteborg, 1986
[4] Lövsund, Nilson, Svensson: Passenger Car Crash Worthiness in Moose-Car Collisions. Chalmers University Göteborg, 1989
[5] www.forst-hamburg.de/rehwild.htm/
[6] http://de.wikipedia.org/wiki/Pferdegangart#Geschwindigkeiten
[7] Haller: der neue Kosmos-Pferdeführer, Kosmos, 2003
[8] Lehren und Lernen- Rund um das Pferd, deutsche reiterliche Vereinigung e.V. (FN), 1997
[9] Godon Watson, Lyon, Montgomery: Pferde Reittechniken, Pflege & Haltung, Rassen, Weltbild-Verlag, 1999
[10] http://www.ipzv.de/200-Islandpferde_Toelt-.htm
[11] http://www.palkan.de/

Alle Bilder und Fotos (außer Falldarstellung): copyright Julia Caselitz

Danksagung

Bei der Ausarbeitung dieses Kapitels haben folgende Personen durch Hinweise, Mithilfe bei der Datenbeschaffung und der Anfertigung von Bildern und Tabellen mitgeholfen: Dirk Christiaens, Wim Vandeweerdt, Helen Holvoet, Steve Frankenstein, Maik König. Der Autor bedankt sich an dieser Stelle recht herzlich.

B2 Unfälle mit Fußgängern

Dr. Heinz Burg

1 Sachverhalt

Auf einer gut ausgebauten Straße im innerörtlichen Bereich wurde eine Fußgängerin von einem Pkw erfasst. Die Fußgängerin kam für den Pkw von links. Nach Aussage einer Zeugin lief sie hinter einem Brückenpfeiler hervor auf die Fahrbahn, vermutlich um einen Bus zu erreichen. Die Kollisionsstelle war am Pkw vorne rechts, in der Frontscheibe rechts unten war eine Beschädigung, die wegen Haaranhaftung einem Kopfaufprall zugeordnet werden konnte. Vom Pkw waren Bremsspuren entstanden. Die Endlage der Fußgängerin und die Endlagen von Gegenständen konnten markiert und vermessen werden. Von der Polizei war ein Sachverständiger an die Unfallstelle gerufen worden. Er fand den Pkw in Endstellung und die auf der Fahrbahn liegenden Teile vor. Die Fußgängerin war bereits abtransportiert worden, der Pkw-Fahrer ebenfalls (Schock). Der Pkw-Fahrer hatte seinen Wagen abgesperrt.

2 Auftrag

Durch die Polizei wurde nach Rücksprache mit der Staatsanwaltschaft folgender Auftrag erteilt:

1. Wo war die fahrbahnbezogene Kollisionsstelle?
2. Wie hoch war die Kollisionsgeschwindigkeit?
3. Wie schnell ist der Pkw-Fahrer am Reaktionspunkt gefahren?
4. Hat der Pkw-Fahrer rechtzeitig auf die Fußgängerin reagiert?
5. War die Fußgängerin möglicherweise durch einen Brückenpfeiler verdeckt?
6. Falls der Pkw-Fahrer schneller als 50 km/h gefahren ist: war der Unfall bei Einhaltung von 50 km/h vermeidbar?
7. Bei welcher Geschwindigkeit wäre der Unfall räumlich und bei welcher zeitlich für den Pkw-Fahrer zu vermeiden gewesen?

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_22

3 Objektive Merkmale

Tabelle B2.1 Allgemeine Fahrzeugdaten

Fahrzeug		Fußgängerin	
Fahrer/-in	Klaus B.	Name	Melissa M.
Halter	wie oben	Geschlecht	weiblich
Beifahrer	keine	Alter	46 Jahre
Fahrzeugart	Pkw Lim.	Gewicht 65 kg, Größe 162 cm.	
Fabrikat, Typ	Opel Kadett E	Verletzungen: schwere Kopfverletzungen mit Todesfolge, multiple Prellungen, Schürfwunden	
Leergewicht	920 kg		
Gewicht Fahrer	90 kg		



Bild B2-1 Übersichtsaufnahme



Bild B2-2 Bremsspuren vom Pkw mit Spurunterbrechung



Bild B2-3 Bremsspuren und Endstand des Pkw



Bild B2-4 Hüftkontakt und Kopfkontakt



Bild B2-5 Endlagen von Teilen und Markierung der Endlage der Fußgängerin



Bild B2-6 Schäden am Fahrzeug



Bild B2-7 Luftbild von der Unfallstelle

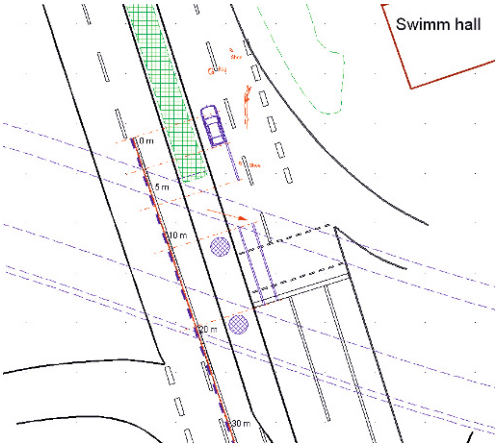


Bild B2-8 Bremsspuren und Endlagen

4 Unfallrekonstruktion

Von dem Pkw wurden Bremsspuren hinterlassen, die dem Aussehen nach Blockierspuren waren und von den Vorderrädern stammten. Die Hinterräder hatten keine Spuren gezeichnet. Vergleichsbremsungen waren nicht möglich, weil der Pkw abgesperrt war.

In Fahrtrichtung betrachtet waren zunächst beidseitige Bremsspuren in einer Länge von 8,1 m vorhanden. Danach folgte eine Spurunterbrechung über 4,5 m, danach war eine einseitige Bremsspur von 3,9 m Länge vorhanden, dann 3,3 m beidseitige Bremsspuren bis zum Stillstand.

Mit einer Mindestverzögerung von 7 m/s^2 für die beidseitige Spurzeichnung, 90 % davon für die einseitige Spurzeichnung und Spurbeginn ab Ende der Bremsenschwelldauer kann die untere Grenze der Geschwindigkeit des Pkw bei Bremsbeginn berechnet werden.

Die Kollision kann in Anlehnung an die Zeugenaussage am Ende der ersten Bremsspur angenommen werden. Es ist zumindest als möglich oder plausibel anzunehmen, dass der Pkw-Fahrer bei Kollision kurzzeitig den Fuß vom Bremspedal nahm oder die Bremse lockerte. Nicht auszuschließen ist, dass durch die Erhöhung der Radlast infolge der Kollision die blockierten Räder kurzzeitig wieder angelaufen sind. Für die Staatsanwaltschaft war nur der Fall mit Lösung der Bremse von Interesse.

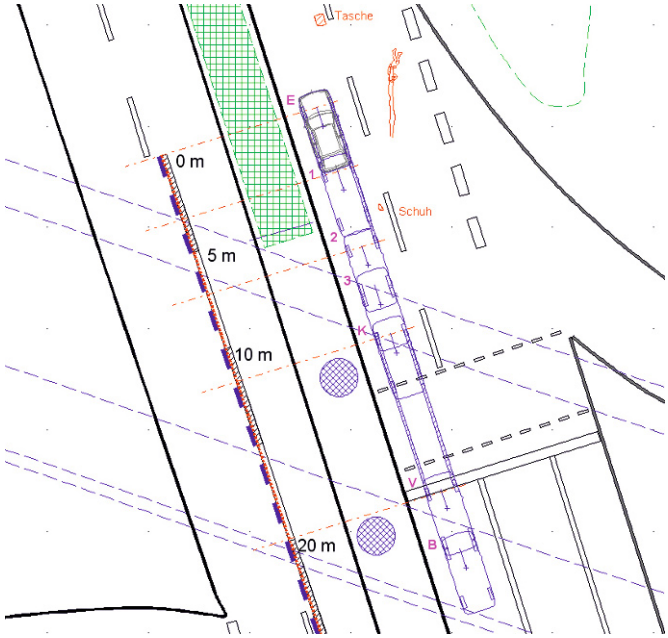


Bild B2-9 Phasen für die Geschwindigkeitsberechnung des Pkw

Mit der im Bild oben gezeigten Bezeichnung der einzelnen Phasen, können die folgenden Berechnungsdaten für eine Rückwärtsrechnung festgelegt werden:

Tabelle B2.2 Werte für die Geschwindigkeitsberechnung des Pkw

Abschnitt	Beschreibung	Strecke	Verzögerung
E – 1	beidseitige Spurzeichnung	3,3 m	7,0 m/s²
1 – 2	einseitige Spurzeichnung	3,9 m	6,3 m/s²
2 – 3	Bremsenschwelldauer	2,02 m	6,3 auf 0 m/s²
3 – K′	keine Spurzeichnung	2,48 m	0 m/s²
K′ – K	Kollision	0,0 m	
K – V	beidseitige Spurzeichnung	8,1 m	7,0 m/s²
V – B	Bremsenschwelldauer		7,0 auf 0 m/s²
B – R	Reaktion		0 m/s²

Mit den Daten aus der **Tabelle B2.2** können für die einzelnen Phasen die Geschwindigkeiten, die Zwischenzeiten und die noch fehlenden Distanzen berechnet werden. Dazu muss allerdings noch der Geschwindigkeitsverlust infolge der Kollision berechnet werden. Dazu wird der Anstoßfaktor mit 0,85 gewählt, näherungsweise rechtwinklige Überquerung angenommen und die Kollisionsgeschwindigkeit mit

$$v_K = v_{K'} \cdot \left(1 + AF \cdot \frac{m_{\text{Fußg.}}}{m_{\text{Pkw}}}\right) = \frac{37{,}42}{3{,}6} \cdot \left(1 + 0{,}85 \cdot \frac{65}{1.010}\right) = 39{,}47 \text{ km/h}$$

berechnet. Damit war die Geschwindigkeit des Pkw bei Bremsbeginn mindestens 57,5 km/h. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit wurde um 7,5 km/h überschritten.

Tabelle B2.3 Berechnete Daten

Abschnitt	Strecke in m	Dauer in s	Verzögerung in m/s²	Geschwindigkeit in km/h
E – 1	3,3	0,97	7,0	24,5
1 – 2	3,9	0,47	6,3	35,2
2 – 3	2,04	0,2	6,3 auf 0	37,4
3 – K′	2,5	0,24	0	37,4
K′ – K	0,0	0		39,5
K – V	8,1	0,62	7,0	55,0
V – B	3,07	0,2	7,0 auf 0	57,5
B – R	11,2	0,7	0	57,5

4.1 Vermeidbarkeit für den Pkw-Fahrer

a) Rechtzeitige Reaktion

Bei diesem Aspekt ist zu prüfen, ab welcher Position ein Fahrzeuglenker auf einen Fußgänger reagieren muss. Dabei ist daran zu denken, ob es sich um eine starke oder eher schwache Reaktionsaufforderung gehandelt hat. Hier hat eher eine starke Reaktionsaufforderung vorgelegen und auch ein klares Gefahrensignal. Somit kann von einer Gefahrerkennung kurz nach dem Auftauchen der Fußgängerin hinter dem Brückenpfeiler ausgegangen werden.

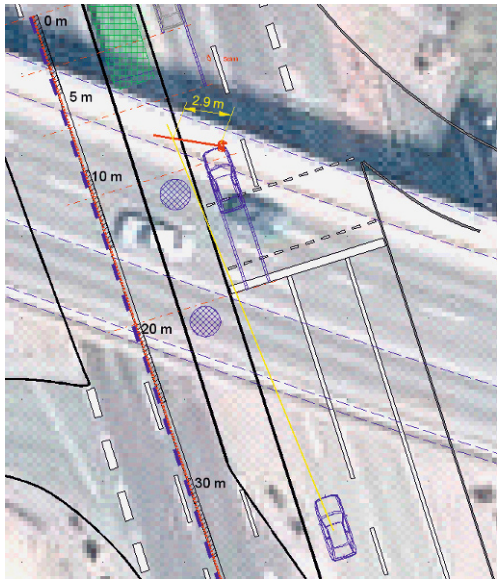


Bild B2-10 Prüfung der rechtzeitigen Reaktion

Von der Sitzposition des Pkw-Fahrers am Reaktionspunkt wird eine Sichtlinie am Sichthindernis vorbei gezeichnet. Damit ergibt sich mit der Bewegungslinie der Fußgängerin und dem Kollisionsort eine Wegstrecke, die die Fußgängerin vor Kollision für den Pkw-Fahrer erkennbar zurückgelegt hat von 2,9 m.

Die Zeitdauer, die sie dafür gebraucht hat, ist aus der Berechnung mit 1,52 s bekannt. Daraus berechnet sich die mittlere Bewegungsgeschwindigkeit für die Fußgängerin aus $v = s/t$ mit 6,9 km/h.

Das ist ein plausibler Wert, sodass sich daraus keine Anhaltspunkte für eine verspätete Reaktion des Pkw-Fahrers ableiten lassen.

b) Verdeckungsproblematik

Wie aus dem **Bild B2-10** ersichtlich, war unter Berücksichtigung der Zeugenaussage sicher eine bedeutsame Sichtverdeckung nicht nur durch einen Brückenpfeiler gegeben.

c) Einhaltung der innerörtliche Höchstgeschwindigkeit

Der Pkw-Fahrer hat die innerörtliche Höchstgeschwindigkeit mindestens um 7,5 km/h überschritten. Sein Reaktionspunkt lag 22,37 m vor dem Kollisionsort. Es ist sinnvoll, einen etwas kleineren Abstand für diese Betrachtung anzunehmen, weil doch jede noch so genaue Rekonstruktion mit Toleranzen behaftet ist, hier z. B. 22 m. Nun wird der Anhalteweg aus 50 km/h berechnet und geprüft, ob dieser größer oder kleiner als die verfügbare Anhaltestrecke von 22 m ist. Der Anhalteweg berechnet sich mit 24,9 m und ist damit länger als die verfügbare Anhaltestrecke. Der Unfall hätte sich somit auch bei 50 km/h ereignet, sofern es nicht zur zeitlichen Vermeidbarkeit gereicht hätte.

$$s_{A,50} = v_{50} \cdot t_{B-R} + \frac{v_{50} + v_{50} - \frac{a_v}{2} \cdot t_{V-B}}{2} \cdot t_{V-B} + \frac{\left(v_{50} - \frac{a_v}{2} \cdot t_{V-B}\right)^2}{2 \cdot a_v}$$

$$s_{A,50} = 13{,}9 \cdot 0{,}7 + \frac{13{,}9 + 13{,}9 - \frac{7}{2} \cdot 0{,}2}{2} \cdot 0{,}2 + \frac{\left(13{,}9 - \frac{7}{2} \cdot 0{,}2\right)^2}{2 \cdot 7} = 24{,}9 \text{ m}$$

d) Räumliche Vermeidbarkeit

Hier ist der Abstand zwischen der Kollisionsstelle *K* und dem Reaktionspunkt *R* mit 22,37 m bekannt, ebenso die mittlere Vollverzögerung mit 7 m/s², die Reaktionsdauer (*B* – *R*) und die Bremsenschwelldauer (*V* – *B*). Damit kann die Geschwindigkeit berechnet werden, die zur räumlichen Vermeidung des Unfalls geführt hätte.

$$v_r = \sqrt{a_V^2 \cdot \left(t_{B-R} + \frac{t_{V-B}}{2}\right)^2 + 2 \cdot a_V \cdot s_{K-R} + \frac{a_V^2}{4} \cdot t_{V-B}^2} - a_V \cdot \left(t_{B-R} + \frac{t_{V-B}}{2}\right)$$

$$v_r = \sqrt{7^2 \cdot \left(0{,}7 + \frac{0{,}2}{2}\right)^2 + 2 \cdot 7 \cdot 22{,}37 + \frac{7^2}{4} \cdot 0{,}2^2} - 7 \cdot \left(0{,}7 + \frac{0{,}2}{2}\right) = 46{,}71 \text{ km/h}$$

e) Zeitliche Vermeidbarkeit

Bei der zeitlichen Vermeidbarkeit muss zuerst festgestellt werden, wie groß die Räumstrecke war, die die Fußgängerin gebraucht hätte, um aus dem Gefahrenbereich zu kommen. Dann muss berechnet werden, wie lange sie zum Zurücklegen der Räumstrecke gebraucht hätte.

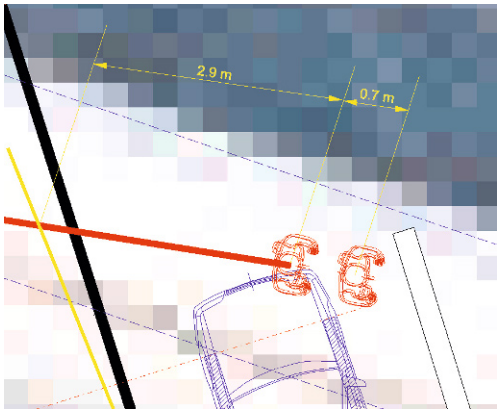


Bild B2-11 Ermittlung der Räumstrecke

Bei der Ermittlung der Räumstrecke ist zu berücksichtigen, dass nicht der Abstand von der Hüft- oder Beckendelle bis zur Außenkontur des Pkw zu bedenken ist, sondern es muss auch noch die Schrittbreite berücksichtigt werden, die abhängig von der Beinlänge und der Bewegungsart des Fußgängers ist.

Hier wurde nach **Bild B2-11** eine Räumstrecke von 0,7 m gewählt. Zum Zurücklegen dieser Strecke benötigte die Fußgängerin mit

$t = s/v$ bzw. 0,7 m/(6,9 km/h/3,6) = 0,37 s

Damit der Unfall zeitlich vermeidbar wird, müsste der Pkw um gerade diese 0,37 s später an der Unfallstelle eintreffen. Diese Bedingung wird mit der folgenden Gleichung berücksichtigt.

$$v_z = \frac{s_{K-R} + \frac{a_V}{2}\left(\left(t_{K-V} + t_{\text{Räum}}\right)^2 + t_{V-B}\cdot\left(t_{V-B} + t_{\text{Räum}}\right) + \frac{t_{V-B}^2}{2}\right)}{\left(t_{B-R} + t_{V-B} + t_{K-V} + t_{\text{Räum}}\right)}$$

$$v_z = \frac{22{,}37 + \frac{7}{2}\left(\left(0{,}62 + 0{,}37\right)^2 + 0{,}2\cdot\left(0{,}62 + 0{,}37\right) + \frac{0{,}2^2}{2}\right)}{\left(0{,}7 + 0{,}2 + 0{,}62 + 0{,}37\right)} = 12{,}46 \text{ m/s} = 44{,}9 \text{ km/h}$$

Da die zeitliche Vermeidbarkeitsgeschwindigkeit in diesem Fall geringer ist als die räumliche Vermeidbarkeitsgeschwindigkeit, liefert diese Berechnung kein sinnvolles Ergebnis.

Der Vollständigkeit halber wird noch die theoretische Geschwindigkeit am Kollisionsort berechnet:

$$v_{K\,th.} = v_z - a_V \cdot \left(t_{V-B} + t_{K-V} + t_{\text{Räum}}\right)$$

$$v_{K\,th.} = 12{,}46 - 7\cdot\left(0{,}2 + 0{,}62 + 0{,}37\right) = 4{,}13\,\text{m/s}$$

Der Wert ist positiv, sodass die Lösung physikalisch grundsätzlich sinnvoll ist.

5 Zusammenfassung

Nach Auswertung der vorliegenden Akten und Durchführung einer Ortsbesichtigung mit Fahrbahnvermessung kann zum Unfallablauf aus technischer Sicht Folgendes gesagt werden:

1. Die fahrbahnbezogene Kollisionsstelle lag wahrscheinlich am Ende der ersten beidseitigen Bremsspuren.
2. Die Kollisionsgeschwindigkeit war mindestens 39,5 km/h.
3. Die Geschwindigkeit des Pkw am Reaktionspunkt des Fahrers war mindestens 57,5 km/h.
4. Die Bewegungsgeschwindigkeit der Fußgängerin errechnete sich mit 6,9 km/h. Das ist ein plausibler Wert, sodass sich daraus keine verspätete Reaktion des Pkw-Fahrers ableiten lässt.
5. Die Fußgängerin war offensichtlich durch die beiden Brückenpfeiler verdeckt.
6. Der Unfall wäre auch bei Einhaltung von 50 km/h nicht zu vermeiden gewesen.
7. Der Unfall wäre räumlich bei einer Geschwindigkeit des Pkw am Reaktionspunkt des Fahrers von 48,5 km/h zu vermeiden gewesen. Die zu berechnende Geschwindigkeit zur zeitlichen Vermeidung des Unfalls liefert kein sinnvolles Ergebnis.

B3 Unfälle mit Zweiradfahrzeugen

Christian Tschirschwitz

Beispiel 1: Pkw kollidiert mit einem Fußgänger, der ein Fahrrad schiebt

1 Sachverhalt

Auf einer außerörtlichen Bundesstraße kam es in einem Baustellenbereich zum frontalen Anprall eines Pkw Ford Fiesta an die rechte Flanke eines Fahrrads, welches durch einen Fußgänger von links nach rechts, bezüglich der Fahrtrichtung des Pkw, geschoben wurde. Das Fahrrad und der Fußgänger wurden auf den Vorbau des Pkw aufgeladen und etwa 15 m weit geworfen. Der Fußgänger verstarb noch an der Unfallstelle.

2 Durchgeführte Maßnahmen/Aufgabenstellung/Lösungsweg

Durch die unfallaufnehmende Polizeibehörde wurde ein Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle an die Örtlichkeit gerufen. Gemeinsam mit den Polizeibeamten wurden zunächst die Spuren auf der Fahrbahnoberfläche lokalisiert und hinsichtlich ihrer Zeichnungsqualität in Abschnitte unterteilt. Die gesamte Situation, d. h. der Verlauf der Fahrbahn, die Lage von Markierungselementen, die Fahrzeugpositionen und die Spuren sowie die installierte Baustellenabsicherung wurden zunächst mittels Messtisch vermessen. Relevante Maße wurden mittels Bandmaß (Spurlängen) bzw. Maßstab (Abstand der Spuren zueinander) zentimetergenau vermessen und notiert. Um die mit dem Pkw erreichbare Schwerpunktverzögerung in möglichst genauer Form zu ermitteln, wurden unmittelbar nach den Unfallaufnahmemaßnahmen im Spurzeichnungsbereich mit dem noch fahrbereiten Fahrzeug Verzögerungsmessungen durchgeführt. Auf Empfehlung des Gutachters wurden der Pkw, das Fahrrad und die Leiche sichergestellt. Die Staatsanwaltschaft gab ein Gutachten in Auftrag, in welchem zum technischen Zustand des Pkw, zu dessen Ausgangsgeschwindigkeit und zur Vermeidbarkeit aus der Sicht des Pkw-Fahrers Stellung bezogen werden sollte.

Am Sicherstellungsort wurden zunächst die Kontaktpunkte an den Fahrzeugen lokalisiert, vermessen, zugeordnet und fotografiert. Anschließend wurden die Kollisionspartner gegenübergestellt. Im Rahmen der am Pkw durchgeführten Untersuchungen wurden keine technischen Mängel festgestellt. Insbesondere konnte mit der Betriebsbremsanlage der Blockierzustand der Vorderräder erreicht werden. Die Messungen an der Unfallstelle ergaben erreichbare Verzögerungswerte zwischen 7,6 m/s^2 und 7,9 m/s^2.

Mit den erhobenen Anknüpfungstatsachen war es möglich, mit einer konventionellen Rückwärtsrechnung zunächst die Ausgangsgeschwindigkeit des Pkw zu bestimmen und eine Vermeidbarkeitsrechnung durchzuführen.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_23

3 Objektive Merkmale

Tabelle B3.1 Allgemeine Fahrzeugdaten

Parameter	Einheit	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2
Fahrzeugart		Pkw	Fahrrad
Alter des Fahrzeugführers	a	22	80
Fabrikat		Ford	Diamant
Typ		Fiesta	
Aufbauart		Limousine 3-türig	Herrenfahrrad
Antriebsart		Otto	
Leistung	kW	44	
Hubraum	cm^2	1.299	
Länge	mm	3.743	
Breite	mm	1.606	
Höhe	mm	1.389	
Radstand	mm	2.446	
Überhang vorn	mm	700	
Spurweite vorn	mm	1.392	
Spurweite hinten	mm	1.384	
Felgendurchmesser	cm		55
Leermasse	kg	825	15
Beladung/Fußgängermasse	kg	175	75

Die maßgeblichen Beschädigungen und Kontaktpunkte am Pkw befanden sich in dessen Vorbaubereich. Unmittelbar linksseitig der Fahrzeuglängsachse wurde an der Vorderkante der Motorhaube eine vertikal verlaufende Einknickung festgestellt (weißer Pfeil in **Bild B3-3**), welche der rechten Gepäckhalterstrebe zuzuordnen war.

Die zwischen der Fahrzeugmitte und dem rechten Scheinwerfer vorhandenen Spuren wurden durch die Fahrradrahmenregion unterhalb des Sattels hervorgerufen. Der Winkel eines Abdrucks am Stoßfänger neben der rechten Ecke (roter Pfeil auf **Bild B3-3**) entsprach exakt dem Verlauf der Tretlager-Lenkkopfstrebe des Fahrrads. In der hinteren Region der Motorhaube wurde eine Druckspur festgestellt, welche dem Handbremsgriff des Fahrrads zuzuordnen war (hinterer blauer Pfeil auf den **Bildern B3-1, B3-3** und **B3-15**). Weiterhin war an der Frontscheibe des Pkw in unmittelbarer Nähe der rechten A-Säule ein Einschlagzentrum vorhanden, welches durch den Kopfkontakt des Fußgängers verursacht wurde.

Am Fahrrad fiel zunächst auf, dass die hintere Region der Hinterradgabel nach links abgeknickt war und gleichzeitig der Rahmenmittelbereich bogenförmig ebenfalls nach links geformt war. Die Räder waren dreidimensional verzogen. Der Sattel wurde nach rechts gebogen (**Bilder B3-4** bis **B3-6**).

Bei der Unfallörtlichkeit handelt es sich um einen außerörtlichen Bundesstraßenabschnitt, an welchem ein Fußgänger-/Fahrradübergangsbereich eingerichtet ist. Durch die Baumaßnahmen war die dort befindliche Lichtsignalanlage nicht in Betrieb. Aufgrund der halbseitigen Sperrung wurde der Verkehr wechselseitig an der Baustelle vorbeigeleitet (Baustellenampel). Abgestellte Baustellenfahrzeuge sowie Leitbaken führten zu ortsfesten Sichtbeeinträchtigungen bezüglich der sich annähernden Unfallbeteiligten. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit war auf 50 km/h festgesetzt. Die Fahrbahnoberfläche befand sich in trockenem Zustand.

Durch den Pkw wurde eine Blockierspur hervorgerufen, welche 35,3 m (links) bzw. 30,2 m (rechts) lang war. Die Zuordnung war zweifelsfrei, da das Fahrzeug mit den Vorderrädern oberhalb des Spurendes zum Endstand kam. Die rechte Spur wurde teilweise in unbefestigtem Gelände gezeichnet. Deutlich sichtbar war eine Unstetigkeit im Spurverlauf in Form einer Verschwenkung nach rechts, welche in Fahrtrichtung des Pkw hinter der Fußgängerfurt lokalisiert werden konnte (**Bilder B3-9** und **B3-10**). Eine hier ersichtliche deutlich intensivere Zeichnung war jedoch nicht das Resultat einer kollisionsbedingten Lasterhöhung auf die zeichnenden Räder. Vielmehr war hier lokal begrenzt ein anderer Fahrbahnwerkstoff mit einem höheren Bindemittelanteil eingebaut. Der Fußgänger kam rechts neben dem Pkw zur Endlage. Das Fahrrad wurde ebenfalls rechts neben dem Pkw vorgefunden. Es sollte sich hierbei jedoch nicht um die unfallbedingte Endlage handeln (**Bild B3-11**). Die Fahrbahngeometrie, die Lage der Spuren und die Endpositionen sind in der Zeichnung **Bild B3-16** dargestellt.



Bild B3-1 Pkw in Übersicht. Neben den gekennzeichneten Einzelbeschädigungen auf der Motorhaube ist die Position des Einschlagzentrums in der Frontscheibe neben der A-Säule erkennbar.



Bild B3-2 Vorbaugeometrie aus seitlicher Richtung gesehen



Bild B3-3 Einzelbeschädigungen an der Front



Bild B3-4 Fahrrad in Übersicht



Bild B3-5 Verformungsrichtung an der Tretlager-Lenkkopfstrebe



Bild B3-6 Ausknickung an der Hinterradgabel links



Bild B3-7 Annäherung aus der Sicht des Pkw-Fahrers. Der sich von links annähernde Fußgänger war durch die Baustelleneinrichtung hier noch verdeckt.



Bild B3-8 Unfallendsituation mit intensiv gezeichnetem Blockierspurpaar

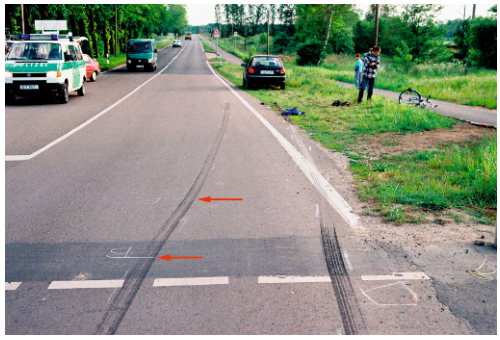


Bild B3-9 Die Pfeile grenzen eine an der Unfallstelle deutlich sichtbare Verschwenkung im Spurverlauf ein. Die sich in Kollisionsortnähe befindliche Intensitätsverstärkung ist hier jedoch das Resultat eines erhöhten Bindemittelanteiles oberhalb des Reparaturstreifens.



Bild B3-10 Blockierspuren entgegengesetzt der Pkw-Fahrtrichtung



Bild B3-11 Endpositionen von Pkw und Fußgänger (abgedeckt). Das Fahrrad soll sich nach Polizeiangaben in einer veränderten Lage befinden.



Bild B3-12 Pkw-Endstand mit den Vorderrädern am Ende der Blockierspuren



Bild B3-13 Stellung der Fahrzeuge während der Erstberührung. In der Folge wurde durch den Anprall des Fahrradrahmens die gekennzeichnete Spur verursacht.



Bild B3-14 Fahrrad relativ zum Pkw-Vorbau beim beginnenden Aufwurf

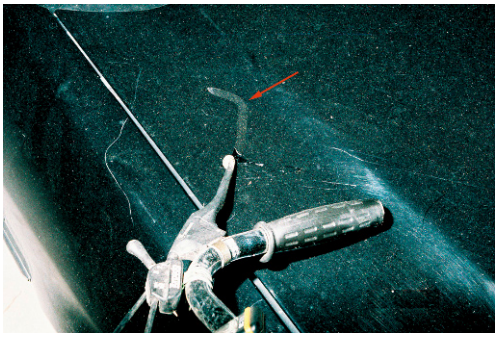
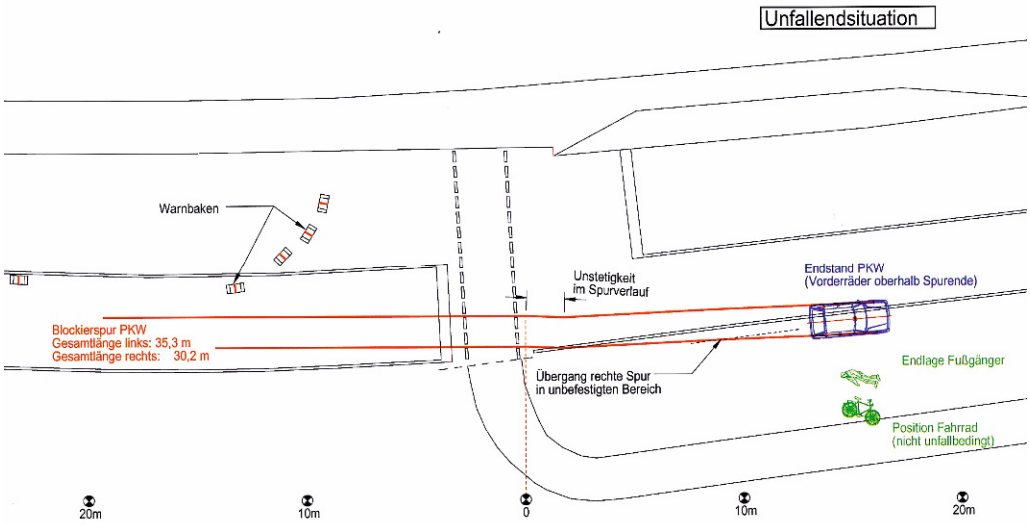


Bild B3-15 Die durch einen Pfeil markierte Spur wurde durch den Handbremshebel hervorgerufen. Die Spur befand sich in Höhe des hinteren Pfeils. (**Bild B3-3**)

Bild B3-16 Befunde an der Unfallstelle



4 Analyse

4.1 Bewegungsabläufe/Kollision

Anhand der Beschädigungscharakteristik am Fahrrad war nachzuvollziehen, dass die Kollision in mehreren Einzelphasen abgelaufen ist. Zunächst prallte der Pkw zwischen Fahrzeugmitte und linkem Scheinwerfer an das Hinterrad des Fahrrads. Die Deformation der Hinterradgabel nach links war offenbar das Resultat einer hier vorhandenen schrägen Stellung des Fahrrads zur Pkw-Querachse so, wie im linken Teilbild von **Bild B3-17** dargestellt. In der weiteren Folge kam es zum Kontakt mit dem Stoßfänger neben der rechten Ecke und der Tretlager-Lenkkopfstrebe am Fahrrad, sodass die hier vorhandene Berührungsspur hervorgerufen werden konnte.

Anhand von weiteren zahlreichen Einzelkontakten konnte darüber hinaus die während der Berührung vorgelegene deutliche verzögerungsbedingte Absenkung des Pkw-Vorbaus nachvollzogen werden. In der weiteren Folge wurde das Fahrrad so auf den Vorbau aufgeworfen, dass die rechte Lenkerregion die Spur in Frontscheibennähe hervorrufen konnte. Auch der Fußgänger wurde aufgeworfen und schlug mit dem Kopf in die Frontscheibe neben der rechten A-Säule ein (rechte Abbildung in Zeichnung **Bild B3-17** und **Bild B3-1**). Mit der deutlich sichtbaren Spurauslenkung lag ein sicheres Merkmal zur Lokalisierung der Kollisionsstelle vor, sodass der Pkw während des Kollisionsbeginns mit den Vorderrädern oberhalb der Unstetigkeit im Spurverlauf zu positionieren war.

Die Stellung des Fahrrads ergab sich entsprechend der rekonstruierten Kollisionsstellung zueinander. Wie in der Zeichnung **Bild B3-18** dargestellt ist, befanden sich Fußgänger und Fahrrad während des Zusammenstoßes außerhalb der Fußgängerfurt. Die Geländebedingungen waren hier geeignet, um als Fußgänger den Weg abzukürzen, sodass die rekonstruierte Stellung prinzipiell nicht unplausibel ist.

Der Pkw-Fahrer führte als Abwehrreaktion auf den seinen Bewegungskorridor querenden Fußgänger eine Vollverzögerung durch, deren Resultat entsprechend **Bild B3-18** in einem Abstand von 19,3 m vor dem Kollisionsort in Form des Spurbeginns zum Tragen kam. Die Komponenten Fußgänger und Fahrrad wurden schräg nach rechts geworfen, wobei lediglich die Wurfweite des Fußgängers in der Größenordnung von etwa 15 m als gesichert anzusehen ist. Der Kollisionsauslaufweg des Pkw betrug 16 m.

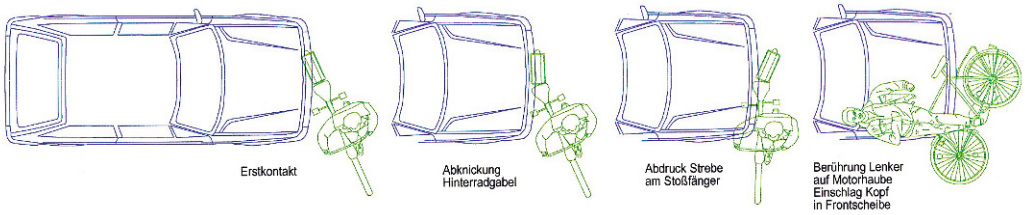


Bild B3-17 Kollisionsablauf

4.2 Geschwindigkeitsberechnungen

Die Ausgangsgeschwindigkeit des Pkw wurde während der vorkollisionären Verzögerung, durch den Anprall selbst und die nachkollisionär erfolgte Bremsung bis zum Stillstand abgebaut. Die Gesamtlänge der Spur wurde in vier Abschnitte entsprechend der unterschiedlichen Zeichnungsqualität unterteilt. In der **Tabelle B3.2** wurde jedem dieser vier Abschnitte eine Länge und ein Verzögerungsbereich zugeordnet. Für die erreichbare Schwerpunktverzögerung wurden die bei den Versuchen gemessenen Werte zur Grundlage genommen und nochmals einer Tolerierung unterzogen. Entsprechend der Stoßpunktlage und dem Masseverhältnis der Kollisionspartner war der Geschwindigkeitsverlust während der Kollision dergestalt zu berücksichtigen, dass die Nachkollisionsgeschwindigkeit 92 % bis 95 % der Vorkollisionsgeschwindigkeit entsprach.

Tabelle B3.2 Werte für Geschwindigkeitsberechnung Pkw

Abschnitt	Beschreibung	Länge in m	Verzögerung in m/s²
1	Spurzeichnung vorkollisionär nur links	5,1	7,0–7,5
2	Spurzeichnung vorkollisionär beidseitig	14,2	7,5–8,0
3	Spurzeichnung nachkollisionär beidseitig befestigte Fahrbahn	8,9	7,5–8,0
4	Spurzeichnung nachkollisionär, rechts unbefestigter Randstreifen	7,1	5,0–6,5

Unter Zugrundelegung der Werte aus **Tabelle B3.2** konnten die in **Tabelle B3.3** eingetragenen Zwischen- und Endergebnisse bezüglich der Pkw-Geschwindigkeit errechnet werden. Die Ausgangsgeschwindigkeit des Pkw betrug somit v_0 = 84 km/h bis 89 km/h. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit wurde um 34 bis 39 km/h überschritten.

Tabelle B3.3 Ergebnisse Geschwindigkeitsberechnung Pkw

Parameter	Symbol	Einheit	Wert	
Nachkollisionsgeschwindigkeit	v_{NK}	m/s km/h	14,3–15,3	51–55
Vorkollisionsgeschwindigkeit	v_{VK}	m/s km/h	15,0–16,6	54–60
Geschwindigkeit zu Beginn der Spurzeichnung	v_{VV}	m/s km/h	22,6–24,1	81–87
Ausgangsgeschwindigkeit	v_0	m/s km/h	23,3–24,8	84–89

4.3 Vermeidbarkeit für den Pkw-Fahrer

Bei einer nachgewiesenen Geschwindigkeitsüberschreitung war zu überprüfen, ob der Pkw-Fahrer bei gleichem Reaktionsverhalten und bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (50 km/h) vor dem Kollisionsort zum Stillstand kommen konnte und somit den Unfall hätte räumlich vermeiden können. Zugunsten des Pkw-Fahrers war hier die untere Ausgangsgeschwindigkeitsgrenze zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Vermeidbarkeitsrechnung sind in **Tabelle B3.4** eingetragen und können gleichzeitig anhand der Zeichnung **Bild B3-18** nachvollzogen werden. Es konnte ermittelt werden, dass der Pkw bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit $s_{STILL–KP}$ = 17,3 m vor dem Kollisionspunkt zum Stillstand gekommen wäre. Der Unfall wäre auch unter Zugunstenbetrachtung für den Pkw-Fahrer durch diesen räumlich zu vermeiden gewesen.

Tabelle B3.4 Werte und Ergebnisse räumliche Vermeidbarkeit (zugunsten Pkw-Fahrer)

Parameter	Symbol	Einheit	Wert
Länge tatsächlicher Vorbremsweg	s_{VB}	m	23,3
Abstand Reaktionspunkt – Kollisionspunkt	$s_{RP–KP}$	m	42,6
Vorbremsweg aus 50 km/h	$s_{VB(50)}$	m	13,8
Vollverzögerungsstrecke nach Ablauf der Schwellzeit aus 47 km/h	$s_{VV(50)}$	m	11,5
Anhalteweg aus 50 km/h	$s_{A(50)}$	m	25,3
Abstand Pkw im Stillstand vom Kollisionsort aus 50 km/h	$s_{ST–KP50}$	m	17,3

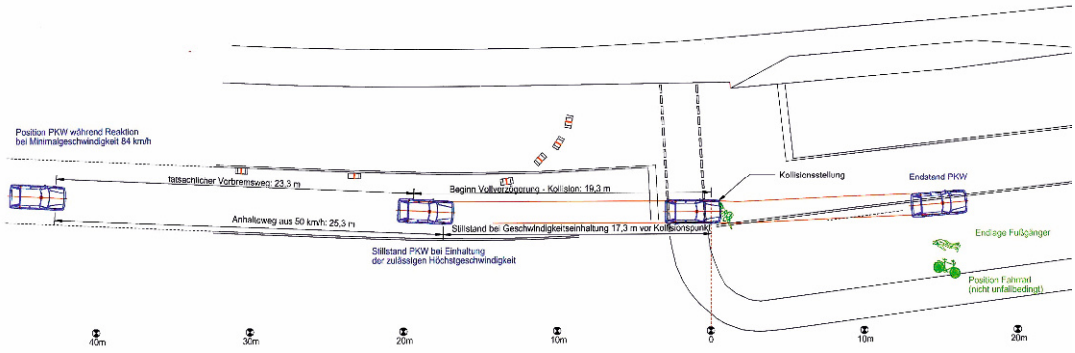


Bild B3-18 Rekonstruktionszeichnung

B4 Unfälle mit motorisierten Zweirädern

Christian Tschirschwitz

1 Pkw kollidiert mit vorfahrtsberechtigtem Krad

1.1 Sachverhalt

Der Fahrer eines Pkw Opel Astra überquerte mit seinem Pkw von einer untergeordneten Einmündung kommend eine außerörtliche Bundesstraße in gerade Richtung. Dabei kam es zur Kollision mit einem sich von rechts vorfahrtsberechtigt annähernden Krad Suzuki RGV250. Der Anprall des Krades erfolgte mit dem Heck an die rechte Pkw-Flanke zwischen vorderem Radausschnitt und Fahrzeugecke. Der Krad-Fahrer, welcher sofort tot war und das Zweirad verklemmten sich am Pkw und verblieben relativ zu selbigem annähernd in Kollisionsstellung.

1.2 Durchgeführte Maßnahmen/Aufgabenstellung/Lösungsweg

Die Unfallaufnahme erfolgte durch den polizeilichen Fachdienst in Zusammenarbeit mit einem Sachverständigen. Hierbei wurde nach Analyse des Kontaktspurenbildes am Zweirad festgestellt, dass sich selbiges in einer a-typischen Bewegungsform an den Kollisionsort angenähert haben muss. Die durch beide Fahrzeuge hervorgerufenen Spuren wurden lokalisiert, den einzelnen Fahrzeugzonen zugeordnet, fotografiert und vermessen. Die Vermessung erfolgte mittels Messtisch. Spurdetails wurden zentimetergenau unter Nutzung eines Maßstabes bzw. Bandmaßes erfasst. Da zwischen den Annäherungslinien der Unfallbeteiligten ein ortsfestes Sichthindernis bestand und auch hinsichtlich des Vegetationsstandes von Bäumen und Grasbewuchs individuelle Verhältnisse vorlagen, wurde unmittelbar nach der Unfallaufnahme ein Wahrnehmbarkeitsversuch durchgeführt.

Durch die zuständige Staatsanwaltschaft wurde ein Gutachten in Auftrag gegeben, in welchem zum technischen Zustand der Fahrzeuge, zum Unfallablauf und zur Vermeidbarkeit aus der Sicht beider Beteiligter Stellung bezogen werden sollte.

Die technische Untersuchung der Fahrzeuge, welche bezüglich des Zweirads auch eine Schwerpunktbestimmung beinhaltete, wurde bei einem hierfür geeigneten Abschleppunternehmen durchgeführt. Zuvor war es notwendig, weitere technische Details vom Zweirad bei einem Fachhändler in Erfahrung zu bringen.

Nach Anfertigung einer Zeichnung von der Unfallendsituation, in welche auch die Spurdetails in der Umgebung des Kollisionsortes Eingang gefunden haben, wurde zunächst eine klassische Auslaufanalyse durchgeführt. Selbige lieferte die Grundlage für die geometrische Herleitung der Kollisionseinlaufimpulse und damit der Kollisionsgeschwindigkeit nach dem Impulsspiegelverfahren. Die Ergebnisse wurden mittels einer Energiebilanzierung sowie unter Anwendung des Vorwärtsverfahrens (PC-Crash) überprüft. Die Ausgangsgeschwindigkeit des Zweirads wurde unter Verwendung der den einzelnen Spurabschnitten zugeordneten Schwerpunktverzögerungswerte errechnet. Die Weg-Zeit-Analysen als Grundlage für die Durchführung der Vermeidbarkeitsbetrachtungen erfolgten mittels des Simulationsprogramms Analyzer Pro.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_24

1.3 Objektive Merkmale

Tabelle B4.1 Allgemeine Fahrzeugdaten

Parameter	Einheit	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2
Fahrzeugart		Pkw	Kraftrad
Fabrikat		Opel	Suzuki
Typ		Astra	VJ22B (RGV 250)
Aufbauart		Limousine 3-türig	
Antriebsart		Otto	Otto
Leistung lt. Fzg.-Schein	kW	44	25
tatsächliche Leistung	kW	44	45
Hubraum	cm^3	1.389	249
Länge	mm	4.051	1.995
Breite	mm	1.688	690
Höhe	mm	1.410	1.070
Radstand	mm	2.517	1.380
Überhang vorn	mm	782	
Spurweite vorn	mm	1.424	
Spurweite hinten	mm	1.423	
Schwerpunktrücklage	mm	1.050	600
Schwerpunkthöhe	mm		450
Leermasse	kg	955	166
Beladung	kg	85	75 (Fahrer)
Massenträgheitsmoment	$kg\ m^2$	1.360	

1.3.1 Beschädigungen/technische Zustände

Durch die auf den Vorbau des Pkw von rechts eingeleitete Kraft wurde die Karosserie in der vorderen Region sekundär nicht unbeträchtlich nach links gestaucht. Die Primärverformungen konzentrierten sich auf den vorderen Abschnitt des rechten Kotflügels und die hieran angrenzende Region der Motorhaube (**Bilder B4-1** bis **B4-3**). Im Rahmen der am Pkw durchgeführten Funktionsprüfung, in welche auch die Kupplung einbezogen wurde, waren keine technischen Mängel festzustellen.

Bereits an der Unfallstelle fiel auf, dass die üblicherweise bei Zweiradunfällen vorhandenen Schleifspuren an kontaktprädestinierten Bauteilen eines Krades an einer der Flanken (Fußrasten; Lenker; Verkleidung) hier fehlten. Demgegenüber beeindruckten exakt parallel zur *x-z*-Ebene angeordnete Schürfungen an der Verkleidung zwischen Fahrscheinwerfer und Scheibe

sowie an den Bruchstücken der Scheibe selbst (Bild B4-5). Ansonsten wurden Deformationen am Fahrzeugrahmen hinten sowie Zerreißungen und Materialbrüche im hinteren Fahrwerksbereich festgestellt.

Die für die Fahrsicherheit des Zweirads relevanten Baugruppen waren in Ordnung. Dies betraf insbesondere beide Bremsanlagen. Aufgrund der an der Unfallörtlichkeit vorgefundenen Spuren und deutlicher Abschliffe an den Laufflächen beider Räder konnte davon ausgegangen werden, dass sich das Zweirad in ausreichend verzögerungsfähigem Zustand befand.

Um die Überschlagsbedingungen um das Vorderrad herleiten zu können, war es notwendig, die Schwerpunktlage, insbesondere in vertikale Richtung, zu ermitteln. Hierzu wurde das Zweirad an mehreren Positionen an einen Kran gehängt. Der Schwerpunkt ergab sich durch Schnittbildung der jeweils vom Aufhängepunkt ausgehenden Vertikalen (Bild B4-6). Aus den Fahrzeugunterlagen ging hervor, dass die Leistung durch Gaszuganschlag im Verteilergehäuse auf 25 kW begrenzt war. Es durfte ein maximaler Seilzugweg von 13 mm vorliegen. Bei Überprüfung des Fahrzeugs wurde festgestellt, dass es durch Drehen am Gasgriff möglich war, die Ansaugquerschnitte voll zu öffnen. Es war ein Gaszugweg von nahezu 40 mm möglich (Bilder B4-7 und B4-8). Somit konnte davon ausgegangen werden, dass mit dem Zweirad die serienmäßige Leistung von 45 kW erreicht werden konnte. Der Zweiradfahrer war nicht im Besitz der hierfür notwendigen Fahrerlaubnis.



Bild B4-1 Pkw in Übersicht



Bild B4-2 Verformungen im Anstoßbereich



Bild B4-3 Verzug des Vorbau nach links



Bild B4-4 Beschädigungen am Krad



Bild B4-5 Schürfungen an Verkleidung und Resten der Scheibe parallel zur Längsebene



Bild B4-6 Schwerpunktbestimmung am Krad

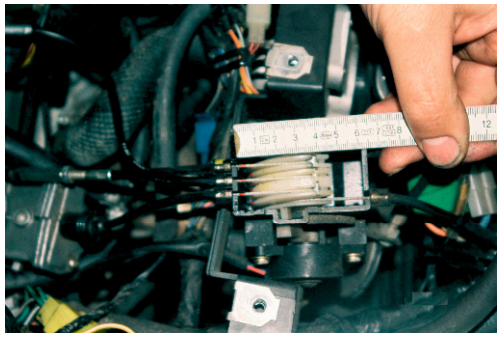


Bild B4-7 Gaszüge in Leerlaufstellung

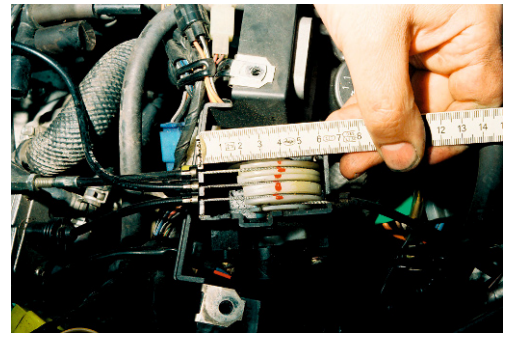


Bild B4-8 Möglicher Gaszugweg von fast 40 mm bei zulässigem Weg von maximal 13 mm

1.3.2 Unfallstelle/Endstände/Spuren

Die Bundesstraße, auf welcher sich der Unfall ereignete, verfügte über eine zum Unfallzeitpunkt trockene Asphaltoberfläche. Sie war 6,0 m breit. Gegenüber der Einmündung, aus welcher sich der Pkw annäherte, befand sich ein Feldweg, in welchen der Pkw-Fahrer beabsichtigte, hinein zu fahren. Die Unfallstelle befand sich außerorts, jedoch passierte der Kradfahrer

117 m vor dem Kollisionsort eine Ortstafel (Rückseite). Nach Passieren der Ortstafel verläuft die Fahrbahn in Fahrtrichtung des Zweirads linksgekrümmt. Das links befindliche Grundstück wurde durch einen etwa 2 m hohen Zaun eingegrenzt, von welchem eine ortsfeste Sichtbeeinträchtigung hinsichtlich der Fahrlinien beider Unfallbeteiligter ausging.

Die Geometrie der Unfallstelle ist in den **Bildern B4-9** und **B4-24** dargestellt. Erwähnenswert ist die Tatsache, dass die Fahrbahn in Fahrtrichtung des Zweirads betrachtet, nach der Einmündung eine stärkere Rechtskurve beschreibt. Ein Mischwaldbestand verdeckte hier von links kommende, vorfahrtsberechtigte Fahrzeuge für den Pkw-Fahrer.

Geschwindigkeitsbeschränkungen waren für den Zweiradfahrer nicht vorhanden. Der Unfall ereignete sich bei Tageslicht.

Der Pkw wurde in dessen Endstellung schräg auf der durch das Zweirad benutzten Fahrspur vorgefunden. Das Krad hatte sich mit dem Heck und den Rädern nach oben weisend in der rechten vorderen Eckregion des Pkw verhakt. Der getötete Zweiradfahrer befand sich unterhalb des Zweirads, so, wie in den Zeichnungen der **Bilder B4-21** und **B4-22** und in den **Bildern B4-14** und **B4-15** dargestellt. Der Kollisionsort war hier anhand der Spuren eindeutig zu lokalisieren. Zum rechten Vorderrad des im Endstand befindlichen Pkw führte eine Radierspur (Nummer 6 auf **Bild B4-19** sowie in Zeichnung **B4-21**).

Korrespondierend zu der Kollisionsstellung zueinander mündete in Höhe Nummer 7 eine Schleifspur. Innerhalb dieser Spur wurden farbige Lacksplitter vorgefunden, welche dem Schutzhelm des Zweiradfahrers zugeordnet werden konnten (**Bild B4-19** und **Bild B4-20**).

In retrograder Verlängerung der Spur 7 wurde eine weitere geradlinige Schleifspur mit einer Länge von 1,8 m gesichert. Hier konnten Materialien festgestellt werden, welche ihren Ursprung in der Verkleidung und der Scheibe des Krades hatten (**Bild B4-18**).

Zu der Spur 5 führten Blockierspuren vom Zweirad. Zunächst setzte in einem Abstand von 32,9 m vom Beginn der Spur 5 in Höhe Nummer 1 eine 8,3 m lange und gerade gezeichnete Spur ein (**Bild B4-16**). Nach einem 4,3 m freien Abstand begann in Höhe Nummer 3 eine insgesamt 12,0 m lange Spur, welche jedoch deutlich von der Geradlinigkeit abwich und zudem intensiver gezeichnet war, als die Spur 1–2 (**Bild B4-17**).

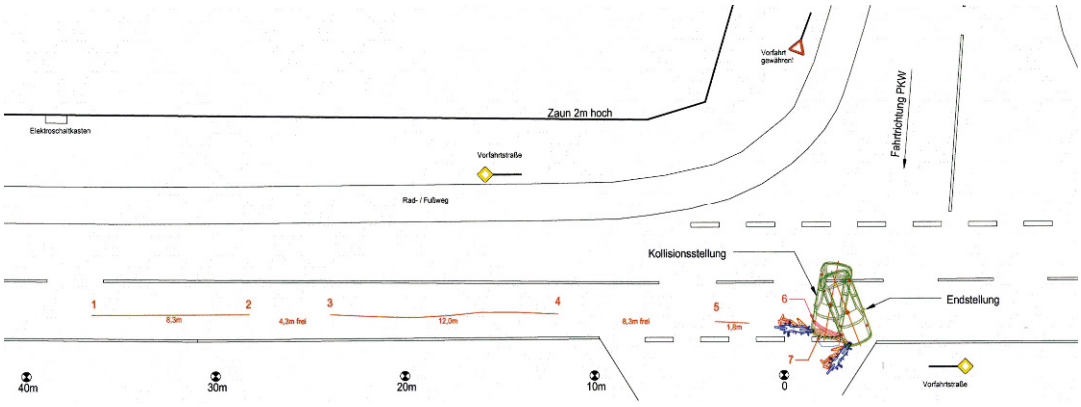


Bild B4-9 Bewegungsablauf Krad bis zur Kollision



Bild B4-10 Annäherung aus Sicht Kradfahrer noch innerorts



Bild B4-11 Sicht Kradfahrer in Annäherung an die Einmündung



Bild B4-12 Geometrie der Einmündung



Bild B4-13 Sicht Pkw-Fahrer nach rechts



Bild B4-14 Endpositionen der Fahrzeuge



Bild B4-15 Endpositionen Fahrzeuge und Fahrer



Bild B4-16 Spurbeginn Krad, wenig intensiv und gerade gezeichnet (Hinterrad)



Bild B4-17 Beginn intensive, nicht gerade verlaufende Spur (Vorderrad)



Bild B4-18 Schürfung von Krad-Verkleidung



Bild B4-19 Radierspur rechtes Vorderrad Pkw (6) und Schürfspur Helm (7)



Bild B4-20 Farbpartikel vom Helm im Detail

1.4 Analyse

1.4.1 Rekonstruktion der Bewegungsabläufe

Zeugen führten zunächst aus, dass der Pkw-Fahrer mit seinem Fahrzeug in Höhe der Wartelinie stand, ehe er sein Fahrzeug in mäßiger Größenordnung beschleunigte. Andere Zeugen beschrieben die Geschwindigkeit des Zweirads noch vor Verlassen der der Unfallstelle vorgelagerten Ortschaft als sehr schnell. Legt man für den Pkw eine mittlere Beschleunigung zugrunde, hatte er innerhalb der 6,2 m langen Strecke zwischen Stillstand und Kollisionsort eine höhere Geschwindigkeit erreicht, als die Kollisionsgeschwindigkeit. Das heißt, der Fahrer hat auf das sich annähernde Zweirad reagiert und eine Verzögerung eingeleitet. Der Zweiradfahrer leitete als Abwehrmaßnahme auf den sich in Richtung seines Fahrkorridors bewegenden Pkw eine Vollverzögerung ein, welche 38 m vor der Kollision einsetzte. Die wenig intensive Zeichnungsqualität der Spur 1–2 und der exakt geradlinige Verlauf deuten darauf hin, dass hierfür zunächst nur die Hinterradbremse benutzt wurde. Zwischen den Positionsnummern 2 und 3 hat der Zweiradfahrer dann zusätzlich die Vorderradbremse betätigt, sodass das Hinterrad in Höhe der Nummer 2 entlastet wurde und die Spurzeichnung zunächst hier endete. Durch den Abbruch der Rotation der Räder wurde das Zweirad instabil. Neben der stärkeren Zeichnung verlief die Spur 3–4 auch deutlich sinusförmig. Im Verlauf der Spur 3–4 kam es aufgrund der hohen Schwerpunktlage (Bild B4-6) zum Ausheben des Hecks und zum anschließenden Über-

schlag um das Vorderrad, sodass die parallel zur Längsebene des Fahrzeugs vorhandenen Schürfungen (Bild B4-5) ab dem Beginn der Spur 5 entstehen konnten. Da sich das Fahrzeug zu keinem Zeitpunkt auf der Flanke rutschend bewegte, blieben auch die ansonsten typischen Schleifspuren an Fußrasten, Lenker oder Seitenverkleidung aus. Der Überschlagprozess, welcher nur durch Einsatz der Vorderradbremse zu realisieren war, ist in Bild B4-21 dargestellt.

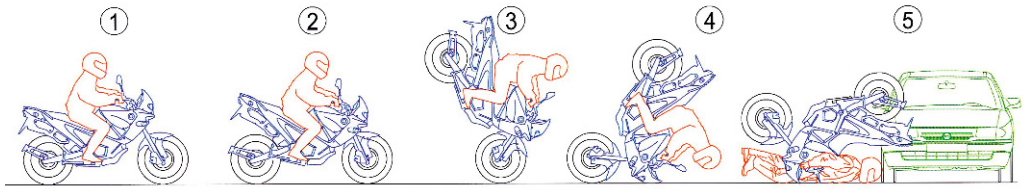


Bild B4-21 Bewegungsablauf Krad bis zur Kollision

1.4.2 Geschwindigkeiten

Kollisionsgeschwindigkeiten

Mit den in der Nähe des rechten Winkel befindlichen Kollisionseinlaufrichtungen der Fahrzeuge lagen gute Bedingungen vor, um die Kollisionsgeschwindigkeiten mit dem Impulsspiegelverfahren einzugrenzen. Zudem konnten die Auslaufwege und Auslaufrichtungen auf Grundlage der an der Unfallstelle durchgeführten Arbeiten mit einer vergleichsweise hohen Genauigkeit ermittelt werden. Als vorteilhaft hat sich erwiesen, die Spuren im Auslaufbereich zentimetergenau zu vermessen und in einer Detailskizze darzustellen. Für die Auslaufanalyse wurde eine Zeichnung mit vergrößertem Maßstab angefertigt (B4-22), in welche die Kollisionsstellungen, die Endpositionen und Zwischenpositionen eingetragen wurden. Es hat sich auch hier gezeigt, dass die Auslaufimpulsrichtungen nicht durch Verbinden der Fahrzeugschwerpunkte in Kollisionsstellung und Endlage gebildet werden können. Maßgeblich sind die Richtungen unmittelbar zum Ende der Kollisionsphase. Je nachdem, wie genau die entsprechenden Parameter (Auslaufkurswinkel; Verzögerung; Wegstrecke) zugrunde gelegt werden können, sind Toleranzen zu berücksichtigen.

Nur so ist es möglich, einen abschließend gesicherten Ergebnisbereich als Grundlage für die juristische Entscheidung zu gewinnen. Die Auslaufgeschwindigkeit des Pkw wurde unter Verwendung der Schwerpunktwegstrecke gewonnen, wobei hier zu berücksichtigen ist, dass sich die Geschwindigkeit dann auch auf den Schwerpunkt und nicht auf den Stoßpunkt bezieht. Da im Weiteren die Kenntnis des Gesamtimpulses des Pkw notwendig ist, ist für die Impulsrechnung somit die Schwerpunktgeschwindigkeit und nicht die Stoßpunktgeschwindigkeit zugrunde zu legen. Die in Ansatz gebrachte Verzögerung des Pkw wurde zwischen 4,8 m/s^2 und 6,0 m/s^2 berücksichtigt. Der obere Wert wäre zutreffend, wenn nachkollisionär durch den Pkw-Fahrer eine starke Verzögerung durchgeführt wurde. Die untere Grenze wurde durch vektorielle Addition des Quer- und Längsverzögerungsanteils bei einem mittleren Schwimmwinkel von etwa 50° ermittelt.

Bei der Bestimmung der Auslaufgeschwindigkeit des Zweirads wurde davon ausgegangen, dass sich das Fahrzeug unmittelbar nach der Kollision am Pkw verhakte und etwa über einen gemeinsamen Drehpunkt neben der translatorischen Auslaufstrecke auch mit einem rotatorischen Geschwindigkeitsanteil in die Endlage gelangte. Dieser rotatorische Geschwindigkeitsanteil wurde über den gemeinsamen Drehwinkel in der Größenordnung von 31°, dem Abstand der Einzelschwerpunkte und der Auslaufzeit grenzwertig bestimmt. Die minimale und maximale lineare Geschwindigkeit, welche vom Pkw vorgegeben wurden, wurden sodann entsprechend **Bild B4-22** an die Rotationsgeschwindigkeiten angetragen. Durch entsprechende Verbindung der Vektorpfeile ergab sich sodann die tolerierte Kollisionsauslaufgeschwindigkeit des Krades hinsichtlich der möglichen Richtungen und Beträge. Die Auslaufimpulsrichtungen des Krades sind dabei mit den tatsächlichen Auslaufbedingungen des Fahrzeugs gut vereinbar. Die Werte sind in **Tabelle B4.2** eingetragen. Durch Anwendung des Impulsspiegelverfahrens (**Bild B4-23**) ergaben sich die Kollisionsgeschwindigkeiten wie folgt:

Pkw: v = 5 km/h – 9 km/h

Krad: v = 54 km/h – 67 km/h

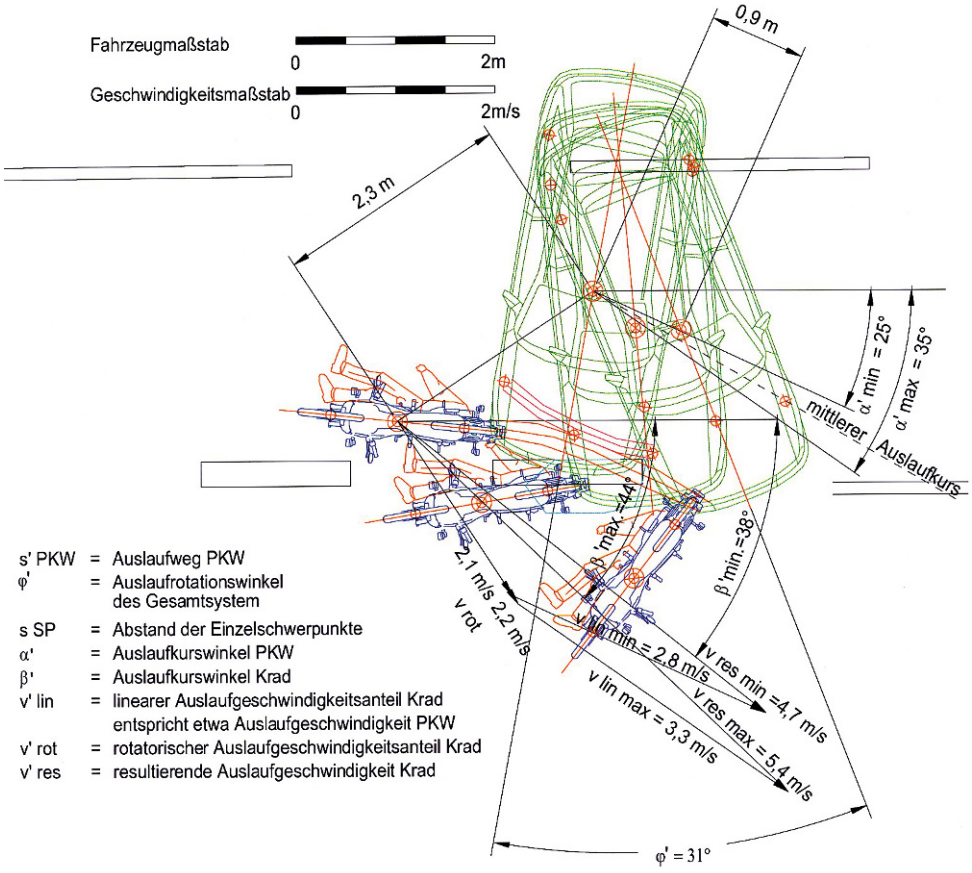


Bild B4-22 Parameter für Auslaufanalyse

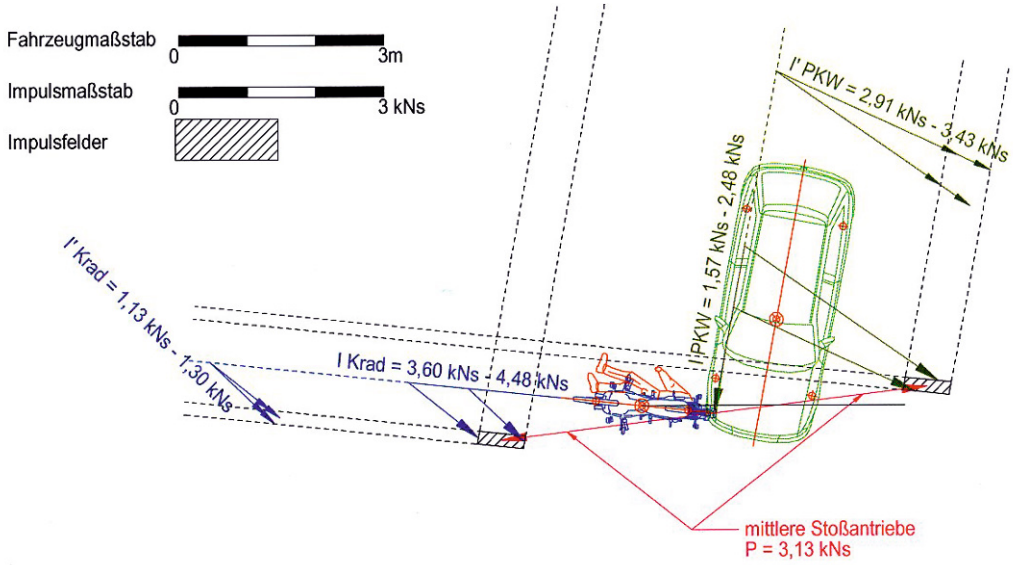


Bild B4-23 Konstruktion der Lösungsfelder mit Impulsspiegelverfahren

Tabelle B4.2 Werte und Ergebnisse Impulsspiegelverfahren

Parameter	Symbol	Einheit	Pkw Opel	Krad Suzuki
Minimale Nachkollisions-geschwindigkeit	v'_{min}	m/s	2,8	4,7
Maximale Nachkollisions-geschwindigkeit	v'_{max}	m/s	3,3	5,4
Masse zum Unfallzeitpunkt	m	kg	1.040	241
Minimaler Betrag Auslaufimpuls	I'_{min}	kNs	2,91	1,13
Maximaler Betrag Auslaufimpuls	I'_{max}	kNs	3,43	1,30
Grenze 1 Auslaufimpulsrichtung	$\alpha_1' \beta_1'$	°	325	316
Grenze 2 Auslaufimpulsrichtung	$\alpha_2' \beta_2'$	°	335	322
Einlaufimpulsrichtung	$\alpha \beta$	°	260	354
Minimaler Betrag Einlaufimpuls	I_{min}	kNs	1,57	3,60
Maximaler Betrag Einlaufimpuls	I_{max}	kNs	2,48	4,48
Richtung mittlerer Stoßantrieb	δ	°	187	7
Betrag mittlerer Stoßantrieb	P	kNs	3,13	3,13
Minimale Kollisionsgeschwindigkeit	v_{min}	m/s km/h	1,5 5	14,9 54
Maximale Kollisionsgeschwindigkeit	v_{max}	m/s km/h	2,4 9	18,6 67

Bei den Geschwindigkeitsberechnungen wurde berücksichtigt, dass die Masse des Zweiradfahrers hier vollumfänglich an der Impulsbildung teilgenommen hat. Es hat sich im Rahmen der Geschwindigkeitsanalyse gezeigt, dass insbesondere die Kollisionsgeschwindigkeit des Zweirads sehr sensibel auf die Auslaufstrecke des Pkw und den Rotationswinkel reagiert. Dies ist hier insbesondere in der beträchtlichen Stoßmassendifferenz der Kollisionspartner begründet. Insbesondere dann, wenn die notwendigen Ausgangsgrößen nicht mit der gebotenen Genauigkeit festgestellt werden können, sollten parallel auch andere Verfahren zur Geschwindigkeitseingrenzung verwendet werden, um ermittelte Ergebnisse zu überprüfen. Im vorliegenden Fall wurden die mittels des Impulsverfahrens berechneten Ergebnisse trotz der vergleichsweise genauen Anknüpfungsbasis durch Kalkulation des kollisionsbedingten Energieumsatzes und durch eine kinetische Analyse mittels PC-Crash überprüft.

Ausgangsgeschwindigkeiten

Pkw

Vom Stillstand bis zur Kollision legte der Pkw eine Wegstrecke von 6,2 m zurück. Bekannt ist nunmehr weiterhin, dass der Pkw mit einer Geschwindigkeit zwischen 5 km/h und 9 km/h am Kollisionsort eingetroffen ist. Die Ausgangsparameter sind hier zugunsten des Pkw-Fahrers vorzugeben. Günstig für den Pkw-Fahrer ist eine lange Zeit vom Start bis zur Kollision. Die Beschleunigung ist somit im unteren Bereich des möglichen Rahmens vorzugeben.

Eine entsprechende Größenordnung würde hier ein Wert von 1,5 m/s^2 darstellen, welcher auch den Zeugenaussagen nicht widerspricht. Der Pkw-Fahrer musste sein Fahrzeug innerhalb der zur Verfügung stehenden Wegstrecke in der genannten Größenordnung beschleunigen, auf den sich annähernden Kradfahrer reagieren und dann den Pkw auf die Kollisionsgeschwindigkeit wieder verzögern.

Prinzipiell ist es möglich, die maximal erreichbare Geschwindigkeit durch eine Handrechnung durch iterative Veränderung der Parameter zu bestimmen. Dies wäre jedoch sehr zeitaufwendig, sodass es von Vorteil ist, wenn man sich hierfür entsprechender Rekonstruktionssoftware bedient. Vorliegend wurde die Kalkulation mit Analyzer Pro vorgenommen. Es konnte herausgefunden werden, dass eine maximale Zeit vom Anfahrbeginn bis zur Kollision von 3,18 s vorgelegen hat, wenn das Fahrzeug auf die minimale Kollisionsgeschwindigkeit (5 km/h) abgebremst wurde. Die maximal erreichbare Geschwindigkeit ergab sich hier zu

$$v_{\text{Pkw max}} = 10{,}6 \text{ km/h}$$

Die fahrdynamischen Werte für den Pkw sind in der **Tabelle B4.3** dargestellt.

Tabelle B4.3 Fahrdynamische Werte für Pkw in Vorkollisionsphase (aus Analyzer Pro)

Phase	I Verzögerung	II Schwell	III Reaktion	IV Beschleunigung	
Endgeschwindigkeit	5,00	**8,84**	**10,64**	**10,64**	km/h
Weg(-Intervall)	0,41	**0,56**	**2,36**	**2,91**	m
Bremsverzögerung	5,00	5,00	**0,00**	–1,50	m/s²
Zeit(-Intervall)	**0,21**	0,20	0,80	**1,97**	s
Anfangsgeschwindigkeit	**8,84**	**10,64**	**10,64**	0,00	km/h
Summe Weg	**0,41**	**0,97**	**3,33**	**6,24**	m
Summe Zeit	**0,21**	**0,41**	**1,21**	**3,18**	s
Die Ergebnisse der Rechnung sind **fett** gedruckt. Die übrigen Werte sind in Normalschrift dargestellt.					

Krad

Der Geschwindigkeitsabbau des Zweirads erfolgte vor der Kollision während fünf Einzelphasen, innerhalb welcher unterschiedliche Verzögerungsspannen zur Grundlage genommen wurden. Die Einzelphasen sind einschließlich der Parameter Länge und Verzögerung in der **Tabelle B4.4** erläutert. Bei der Fixierung insbesondere der Verzögerungswerte wurde berücksichtigt, dass sich eine hohe Geschwindigkeit des Krades prinzipiell günstig für den Pkw-Fahrer auswirkt.

Unter Zugrundelegung der in der Tabelle stehenden Werte, der Vorkollisionsgeschwindigkeit des Krades und des während der Schwell- und Ansprechphase abgebauten Geschwindigkeitsanteiles ergibt sich die Ausgangsgeschwindigkeit für das Krad zu

$$v_0 = 90 \text{ km/h} - 106 \text{ km/h}$$

Es ist somit nicht auszuschließen, dass der Zweiradfahrer die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h überschritten hatte.

Tabelle B4.4 Werte für Geschwindigkeitsberechnung des Krad

Abschnitt	Beschreibung	Länge in m	Verzögerung in m/s²
1	Vollverzögerung Hinterrad; nicht auszuschließende Teilverzögerung Vorderrad	8,3	4,0–6,0
2	Aufbau Vollverzögerung Vorderrad, Entlastung Hinterrad (ohne sichtbare Spurzeichnung)	4,3	4,0–6,0
3	Vollbremsung beide Räder	12,0	8,0–9,0
4	Überschlag um das Vorderrad	8,3	3,0–4,0
5	Rutschphase	5,0	4,0–5,0

1.4.3 Weg-Zeit-Betrachtungen und Vermeidbarkeit

Zugunsten des Pkw-Fahrers musste davon ausgegangen werden, dass der Zweiradfahrer über eine längere Wegstrecke, so auch innerhalb der Ortschaft, mit der oberen Ausgangsgeschwindigkeit fuhr. Zumindest würde eine solche Geschwindigkeit den Zeugenaussagen nicht widersprechen. Die Untersuchung, in einem welchen zeitlichen und räumlichen Abstand vom Kollisionspunkt das Krad für den Pkw-Fahrer sichtbar wurde, erfolgte mit dem Simulationsprogramm Analyzer Pro. Die zwischen Pkw und Krad aufgespannte Sichtlinie schnitt die ortsfeste Sichthinderniskonzeption unter Zugunstenbetrachtung für den Pkw-Fahrer 4,7 s vor der Kollision. Das Krad war hierbei 130 m vom Kollisionsort entfernt (**Bild B4-24**). Beim Start des Pkw, 3,2 s vor der Kollision entsprechend der in **Tabelle B4.3** nachvollziehbaren Werte, war das Zweirad noch 85 m vom Kollisionsort entfernt. Die Reaktion seitens des Zweiradfahrers erfolgte 2,6 s vor der Kollision bei einer Entfernung zum Anstoßpunkt von 67 m. Die entsprechenden Werte sind in den **Tabellen B4.5a** bis **B4.5d** dargestellt.

Bei der technischen Beurteilung der Vermeidbarkeit für den Pkw-Fahrer ist zunächst festzustellen, dass das Zweirad auch unter Zugunstenbetrachtung für den Pkw-Fahrer eher aus der Verdeckung herausfuhr, als der Start des Pkw erfolgte. Es ist hier jedoch zu berücksichtigen, dass der Pkw-Fahrer nicht nur den sich rechts annähernden Verkehrsraum zu analysieren hatte, sondern sich vielmehr auch auf den von links kommenden Streckenabschnitt der Bundesstraße konzentrieren musste. Zum einen bestanden hier noch ungünstigere Sichtbedingungen und zum anderen hätte der Pkw den Fahrkorridor dieser vorfahrtsberechtigten Fahrzeuge eher erreicht, da er zuerst deren Fahrspur querte. Die Verkehrsraumanalyse war somit unter technischen Gesichtspunkten betrachtet mit Blick nach links abzuschließen. Kalkuliert man die Zeit vom letzten rechtsseitigen Blickkontakt bis zum Start des Fahrzeugs wie folgt:

Kopfdrehung von rechts nach links:	0,4 s
Analysezeit links:	0,6 s
Kopfdrehung gerade in Fahrtrichtung:	0,4 s
Entschlusszeit:	0,8 s
Ansprechzeit des Fahrzeugs:	0,2 s
Gesamtzeit:	2,4 s

ergibt sich unter Addition der Zeit vom Stillstand bis zur Kollision von 3,2 s, dass vom Abschluss der Verkehrsraumanalyse nach rechts bis zur Kollision durchaus eine Zeit von 5,6 s vergehen konnte. Diese Zeit ist letztlich größer, als der Zweiradfahrer sichtbar war.

Es besteht die Möglichkeit, dass das Zweirad für den Pkw-Fahrer noch verdeckt war, als er letztmalig rechtsseitig Blickkontakt hatte. Letztlich hätte der Unfall für den Pkw-Fahrer unter den ermittelten Geschwindigkeitsbedingungen nur vermieden werden können, wenn er eine Blickwiederholung nach rechts durchgeführt hätte.

Bei der Vermeidbarkeit für den Zweiradfahrer ist zunächst zu berücksichtigen, dass er einerseits die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschritt und andererseits offenbar bereits in der Ortschaft zu schnell fuhr. Es war insofern zu untersuchen, wie sich die fahrdynamischen Verhältnisse gestaltet hätten, wenn der Zweiradfahrer bis zum Passieren der Ortstafel 50 km/h schnell gefahren wäre, danach sein Fahrzeug beschleunigt hätte und im tatsächlichen Kollisionspunkt reagiert hätte. Die Ortstafel befindet sich 117 m vom Kollisionsort entfernt. Der Re-

aktionspunkt hatte eine Entfernung von 67 m, sodass das Krad hätte über eine Wegstrecke von 50 m beschleunigt werden können. Unter Zuhilfenahme der Beschleunigungskurve eines vergleichbaren Zweirads konnte ermittelt werden, dass ab einer Geschwindigkeit von 50 km/h durchaus eine durchschnittliche Beschleunigung von 4 m/s² erreicht werden konnte. Das Krad hätte dann im Reaktionspunkt eine Geschwindigkeit von 88 km/h nach einer Beschleunigungszeit von 2,6 s inne gehabt. Der Anhalteweg aus 88 km/h hätte bei einer starken, jedoch noch beherrschbaren Verzögerung (6 m/s^2) 72 m betragen. Zur Verfügung hätte eine Wegstrecke von etwa 67 m gestanden, sodass es dem Zweiradfahrer nicht gelungen wäre, vor dem Kollisionsort zum Stillstand zu kommen und das Unfallgeschehen räumlich zu vermeiden. Er wäre mit etwa 28 km/h am Kollisionsort eingetroffen. Die Zeit vom Reagieren bis zur Kollision hätte 3,7 s gegenüber einer Zeit von 2,6 s beim Realunfallgeschehen betragen. Innerhalb des Zeitgewinn von 1,1 s wäre der Pkw bei Beibehaltung der Maximalgeschwindigkeit (10,6 km/h) 3,2 m weiter vorgefahren, sodass er den Bewegungskorridor des Zweirads noch nicht vollständig geräumt hätte, als das Zweirad am Kollisionsort eintraf. Der Unfall wäre somit durch den Zweiradfahrer auch zeitlich nicht zu vermeiden gewesen, zumal sich der Pkw beim Realunfall vor der Kollision unmittelbar vor dem Stillstand befand und somit ohnehin nicht aus dem Kollisionsbereich herausgefahren wäre.

Unter Zugrundelegung der hierbei gewonnenen Werte kann nunmehr auch die Zeit kalkuliert werden, innerhalb welcher sich das Zweirad für den Pkw-Fahrer bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, auch innerorts, sichtbar bewegte.

Folgende Zeiten ergeben sich:

Verlassen der Verdeckung bis Passieren der Ortstafel 13 m mit 50 km/h:	0,9 s
Beschleunigungszeit von 50 km/h auf 88 km/h mit 4 m/s^2 innerhalb 50 m:	2,6 s
Vorbremszeit:	1,0 s
Verzögerungszeit aus 86 km/h (nach Ablauf Schwellphase) mit 6 m/s^2:	2,7 s
Gesamtzeit:	7,2 s

Das Zweirad wäre somit bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit aus der Augpunktposition des Pkw-Fahrers 2,5 s früher sichtbar gewesen, als beim Unfall (4,7 s). Es wäre 1,6 s vor der Zeit, als dem Pkw-Fahrer letztmalig rechtsseitiger Blickkontakt zu unterstellen ist (5,6 s vor Kollision), hinter dem Sichthindernis aufgetaucht. Es hätte somit bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit die Möglichkeit bestanden, dass der Pkw-Fahrer das Krad hätte wahrnehmen können.

Neben technischen Vermeidbarkeitsbetrachtungen spielten hier auch zahlreiche juristische Gesichtspunkte hinsichtlich der Vermeidbarkeit eine Rolle. Beispielsweise musste juristisch beurteilt werden, inwieweit durch den Pkw-Fahrer unter den gegebenen Umständen, insbesondere der erhöhten Gefahr, dass innerhalb kürzester Zeit hinter dem linken Sichthindernis vorfahrtsberechtigter Verkehr auftauchen konnte, eine Blickwiederholung durchzuführen war. Auch war rechtlich zu bewerten, dass der Zweiradfahrer sein Fahrzeug letztlich ohne die notwendige Fahrerlaubnis führte und dass er mit seinem Krad bei Vorhandensein der vorgeschriebenen Leistungsreduzierung die zum Unfall mit in erheblichem Maße beigetragene Geschwindigkeit hätte nicht entwickeln können. Vorteilhaft wäre die Herabsetzung der außerörtlichen zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach Passieren der Ortstafel durch Aufstellen eines entsprechenden Verkehrszeichens gewesen.

Tabelle B4.5a Werte beim Ausfahren des Krad aus Verdeckung (aus Analyzer Pro)

Position				t vom Anfang		
s = ...m		t = 4,730 s		t = 1,274 s		
Fzg	**s (m)**	**v (km/h)**	**a (m/s²)**	**Phase**	**Radius**	**an (m/s²)**
1	130,02	105,51	0,00	v = konst	288,94	2,97
2	6,24	0,00	0,00	Erkenn.	.....	0,00

Tabelle B4-5b Werte Krad beim Start des Pkw (aus Analyzer Pro)

Position				t vom Anfang		
s = ... m		t = 3,183 s		t = 2,821 s		
Fzg	**s (m)**	**v (km/h)**	**a (m/s²)**	**Phase**	**Radius**	**an (m/s²)**
1	84,67	105,51	0,00	v = konst	193,01	4,45
2	6,24	0,01	–1,50	Beschl.	.....	0,00

Tabelle B4-5c Werte Krad beim Reagieren des Krad-Fahrers (aus Analyzer Pro)

Position				t vom Anfang		
s = ... m		t = 2,585 s		t = 3,419 s		
Fzg	**s (m)**	**v (km/h)**	**a (m/s²)**	**Phase**	**Radius**	**an (m/s²)**
1	67,15	105,51	0,00	Reakt.	630,44	1,36
2	5,97	3,23	–1,50	Beschl.	.....	0,00

Tabelle B4-5d Werte bei Kollision (aus Analyzer Pro)

Position				t vom Anfang		
s = ... m		t = 0,001 s		t = 6,003 s		
Fzg	**s (m)**	**v (km/h)**	**a (m/s²)**	**Phase**	**Radius**	**an (m/s²)**
1	0,01	67,01	6,00	Verzög.	2515,56	0,02
2	0,00	5,01	5,00	Verzög.	.....	0,00

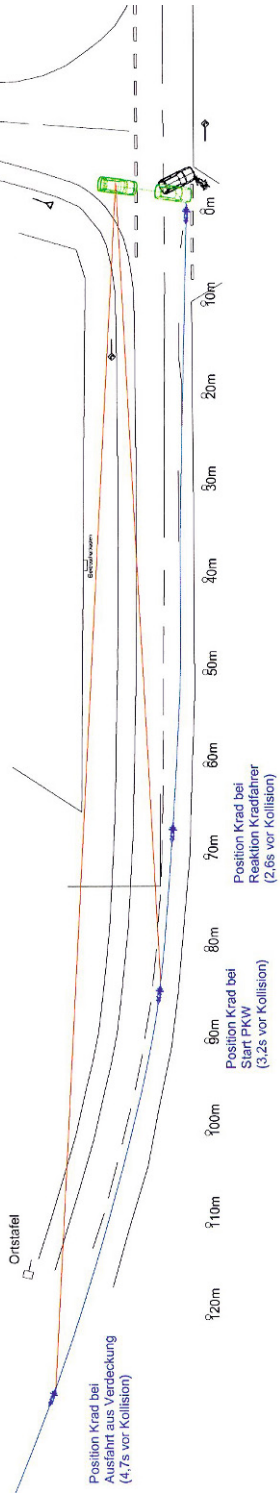


Bild B4-24 Weg-Zeit-Beziehungen und Auftauchentfernung

B5 Unfälle mit Pkw

Dr. Heinz Burg

1 Sachverhalt

Der Verkehrsunfall ereignete sich innerorts auf einer Kreuzung mit rechts vor links Regelung. Es galt dort die allgemeine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 50 km/h. Zur Unfallzeit war es hell und trocken. Die Fahrbahn hatte eine Schwarzdecke.

Die Fahrerin eines Pkw VW Golf fuhr innerorts auf einer Seitenstraße, es galt rechts vor links. Von rechts kam der Fahrer eines Pkw Audi A3 und wollte die Straße geradeaus überqueren. Die Fahrzeuge stießen zusammen.

2 Auftrag

Es war der Hergang des Verkehrsunfalls ganz allgemein zu untersuchen, insbesondere ob die Fahrerin des VW Golf an der Sichtlinie angehalten hatte.

3 Objektive Merkmale

Tabelle B5.1 Allgemeine Fahrzeugdaten

	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2
Fahrer/in	Frau R.	Herr M.
Bei-/Mitfahrer	2 Frauen und 2 Kinder	keine
Fahrzeugart	Pkw Limousine	Pkw Limousine
Fabrikat/Typ	VW Golf III	Audi A3
Leergewicht	1.015 kg	1.090 kg
Gewicht beim Unfall	1.205 kg	1.170 kg



Bild B5-1 Übersichtsaufnahme der Kreuzung, an welcher der Unfall stattfand. Der rote Pfeil zeigt die Fahrtrichtung des VW Golf. Der blaue Pfeil zeigt die Fahrtrichtung des Audi A3.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_25

Die Polizei war an den Unfallort gerufen worden und fertigte mehrere Fotos an, die später mit Zusatzangaben beschriftet wurden.

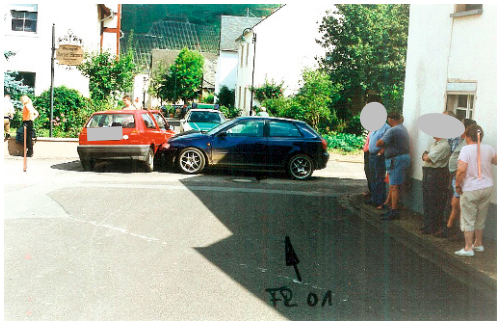


Bild B5-2 Endlagen der Fahrzeuge



Bild B5-3 Endlagen der Fahrzeuge



Bild B5-4 Endlagen und Schäden



Bild B5-5 Endlagen und Schäden



Bild B5-6 Reifenspuren vom VW Golf



Bild B5-7 Endlagen und Maßangaben

4 Unfallrekonstruktion

Die objektiven Merkmale, die zur Unfallrekonstruktion verwendet werden konnten, sind im Wesentlichen auf den Fotos der Polizei zu sehen (**Bild B5-2** bis **B5-7**). Es handelte sich um die Endlagen der Fahrzeuge, die Schäden und Reifenspuren vom VW Golf. In den Fotos wurden auch Maßangaben (**Bild B5-6** und **B5-7**) aufgeschrieben, jedoch ist nur die Angabe 2,4 m für eine Reifenspur eindeutig, die beiden Abstandsmaße für den Audi sind nicht verwertbar, weil die Bezugspunkte fehlen (**Bild B5-7**).

Bedeutsam war dies nicht, denn nach der photogrammetrischen Vermessung der Unfallörtlichkeit konnten die Fahrzeuge ausreichend genau positioniert werden, auch die Reifenspuren konnten wegen diverser Merkmale auf der Fahrbahn alleine aus den Fotos in die Zeichnung eingetragen werden. Die Fahrzeugschäden sind mit den Fotos (**Bild B5-2** bis **B5-7**) nicht gut dokumentiert. Die Endlagen der Fahrzeuge und die Reifenspuren vom VW Golf sind im **Bild B5-9** zu sehen.

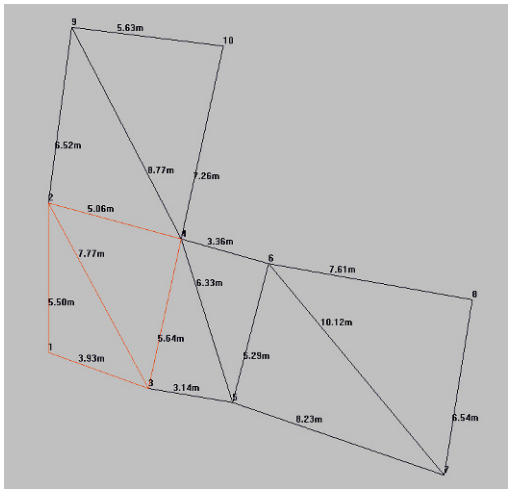


Bild B5-8 Messdaten der Unfallstelle



Bild B5-9 Photogrammetrische Vermessung des Unfallortes mit den Endlagen und Reifenspuren vom VW Golf

Da bei einem Unfalltyp wie hier die Reifenspuren nahezu direkt am Ort der Kollision beginnen, kann der VW Golf mit den Hinterrädern auf diese Spuren gestellt werden. Die Position der Vorderräder folgt zunächst aus der allgemeinen Fahrtrichtung und kann später durch die Simulationsberechnung verfeinert werden. Anhand der Zuordnung der Schäden kann dann auch die Position des Audi weitgehend exakt bestimmt werden. Die Fahrtrichtung ergibt sich aus der Simulationsberechnung.

Bei der Simulationsberechnung sollen die Fahrzeuge infolge der Kollision und unter Einwirkung der Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahn unter Berücksichtigung der Fahrbahnneigungen in Längs- und Querrichtung in die von der Polizei fotografierten Endlagen gelangen. Das ist nur möglich, wenn die Bedingungen vor der Kollision richtig gewählt werden. In den beiden **Bildern B5-10** und **B5-11** sind die Situationen bei Kollision und der Auslauf der Fahrzeuge nach Kollision gezeigt. Mit der Situation bei Kollision ist auch klar, wie der Audi bei und kurz vor der Kollision in Bezug auf die Fahrbahnbreite gefahren ist.

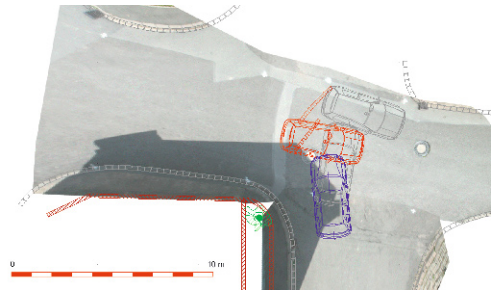


Bild B5-10 Positionen der Pkw vor Kollision

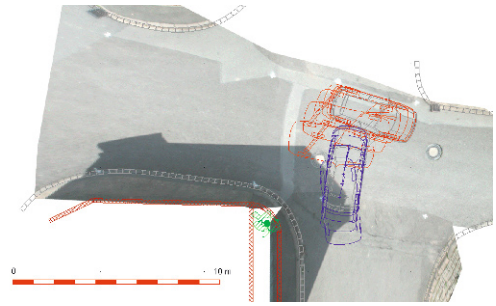


Bild B5-11 Auslauf der Pkw nach Kollision

Kollisionsgeschw.	km/h	16.00	29.00
Kurswinkel	Grad	-11.0	95.2
Schwimmwinkel	Grad	0.0	-0.0
Giergeschw.	Grad/s	-10	5
Gierwinkel	Grad	-11.0	95.2
EES-Eingabe	km/h	0.00	0.00
Hebelarm	m	0.77	1.76
Richtungswinkel	Grad	-65.7	-4.2
Deformation	m	0.263	0.170
Struktursteifigkeit	kN/m	476	730
T -7.7	X	-3.500	Y 0.330
R 0.414	dvBn'	4.0	k 0.14
EES-Berechnung	km/h	18.44	15.45
Geschw.-änderung	km/h	18.18	19.73
ind. Giergeschw.	Grad/s	-14.5	-95.0
mittlere Verz. Bp.	m/s²	51.1	55.5
Koll.-dauer 0.099	s	GEV	1.11
Auslaufgeschw.	km/h	18.26	10.09
Kurswinkel	Grad	52.7	76.2
Giergeschw.	Grad/s	-15	-95

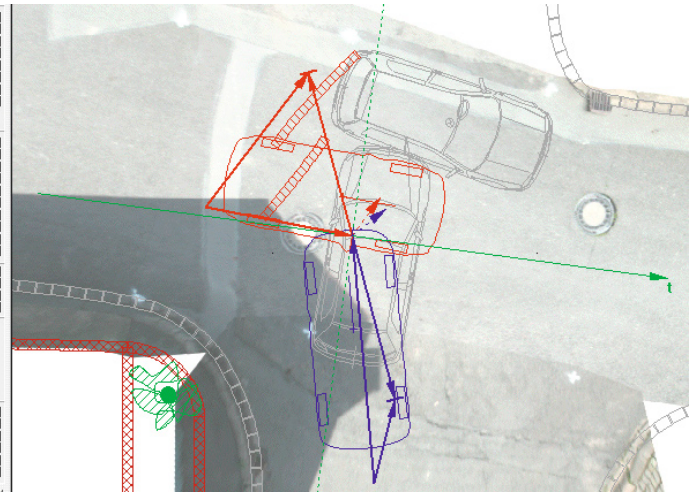


Bild B5-12 Kollisionsanalyse

Die Kollisionsberechnung lieferte für den VW Golf eine Kollisionsgeschwindigkeit von 16 km/h und für Audi A3 eine Kollisionsgeschwindigkeit von 29 km/h. Diese Werte haben eine mögliche Abweichung von +/–10 %, weil alle Berechnungsdaten nur als wahrscheinliche Daten angenommen werden können. Explizit und implizit gehen in eine vollständige Berechnung an die 50 Einzeldaten ein, deren Abweichungen teilweise deutlich erkennbar sind, teilweise nur verschwindend geringen Einfluss auf das Ergebnis haben.

Beispielsweise ist der Auslaufweg des VW Golf ein Resultat der eigenen Geschwindigkeit vor der Kollision und der Geschwindigkeit, die dem Fahrzeug durch den von der Seite kommenden Audi mitgeteilt wurde. Dabei spielen auch noch die Fahrtrichtungen der Fahrzeuge vor der Kollision eine Rolle, die Lage des Angriffspunktes der resultierenden Stoßkraft, die Bedingungen in der Kontaktzone und die Art und Weise, wie die Geschwindigkeit nach der Kollision durch die Reifenkräfte abgebaut wird.

Vermeidbarkeit

Zunächst wird der Anfahrvorgang des VW Golf untersucht. Für die mittleren Anfahrbeschleunigungen im normalen Straßenverkehr wurden Werte zwischen 1,5 und 2,5 m/s^2 gemessen (siehe Kapitel A12). Geht man an den oberen Bereich dieses Wertes und berücksichtigt man

das Gefälle von 3 % in Fahrtrichtung des VW, so kann die Fahrerin in der Position laut **Bild B5-13** angehalten haben. Ein technischer Beweis dafür kann nicht erbracht werden.

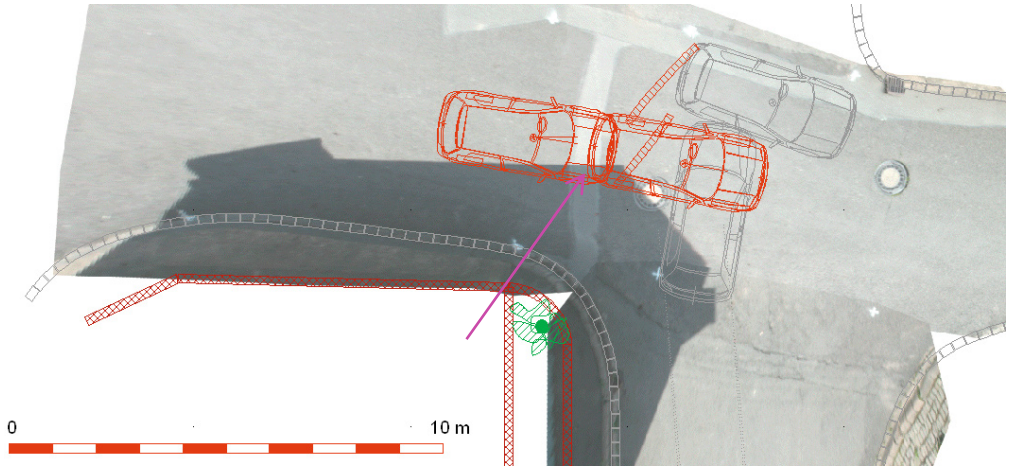


Bild B5-13 Position, in welcher die Fahrerin des VW Golf angehalten haben kann

Bei der Ortsbesichtigung wurde mit einem Golf II (hinreichend vergleichbar mit Golf III) untersucht, wo man anhalten muss, um ausreichend Sicht nach rechts zu haben (**Bild B5-14**). Dabei ist die Position der Vorderräder im Vergleich zu der Asphaltausbesserung zu beachten. Übertragen in die Rekonstruktionszeichnung (grünes Fahrzeug) ist festzustellen, dass die Fahrerin des VW Golf gegebenenfalls etwa 50 cm zu weit hinten gehalten hatte (**Bild B5-15**).



Bild B5-14 Nachgestellte Position, um ausreichend Sicht nach rechts zu haben



Bild B5-15 Vergleich der beiden Positionen, grün ist die Position entsprechend **Bild B5-14** gezeichnet

Mit der oben genannten Anfahrbeschleunigung kann berechnet werden, dass die Fahrerin des VW Golf vom Start bis zur Kollision etwa 1,7 s benötigt hat. Damit kann zum Einen gesagt werden, dass in dieser kurzen Zeit der Fahrer des Audi A3 nicht mehr oder kaum noch zum Bremsen gekommen sein kann, zum Anderen kann berechnet werden, wo der Audi war, als sich der VW in Bewegung gesetzt haben kann. Allerdings ist anzumerken, dass es sein kann,

dass sich der Audi bremsend der Kreuzung näherte. Wenn diese Bremsung im normalen Rahmen verlief, dann kann der Audi theoretisch 1 s vor Kollision mit 40 km/h gefahren sein, 2 s vor der Kollision mit 51 km/h und 3 s vor Kollision mit 61 km/h. Da ein solches Verhalten nicht nachweisbar ist, wird davon ausgegangen, dass der Audi vor Kollision mit 29 km/h gefahren ist. Die Berechnungsdaten sind den **Tabellen B5.2** und **B5.3** zu entnehmen, die Positionen der Fahrzeuge dem **Bild B5-16**. In **Bild B5-16** ist auch eine Sichtlinie für die Pkw-Fahrerin aus der möglichen Stillstandsposition eingezeichnet.

Tabelle B5.2 Weg-Zeit-Berechnungen für den Audi A3

	Konstante Beschleunigung	Konstante Beschleunigung
Zeit	–0,7 s	–1 s
Weg	–5,64 m	–8,05 m
Anfangsgeschwindigkeit	29 km/h	29 km/h
Endgeschwindigkeit	29 km/h	29 km/h
Anfangsbeschleunigung	0	0

Tabelle B5.3 Weg-Zeit-Berechnungen für den VW Golf

	Konstante Beschleunigung	Stillstand
Zeit (Δt)	–1,6 s	–2 s
Weg (Δs)	–3,5 m	
Anfangsgeschwindigkeit ($\dot{s}_0$)	16 km/h	
Endgeschwindigkeit ($\dot{s}_1$)	0 km/h	
Anfangsbeschleunigung ($\ddot{s}$)	2,8	

Wenn man bedenkt, dass die Fahrerin des VW Golf ihren Anfahrentschluss etwa 1 s vor dem Start des Pkw gefasst haben muss und zu dieser Zeit gerade nochmals nach links geblickt hat, dann kann es sein, dass sie den Audi gerade noch nicht gesehen hatte.

Auch wenn es im **Bild B5-16** so aussieht, dass die Fahrerin des VW Golf auch schon 1 s vor dem Start den Audi sehen konnte, so kann es doch sein, dass der Fahrer des Audi in Annäherung an die Kreuzung seine Geschwindigkeit verringert hatte oder etwas weiter links war als im **Bild B5-16** dargestellt.

Wäre der Fahrer des Audi äußerst rechts gefahren, dann wäre er für die Fahrerin des VW Golf früher erkennbar gewesen.

Abgesehen davon, dass die Fahrerin des VW zu weit hinten gehalten hatte, hätte sie auch während des Losfahrens nochmals nach rechts blicken können. Dann hätte sie den Audi erkennen und sofort wieder anhalten können.

Zur Vermeidbarkeit des Audi ist aus technischer Sicht zu sagen, dass er den Unfall hätte vermeiden können, wenn er innerhalb der Strecke hätte anhalten können, die er in 1 s zurückgelegt hat. Mit etwas Sicherheitsabstand sind das 7 m. Anhalten innerhalb dieser Strecke bei starker Bremsung (5 m/s^2, keine Vollbremsung) wäre bei 17 km/h möglich gewesen.

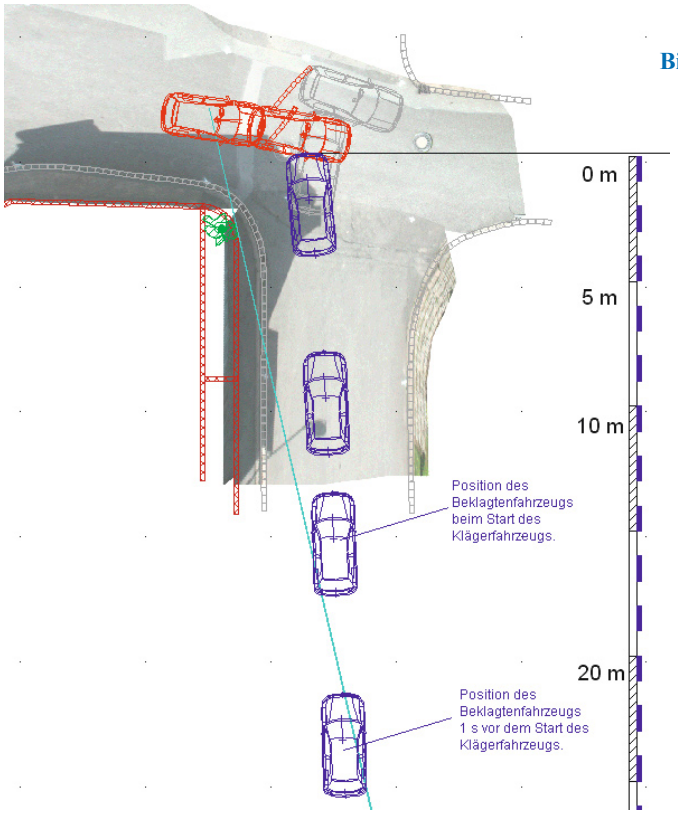


Bild B5-16 Positionen der Fahrzeuge



Um ausreichend Sicht nach rechts zu erlangen, hätte der Fahrer des Audi bis zu der im **Bild B5-17** gezeigten Stelle vorfahren müssen, was bedeutet, dass er allenfalls Schrittgeschwindigkeit hätte einhalten dürfen, um sich selbst über Fahrzeuge von rechts zu vergewissern. Ob das rechtlich relevant ist, kann der Unterzeichner nicht beurteilen.

Bild B5-17 Sichtmöglichkeiten des Audi-Fahrers nach rechts

5 Zusammenfassung

Der Fahrer des Audi ist weit links orientiert mit etwa 29 km/h in die Kreuzung hinein gefahren. Die Fahrerin des VW Golf hatte bei Kollision eine Geschwindigkeit von etwa 16 km/h. Sie kann diese Geschwindigkeit beim Anfahren aus dem Stand erreicht haben. Sie war dann allerdings nicht weit genug nach vorne gefahren, um die von rechts kommende Straße vollständig einzusehen.

B6 Unfälle mit Kleintransportern

Christian Tschirschwitz

1 Sachverhalt

Auf einer außerörtlichen Bundesstraße geriet ein mit vier Personen besetzter Pkw Toyota Corolla aus letztlich nicht vollständig geklärten Gründen ins Schleudern. Nachdem sich das Fahrzeug beträchtlich entgegen dem Uhrzeigersinn ausgedreht hatte, prallte ein entgegenkommender Kleintransporter VW T4 frontal an die rechte Flanke des Toyota. Der Transporter wurde gedreht, ausgehoben und durch einen Pkw Ford Escort unterfahren. Alle Fahrzeuge kamen in Kollisionsortnähe zum Endstand. Die vier Toyota-Insassen wurden getötet. Aus den anderen Fahrzeugen wurden sechs Personen überwiegend schwer verletzt. Unbeteiligte Zeugen waren nicht vorhanden.

2 Durchgeführte Maßnahmen/Aufgabenstellung/Lösungsweg

Durch den zum Unfallort gerufenen Gutachter wurden im Anschluss an den umfangreichen Rettungseinsatz gemeinsam mit den Polizeibeamten einer Fachabteilung die in sehr deutlicher Form vorliegenden Spuren zugeordnet, vermessen und fotografiert. Alle Fahrzeuge wurden sichergestellt. Bei der Auswahl des Abschleppdienstes wurde darauf geachtet, dass Aufnahmekapazität für alle Fahrzeuge bestand, um eine Gegenüberstellung durchführen zu können. Auch war die Voraussetzung für die Durchführung von technischen Untersuchungsmaßnahmen zu gewährleisten. Entsprechend dem staatsanwaltschaftlichen Auftrag interessierte in erster Linie die Ursache für den nicht regelrechten Bewegungszustand des Pkw Toyota. Weiterhin waren der Unfallablauf zu rekonstruieren, die Geschwindigkeiten zu ermitteln und das Abwehrverhalten der im Gegenverkehr des Toyota befindlichen Fahrer zu untersuchen.

Am Folgetag wurde die Unfallstelle bei Taglicht nochmals in Augenschein genommen. Unter Zuhilfenahme von Hebezeugen konnten die Kollisionsstellungen der Fahrzeuge anhand korrespondierender Kontaktpunkte im Rahmen von Gegenüberstellungsversuchen rekonstruiert werden. Der Pkw Toyota wurde einer technischen Untersuchung unterzogen. Materialbrüche insbesondere an Radaufhängungsbauteilen wurden herausgetrennt und in einem Werkstofflabor mikroskopisch untersucht. Es wurden an dem Fahrzeug keine die Funktion beeinträchtigende Mängel festgestellt.

Unter Zugrundelegung der bei der Spuranalyse und der Fahrzeuggegenüberstellungen gewonnenen Erkenntnisse wurden zunächst die Kollisionsstellungen auf der Fahrbahn und die Bewegungsabläufe vor und nach den Einzelstößen rekonstruiert. Die sich so ergebenden Impulsrichtungen und Werte für die Auslaufimpulse bildeten im Zusammenhang mit den Fahrzeugdaten und den EES die Grundlage für die Durchführung der Kollisionsanalyse Toyota-VW. Dazu wurde eine klassische Rückwärtsanalyse (erweitertes Rhomboid-Schnittverfahren) zur Anwendung gebracht. Eine weitere Eingrenzung der Ergebnisse erfolgte mit dem Vorwärtsverfahren (PC-Crash). Anhand der Spurlängen wurden die Ausgangsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge VW und Ford errechnet. Die Ausgangsgeschwindigkeit des Toyota wurde mit einer trivialen Schwimmwinkelanalyse berechnet und durch eine Simulation (PC-Crash) überprüft.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_26

3 Objektive Merkmale und sonstige Informationen

Tabelle B6.1 Allgemeine Fahrzeugdaten

Parameter	Einheit	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Fahrzeug 3
Fahrzeugart		Pkw	Kleintransporter	Pkw
Fabrikat		Toyota	Volkswagen	Ford
Typ		Corolla	T4	Escort
Aufbauart		Limousine 5-türig	Offener Kasten	Limousine 5-türig
Leistung	kW	66	44	37
Länge	mm	4 215	5 245	3 970
Breite	mm	1.655	1.970	1.640
Höhe	mm	1.365	1.920	1.374
Radstand	mm	2.465	3.320	2.393
Überhang vorn	mm	860	920	710
Schwerpunktrücklage	mm	1.100	1.550	1.050
Leermasse	kg	1.010	1.606	805
Beladung	kg	185	650	100
Trägheitsmoment	kg m^2	1.505	4.400	

3.1 Beschädigungen

Die Beschädigungen am Pkw Toyota waren von einer U-förmigen Deformation geprägt, welche etwa zentral an der rechten Flanke angeordnet war. Die Tiefe betrug ca. 0,4 m.



Bild B6-1 Links oben: Pkw Toyota. Das Dach und die Türen mussten zur Insassenbergung vom Fahrzeug abgetrennt werden.



Bild B6-2 Rechts: Pkw Toyota. Deformationsverlauf an der rechten Fahrzeugflanke

Auf Grund des Frontalaufpralles war die gesamte Front des VW Transporters nach hinten verlagert. In die Deformation, deren Tiefe 0,2 m bis 0,3 m betrug, waren auch der Motor, das Getriebe und die Radaufhängungen einbezogen.



Bild B6-3 Transporter VW in Übersicht



Bild B6-4 Deformationstiefe in linker Vorbauregion



Bild B6-5 Pkw Ford in Übersicht. Am Pkw Ford fiel auf, dass am Vorbau keinerlei Frontalanstoßmerkmale vorhanden waren. Lediglich die Motorhaube war nach unten gedrückt und unregelmäßig zerkratzt.

3.2 Unfallstelle/Endstände/Spuren

Bei der Unfallstelle handelt es sich um eine außerörtliche Bundesstraße. Die aus Asphalt bestehende Fahrbahn war 6,3 m breit und zum Unfallzeitpunkt trocken. Aus der Fahrtrichtung des Transporters ist eine leichte Bergkuppe vorgelagert. Zum Unfallzeitpunkt war es dunkel.

Der Pkw Toyota kam im für ihn linken Randbereich und quer zur Fahrbahn angeordnet zum Endstand (**Bild B6-6**). In unmittelbarer Nähe wurde der VW ebenfalls quer, jedoch entgegengesetzt ausgerichtet vorgefunden. Die rechte Fahrzeugseite war auf den Vorbau des fahrbahnparallel stehenden Ford aufgestützt.

Aus Fahrtrichtung des Toyota wurden diesem Fahrzeug zuzuordnende Schleuderspuren festgestellt, welche auf der rechten Fahrspur begannen und nach links in Richtung Toyota-Endstand verliefen. Die durch die rechten Räder gezeichneten Spuren (Nr. 2 und 4 auf den **Bildern B6-10** und **B6-11**) waren insgesamt 41,8 m lang und kräftig ausgebildet. Später setzten auch die den linken Rädern zuzuordnenden Spuren ein (Nr. 1 und 3). Am jeweiligen Ende der Spuren 2

und 4 wurden starke Auslenkungen nach links festgestellt (**Bild B6-12**). Die Vorderräder der beiden anderen beteiligten Fahrzeuge zeichneten Blockierspuren, welche 5,7 m (VW – Nr. 5 und 6) und 24,9 m (Ford – Nr. 9 und 10) lang waren. Auch hier waren am jeweiligen Ende kollisionstypische Merkmale (Knick und Verstärkung) erkennbar. Während der Kollisionsauslaufphase verursachten die Hinterräder des VW die Radierspuren 7 und 8.



Bild B6-6 Endstände Toyota und VW



Bild B6-7 Endstände VW und Ford



Bild B6-8 Beginn der Blockierspuren Ford



Bild B6-9 Blockierspuren Ford (9 und 10) sowie VW (5 und 6)



Bild B6-10 Beginn Schleuderspuren Toyota (2: vorn rechts; 4: hinten rechts)



Bild B6-11 Schleuderspuren Toyota im weiteren Verlauf (1: vorn links; 3: hinten links)

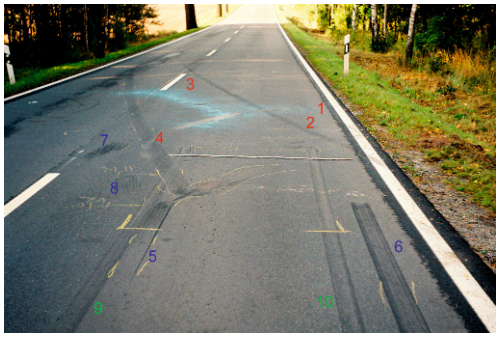


Bild B6-12 Spuren im Kollisionsbereich
1–4: Schleuderspuren Toyota; Spur 4 (hinten rechts) mit Knick
5–6: Blockierspuren VW mit Verstärkung (rechts) und Knick (links)
7–8: Radierspuren Hinterräder VW
9–10: Blockierspuren Ford mit Verstärkungen an den Abschlüssen

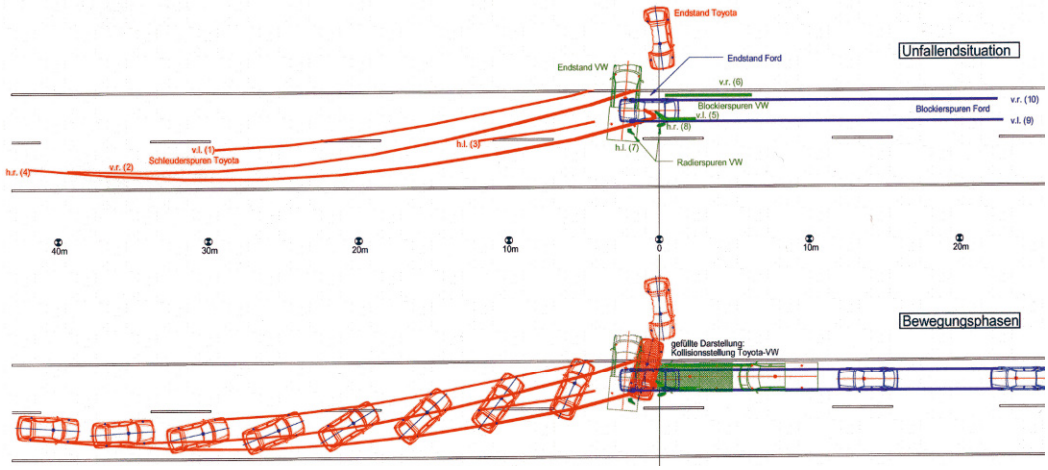


Bild B6-13 Unfallendsituation und Bewegungsabläufe

4 Analyse

4.1 Rekonstruktion der Bewegungsabläufe

Bei diesem Unfall lag ein ausgeprägtes Spurenaufkommen vor. Jedes der Fahrzeuge hatte bis zum Eintreffen am Kollisionsort sicher den Einzelrädern zuzuordnende Spuren gezeichnet. Da bezüglich des Toyota über den gesamten Verlauf mindestens zwei Spuräste vorlagen, konnten die Bewegungsbahn und insbesondere der ortsbezogene Gierwinkel eindeutig bestimmt werden (vgl. obenstehende Phasenzeichnung). So konnte festgestellt werden, dass der Pkw zu Beginn der Spurzeichnung gegenüber der Fahrbahn etwa 3° im Uhrzeigersinn ausgedreht war. Diese Stellung deutet darauf hin, dass sich der Ursprung der Instabilität des Fahrzeugs im linken Straßenbereich, zumindest aber fahrbahnmittig befand. Während der Schleuderphase drehte sich der Pkw entgegengesetzt der Uhr, sodass er im Winkel von 77° gegenüber der Fahrbahnlängsachse im Kollisionsort eintraf. Die vorkollisionären Fahrlinien des Transporters und des Pkw Ford ließen sich an deren Blockierspuren binden. Die Spurzuordnung war hier eindeutig, da einerseits erheblich abweichende Spurweiten vorlagen. Andererseits verfügte der Transporter über breitere Reifen, sodass auch dessen Spurbreite größer war als die Breite der Ford-Spur.

Anhand der Tatsache, dass die Fahrzeuge Toyota und VW in unmittelbarer Kollisionsortnähe wenig räumlich getrennt zum Endstand gekommen sind, war nachzuvollziehen, dass der überwiegende Anteil der Bewegungsenergie in Formänderungsarbeit umgewandelt wurde. Aufgrund der nicht unbeträchtlich größeren Stoßmasse des VW war bereits an der Unfallstelle abzuleiten, dass der Toyota eine höhere Kollisionsgeschwindigkeit innegehabt haben musste. Der Kollisionspartner drang am Toyota etwa zentral in die rechte Flanke ein. Dadurch wurde die Geschwindigkeitsrichtung des Pkw innerhalb eines sehr kurzen Weges umgelenkt. Die dadurch hervorgerufenen erheblichen Insassenbeschleunigungen verursachten schließlich die katastrophalen Verletzungen. Kollisionsbedingt wurde das Gesamtsystem Toyota-VW im Uhrzeigersinn ausgedreht. Bei der Kollisionsanalyse nach dem Vorwärtsverfahren unter dreidimensionalen Bedingungen konnte das Anheben des VW-Heck in der ersten Phase des Zusammenstoßes durch den Vertikalabstand von Stoßpunkt und Fahrzeugschwerpunkt nachvollzogen werden. Ebenfalls konnte im Rahmen der Simulationen nachvollzogen werden, dass sich die ineinandergedrungenen Fahrzeuge über einen beträchtlichen Teil der Kollisionsdauer, insbesondere während der Ausdrehphase, stark verhakt haben mussten. Anderenfalls waren die Endstände nicht zu erreichen. Nach dem Fortschritt der Drehbewegung setzten die Hinterräder des VW in Höhe der Spuren 7 und 8 auf. Der Transporter kippte anschließend über die linken Räder, jedoch nicht in einer solchen Stärke, dass ein gänzliches Umkippen auf die linke Flanke erfolgte. Während dieser Phase hatte sich der Ford vollverzögernd angenähert und kam gerade unter dem noch rechts angehobenen und zurückkippenden VW zum Stillstand. Der Ford wurde somit nur durch das Eigengewicht des VW, nicht aber durch einen eigenständigen Anprall beschädigt.

4.2 Geschwindigkeiten

4.2.1 Kollisionsgeschwindigkeiten

Die Kollisionsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge Toyota und VW wurden zunächst auf grafischer Basis eingegrenzt. Es wurde das erweiterte Rhomboid-Schnittverfahren nach Schimmelpfennig/Becke/Hebing angewandt. Die hierbei zugrunde gelegten Werte, einschließlich die Ergebnisse der zuvor durchgeführten Auslaufanalyse, sind in die **Tabellen B6.2, B6.3** und **B6.4** eingefügt. Erwartungsgemäß lieferte das Impulsspiegelverfahren aufgrund der schleifenden Schnittbildung der Einlaufimpulse ein sehr starkes Toleranzband bezüglich der Kollisionsgeschwindigkeiten. Eine optimalere Eingrenzung wurde durch die über die Impulsfelder gelegten Energieringsegmente erreicht. Zwar gelang es nach Anwendung des Drallspiegelverfahrens, die Lösungsmenge noch weiter zu reduzieren. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die Lage der Drallfelder bei diesem Fall extrem sensibel auf die Stoßpunktlage reagiert. Die Einbeziehung des Drallsatzes sollte hier aus diesem Grund mehr überprüfenden Charakter aufweisen. Die mit dem Rückwärtsverfahren erzielten Ergebnisse sind in der **Tabelle B6.5** dargestellt. Wird die Lösungsmenge aus Impulsspiegel- und Energieringverfahren gebildet, ergibt sich eine Kollisionsgeschwindigkeit für den Pkw Toyota zwischen 69 km/h und 85 km/h. Die Kollisionsgeschwindigkeit betrug für den Transporter VW 48 km/h bis 59 km/h. Betrachtet man zusätzlich die Lösung des Drallspiegelverfahrens, würden sich die Kollisionsgeschwindigkeiten zu 72 km/h bis 85 km/h (Toyota) bzw. 49 km/h bis 59 km/h (VW) entsprechend der Zeichnung **Bild B6-14** ergeben.

Unter Nutzung des Vorwärtsverfahrens wurde das Optimalergebnis bei der mit Zeichnung **Bild B6-15** dokumentierten Simulation erreicht. Die Kollisionsgeschwindigkeit ergab sich hier für den Toyota zu 71 km/h und für den VW-Transporter zu 50 km/h. Aufgrund der dreidimensio-

nalen Modellierung der Fahrzeuge konnte einerseits der Kippvorgang des Transporters über die linken Räder gut nachvollzogen werden. Andererseits gestaltete es sich jedoch problematisch, die nachweisbaren Auslaufrichtungen einzuhalten.

Offenbar konnte der extreme Verhakungsprozess beider Fahrzeuge, welcher mit hoher Wahrscheinlichkeit bis unmittelbar vor das Rotationsende des VW angedauert hat, nicht mit der notwendigen Genauigkeit modelliert werden. Insgesamt ergaben sich die Ergebnisse des Vorwärtsverfahrens im unteren Bereich des mit dem Rhomboidschnittverfahren bestimmten Ergebnisrahmens. Eine akzeptable Schnittmenge aus beiden Verfahren wird bei einer Tolerierung der Optimalergebnisse des Vorwärtsverfahrens in der Größenordnung von +/–5 % erreicht, sodass für die weiteren Berechnungen folgende Kollisionsgeschwindigkeiten als Grundlage genommen werden: Toyota: v_{Koll} = 67 km/h – 75 km/h; VW: v_{Koll} = 47 km/h – 53 km/h.

Tabelle B6.2 Werte für Impulsspiegelverfahren

Parameter	Symbol	Einheit	Toyota Corolla	VW T 4
Minimale Nachkollisionsgeschwindigkeit	v'_{min}	m/s	6,9	4,0
Maximale Nachkollisionsgeschwindigkeit	v'_{max}	m/s	8,0	4,9
Masse zum Unfallzeitpunkt	m	kg	1.195	2.256
Minimaler Betrag Auslaufimpuls	I'_{min}	kNs	8,2	9,0
Maximaler Betrag Auslaufimpuls	I'_{max}	kNs	9,6	11,1
Grenze 1 Auslaufimpulsrichtung	α_1'	°	82	185
Grenze 2 Auslaufimpulsrichtung	α_2'	°	88	195
Einlaufimpulsrichtung	α	°	16	180

Tabelle B6.3 Werte für Energieringverfahren

Parameter	Symbol	Einheit	Toyota Corolla	VW T 4
Minimale energieäquivalente Geschwindigkeit	EES_{min}	km/h	60	40
Maximale energieäquivalente Geschwindigkeit	EES_{max}	km/h	70	45
Masse zum Unfallzeitpunkt	m	kg	1.195	2.256
Minimale Formänderungsarbeit	W_{min}	kNm	165,9	139,2
Maximale Formänderungsarbeit	W_{max}	kNm	225,9	176,2
Trägheitsmoment	Θ	kg m^2	1.500	4.400
Trägheitsradius	i	m	1,2	1,9
Hebelarm 1 Stoßantrieb-Schwerpunkt	a_1	m	0,4	0,1
Hebelarm 2 Stoßantrieb-Schwerpunkt	a_2	m	0,5	0,3
Minimale reduzierte Masse	$\underline{m}_{min}$	kg	1.008	2.101
Maximale reduzierte Masse	$\underline{m}_{max}$	kg	1.068	2.249
Minimaler Betrag Stoßantrieb (Energie) 1	S_{E1min}	kNs	21,4	
Maximaler Betrag Stoßantrieb (Energie) 1	S_{E1max}	kNs	25,7	
Minimaler Betrag Stoßantrieb (Energie) 2	S_{E2min}	kNs	22,0	
Maximaler Betrag Stoßantrieb (Energie) 2	S_{E2max}	kNs	26,4	

Tabelle B6.4 Werte für Drallspiegelverfahren

Parameter	Symbol	Einheit	Toyota Corolla	VW T 4
Minimale Winkelgeschwindigkeit nach Stoß	ω'_{min}	1/s	–6,1	–0,9
Maximale Winkelgeschwindigkeit nach Stoß	ω'_{max}	1/s	–8,4	–1,4
Winkelgeschwindigkeit vor Stoß	ω	1/s	0	0
Trägheitsmoment	Θ	kg m^2	1.500	4 400
Abstand Stoßpunkt-Schwerpunkt	e	m	0,8	2,2
Minimaler kleinstmöglicher Stoßantrieb (Drall)	S^*_{Dmin}	kNs	11,4	1,8
Maximaler kleinstmöglicher Stoßantrieb (Drall)	S^*_{Dmax}	kNs	15,7	3,0

Tabelle B6.5 Ergebnisse

Parameter	Symbol	Einheit	Toyota Corolla	VW T 4
Minimaler Betrag Einlaufimpuls (alle)	$I_{min\ (IED)}$	kNs	24,0	31,0
Maximaler Betrag Einlaufimpuls (alle)	$I_{max(IED)}$	kNs	28,2	36,7
Minimale Kollisionsgeschwindigkeit (alle)	$v_{min(IED)}$	m/s km/h	20,0 72	13,7 49
Maximale. Kollisionsgeschwindigkeit (alle)	$v_{max(IED)}$	m/s km/h	23,6 85	16,3 59
Minimaler Betrag Einlaufimpuls (I + D)	$I_{min\ (IE)}$	kNs	22,8	30,4
Maximaler Betrag Einlaufimpuls (I + D)	$I_{max(IE)}$	kNs	28,2	36,7
Minimale Kollisionsgeschwindigkeit (I + E)	$v_{min\ (IE)}$	m/s km/h	19,1 69	13,5 48
Maximale Kollisionsgeschwindigkeit (I + E)	$v_{max(IE)}$	m/s km/h	23,6 85	16,3 59

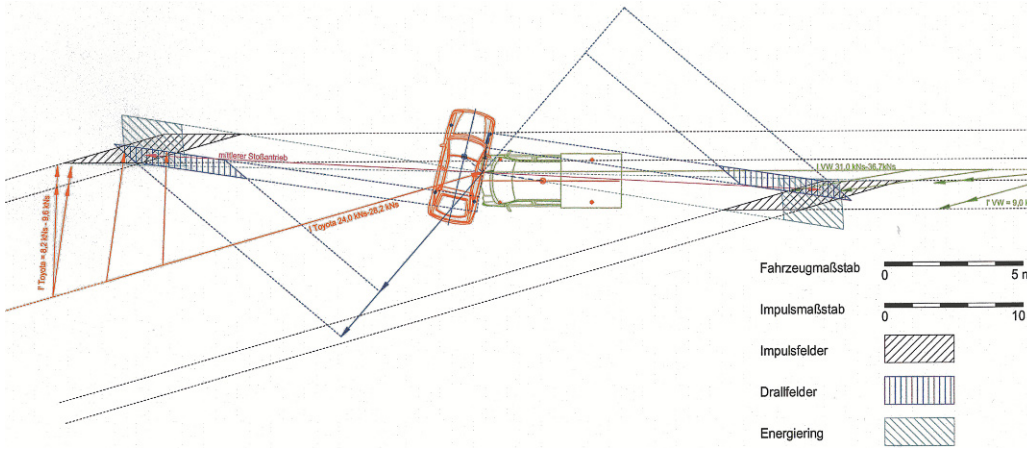


Bild B6-14 Konstruktion der Lösungsfelder mit Rhomboid-Schnittverfahren

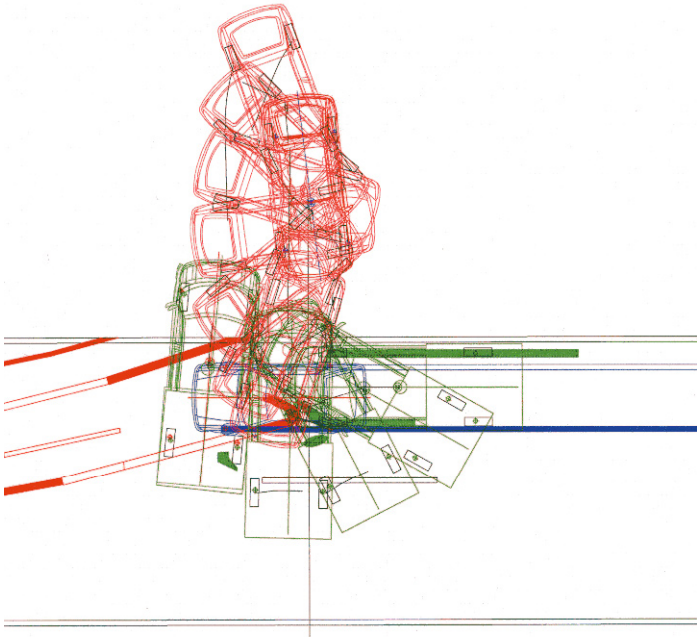


Bild B6-15 Mittels Vorwärtsrechnung optimiertes Ergebnis

4.2.2 Ausgangsgeschwindigkeiten

Toyota

Bei Schleudervorgängen ist es möglich, die Geschwindigkeit zu Beginn der Spurzeichnung über die in Längs- und Querrichtung bezüglich des fahrzeugfesten Koordinatensystems wirkenden Verzögerungen zu berechnen. Da der jeweilige Anteil vom aktuellen Schwimmwinkel abhängig ist, ist es notwendig, die Wegstrecke, innerhalb welcher sich das betreffende Fahrzeug schleudernd bewegte, in hinreichend kurze Abschnitte zu unterteilen. Für jeden dieser Abschnitte sind sodann mittlere Werte für die betreffenden Parameter zugrunde zu legen. Auf diese Art und Weise wurde die hier zutreffende Wegstrecke in Segmente zu je 5 m (am Beginn 1 x 6 m) geteilt. Die mittleren Schwimmwinkel wurden grafisch anhand der Zeichnung **Bild B6-13** ermittelt. Die Berechnung der End- und Anfangsgeschwindigkeit an einem jeden Abschnitt sowie der jeweils vorhandenen resultierenden Verzögerung erfolgte mit einer EXCEL-Anwendung. Die **Tabelle B6.6** ist so gestaltet, dass die Eingabewerte, die jeweiligen Zwischenwerte und das Endergebnis abgelesen werden können. Die Zeichnungscharakteristik der Schleuderspuren deutete nicht darauf hin, dass der Toyota-Fahrer vor dem Anstoß eine aktive Bremsung durchgeführt hat. Insofern waren für den Längsanteil nur die Werte in der Größenordnung der Fahrzeugwiderstände zu berücksichtigen. Die Festsetzung der Verzögerungswerte erfolgte auch unter der Maßgabe, dass die Schleuderphase in einem Steigungsbereich stattfand.

Die Berechnung ergab für den Pkw Toyota eine Ausgangsgeschwindigkeit zwischen

$$v_{0\ \mathrm{Toyota}} = 90\ \mathrm{km/h} - 100\ \mathrm{km/h}$$

Eine Simulation mit PC-Crash hat die Größenordnung des während der Schleuderphase abgebauten Geschwindigkeitsanteiles bestätigt.

Tabelle B6.6 Geschwindigkeitsberechnung über Schwimmwinkel

Geschwindigkeitsberechnung bei Schleuderphase

Eingabewerte

Geschwindigkeit am Ende der Schleuderphase (minimal):	$v_{End(min)}$	67	km/h
Geschwindigkeit am Ende der Schleuderphase (maximal):	$v_{End(max)}$	75	km/h
Querbeschleunigung minimal:	$a_{q(min)}$	7,0	m/s²
Querbeschleunigung maximal:	$a_{q(max)}$	7,5	m/s²
Längsverzögerung d.Fahrzeugwiderst. minimal:	$a_{e(min)}$	0,5	m/s²
Längsverzögerung d.Fahrzeugwiderst. maximal:	$a_{e(max)}$	1,0	m/s²
mittlerer Schwimmwinkel in Phase (Eing. in Tabelle):	α		°
Länge der Phase(Eing. in Tabelle):	s		m

Ausgabewerte

Tangentialverzögerung minimal:	$a_{t(min)}$	m/s²
Tangentialverzögerung maximal:	$a_{t(max)}$	m/s²
Geschwindigkeit am Ende der Phase (minimal):	$v_{End.(min)}$	m/s[km/h]
Geschwindigkeit am Ende der Phase (maximal):	$v_{End.(max)}$	m/s[km/h]
Geschwindigkeit zu Beginn der Phase(minimal):	$v_{Beg.(min)}$	m/s[km/h]
Geschwindigkeit zu Beginn der Phase(maximal):	$v_{Beg.(max)}$	m/s[km/h]

Phase	s [m]	α [°]	sin α	cos α	$\sin\alpha*a_{q(min)}$ [m/s²]	$\sin\alpha*a_{q(max)}$ [m/s²]	$\cos\alpha*a_{e(min)}$ [m/s²]	$\cos\alpha*a_{e(max)}$ [m/s²]	$a_{t(min)}$ [m/s²]	$a_{t(max)}$ [m/s²]	$v_{End.(min)}$ [m/s]	$v_{End.(max)}$ [m/s]	$v_{Beg.(min)}$ [m/s]	$v_{Beg.(max)}$ [m/s]	$v_{End.(min)}$ [km/h]	$v_{End.(max)}$ [km/h]	$v_{Beg.(min)}$ [km/h]	$v_{Beg.(max)}$ [km/h]
1	5,0	56,4	0,83	0,55	5,8	6,2	0,3	0,6	6,1	6,8	18,6	20,8	20,2	22,4	67	75	73	81
2	5,0	47,6	0,74	0,67	5,2	5,5	0,3	0,7	5,5	6,2	20,2	22,4	21,5	23,8	73	81	77	86
3	5,0	38,2	0,62	0,79	4,3	4,6	0,4	0,8	4,7	5,4	21,5	23,8	22,6	24,9	77	86	81	90
4	5,0	29,2	0,49	0,87	3,4	3,7	0,4	0,9	3,9	4,5	22,6	24,9	23,4	25,8	81	90	84	93
5	5,0	21,3	0,36	0,93	2,5	2,7	0,5	0,9	3,0	3,7	23,4	25,8	24,0	26,5	84	93	87	95
6	5,0	14,8	0,26	0,97	1,8	1,9	0,5	1,0	2,3	2,9	24,0	26,5	24,5	27,0	87	95	88	97
7	5,0	8,6	0,15	0,99	1,0	1,1	0,5	1,0	1,5	2,1	24,5	27,0	24,8	27,4	88	97	89	99
8	6,0	3,0	0,05	1,00	0,4	0,4	0,5	1,0	0,9	1,4	24,8	27,4	25,0	27,7	89	99	90	100

VW

Die Anstoßgeschwindigkeit des Transporters VW wurde in der Größenordnung von 47 km/h – 53 km/h ermittelt. Die diesem Fahrzeug zugeordnete Blockierspur wies eine Länge von 5,7 m auf. Geht man davon aus, dass eine Schwerpunktverzögerung zwischen 7,5 m/s² und 8,0 m/s² erreicht werden konnte und berücksichtigt den während der Bremsschwell- und Ansprechzeit abgebauten Geschwindigkeitsanteil, wäre für den Transporter eine Geschwindigkeit von

$$v_{0\,VW} = 60 \text{ km/h} – 66 \text{ km/h}$$

nachzuweisen.

Ford

Am Pkw Ford wurden keine Merkmale festgestellt, welche auf eine merkliche Restgeschwindigkeit hindeuten, als sich der Transporter auf dem Vorbau des Pkw abstützte. Es ist nicht davon auszugehen, dass die diesbezügliche Endgeschwindigkeit größer als 5 km/h war. Ebenso kann das Fahrzeug am Spurende gerade zum Stillstand gekommen sein, als die Belastung mit dem Transporter erfolgte. Die Blockierspur wies eine Länge von 24,9 m auf. Legt man auch für dieses Fahrzeug eine erreichbare Schwerpunktverzögerung zwischen 7,5 m/s² und 8,0 m/s² zugrunde, ergibt sich zuzüglich des während der Bremsschwell- und Ansprechzeit abgebauten Geschwindigkeitsbetrages eine nachweisbare Ausgangsgeschwindigkeit zwischen

$$v_{0\,Ford} = 72 \text{ km/h} – 75 \text{ km/h}$$

4.3 Weg-Zeit-Betrachtungen

Aus den jeweiligen Anfangs- und Endgeschwindigkeiten während einer jeden Phase des Toyota-Schleudervorgangs kann in Verbindung mit den jeweils errechneten mittleren Verzögerungen auf die Zeitdauer der Einzelphasen geschlossen werden. Hieraus errechnet sich die Gesamtdauer des nachweisbaren Schleuderprozesses in der Größenordnung von 1,6 s bis 1,7 s. Eine merkliche Schrägstellung des Pkw gegenüber der Fahrbahnlängsachse und damit ein sicheres Ergehen einer Reaktionsaufforderung an den Gegenverkehr wäre ab dem Beginn der 6. Phase vorhanden gewesen. Zum Passieren der Phasen 6 bis 1 war eine Zeit von 1,2 s bis 1,3 s notwendig.

Die Vollverzögerungszeit des Transporters betrug 0,3 s bis 0,4 s. Zuzüglich einer unterstellten Reaktionszeit von 0,8 s und einer Bremsschwell- und Ansprechzeit von 0,2 s ergibt sich der zeitliche Abstand des Reaktionspunktes des Transporterfahrers vom Kollisionszeitpunkt in der Größenordnung von 1,3 s bis 1,4 s.

Setzt man den Zeitpunkt des Eintreffens des Pkw Ford am Ende der Blockierspur gleich mit dem Zurückkippen des Transporters, ergibt sich, dass der Verzögerungsvorgang des Pkw Ford 0,9 s nach dem Zusammenprall Toyota/VW beendet war. Diese Zeit wurde im Rahmen der Simulation ermittelt. Der Verzögerungsvorgang seitens des Ford dauerte 2,3 s bis 2,6 s. Das heißt, die Reaktion seitens des Ford-Fahrers erfolgte 3,3 s bis 3,6 s vor dem Verzögerungsende bzw. 2,4 s bis 2,7 s vor der Kollision Toyota/VW.

4.4 Unfallursache

Die primäre Unfallursache bestand in einem instabilen Bewegungszustand des Pkw Toyota, aufgrund dessen das Fahrzeug in den Bereich der Gegenfahrspur eingedrungen war. Es hat sich im Ergebnis durchgeführter Fahrsimulationen ergeben, dass der Ursprung der Instabilität im Bereich der linken Fahrspur gelegen haben musste. Warum der Toyota-Fahrer in gewissem Abstand zum Kollisionsort einen Spurwechsel von rechts nach links durchführte, war nicht zu ermitteln. Da keine Faktoren im Wirkungsbereich des Fahrzeugs festgestellt wurden, welche hätten ursächlich für ein derartiges Fahrmanöver sein können, käme unter Umständen hierfür ein Fahrfehler des Toyota-Fahrers in Betracht.

Die Weg-Zeit-Analysen haben ergeben, dass für den Ford-Fahrer eine um mehr als eine Sekunde frühere Reaktion nachzuweisen war, als für den VW-Fahrer. Im Hinblick auf die festgestellte Geschwindigkeitsdifferenz zwischen VW und Ford ist es wahrscheinlich, dass auch der VW zunächst schneller war, als zu Beginn der Spurzeichnung und dass vor der sichtbaren Spurzeichnung bereits eine Verzögerung durchgeführt wurde, welche nicht durch eine Blockierspur repräsentiert wurde. Offenbar hat der VW-Fahrer bereits eine Geschwindigkeitsreduzierung vorgenommen, als er den Toyota im Gegenverkehr wahrgenommen hat und erkannt hat, dass eine Konfliktsituation entstehen könnte. Die nachweisbare Abwehrmaßnahme in Form einer Vollverzögerung wurde etwa zeitgleich zu dem Zeitpunkt eingeleitet, als vom in eine Schleuderbewegung geratenen Toyota eine zwingende Aufforderung hierzu ausging. Insofern war dem VW-Fahrer eine verspätete oder ungeeignete Reaktion nicht sicher nachzuweisen. Selbiges trifft für den Fahrer des Pkw Ford zu.

B7 Unfälle mit Nutzfahrzeugen

Reisebus kippt beim Abbiegen auf linke Seite

Christian Tschirschwitz

1 Sachverhalt

Nach Verlassen einer Autobahn befuhr der Fahrer eines Busses einen längeren Autobahnzubringer, welcher innerorts auf eine Bundesstraße mündet. Die Einmündung war ampelgeregelt. Zu dem Zeitpunkt, als der Bus die Einmündung erreicht hatte, war die Hauptfahrtrichtung (Bundesstraße) frei gegeben. Anhand der Spurlage war nachzuvollziehen, dass der Busfahrer mit Überschussgeschwindigkeit in die Einmündung einfuhr und hierbei ein starkes Lenkmanöver nach rechts entsprechend dem Fahrbahnverlauf durchführte. Dadurch kippte der Bus um und rutschte auf der linken Flanke in die Endlage. Während des Umkippens kam es zur Kollision mit mehreren Pkw, welche teilweise stark deformiert wurden. Zwei Businsassen erlitten tödliche Verletzungen, zahlreiche weitere Fahrgäste wurden zum Teil schwer verletzt. Die Insassen der Pkw trugen überwiegend nur leichte Verletzungen davon.

2 Durchgeführte Maßnahmen/Aufgabenstellung/Lösungsweg

Aufgrund der Vielzahl der verletzten Personen und der Lage der Unfallörtlichkeit auf einem wichtigen innerstädtischen Verkehrsknotenpunkt war zunächst ein umfangreicher Rettungs- und Polizeieinsatz notwendig, um die Insassen aus den Fahrzeugen zu befreien, die Unfallstelle abzusichern und den Verkehr umzuleiten. Der zur Unfallstelle gerufene Staatsanwalt ordnete den Einsatz eines technischen Sachverständigen an. Da bereits durch die erste Lageschilderung ein hohes Arbeitsvolumen für den Gutachter abzusehen war, wurde durch selbigen ein weiterer Mitarbeiter eingesetzt. Unter Berücksichtigung der noch laufenden Rettungsarbeiten wurden durch den einen Gutachter in Zusammenarbeit mit dem polizeilichen Unfalldienst die Spuren auf der Fahrbahnoberfläche lokalisiert, gekennzeichnet und den einzelnen beteiligten Fahrzeugen zugeordnet.

Der andere Gutachter übernahm die fotografische Dokumentation und unterstützte die technischen Zeichner der Polizeibehörde bei der Durchführung der Vermessungsarbeiten. Der polizeiliche Fachdienst entwickelte hierauf aufbauend eine maßstabsgerechte Zeichnung, in welcher die Geometrie der Fahrbahn, die Endpositionen und die Spurverläufe dargestellt wurden.

Da sich durch Zeugenaussagen bereits an der Unfallörtlichkeit abzeichnete, dass technische Gesichtspunkte im Wirkungsbereich des Busses mitursächlich für den Unfall gewirkt haben könnten, wurde während der Bergungsmaßnahmen gezielt darauf geachtet, dass an relevanten Fahrzeugkomponenten keine Veränderungen durchgeführt wurden. In Absprache mit dem Staatsanwalt wurde das Fahrzeug in einer Fachwerkstatt sichergestellt, welche sowohl hinsichtlich der räumlichen Gegebenheiten als auch hinsichtlich der technischen und personellen Ausstattung für die Durchführung einer technischen Untersuchung geeignet war.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_27

In Anlehnung an die Erkenntnisse während der Unfallaufnahme wurde durch die Staatsanwaltschaft ein Gutachten in Auftrag gegeben, in welchem die Unfallursache geklärt werden sollte. Die grundlegende Frage war, ob technische Mängel oder ein Fehlverhalten des Busfahrers zum Unfall geführt haben. Es war zur Vermeidbarkeit aus der Sicht des Fahrers Stellung zu beziehen.

Zur Durchführung der technischen Untersuchungsmaßnahmen war es notwendig, neben den allgemeinen Fahrzeugkenndaten auch die Parameter der einzelnen Baugruppen, insbesondere die Bremsanlage betreffend, zu kennen. Weiterhin war es notwendig, die Schwerpunkthöhe des Fahrzeugs in Erfahrung zu bringen. Aus diesem Grund wurde der Hersteller in die Untersuchungen mit einbezogen. Durch selbigen wurden die notwendigen Unterlagen zur Verfügung gestellt und die entsprechenden Auskünfte erteilt. Auf dieser Basis wurde in der Fachwerkstatt zunächst eine Funktionsprüfung des Gesamtfahrzeuges sowie einzelner Baugruppen und später eine innere technischer Untersuchung durchgeführt.

Die zum Unfallzeitpunkt in das Fahrzeug eingelegte Diagrammscheibe wurde im Rahmen eines Sondergutachtens mikroskopisch ausgewertet. Auf dieser Grundlage und im Ergebnis der durchgeführten Spuranalyse konnten die Bewegungsphasen des Busses beim Befahren der Einmündung und das Weg-Geschwindigkeits-Verhalten ab einer größeren Entfernung von der Unfallstelle rekonstruiert werden. Hierauf aufbauend wurde ein Weg-Zeit-Diagramm konstruiert, anhand welchem untersucht wurde, unter welchen Bedingungen eine Vermeidbarkeit für den Busfahrer gegeben gewesen wäre.

3 Objektive Merkmale

3.1 Unfallstelle/Endpositionen/Spuren

Die Richtungsfahrbahn des Autobahnzubringers, welche durch den Bus befahren wurde, verfügt zunächst über zwei und unmittelbar vor der Einmündung auf die Bundesstraße über drei Fahrspuren (**Bilder B7-1** bis **B7-7**). Ab einer Entfernung von 320 m vor Erreichen der Einmündung war durch Verkehrszeichen eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h angeordnet. Ab der Ortstafel (ca. 80 m vor der Einmündung) betrug die zulässige Höchstgeschwindigkeit 50 km/h. Mehrere Verkehrszeichen wiesen ab ca. 450 m vor der Unfallstelle auf besondere Gefahren durch Baumaßnahmen hin. In unmittelbarer Annäherung an die Einmündung wurde ein Gefälle von 2 bis 3 % gemessen. Die installierte Lichtsignalanlage war in Betrieb und zeigte Bezug nehmend auf Zeugenaussagen für den Busfahrer Rotlicht. Die Asphaltfahrbahn war trocken und in gutem Zustand. Die Fahrbahnmarkierungen, durch Baumaßnahmen teilweise in gelber Farbe, waren gut sichtbar. Die Geometrie der Unfallstelle ist im **Bild B7-16** dargestellt.

Ausgehend von der Fahrlinie des KOM begann 13 m vor der Haltelinie auf der rechten Rechtsabbiegespur eine bogenförmige, rechtsorientiert gezeichnete Driftspur deren Intensität mit weiterem Zeichnungsfortschritt stärker wurde (Beginn in Höhe Positionsnummer 0 auf **Bild B7-4** und **Bild B7-5**). Die dem linken Vorderrad des Busses zuzuordnende Spur war 47 m lang. Der Verlauf und die Charakteristik sind anhand der **Bilder B7-5** bis **B7-12** nachzuvollziehen. Durch das rechte Vorderrad des Busses wurde der rechts befindliche Bordstein tangiert. In dieser Region kam es zum Verursachen einer kürzeren Driftspur (Positionsnummern 2 bis 3 auf **Bild B7-5** und **Bild B7-6**). Im Bereich der durch das linke Vorderrad hervorgerufenen Spur wurden von dem hinteren Zwillingsradpaar dieser Fahrzeugseite linienartige Spuren gezeichnet (**Bild B7-6** und **Bild B7-8**).



Bild B7-1 Annäherung an die Unfallstelle, Abstand zur Einmündung etwa 350 m



Bild B7-2 Annäherung an die Unfallstelle, Abstand zur Einmündung etwa 200 m



Bild B7-3 Annäherung an die Unfallstelle, Abstand zur Einmündung etwa 100 m



Bild B7-4 Beginn der Spurzeichnung in Höhe Nr. 0



Bild B7-5 Beginn Driftspur linkes Vorderrad (Nr. 0). Beginn Spur durch rechtes Vorderrad in Höhe Nr. 2



Bild B7-6 Spuren im weiteren Verlauf



Bild B7-7 Driftspuren entgegengesetzt der Fahrtrichtung

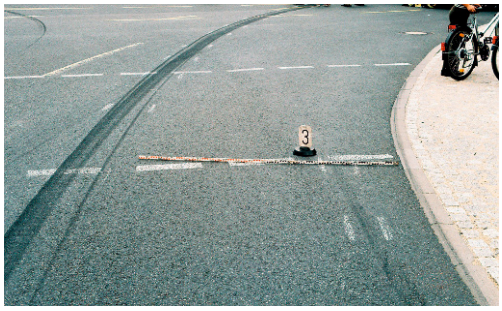


Bild B7-8 Spurdetail. In Höhe Nr. 3 Beginn Kippvorgang



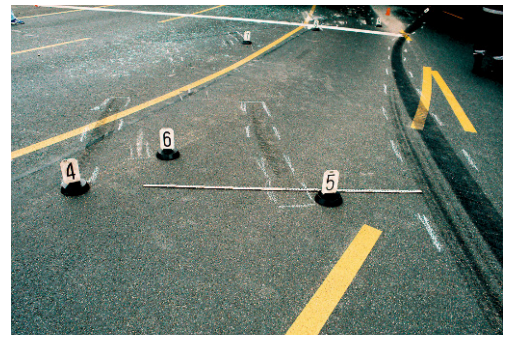


Bild B7-9 Oben: Spuren 4, 5 und 6 im Detail

Bild B7-10 Links: Spuren der linken Bus-Räder während der Kippphase. Nr. 4, 5 und 6 kennzeichnen Spuren vom dunklen Pkw, welcher im Bildhintergrund steht.



Bild B7-11 Endstand dunkler Pkw und Aufschlagpunkt des Bus auf Fahrbahn in Höhe Nr. 8 und 9

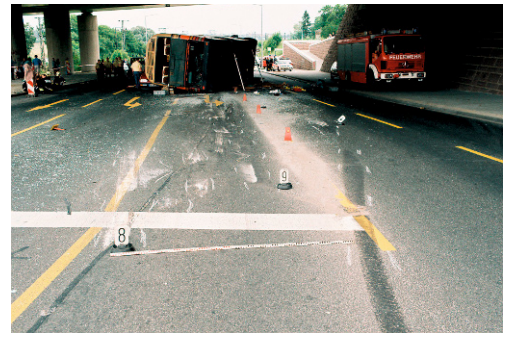


Bild B7-12 Aufschlagpunkt und Schürfspuren bis zur Bus-Endlage



Bild B7-13 Endlage Bus, Positionen weiterer beteiligter Fahrzeuge



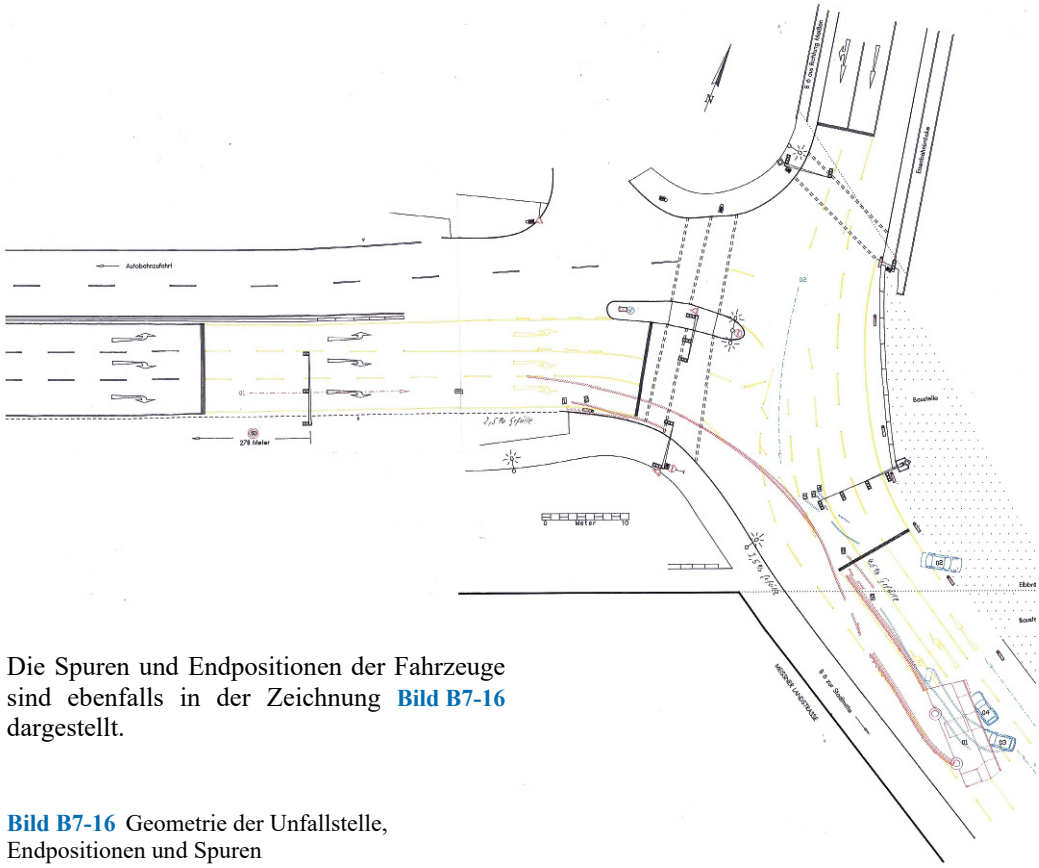
Bild B7-14 Unter Bus eingeklemmter Pkw



Der umgekippte Bus ruhte teilweise auf dem Vorbau und der vorderen Region der Fahrgastzelle eines Pkw (**Bild B7-14**). Ein weiterer Pkw (rotes Fahrzeug auf **Bild B7-13**) wurde nur leicht beschädigt.

Bild B7-15 Gegen Rückkippen gesicherter Bus

Auf **Bild B7-10** sind Radier- und Schlagspuren dargestellt, welche durch den auf **Bild B7-11** dargestellten dunklen Pkw hervorgerufen wurden. Während des Kippvorgangs des Busses wurde dieser Pkw erheblich in vertikale Richtung belastet, sodass teilweise Metallstrukturen des Fahrzeugs mit der Fahrbahn Kontakt hatten (Positionsnummer 6). Zwischen dem Endbereich der durch das linke Bus-Vorderrad hervorgerufenen kräftigen Spur und der von hier 22 m entfernten Endlage des Fahrzeugs wurden intensive Kratz- und Schürfspuren vorgefunden (**Bild B7-12**).



Die Spuren und Endpositionen der Fahrzeuge sind ebenfalls in der Zeichnung **Bild B7-16** dargestellt.

Bild B7-16 Geometrie der Unfallstelle, Endpositionen und Spuren

3.2 Fahrzeugkenndaten/Beschädigungen

Die Daten und Zustände der am Unfall beteiligten Pkw waren für die Ermittlung der Unfallursache nicht vordergründig relevant, sodass selbige hier auch nicht näher betrachtet werden. Die wesentlichen Kenndaten des Busses sind in **Tabelle B7.1** aufgeführt.

Tabelle B7.1 Allgemeine Fahrzeugdaten

Parameter	Einheit	Werte
Fahrzeugart		Kraftomnibus
Fabrikat		G. Auwärter
Typ		Neoplan N 116
Antriebsart		Diesel
Leistung	kW	213
Hubraum	cm^3	15.078
Länge	mm	12.000
Breite	mm	2.500
Höhe	mm	3.650
Radstand	mm	5.950
Überhang vorn	mm	2.800
Spurweite vorn	mm	2.098
Spurweite hinten	mm	2.156
Leermasse	kg	12.500
Zulässige Gesamtmasse	kg	17.500
Anzahl Sitzplätze		53
Anzahl der Insassen		29

Die Schäden am Bus konzentrierten sich im Wesentlichen auf die linke Fahrzeugflanke, an welcher zwar großflächige, jedoch nur wenig tiefe Deformationen vorhanden waren. Weiterhin wurden intensive Materialabschliffe aufgrund des Rutschvorgangs lokalisiert. Die drei vorderen Seitenscheiben des Personendecks waren ebenso zertrümmert, wie die Fahrerseitenscheibe und beide Bestandteile der Frontscheibe (**Bild B7-17**). Der Innenraum war nur wenig beschädigt. Lediglich einige Rücken- und Armlehnen waren nach links gestaucht (**Bild B7-18**). Ansonsten war das Fahrzeug mechanisch wenig beschädigt. Es konnte während der technischen Untersuchungsmaßnahmen mit eigener Motorkraft bewegt werden.



Bild B7-17 Oben: Beschädigungen an der linken Flanke und der Front



Bild B7-18 Rechts: Zustand im Innenraum (Fahrzeug noch in Endlage)

4 Technischer Zustand

Da sich im Zuge der Unfallaufnahme und der später durchgeführten Zeugenvernehmungen die Möglichkeit eines Bremsdefekts herauskristallisierte, wurden die Untersuchungen schwerpunktmäßig auf die Bremsanlage konzentriert. Die weiteren für die Fahrsicherheit relevanten Baugruppen (Fahrwerk; Räder/Bereifung; Lenkanlage) wurden einer Sicht- und Funktionsprüfung unterzogen. An diesen Baugruppen wurden keine technischen Mängel festgestellt.

Zunächst wurde im Istzustand des Fahrzeugs die mittels Betriebsbremse und später die mittels Feststellbremse erreichbare Schwerpunktverzögerung im Rahmen eines Fahrversuches ermittelt. Im Leerzustand des Fahrzeugs wurden nach Betätigung der Betriebsbremse Verzögerungen von –2,3 m/s^2 und bei Betätigung der Feststellbremse –0,2 m/s^2 gemessen. Das heißt, die Feststellbremsanlage war nahezu wirkungslos. Dies war bereits im Vorfeld der Untersuchungen dadurch festgestellt worden, dass der Bus selbst bei geringstem Gefälle mittels Feststellbremse nicht fixiert werden konnte. Aufgrund der Tatsache, dass an dem Fahrzeug eine lastabhängige Reglung der Bremskräfte nicht vorhanden war (kein ALB-Regelventil) ist davon auszugehen, dass die Bremsleistung im beladenen Zustand noch geringer war. Als Orientierung für die notwendige Bremsleistung kann der gesetzlich geforderte Mindestabbremsungswert von 48 % dienen. Da nunmehr als gesichert angesehen werden konnte, dass die Bremsanlage den gesetzlichen Vorschriften nicht entsprach, war durch weitere Untersuchungsmaßnahmen die Ursache für den Defekt herauszufinden. Ehe Demontagearbeiten durchgeführt wurden, wurden

die an den Einzelrädern erreichbaren Bremskräfte auf einem Rollenprüfstand gemessen. Die erreichten Werte sind in **Tabelle B7.2** aufgeführt.

Tabelle B7.2 Erreichte Bremskräfte im Istzustand

Bremssystem	Rad	Kraft (kN)
Betriebsbremse	vorn links	13,0
Betriebsbremse	vorn rechts	11,2
Betriebsbremse	hinten links	5,0
Betriebsbremse	hinten rechts	4,9
Feststellbremse	hinten links	1,8
Feststellbremse	hinten rechts	2,0

Anhand der in **Tabelle B7.2** ersichtlichen Werte ist nachzuvollziehen, dass die Minderbremsleistung in erster Linie von der Hinterachse ausging. Mit diesen Bremskräften und der Gewichtskraft des Fahrzeugs konnte die Abbremsung im Leerzustand für die Betriebsbremse mit 28 % und für die Feststellbremsanlage mit 3 % berechnet werden. Diese Werte ordnen sich gut in die Ergebnisse der Schwerpunktverzögerungsmessungen im dynamischen Zustand ein. Hochgerechnet auf die zulässige Gesamtmasse wäre im beladenen Zustand unter Nutzung der Betriebsbremse eine Abbremsung von 20 % und mittels Feststellbremse eine Abbremsung von 2 % erreicht worden. Diese Werte liegen deutlich unter den gesetzlich geforderten Abbremsungswerten.

Als nächster Untersuchungsschritt wurden die Ausrückwege der einzelnen Radbremszylinder gemessen und mit den vorgeschriebenen Arbeitsbereichen der Hersteller verglichen. Die festgestellten Parameter sind in **Tabelle B7.3** eingetragen. Der Ausrückweg hinten links befand sich mit 68 mm um 4 mm über dem zulässigen Maximalhub (64 mm) für die hier eingesetzten Zylinder (**Bilder B7-20** und **B7-21**). Bezüglich des Radbremszylinder hinten rechts erfolgte eine unmittelbare Annäherung des Ausrückweges an den zulässigen Arbeitsbereich (bis auf 3 mm). Somit ist davon auszugehen, dass wesentliche Anteile der in den hinteren Bremszylindern erzeugten Kräfte nicht zum Anlegen der Beläge an die Bremstrommeln zur Verfügung stehen konnten. Bezüglich der vorderen Radbremszylinder waren die gemessenen Ausrückwege im oberen Bereich des zulässigen Toleranzbereiches anzusiedeln.

Tabelle B7.3 Ausrückwege der Radbremszylinder

Bremssystem	Rad	Ausrückweg (mm)
Betriebsbremse	vorn links	31
Betriebsbremse	vorn rechts	43
Betriebsbremse	hinten links	68
Betriebsbremse	hinten rechts	61
Feststellbremse	hinten links	59
Feststellbremse	hinten rechts	51

Durch die Schauöffnungen in den hinteren Radbremsen konnte festgestellt werden, dass die Bremsbeläge eine ausreichende Stärke aufwiesen. Es zeichnete sich somit ab, dass die großen Ausrückwege der Bremszylinder nicht durch übermäßigen Verschleiß der Reibpartner, sondern durch eine mangelhafte Grundeinstellung verursacht worden sind. Aus diesem Grund wurde die Grundeinstellung der Radbremsen an der Hinterachse entsprechend der Herstellervorschrift korrigiert. Hierbei wurde festgestellt, dass die Einstellschrauben an den Gestängestellern vergleichsweise leichtgängig waren. Nach Korrektur der Grundeinstellung wurden mit dem Fahrzeug erneut Schwerpunktverzögerungsmessungen im Leerzustand durchgeführt. Es wurde mittels Betriebsbremse eine Verzögerung von –6,4 m/s² und mittels Feststellbremse eine Verzögerung von –3,2 m/s² gemessen. Die mittels der einzelnen Räder erreichbaren Bremskräfte wurden wiederum auf einem Rollenprüfstand gemessen. Die Werte sind in **Tabelle B7.4** dargestellt.

Tabelle B7.4 Erreichte Bremskräfte nach Einstellung

Bremssystem	Rad	Kraft (kN)
Betriebsbremse	hinten links	24,0
Betriebsbremse	hinten rechts	22,5
Feststellbremse	hinten links	18,0
Feststellbremse	hinten rechts	24,0

Bezogen auf die Gewichtskraft im Leerzustand wäre mittels der Betriebsbremse eine Abbremsung von 58 % und mit der Feststellbremse von 34 % zu erreichen gewesen. Hochgerechnet auf das zulässige Gesamtgewicht hätte die Abbremsung nach Veränderung der Grundeinstellung 41 % (Betriebsbremse) bzw. 24 % (Feststellbremse) betragen. Auch nach Korrektur der Einstellung wäre der gesetzlich geforderte Mindestabbremsungswert (48 %) nicht erreicht worden. Im Ergebnis der weiteren durchgeführten Untersuchungen ist die Ursache hierfür in erster Linie in der Herabsetzung des Reibbeiwertes an den vorderen Radbremsen durch ständige thermische Überlastung (so genanntes „Verglasen“ der Bremsbeläge) zu suchen.

Im Vorfeld der durchzuführenden Demontagearbeiten wurden die einzelnen sicherheitsrelevanten Baugruppen der Bremsanlage hinsichtlich ihrer Funktionstüchtigkeit untersucht. Dies betraf insbesondere die Dichtheit des Gesamtsystems, die Förderleistung des Verdichters, der Druckluftbedarf in Abhängigkeit von der Anzahl der Bremsbetätigungen sowie die Funktionstüchtigkeit von Druckregelventil und Mehrkreisschutzventil. Zur Überprüfung des letztgenannten Bauteiles wurde in einem Bremskreis jeweils ein Fehler simuliert und durch Anschluss entsprechender Manometer das Absperren des anderen Bremskreises überprüft (**Bild B7-19**).

Die Zusatzbremsen (Motorbremse; hydrodynamische Bremse [Retarder]) wurden ebenfalls überprüft, funktionsbeeinträchtigende Mängel wurden hier nicht festgestellt.

Die einzelnen Radbremsen wurden einer inneren Untersuchung unterzogen. Nach der Demontage der Bremstrommeln beeindruckte der unterschiedliche Beanspruchungszustand bezüglich der Reibflächen der vorderen Radbremsen im Gegensatz zu den Oberflächen von Bremsbelägen und Bremstrommeln an der Hinterachse. An den Bremsbelägen vorn waren teilweise Oberflächenverhärtungen (Verglasungen) und an den zugehörigen Bremstrommeln Anlauffarben erkennbar (**Bilder B7-22** und **B7-23**). Diese Merkmale deuteten darauf hin, dass die vorderen Radbremsen thermisch hoch beansprucht wurden. Demgegenüber stellten sich die hinteren Radbremsen in nahezu unverschlissenem Zustand dar. Das heißt, die Beläge wiesen neuwertige Stärken auf. An den Trommeln waren teilweise noch die fertigungsbedingten Bearbeitungsspu-

ren sichtbar (**Bilder B7-24** und **B7-25**). Anhand vorliegender Reparaturrechnungen müssten die Bremstrommeln auf der Hinterachse über eine Laufleistung von mehr als 100.000 km verfügt haben. So, wie das Beanspruchungsbild an den hinteren Radbremsen vorgelegen hat, dürften während des gesamten Einsatzzeitraumes an der Hinterachse keine nennenswerten Bremsmomente erzeugt worden sein. An allen Bremstrommeln wurden in verschiedenen Ebenen die Durchmesser ermittelt. Sie befanden sich im herstellerseitig angegebenen Einsatzbereich.

In Anbetracht des Zustandes der Radbremsen kristallisierte sich heraus, dass die Ursache für den Bremsdefekt an der Hinterachse im Bereich der automatischen Gestängesteller zu suchen war. Beide Bauteile wurden zerlegt. Es zeigte sich, dass die inneren Bestandteile der Gestängesteller teilweise so stark verschlissen waren, dass eine formschlüssige Kraftübertragung von Zahnstange und Ritzel nicht mehr zu realisieren war. **Bild B7-30** zeigt die Zahnstange des hinteren rechten Gestängestellers. Die Druckfedern waren unbrauchbar und teilweise nur noch fragmenthaft vorhanden (**Bilder B7-27, B7-28** und **B7-29**). Die Einwegkupplungen waren nahezu unwirksam. Dies wurde bereits beim Verändern der Grundeinstellung in noch montiertem Zustand nachvollzogen. Der blaue Pfeil auf **Bild B7-29** verweist auf Einlaufspuren in der Verzahnung. Weiterhin ist auf diesem Foto die verschlissene Konusverzahnung ersichtlich. Der Zustand der Gestängesteller gestattete es, beispielsweise im Vorfeld einer Fahrzeugüberprüfung die Grundeinstellung der Bremsen so zu korrigieren, dass akzeptable Bremskräfte an der Hinterachse erreicht wurden. Im Rahmen des Fahrzeugbetriebes wurde der Einstellzustand der Bremsen jedoch nicht, wie vorgesehen, gehalten bzw. ordnungsgemäß automatisch korrigiert. Vielmehr erfolgten ungewollte Verdrehungen der Gestängesteller gegenüber den Nockenwellen, sodass sich die Ausrückwege der Radbremszylinder nach und nach bis auf das festgestellte Maß vergrößern konnten. Da hierbei die hinteren Radbremsen nahezu wirkungslos wurden, wurde das Fahrzeug im Normalfahrbetrieb nahezu ausschließlich über die Vorderräder verzögert. Dies führte schließlich zu Überhitzungserscheinungen an den vorderen Radbremsen.



Bild B7-19 Prüfung des Mehrkreisschutzventils. Bei simuliertem Defekt im Kreis 3–4 bleibt Dichtheit im Kreis 1–2 erhalten.



Bild B7-20 Radbremszylinder hinten links, Kolbenstange in Ruhestellung



Bild B7-21 Radbremszylinder hinten links, Kolbenstange bei Betätigung der Betriebsbremse

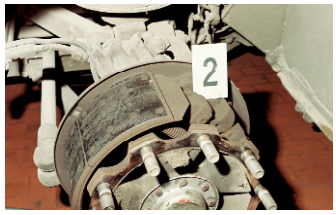


Bild B7-22 Bremsbelag vorne rechts mit verhärteter Oberfläche



Bild B7-23 Bremstrommel vorne rechts mit Anlauffarben



Bild B7-24 Bremsbelag hinten links in nahezu neuwertigem Zustand



Bild B7-25 Bremstrommel hinten links ohne nennenswerten Verschleiß



Bild B7-26 Teildemontierter Gestängesteller hinten links



Bild B7-27 Zustand des Zahnstangengetriebes am Gestängesteller hinten links



Bild B7-28 Unbrauchbare Druckfeder

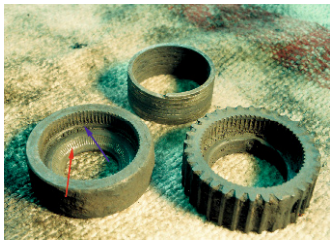


Bild B7-29 Verschlissene Einwegkupplung: Einlaufspuren an der Verzahnung (blauer Pfeil) und unwirksame Konusverzahnung (roter Pfeil)



Bild B7-30 Zustand des Zahnstangengetriebes am Gestängesteller hinten rechts

5 Rekonstruktion des Bewegungsablaufes

Der Bewegungsablauf des Busses vom Verlassen des Autobahnzubringers bis zur Endlage war mit Hilfe der an der Unfallstelle festgestellten Spuren einfach zu rekonstruieren. Durch das eingeleitete Lenkmanöver und die noch vorhandene Überschussgeschwindigkeit wurde zunächst in Höhe der Positionsnummer 0 (**Bild B7-5**) die Grenzgeschwindigkeit bei Kurvenfahrt gegenüber Rutschen erreicht, sodass insbesondere durch die linken Räder eine markante Spurzeichnung erfolgte. Später wurde aufgrund der Schwerpunktlage in vertikaler Richtung auch die Grenzgeschwindigkeit gegenüber Kippen überschritten. Das rechte Vorderrad verlor in Höhe der Positionsnummer 3 (**Bild B7-8**) den Bodenkontakt. Der Kippprozess wurde mit dem Aufschlagen der linken Fahrzeugflanke auf die Straße in Höhe der Positionsnummern 8 und 9 (**Bilder B7-11** und **B7-12**) beendet. Die sich anschließende Rutschstrecke bis in die Endlage betrug 22 m. Während des Kippens geriet der sich von links auf der freigegebenen Fahrbahn annähernde Pkw, welcher auf **Bild B7-11** dargestellt ist, teilweise unter den Bus. Aufgrund der Eigengeschwindigkeit konnte sich der Pkw jedoch wieder vom Bus lösen und in die festgestellte Endposition gelangen. Ein im Gegenverkehr befindlicher Pkw wurde durch den umgekippten Bus niedergedrückt und etwa 25 m im eingeklemmten Zustand in die auf **Bild B7-14** ersichtliche Endstellung bewegt. Ein weiterer Pkw wurde überwiegend nur streifend berührt und rollte in dessen Endstand. Die Bewegungsphasen der Fahrzeuge sind in der Zeichnung **Bild B7-31** dargestellt.

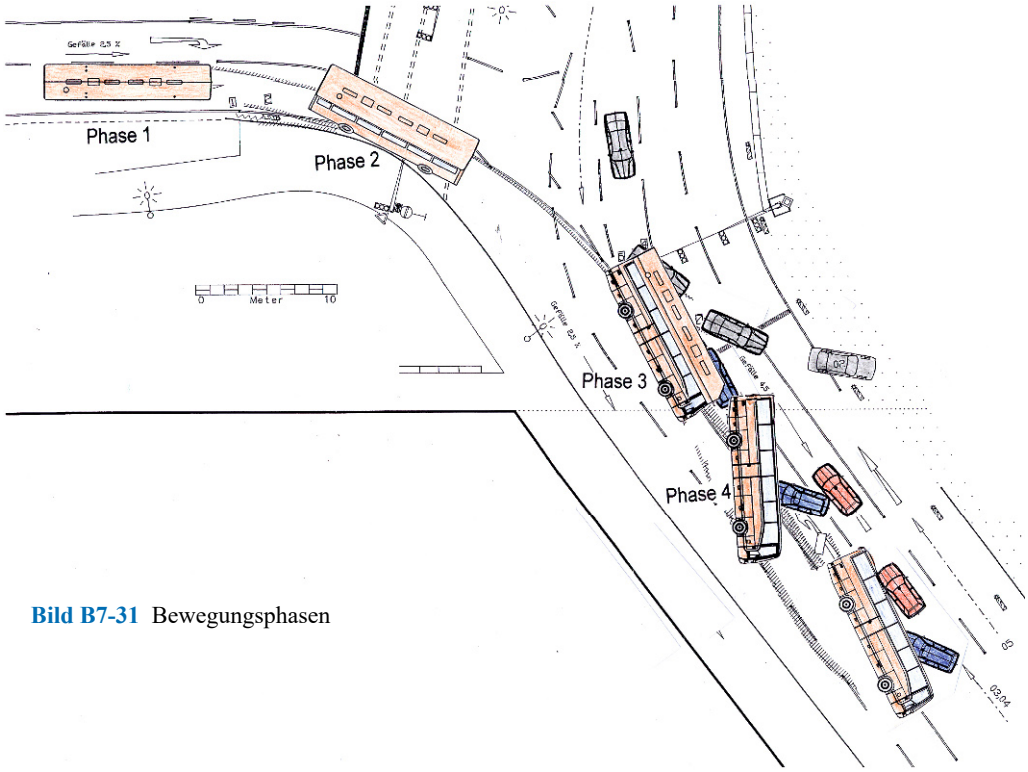


Bild B7-31 Bewegungsphasen

5.1 Geschwindigkeit des Busses

Die Diagrammscheibe des Busses wurde mikroskopisch ausgewertet, sodass Geschwindigkeits- und Zeitdaten im Vorfeld des Kippvorgangs vorlagen. Es war jedoch nicht möglich, anhand der Diagrammscheibe den Geschwindigkeitsabbau zum Ende der Kippphase und während des Rutschvorgangs zu rekonstruieren. Somit musste die Art und Weise des Geschwindigkeitsabbau in der Umgebung der Kollisionsorte mit den Pkw bzw. des Aufschlagens auf die Fahrbahn und der Endlage durch objektive Anknüpfungsparameter von der Unfallstelle (Spuren) hergeleitet und ein entsprechender Anschluss an die Weg-Geschwindigkeits-Kurve der Diagrammscheibenauswertung geschaffen werden. Die festgestellte Rutschstrecke von 22 m wurde mit einer Schwerpunktverzögerung während des Rutschvorgangs zwischen –3 m/s^2 und –4 m/s^2 verknüpft, sodass sich eine Geschwindigkeit zu Beginn des Rutschvorgangs zwischen 41 km/h und 48 km/h ergab. Bei der Diagrammscheibenauswertung wurde bei einer Geschwindigkeit von 45 km ein anormaler Aufschrieb festgestellt, welcher auf die außergewöhnlichen Erschütterungen des Fahrzeugs beim Auftreffen auf die Fahrbahn zurückzuführen war. Dieser Wert befindet sich nahezu exakt in der Mitte des über die Rutschstrecke hergeleiteten Geschwindigkeitsbereiches. Die Geschwindigkeit von 45 km/h im Mittel zu Beginn des Rutschvorgangs konnte somit als gesichert angesehen werden. Die Diagrammscheibenauswertung ging davon aus, dass aus 51 km/h (Auswertungsende) bis zu den anormalen Aufzeichnungen ein für eine Bremsung typischer rascher Abfall des Geschwindigkeitsschreibers festgestellt wurde. Es galt nunmehr zu ermitteln, in welcher Größenordnung das kippende Fahrzeug noch zu verzögern war. Es war hierbei zu berücksichtigen, dass die während des Fahrversuches

gemessene erreichbare Schwerpunktverzögerung von –2,3 m/s² durch Beladung und Gefälle bei Maximaldruck im Bremssystem auf –1,5 m/s² reduziert wurde. Es war jedoch davon auszugehen, dass der Maximaldruck in der Bremsanlage nicht mehr zur Verfügung stand. Zeugen berichteten, dass der Fahrer im Vorfeld das Fußbremspedal mehrfach betätigte und wieder entlastete. In Anlehnung an die am Fahrzeug durchgeführten Druckmessungen war somit von einer maximal erreichbaren Schwerpunktverzögerung unmittelbar vor dem Kippen von lediglich –1,1 m/s² bis –1,2 m/s² auszugehen. Die Wegstrecke zwischen dem Aufschlagen des Busses auf die Fahrbahn und dem Ende der Diagrammscheibenauswertung wurde anhand dieser Werte in der Größenordnung von etwa 18 m errechnet.

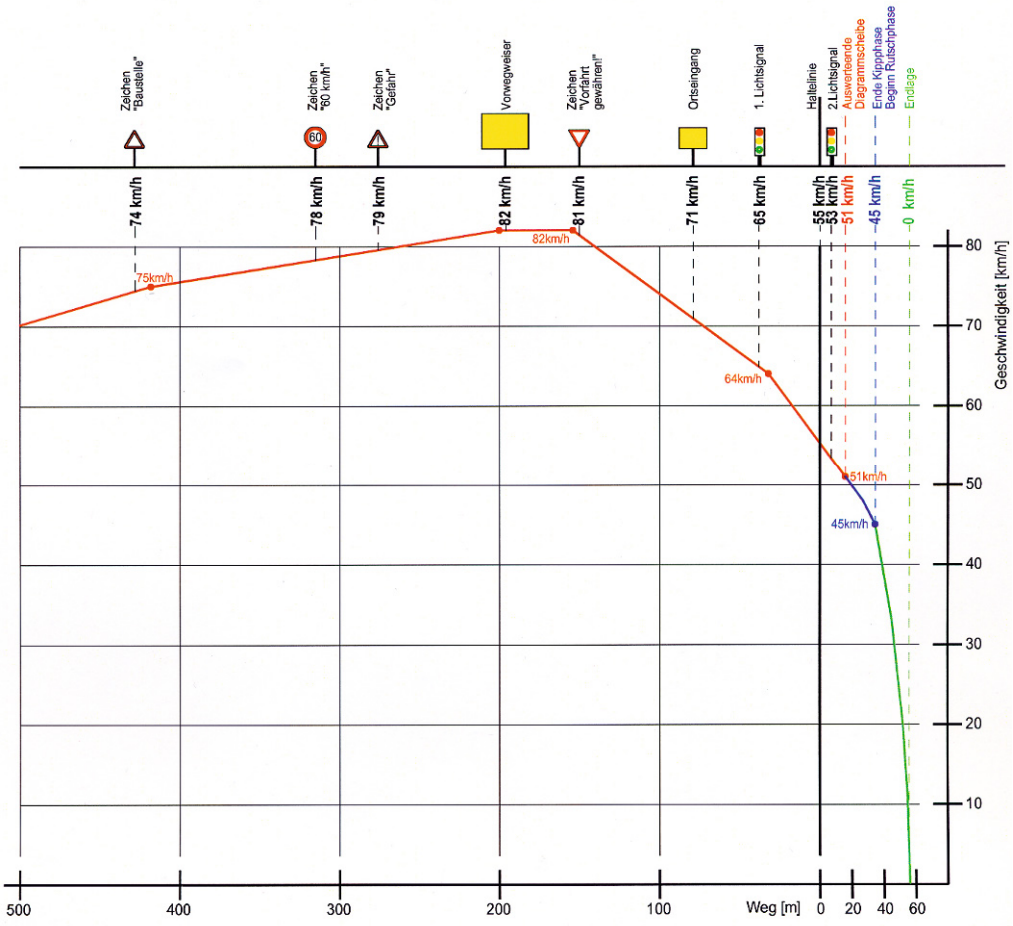


Bild B7-32 Weg-Geschwindigkeits-Diagramm

Anhand der durch den Hersteller gelieferten Schwerpunkthöhe des Fahrzeugs, welche unter Zuhilfenahme des aktuellen Beladungszustandes korrigiert wurde, konnte anhand des Spurradius errechnet werden, dass das Fahrzeug rechnerisch bei einer Geschwindigkeit zwischen 53 km/h und 55 km/h umkippen musste. Dies entsprach dem Geschwindigkeitsbereich, welchen der Bus beim Überfahren der Haltelinie und damit beim anhand der Spuren nachzuvollziehenden Beginn des Kippvorgangs innehatte. Somit lag ein weiteres Indiz für die örtliche

Fixierung des mittels der Diagrammscheibe abgeleiteten Weg-Geschwindigkeits-Bereiches vor. Es konnte ein in sich widerspruchsfreies Weg-Geschwindigkeits-Diagramm konstruiert werden (**Bild B7-32**). Anhand dieses Diagramms war abzulesen, dass der Bus das Schild „Zulässige Höchstgeschwindigkeit – 60 km“ mit einer Geschwindigkeit von 78 km/h überfuhr und dass der Fahrer nach Passieren des Verkehrszeichens die Geschwindigkeit seines Fahrzeugs noch bis auf 82 km/h erhöhte. Ab etwa 150 m vor Erreichen der Haltelinie erfolgte eine allmähliche Reduzierung der Geschwindigkeit in der Größenordnung von –0,8 m/s^2 auf 64 km/h. Das Ortseingangsschild wurde mit einer Geschwindigkeit von 71 km/h überfahren. Die Geschwindigkeit von 64 km/h wurde etwa in Höhe des ersten Lichtsignals (**Bild B7-3**) erreicht. Offenbar erst an diesem Punkt wurde seitens des Fahrers eine Vollverzögerung eingeleitet, welche aufgrund der technischen Mängel, des Gefälles, der Beladung und des Minderdruckes im System nicht stärker als –1,2 m/s^2 gewesen sein konnte. Dieser Wert ist die durchschnittliche Verzögerung, welche im letzten Diagrammscheibenauswerteintervall errechnet wurde.

In **Bild B7-32** sind mittlere Geschwindigkeitswerte eingetragen. Bei der Begutachtung erfolgte eine Grenzwertbetrachtung unter Berücksichtigung der Toleranz des Fahrtenschreibers.

5.2 Weg-Zeit-Verhalten und Vermeidbarkeit

Anhand der Weg-Geschwindigkeits-Werte (**Bild B7-32**) wurde ein Weg-Zeit-Diagramm gezeichnet (**Bild B7-33**). Der tatsächliche Verlauf wird durch die rote Kurve repräsentiert. Entsprechend der an den Gutachter gerichteten Aufgabenstellung war zu klären, ob der Unfall unter den tatsächlichen Geschwindigkeitsbedingungen jedoch bei intakter Bremsanlage zu vermeiden gewesen wäre. Weiterhin war zu untersuchen, ob eine Vermeidbarkeit bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, spätestens ab Passieren der Geschwindigkeitsbegrenzung, jedoch unter Berücksichtigung des technischen Mangel gegeben war.

Wird davon ausgegangen, dass der Busfahrer ab etwa 150 m vor der Haltelinie eine aktive Verzögerung durchführte, die tatsächliche Geschwindigkeit betrug hier 82 km/h, war nunmehr zu untersuchen, ob die verminderte Leistungsfähigkeit der Bremsanlage ausreichend gewesen wäre, das Fahrzeug aus einer hier zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h vor der Haltelinie zum Stillstand zu bringen. Hierfür hätte das 60 km/h schnell fahrende Fahrzeug innerhalb der zur Verfügung stehenden Wegstrecke von 150 m bei einer mittleren Verzögerung von –0,9 m/s² abgebremst werden müssen. Der Weg-Zeit-Verlauf ist in **Bild B7-33** blau dargestellt. Die notwendige Verzögerung ist geringer, als die mit der mangelhaften Bremsanlage erreichbare Verzögerung, sodass der Unfall bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und dieser Verzögerung durch den Busfahrer zu vermeiden gewesen wäre. Räumt man dem Busfahrer ein, dass er zwischen 150 m und 32 m vor der Haltelinie hier noch in Unkenntnis des technischen Mangels entsprechend der tatsächlichen Größenordnung verzögern durfte (–0,83 m/s^2), hätte er zu Beginn der nachvollziehbaren Maximalverzögerung eine Geschwindigkeit von 31 km/h inne gehabt. Innerhalb der zur Verfügung stehenden Wegstrecke von 32 m wäre das Fahrzeug mit der tatsächlich registrierten Verzögerung im letzten Auswerteintervall (–1,2 m/s^2) vor der Haltelinie zum Stillstand gekommen (grüne Weg-Zeit-Kurve in **Bild B7-33**). Auch bei dieser Variante wäre der Unfall bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit trotz des technischen Defektes durch den Busfahrer zu vermeiden gewesen. Wenn das Fahrzeug technisch mangelfrei gewesen wäre, wäre bei einer Mindestabbremsung von 48 % eine Schwerpunktverzögerung von mindestens 4,7 m/s^2 zu erreichen gewesen. Wenn die Vollverzögerung wiederum unter Berücksichtigung des tatsächlichen Weg-Zeit-Verlaufes (rote Kurve)

bei einer Geschwindigkeit von 64 km/h und 32 m vor der Haltelinie in eben dieser Größenordnung begonnen wurde, wäre der Bus etwa 1 m nach der Haltelinie, d. h. noch vor Erreichen der freigegebenen Straße, zum Stillstand gekommen (rosa Kurve in **Bild B7-33**). Der Unfall wäre somit auch unter Zugrundelegung der überhöhten Geschwindigkeit, jedoch bei ordnungsgemäßer Bremsanlage zu vermeiden gewesen.

Die Unfallursache bestand in einer Wechselwirkung zwischen einer überhöhten Geschwindigkeit des KOM und einem vorhandenen technischen Mangel. Hätte jeder dieser beiden Faktoren allein gewirkt, wäre es nicht zum Unfall gekommen.

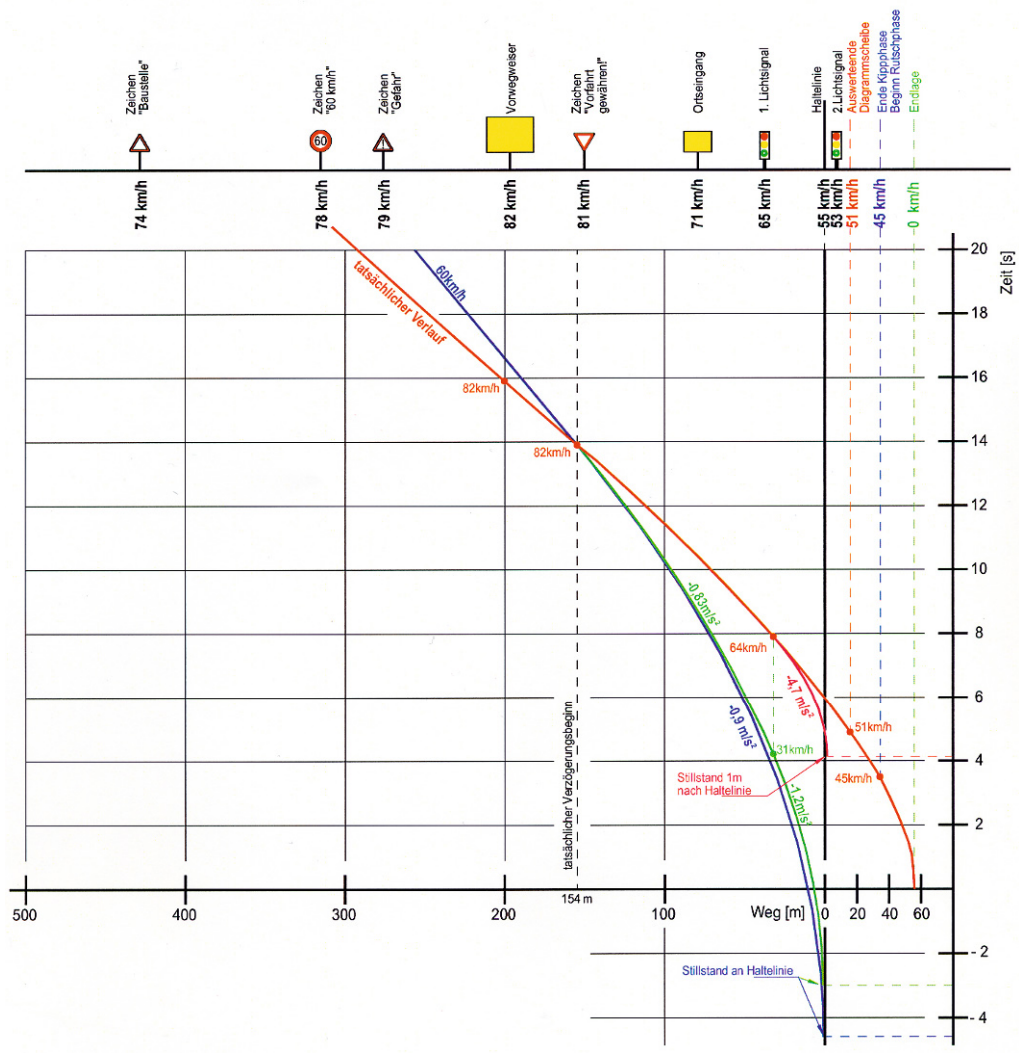


Bild B7-33 Weg-Zeit-Diagramm

Schwerlasttransporter schwenkt bei Kurvenfahrt aus und kollidiert mit einem entgegen kommenden Pkw

Dr. Heinz Burg

1 Sachverhalt

Der Verkehrsunfall ereignete sich innerorts. Es galt die allgemeine Geschwindigkeitsbegrenzung. Zur Unfallzeit war es hell und trocken. Die Fahrbahn hatte eine Schwarzdecke. Zum Unfallhergang war der VU-Anzeige zu entnehmen, dass der Fahrer des Sattelzugs in einen Kreisverkehr am Ortsanfang einfuhr. Aus entgegengesetzter Fahrtrichtung kam die Fahrerin eines Pkw Mercedes und wollte den Kreisverkehr verlassen. Dort kam es zur Kollision der vorderen linken Ecke des Pkw mit dem linken Rad der hintersten Achse des Sattelanhängers.

2 Auftrag

In einem Zivilprozess ging es um die Frage, ob der Sattelanhänger über die Fahrbahnmitte geraten war, ob dies für den Fahrer unvermeidlich war und ob die Pkw-Fahrerin damit rechnen musste, dass der Sattelanhänger ausscheren könnte.

3 Objektive Merkmale

Tabelle B7.5 Allgemeine Fahrzeugdaten

	Lkw	Pkw
Fahrer/in	Anton M.	Maria B.
Fahrzeugart	Sattelschlepper	Pkw Limousine
Fabrikat, Typ	MAN T 48/Goldhofer STZ VL4	Mercedes W 203
Leergewicht	31.000 kg	1.490 kg
Gewicht Fahrer	31.090 kg	1.560 kg



Bild B7-34 Übersichtsaufnahme der Unfallstelle



Bild B7-35 Luftbild von der Unfallörtlichkeit

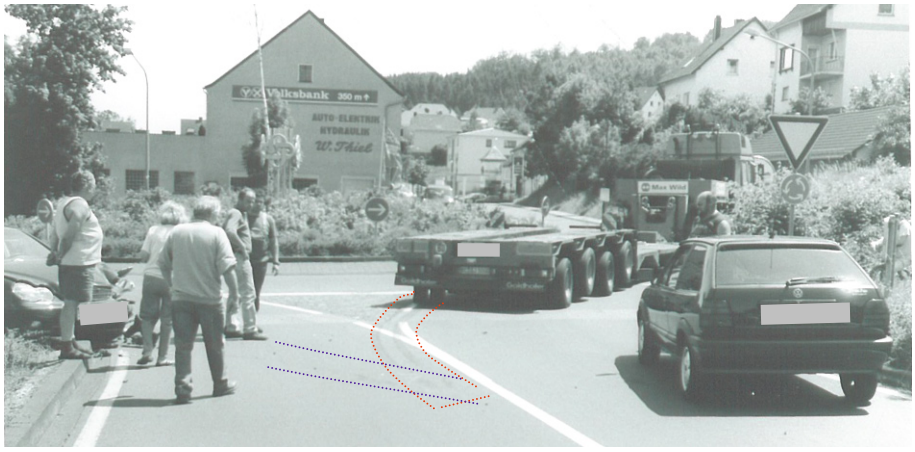


Bild B7-36 Von der Polizei gesicherte Spuren

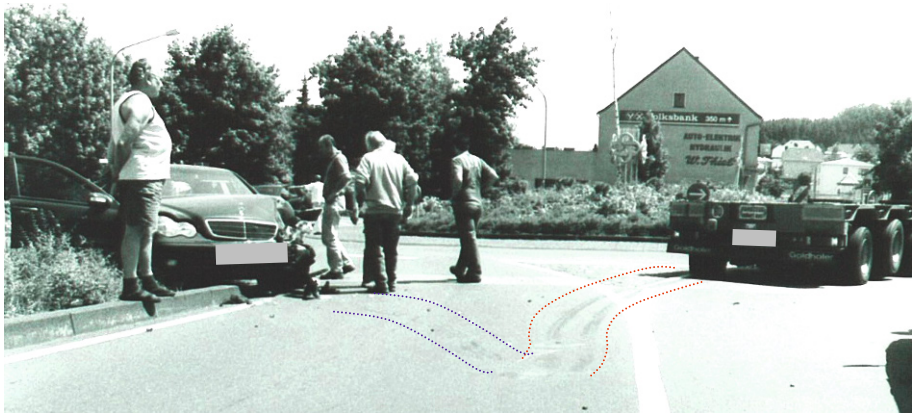


Bild B7-37 Von der Polizei gesicherte Spuren

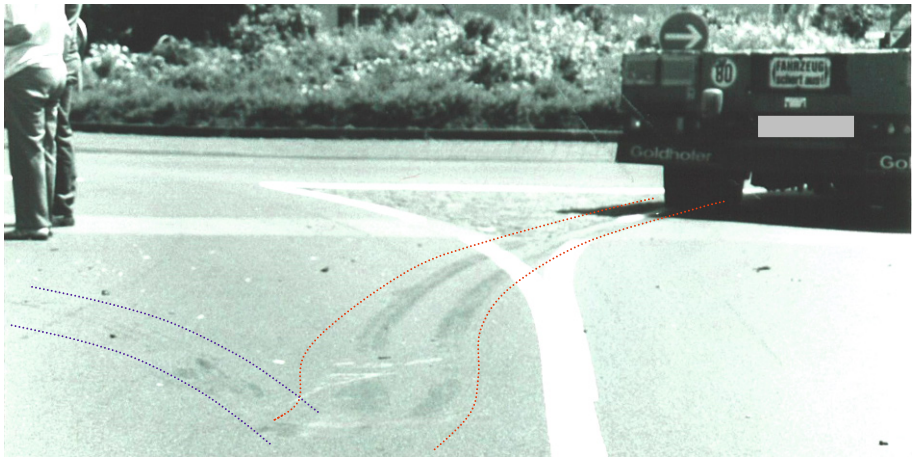


Bild B7-38 Von der Polizei gesicherte Spuren. Genaue Lage des Kollisionsortes am Anfang der Reifenspuren



Bild B7-39 Schäden und Endstellung vom Mercedes

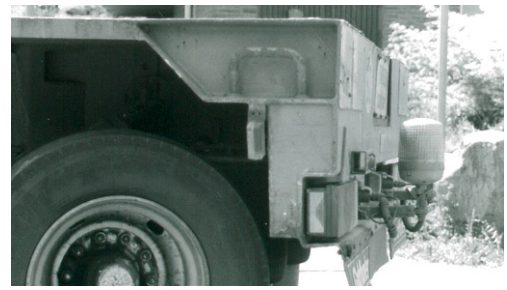


Bild B7-40 Beschädigung der Radaufhängung am Sattelanhänger hinten links

3.1 Merkmale am Sattelzug

Hier von Bedeutung ist das Ausschermaß des Sattelanhängers. Dieses wird durch Fahrversuche ermittelt und hängt davon ab, auf welche Länge der Sattelanhänger ausgezogen ist. Nach den Ermittlungen der Polizei war die Länge des Sattelzugs am Unfalltag 20,6 m. Damit ist nach Angaben des Herstellers des Sattelanhängers das Ausschermaß 0,93 m bei 14 m Radius.

Werte bei der Kreisfahrt
bei Fz. Breite 2,55 m
(G)

Länge	m	19,60	19,60	20,10	20,60	21,10
Außenradius	m	12,50	12,50	14,00	14,00	14,00
Kreisfahrt	Grad	360	120	120	120	120
Ringflächenbreite	m	techn.	6,50	6,30	6,50	6,70
Ausschermaß	m	nicht	1,00	0,90	0,93	0,95
Stützweite Ladung	m	mögl.	-	-	-	-
Nachlenkung (ja/nein)		< - - - - - nein - - - - - >				

Länge	m	21,60	22,10	22,60	23,30
Außenradius	m	14,00	14,00	14,00	14,00
Kreisfahrt	Grad	120	120	120	120
Ringflächenbreite	m	7,10	7,30	7,50	7,80
Ausschermaß	m	1,00	1,05	1,10	1,20
Stützweite Ladung	m	-	-	-	-
Nachlenkung (ja/nein)		< - - - - nein - - - - >			

Bild B7-41 Auszug aus einem Technischen Gutachten des TÜV über den Sattelauflieger

Das Ausschermaß ist so zu verstehen, dass der Auflieger bei der Einfahrt in eine Kurve um eben dieses Maß über die Tangente an den Kreis hinausläuft. Das kann man an der Reifenspur des Aufliegers ganz gut sehen, die sich nach der Kollision auf der Fahrbahn abgezeichnet hatte. Dort wo der rote Pfeil hinweist, war in etwa die Kollisionsstelle (**Bild B7-42**).

Die Spurzeichnung vom linken Rad der letzten Achse kommt daher, dass dieses Rad durch den Anstoß ausgestellt worden ist, möglicherweise wurde die Lenkstange für dieses Rad verbogen. Fotos von den Beschädigungen der Radaufhängung und Radlenkung waren nicht vorhanden.



Bild B7-42 Foto von der Unfallstelle



Bild B7-43 Hinterachsen des Sattelanhängers

Die Sattelzugmaschine hatte 4 Achsen, wovon 2 gelenkt waren. Aus den Lichtbildern der Polizei sieht man, dass die 1. und die 3. Achse des Sattelanhängers angehoben waren. Das wird zur Verringerung des Reifenverschleißes bei leerem Fahrzeug gemacht.

Am Fahrerhaus und am Heck des Sattelzugs waren Rundumleuchten montiert, die im Allgemeinen sehr auffällig sind. Die Rundumleuchten werden meistens mit dem Standlicht oder dem Abblendlicht zusammen geschaltet, damit nicht vergessen werden kann, diese Leuchten einzuschalten.



Bild B7-44 Rundumleuchte

Inwieweit die Rundumleuchte auf dem Fahrerhaus der Zugmaschine für die Pkw-Fahrerin Bedeutung gehabt hatte und ob sie daraus Schlüsse auf das Fahrverhalten des Sattelzugs ziehen konnte oder musste, entzieht sich der Bewertung durch einen technischen Sachverständigen. Nachdem die Pkw-Fahrerin in den Kreisel eingefahren war, konnte sie keine der Leuchten sehen. Zum einen war der Hügel in der Mitte des Kreisels im Weg, zum anderen war die Sattelzugmaschine bei der Ausfahrt aus dem Kreisel schon nicht mehr im Sichtbereich der Pkw-Fahrerin. Die am Heck des Sattelanhängers angebrachte Rundumleuchte war für die Pkw-Fahrerin ebenfalls nicht zu sehen.

3.2 Sichtverhältnisse für den Fahrer des Sattelzugs

Bei der 4-achsigen Zugmaschine kann davon ausgegangen werden, dass sich die Augpunkthöhe des Fahrers bei 2,4 bis 2,5 m befindet.

Bei einer Ortsbesichtigung konnte mittels einer Leiter aus entsprechender Augpunkthöhe festgestellt werden, dass der Fahrer der Zugmaschine Pkws, die sich hinter dem Hügel in der Mitte des Kreisels befanden, nicht sehen konnte. Der Bewuchs auf dem Hügel war zur Zeit des Unfalls dichter als bei der Besichtigung.

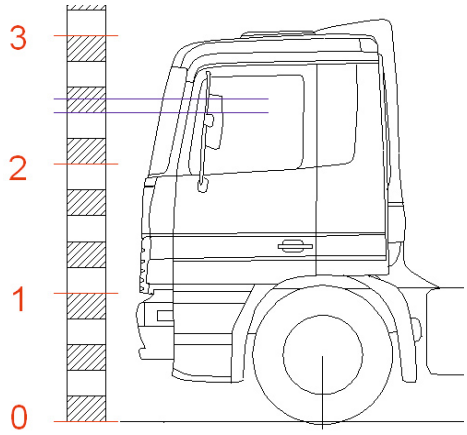


Bild B7-45 Augpunkthöhe des Fahrers

Nachdem die Sattelzugmaschine in den Kreisel eingefahren war, hat sich die Sicht für den Fahrer verschlechtert, weil die Fahrbahn vor dem Kreisel und auch im Kreisel abfällt und der Fahrer der Sattelzugmaschine dichter an den Hügel herankommt.







Bilder B7-46a bis c Sicht des Fahrers der Sattelzugmaschine bei Einfahrt in den Kreisel

4 Unfallrekonstruktion

Im Folgenden wird eine Näherungsberechnung mit einer manuellen Ergänzung unter Berücksichtigung der technischen Unterlagen verwendet. Über die Knickwinkellenkung in PC-Crash ist auch eine dynamische Simulation des Fahrvorgangs dieses Gespannes möglich, im vorliegenden Fall wurde diese Simulation jedoch wegen des höheren Aufwandes nicht durchgeführt.

Der Fahrer des Sattelzugs wird sich linksorientiert dem Kreisel genähert haben, denn es wird für ihn nicht zu erwarten gewesen sein, dass er völlig problemlos durch den Kreisel kommen würde. Die Lenkung des Sattelanhängers wird über den Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Sattelanhänger gesteuert. Wenn das Lenkrad an der Zugmaschine während der Fahrt z. B. nach rechts eingeschlagen wird, dann entsteht ein Winkel zwischen den Längsachsen beider Fahrzeuge, woraufhin die Räder am Anhänger nach links eingeschlagen werden. Dadurch fährt das Heck des Anhängers nach links in Richtung Gegenfahrbahn. Dieses Fahrverhalten ist notwendig, weil sonst ein solch langes Fahrzeug nicht um enge innerstädtische Kurven kommen würde. Nach § 70 StVZO (Gesetzgebung Deutschland) ist das auch zulässig.

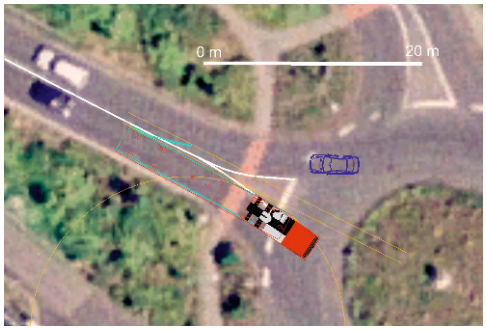


Bild B7-47 Beginn der Einfahrt in den Kreisel

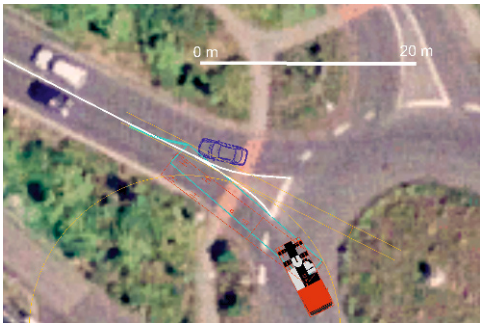


Bild B7-48 Vergleich der Anhängerbewegung gelenkt und nicht gelenkt

Während ein normaler Sattelanhänger zur Kurveninnenseite hin fahren würde, verhält sich ein Fahrzeug wie das in diesem Fall beteiligte gerade anders. Nachdem die Sattelzugmaschine im Kreisel war und der Fahrer sein Lenkrad wieder nach links drehen konnte, hatte der Anhänger die größte Ausschwenkung des Hecks erreicht. Bei dem im **Bild B7-48** rot gezeichneten Anhänger handelt es sich um einen Sattelanhänger ohne gelenkte Hinterachsen, der deshalb in die Kurve einläuft. Die schon angesprochene manuelle Korrektur wird mit dem blau gezeichneten Anhänger dargestellt. Die blaue Kurve stellt die Bewegungsbahn des linken hinteren Ecks des Sattelanhängers dar.

Etwa hier hat sich die Kollision mit dem Pkw ereignet. Diese Kollisionssituation ist im **Bild B7-48** ebenfalls eingetragen. Nach der Kollision hat der hinterste linke Reifen eine Spur auf der Fahrbahn hinterlassen Der Pkw wurde nach hinten und nach rechts weggeschleudert.

5 Unfallvermeidung

Aus dem **Bild B7-48** kann auch beurteilt werden, wer den Unfall gegebenenfalls wie hätte vermeiden können. Für die Fahrerin des Pkw dürfte das Ausscheren des Sattelanhängers eher unerwartet eingetreten sein. Die Zeitspanne vom Beginn des Ausscherens bis zur Kollision kann mit 1,2 bis 1,5 s berechnet werden. Dabei ist davon ausgegangen worden, dass der Sattelzug vor dem Kreisel angehalten hatte.

Bei der von dem Pkw gewählten Fahrlinie hätte keine Möglichkeit zur Unfallvermeidung bestanden. Aus den **Bildern B7-47** und **B7-48** ist ersichtlich, dass sich der Unfall nicht ereignet hätte, wenn die Fahrerin des Pkw äußerst rechts gefahren wäre.

Der Fahrer des Sattelzugs konnte mit seinem Fahrzeug nicht anders fahren als er gefahren ist. Sein Anhänger geriet technisch bedingt nach links auf die Gegenfahrbahn. Wenn man das **Bild B7-47** betrachtet, dann hätte der Fahrer des Sattelzugs den Unfall vermeiden können, wenn er nach Erscheinen des Pkw, den er im linken Seitenfenster hätte sehen können, sofort angehalten hätte, d. h. noch bevor der Anhänger ausschwenkte. Ob das so hätte geschehen können, ist fraglich, denn der Fahrer des Sattelzugs musste sich – einmal in den Kreisel eingefahren – primär nach vorne konzentrieren, um in der richtigen Weise am Lenkrad zu drehen.

Der Fahrer des Sattelzuges hätte in der Situation wie im **Bild B7-47** gezeigt, oder auch noch eine kurze Zeitspanne vorher, nicht beurteilen können, wie die Fahrerin des Pkw den Kreisel verlassen würde, d. h., ob sie links oder rechts orientiert aus dem Kreisel fahren würde. Ein eventuelles Anhalten hätte sich auf den Verdacht gegründet, dass die Fahrerin des Pkw links orientiert aus dem Kreisel fahren und deshalb gegen den ausschwenkenden Anhänger stoßen könnte.

Danksagung

Der Autor dankt Herrn Steve Frankenstein, derzeit Student an der HTW Dresden, für seine Mithilfe bei der Aufbereitung des Falles.

Unfall Bus/Radfahrer

Dirk Christiaens

Ein 13 Jahre alter Radfahrer fuhr auf der linken Fahrradspur und schaute nach hinten, um eine geeignete Verkehrslücke zu finden. Er versuchte schließlich die Fahrbahn von links nach rechts zu überqueren und wurde von einem entgegenkommenden Bus getroffen. Der Radfahrer wurde dabei tödlich verletzt.

Der Bus-Fahrer ist in einer Abwehrreaktion bis auf die linke Fahrspur ausgewichen, wo ein entgegenkommender Pkw-Fahrer eine Kollision mit dem Bus durch einen Ausweichvorgang zur Mitte der Fahrbahn gerade noch vermeiden konnte.

Unfallzeit war der Juli 2005, es war sonnig und trocken, die Fahrbahn hatte eine Asphaltdecke.

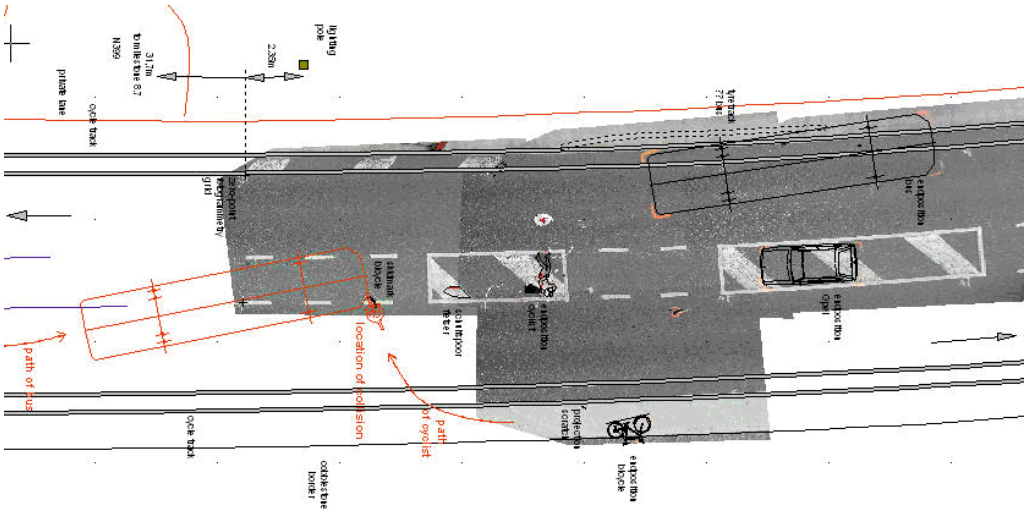


Bild B7-49 Unfallskizze

Tabelle B7.6 Fahrzeugdaten

Fahrzeug	Evobus Mercedes Connecto c
Rahmennummer	NMB671
Erstzulassung	01.2003
Motor	Diesel, 11.960 cm³, 184 kW
Leergewicht	11.350 kg (3.290/8.060 kg)
Sitzplätze	90 + 1
Abmessungen	LBH: 11.915 · 2.500 · 3.050 mm
Radstand	5.875 mm
Überhang vorne	1.583 mm



Bild B7-50 Übersichtsaufnahme

6 Bremsversuch auf dem Bus mit PocketDAQ



Bild B7-51 Bremsversuch mit PocketDAQ – mittlere Verzögerung 5,5 m/s²

7 Spuren an den Fahrzeugen

- Frontscheibe vom Bus an der rechten Seite durch Kopfanprall des Radfahrers zersplittert.
- Einprägung der Vorderachse des Fahrrads in der Stoßstange des Busses. Dadurch wurde die relative Kollisionsposition dokumentiert. Aus dem Höhenvergleich geht hervor, dass der Bus bei der Kollision infolge Bremsung eingetaucht war.
- Die rechte Vordertür des Busses war durch Kontakt mit Fahrrad und Fahrradfahrer beschädigt.
- Das linke Standrohr der Vordergabel des Fahrrads war abgebrochen.



Bild B7-52 Schaden am Bus

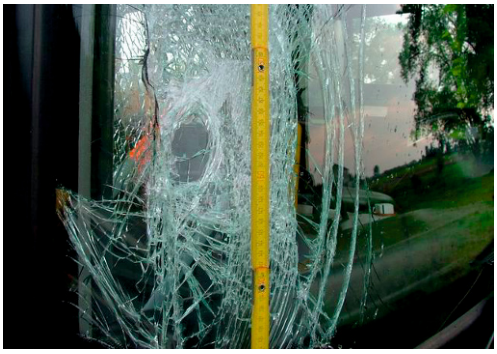


Bild B7-53 Schaden an der Frontscheibe



Bild B7-54 Kontaktstelle Fahrrad/Bus

8 Spuren auf der Fahrbahn

An der Kollisionsstelle zeichnete der Reifen des Vorderrads vom Fahrrad, das seitlich getroffen wurde, eine Schiebespur.

Ein Kratzer des weggestoßenen Fahrrads ließ sich von der Endlage des Fahrrads in Richtung der Kollisionsstelle verfolgen.

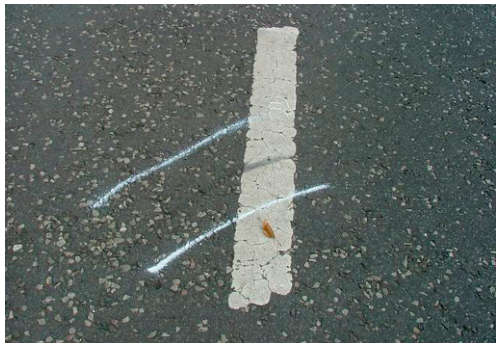


Bild B7-55 Wischspur vom Fahrrad = fahrbahnbezogene Kollisionsstelle

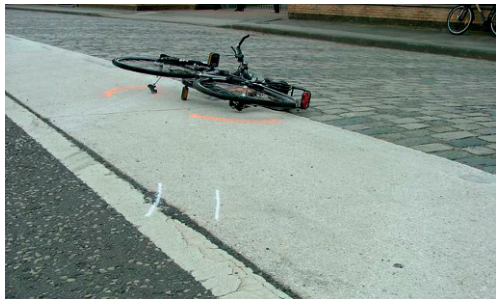


Bild B7-57 Endlage vom Fahrrad und Rutschspur



Bild B7-56 Wischspur am Fahrradreifen

9 Geschwindigkeit des Busses

Der Bus kam etwa 23,75 m hinter der Kollisionsstelle zum Stillstand. Mit der gemessenen mittleren Bremsverzögerung von 5,5 m/s² konnte die Kollisionsgeschwindigkeit mit

$$\sqrt{2 \cdot 5{,}5\ \text{m/s}^2 \cdot 23{,}75\ \text{m}} = 16{,}16\ \text{m/s} = 58{,}2\ \text{km/h}\ (+/-5\ \text{km/h})$$

berechnet werden. Dieser Wert passt plausibel zu dem Schadenbild. Der Bus hatte ABS-Bremsen und zeichnete keine Bremsspuren, sodass durch Reifenspuren nicht nachgewiesen werden konnte, über welche Distanz der Bus vor der Kollision abgebremst wurde. Mit einem Simulationsprogramm konnte aber berechnet werden, dass der Bus-Fahrer etwa 0,9 s vor der Kollision mit dem Ausweichvorgang begonnen haben dürfte, was mit dem Bremsvorgang zusammenpasste. Somit kann sein Reaktionspunkt mit 1,5 bis 2 s vor Kollision bestimmt werden.

Die Geschwindigkeit des Radfahrers war zwar nicht genau zu bestimmen, der Bus-Fahrer kann aber nicht reagiert haben, bevor der Radfahrer die Fahrradspur verlassen hatte, sodass insofern doch eine Beurteilungsmöglichkeit bestand. Der Radfahrer hatte eine Strecke von ca. 6 m auf der Fahrbahn durchfahren, bevor er von dem Bus erfasst worden war. Der Radfahrer kann also wegen der Zeitspanne vom Reaktionspunkt bis zur Kollision nicht schneller als ca. 12,5 km/h gefahren sein. Eine verspätete Reaktion des Busfahrers konnte somit nicht nachgewiesen werden.

Auffahrkollision von Nutzfahrzeugen

Dirk Christiaens

Serienkollision mit drei Lkw und einem Pkw auf der Autobahn. Die Autobahn war wegen Instandhaltungsmaßnahmen teilweise gesperrt.

Der Fahrer der Mercedes-Sattelzugmaschine mit Sattelanhänger ist offensichtlich unaufmerksam in einen Stau hinein gefahren. Am Ende dieses Staus stand eine DAF-Sattelzugmaschine mit Kühlauflieger. Vor dem DAF stand ein Pkw Ford Fiesta. Vor dem Fiesta stand eine Sattelzugmaschine mit Containerauflieger. Der Fahrer der Mercedes-Sattelzugmaschine wurde tödlich verletzt. Die DAF-Sattelzugmaschine mit Kühlauflieger wurde durch das Auffahren der Mercedes-Sattelzugmaschine beschleunigt. Dadurch wurde der Pkw Ford Fiesta zwischen DAF und Containerauflieger eingeklemmt. Der Fahrer des Pkw Ford Fiesta wurde schwer verletzt.

Die Unfallzeit war der 20.09.2001 gegen 10:15 Uhr. Es regnete leicht und die Asphaltfahrbahn war nass.



Bild B7-58 Unfallszene

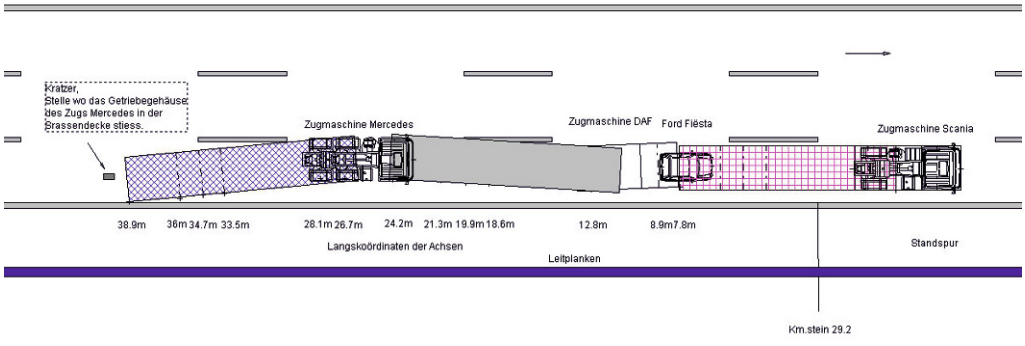


Bild B7-59 Unfallskizze



Bild B7-60 Mercedes-Sattelzug



Bild B7-61 Sattelzugmaschine am Heck des Kühlaufliegers

Das Fahrgestell der auffahrenden Mercedes-Zugmaschine ist unter den Laderaumboden des Sattelanhängers gerutscht, während sich die Kabine am Laderaum des Aufbaus abgestützt hat und dadurch zusammengedrückt wurde.



Bild B7-62 Sattelzugmaschine am Heck des Kühlaufliegers



Bild B7-63 DAF-Sattelzugmaschine auf dem Pkw Ford Fiesta

Fahrzeugdaten:

- Mercedes Actros 2540 (3 Achsen)/Auflieger mit ca. 1 t Ladung
- DAF ATI 95-400 (7.650 kg)/Kühlauflieger CHEREAU, leer
- Ford Fiesta, Motor 44 KW, 1.300 cm^3 Benzinmotor, Erstzulassung 06.1997
- Scania R113 HA4X2A/Containerauflieger Renders (5.640 kg + 3.780 kg + ca. 9.000 kg Beladung)

Die Kollisionsstelle wurde durch Kratzspuren vom Getriebegehäuse des auffahrenden Mercedes-Sattelzugs markiert. Das Getriebegehäuse wurde bei der Kollision vom Motorgehäuse abgebrochen und ist in der Straßendecke eingeschlagen. Der Motorblock kippte nach hinten als sich das Fahrgestell mit dem Motor unter den Kühlauflieger schob. Die Hinterwand des Kühlaufliegers wurde relativ wenig eingedrückt im Vergleich zur Kabine der auffahrenden Mercedes-Zugmaschine.

Der Sattelzug mit Kühlauflieger wurde etwa 15 m nach vorne gestoßen und schob den Pkw Ford Fiesta unter den Containerauflieger mit Scania-Zugmaschine. Am Containerauflieger wurde der hintere Unterfahrschutz leicht beschädigt.



Bild B7-64 Kratzspuren vom Getriebegehäuse



Bild B7-65 Blick auf das abgebrochene Getriebegehäuse



Bild B7-66 Beschädigte Hinterwand des Kühlaufliegers



Bild B7-67 Beschädigter Unterfahrschutz am Containerauflieger

Die Tachoscheibe des auffahrenden Mercedes-Sattelzugs zeigte, dass der Fahrer aus etwa 88 km/h abbremste und die Tachoregistrierung mit der Kollision bei etwa 75 km/h aufhörte. Die Kollisionsgeschwindigkeit der Mercedes-Zugmaschine betrug also etwa 75 km/h.

Die Tachoscheibe des Sattelzugs mit Kühlauflieger zeigte an, dass dieses Fahrzeug infolge der Kollision bis auf etwa 35 km/h beschleunigt wurde.

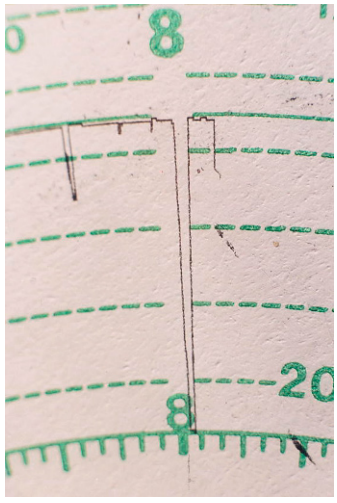


Bild B7-68 Tachoscheibe des Mercedes-Sattelzugs

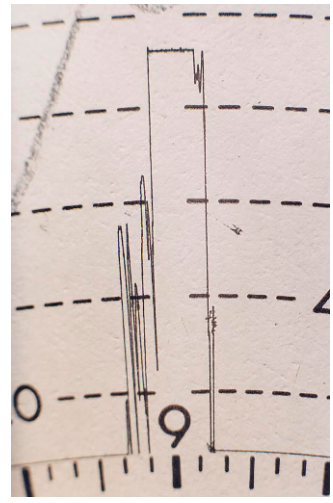


Bild B7-69 Tachoscheibe des DAF-Sattelzugs

B8 Unfälle mit land- oder forstwirtschaftlichen Fahrzeugen

Dr. Heinz Burg

Überholender Pkw kollidiert mit nach links abbiegendem Traktor

1 Sachverhalt

Der Unfall ereignete sich außerorts auf einer Landesstraße. Es galt dort die allgemeine Geschwindigkeitsbegrenzung. Zur Unfallzeit war es hell und trocken. Die Fahrbahn hatte eine Schwarzdecke.

Die Fahrerin eines Pkw VW Golf wollte einen Traktor überholen, dessen Fahrer nach links in einen Feldweg abbiegen wollte. Es kam zur Kollision der Fahrzeuge.

2 Auftrag

Es war der Hergang des Verkehrsunfalls ganz allgemein zu untersuchen. Zudem sollte untersucht werden, ob die Fahrerin des Pkw gefahrlos überholen hätte können und ob ein gefahrloses Abbiegen des Traktors möglich war. Außerdem sollte untersucht werden, ob die Rückleuchten des Traktors beim Abbiegen zu erkennen waren.

3 Objektive Merkmale

Tabelle B8.1 Allgemeine Fahrzeugdaten

	Pkw	Traktor
Fahrer/in	Heike B.	Richard L.
Bei-/Mitfahrer	Elmar B.	Keine
Fahrzeugart	Pkw Limousine	Traktor mit Düngerstreuer (650 kg)
Fabrikat/Typ	VW Golf 1,6 55 kW	Massey Ferguson
Leergewicht	1.030 kg	3.000 kg + 650 kg = 3.650 kg
Gewicht beim Unfall	1.170 kg	3.740 kg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_28



Bild B8-1 Übersichtaufnahme zur Einmündung des Feldwegs

Es wurden mehrere Fotos angefertigt (**Bild B8-2** bis **Bild B8-7**) zuerst vor der Kuppe, danach hinter der Kuppe. 65 bis 70 m vor dem nach links abzweigenden Feldweg wird dieser erkennbar. Ab 130 bis 140 m vor dem Feldweg konnten sich die Unfallbeteiligten gegenseitig sehen. Das Gefälle im Bereich der Bremsspuren vom Pkw wurde mit 8,5 bis 9 % gemessen.



Bild B8-2 Vor der Kuppe. Blick in Fahrtrichtung der Pkw Fahrerin



Bild B8-3 Kurz vor der Kuppe. 184 m vor der Mitte des nach links abzweigenden Feldwegs



Bild B8-4 Hinter der Kuppe, Blick in Fahrtrichtung der Unfallbeteiligten. 159 m vor der Mitte des nach links abzweigenden Feldwegs



Bild B8-5 Hinter der Kuppe, Blick in Fahrtrichtung der Unfallbeteiligten. 135 m vor der Mitte des nach links abzweigenden Feldwegs. Beide Fahrer können sich jetzt erkennen.



Bild B8-6 Hinter der Kuppe, Blick in Fahrtrichtung der Unfallbeteiligten. 109 m vor der Mitte des nach links abzweigenden Feldwegs. Feldweg noch nicht eindeutig erkennbar



Bild B8-7 67 m vor der Mitte des nach links abzweigenden Feldwegs. Feldweg eindeutig erkennbar

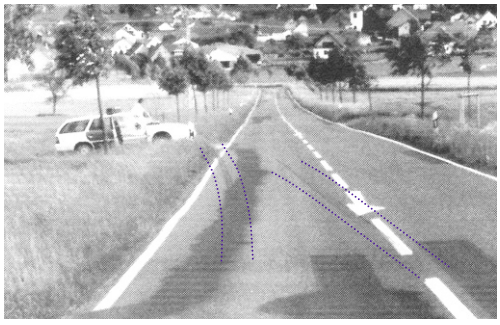


Bild B8-8 Bremsspuren des Pkw. Blick in Fahrtrichtung

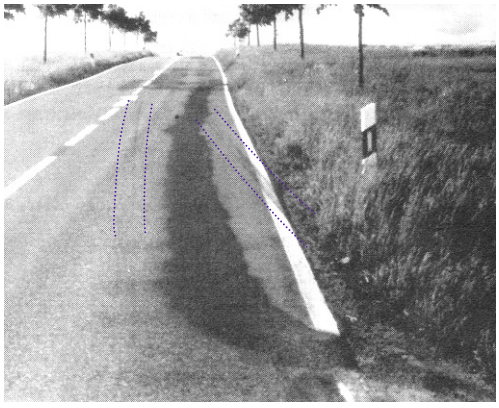


Bild B8-9 Bremsspuren des Pkw. Blick entgegen der Fahrtrichtung

Das Gras auf den Banketten wächst im Frühling und wird meist im Juni geschnitten. Danach wächst es wieder. Zum Zeitpunkt der Besichtigung der Unfallstelle war der zweite Wuchs in etwa vergleichbar mit dem Zustand beim Unfall (siehe **Bild B8-8** und **Bild B8-9**).



Bild B8-10 Verbogene Achse am Traktor



Bild B8-11 Verbogene Achse am Traktor



Bild B8-12 Beschädigungen am VW



Bild B8-13 Beschädigungen am VW



Bild B8-14 Beschädigungen am VW



Bild B8-15 Beschädigungen am VW

3.1 Besichtigung des Traktors

Hierbei ging es im Wesentlichen um den Düngerstreuer und die mögliche Verdeckung der Rückleuchten durch denselben. Wenn der Düngerstreuer etwa waagrecht steht, dann ist die Unterkante rund 20 cm über dem Boden. Die Rückleuchten des Traktors sind dann gut zu sehen. Wenn der Düngerstreuer beim Unfall voll war, dann wird der Düngerstreuer wahrscheinlich waagrecht oder noch tiefer eingestellt gewesen sein, weil der Fahrer ein Gefälle befuhr. Es kann aber auch sein, dass die Rückleuchten verdeckt waren, wenn der Streuer mehr nach oben gehoben war.

Am Traktor links war ein großer Rückspiegel montiert, der bei richtiger Einstellung gute Sicht nach hinten ermöglichte. Einzelheiten zum Traktor mit Düngerstreuer sind den **Bildern B8-16** bis **B8-21** zu entnehmen.



Bild B8-16 Ansicht Traktor von rechts vorne



Bild B8-17 Ansicht Traktor von links vorne



Bild B8-18 Seitenansicht, Düngerstreuer abgelassen



Bild B8-19 Ansicht von hinten, Streuer waagrecht, Rückleuchten oberhalb des Düngerbehälters sichtbar



Bild B8-20 Ansicht von hinten, Streuer in mittlere Position, Rückleuchten verdeckt



Bild B8-21 Ansicht von hinten, Streuer ganz oben, Rückleuchten unterhalb des Düngerbehälters sichtbar

4 Unfallrekonstruktion

Über die beschädigten Fahrzeuge wurden Fotos zur Verfügung gestellt (**Bild B8-10** bis **Bild B8-15**). Diese erlauben eine Einstufung der Kollisionsgeschwindigkeit des Pkw und eine Rekonstruktion des Kollisionswinkels.

Der Kollisionswinkel ist der Zeichnung im **Bild B8-22** zu entnehmen. Die Kollisionsgeschwindigkeit kann nur anhand von Versuchen eingestuft werden. Dazu wurden die Versuche der AREC 2003 verwendet. Einige Fotos davon sind nachstehend gezeigt.

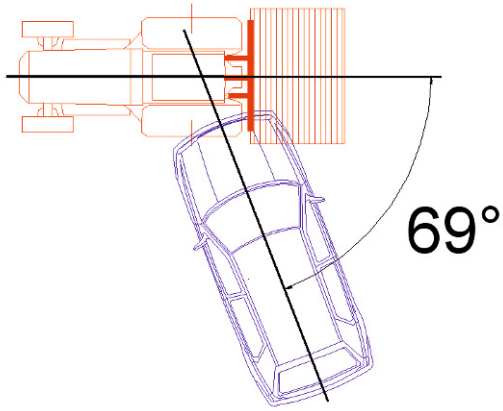


Bild B8-22 Kollisionswinkel

Bei den AREC-Versuchen wurde ein ähnlicher Traktor verwendet, gegen dessen Hinterrad zwei Pkw Opel Astra gefahren wurden; einmal mit etwa 35 km/h und einmal mit etwa 45 km/h (**Bilder B8-23** und **B8-24**). Bei dem Versuch mit 45 km/h war die Achswelle des Hinterrads am Traktor (**Bild B8-25**) vollständig abgebrochen, der Schaden am Pkw Opel war etwas geringer als am VW. Danach ist anzunehmen, dass die Kollisionsgeschwindigkeit des Pkw VW im Bereich von 45 km/h war.



Bild B8-23 Geschwindigkeit etwa 35 km/h



Bild B8-24 Geschwindigkeit etwa 45 km/h



Bild B8-25 Bei den Versuchen verwendeter Traktor

Für den Traktor wurde angenommen, dass er bei Kollision eine Geschwindigkeit von etwa 9 km/h hatte und davor über rund 15 m aus 17 km/h verzögerte. Davor wurde eine konstante Geschwindigkeit von 17 km/h angenommen, was in Anbetracht der Höchstgeschwindigkeit des Traktors von 22 km/h realistisch erscheint.

Für den Pkw wurde als Kollisionsgeschwindigkeit 45 km/h angenommen. Davor wurde entsprechend der von der Polizei ermittelten Bremsspurlängen abgebremst.

Tabelle B8.2 Berechnungsdaten für die Pre-Crash-Phase vom Pkw

	Konstante Beschleunigung	Lineare Beschleunigung	Lineare Beschleunigung	Konstante Geschwindigkeit
Zeit (*s*)	–1,40	–0,37	–0,20	–0,80
Weg (*m*)	–24,36	–8,83	–4,97	–20,04
Anfangsgeschwindigkeit km/h)	45,00	80,28	88,40	90,20
Endgeschwindigkeit (km/h)	80,28	88,40	90,20	
Anfangsbeschleunigung (m/s^2)	–7,00	–7,00	–5,00	
Endbeschleunigung (m/s^2)		–5,00		

Die Berechnungsdaten sind der nebenstehenden Tabelle zu entnehmen. Ergebnis ist eine Geschwindigkeit des Pkw von etwa 90 km/h, unter Berücksichtigung der Toleranzen bei den Eingabedaten kann von 85 bis 95 km/h ausgegangen werden.

Mit diesen Daten können die Positionen der Fahrzeuge bei Reaktion der Pkw-Fahrerin (Klägerin) wie folgt berechnet werden (**Bild B8-26**).

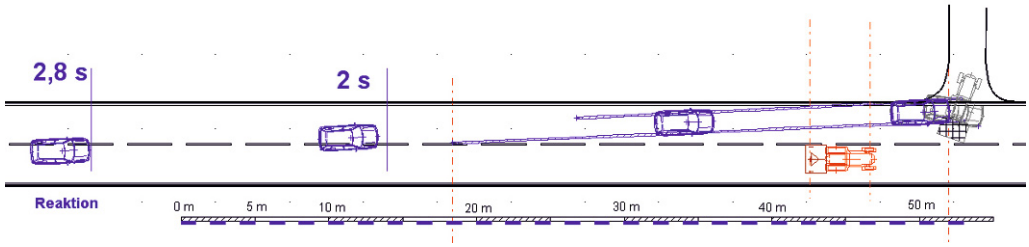


Bild B8-26 Unfallablauf

Die Fahrerin des Pkw war somit bei Reaktion gerade am Überholbeginn bzw. schon leicht nach links ausgeschert. Der Fahrer des Traktors war am Abbiegebeginn und hatte möglicherweise das Lenkrad schon leicht eingeschlagen. Er musste in dieser Situation bereits nach vorne in Richtung Feldweg blicken, um in diesen richtig einfahren zu können. Wenn er 1 bis 2 s vor dem Beginn des Lenkradeinschlags nach hinten geschaut hätte, dann wäre es ihm möglich gewesen, den herannahenden Pkw zu erkennen, der allerdings zu dieser Zeit noch auf der rechten Fahrbahnhälfte war. Die erste Möglichkeit des Sichtkontakts war 5,8 s vor der Kollision; diese Situation ist im **Bild B8-27** gezeigt.

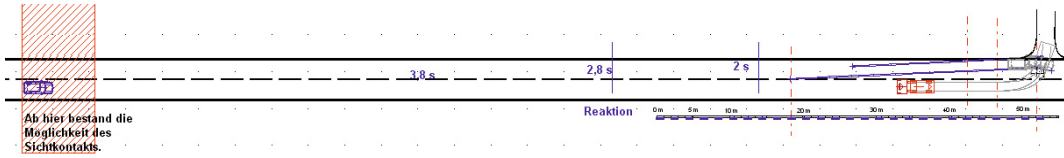


Bild B8-27 Positionen der Fahrzeuge beim ersten möglichen Sichtkontakt 5,8 s vor der Kollision

Die Fahrerin des Pkw konnte etwa 70 m vor der Kollisionsstelle den nach links abzweigenden Feldweg erkennen und hat bei etwa 60 m vor der Kollisionsstelle reagiert. Was letztlich die Reaktion ausgelöst hat, kann nicht sicher gesagt werden, es können das der Feldweg, der linke Blinker am Traktor oder der beginnende Abbiegevorgang des Traktors gewesen sein.

5 Unfallvermeidung

Die Fahrerin des Pkw hätte den Traktor mit geringerer Geschwindigkeit überholen können, um bei einem unvorhersehbaren Fahrmanöver des Traktors noch rechtzeitig anhalten zu können. Um den Unfall bei Reaktion am oben berechneten Punkt, etwa 60 m vor der Kollisionsstelle, durch rechtzeitiges Anhalten noch vermeiden zu können, hätte die Fahrerin nicht schneller als 75 km/h fahren dürfen.

Der Fahrer des Traktors hätte im Bereich 1 bis 2 s vor Beginn der Lenkraddrehung (3,8 bis 4,8 s vor Kollision) nach hinten schauen können (siehe **Bild B8-28**). Er hätte dann den Pkw etwa 75 bis 100 m hinter sich erkennen und an der Mittellinie anhalten können.

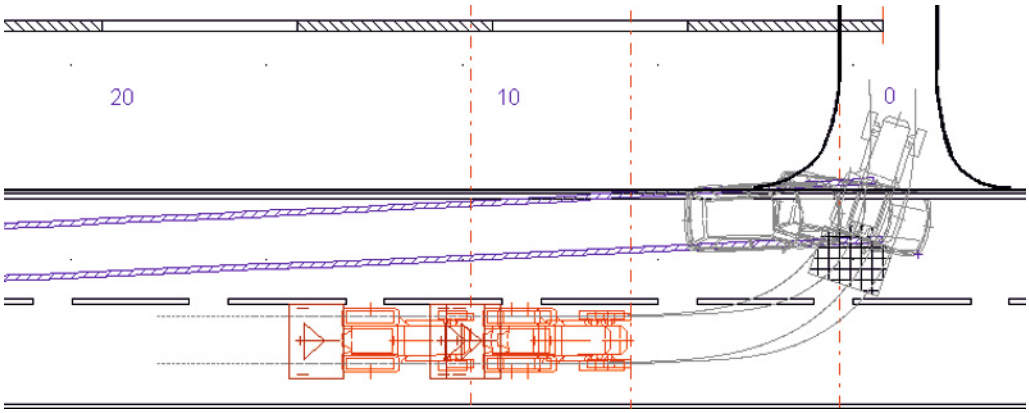


Bild B8-28 Position des Traktors 3,8 bis 4,8 s vor Kollision

6 Zusammenfassung

Die Fahrerin des Pkw war gerade am Überholbeginn und fuhr mit etwa 90 km/h als sie eine von dem vorausfahrenden Traktor ausgehende Gefahr bemerkte. Sie reagierte etwa 2,8 s vor der Kollision, bremste und kollidierte mit etwa 45 km/h mit dem Traktor, der bereits weitgehend in den Feldweg eingebogen war.

Die Fahrerin hätte den Unfall vermeiden können, wenn sie am Reaktionspunkt mit 75 anstatt mit 90 km/h gefahren wäre. Der Fahrer des Traktors hätte den Pkw bei Rückschau 1 bis 2 s vor Beginn der Lenkraddrehung bereits sehen und von dem Abbiegen Abstand nehmen können.

Danksagung

Der Autor dankt Herrn Steve Frankenstein, derzeit Student an der HTW Dresden, für seine Mithilfe bei der Aufbereitung des Falles.

B9 Unfälle mit Schienenfahrzeugen

Dr. Heinz Burg

1 Sachverhalt

Auf einer viel befahrenen Kreuzung ereignete sich in der Winterzeit und gegen Mitternacht eine Kollision zwischen einer Straßenbahn (roter Pfeil) und einem Polizeifahrzeug (blauer Pfeil). Die Straßenbahn hat als schienengebundenes Fahrzeug gegenüber dem sonstigen Verkehr ein Vorrecht. Das Polizeifahrzeug war auf einer Einsatzfahrt zu einem Wohnungsbrand und hatte insoweit auch ein Vorrecht, da unstreitig Blaulicht und Signalhorn eingeschaltet waren. Das Gutachten war in einem Zivilprozess zu erstatten. Nach dem Gerichtsauftrag sollte zu folgenden Parteibehauptungen Stellung genommen werden:

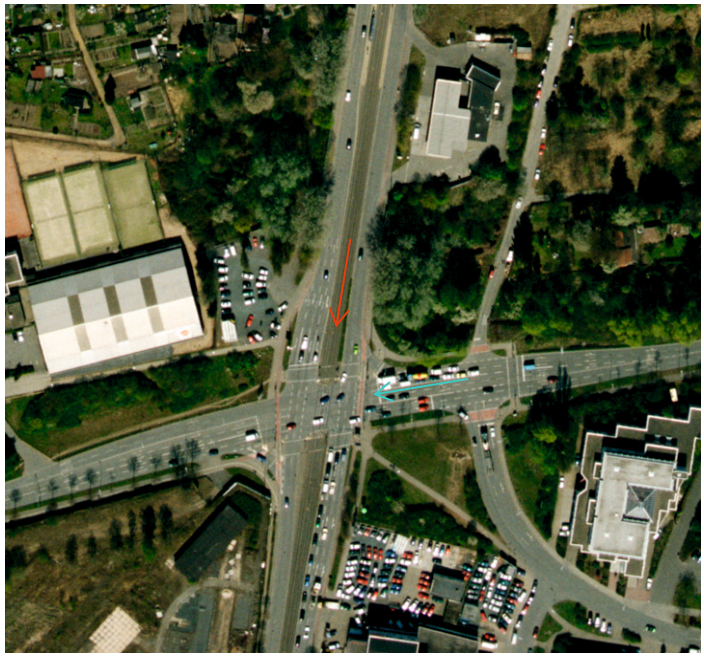


Bild B9-1 Luftbild der Örtlichkeit

Zu den Behauptungen der Beklagten:

1. Der Straßenbahnfahrer habe angesichts des nahenden Polizeifahrzeuges unverzüglich eine Notbremsung eingeleitet, insoweit habe zu diesem Zeitpunkt die Entfernung zur Unfallstelle noch ca. 65 bis 70 m betragen.
2. Vor der Einleitung der Notbremsung sei das Einsatzfahrzeug nicht zu sehen und hören gewesen.
3. Das Einsatzfahrzeug sei mit zumindest 30 km/h in den Kreuzungsbereich eingefahren, habe jedenfalls diese Geschwindigkeit beim Auftreffen auf die Straßenbahn eingehalten.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_29

Sowie über die Behauptungen des klagenden Landes:

1. Das Einsatzfahrzeug habe den Kreuzungsbereich mit lediglich 10 bis 15 km/h befahren (soweit diese Feststellung im Rückschluss aus irgendwelchen anderen Daten möglich ist).
2. Die Straßenbahn habe erst unmittelbar vor dem eigentlichen Unfallgeschehen gebremst, bei dem Einfahren des Pkw in den Kreuzungsbereich habe sie eine geringe Geschwindigkeit eingehalten.
3. Das Polizeifahrzeug sei hinreichend früh optisch wie akustisch wahrnehmbar gewesen.

Der Unfall wurde von der Polizei aufgenommen, die eine Verkehrsunfallanzeige, Fotos, Vernehmungen und Vermerke fertigte.

Daten der Beteiligten und der Fahrzeuge

Über die unfallbeteiligten Personen und Fahrzeuge konnten die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Daten den Akten entnommen werden. Weitere Informationen wurden aus allgemein zugänglichen Datenblättern und Katalogen verwendet und werden als bekannt vorausgesetzt.

Tabelle B9.1 Fahrzeugdaten

	Fahrzeug 1 (Kl.)	Fahrzeug 2
Fahrer/in	Herr X	Herr A
Halter	Bundesland	Verkehrs GmbH
Bei-/Mitfahrer	Herr Y	mehrere Fahrgäste
Fahrzeugart	Pkw Limousine 4-türig	Straßenbahnzug
Fabrikat, Typ	Opel Vectra 2,2 DTI	Triebwagen ST13, Beiwagen SB9
Leergewicht in kg	1.530	ca. 56.000

2 Parteivorträge und sonstige Informationen

2.1 Klagevortrag

Die Polizeibeamten des klagenden Landes befanden sich mit dem Dienstfahrzeug auf einer Einsatzfahrt zu einem Wohnungsbrand. Der Zeuge X war Fahrer, der Zeuge Y war Beifahrer im Pkw des klagenden Landes. Sie fuhren unter Verwendung der Sondersignale Martinshorn und Blaulicht. Etwa 200 m vor der Kreuzung verlangsamte Herr X die Geschwindigkeit und fuhr an mehreren, an der Ampel haltenden Fahrzeugen links vorbei. Als er sodann in den Kreuzungsbereich einfuhr, hatte er die Geschwindigkeit auf 10 bis 15 km/h herabgesetzt. Von rechts näherte sich eine langsam fahrende Straßenbahn. Der Zeuge X fuhr weiter und war fast bis zum Gleiskörper gefahren, als er erkannte, dass der Fahrer der Straßenbahn ihn offenbar nicht wahrnahm und keine Reaktion zeigte. Er leitete sofort eine Vollbremsung ein und versuchte nach links auszuweichen, konnte jedoch einen Zusammenstoß mit der Straßenbahn nicht mehr verhindern. Erst jetzt bremste der Fahrer der Straßenbahn diese ab.

2.2 Beklagtenvortrag

Der Fahrer der Straßenbahn hatte bereits 65 bis 70 m vor der Kreuzung reagiert und eine automatisch ablaufende Vollbremsung eingeleitet. Alleine der Bremsvorgang dauerte 7 s. Die Polizeibeamten hätten wissen müssen, dass eine Straßenbahn nicht so schnell anzuhalten ist, zumal die Schienen durch Schneematsch glatt waren. Sie hätten deshalb nicht vor der Straßenbahn in die Kreuzung einfahren dürfen.

2.3 Beweisaufnahme

Herr K. (Polizeibeamter): Hat den Unfall aufgenommen und bestätigt auf einem ihm vorgelegten Foto die Endstellungen der Fahrzeuge nach dem Unfall.

Herr Y (Polizeibeamter), Beifahrer im Polizeifahrzeug: 70 km/h in Annäherung an die Kreuzung, abgebremst bis auf 20 km/h vor dem Einfahren in die Kreuzung, beschleunigt bis auf 40 km/h, abgebremst bis auf 30 km/h bei Kollision (frühere Aussage 15 bis 20 km/h bei Kollision). Heck der Straßenbahn hatte den Kreuzungsbereich in der Endstellung verlassen.

3 Sachverständige Feststellungen und Ausführungen

3.1 Fahrdatenerfassung der Straßenbahn

Zunächst wurde nach vorheriger Terminabsprache und Informationen der Parteivertreter der Aufschrieb der Fahrdatenerfassung bei der Verkehrs GmbH untersucht. Es wurde der Raum aufgesucht, in dem der Arbeitsplatz für die Auswertung der Fahrdaten eingerichtet ist (**Bild B9-2**). Zuständig ist Herr N. Der Datenchip war bereits dort. Es wurde geprüft, ob die Daten mit den aktenkundigen Daten übereinstimmen, was der Fall war. Nach Betrachtung der Fahrdaten, wurde der hier interessierende Bereich mit unterschiedlicher Auflösung ausgedruckt. Der Aufschrieb über den Notbremsvorgang ist dem **Bild B9-3** zu entnehmen.



Bild B9-2 Arbeitsplatz für die Fahrdatenauswertung



Bild B9-3 Abbremsung der Straßenbahn bis zum Stillstand

Der Aufschrieb vom Start an der letzten Haltestelle bis zum Stillstand nach dem Unfall zeigte, dass sich die Straßenbahn bis zur Reaktion des Fahrers in Beschleunigung befunden hatte. Bei einer Geschwindigkeit von 59 km/h wurde eine Bremsung eingeleitet. Nach einer Bremsstre-

cke von etwa 46 m kam die Straßenbahn zum Stillstand. Das entspricht einer mittleren Verzögerung von 2,9 m/s^2 und einer Bremsdauer von 5,6 s.

Nach der Untersuchung der Fahrdatenaufzeichnung wurde ein Straßenbahnzug besichtigt, der baugleich mit dem war, der an dem Unfall beteiligt war. Bei dieser Besichtigung wurden Erklärungen zur Bedienung der Straßenbahn und zum Ein- und Ausbau des Datenchips gegeben und nachgeprüft. Darüber wurde ein gesonderter Bericht angefertigt, der die Aspekte aus dem Kapitel A17 berücksichtigt.

3.2 Ortsbesichtigung und Erkennbarkeit des Blaulichts

Zu einer vergleichbaren Jahreszeit fand ab 23 Uhr eine Ortsbesichtigung statt. Dabei wurde untersucht, ab welcher Stelle der Fahrer der Straßenbahn das Blaulicht des Polizeifahrzeugs sehen und gegebenenfalls das Martinshorn hören konnte. Dazu wurde von der Beklagtenseite der am Unfall beteiligte Straßenbahnzug mitgebracht, von der Polizei wurde ein baugleiches Polizeifahrzeug Opel Vectra mitgebracht. Anwesend waren die beiden Parteivertreter und weitere Personen, der Unterzeichner und eine Hilfsperson. Später kamen noch weitere Polizeibeamte, die den Unfall aufgenommen hatten.

Nachdem aus der Auswertung des Fahrdatenaufschriebs bekannt war, dass der Bremsweg etwa 46 m betragen hatte und die Geschwindigkeit bei Bremsbeginn etwa 59 km/h, konnte auch auf den Anhalteweg (Reaktionspunkt bis Endstand) des Straßenbahnzuges mit mindestens 63 m geschlossen werden.

Deshalb wurde ein theoretischer Reaktionspunkt 63 m vor der Kreuzungsmitte markiert. Das ist ein Reaktionsort, der es dem Straßenbahnfahrer gerade noch ermöglicht hätte, rechtzeitig vor der Kollision anzuhalten. Dann wurde der Polizeibeamte gebeten, sich mit seinem Fahrzeug 70 m vor dem Haltebalken des Martin-Luther-King-Rings hinzustellen, dann in einer Entfernung von 60 m usw. Alle anderen Personen waren in der Straßenbahn, gemeinsam wurde festgestellt, wie die Erkennbarkeit des Blaulichts war:

Tabelle B9.2 Ergebnisse der Sichtbarkeitsuntersuchung

70 m vor der Haltelinie	schwach sichtbar (peripher)
60 m …	nicht sichtbar, weil gerade hinter einem dicken Baum
50 m …	sichtbar (peripher)
40 m …	nicht sichtbar
30 m …	nicht sichtbar
20 m …	nicht sichtbar
10 m vor der Haltelinie	schwach sichtbar
An der Haltelinie	deutlich sichtbar

Der überraschende Effekt, dass das Blaulicht im Bereich 40 bis 20 m vor der Haltelinie nicht zu sehen war, erklärte sich daraus, dass in Fahrtrichtung des Polizeifahrzeugs rechts große Werbetafeln angebracht waren, die zusammen mit teilweise immergrünen Pflanzen zu einer vollständigen Sichtverdeckung führten.

Des Weiteren war der tatsächliche Reaktionspunkt von Interesse. Dazu war die Endstellung der Straßenbahn bedeutsam. Diese Endstellung war die unmittelbar nach dem Unfall. Dies folgt aus dem Aufschrieb der Fahrdatenerfassung. Die Straßenbahn hatte sich nach der automatischen Vollbremsung bis zur Entnahme des Speicherchips nicht mehr nach vorne bewegt.

Über die anzunehmende Endstellung der Straßenbahn befindet sich ein Hinweis im Beweisbeschluss. Vor Ort wurden die verfügbaren Fotos in den Ermittlungsakten angeschaut. Der anwesende Polizeibeamte K. erläuterte die qualitativ schlechten Fotos in der Ermittlungsakte anhand seiner Erinnerungen. Danach hatte das Heck der Straßenbahn gerade den Kreuzungsbereich verlassen. Da der Straßenbahnzug etwa 44 m lang war, konnten von der Front 63 m zurück gemessen werden. Daraus folgte, dass der späteste Reaktionspunkt des Fahrers etwa bei Einfahrt in den Kreuzungsbereich gelegen hat. Das bedeutet, dass die Sicht auf den Polizeiwagen und sein Blaulicht schon vorher vorgelegen hatte. Die Straßenbahn wurde bis etwa an diesen spätesten Reaktionspunkt gefahren. Von dort war Sicht bis weit in die Straße hinein gegeben, aus der das Polizeifahrzeug gekommen war.

Als nächstes wurde die Hörbarkeit des Martinshorns untersucht. Der Polizeibeamte H. meinte, dass es problemlos sei, das Horn einzuschalten, weil im Bereich der Unfallstelle keine Wohnungen sind und (es war bereits nach Mitternacht) kaum mehr Verkehr war. Da dies die Hörbarkeitsuntersuchung doch wesentlich vereinfachte, wurde beschlossen, diese vor Ort durchzuführen.

Weil ohnehin geplant war, auch eine Vollbremsung mit dem Straßenbahnzug durchzuführen, wurde die Hörbarkeitsuntersuchung damit verbunden. Der Polizeiwagen wurde an einer Stelle bei 40 m vor der Haltelinie positioniert. Die Straßenbahn stand vor der Haltestelle Nordbahnhof. In der Straßenbahn befanden sich alle Parteivertreter, Herr F. und der Unterzeichner befanden sich in der Fahrerkabine. Herr B. stand an der Kreuzung und gab die Anweisung zum Einschalten des Martinshorns und zum Start der Straßenbahn. Die Straßenbahn wurde nun beschleunigt und dann erfolgte die Vollbremsung, wobei die Straßenbahn kurz vor der Kreuzung zum Stillstand kam. Alle in der Straßenbahn anwesenden Personen stellten fest, dass das Martinshorn erst zu hören war, nachdem die Straßenbahn zum Stillstand gekommen war und damit die Fahrgeräusche weg waren. Das bedeutet: Der Fahrer der Straßenbahn hatte das Martinshorn nicht hören können.

Vor der Bremsung war ein elektronisches Verzögerungsmessgerät (XLMeter) in der Straßenbahn montiert worden, um den Aufschrieb der Fahrdatenerfassung mit einem anderen Gerät vergleichen zu können.

Der Polizeibeamte H. wurde noch gebeten, in Erfahrung zu bringen, wie lange die Werbetafeln schon an der Straße angebracht sind, aus der das Polizeifahrzeug gekommen war. Er teilte einige Tage später telefonisch mit, dass die Werbetafeln (Plakatwände) schon seit rund 15 Jahren dort stehen. Er hatte dies von der beauftragten Stelle (Adresse, Ansprechpartner, Telefon) erfahren. Am Folgetag wurde die Unfallstelle nochmals aufgesucht, es wurden einige Fotos bei Tageslicht angefertigt.

3.3 Vergleich der Fahrdatenerfassung mit dem XLMeter

Am Folgetag wurde bei der Verkehrs GmbH der Aufschrieb von der Notbremsung bei der Ortsbesichtigung am Auswertecomputer angeschaut. Der Aufschrieb wurde ausgedruckt und mitgenommen. Der Bremsweg aus 60 km/h war 44 m lang, was einer mittleren Verzögerung von 3,2 m/s^2 entspricht. Der Vergleich dieses Aufschriebs mit dem Aufschrieb vom Unfalltag

zeigte, dass sich beide Schriebe von der Charakteristik gleichen. Das beweist, dass am Unfalltag eine automatische Vollbremsung eingeleitet wurde.

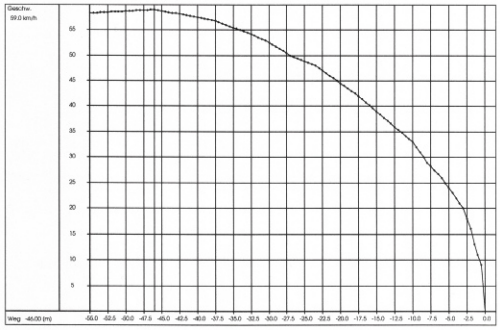


Bild B9-4 Daten vom Unfall

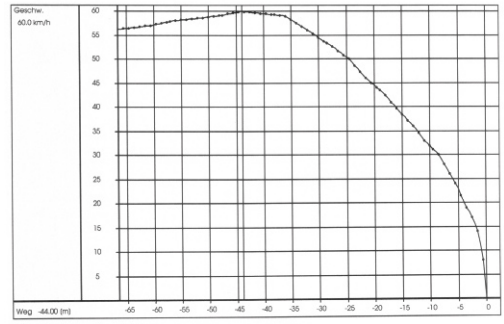
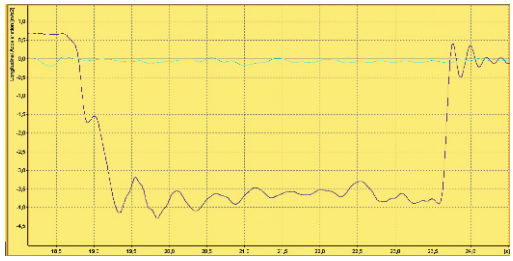


Bild B9-5 Daten vom Ortstermin



Mit dem zusätzlich bei dem Ortstermin eingebauten Messgerät XLMeter wurde der in **Bild B9-6** gezeigte Verzögerungsverlauf gemessen. Der Mittelwert über die gesamte Bremsdauer entspricht dem aus dem Fahrdatenschrieb.

Bild B9-6 Aufschrieb XLMeter

3.4 Kollision zwischen Straßenbahn und Polizeifahrzeug

Wenn man die Endstellung der Straßenbahn kennt, dann kann aus dem Aufschrieb des Fahrdatenerfassungsgeräts die Kollisionsgeschwindigkeit beurteilt werden. Zwar ist die Endstellung nicht ganz exakt bekannt, aber doch mit geringer Toleranz bestimmbar. Vermutlich erfolgte der Anstoß 54 m vor der Endstellung der Straßenbahn, d. h., die Straßenbahn hat bei Kollision noch gar nicht gebremst und fuhr mit rund 59 km/h (tatsächlicher Bremsweg 46 m).



Bild B9-7 Foto aus der Ermittlungsakte

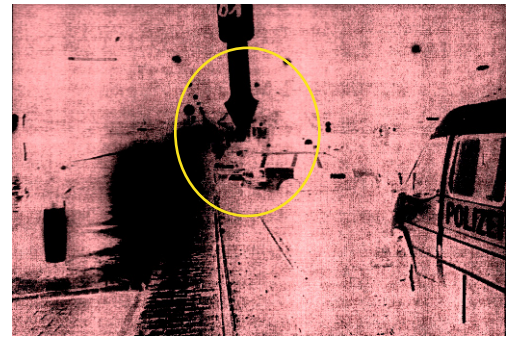


Bild B9-8 Foto aus der Ermittlungsakte in Falschfarbendarstellung



Bild B9-9 Straßenbahnzug in der Endstellung nach dem Unfall

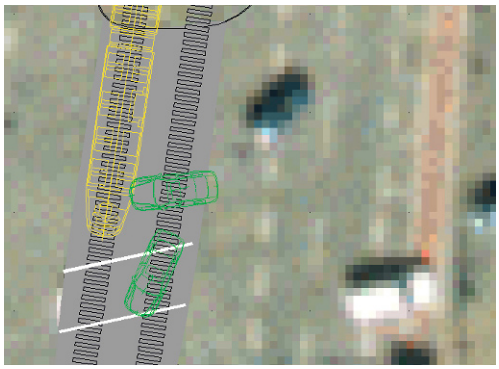


Bild B9-10 Kollisionsstellung



Bild B9-11 Schaden am Polizeifahrzeug

Die Geschwindigkeit des Polizeifahrzeugs kann nur anhand von bestimmten Schadensmerkmalen durch Vergleich mit Versuchen eingestuft werden. Insbesondere deshalb, weil am Spalt zwischen Kotflügel und Tür keine Stauchung erkennbar ist, muss die Kollisionsgeschwindigkeit mit weniger als 15 km/h bewertet werden. Eine genauere Angabe ich nicht möglich.

3.5 Weg-Zeit-Berechnungen

Das Bewegungsverhalten der Straßenbahn in Annäherung an die Kollisionsstelle ist aus dem Fahrdatenaufschrieb bekannt.

Das Bewegungsverhalten des Polizeifahrzeugs ist durch objektive Daten nur durch die Kollisionsgeschwindigkeit belegt (kleiner 15 km/h). Was davor passiert ist, kann nur aus den Aussagen abgeleitet werden. Danach fuhr es in Annäherung an die Kreuzung mit etwa 70 km/h und wurde dann abgebremst, möglicherweise wieder beschleunigt und nochmals abgebremst.

Für die Straßenbahn wurde angenommen, dass sie an der Haltestelle Nordbahnhof angefahren ist und 46 m vor der Endstellung mit der Notbremsung begann. Für das Polizeifahrzeug wurde angenommen, dass es aus 70 km/h mit einer Verzögerung von 5 m/s^2 auf eine Kollisionsgeschwindigkeit von 12 km/h abgebremst wurde.

Wenn man eine Reaktionsdauer des Straßenbahnfahrers von 2 s annimmt, was ein realistischer Wert ist, dann hat der Reaktionspunkt rund 85 m vor dem Endstand der Straßenbahn oder 25 m und 1,55 s vor der Kollisionsstelle gelegen. Das Polizeifahrzeug war jetzt beim Einfahren in die Kreuzung und hatte eine Geschwindigkeit von etwa 40 km/h. Diese Situation ist im **Bild B9-12** gezeigt.

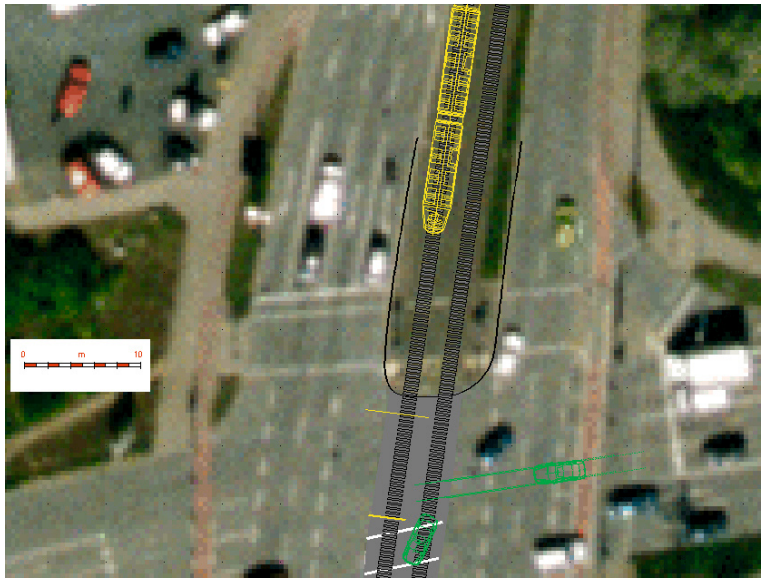


Bild B9-12
Positionen der Fahrzeuge 1,55 s vor der Kollision oder 2 s vor Bremsbeginn

Daraus folgt, dass der Straßenbahnfahrer schon früher hätte reagieren können. Der Ort, an dem die frühere Reaktion hätte erfolgen können, ist dadurch festzustellen, dass die Fahrzeuge soweit zurückgefahren werden, bis der Straßenbahnfahrer Sichtkontakt auf das mit Blaulicht fahrende Polizeifahrzeug hatte. Die Sichtgrenze stellen die Plakatwände dar, die sich noch vor dem dort abzweigenden Weg befinden.



Bild B9-13
Unfallörtlichkeit bei Tageslicht fotografiert. Der Pkw im Foto fährt in die gleiche Richtung wie das am Unfall beteiligte Polizeifahrzeug.

Der Straßenbahnfahrer hätte demnach 3,8 s vor der Kollision reagieren können. Die Straßenbahn war noch in der Beschleunigungsphase und fuhr an dieser Stelle mit 47 km/h, was einen kürzeren Anhalteweg zur Folge gehabt hätte. Der Abstand von dieser Stelle bis zum erforderlichen Stillstand hätte rund 45 m betragen. Da der Anhalteweg aus 47 km/h nur rund 43 m betragen hätte, lässt eine Vermeidbarkeit für den Straßenbahnfahrer als möglich erscheinen, zumindest ist sie nicht auszuschließen. Möglich ist auch, dass der Fahrer des Polizeifahrzeugs anders reagiert, d. h. nicht gebremst haben könnte, und es zu einer zeitlichen Vermeidbarkeit hätte kommen können. Ob dieses erste Erscheinen des Polizeifahrzeugs in einer Entfernung von etwa 34 m von der Haltelinie der Kreuzung bzw. 44 m von der Kollisionsstelle Anlass für eine Notbremsung gewesen sein muss, ist juristisch zu bewerten.

Bild B9-14
Ort der frühest möglichen Erkennbarkeit des Polizeifahrzeugs durch den Straßenbahnfahrer

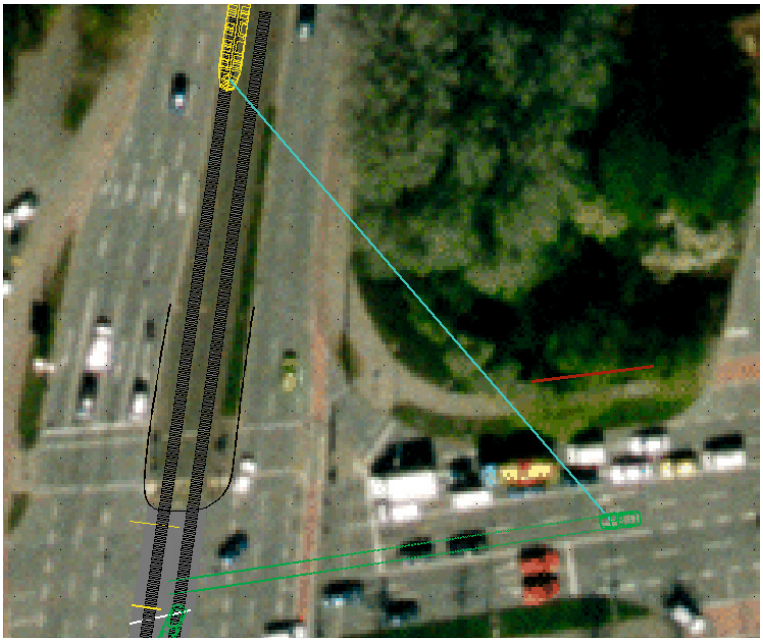
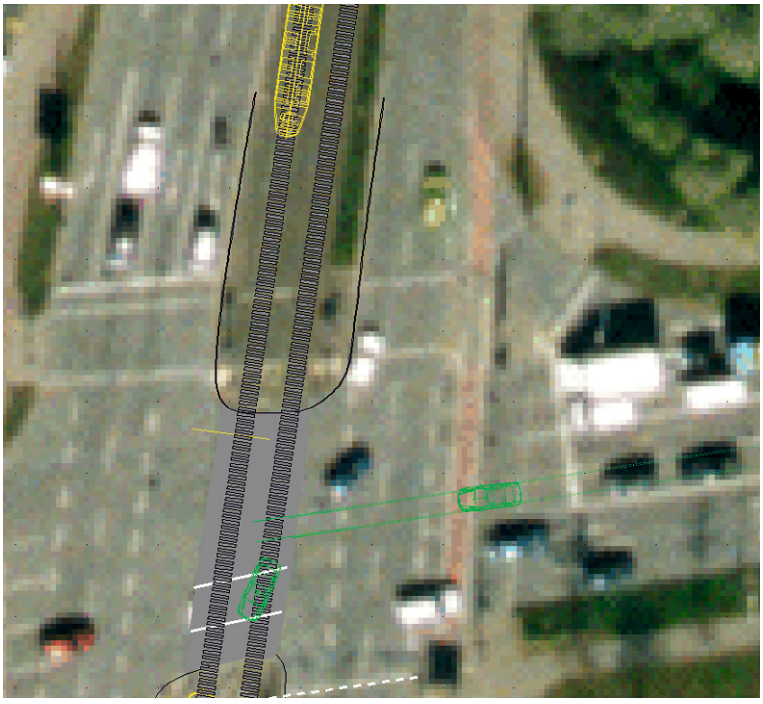


Bild B9-15
Positionen der Fahrzeuge beim Einfahren des Polizeifahrzeugs in den Kreuzungsbereich



Für den Fahrer des Polizeifahrzeugs ist die Situation so gewesen, dass er beim Einfahren in die Kreuzung die von rechts herannahende Straßenbahn hätte sehen können. Er hätte auch sehen können, dass die Straßenbahn relativ schnell war und hätte, wenn die Aussage des Beifahrers

zutrifft, vor der Straßenbahn anhalten können. Im **Bild B9-15** sind die Positionen der beiden Fahrzeuge beim Einfahren des Polizeifahrzeugs in die Kreuzung zu sehen. Die direkte Entfernung zwischen dem Polizeifahrzeug und der Straßenbahn ist nur noch etwa 27 m. Alle angegebenen Maße sind nur als Näherungswerte zu verstehen, weil sich durch andere Annahmen für die Fahrweise des Polizeifahrzeugs Abstände und Geschwindigkeiten ändern. Es sind dies aber nur Änderungen, die für die grundsätzlichen Aussagen keine Relevanz haben. Deshalb wurde auf die Darstellung mehrerer Varianten verzichtet.

4 Zusammenfassung

Nach Auswertung der vorliegenden Akten und Durchführung verschiedenen Besichtigungen kann zum Beweisbeschluss aus technischer Sicht Folgendes gesagt werden.

Zu den Behauptungen der beklagten Verkehrs GmbH:

Der Straßenbahnfahrer hat angesichts des nahenden Polizeifahrzeuges nicht unverzüglich eine Notbremsung eingeleitet, sondern erst in einer Entfernung von ungefähr 25 m vor der Kollisionsstelle.

Das Einsatzfahrzeug war schon vor der Einleitung der Notbremsung zu sehen, aber nicht zu hören.

Das Einsatzfahrzeug kann mit zumindest 30 km/h in den Kreuzungsbereich eingefahren sein, beim Auftreffen auf die Straßenbahn war die Geschwindigkeit unter 15 km/h.

Zu den Behauptungen des klagenden Landes:

Wie das Einsatzfahrzeug den Kreuzungsbereich befahren hat, kann nicht festgestellt werden, die Kollisionsgeschwindigkeit war aber weniger als 15 km/h.

Die Straßenbahn hat erst nach der Kollision gebremst. Bei dem Einfahren des Pkw in den Kreuzungsbereich fuhr die Straßenbahn noch mit einer Geschwindigkeit von 59 km/h. Das Polizeifahrzeug war so früh optisch wahrnehmbar, dass die sofortige Einleitung einer Gefahrenbremsung zur Unfallvermeidung geführt haben kann.

Über die gegenseitige Annäherung der Fahrzeuge wurden einige Berechnungen durchgeführt, die Ergebnisse wurden grafisch dargestellt. Für die Straßenbahn ist der Geschwindigkeitsverlauf während der Annäherung an die Kollisionsstelle ziemlich genau bekannt. Bei dem Polizeifahrzeug konnte aus objektiven Merkmalen nur festgestellt werden, dass die Kollisionsgeschwindigkeit unter 15 km/h war. Das Bewegungsverhalten davor kann nur an den Schilderungen der beiden Polizeibeamten orientiert werden. Von relevantem Einfluss sind die dadurch gegebenen Unterschiede aber nicht.

Durch Plakatwände in der von dem Polizeifahrzeug befahrenen Straße wird das Blaulicht eines Polizeifahrzeugs im Bereich 20 bis 40 m vor der Haltelinie vollständig abgedeckt, davor ist es nur schwach erkennbar. Das Martinshorn war in der fahrenden Straßenbahn nicht zu hören.

Zur Unfallzeit waren die Schienen nass, was sich in einem Bremsverzögerungswert von 2,9 m/s^2 laut Fahrdatenauswertung bemerkbar machte. Bei trockenen Schienen wurde bei einem Bremsversuch am gleichen Ort eine Verzögerung von 3,2 m/s^2 ermittelt. Schneereste auf den Schienen hatten keinen relevanten Einfluss auf die Verzögerung gehabt. Selbst wenn ein geringer Einfluss als möglich angesehen wird, so hätte dieser keine Auswirkung auf das Gutachtenergebnis.

B10 Alleinunfälle

Jörg Arnold

1 Einleitung

Bei Alleinunfällen erfolgt die Untersuchung des Unfalls im Zusammenhang mit der Frage, ob andere, am Unfall nicht beteiligte Fahrzeug oder Personen gefährdet wurden und ob statt der üblichen Fahrlässigkeit allenfalls Vorsatz bei der Begehung der Übertretungen im Spiel waren oder nicht.

Um diese Frage beantworten zu können, muss die Spurensicherung nach Alleinunfällen den gleichen Qualitätsansprüchen genügen, wie bei einem normalen Unfall.

2 Fallbeispiel 1: Überschreiten der Kurvengrenzgeschwindigkeit

Am 4. Oktober 2000, 3:35 Uhr, erstattete ein junger Mann (der Ford-Fahrer) bei der Polizei Anzeige über einen schweren Verkehrsunfall, unmittelbar nach einer Autobahn Ausfahrt. In der Folge rückten die Polizei sowie die Rettungskräfte aus. Ebenso rückte der Dienst habende Untersuchungsrichter aus.



Bild B10-1 Der völlig demolierte BMW M3 in der Unfallendlage, 1/3 der Front fehlt.



Bild B10-2 Dem BMW M3 wurde durch die Kollision gegen die Leitplanken und ein Beleuchtungskandelaber 1/3 der Front abgeschert, die Schäden Enden erst im Bereich der Hinterachse.

Folgende Situation trafen die ausgerückten Personen an: Ein BMW-Fahrer war mittelschwer verletzt und dessen Beifahrer getötet worden. Gestützt auf die vorgefundene Endsituation des Unfalls musste davon ausgegangen werden, dass der BMW-Fahrer mit massiv überhöhter Geschwindigkeit rund 180 m vor der Endlage des BMW M3 in die rechte Seitenleitplanke und einen Betonkandelaber geprallt und anschließend mehrmals sich um die eigene Achse drehend an den Endstandort geschleudert war.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_30

Bis Ende 2001 wurden alle wichtigen untersuchungsrichterlichen Einvernahmen der Beteiligten und von Zeugen durchgeführt. Die Rekonstruktion der eigentlichen Unfallfahrt wurde am 8. Juni 2002 am Ort des Geschehens durchgeführt.

Ein verkehrstechnisches Gutachten sowie ein verkehrspsychologisches Gutachten wurden Ende 2003 erstattet. Die Schlusseinvernahmen fanden Ende Januar 2004 statt.

2.1 Ablauf

Nach Mitternacht am 4. Oktober 2000 trafen der BMW-Fahrer sowie sein Beifahrer auf den Ford-Fahrer und dessen drei Mitfahrer. Der gemeinsame Plan etwas trinken zu gehen scheiterte. Deshalb kamen die Beteiligten auf die Idee zu einer Autobahn-Raststätte zu fahren.

Vor Beginn der Fahrt hatte sich der BMW-Fahrer abschätzig über den Ford-Escort Cosworth 4x4 des Ford-Fahrers geäußert.

Der BMW-Fahrer und der Ford-Fahrer führten am 4. Oktober 2000 ab ca. 3:10 Uhr miteinander ein privates Autorennen durch. Sie fuhren dabei innerorts mit massiv überhöhten Geschwindigkeiten von 80 km/h bis etwa 100 km/h (alle Angaben beziehen sich auf die Tachoanzeige). Der BMW-Fahrer versuchte, jeweils mit dem BMW M3 den vor ihm fahrenden Ford Escort Cosworth des Ford-Fahrers zu überholen, was dieser durch Gasgeben immer wieder verhinderte. Der Abstand zwischen dem Ford Escort Cosworth und dem BMW M3 war dabei deutlich unterhalb des „halben Tachos“, bei ca. einer Wagenlänge.

Sowohl der Ford-Fahrer als auch der BMW-Fahrer fuhren anschließend parallel zur Autobahn erneut mit deutlich überhöhter Geschwindigkeit und zwar mit 100 km/h bis 120 km/h statt der dort zulässigen 50 km/h bzw. 80 km/h.

Auf der Autobahn von der Einfahrt bis zur Ausfahrt bei der Raststätte wurde mit Geschwindigkeiten von zwischen 160 km/h und 180 km/h statt der erlaubten 120 km/h gefahren. Auch auf dieser Strecke versuchte der BMW-Fahrer den Ford-Fahrer zu überholen.

Auf dem Parkplatz der Raststätte ließ der BMW-Fahrer die Reifen quietschen und den Warnblinker kurz aufleuchten, was von allen Beteiligten als Zeichen für ein erneutes Rennen auf dem Weg zurück aufgefasst wurde. In der Folge fuhren beide Autolenker, Ford-Fahrer und BMW-Fahrer mit Geschwindigkeiten von über 150 km/h statt der erlaubten 120 km/h zurück. Auf einer Autobahnbrücke überholten der Ford-Fahrer und der BMW-Fahrer ein Taxi, das zweimal regelrecht geschüttelt wurde. Der seitliche Abstand des Ford Escort Cosworth und des BMW M3 zum Taxi war angesichts der gefahrenen Geschwindigkeiten massiv zu gering.

Die Mitfahrer im Ford sagten zum Teil spontan und mehr als ein Jahr nach dem Unfall aus, sie hätten den Ford-Fahrer aufgefordert mit dem Rennen aufzuhören. Der Ford-Fahrer brach ca. 1.000 m vor der Ausfahrt das Rennen ab. Der BMW-Fahrer raste mit einem seitlichen Abstand von weniger als 2 m am Ford (noch auf der Autobahn) vorbei. Dann entschloss sich der BMW-Fahrer doch noch die Ausfahrt zu nehmen und raste auf der Sperrfläche und dem linken Streifen durch die Ausfahrt, seitlich weniger als 2 m an einem nicht beteiligten Honda-Fahrer vorbei.

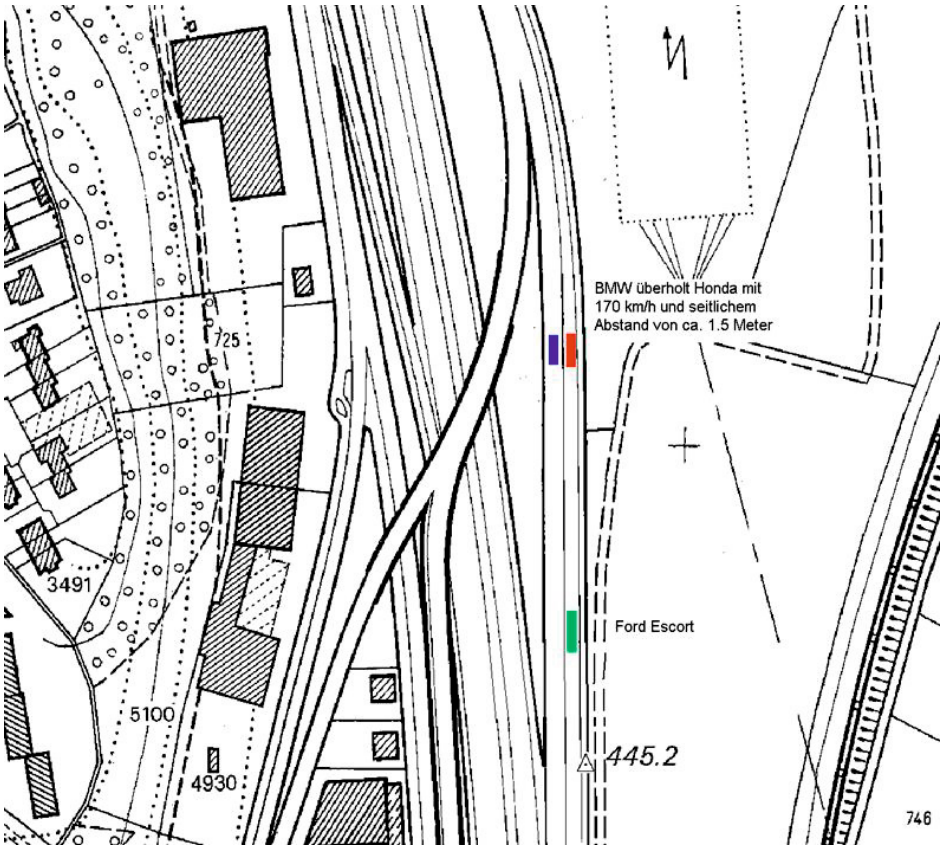


Bild B10-3 Schematische Darstellung des Überholmanövers des BMW M3 (blau) in der Autobahnausfahrt, daneben der unbeteiligte Honda (rot) und der am Rennen beteiligte Ford Cosworth (grün)

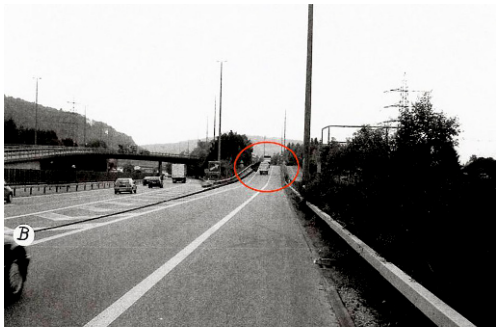


Bild B10-4 Bereich des Überholmanövers des BMW M3 in der Autobahnausfahrt: zuerst eine Senke, dann eine Kuppe und der Beginn der Linkskurve



Bild B10-5 Rekonstruktion des Überholmanövers des BMW M3 (silber) in der Autobahnausfahrt: vorne der unbeteiligte Honda (blauer Peugeot) und der am Rennen beteiligte Ford Cosworth (weißer Ford)

2.2 Augenschein, Rekonstruktion (alle Fahrzeuge sind Vergleichsfahrzeuge)

Der BMW-Fahrer fuhr kurz bevor er in die Autobahnausfahrt einbog am Ford Escort Cosworth vorbei. Der Ford-Fahrer sagte aus, der Abstand sei sehr knapp gewesen und er habe Angst gehabt, als er überholt worden sei.

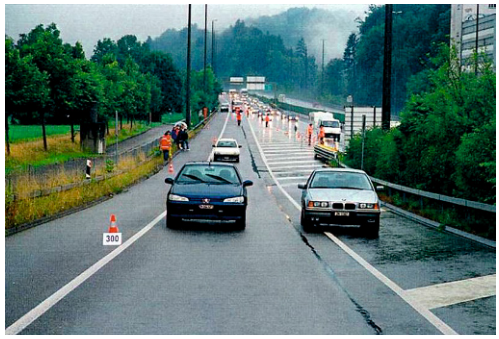


Bild B10-6 Rekonstruktion des Überholmanövers des BMW M3 (silber) in der Autobahnausfahrt: links der unbeteiligte Honda (blauer Peugeot) und der am Rennen beteiligte Ford Cosworth (weißer Ford)



Bild B10-7 Rekonstruktion des Überholmanövers des BMW M3 (links) in der Autobahnausfahrt auf Höhe des unbeteiligten Honda (links): Blick aus dem am Rennen beteiligten Ford Cosworth



Bild B10-8 Letzter Blick aus dem am Rennen beteiligten Ford Cosworth auf den BMW M3 (links) in der Autobahnausfahrt



Bild B10-9 Letzter Blick aus dem unbeteiligten Honda auf den BMW M3 (links) in der Autobahnausfahrt

Die Außenspiegel des Ford Escort Cosworth und des BMW M3 hätten sich fast touchiert. Der seitliche Abstand zum Ford Escort Cosworth vom BMW-Fahrer lag daher höchstens bei etwa einer Wagenbreite. In jenem Moment fuhr der BMW M3 mit mindestens 170 km/h. Damit muss ein seitlicher Abstand von 2 m bis 3 m zum Ford Escort Cosworth als gefährlich klein gewertet werden. Es bestand nicht nur beim kleinsten Fahrfehler des BMW-Fahrers eine hohe Unfallgefahr, sondern auch die Gefahr einer Angst- und damit Fehlreaktion.

Schließlich ist auch die letzte Phase des geschilderten Autorennens, die in der Kollision und mit dem Tod des Beifahrers im BMW endete, als unkontrollierte Fahrt zu werten. Alle Verkehrsteilnehmer, welche die Autobahnüberwerfung von links herkommend befuhren, hätten

keine echte Chance gehabt die herannahende Gefahr in der Form des rasenden BMW M3 vom BMW-Fahrer zu erkennen. Ein unbeteiligt herannahendes Fahrzeug hätte vermutlich noch zu einem schweren Folgeunfall geführt.



Bild B10-10 Rekonstruktion des Überholmanövers des BMW M3 in der Autobahnausfahrt



Bild B10-11 Rekonstruktion des Überholmanövers des BMW M3 in der Autobahnausfahrt (Gegenrichtung)

2.3 Unfalldynamische Grundlagen

Anfangs Juli 2002 fand vor und in der Autobahn-Ausfahrt eine Rekonstruktion am Unfallort statt. Diese bildet neben den am Unfalltag aufgenommenen Spuren und der damals gemachten Fotos die Grundlage für das unfalltechnische Gutachten. Im Gutachten ist erläutert, dass ein Motorfahrzeug bei Kurven- und/oder Kuppenfahrten einem Wechselspiel zwischen der Erdanziehungskraft, den Reibungskräften zwischen den Reifen und der Fahrbahn in Fahrtrichtung und quer dazu sowie den Zentripetalkräften in der Horizontalen ausgesetzt ist. Die Grafiken zeigen diese Zusammenhänge grafisch auf bzw. erläutern sie näher.

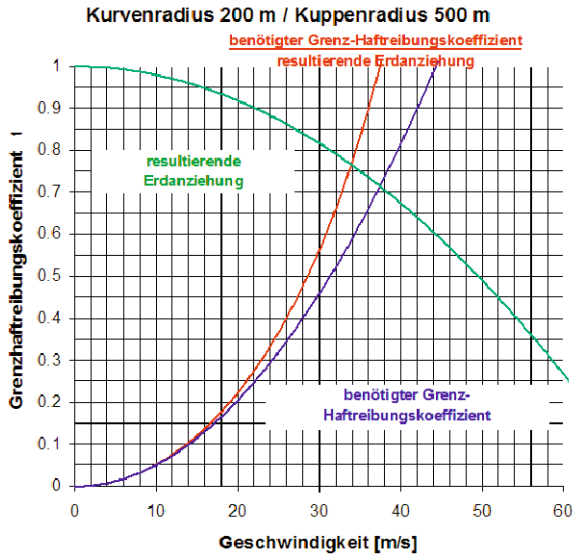


Bild B10-12 Kurvengrenzgeschwindigkeit in der Kurve/Kuppe in der Autobahnausfahrt (minimaler Kurvenradius)

Entscheidend ist es festzuhalten, dass es für jede Kurve und Kuppe Geschwindigkeiten gibt, die nicht überschritten werden dürfen, wenn diese sicher befahren werden sollen. Am Unfallort ist gemäss Gutachten ein starkes Ausfedern des BMW M3 auf der Kuppe zu erwarten, wenn es zu einer Reduktion des auf den Federn liegenden Gewichts um ca. einen Viertel kommt. Dazu käme es bei einer Geschwindigkeit von ca. 125 km/h (35 m/s) oder mehr. Am Unfallort wäre für die sichere Kuppen-/Kurvenfahrt ein Haftreibungskoeffizient von 0,55 bis 0,80 nur für die Einhaltung der Fahrlinie nötig. Bei trockener Fahrbahn würde bei einem dafür geltenden Haftreibungskoeffizient von 0,90 60 % bis 90 % für die zu kompensierenden Fliehkräfte verbraucht. Bei z. B. einem Ölfleck auf der Fahrbahn müsste mit dem Verlust der Herrschaft übers Fahrzeug gerechnet werden. Bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h (36 m/s, 200 m Kurvenradius) bis 148 km/h (41 m/s, 300 m Kurvenradius) könnte die Kurve nicht mehr sicher durchfahren werden und zwar auch nicht bei optimalen Straßenverhältnissen. Im Bereich der genannten Geschwindigkeiten nimmt der für die Einhaltung der Fahrlinie nötige Haftreibungskoeffizient auf 0,90 zu. Gleichzeitig nimmt die für die Bremsung in der Kurve zur Verfügung stehende Grenzverzögerung ab. Bei einer Vollbremsung bestünde die Gefahr, dass über die zulässige Grenzverzögerung hinaus gebremst würde, was zum Verlust der Herrschaft übers Fahrzeug führte. Der Fahrzeuglenker benötigt eine Reaktionszeit von 0,6 s (Basisreaktionszeit) bis 1,5 s (Reaktionszeit mit Blickzuwendung), um auf eine auftauchende Gefahr zu reagieren. Bei einer Geschwindigkeit von 108 km/h hätte bei einem auftauchenden Hindernis der BMW M3 eine Strecke von 18 m bis 45 m zurückgelegt, ohne dass gebremst oder die Richtung geändert worden wäre. Das Gutachten legt die theoretischen Grundlagen für die Berechnung der Geschwindigkeiten des BMW M3 dar.

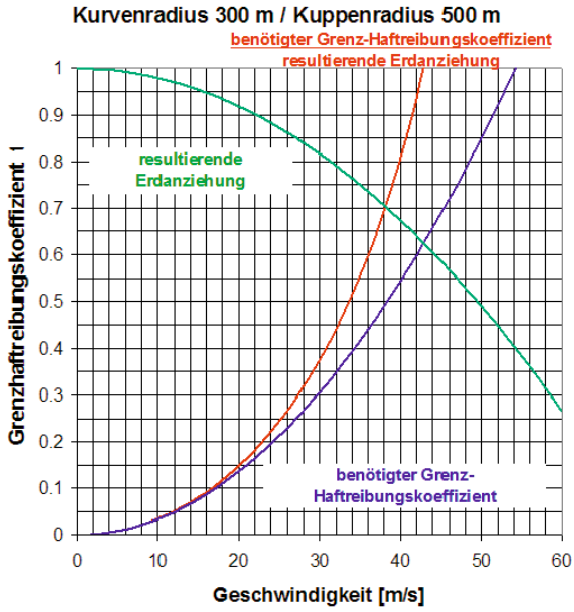


Bild B10-13 Kurvengrenzgeschwindigkeit in der Kurve/Kuppe in der Autobahnausfahrt (maximaler Kurvenradius)

2.4 Unfallanalyse (Hergang)

Im Gutachten ist der Hergang, ausgehend von der Unfallendlage „rückwärts“ dargestellt.

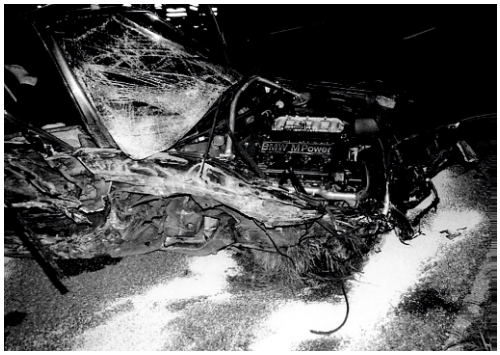




Bild B10-14 Dem BMW M3 wurde durch die Kollision gegen die Leitplanken und ein Beleuchtungskandelaber 1/3 der Front abgeschert

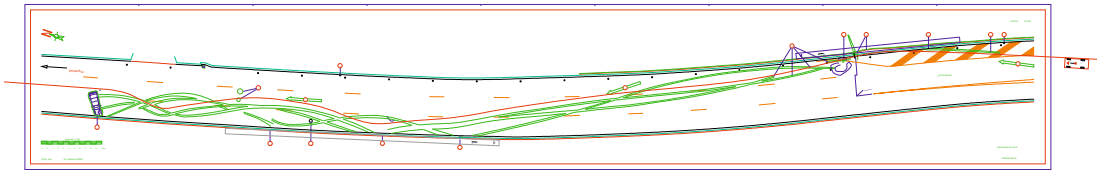


Bild B10-15 Situationsplan: Übersicht über das Gesamtspurenbild

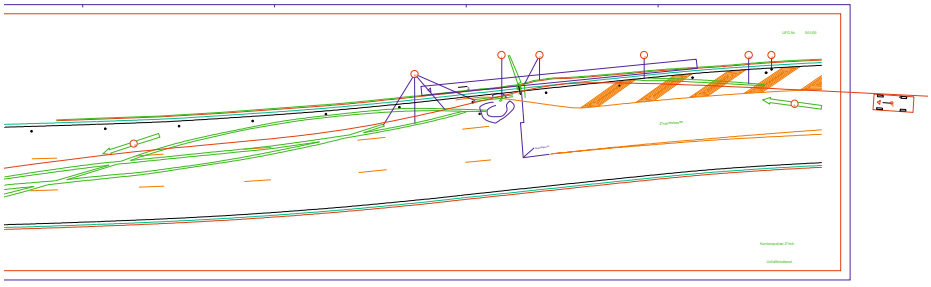


Bild B10-16 Situationsplan: Verlust der Herrschaft über das Fahrzeug, Primärkollision gegen Leitplanke und Beleuchtungskandelaber

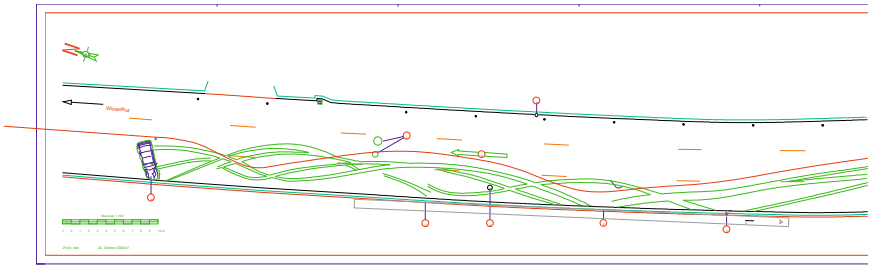


Bild B10-17 Situationsplan: Auslaufphase, Sekundärkollisionen gegen die Leitplanke

Anschließend wird die Darstellung umgekehrt, erfolgt also vorwärts in der Zeit und in Fahrtrichtung. Hierzu ist der vom Unfalldienst der Polizei nach Vorgaben des Gutachters photogrammetrisch erstellte Plan eine unentbehrliche Grundlage.

Positionen A–C:

Im Gutachten wird eine minimale Eingangsgeschwindigkeit des BMW M3 vor der Kollision mit dem rechten Straßenrand von 170 km/h errechnet. Die effektiv gefahrene Geschwindigkeit kann über 200 km/h gelegen haben. Das Gutachten geht zu Gunsten des BMW-Fahrers von einer Verzögerung von nur 1 m/s^2 aus vor der ersten Kollision mit dem rechten Randstein, der rechten Leitplanke und dem Betonkandelaber. Diese erste Verzögerungsstrecke misst 29 m.



Bild B10-18 Erste Spuren nach dem Verlust der Herrschaft über das Fahrzeug

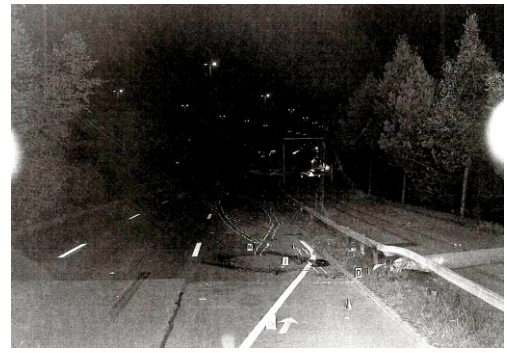


Bild B10-19 Primärkollision gegen Leitplanke und Beleuchtungskandelaber



Bild B10-20 Primärkollision gegen Leitplanke und Beleuchtungskandelaber



Bild B10-21 Schäden am BMW M3 auf der rechten Fahrzeugseite bis zur Hinterachse

Aufgrund der massiven Schäden am BMW M3 wird im Gutachten bei der Kollision dieses Fahrzeugs mit dem Kandelaber eine Geschwindigkeitsreduktion von mindestens 25 km/h bis 40 km/h errechnet.

Positionen D–E:

Nach der Kollision mit dem Betonkandelaber drehte es den BMW M3 um 260° im Uhrzeigersinn. Er legte vom Betonkandelaber bis zum ersten Anprall an der linken Leitplanke etwa 66 m zurück. Die Geschwindigkeit betrug noch 140 km/h bis 170 km/h.



Bild B10-22 Auslaufphase mit voll blockierten Rädern



Bild B10-23 Auslaufphase, erste Sekundärkollision gegen die Leitplanke

Positionen E–F:

Der BMW M3 drehte im Gegenuhrzeigersinn um 90° und legte eine Strecke von 18 m zurück (vom ersten Anprall an der linken Leitplanke bis zum zweiten Anprall). Die Geschwindigkeit wurde um 5 km/h bis 10 km/h reduziert. Bei der Position E lag die Geschwindigkeit noch bei 98 km/h bis 121 km/h.

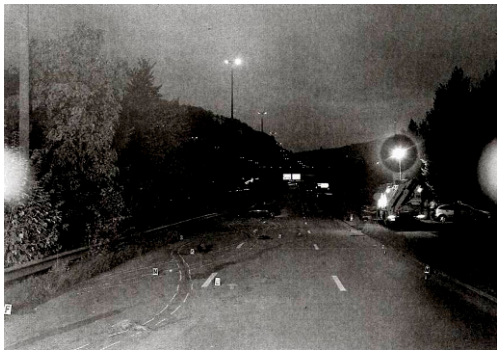


Bild B10-24 Auslaufphase, weiterte Sekundärkollision gegen die Leitplanke



Bild B10-25 Auslaufphase und Unfallendlage des BMW M3

Positionen F–G:

Der BMW M3 drehte sich im Uhrzeigersinn um ca. 110° und legte eine Strecke von ca. 20 m zurück. Bei der Position F betrug seine Geschwindigkeit noch 82 km/h bis 101 km/h. Der Geschwindigkeitsverlust betrug 5 km/h.

Positionen G–H:

Der BMW M3 drehte im Gegenuhrzeigersinn um 360° bis in die Unfallendlage und legte dabei eine Strecke von 32 m zurück. Bei der Position G betrug die Geschwindigkeit noch 61 km/h bis 76 km/h. Dort wurde sie um 5 km/h reduziert.



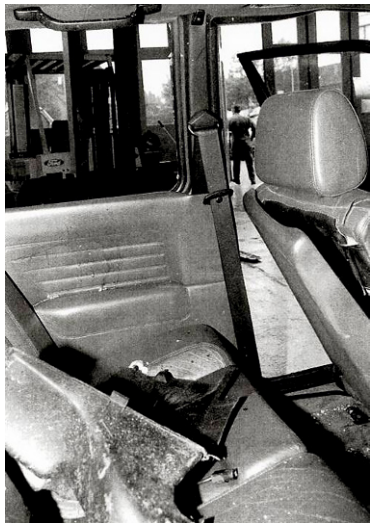
Bild B10-26 Auslaufphase und Unfallendlage des BMW M3 (Gegenrichtung)



Bild B10-27 Unbeschädigte Lenkerseite des BMW M3

2.5 Sicherheitsgurte

Die Auswertung der Gurten auf Fahrer- und Beifahrerseite ergab, dass weder BMW-Fahrer noch Beifahrer die Sicherheitsgurte getragen hatten. Es konnten keine Spuren entdeckt werden, welche wegen der starken Belastung beim vorliegenden Unfall zweifellos hätten vorhanden sein müssen. Der Gutachter geht davon aus, dass der Beifahrer allerdings auch dann den Unfall nicht überlebt hätte, wenn er die Sicherheitsgurte getragen hätte.





Bilder B10-28 und **B10-29** Beide Sicherheitsgurten in der Ruheposition an der B-Säule: Die Sicherheitsgurten wurden weder vom Fahrer noch vom Beifahrer getragen.

2.6 Anhaltestrecken

Es geht um die Strecken und Zeiten, die für die Reduktion auf 80 km/h (am Unfallort zulässige Höchstgeschwindigkeit) und auf 0 km/h bei einer Reaktionszeit von 1 s und maximaler Verzögerung:

von 170 km/h auf 80 km/h:	148 m, Bremszeit: 4 s,	Vollbremszeit: 3 s
von 200 km/h auf 80 km/h:	205 m, Bremszeit: 5 s,	Vollbremszeit: 4 s
von 170 km/h auf 0 km/h:	176 m, Bremszeit: 6,4 s,	Vollbremszeit: 5,4 s
von 200 km/h auf 0 km/h:	233 m, Bremszeit: 7,3 s,	Vollbremszeit: 6,3 s

Sichtweite in der Autobahn-Ausfahrt: 102 m

Es war somit dem BMW-Fahrer auch bei einer Geschwindigkeit von „lediglich“ 170 km/h nicht einmal möglich innerhalb der sichtbaren Strecke auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit abzubremsen. Das wäre im Prinzip erst dort möglich gewesen, wo die Straße parallel zur Autobahn A1 verläuft, mithin erst nach dem Ort, wo die Kollision mit der Leitplanke und dem Betonkandelaber stattgefunden hatte.

2.7 Beurteilung der Fahrweise des BMW-Fahrers

Das Gutachten kommt zu dem Schluss, dass bei den gefahrenen Geschwindigkeiten von jenem Moment an, da der BMW-Fahrer in die Autobahn-Ausfahrt einbog, der folgende Unfall unvermeidlich wurde und bereits das Überholen des Pkw Honda als unkontrollierbares Fahrmanöver beurteilt werden muss.

Das Gutachten führt weiter aus, dass der BMW-Fahrer bereits als er den Ford-Fahrer überholte mindestens 170 km/h gefahren sein müsse, da auch ein BMW M3 bei derartigen Geschwindigkeiten eine gewisse Zeit braucht um noch mehr zu beschleunigen.

Es ist klar, dass der Beifahrer des BMW-Fahrers hier keine Chancen hatte: Er erlitt schwerste Schädel-/Hirnverletzungen und war auf der Stelle tot.

2.8 Die Person des BMW-Fahrers

Die folgenden Ausführungen stützen sich auf das verkehrspsychologische Gutachten. Dieses kam zum Schluss, dass der BMW-Fahrer in Bezug auf das von ihm verursachte Unfallereignis erstaunlich wenig Problembewusstsein zeige. Sein aggressives und riskantes Fahrverhalten bagatellisiere er aufs Deutlichste. Er zeige große Schwierigkeiten, für sein Handeln Verantwortung zu übernehmen. Bezüglich Aggressivität erwähnt das Gutachten, es dränge sich gestützt auf die Untersuchungsbefunde der Verdacht auf, dass der BMW-Fahrer in hohem Maße dazu neige, spontan aggressive Impulse zu verdrängen. Es falle ihm sehr schwer, auf die Stillung eines momentanen Bedürfnisses zugunsten eines höheren Ziels bzw. zur Erfüllung einer moralischen Vorstellung zu verzichten. Das Selbstwertgefühl des BMW-Fahrers werde durch riskantes und waghalsiges Fahrverhalten aufgewertet.

Zur Zurechnungsfähigkeit hält das Gutachten fest, es bestünden gestützt auf die Einvernahmen und die aktuellen verkehrsmedizinischen und -psychologischen Untersuchungen keine Anhaltspunkte dafür, dass der BMW-Fahrer zum Zeitpunkt des Unfalls an einer Geisteskrankheit, Schwachsinn oder einer schweren Störung des Bewusstseins gelitten habe. Er sei geistig nicht mangelhaft entwickelt gewesen. Er sei somit durchaus in der Lage gewesen, das Unrecht seiner Tat einzusehen und dementsprechend zu handeln. Aufgrund seiner Persönlichkeit sei die Zu-

rechnungsfähigkeit leicht vermindert gewesen, jedoch nicht in einem forensisch relevanten Maß. – Der BMW-Fahrer weise jetzt und habe auch im Zeitpunkt des Unfalls eine erhöht emotionale Beziehung zum Auto und zum Autofahren aufgewiesen. Als Ursachen für den Unfall seien wohl erhöhte Risikobereitschaft als auch deutlich mangelnder Verkehrssinn anzusehen. Ursachen für den Unfall seien nicht ein Geschwindigkeitsrausch, sondern Selbstüberschätzungs- bzw. inadäquate Beurteilung der Verkehrssituation und deutlicher Mangel im Bereich der Kontrolle und Steuerung von Handlungsimpulsen.

3 Fallbeispiel 2: „Flugunfall“

Auf der Autobahn verliert der Fahrer bei guten Straßenverhältnissen (trocken, nachts, nicht kalt) in einer lang gezogenen Linkskurve die Herrschaft über seinen BMW M3. Der BMW M3 schleuderte über die rechte Böschung und prallte nach ca. 175 m Flug ca. 8 m tiefer auf einer Wiese auf.

Vom BMW waren auf der Böschung klare Spuren wie auf einer „Abschussrampe“ gezeichnet worden. Der Fahrer erinnert sich zuerst an gar nichts – dann in der Rehabilitationsklinik an einen zweiten BMW M3. Der Fahrer berichtet von einem privaten Autorennen ...

3.1 Unfalluntersuchung

Im Bereich der Unfallstelle gilt eine signalisierte Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Der Angeschuldigte gab zu, dass er etwas zu schnell, aber maximal mit 130 km/h unterwegs gewesen sei.

Aufgrund des deutlichen Spurenbildes und der guten Arbeit der ausgerückten Polizeibeamten konnte der „Abschusswinkel“ bestimmt werden: Er betrug 10° ± 1°. Dadurch konnte die Wurfparabel berechnet werden.

Die Vereinfachung auf die Berechnung der Flugbahn eines Massenpunktes bei diesem Flugmanöver führt zur Bedingung, dass sich die Vertikalbewegung des Herunterfallens des BMW M3 und die Vorwärtsbewegung des BMW M3 am Aufschlagspunkt treffen müssen. Reibung und Luftwiderstand können zugunsten einer minimalen „Abschussgeschwindigkeit“ vernachlässigt werden. Die einzigen zwei Zahlen, die gebraucht werden, sind die horizontale Flugdistanz und der vertikale Höhenunterschied ab der Böschungs-Oberkante bis zum Aufschlagspunkt.

Die Berechnungen ergaben eine Minimalgeschwindigkeit beim Abflug von 230 km/h bis 250 km/h.



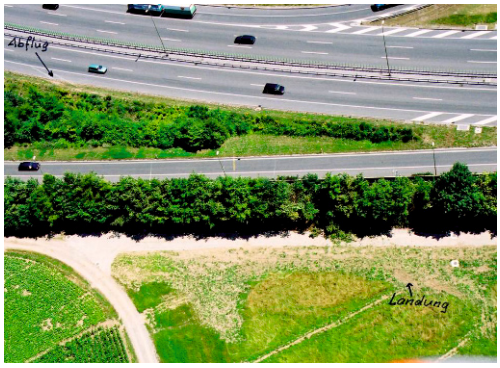


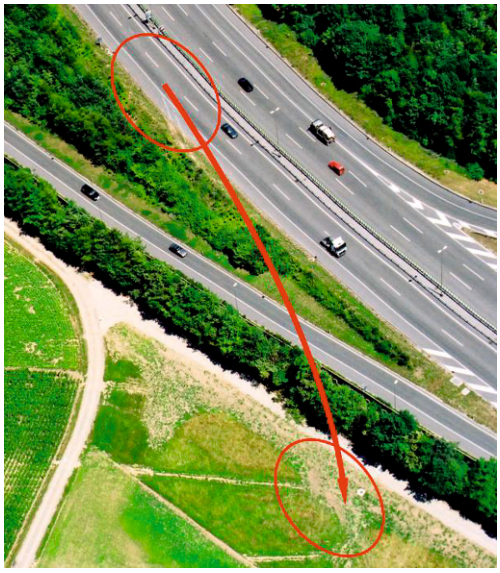
Bilder B10-30 und **B10-31** Verlust der Herrschaft über das Fahrzeug (Gegenrichtung)





Bilder B10-32 und **B10-33** Verlust der Herrschaft über das Fahrzeug





Bilder B10-34 und **B10-35** Übersichtsaufnahmen aus dem Helikopter: Verlust der Herrschaft über das Fahrzeug, Flugphase, Aufprall nach 175 m Flug in der angrenzenden Wiese





Bild B10-36 Aufprallstelle nach 175 m Flug in der Wiese

Bild B10-37 Durchschlagen der Bäume direkt oberhalb der Schallschutzmauer



Bild B10-38 Unfallendlage des BMW M3



Bild B10-39 Unfallendlage des BMW M3, Schäden



Bild B10-40 Unfallendlage des BMW M3, Schäden

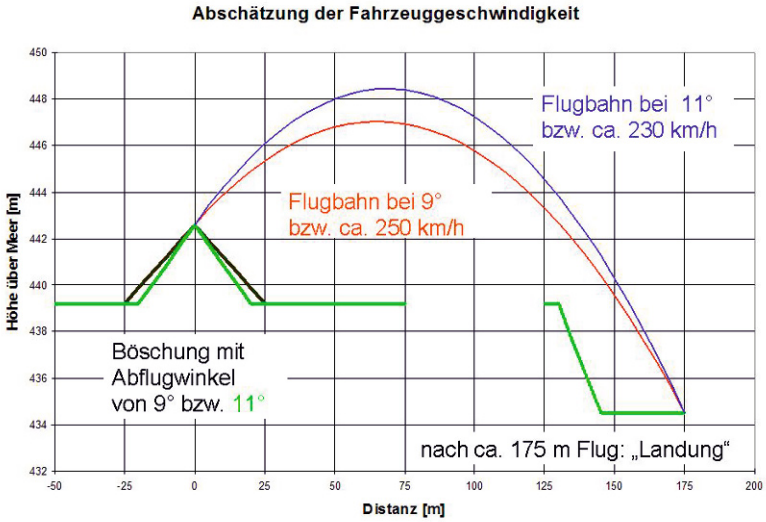


Bild B10-41 Berechnung der Flugbahn

4 Zusammenfassung

Bei Alleinunfällen werden häufig umfangreiche Spurenbilder vorgefunden. Für eine Unfallrekonstruktion – insbesondere wenn damit gerechnet werden muss, dass keine brauchbaren Aussagen zum Unfallhergang gemacht werden – sind diese Spurenbilder umfassend zu sichern.

Speziell bei Hochgeschwindigkeitsunfällen oder wenn die Fahrzeuge zum Teil fliegen, werden für die Unfallrekonstruktion sowohl die Distanzen in der Horizontalen als auch Höhenunterschiede benötigt.

Die physikalischen Grundgesetze (Kurvengrenzgeschwindigkeit, Wurfparabel, Schwerpunktsbewegung) erlauben es meistens, die Eingangsgeschwindigkeiten mit den vorhandenen Anknüpfungstatsachen genügend genau zu bestimmen. Damit lassen sich häufig klare Aussagen zur Unfallursache machen.

B11 Überschlagunfälle

Pkw kollidiert mit einem Geländewagen

Dirk Christiaens

1 Sachverhalt

Der Unfall fand auf einer Schnellstraße im Bereich der Mündung einer Autobahnausfahrt statt. Die Unfallzeit war August an einem Feiertag um etwa 17:30 Uhr, bei klarem Wetter und trockener Fahrbahn. Der Fahrbahnbelag war Asphalt. Der Expressweg war die Vorfahrtstraße und es galt ein Geschwindigkeitslimit von 90 km/h.

Ein Landrover Defender befuhr die Schnellstraße. Neben dem Fahrer, 57 Jahre alt, war ein Insasse, 48 Jahre alt, anwesend im Landrover. Ein Pkw Ford Mondeo kam von der Autobahnausfahrt, rechts in der Fahrrichtung des Landrovers. Neben dem Fahrer (64 Jahre alt) war ein Insasse (66 Jahre alt) im Ford.

Es kam zu einem frontalen Anprall des Pkw Ford Mondeo gegen die rechte Flanke des Landrover Defender im Bereich des rechten Hinterrads.

Der Landrover hat sich im Auslauf übergeschlagen. Der Landrover-Fahrer wurde aus dem Fahrzeug geschleudert und verstarb an der Unfallstelle. Die Landrover Beifahrerin wurde leicht verletzt. Die Insassen des Pkw Ford Mondeo wurden nicht verletzt.

Der Ford-Mondeo-Fahrer behauptete in seiner Aussage, dass er am Ende der Ausfahrt angehalten habe. Er wollte auf dem Expressweg nach links weiter fahren. Er sah von links in der Ferne ein Fahrzeug ankommen, zweifelte und ist schließlich nicht weiter gefahren, weil das Fahrzeug sich zu schnell näherte. Er stand etwa 0,5 m auf der Hauptstraße. Er versuchte noch rückwärts zu fahren aber das Fahrzeug von links traf die Vorderkante seines Pkw und es kam sofort zum Überschlag.

2 Durchgeführte Maßnahmen/Aufgabenstellung/Lösungsweg

Vom Staatsanwalt wurde ein Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle an die Örtlichkeit gerufen. Die Spuren wurden photogrammetrisch vermessen. Markierungselemente wurden um die Spuren herum mit einer Spraydose auf der Fahrbahn angebracht und mit einem Messrad vermessen. Bilder der Spuren und Markierungselemente wurden mit einer Rollei d30 Messkamera und mit einer digitalen Kamera angefertigt. Die Bilder wurden aus einer Höhe von etwa 4,5 m stehend auf einem Feuerwehrwagen aufgenommen, auf dieser Weise konnten die Abstände zwischen den Markierungselementen mit etwa 10 m gewählt werden. Die Bilder wurden mit der Software RolleiMetric-MSR 4.2 entzerrt.

Die Unfallstelle wurde teilweise mit im Internet verfügbaren Luftbildern, teilweise durch örtliche Vermessung von relevanten Punkte und Abstände, in die Unfallskizze hinein gezeichnet. Diese Unfallskizze wurde mit dem Programm Carat-3 erstellt. In die Unfallskizze wurde das Gesamtbild mit der Entzerrung der Spurenbilder übergetragen.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_31

Auf Empfehlung des Gutachters wurden die Fahrzeuge sichergestellt. Die Leiche wurde auf extern warnehmbare Verletzungen untersucht.

Die Staatsanwaltschaft gab ein Gutachten in Auftrag, in welchem zum technischen Zustand der Fahrzeuge, zu deren Kollisionsanordnung und Fahrrichtungen und zu deren Geschwindigkeiten Stellung genommen werden sollte.

Am Sicherstellungsort wurden zunächst die Fahrzeuge weiter untersucht und fotografiert. Die Wirkung der Bremsen und Lenkung wurde untersucht, Reifenmerkmale wurden notiert. Spuren an den Reifen und Rädern des Landrover und Schlagspuren an der Karosserie wurden mit den Spuren auf der Fahrbahnoberfläche in Zusammenhang gebracht.

Im Rahmen der an den Fahrzeugen durchgeführten Untersuchungen wurden keine technischen Mängel festgestellt.

Die Kollisionsgeschwindigkeiten wurden mit dem Simulationsprogramm PC-Crash 7.3 bestimmt.

3 Objektive Merkmale

Tabelle B11.1 Allgemeine Fahrzeugdaten

Parameter	Einheit	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2
Fahrzeugart		Offroader -Allrad	Pkw
Alter des Fahrzeugführers	a	57	64
Fabrikat		Landrover	Ford
Typ		Defender 3-türig	Mondeo
Erstzulassung		05.2002	05.1995
Antriebsart		Diesel	Diesel
Leistung	kW	90	65
Hubraum	cm^3	2.492	1.753
Länge	mm	3.883	4.481
Breite	mm	1.790	1.747
Höhe	mm	2.076	1.372
Radstand	mm	2.360	2.704
Überhang vorne	mm	720	780
Spurweite vorne	mm	1.486	1.503
Spurweite hinten	mm	1.486	1.487
Reifen		LT235 85R16 120/116Q	185 65R14 86T
Leermasse	kg	1.740	1.290
Beladung	kg	150	150

Die Beschädigungen und Kontaktpunkte am Pkw Ford Mondeo befinden sich im Vorbaubereich (**Bild B11-1**). Die Stoßstange, der Kühlergrill und der rechte Scheinwerfer wurden abgerissen. Das Querprofil hinter der Stoßstange und die Motorhaube wurden in einem Bereich rechts der Fahrzeuglängsachse eingedrückt (**Bilder B11-2** und **B11-3**). Der rechte Kotflügel ist

ausgeknickt. Vorne auf der Motorhaube befinden sich Reifenkontaktspuren, die vom rechten Hinterrad des Landrover stammen.

Am Offroadfahrzeug Landrover wurden diverse Beschädigungen verursacht durch mehrere Überschläge um die Längsachse des Fahrzeugs festgestellt: Eindrückung des Dachs und Bruch von fast aller Glasscheiben, ausgeprägte Kratzspuren an der A-Säule links und an den Dachkanten links und rechts, abgebrochene Dachstützen vorne (in massiv Aluminium), Beulen und Kratzspuren am Dach und oben im vorderen Bereich der Motorhaube und der Kotflügel, Kratzspuren vorne und hinten an den Flanken. Anzumerken ist noch dass die Landrover Karosserie aus Aluminium verfertigt ist.

Am rechten Hinterrad des Landrover befinden sich die Spuren, welche durch den Kontakt mit dem Pkw Ford verursacht wurden: Reibspuren an der Reifenflanke, Schnitte in der Reifenflanke und Druckverlust des Reifens, braun-rote Farb- und Lackablagerung am Felgerand (**Bild B11-5**). Es gibt ebenso leichte Kratzspuren und braun-rote Farbablagerungen am Schweller vor dem rechten Hinterrad (**Bild B11-6**). Wegen der hohen Struktursteifigkeit des Landrover im Kontaktbereiche gibt es hier keine Deformationen von Bedeutung in der Kontaktzone an der rechten Flanke des Landrover.

Bei den Überschlägen um die Längsachse ist der Landrover nicht nur mit dem Dach sondern auch mit den Rädern auf die Fahrbahnoberfläche geschlagen und so entstanden Kratzspuren an den Felgen (**Bild B11-5**) oder am Felgenhorn der Räder (**Bild B11-11**). Das linke Vorderrad ist schief eingedrückt.

Auf der Reifenflanke des linken Hinterrads ist eine Ablagerung von Blut sichtbar (**Bild B11-15**). Der Landrover-Fahrer erlitt tödliche Kopfverletzungen und es zeigte sich, dass er bei den Überschlägen aus dem Fahrzeug geschleudert wurde und zwischen Fahrzeug und Fahrbahnoberfläche eingeklemmt wurde. Bei der Untersuchung wurden keine Reib- oder Schürfspuren am Fahrergurt oder an dessen Schnalle festgestellt, sodass zweifellos gesagt werden kann dass der Landrover-Fahrer den Gurt nicht getragen hatte. Die Beifahrerin ist während der Überschläge im Fahrzeug verblieben. Sie erklärte nach dem Unfall dass sie den Gurt angelegt hatte. Im Kontaktbereich Gurt/Schnalle des Beifahrergurtes zeigten sich die typischen Reibspuren, die diese Aussage bestätigen.



Bild B11-1 Der Ford Mondeo ist frontal beschädigt, graduell zunehmend von links nach rechts. Auffällig sind die Reifenkontaktspuren an der Motorhaube.

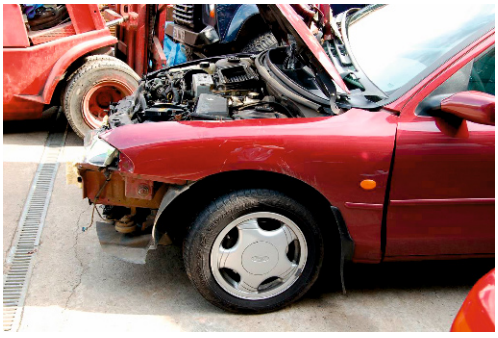


Bild B11-2 Die linke Vorderflanke des Ford Mondeo wurde noch nicht vom Landrover getroffen.

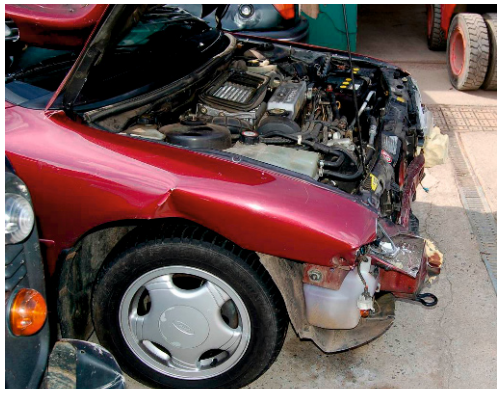


Bild B11-3 Ford Mondeo: Frontale Eindrückung rechts



Bild B11-4 Landrover – rechte Flanke



Bild B11-5 Kontaktspuren und braun-rote Lackablagerung vom Ford an Reifen und Felge des rechten Hinterrads; Kratzspuren an der Felge



Bild B11-6 Braun-rote Lackablagerung vom Ford am rechten Schweller des Landrover



Bild B11-7 Landrover; linke Flanke



Bild B11-8 Spuren beim Anfang der Überschlage

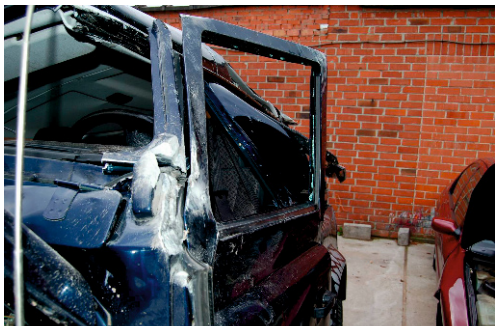


Bild B11-9 A-Säule; Schürfspuren

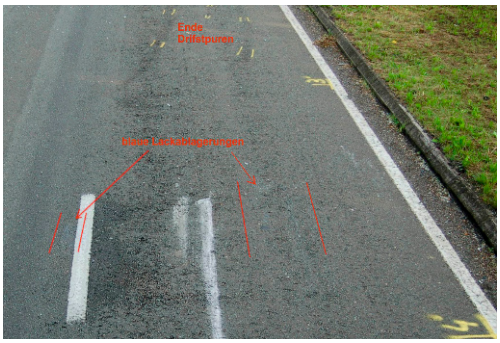


Bild B11-10 Kratzspur der A-Säule des Landrover



Bild B11-11 Rad links vorne des Landrover: Kratz- und Schlagspuren am Felgerand

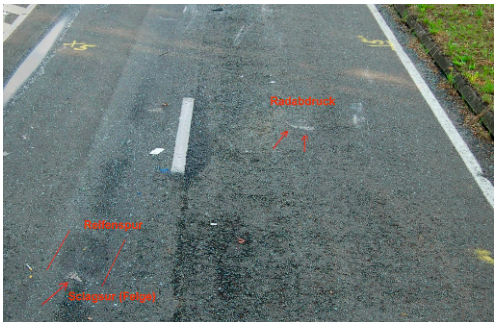


Bild B11-12 Radabdruck des rechten Hinterrads (**Bild B11-5**); Reifenspur und Schlagspur des linken Vorderrads des Landrover



Bild B11-13 Verformung des Dachs



Bild B11-14 Endlage der Frontscheibe; Glassplitterfeld



Bild B11-15 Endlage Landrover-Fahrer, Endlage Landrover



Bild B11-16 Landrover: Rad hinten links; Blutspur



Bild B11-17 Spuren an der Kollisionsstelle



Bild B11-18 Landrover: Schadenbild Front und Dach



Bild B11-19 Reibspuren im Kontaktbereich Gurt/Schnalle des Beifahrergurtes



Bild B11-20 Fehlende Reibspuren an der Schnalle des Fahrergurtes

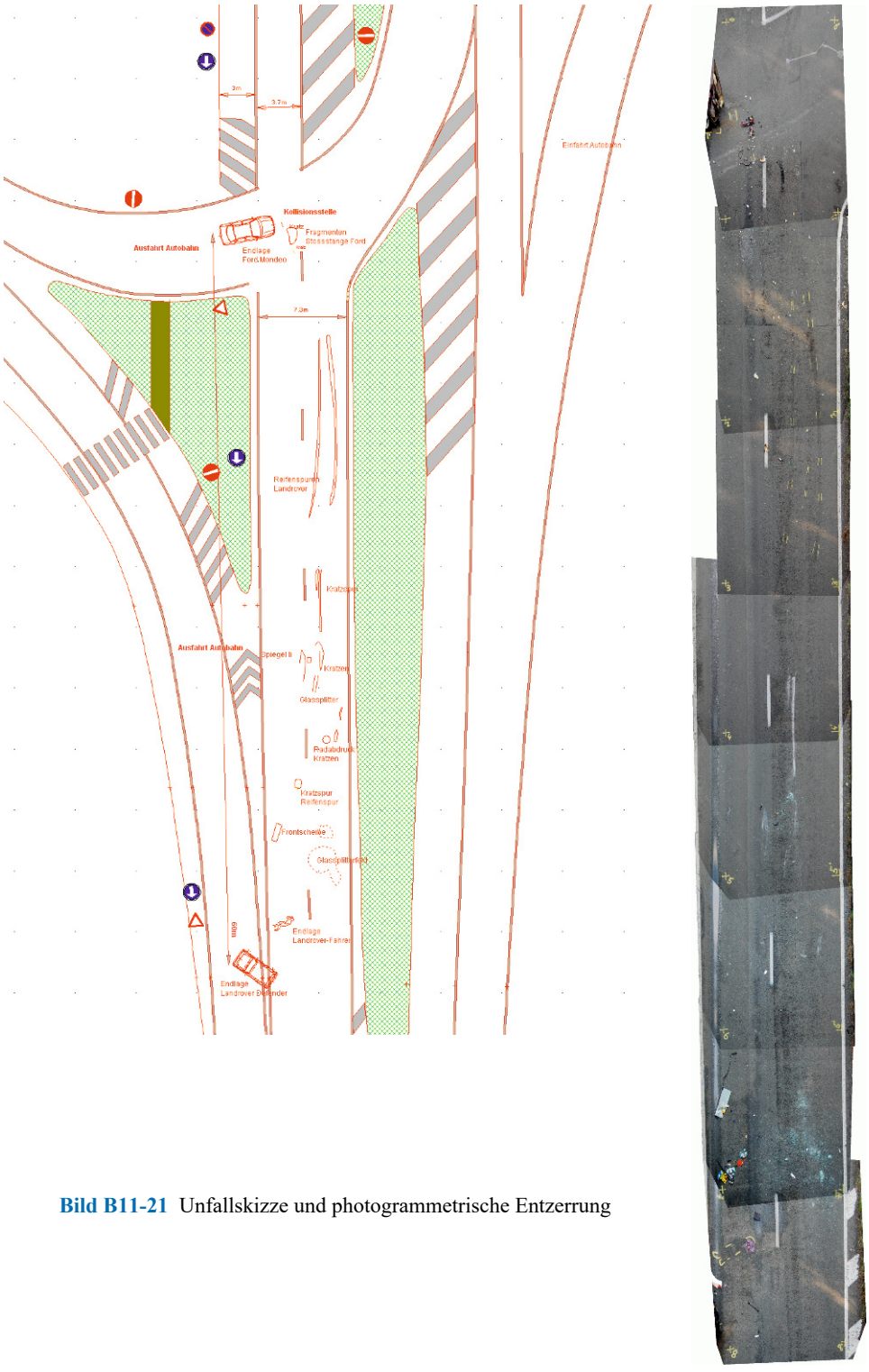


Bild B11-21 Unfallskizze und photogrammetrische Entzerrung

4 Analyse

4.1 Bewegungsabläufe/Kollision

Anhand der Beschädigungsmerkmale an den Fahrzeugen zeigte sich dass der Ford den Landrover frontal in der rechten Flanke im Bereich des rechten Hinterrads getroffen hat. Der Vorderbau des Ford wurde dabei deutlich eingedrückt. Nach der Kollisionsstelle wurden vom Landrover auf der Fahrbahnoberfläche zwei Driftspuren gezeichnet (**Bild B11-8**, **Bild B11-17**), die etwa 23 m weiter beim umkippen des Landrover enden und die darauf hindeuten, dass der Landrover infolge der Kollision in eine Rotation um die Z-Achse im Uhrzeigersinn versetzt wurde. Die Aussage des Ford-Fahrers, er sei zum Zeitpunkt der Kollision schon zum Stillstand gekommen, findet also keine Bestätigung in den objektiven Feststellungen. Zum Zeitpunkt der Kollision bewegte sich der Ford vorwärts. Die Lage der Spuren vor der Kollision und die Endlage des Ford führen zu dem Schluss, dass sich der Ford nach der Kollision wieder rückwärts bewegt hat von der Kollisionsstelle in seine Endlage.

Am Ende seiner Driftspuren ist der Landrover umgekippt auf die linke Flanke. Dabei entstand zuerst eine etwa 5 m lange Kratzspur, offensichtlich stammend von dem Bereich der A-Säule und der Spiegelstütze des Landrover (**Bild B11-8** bis **B11-10**). Auch aus der PC-Crash Simulation der Überschläge ergibt sich, dass der Landrover beim Umkippen etwa mit der A-Säule diese Kratzspur auf der Fahrbahn verursacht (Position 2 im **Bild B11-23**).

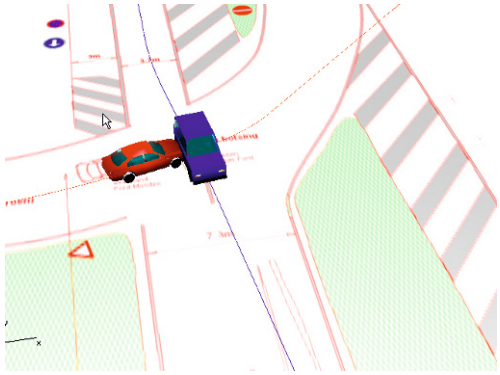


Bild B11-22 Kollisionsanordnung Ford/Landrover

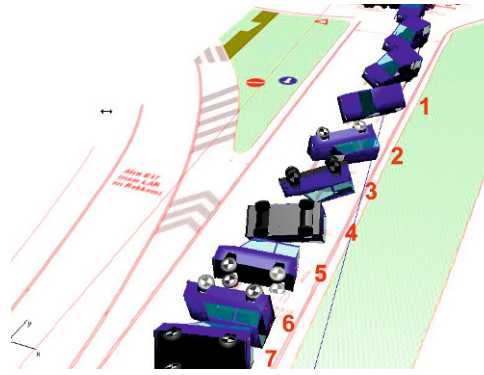


Bild B11-23 Anfang der Überschlagbewegung

Die Anzahl der Überschläge des Landrovers kann aus den Spuren auf der Fahrbahnoberfläche abgeleitet werden.

Der linke Außenspiegel ist abgebrochen als der Landrover das erste Mal auf die linke Flanke umkippte, dieser ist dann noch etwas weiter gerutscht, bis zu seiner Endlage etwas neben der Kratzspur seiner Stütze an der A-Säule (Positionen 2 und 3 im **Bild B11-23**).

Etwa 6,5 m hinter der Endlage des linken Spiegels auf der Fahrbahn gibt es einen deutlichen Radabdruck auf der Fahrbahnoberfläche, bestehend aus zwei konzentrischen kreisförmigen Kratzern (**Bild B11-12**). Dieser Radabdruck ist dem rechten Hinterrad des Landrover zuzuweisen, weil dieses Rad ebenso kreisförmig und konzentrisch Kratzspuren über seinem Umkreis aufweist (**Bild B11-5**). Dieser Radabdruck bestimmt die Position 5 des Landrover im Bild oben. Die Reifenspur mit Schlagspur von **Bild B11-12** ist dem linken Vorderrad des Landrover zuzuweisen, dessen Felgerand lokal Kratzspuren aufweist (**Bild B11-11**).

Das Glassplitterfeld ist entstanden als der Landrover zwischen den Positionen 6 und 7 im Bild oben nochmals auf das Dach kippte und die hinteren Glasscheiben zerbrachen (**Bild B11-13** und **B11-14**). Es soll dabei beachtet werden, dass auch die Glassplitter zu diesem Moment noch eine Geschwindigkeit haben und also daher weiter vorwärts über die Fahrbahnoberfläche bis ihre Endlage geschleudert werden.

Die Blutspur am linken Hinterrad des Landrover ist mit der Endlage des tödlichen Opfers zu verknüpfen. Das heißt, dass der Landrover zwischen Position 7 im Bild oben und der Endlage des Opfers sich nochmals mindestens um eine halbe Umdrehung gedreht hat, wenn nicht um anderthalb Umdrehungen. Anschließend hat sich der Landrover nochmals um drei Viertel Umdrehung um seine Langsachse gedreht, um in seiner Endlage auf seinen vier Rädern zu landen.

Der Landrover hat also mindestens drei vollständige, möglicherweise vier Umdrehungen um die Langsachse bei den Überschlägen durchgeführt.

4.2 Geschwindigkeitsberechnungen

Die Kollisionsgeschwindigkeiten können am besten mit einem Simulationsprogramm berechnet werden. Der Verlauf der Driftspuren des Landrover nach der Kollisionsstelle und die Spuren beim ersten Überschlag bilden ein Kriterium zur Bewertung. Man muss bei der Simulation der Kippbewegung bedenken, dass nicht alle Parameter, auch nicht alle Fahrzeugdaten des überschlagenden Fahrzeugs genau bekannt sind. Insbesondere der Kraftschluss der Reifen, die Schwerpunktshöhe des Fahrzeugs und die Steifigkeit seiner Federung, aber auch das Wankträgheitsmoment, die Chassiseigenschaften wie Reibung, k-Faktor, Steifigkeit, sind Parameter, deren Werte in der Simulation überprüft werden sollen und die das Kippen und die Auslaufbewegung beeinflussen. Und selbst dann ist es nicht immer möglich, in der Simulation alle Überschläge exakt nachzubilden. Während der Überschläge ändern sich durch die Beschädigung die Fahrzeugparameter etwas gegenüber den Werten, mit denen die Simulation begonnen wurde.

Eine Simulation mit dem Programm PC-Crash 7.3 führt zu folgende Kollisionsgeschwindigkeiten:

- Kollisionsgeschwindigkeit des Ford Mondeo: 23 km/h +/–10 %
- Kollisionsgeschwindigkeit des Landrover: 87,5 km/h + 5 %/–10 %

Die Kollision mit dem Ford Mondeo war eine Abgleitkollision.

In Bezug auf die Simulationsparameter kann noch angemerkt werden: Je höher der Kraftschluss der Reifen, je höher der Schwerpunkt, je härter die Federung, desto leichter kippt das Fahrzeug.

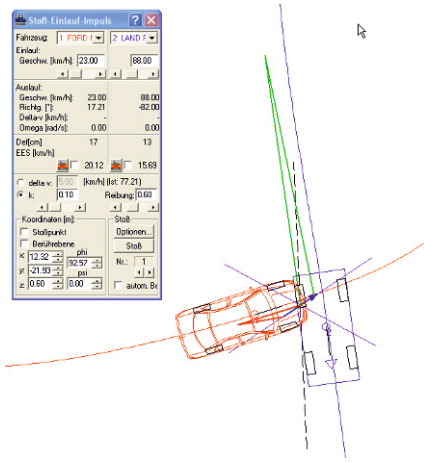
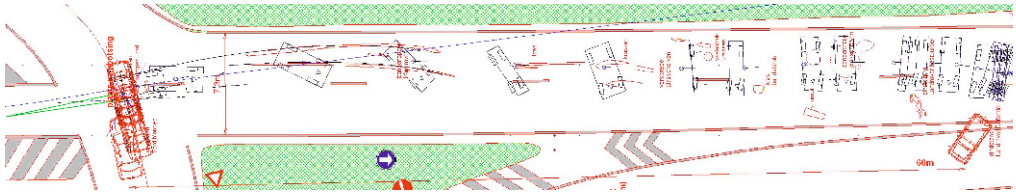


Bild B11-24 Kollisionsdiagram und Auslaufstrecken



4.3 Vermeidbarkeit

Der Landrover-Fahrer fuhr eine Geschwindigkeit die sich noch unter dem örtlichen Limit befand. Andererseits fuhr der Ford bereits über eine kurze Strecke in die Fahrbahn des Landrover ein. Offensichtlich ist der Landrover-Fahrer noch etwas nach links ausgewichen. Für den Fahrer des Landrover war der Unfall nicht vermeidbar.

Für den Fahrer des Ford war der Unfall vermeidbar, der Landrover war schon über eine weite Strecke sichtbar.

B12 Beispiele zu Insassenverletzungen

Beweissicherung und Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen mit unklarer Sitzposition

Christian Tschirschwitz, Dr. Jan Dreßler

1 Einleitung

Straßenverkehrsunfälle mit unklarer Sitzposition stellen sowohl Polizeibeamte als auch technische und medizinische Sachverständige vor eine große Herausforderung. Einerseits besteht ein hohes öffentliches Aufklärungsinteresse beispielsweise dann, wenn im Rahmen des Unfallgeschehens Todesopfer zu beklagen sind. Andererseits bedarf es einer lückenlosen Beweiskette, um einer Person den Vorwurf zu machen, dass sie zum Zeitpunkt des Unfalls am Steuer gesessen hat.

Die Vergangenheit hat gezeigt, dass es oft nur durch die zeitnahe Zusammenarbeit von Sachverständigen verschiedener Wissenschaftszweige möglich war, ein umfassendes Gesamtbild hinsichtlich des Unfallablaufes liefern zu können.

Oft scheint die Sache klar zu sein: Der Tote ist Halter des Fahrzeugs und liegt neben der Fahrertür. Der überlebende Zeuge, ebenfalls aus dem Fahrzeug geschleudert, schildert glaubhaft, er sei der Beifahrer gewesen. Eine auf diese Aussage aufbauende erste polizeiliche Feststellung der Fahrereigenschaft ist oft die Weichenstellung dahingehend, ob weitere strafprozessuale Maßnahmen eingeleitet werden oder nicht.

Die Praxis hat auch gezeigt, dass die Unfallaufnahme weniger vorangetrieben wurde, nachdem eine Person an der Unfallstelle eingeräumt hatte, der Fahrer zu sein. Wenn ein derartiges „Geständnis“ gegebenenfalls erst im Rahmen der Hauptverhandlung widerrufen wird, sind dann nahezu keine Möglichkeiten mehr vorhanden, die Fahrerfrage beweissicher zu klären.

Oftmals wird an der Unfallstelle verkannt, dass durch schwer nachzuvollziehende Insassenrelativbewegungen, durch Unfälle in mehreren Phasen mit verschiedenen Einzelkollisionen, durch Rettungsmaßnahmen aber auch durch bewusste Manipulation anhand der vorgefundenen Situation nicht zwingend auf eine Fahrereigenschaft geschlossen werden kann.

Wenn bei dieser Ausgangslage nicht unverzüglich eine präzise Spurensicherung am Unfallort, an den Fahrzeugen sowie den Insassen angeordnet und durchgeführt wird, ist es im Nachhinein oft nicht mehr möglich, eine zweifelsfreie Aussage zu den Sitzpositionen im Fahrzeug zu treffen, da relevante Spuren an der Unfallörtlichkeit sowie am Fahrzeug im Zuge der Beräumungsmaßnahmen in nicht wenigen Fällen vernichtet werden.

Anhand von Fallbeispielen wollen die Autoren in diesem Kapitel ihre Erfahrungen weitervermitteln, welche sie bei der gemeinsamen Analyse von Realunfällen gewonnen haben, und gleichzeitig eine Sensibilisierung derjenigen Personengruppe erreichen, welche angefangen von der Unfallaufnahme bis zur straf- und zivilrechtlichen Bearbeitung mit Unfällen in Berührung kommen, bei welchen sich Probleme hinsichtlich der Sitzposition der Insassen herausstellen könnten.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_32

2 Fallbeispiel 1

2.1 Ausgangssituation

Ein mit drei Jugendlichen besetzter Pkw wurde durch ein Polizeieinsatzfahrzeug auf einer innerörtlichen Fahrbahn verfolgt. Dabei kam es zu einer rechtsexzentrischen Frontalkollision mit einem entgegenkommenden Einsatzfahrzeug der Polizei. Der betreffende Pkw wurde um 180° im Uhrzeigersinn ausgedreht und kam auf der rechten Flanke zur Endposition (**Bild B12-1**). Die Insassen waren zwischenzeitlich in medizinische Einrichtungen verbracht worden. Ein Teil der Rettungskräfte (Feuerwehr) hielt sich noch am Unfallort auf.



Bild B12-1 Unfallendsituation im Fall 1

2.2 Ablauf der Beweissicherung

Zunächst wurden die noch am Unfallort anwesenden Rettungskräfte hinsichtlich der Auffindsituation der Insassen befragt. Diese gaben an, dass sich Insasse A mit vergleichsweise leichten Verletzungen außerhalb des Fahrzeugs befunden hat. Die Auffindpositionen der Insassen B und C wurden beschrieben bzw. im Fahrzeug demonstriert. Die ersten Feststellungen, welche sodann auch in Zeugenvernehmungen festgehalten wurden, sind in **Bild B12-2** dargestellt. Während der Unfallaufnahme wurde bekannt, dass der Insasse B seinen Verletzungen erlegen ist. Noch an der Unfallörtlichkeit wurden prädestinierte Fahrzeugstrukturen im Innenraum hinsichtlich möglicher Kontaktspuren (Fasern, Blutantragungen, sowie Kopfhaareinpressungen in der Frontscheibe) untersucht. Wohl auch vor dem Hintergrund, dass es hier während des Kollisionsauslaufes gleichzeitig zu Rotationen um die Hochachse sowie die Längsachse kam, waren im Innenraum keine derart klassischen Kontaktpunkte feststellbar. Bei der weiteren Untersuchung des Innenraumes fiel auf, dass unterhalb des Fahrersitzes von der Rücksitzbank aus ein Sportschuh dynamisch, d. h. mit großer Kraft, eingepresst war (**Bild B12-3**).

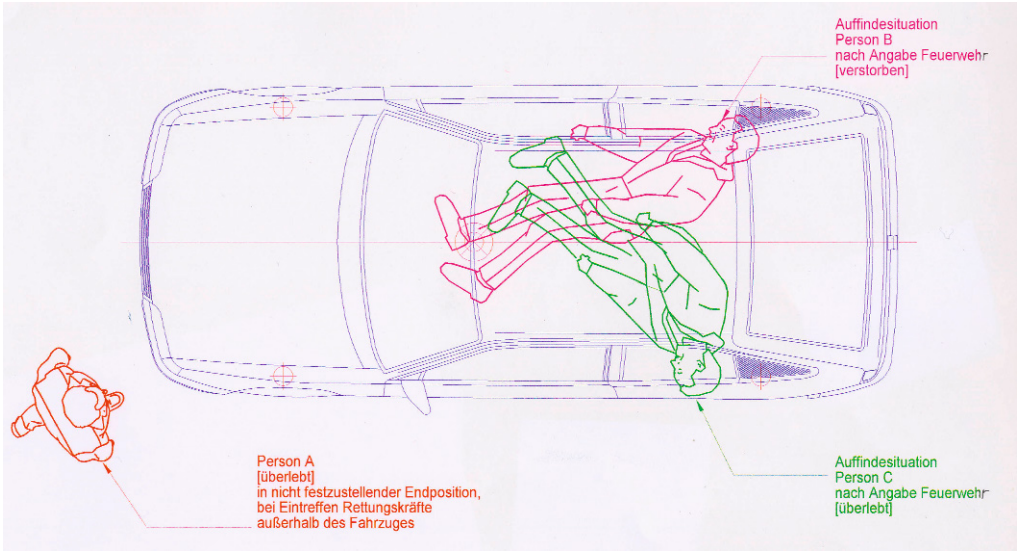


Bild B12-2 Auffindposition der Insassen im Fall 1



Bild B12-3 Innenraumsituation im Fall 1. Unterhalb von Fahrersitz eingeklemmter Schuh vom Insassen C

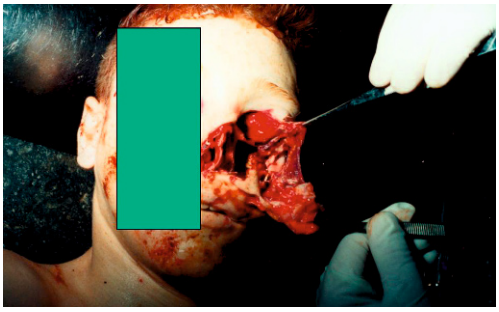


Bild B12-4 Massive Gesichtsschädelverletzungen des Insassen B

Da der Träger dieses Schuhwerkes als Fahrer ausschied, erfolgte unverzüglich eine entsprechende Untersuchung der bereits sichergestellten Oberbekleidung aller drei Insassen. Es wurde ermittelt, dass Insasse C mit nur dem anderen zugehörigen Schuh eingeliefert wurde und so als gesichert anzusehen war, dass dieser hinten links im Fahrzeug Platz genommen hatte. Die Sitzverteilung zwischen A und B war bis zum Abschluss der Unfallaufnahmemaßnahmen unklar, zumal A zwischenzeitlich angegeben hatte, nicht gefahren zu sein. Insofern konzentrierten sich nunmehr die weiteren Untersuchungen auf das Verletzungsbild des Insassen B. Im Rahmen der Obduktion beeindruckte ein offene Gesichts- und Hirnschädelfraktur mit Großhirnlazerationen im Sinne einer Pfählungsverletzung (**Bild B12-4**). Auch dem zur Obduktion anwesenden technischen Sachverständigen war es anhand des bislang vorliegenden Fotomateriales sowie aus eigener Erinnerung nicht möglich, diese massiven Gesichtsverletzungen einem kontaktbevorzugten Innenraumbauteil zuzuordnen. Da eine Verletzungszuordnung auf andere Art und Weise nicht zu realisieren war, wurde der Pkw noch während der gerichtsmedizinischen Untersuchungen ans Institut gebracht, sodass nunmehr eine wechselseitige Analyse von Traumatisierungen und von möglichen Fahrzeugbauteilen erfolgen konnte. Bereits nach kurzer Zeit

wurde herausgefunden, dass die Verletzungen des Insassen B durch die rechte hintere Ecke der kollisionsbedingt abgerissenen Motorhaube verursacht worden sind, welche während des Zusammenstoßes in den Innenraum gedrückt worden war. Dies ließ sich insbesondere anhand der Tatsache ermitteln, dass sich an der Motorhaubenecke Blut- und Gewebespuren mit einer Ausdehnung von ca. 10 cm Tiefe befanden (**Bilder B12-5** und **B12-6**). Zudem wurden Lacksplitter in der Kopfhöhle des Insassen B vorgefunden. Eine molekulargenetische Untersuchung des Spurmateriales an der Motorhaubenecke ergab eine Übereinstimmung mit Person B.



Bild B12-5 Beschädigungen im Fall 1 mit gekennzeichneter Motorhaubenecke



Bild B12-6 Motorhaubenecke mit organischem Spurmaterial (Blut; Sekrete) – Insasse B zugeordnet

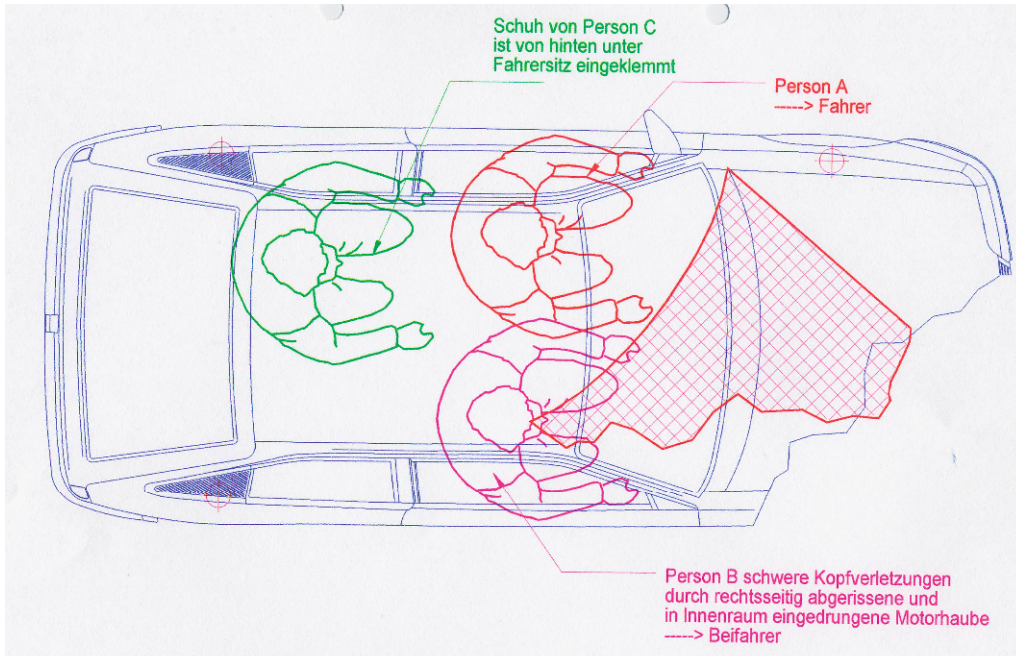


Bild B12-7 Rekonstruierte Sitzpositionen im Fall 1

Aufgrund der Tatsache, dass linksseitig noch eine Befestigung der Motorhaube vorlag, konnte diese faktisch nur den Gesichtsbereich des Beifahrers erreichen. Der Insasse B muss folglich in der Eigenschaft als Beifahrer im beteiligten Pkw mitgefahren sein. Somit war nachgewiesen, dass die Person A zum Zeitpunkt des Unfalls am Steuer saß (**Bild B12-7**).

3 Fallbeispiel 2

3.1 Ausgangssituation

Auf einer innerörtlichen Bundesstraße kam es zu einer rechtsexzentrischen Frontalkollision eines Pkw mit einem am linken Fahrbahnrand stehenden Baum. Durch die Kollision wurde der Insasse E aus dem Fahrzeug geschleudert, der Insasse D wurde schräg auf dem Beifahrersitz vorgefunden. Beide Personen waren erheblich alkoholisiert. Insasse E gab gegenüber Zeugen an, nicht gefahren zu sein. Es erfolgte polizeilicherseits eine eher mäßige fotografische Dokumentation des Unfallgeschehens. Vermessungen am Unfallort wurden nicht durchgeführt.

3.2 Ablauf der Beweissicherung

Für die unfallaufnehmenden Polizeibeamten stand fest, dass Insasse D der Beifahrer gewesen sein musste, da dieser ja nachkollisionär auf dem Beifahrersitz vorgefunden wurde und aus Erfahrung der Polizeibeamten bei einer Frontalkollision die Insassen tendenziell nach vorn geschleudert werden. Diese Tatsache wurde dadurch untermauert, dass eine im Beifahrerbereich an der Frontscheibe vorgefundene Blutantragung molekulargenetisch dem Insassen D zugeordnet wurde. Nachdem Person E erstinstanzlich verurteilt wurde und gegen das Urteil Rechtsmittel einlegte, wurde am Berufungsgericht ein technischer Sachverständiger hinzugezogen. Bereits nach erster Analyse des polizeilichen Lichtbildmateriales wurden Schleuderspuren festgestellt, welche polizeilicherseits ebenfalls nicht erkannt und demzufolge auch nicht vermessen wurden. Die nachträgliche Rekonstruktion des Spurenaufkommens und der Endstellung des Pkw gelang anhand der noch ersichtlichen Fugen zwischen den Betonplatten, aus welchen die Fahrbahn bestand.

So konnte im Nachhinein eine maßstabsgerechte Zeichnung angefertigt werden, in welche auch die Endpositionen der Insassen entsprechend den Zeugenfeststellungen eingetragen werden konnten (**Bild B12-10** in Verbindung mit **Bild B12-8**). Nach Zuordnung der Spuren zu den Einzelrädern ergab sich im Hinblick auf den Deformationsverlauf am Pkw (**Bild B12-9**), dass das Fahrzeug bereits vor der Kollision gegenüber der Geschwindigkeitsrichtung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn ausgedreht war und so mit einem nicht unbeträchtlichen Schwimmwinkel an den Baum prallte. Anhand dieser Kollisionsstellung war eine Insassenrelativbewegung schräg nach rechts vorn bezüglich des Pkw abzuleiten. Das heißt, der Fahrer bewegte sich in Richtung der Position, an welcher an der Frontscheibe die Blutspur festgestellt wurde. Der Beifahrer wurde tendenziell schräg gegen die Beifahrertür geschleudert. In Verbindung mit der Tatsache, dass diese Tür von innen nach außen aufgedellt war (**Bild B12-8**) und vor dem Hintergrund der Endposition der Person E in der nachvollziehbaren Abwurfrichtung konnte bereits nach konventioneller Analyse davon ausgegangen werden, dass Person E während der Kollision auf dem Beifahrersitz Platz genommen hatte. Weiterhin war es nicht möglich, dass der Beifahrer unmittelbar nach der Kollision mit der Frontscheibe im mittleren Beifahrerbereich Kontakt haben konnte. Hierfür kam nur der Fahrer in Betracht. In Verbindung mit der bereits durchgeführten DNA-Analyse war es somit nicht möglich, dass E die Blutspur gesetzt hatte. Er wurde in zweiter Instanz freigesprochen. Im Rahmen des nunmehr gegen D eingeleiteten Ermittlungsverfahren erfolgte eine rechnergestützte Rekonstruktion des Unfalls mittels der Simulationssoftware PC-Crash [5] unter Verwendung von Mehrkörpersystemen. Zunächst wurde der sich aus den Spuren ergebende Bewegungsablauf des Pkw nach dem Vorwärtsverfahren nochmals analysiert (**Bild B2-11**).



Bild B12-8 Unfallendsituation im Fall 2 mit Schleuderspuren (Pfeile)



Bild B12-9 Beschädigungen am Fahrzeug im Fall 2

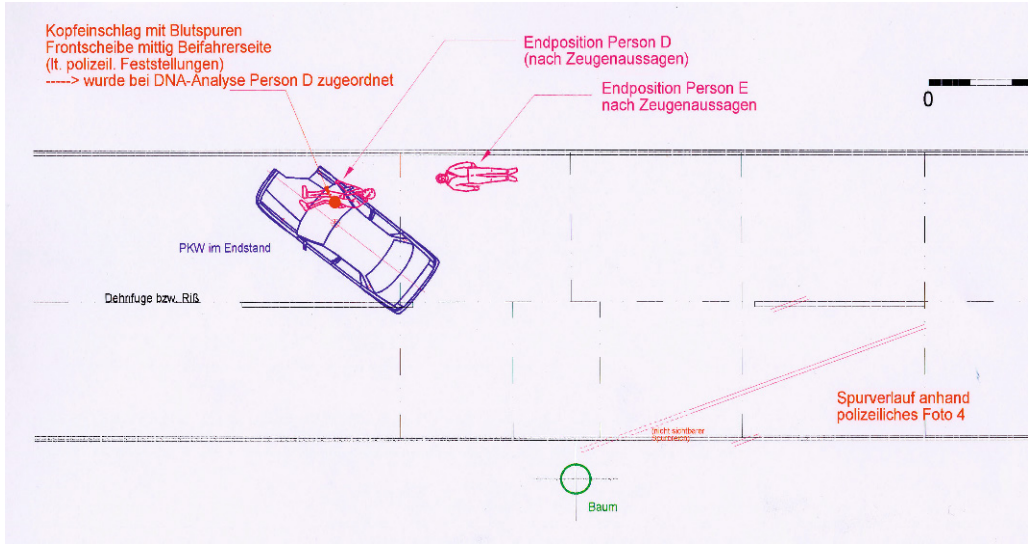


Bild B12-10 Anhand von Akteninhalt erstellte Unfallzeichnung im Fall 2

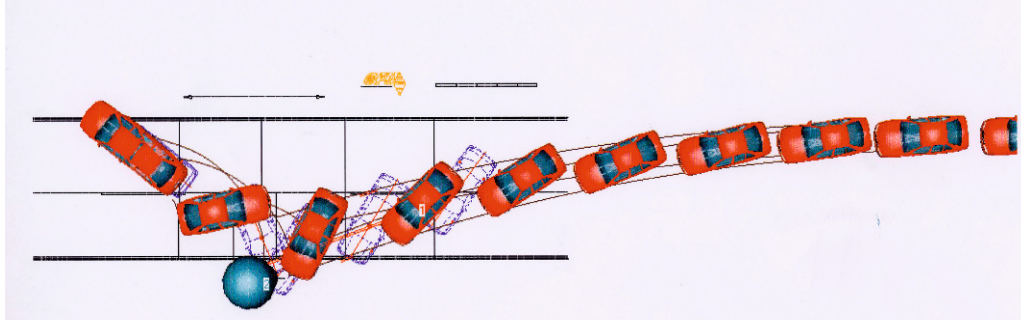


Bild B12-11 Nach Vorwärtsverfahren rekonstruiertes Bewegungsverhalten im Fall 2

Der Einsatz des Mehrkörpersystems zeigte eindrucksvoll die Auswanderungstendenz der Insassen (**Bild B12-12**). Der Fahrer bewegte sich mit dem Kopf nahezu exakt in die Position, an welcher die Blutablagerung an der Frontscheibe vorgefunden wurde. Der Beifahrer prallte nach rechts vorn gegen die Beifahrertür. Der Insasse D wurde rechtskräftig verurteilt.

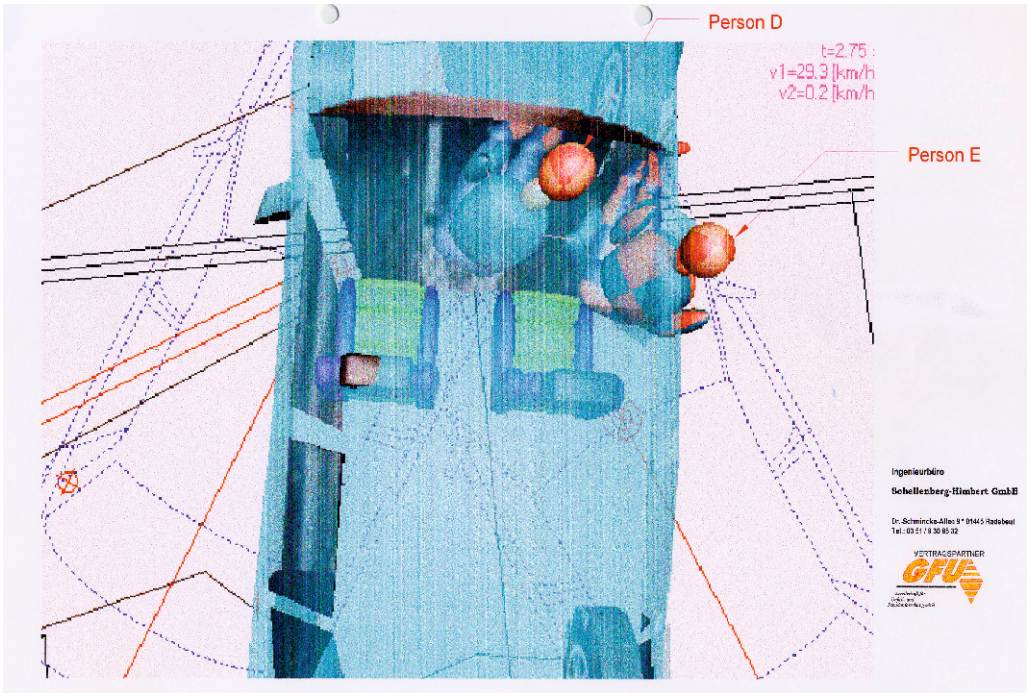


Bild B12-12 Mit Mehrkörpersystemen rekonstruiertes Bewegungsverhalten im Fall 2

4 Fallbeispiel 3

4.1 Ausgangssituation

Ein mit zwei Insassen besetzter Pkw kam von der Fahrbahn ab, prallte frontal gegen eine quer verlaufende Böschung (**Bild B12-13**) und kam etwa in Kollisionsposition zum Stillstand. Das Fahrzeug war frontal gleichmäßig erheblich deformiert (**Bild B12-14**). Beim Eintreffen der Rettungskräfte befanden sich beide Insassen in undefinierter Position außerhalb des Fahrzeugs. Person F verstarb während der Reanimationsmaßnahmen. Der schwer verletzte Insasse G gab an, nicht gefahren zu sein.



Bild B12-13 Unfallstelle im Fall 3



Bild B12-14 Beschädigtes Fahrzeug im Fall 3



Bild B12-15 Innenraumsituation im Fall 3 mit markierten Einzelspuren und unsachgemäß abgelegten Fahrzeugtrümmern (rechts)

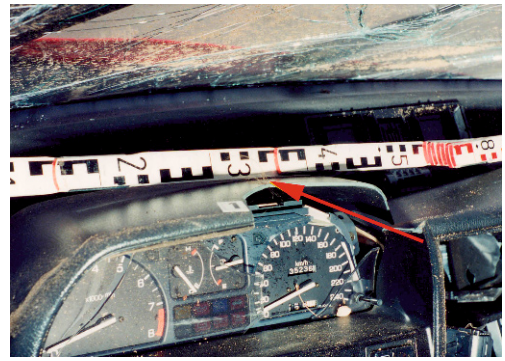


Bild B12-16 Geformte Zersplitterung der Armaturenabdeckung mit Kopfhaareinpressungen (Pfeil)

4.2 Ablauf der Beweissicherung

Hier wurde kein technischer Sachverständiger zur Unfallaufnahme herangezogen. Die Beauftragung erfolgte am Folgetag. Eine erste Besichtigung des Unfallortes gab nur den Aufschluss, dass sich beide Insassen aufgrund des Frontalaufpralles mit 100%iger Überdeckung nahezu fahrzeuglängsachsenparallel nach vorn bewegt haben mussten. Im unmittelbaren Anschluss

wurde der Pkw in Augenschein genommen. Hier musste jedoch festgestellt werden, dass der Großteil der unfallbedingt abgetrennten Fahrzeugbauteile sowie medizinischer Restmüll in den Innenraum geworfen wurden und sich so die Suche und Zuordnung relevanter Spuren sehr kompliziert gestaltete. Es wurden vorerst alle gegebenenfalls zugehörigen Materialspuren wie Blut, Haare und Textilgewebe im Innenraum markiert, vorab hinsichtlich deren Entstehungsmöglichkeit beurteilt, vermessen und fotografisch dokumentiert. Es hat sich erwiesen, dass aufgrund der unsachgemäßen Innenraumbehandlung nach den Unfallaufnahmemaßnahmen eine Vielzahl von Spuren zerstört war oder deren ursprüngliche Position nach dem Unfallgeschehen nicht mehr rekonstruiert werden konnte. Einen Eindruck von der Situation im Innenraum gibt das **Bild B12-15**. Bei einer Einpressung von Kopfhaaren in der geformt zersplitterten Armaturabdeckung zwischen Lenkrad und Frontscheibe konnte es sich demgegenüber nur um kollisionsbedingt angetragenes Material handeln, da zum Aufspreizen des Bauteiles und Einlagern der Spuren eine nicht unerhebliche Kraft notwendig war (**Bild B12-16**). Somit konzentrierte sich nunmehr die weitere Untersuchung auf den Träger dieses Spurmateriales, da hinsichtlich der Anstoßkonstellation nur dieser die Fahrerfunktion inne gehabt haben konnte. Zwar wies der getötete Insasse F massive Gesichtsschädelverletzungen auf, im in Frage kommenden Haaransatzbereich waren jedoch keine Kontaktmerkmale erkennbar. Im Rahmen der Obduktion wurden bei dem Getöteten sowohl Blut als auch Kopfhaar als Vergleichsmaterial sichergestellt. Im weiteren Verlauf der Begutachtung wurde der überlebende Insasse G durch einen Rechtsmediziner während der stationären Behandlung vor allem hinsichtlich äußerer Verletzungsspuren untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass sich im linken vorderen Haaransatzbereich eine oberflächige Verletzung der Kopfschwarte befand (**Bild B12-17**). Bei dieser Wunde handelt es sich um eine Bagatellverletzung, die aus der Sicht des Klinikers nur von geringfügigem therapeutischem Interesse ist. Die genauere Beschreibung solcher Wunden (Art, Größe, Lokalisation, Alter u. a.) findet sich später zumeist nicht in den Behandlungsunterlagen. Aus forensischer Sicht können aber gerade diese Verletzungen, wie im vorgestellten Fall, für die Unfallrekonstruktion von großer Bedeutung sein.

So wurde bei Adaptation der Kopfverletzung zu der Position der Haaranträge an der bogenförmigen Ausplatzung an der Armaturabdeckung eine gute Übereinstimmung festgestellt. Zusätzlich stand auch vom Insassen G Spurmaterial in Form von Kopfhaar und Blut zur Verfügung. Eine durchgeführte molekulargenetische Untersuchung hat ergeben, dass die eingepressten Kopfhaare dem Insassen G zugeordnet werden konnten und auf dieser Basis nur er das Fahrzeug vor dem Unfall gesteuert haben konnte.

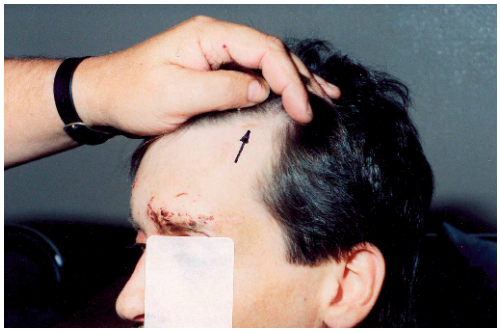


Bild B12-17 Verletzungen des Insassen G im Haaransatzbereich – korrespondieren mit Beschädigungen auf **Bild B12-16**



Bild B12-18 Gurtverletzungen einer getöteten Beifahrerin

5 Aufgaben der Sachverständigen bei der Konfrontation mit unklaren Fahrereigenschaften

5.1 Technischer Sachverständiger

5.1.1 Arbeit am Unfallort

Die erste Maßnahme des technischen Sachverständigen am Unfallort bildet ein kritisches Gespräch mit den am Unfallort anwesenden Polizeibeamten, ob die Sitzposition geklärt ist. Wird dieses bejaht, sollte tiefgründig nachgefragt werden, auf welcher Basis diese Feststellungen beruhen. Eine Person kann objektiv nur zweifelsfrei als Fahrer angesehen werden, wenn sie so eingeklemmt ist, dass anhand der Auffindeposition ausgeschlossen werden kann, dass sie durch dynamische Vorgänge im Rahmen der Kollision auf den Fahrersitz gelangt ist. Ein derartiges Indiz wäre beispielsweise auch das Vorfinden mit Gurtschutz. Sind die Rettungsarbeiten abgeschlossen, sollten alle nicht unmittelbar mit der Spurensicherung betraute Personen einen größeren Abstand einnehmen, damit keine weiteren Spuren zerstört werden. Es liegt auf der Hand, dass hier Blut- und Textilablagerung kleinsten Ausmaßes relevant sein können. Oftmals sind Angehörige der Feuerwehr bzw. der medizinischen Dienste zeitlich früher am Unfallort, als Polizeibeamte, sodass diese auch eher Aufschluss bezüglich der Auffindesituation nach dem Unfall geben können. Es sollte bei entsprechender Unklarheit der Sitzposition deshalb angeregt werden, noch während der Unfallaufnahme entsprechende Vernehmungen durchzuführen. Hier sollen auch Ersthelfer mit einbezogen werden. Es hat sich in der Vergangenheit in vielen Fällen erwiesen, dass das Erinnerungsvermögen von Zeugen an der Unfallörtlichkeit noch um ein Vielfaches plastischer war, als Tage danach, sodass man sich vor Ort auch noch an Details erinnern konnte, welche für die Rekonstruktion von Bedeutung waren.

Es sollte der Polizeibehörde unbedingt der Hinweis gegeben werden, dass diese die Sicherstellung der Oberbekleidung der Insassen veranlassen soll, da hier unter Umständen zu Innenraumstrukturen korrespondierende Kontaktspuren vorhanden sind.

Bereits an der Unfallörtlichkeit sollte der technische Sachverständige das Bewegungsverhalten des Fahrzeugs vor und nach der Kollision gedanklich rekonstruieren und sich hierbei ein Bild von den hieraus resultierenden Insassenrelativbewegungen machen. Anhand dieser Erkenntnisse ist sodann oft eine Eingrenzung der in Frage kommenden Zonen möglich, innerhalb welcher gezielt nach Spuren gesucht werden sollte. In der Umgebung der Unfallörtlichkeit wären dies in ersten Linie Blut-, Gewebe- oder Textilbestandteile, welche oft zwischen dem Auffindepunkt einer Person und dessen Abwurfbereich zu finden sind. Auch sollten bereits an der Unfallstelle außen am Fahrzeug befindliche Wischspuren oder Materialanträge dokumentiert und gesichert werden, da derartige Beweise durch Witterungseinflüsse oder den Fahrzeugtransport unbrauchbar werden können. Sollte der technische Sachverständige nicht über die Möglichkeit verfügen, entsprechendes Spurenmaterial qualifiziert zu sichern, wäre je nach regionaler Verfügbarkeit gegebenenfalls auch der kriminaltechnische Dienst der entsprechenden Polizeibehörde hinzuzuziehen. Der Einsatz eines gerichtsmedizinischen Sachverständigen an der Unfallörtlichkeit kann sich dann erforderlich machen, wenn Untersuchungen an Getöteten noch vor Ort unverzichtbar sind.

Wie bei jedem schweren Verkehrsunfall, so ist auch bei dem hier zu behandelnden Unfalltyp naturgemäß eine Zeichnung von der Situation anzufertigen, in welche alle auch sonst üblichen Gesichtspunkte eingetragen werden. Aufgrund der hier zu erwartenden relativ erheblichen

Rechtsfolgen für den betreffenden Personenkreis verbietet sich bei der Anfertigung der entsprechenden Dokumentation jede auch noch so kleine Ungenauigkeit. Das Anfertigen von aussagefähigen Lichtbildern und gegebenenfalls Videoaufnahmen, insbesondere auch Details darstellend, ist selbstverständlich und soll hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

Sind die Spurensicherungs- und Dokumentationsarbeiten abgeschlossen, sollte der technische Sachverständige darauf hinwirken, dass das betreffende Fahrzeug an einem geeigneten Sicherstellungsort in einem geschlossenen Gebäude verwahrt wird. Es ist darauf zu achten, dass nicht, wie es übliche Praxis ist, unfallbedingt abgerissene Fahrzeugteile einfach in den Innenraum geworfen werden. Dieser hat unversehrt zu bleiben. Des Weiteren dürften Anschlagmittel bei Kranbergung nicht durch Innenräume gezogen werden, da hierbei Spuren insbesondere im Dachbereich vernichtet werden können. Insgesamt gilt hier der Grundsatz, dass nicht das Abschleppunternehmen den Auftrag bekommen sollte, welches laut Anbieterliste dran ist, sondern welches für diese Arbeit am besten geeignet ist.

5.1.2 Spurensicherung am Fahrzeug

Die Spurensicherung am Fahrzeug sollte zeitnah, jedoch bereits nach ersten rekonstruktiven Betrachtungen erfolgen. Besonderes Augenmerk sollte hierbei auf dynamisch angetragene Blutspuren, angepresste oder angeschmolzene Bestandteile der Oberbekleidung (Textilfasern; Kunststoff) oder aber Kopfhaarspuren gelegt werden. Bei Unfällen mit hohem Energieaustausch könnten beispielsweise eingespießte Knochenfragmente nach Kniescheibenzertrümmerung die Sitzposition eindeutig klären [3]. Wichtig bei der Spurensicherung am Fahrzeug ist eine gute Dokumentation der Spuren, auch im Detail. Im Vorfeld sind die Spuren zu kennzeichnen. Das Verwenden von gängigen Referenzobjekten zur Verdeutlichung der Größe und der Position im Innenraum (Maßstab) darf dabei nicht vergessen werden. Am besten geeignet ist die Entnahme der Spur auf dem Spurträger. Ist dies nicht möglich, sollen flüssige Blutspuren mit feuchtem Filterpapier aufgenommen oder mit einer Spritze absaugt werden. Trockene Blutspuren werden mit einem Messer in ein trockenes Papiertütchen gekratzt [3]. Bei Haaren sollte darauf geachtet werden, dass diese unversehrt, d. h. mit Wurzel sichergestellt werden, da hier der Träger des Erbgutes enthalten ist. Vor Durchführung der molekulargenetischen Untersuchungen wird das Vorhandensein der Haarwurzel mikroskopisch überprüft, da weitere Analyseschritte ansonsten wenig Erfolg versprechend sind. Alle Spuren sollten steril, trocken und lichtgeschützt aufbewahrt werden. Bereits unmittelbar nach der Entnahme sind die Proben zu kennzeichnen, damit eine entsprechende Verwechslung ausgeschlossen wird. Des Weiteren müssen die Spuren, dies betrifft insbesondere organische Materialen, unverzüglich dem die Auswertung durchführenden Institut zugeleitet werden. Unsachgemäß gelagerte organische Spuren werden schnell unbrauchbar.

Je nach regionalen polizeilichen Strukturen kann es vorteilhaft sein, wenn die Spurensicherung am Fahrzeug durch den kriminaltechnischen Dienst durchgeführt wird. Insbesondere dann, wenn daktyloskopische Spuren gesichert werden müssen, dürften die technischen Möglichkeiten der Polizeibehörde denen des technischen Sachverständigen überlegen sein. Vorteilhaft ist in jedem Fall die Anwesenheit des Unfallanalytikers bei der Spurensicherung, da dieser am ehesten Kenntnis über fahrdynamische Zusammenhänge und die Position zu erwartender Spuren hat.

Eine nicht unbeträchtliche Bedeutung bei der Bestimmung der Sitzposition kommt dem Zustand der Sicherheitsgurtsysteme zu. Insbesondere dann, wenn die Gurte beispielsweise bei Frontalkollisionen erheblich beansprucht werden, können geformte Abdrücke auf der Oberbekleidung oder entsprechende Verletzungen im Thorax- und Abdomenbereich von Insassen

entstehen (**Bild B12-18**). Weiterhin kann Material der Oberbekleidung am Gurtband angetragen werden. Es empfiehlt sich deshalb, die Sicherheitsgurte in die Untersuchungen mit einzubeziehen und gegebenenfalls als Spurenträger zu asservieren.

Das Fahrzeug sollte nicht eher freigegeben werden, bis auch alle medizinischen Untersuchungen abgeschlossen sind, da es unter Umständen im Ergebnis von Lebenduntersuchungen oder Obduktionen notwendig werden kann, das Fahrzeug mit dem neuen Erfahrungshintergrund nochmals in Augenschein zu nehmen.

5.1.3 Teilnahme an medizinischen Untersuchungen

Insbesondere dann, wenn der gerichtsmedizinische Sachverständige nicht am Unfallort war, hat es sich als hilfreich erwiesen, dass der technische Sachverständige bei den gerichtsmedizinischen Untersuchungsmaßnahmen mit anwesend ist. Die Zuordnung bestimmter Verletzungsmuster zu Fahrzeugstrukturen bzw. zu Faktoren an der Unfallörtlichkeit gestaltet sich sicherer, wenn entsprechendes Bildmaterial von der Unfallendsituation bzw. aus den Fahrzeuginnenräumen vorliegt. Auf die Bedeutung von Gurtspuren an der Oberbekleidung bzw. an verletzten oder getöteten Insassen, welche ebenfalls eine interdisziplinäre Problematik darstellen, wurde im Vorpunkt bereits verwiesen. Auch kann der Techniker dem Mediziner Hinweise über Krafteinleitungsrichtungen auf den menschlichen Körper geben.

5.1.4 Rekonstruktion der Bewegungsabläufe

Um letztlich die Frage beantworten zu können, welche der in Frage kommenden Personen zum Kollisionszeitpunkt auf dem Fahrersitz Platz genommen hat, sind die vor- und nachkollisionären Bewegungsabläufe von Fahrzeug und Insassen auf der Basis der Unfalldokumentation zu analysieren [1], [2]. Neben klassischen Rekonstruktionsmöglichkeiten wird dabei insbesondere auch vor dem Hintergrund einer anschaulicheren Dokumentation für Nichttechniker nunmehr auf moderne CAD- [4] und Simulationsprogramme [5] zurückgegriffen.

Das Softwarepaket PC-Crash [5] bietet diesbezüglich die Möglichkeit an, aus Sitzen und Personen bestehende Einzelkomponenten in dreidimensional modellierte Fahrzeuge einzubinden und so das unmittelbare Bewegungsverhalten von Insassen bei bestimmten Anstoßkonstellationen zu analysieren und anschaulich darzustellen. Es ist so beispielsweise möglich, während der Spurensicherung festgestellte Kontaktpunkte im Fahrzeug bestimmten Personen im Innenraum, unter Umständen sogar dessen Körperteilen, zuzuordnen bzw. auszuschließen, dass ein anderer Insasse die entsprechende Spur gesetzt hat. Darüber hinaus darf jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass moderne, computergestützte Analyseverfahren dann an Grenzen geraten, wenn während des Primäranstoßes nur ein geringer Energieumsatz erfolgte und die Geschwindigkeit beispielsweise während mehrerer Überschläge in undefinierter Art und Weise abgebaut wurde.

5.2 Medizinischer Sachverständiger

Rechtsmediziner werden bei körperlichern Untersuchungen oder der Durchführung von Obduktionen von Unfallopfern durch die ermittelnde Staatsanwaltschaft nach der Kausalität der eingetretenen Schädigung des menschlichen Organismus zum Verkehrsunfallereignis gefragt. Dabei ist im Strafrecht die Äquivalenztheorie anzuwenden, nach der jede Bedingung, die nicht hinweggedacht werden kann, ohne das die Straftat entfiele, als Ursache für den Eintritt des körperlichen Schadens anzusehen ist. Außerdem muss strafrechtlich eine schuldhafte Handlung mit an „Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit“ feststellbar sein.

Vor diesem juristischen Hintergrund erfolgt die Begutachtung immer durch zwei Ärzte und mit der größtmöglichen Sorgfalt. Ein Hinzuziehen des Rechtsmediziners an die Unfallstelle wird in der Praxis den komplizierten, mehrphasigen Unfallereignissen mit mehreren Schwerverletzten oder Toten, vorbehalten bleiben. Bei dieser Entscheidung kommt natürlich dem Unfallsachbearbeiter der Polizei und dem diensthabenden Staatsanwalt eine Schüsselstellung zu. Die Domäne des Rechtsmediziners wird nach wie vor in der makroskopischen, mikroskopischen und molekularbiologischen Beurteilung von Befunden im Sektionssaal und an den in Universitätsinstituten etablierten Laboreinrichtungen, bestehen.

Dabei ist es auch Aufgabe der dort tätigen Ärzte einen Beitrag zur Rekonstruktion des Unfallgeschehens zu leisten [7]. Dafür ist es notwendig, den primär mit der Aufnahme und Simulation des Unfalls betrauten Polizeibeamten und technischen Sachverständigen diesbezüglich medizinische Informationen verständlich an die Hand zu geben. Im Detail sollte dabei folgende Schwerpunkte beachtet werden.

- Es sind am Unfallort und Unfallfahrzeug Blut-, Sekret-, Haarproben, aber auch Griffspuren für molekulargenetische Untersuchungen zu asservieren. Wie im Vorpunkt bereits beschrieben, ist dabei der Entnahme des Originalspurenträgers (z. B. Bekleidung, Sitzbezüge, Fahrzeugteile) der Vorzug zu geben. Ist dies nicht möglich, ist die Probe mit einem angefeuchteten, sterilen Wattetupfer abzunehmen. Danach sollte der Spurenträger luftgetrocknet werden und bei späterer Untersuchung kühl (4 °C, Asservatenkühlschrank) aufbewahrt werden.
- Bei der körperlichen Untersuchung oder äußeren Besichtigung des Unfallopfers müssen alle Wunden/Verletzungen, insbesondere geformte Hautverletzungen, fotodokumentiert werden. Im Rahmen der Lupen-Inspektion der Hautdurchtrennungen ist auf Fremdkörper zu achten und diese zum Vergleich mit dem Unfallfahrzeugen zu asservieren. Eine histologische Aufarbeitung der Wunden, bei der auch mikroskopisch Fremdkörper feststellbar sind, ist bei Fragestellungen zum Alter und der Vitalitat von Wunden unerlässlich.
- Auf die Bekleidung des Unfallopfers ist in jedem Fall zu achten. Befand sich der Betreffende zunächst in einem Krankenhaus, so muss von dort die Bekleidung an den Ort der rechtsmedizinischen Untersuchung gebracht werden. Insbesondere bei mehrphasigen Unfallereignissen mit dem Verdacht des Überrollens, ist die Suche nach möglichen Reifenprofilabdrücken notwendig. Auch diese sind mit Maßstab zu fotografieren um sie mit dem Reifenprofil der Fahrzeuge vergleichen zu können.
- Alle äußeren Verletzungen müssen in ihrer Größe, Lokalisation (Abstand in cm von der Fußbodenebene und Mittellinie), Verlaufsrichtung (z. B. senkrecht, horizontal, diagonal) beschrieben werden. Außerdem ist auf die Beschaffenheit der Wundränder, vor allem ob die unterblutet bzw. unterminierbar sind, zu achten. So lassen sich Rückschlüsse auf die Richtung der Gewalteinwirkung ziehen.
- Bei jedem Unfallbeteiligten sollten zumindest Blutproben, wenn möglich auch Urin, zur Bestimmung der Ethanolkonzentration, von Betäubungsmitteln und Arzneimitteln, die die Reaktionsfähigkeit beeinträchtigen können, abgenommen und analysiert werden.

6 Fazit

Der unterschiedliche Charakter bereits der vorgestellten Realunfälle zeigt, dass die durch das Autorenkollektiv formulierten Aufgaben der technischen und medizinischen Sachverständigen bei der Bearbeitung von Unfällen mit unklarer Sitzposition nur einen allgemeinen Leitfaden darstellen können. Aufgrund der Komplexität dieser Thematik sollte sich jeder, der Entscheidungen bezüglich der Art und Weise der hier durchzuführenden Beweissicherungsmaßnahmen trifft, bewusst sein, dass eine lückenlose Rekonstruktion von Sitzpositionen oft nur möglich ist, wenn zeitnah Sachverständige unterschiedlicher Disziplinen in die Ermittlungen einbezogen werden. Medizinische und technische Sachverständige, in letzterer Gruppe seien auch Kriminaltechniker sowie Festkörperanalytiker integriert, sollten dabei möglichst frühzeitig Kontakt zueinander suchen und die gutachterlichen Maßnahmen abstimmen.

Literatur

[1] Burg, H., Rau, H.: Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion, Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim 1981
[2] Danner, M., Halm, J.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen EUROTAX, Pfäffikon 1994
[3] Ropohl, D.: Die rechtsmedizinische Rekonstruktion von Verkehrsunfällen. DAT, Deutsche Automobil Treuhand, Stuttgart 1990
[4] Hugemann, W.: Venus-Datenbank Version 5.0, Eigenverlag, Münster 2003
[5] Steffan, H., Moser, A.: PC-Crash Dr. Steffan Datentechnik, Linz 2002
[6] Penning, R.: Rechtsmedizin systematisch, Uni-Med Verlag, 1996

Teil C:
Sonderthemen

C1 Aktive und passive Sicherheit

Dr. Florian Kramer

1 Die Fahrzeugsicherheit und das Risiko

Im Bereich der Fahrzeugsicherheit wird mit dem Begriff „Sicherheit“ eine Situation beschrieben, bei der das erzielbare Risiko kleiner ist als das größte noch vertretbare Risiko (Grenzrisiko) eines bestimmten technischen Vorgangs oder Zustands. Dabei wird das Risiko durch eine Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben, d. h. durch die zu erwartende Häufigkeit des Eintritts eines zum Schaden führenden Ereignisses *und* das beim Ereigniseintritt zu erwartende Schadensausmaß. Auf Straßenverkehrsunfälle übertragen bedeutet dies beispielsweise die erwartete Häufigkeit von Unfällen nur mit Sachschäden oder die mit Personenschäden. Die Wahrscheinlichkeitsaussage ist die erwartete Häufigkeit von Unfällen und das Schadensausmaß der Sach- bzw. der Personenschäden. Es ist nahe liegend, dass das Risiko, einen Unfall mit Sachschaden zu erleiden, ungleich höher ist als das Risiko für Unfälle mit Personenschaden. So wurden im Jahr 2005 in Deutschland insgesamt 1.917.373 Unfälle nur mit Sachschäden, jedoch nur 336.619 Unfälle mit Personenschäden registriert.

Je größer aber das Risiko ist, desto geringer ist die Sicherheit, und umgekehrt gilt, je höher die Sicherheit gesteigert werden soll, desto geringer darf das Risiko nur sein.

Die Straßenverkehrssicherheit ist ausgerichtet auf den Menschen (Verkehrsteilnehmer), auf das Fahrzeug (Verkehrsmittel) und auf die Umwelt (Verkehrswege). Die Maßnahmen, die geeignet sind, Unfälle zu vermeiden, werden der aktiven Sicherheit zugeordnet. Handelt es sich dem gegenüber um Maßnahmen, die die Unfallfolgen mindern sollen, so werden sie der passiven Sicherheit zugerechnet. Im englischen Sprachgebrauch wird die aktive Sicherheit zutreffenderweise auch als primary safety gekennzeichnet, da es primär gilt, Unfälle zu vermeiden. Gelingt dies jedoch nicht, so greifen die Maßnahmen der sekundären Sicherheit (engl.: secondary safety) zur Minimierung der Folgen eines Unfalls.

Während sich seit der Aufzeichnung der Unfallzahlen in Deutschland, also seit 1953, die aktive Sicherheit mehr als verdreifacht hat, erhöhte sich die passive Sicherheit etwas mehr als um das Sechsfache [1].

2 Die aktive Sicherheit

Die Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen, der aktiven Sicherheit also, zielen beispielsweise ab

- auf Verkehrsteilnehmer durch Verkehrspädagogik und -psychologie, Verkehrsmedizin und Rechtssicherheit;
- auf Verkehrsmittel durch Fahr-, Bedienungs-, Wahrnehmungs- und Konditionssicherheit;
- auf Verkehrswege durch Verkehrsfluss-Steuerung, Straßenführung und -bau, Unfallschwerpunkte und Verkehrsrecht.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_33

Diese Maßnahmen sind in der PreCrash-Phase wirksam; das ist der Zeitbereich vor einem Unfall, also vom Erkennen der kritischen Situation bis zum ersten Kontakt mit dem Kollisionskontrahenten [2].

3 Die passive Sicherheit

Diejenigen Maßnahmen, die geeignet sind, die Unfallfolgen zu mindern, wirken sich demgegenüber in der InCrash-Phase aus. Diese Phase reicht vom ersten Kontakt der Kollisionskontrahenten bis zum Stillstand der Fahrzeuge und der Ruhelage der Betroffenen und enthält mindestens eine Kontakt- und eine Auslaufphase; Mehrfachkollisionen sind dabei eingeschlossen. Genau genommen greifen aber auch noch im nachfolgenden Zeitraum, in der PostCrash-Phase, die Maßnahmen der passiven Sicherheit, wenn z. B. das Rettungswesen (Ausbildung des Rettungspersonals, Lage von Unfallkliniken, Einsatz von Rettungshubschraubern u. a.) einbezogen wird [2].

Die Maßnahmen, die der passiven Sicherheit zugerechnet werden, umfassen beispielsweise

- bei Verkehrsteilnehmern die Motivation zur Benutzung von Schutzeinrichtungen, die Erste-Hilfe-Ausbildung und den Versicherungsschutz;
- bei Verkehrsmitteln den Selbst- und den Kontrahentenschutz, letzterer oftmals auch „Partner“-Schutz genannt;
- bei Verkehrswegen die Straßenrand-Entschärfung, die Sicherung der Unfallstelle sowie das Rettungswesen.

Herausragende Vertreter für Maßnahmen der passiven Sicherheit sind die als „Lebensretter Nummer 1“ bezeichneten Sicherheitsgurte und die unterschiedlich eingesetzten Airbag-Systeme, auf die in Kapitel C3 einzugehen sein wird. Beide Einrichtungen sind Komponenten der dem Selbstschutz dienenden Insassenschutz-Systeme.

4 Nutzung von Daten und Informationen aus der aktiven für die passive Sicherheit

Die heutigen Sicherheitsanstrengungen erfahren hinsichtlich ihrer Ausrichtung eine enorme Veränderung: Die Entwicklung von Sicherheitssystemen konzentriert sich, forciert durch die US-amerikanische und die europäische Sicherheitsgesetzgebung [3, 4] in den letzten Jahren, zum einen auf die weitere nachhaltige Verbesserung der Funktion und Wirksamkeit der Insassenschutz-Systeme, zum anderen aber rückt der Schutz äußerer Verkehrsteilnehmer wie Zweirad-Fahrer und Fußgänger in den Vordergrund. Diese neuen Anforderungen bedingen eine neue Ausrichtung der Sensoren zur Insassenerkennung und -klassifizierung sowie zur Umfeld-Detektierung in der PreCrash-Phase. Um dem steigenden Sicherheitsbedürfnis gerecht zu werden, wird daher ein zunehmender Informationsfluss zwischen den Bereichen der aktiven und der passiven Sicherheit bzw. aus der PreCrash-Phase zur Minimierung der Unfallfolgen angestrebt.

Der Erwartungshorizont an die aktive Sicherheit ist darauf ausgerichtet, kritische Fahrsituationen zu bewältigen, um so Unfälle zu vermeiden. Die eingesetzten Sensoren werden, abhängig von deren räumlicher und zeitlicher Reichweite, dazu genutzt, mit Hilfe der generierten Informationen den Fahrer zu warnen und zu unterstützen. Derartige Sicherheitskomponenten sind

beispielsweise das mittlerweile in Pkw weit verbreitete Anti-Blockiersystem (ABS) oder das in neueren Pkw beinahe ebenso häufig anzutreffende elektronische Stabilitätsprogramm (ESP). Zudem wurden vor kurzer Zeit serienmäßig Systeme wie die Spurwechsel-Warneinrichtung (LDW: Lane Departure Warning) und das Spurhalte-Unterstützungssystem (LKS: Lane Keeping Support) eingeführt. Diese Einrichtungen warnen den Fahrer vor einem unbeabsichtigten Fahrspurwechsel oder halten das Fahrzeug, in Verbindung mit einer elektrisch unterstützten Lenkung, automatisch in der Fahrspur [4].

Die hierzu generierten Informationen lassen sich aber auch zur Aktivierung von Insassenschutz-Systemen verwenden, die früher und präziser angesteuert werden können als heute verfügbare Systeme [4]. So werden beispielsweise seit 2002 von Mercedes-Benz [5] elektrische Komfortsysteme, wie Sitzverstellungen, Schiebedächer, Fensterheber aber auch Fondsitzanlagen und reversible Gurtsysteme angesteuert und in den präventiven Insassenschutz integriert.

Literatur

[1] Kramer, F.: Passive Sicherheit/Biomechanik I. Vorlesungsskript der gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), Dresden 2006

[2] Kramer, F.: Unfallrekonstruktion. Vorlesungsskript der gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), Dresden 2005/06

[3] Lehmann, D.: Aktuelle und zukünftige Vorschriften zur Bewertung der passiven Sicherheit. 2. International Symposium on Sophisticated Car Occupant Safety Systems, Karlsruhe 1994

[4] Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. 2. erweiterte und überarbeitete Auflage. Vieweg Verlag, Wiesbaden 2006

[5] Schöneburg, R., Breitling, T.: Enhancement of Active & Passive Safety by Future PRE-SAFE® Systems. 19th ESV-Conference, Paper Number 05-0080-O. Washington D.C. (VA), USA, 2005

C2 Sicherheitsgurte

A – Technik der Gurtsysteme

Dr. Florian Kramer

1 Bedeutung der Gurtanlege-Quote

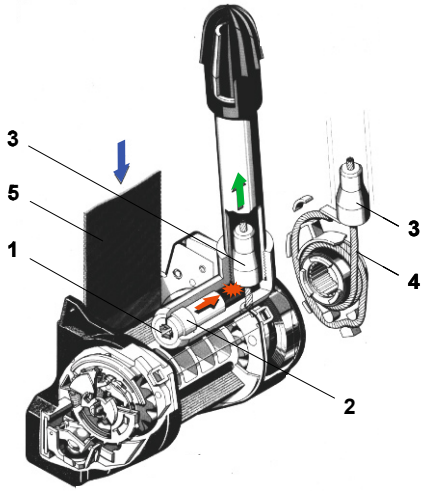
Spätestens seit Einführung der Bußgeld-Bewehrung für das Nicht-Angurten im August 1984 gilt unbestritten, dass das Gurtsystem eine wesentliche Sicherheitsverbesserung brachte. Dies kann abgelesen werden anhand des sprunghaften Anstiegs der Gurtanlege-Quote in Pkw von etwa 65 % vor Einführung auf mehr als 90 % danach. Damit einher ging der Rückgang von 11.732 Getöteten im Jahr 1983 auf 8.400 im Jahr 1985; das entspricht einer Reduzierung der Unfallopfer von 28,4 %. Im gleichen Zeitraum stieg infolge dessen die passive Sicherheit, gemessen am Sicherheitsindex PaSiX, sogar um 37,6 % [1]. Die Gurtanlege-Quote in Pkw liegt heute bei 89,4 % bei Fahrern und auf der Beifahrer-Seite bei 87,8 % [2].

2 Komponenten und Funktionsweise des Sicherheitsgurts

Das Gurtsystem besteht zunächst aus einem Gurtband mit einer 6- bis 11%-igen Dehnung. Während das eine Ende des Gurtbandes am Fahrzeug, heute meist am Sitzrahmen befestigt ist, verläuft das andere Ende über den Umlenk-Beschlag (eventuell mit Höhenversteller) zum Retraktor (Automat) und ist dort auf der Gurtspule aufgewickelt. Bei Gurtbenutzung reicht das Gurtband vom Umlenk-Beschlag über die Schulter und die Brust des Insassen und liegt nach der Umlenkung an der Schlosszunge eng am Becken an, wobei die Schlosszunge mit dem Gurtschloss verriegelt ist. Um den Insassen eine größtmögliche Bewegungsfreiheit zu gestatten, wird das Gurtband beim Vorbeugen von der Gurtspule abgewickelt und beim Zurücklehnen mit Hilfe einer Wickelfeder wieder aufgespult. Die Gurtspule arretiert bereits bei leichteren Unfällen, wenn das Fahrzeug spürbar verzögert oder das Gurtband aufgrund einer raschen Vorverlagerung des Insassen mit einer höheren Geschwindigkeit von der Spule abgewickelt wird.

Automatikgurte liegen zwar relativ dicht am Körper an, jedoch aus Komfortgründen nicht so eng, wie dies bei einem Aufprall ideal wäre. Die aus Komfortgründen geringe Federkraft der Aufroll-Automatik, die Gurtdehnung, der „Filmspulen"-Effekt und der Abstand durch Kleidung des Insassen addieren sich zu einer Gurtlose, aus der im Unfall bei plötzlicher Fahrzeugverzögerung eine größere Vorverlagerung resultiert, d. h., es würde wertvoller Weg „verschenkt" werden, an dem der Insasse nicht an der Fahrzeugverzögerung beteiligt ist. Gurtstraffer, die im Retraktor oder am Gurtschloss pyrotechnisch eine schlagartige Verkürzung des Gurtbandes bewirken, kompensieren diese Nachteile. Heute sind etwa 75 % der Neuwagen mit Gurtstraffern ausgerüstet [3]; **Bild C2-1** zeigt ein Beispiel eines pyrotechnischen Aufroller-Straffers, der elektrisch gezündet wird.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_34



1: Vom Steuergerät bzw. vom Sensor
2: Zündpille und Treibsatz
3: Kolben im Zylinder
4: Drahtseil
5: Gurtband
6: Gurtschloss

Bild C2-1 Pyrotechnischer Gurtstraffer (hier im Aufroller) mit elektronischer Ansteuerung [3]

Neuerdings werden reversible Gurtstraffer eingesetzt, die mit Hilfe einer PreCrash-Sensorik bei drohender Frontalkollision angesteuert werden. In zwei Dritteln aller Fälle kommt es nämlich in der PreCrash-Phase zu kritischen Situationen wie Schleuderbewegungen, Ausweichmanövern oder Notbremsungen. Diese Phase kann mehrere Sekunden andauern und wird zur Aktivierung des reversiblen Gurtstraffers und anderer Schutzmaßnahmen genutzt. Kriterien sind Signale der aktiven Sicherheit wie ABS, Bremsassistent, Fahrstabilitätsprogramm u. Ä. Beim Erkennen einer kritischen Situation wird ein Elektromotor angesteuert und das Gurtband verkürzt. Kann der Unfall vermieden werden, kehrt das Gurtsystem in die Ausgangssituation zurück. Kommt es allerdings zur Kollision, so wird zusätzlich der pyrotechnische Gurtstraffer aktiviert, der mit einer deutlich höheren Straffkraft die Gurtlose kompensiert.

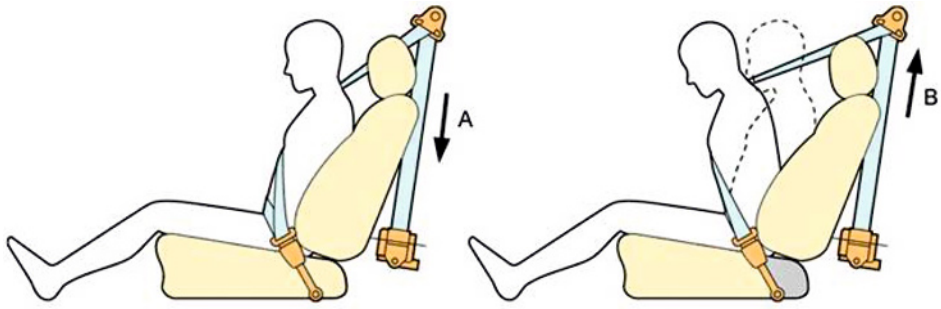


Bild C2-2 Wirkungsweise des Gurtstraffers (links) und des Kraftbegrenzers (rechts)

Während Gurtstraffer die vorhandene Gurtlose überwinden und eine frühzeitige Insassenverzögerung sicherstellen, vermeiden Kraftbegrenzer das Überschreiten biomechanischer Belastungen des Insassen (**Bild C2-2**). Dabei wird beim Auftreten einer kritischen Gurtband-Kraft,

sie liegt zwischen 4 und 5 kN, das Gurtband sukzessive verlängert und gleichzeitig die Kraft reduziert. Die Verlängerung des Gurtbandes erfolgt durch Reißnähte im Gurtband, durch Deformationselemente oder durch einen Drehstab, dem heute am häufigsten verwendeten Funktionsprinzip.

3 Sensierung und Auslösekriterien

Bei Sicherheitsgurten ist hinsichtlich der Funktionalität zu unterscheiden zwischen der Arretierung des Gurtautomaten, der Auslösung des Gurtstraffers und der Kraftbegrenzung beim Überschreiten einer definierten Gurtbandkraft. Während die Arretierung der Gurtspule und die Kraftbegrenzung innerhalb des Gurtsystems erfolgt, wird die Gurtstraffung durch die Detektierung der Unfallschwere mit Hilfe von Sensoren erreicht. Die Sensoren befinden sich entweder im Bereich der Stoßfänger (so genannte Up-Front-Sensoren), im vorderen Bereich des Schwellers am Übergang zur B-Säule oder im Steuergerät auf dem Mitteltunnel.

Die Sensoren messen, unabhängig von der Örtlichkeit, die auf sie einwirkende Beschleunigung. Überschreitet diese einen bestimmten unfallrelevanten Wert, wird das Beschleunigungssignal im Steuergerät über die Zeit integriert; daraus ergibt sich eine Geschwindigkeitsänderung. Sobald sie einen definierten Schwellwert – dieser liegt bei etwa 16 bis 19 km/h – überschreitet, wird der Straffer gezündet und bewirkt eine unverzügliche Verkürzung des Gurtbandes, die in Abhängigkeit von der aktuellen Belastung des Gurtbandes bis zu 120 mm betragen kann.

4 Fragestellung aus der Sicht des Gutachters

Wurde der Sicherheitsgurt benutzt? Die Benutzung des Gurtes ist für Insassen gesetzlich vorgeschrieben. Aufgrund der wirksamen Kräfte ergeben sich bei Gurtnutzung sichtbare Schleif- und Abriebspuren am Gurtband, am Umlenkbeschlag und an der Gurtzunge. Bei der Auslösung des Gurtstraffers lassen sich zudem Schmauchspuren in der unmittelbaren Umgebung des Treibsatzes feststellen, die allerdings auch auftreten können, ohne dass der Sicherheitsgurt benutzt wurde. Bei einigen Gurtstraffern wird die Auslösung zusätzlich gekennzeichnet durch einen farbigen Markierungsstift, der am Gurtgehäuse sichtbar wird. Zur eindeutigen Feststellung der Gurtnutzung ist das Gurtsystem des Unfallfahrzeugs auszubauen und einer Sichtprüfung zu unterziehen.

Insassenverletzungen: Bei der Benutzung von Sicherheitsgurten ergeben sich am Körper des Insassen deutliche Verletzungsmuster, so genannte Prellmarken, die durch die wirksame Kraft und Relativbewegung hervorgerufen werden und sich eindeutig dem Gurtbandverlauf auf dem Oberkörper des Insassen zuordnen lassen. Diese Weichteilverletzungen treten bereits bei relativ geringer Unfallschwere auf; bei höherer Unfallschwere werden diese oberflächlichen Verletzungen begleitet durch Frakturen des Brustkorbes, des Beckens, gelegentlich auch der Wirbelsäule und durch Abdominalverletzungen aufgrund des Eindringens des Beckengurtes in den Bauchbereich, dem so genannten Submarining-Effekt.

Sitzposition der Insassen: Durch die sorgfältige Zuordnung zwischen Insassenverletzungsmustern und den Schleif- und Abriebspuren am Gurtsystem lässt sich die vor dem Unfall eingenommene Sitzposition der Insassen meist widerspruchsfrei aufklären.

Wiederverwendung des Gurtsystems nach einem Unfall: Oftmals stellt sich die Frage nach der Weiterverwendung des Gurtsystems nach einem Unfall. Grundsätzlich gilt, dass die Gurte, der Retraktor, die Befestigungselemente und das Steuergerät, auch wenn sich keine sichtbaren Benutzungsspuren feststellen lassen, komplett ausgetauscht werden müssen, da selbst bei einer Nicht-Auslösung des Gurtstraffers die störungsfreie Funktionalität des Gurtsystems nicht sichergestellt werden kann.

Literatur

[1] Kramer, F.: Passive Sicherheit/Biomechanik I. Vorlesungsskript der gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), Dresden 2006

[2] Kramer, F., Kramer, M., Lüder, M., Herpich, T., Class, U.: Die Bedeutung von OoP-Situationen im Straßenverkehr hinsichtlich künftiger Auslegung von Insassenschutz-Systemen. VDI-Tagung „Innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz“, Berlin 2003

[3] Kramer, F.: Passive Sicherheit/Biomechanik II. Vorlesungsskript der gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), Dresden 2006

B – Spurenkundliche Überprüfung der Gurtsysteme

Jörg Arnold

1 Einleitung

Bei Verkehrsunfällen erfolgt die Untersuchung der Sicherheitsgurte primär im Zusammenhang mit der (vor allem zivilrechtlich bedeutungsvollen) Frage, ob respektive welche Fahrzeuginsassen zum Unfallzeitpunkt die Sicherheitsgurte trugen oder nicht.

Neben dieser Frage kann es auch sein, dass zu identifizieren und spurenkundlich zu verifizieren ist, wer im Fahrzeug wo angegurtet war.

Leider werden sehr häufig die Sicherheitsgurte nicht gesichert respektive nicht einmal im vorgefundenen Zustand einzeln fotografiert. Das hängt damit zusammen, dass die Bedeutung der Spuren auf Sicherheitsgurten nicht bekannt ist, dass die Mittel und Kenntnisse nicht vorhanden sind, um Spuren sachgerecht zu sichern oder dass häufig die Möglichkeiten der spurenkundlichen Auswertung von Sicherheitsgurten nicht bekannt sind.

2 Sicherstellung von Sicherheitsgurten

Die zwei zentralen Probleme (neben der Nichtdokumentation und Nicht-Sicherstellung) in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle mit dieser Fragestellung sind:

1. Entweder ist es den Rettungskräften respektive der Polizei nicht bewusst, wie wichtig in einem Zivilverfahren die Frage sein kann, ob die Sicherheitsgurte getragen worden sind oder nicht,
2. oder auf den Sicherheitsgurten wird oberflächlich respektive nur visuell nach Spuren gesucht und aufgrund dieser zweifelhaften Grundlage entschieden, ob die Sicherheitsgurte getragen worden sind oder nicht.

Immer wieder wurde festgestellt, dass Tragspuren auf Sicherheitsgurten nicht von Auge erkennbar sind.

Für eine umfassende Beantwortung aller offenen Fragen im Zusammenhang mit dem Tragen von Sicherheitsgurten ist von entscheidender Bedeutung, dass immer die kompletten Gurtsysteme mit allen Umlenkbeschlägen, dem Gurtstraffer und dem Gurtschloss sichergestellt und für die Untersuchung zur Verfügung stehen.

3 Bewertung von Spuren als Tragspuren

Auch bei der Bewertung von Spuren auf Sicherheitsgurten gilt die Regel aus der Kriminaltechnik: „Absence of evidence is not evidence of absence!“ oder anders gesagt: Beim Vorhandensein von Spuren kann häufig der Beweis des Tragens der Sicherheitsgurte im Unfallzeitpunkt erbracht werden.

Das Fehlen von Tragspuren jedoch ist **nicht** der Beweis, dass die Gurten **nicht** getragen worden sind.

Dazu muss zuerst durch eine seriöse Untersuchung unter dem Stereomikroskop bei streifender Beleuchtung sichergestellt werden, dass wirklich keine Spuren auf den Sicherheitsgurten und den Umlenkbeschlägen der Sicherheitsgurte vorhanden sind.

Dann muss genau geprüft werden, ob bei der vorliegenden Unfallkonstellation – aufgrund der zu erwartenden Krafteinwirkungen auf das Gurtsystem – bei getragener Sicherheitsgurte überhaupt mit der Bildung von Tragspuren zu rechnen ist.

Die Bildung derartiger Spuren ist jedoch sehr stark vom Unfallablauf abhängig (Heftigkeit, Anprallrichtung etc.).

4 Untersuchung von Sicherheitsgurten (Dreipunkt-Sicherheitsgurte ohne Straffer)

4.1 Vor-Untersuchungen

Zuerst ist der angetroffene Zustand des Gurtsystems vor bzw. beim Ausbau festzuhalten und dann unveränderlich zu sichern. Dieser Zustand entspricht z. B. der Ruheposition im Fahrzeug.

Dann ist das System äußerlich auf unfallrelevante Beschädigungen zu untersuchen.

Anschließend erfolgt eine Überprüfung der Gurtautomatik respektive der Funktionsweise des Aufroll- und Blockiermechanismus. Das Gurtband kann z. B. vollständig ausgezogen werden und wird von der Automatik auch wieder gänzlich aufgerollt.

Das Gurtband ist auf Beschädigungen und Verschmutzungen sowie die üblichen gebrauchsbedingten Abnutzungserscheinungen zu kontrollieren.

Die Funktionskontrolle der Gurtschlösser umfasst das einwandfreie Einrasten/Arretieren und Ausklinken/Auswerfen der Schlosszunge und die Kontrolle des Allgemeinzustands z. B. auf sichtbare Beschädigungen oder Defekte.

4.2 Mikroskopische Untersuchungen

Bei den mikroskopischen Untersuchungen mit dem Stereomikroskop und bei streifender Beleuchtung wird überprüft, ob am Gurtband oder an den Umlenkbeschlägen „Tragspuren“ zu finden sind. Diese entstehen, wenn die umgelegten Gurte durch das Zurückhalten einer Person einer stärkeren Beanspruchung ausgesetzt wird.

Die mikroskopische Untersuchung der Sicherheitsgurte basiert auf der Erfahrung, dass das Gurtband bei einer starken Belastung durch eine zurückzuhaltende Person etwas gedehnt wird. Dadurch läuft ein kurzes Gurtstück unter hohem Druck durch die Umlenkbeschläge. Dabei können bei metallenen Umlenkbeschlägen durch die Reibungswärme Glanzstellen am Gurtband und/oder Schmelzungen des Gurtgewebes entstehen.

Bei kunststoffbeschichteten Umlenkbeschlägen kann das Beschichtungsmaterial durch die Reibungswärme thermisch so stark belastet werden, dass die Gewebestruktur des Gurtbandes in die Oberflächenbeschichtung der Umlenkbeschläge eingeprägt und/oder die Oberflächenbeschichtung aufgeschürft werden kann.

Am Gurtband, insbesondere an den Randzonen, können sich durch die thermische Belastung Verfärbungen des Kunststoffgewebes bilden.



Bild C2-3 Gurtzunge und Gurtband



Bild C2-4 Deutliche Tragspuren am Kunststoffbelag der Gurtzunge vom Unfall

Bei extremer Belastung kann das Beschichtungsmaterial an den Umlenkbeschlägen abgeschürft und auf das Gurtband übertragen und aufgerieben werden. An den Umlenkbeschlägen entstehen dabei so genannte Brauen, die scharfkantig sind.

Zudem können bei extremen Zugbelastungen Risse im Kunststoff der Umlenkbeschläge entstehen.

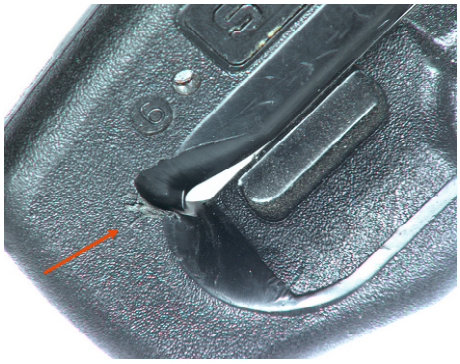


Bild C2-5 Scharfkantige Unfallspuren und Brauen des Kunststoffmaterials



Bild C2-6 Massive Kollisionsschäden nach Frontalkollision mit Baum

Vor allem bei älteren Unfallfahrzeugen wurde festgestellt, dass die bei extremen Zugbelastungen entstehenden Risse im Kunststoff der Umlenkbeschläge dazu führen können, dass scharfkantige Bruchkanten entstehen. Diese können an den Gurtbändern Schnittbeschädigungen verursachen, die aussehen, wie von einer Klinge verursacht.

Abhängig von der Kollisionskonstellation werden die (angegurteten) Fahrzeuginsassen aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten heftig in Anprallrichtung geschleudert. Je nach Richtung sind bei umgelegten Gurten die Voraussetzungen für die Bildung von „Tragspuren“ je nach Richtung der resultierenden Kräfte gegeben oder eher nicht.

Je nach Anprallrichtung und Anprallheftigkeit sind deshalb entsprechende Spuren an den Gurtkomponenten zu erwarten, insbesondere Reib-/Schürfspuren an den kunststoffbeschichteten Umlenkbeschlägen, wenn die Gurte in diesem Zeitpunkt getragen wurden.

Aus dem Fehlen von „Tragspuren“ kann manchmal geschlossen werden, dass bei entsprechender Konstellation die Gurte im Moment des Anpralls von einem Fahrzeuginsassen nicht getragen wurden.

Die Beschädigungen im Fahrzeug (z. B. Frontscheibe, Anprallstellen am Armaturenbrett etc.) können solche Befunde bestätigen.



Bild C2-7 Zerrissene Fahrer-Sicherheitsgurte



Bild C2-9 Ausgebautes zerrissenes Fahrer-Sicherheitsgurtsystem

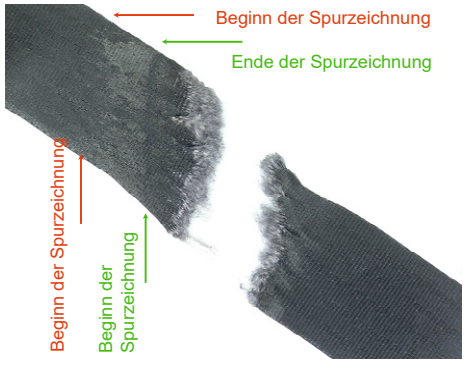


Bild C2-8 Spurenbild auf der zerrissenen Fahrer-Sicherheitsgurte



Bild C2-10 Spurenbild am oberen Umlenkbeschlag der zerrissenen Fahrer-Sicherheitsgurte

Es ist jedoch insbesondere bei den Beschädigungen an der Frontscheibe notwendig, genau zu prüfen, ob diese Beschädigung vom Anprall eines Fahrzeuginsassen verursacht wurde (Position der Beschädigung, Mikrospuren wie Haare, Hautpartikel, Blut etc. in der Beschädigungszone). Die Beschädigung könnte auch durch eine Airbag-Abdeckung, Gegenstände, die z. B. lose auf der Hutablage gelegen haben oder kollisionsbedingte Fahrzeugdeformationen verursacht worden sein.

5 Gurtstraffer/Gurtstrammer

In Ergänzung zu den in Ziffer A gemachten Ausführungen sind zwei Aspekte im Zusammenhang mit der Spurensicherung oder der Sicherstellung von Gurtsystemen und deren Untersuchung von Bedeutung:

ACHTUNG GEFAHR: Viele Gurtstraffer-/Gurtstrammer-Systeme werden pyrotechnisch aktiviert oder sie enthalten mechanisch vorgespannte Aktivierungselemente. Beim Ausbau dieser Systeme besteht die Gefahr einer ungewollten Auslösung und damit eine erhebliche Verletzungsgefahr. Der Ausbau darf deshalb nur durch qualifiziertes Personal erfolgen, das die entsprechenden Systeme kennt und korrekt ausbauen und/oder deaktivieren kann.

Da die meisten Fahrzeughersteller weder die Gurtsysteme noch die Gurtstraffer-/Gurtstrammer-Systeme selber herstellen, sondern von Zulieferern beziehen, können im gleichen Fahrzeugtyp des gleichen Fahrzeugherstellers unterschiedliche Produkte verbaut sein.

Bei der Untersuchung von Gurtsystemen oder von Gurtstraffer-/Gurtstrammer-Systemen, ist es unerlässlich, über die Fahrzeugidentifikationsnummer (VIN) die entsprechenden Detailinformationen zu den Gurtsystemen respektive den Gurtstraffer-/Gurtstrammer-Systemen zu beschaffen (genauer Typ, Ausführung, Ansteuerung/Aktivierung, Verriegelung bei der Ansteuerung, Sitzerkennung etc.). Hier ist unbedingt der Fahrzeughersteller oder der Importeur zu kontaktieren.

6 Zusammenfassung

Die Komponenten des Gurtsystems sind auf Beschädigungen, Verschmutzungen und Funktionstüchtigkeit zu untersuchen.

Je nach Anprallrichtung und Anprallheftigkeit ist beim Vorhandensein entsprechender Spuren an den Gurtkomponenten, insbesondere Reib-/Schürfspuren an den kunststoffbeschichteten Umlenkbeschlägen, der Beweis erbracht, dass die Sicherheitsgurte im Unfallzeitpunkt getragen wurde.

Das Fehlen von „Tragspuren“, insbesondere von Reib-/Schürfspuren an den kunststoffbeschichteten Umlenkbeschlägen, die zu erwarten wären, wenn die umgelegte Gurte durch das Zurückhalten einer Person einer stärkeren Beanspruchung ausgesetzt wird, lässt je nach Anprallrichtung und Anprallheftigkeit den Schluss zu, dass keine relevanten Spuren gebildet wurden, weil die Sicherheitsgurten im Unfallzeitpunkt nicht getragen wurden.

Der Ausbau von Gurtsystemen oder von Gurtstraffer-/Gurtstrammer-Systemen darf nur durch qualifiziertes Personal erfolgen, das die entsprechenden Systeme kennt und korrekt ausbauen und/oder deaktivieren kann.

Literatur

[01] Gorski, Z. M., German A., and Nowak, E. S.: Examination and Analysis of Seat Belt Loading Marks, Journal of Forensic Sciences, JFSCA, Vol. 35, No. 1, Jan. 1990, pp. 69–79
[02] Pfeffer, W.: Rückhalteeinrichtungen als Beweismittel in der Verkehrsunfallrekonstruktion, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, September 1999, Heft 9, S. 224–230
[03] Halonbrenner, R.: Spurenkundliche Untersuchung an Sicherheitsgurten, Archiv für Kriminologie, Band 180, 1978, Heft 3/4, S. 107–113
[04] Detailinformationen der Fahrzeughersteller zu den eingebauten Gurtsystemen resp. den Gurtstraffer/Gurtstrammer-Systemen anhand der Fahrzeugidentifikationsnummer (VIN) der betroffenen Fahrzeuge
[05] Herrmann, R., Gonter, M.: Visualisierung latenter Kontaktspuren auf ausgelösten Airbags, Kriminalistik, 1/2004, S. 49–52
[06] Kelder, K., and Burton B.: Examination of a Deployed Airbag for DNA and Cosmetics to answer the „Driver Question“, Canadian Society of Forensic Sciences Journal, Vol. 35, No. 3 (2002) pp. 165–175

7 Spurenkundliche Überprüfung der Gurtsysteme: Ein Fallbeispiel

7.1 Einleitung

Im vorliegenden Verkehrsunfall erfolgt die Untersuchung der Sicherheitsgurten im Zusammenhang mit der Frage, ob der Fahrzeuglenker zum Unfallzeitpunkt die Sicherheitsgurte trug und wie das ungewöhnliche Verletzungsbild zu interpretieren sei.

7.2 Spurensicherung am Unfallort und am Fahrzeug – Sicherheitsgurten?



Bild C2-11 Fahrzeugendlage

Der Suzuki Jeep wurde nach Mitternacht in dieser Unfallendlage von einem anderen Automobilisten vorgefunden. Dieser alarmierte umgehend Polizei und Sanität.

Der verletzte Lenker war nicht ansprechbar und war neben dem Fahrzeug am Boden liegend gefunden worden.



Bild C2-12 Fahrzeugendlage

Bei der Erstversorgung durch die Sanität stellt diese eine sehr schwere Armverletzung fest: Unter der Jacke und einem Faserpelz war der linke Arm des Lenkers bis auf etwas Muskelgewebe und die Haut durchtrennt worden.

Woher stammte diese schwere Verletzung? Zuerst kam sogar die Vermutung auf, dass der Automobilist, der den Verletzten gefunden hatte, diesem mit seinem Fahrzeug über den Arm gefahren war.



Bild C2-13 Innenraum



Bild C2-14 Innenraum



Bild C2-15 Faseranschmelzungen

An der Mittelkonsole im Suzuki fanden wir bei der Spurensicherung sehr ausgeprägte Faser-Anschmelzungen in der Kunststoffoberfläche, die sich nicht vom Eigenmaterial der Hose des Verletzten unterscheiden ließen.

An der Hose des Verletzten – im Bereich des rechten Knies – fanden wir Kunststoff-Mikrospuren, die sich nicht vom Eigenmaterial der Mittelkonsole unterscheiden ließen.





Die Sicherheitsgurte des Fahrers war in diesem Zustand von uns vorgefunden worden: Sie war teilweise ausgezogen und im oberen Umlenkbeschlag verdreht und verklemmt.

Die Beifahrergurte war vollständig eingerollt in der Ruheposition.

Bild C2-16 und **Bild C2-17** Zustand Fahrer- und Beifahrergurte



Die Untersuchungen der Fahrersicherheitsgurte ergab folgende Befunde:

Am oberen Umlenkbeschlag waren sehr deutliche thermische Belastungsspuren in der Kunststoffbeschichtung des oberen Umlenkbeschlages sichtbar.

Bild C2-18 Spuren am Umlenkbeschlag



Am Gurtband waren in dem Bereich, wo sich die Sicherheitsgurte im oberen Umlenkbeschlag verklemmt hatte, sehr deutliche thermische Belastungsspuren am Kunststoffgewebe des Gurtbandes sichtbar.

Bild C2-19 Spuren am Gurt



Am unteren Umlenkbeschlag waren keinerlei thermische Belastungsspuren in der Kunststoffbeschichtung des unteren Umlenkbeschlag sichtbar.

Am Gurtband waren in dem Bereich, wo die Sicherheitsgurte durch den unteren Umlenkbeschlag lief, keinerlei thermische Belastungsspuren am unteren Umlenkbeschlag und am Kunststoffgewebe des Gurtbandes sichtbar.

In der Faserpelzjacke hatte sich ein Abdruck des Gurtbandes irreversibel in das Faserpelz-Gewebe eingeprägt.

Bild C2-20 Unterer Umlenkbeschlag



Bild C2-21 Spuren an der Kleidung

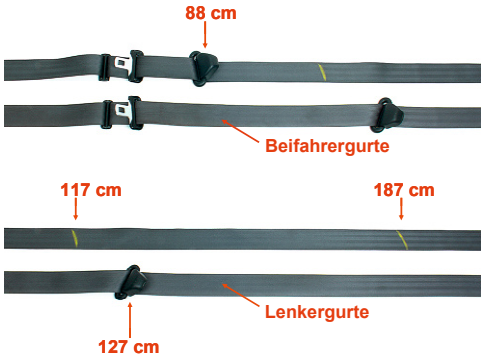


Bild C2-22 Gurtbandvermessung



Bild C2-23 Fehlerhaftes Anlegen des Gurtes

Diese Einprägung korrespondierte maßtechnisch genau mit der Breite des Gurtbandes.

Aber die Frage blieb offen: Wie kann oder muss dieses spurenkundliche Resultat interpretiert werden?

Bei der anschließenden Überprüfung der beiden Gurten im Unfallfahrzeug konnte das ungewöhnliche Spurenbild geklärt werden:

Die gefundenen Spuren auf der Fahrergurte befanden sich nicht dort, wo die Sicherheitsgurte durch den oberen Umlenkbeschlag verlief.

Wenn eine durchschnittlich gebaute, männliche Vergleichsperson die Sicherheitsgurte auf dem Beifahrersitz anlegte, befand sich der obere Umlenkbeschlag bei ca. 88 cm (**Bild C2-22**). Die Spuren befanden sich auf der Fahrergurte aber bei ca. 187 cm.

Die Erklärung sowohl des Spurenbildes an der Fahrersicherheitsgurte als auch der schweren Verletzungen konnte schließlich ermittelt werden:

Der Fahrer hatte sich die Fahrersicherheitsgurte nur um die Schulter gelegt, sodass es von außerhalb des Fahrzeugs den Anschein erweckte, er trage die Sicherheitsgurte korrekt (**Bild C2-23**).

Beim sehr harten Anprall des Suzuki Jeeps gegen den Baumstrunk blockierte der Aufrollmechanismus des Fahrersicherheitsgurts sofort. Er hielt dadurch die linke Schulter respektive den linken Oberarm des Fahrers zurück. Der Fahrer selber wurde durch die Trägheitskräfte mit großer Wucht nach vorne geworfen.

Die Fahrersicherheitsgurte bewirkte dadurch eine sehr hohe Belastung des Oberarms des Lenkers, der dadurch brach und dessen Muskeln zu einem großen Teil durchtrennt wurden.

Der Lenker verstarb zwei Wochen nach dem Unfall im Krankenhaus.

7.3 Bewertung von Spuren als Tragspuren

Bei der Bewertung von Spuren auf Sicherheitsgurten muss möglichst viel Information zum mutmaßlichen Unfallablauf bekannt sein, da die Bildung derartiger Spuren sehr stark vom Unfallablauf abhängig (Heftigkeit, Anprallrichtung etc.) ist.

Beim Vorhandensein von Spuren kann häufig der Beweis des Tragens der Sicherheitsgurte im Unfallzeitpunkt erbracht werden. Das Vorhandensein von Tragspuren jedoch ist **nicht** der Beweis, dass die Gurten **korrekt** getragen worden sind.

Dazu muss für eine seriöse Untersuchung auch geklärt werden, **wo** auf den Sicherheitsgurten durch die Umlenkbeschlägen der Sicherheitsgurte Spuren verursacht worden sein müssten.

7.4 Zusammenfassung

Je nach Anprallrichtung und Anprallheftigkeit ist beim Vorhandensein entsprechender Spuren an den Gurtkomponenten, insbesondere Reib-/Schürfspuren an den kunststoffbeschichteten Umlenkbeschlägen, auch zu prüfen, wo die Sicherheitsgurten im Unfallzeitpunkt Spuren verursachen müssten.

Das nicht korrekte Tragen der Sicherheitsgurten ist sehr gefährlich und kann neben dem Effekt, dass die Insassen bei einer Kollision nicht vom Sicherheitsgurt zurückgehalten werden auch schwere Verletzungen verursachen.

Literatur

[1] Halonbrenner, R., Spurenkundliche Untersuchung an Sicherheitsgurten, Archiv für Kriminologie, Band 180, 1978, Heft 3/4, S. 107–113

C3 Airbag-Systeme

Dr. Florian Kramer

1 Der Airbag als Sicherheitsbestandteil heutiger Automobile

Heutige Pkw sind zum Schutz der Insassen bei Frontalkollisionen zu etwa 90 % fahrerseitig und zu ca. 70 % auf der Beifahrerseite mit Airbags ausgestattet, während die Seiten-Airbags zum Schutz des Kopfes und des Thorax von Insassen bei Seitenkollisionen nur mit ungefähr 40 bis 50 % vertreten sind [1]. Weitere Schutzmaßnahmen wie Fuß- und Fond-Airbags befinden sich im Entwicklungsstadium, ihr Einsatz in der Serie ist umstritten und wird sich, wenn überhaupt, nur in Einzelfällen durchsetzen. In **Bild C3-1** sind Airbags dargestellt, die heute serienmäßig in Pkw anzutreffen sind.

Airbags bieten den Insassen (Fahrer und Beifahrer) bei Frontalkollisionen als Ergänzung zum Gurtsystem einen größtmöglichen zusätzlichen Schutz; sie bewahren insbesondere bei angelegtem Sicherheitsgurt den oberen Torso und den Kopf vor einem Aufprall auf harte Innenraum-Teile und verhindern somit schwerwiegende Verletzungen der Frontpassagiere [1]. Bei Seitenkollisionen verhindern die Airbags den direkten Kontakt zwischen den stoßzugewandten Insassen und Innenraum-Teilen, wie Türverkleidung, B-Säule und Dachrahmen, sowie den Aufprall auf die Motorhaube des stoßenden Fahrzeugs oder den Kontakt mit eindringenden Hindernissen.

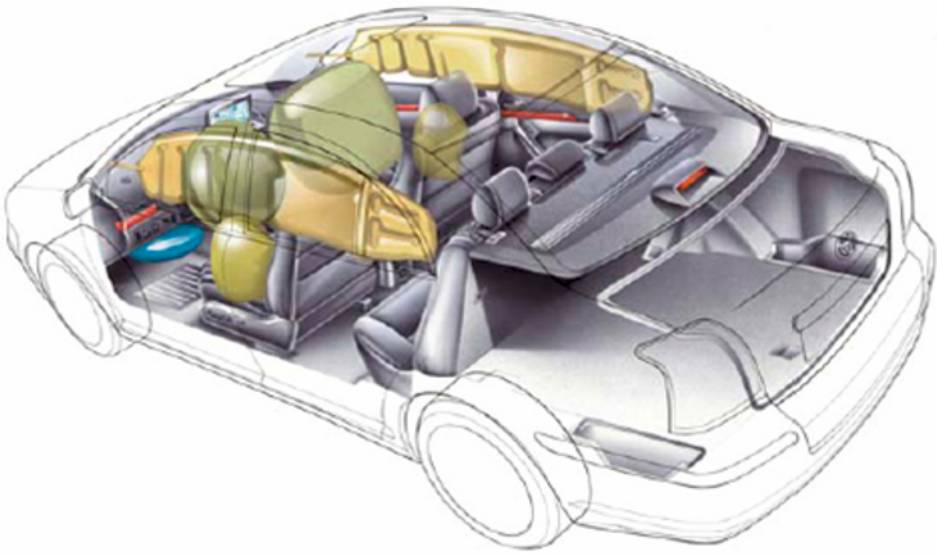


Bild C3-1 Beispiel für die Airbag-Ausstattung heutiger Pkw (Fahrer- und Beifahrer-Airbag, Knie-Airbags, Seiten-Airbags in den vorderen Sitzen sowie durchgehende Kopf-Airbags) [2]

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_35

2 Komponenten und Funktionsweise von Airbag-Systemen

Die Bauweise von Airbag-Systemen ist deutlich einfacher als die von Gurtsystemen, birgt jedoch aufgrund der hohen gespeicherten Energie neben der zweifellos vorhandenen Schutzwirkung ein nicht zu unterschätzendes Risikopotenzial, dem im Rahmen der Serien-Entwicklung und -Anpassung höchste Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. Airbag-Systeme bestehen aus den Sensoreinheiten zur Detektierung der frontalen oder lateralen Unfallschwere, dem Zentral-Steuergerät und dem eigentlichen Airbag-Modul. Das Airbag-Modul umfasst das Gehäuse, den Generator mit Treibmittel, Anzünder und Filter und den gefalteten Luftsack. Für Fahrer und Beifahrer bei Frontalkollisionen ist das Airbag-Modul im Lenkrad bzw. in der Instrumententafel hinter einer Abdeckung untergebracht. Zum Schutz der Insassen bei Seitenkollisionen befindet sich das Modul im seitlichen Dachrahmen als Kopf-Airbag und in der Sitzlehne bzw. in der Türverkleidung als Thorax-Airbag.

Sobald mit Hilfe eines Schwellwert-Vergleichs im Steuergerät ein Unfall bestimmter Schwere erkannt wird, gelangt ein Zündstrom an den Anzünder im Generator, der das Treibmittel entzündet. Beim Abbrand des Treibmittels entsteht ein nicht-toxisches Gas, das den Luftsack innerhalb kürzester Zeit entfaltet (vgl. **Bild C3-2**), so dass der Insasse in das bereitgestellte Polster eintauchen kann. Der erforderliche Angleich der Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeuginnenraum und Insassen erfolgt durch das Abströmen des Gases aus dem Luftsack über sorgfältig dimensionierte Ausströmöffnungen oder durch das luftdurchlässige Gewebe des Luftsacks.

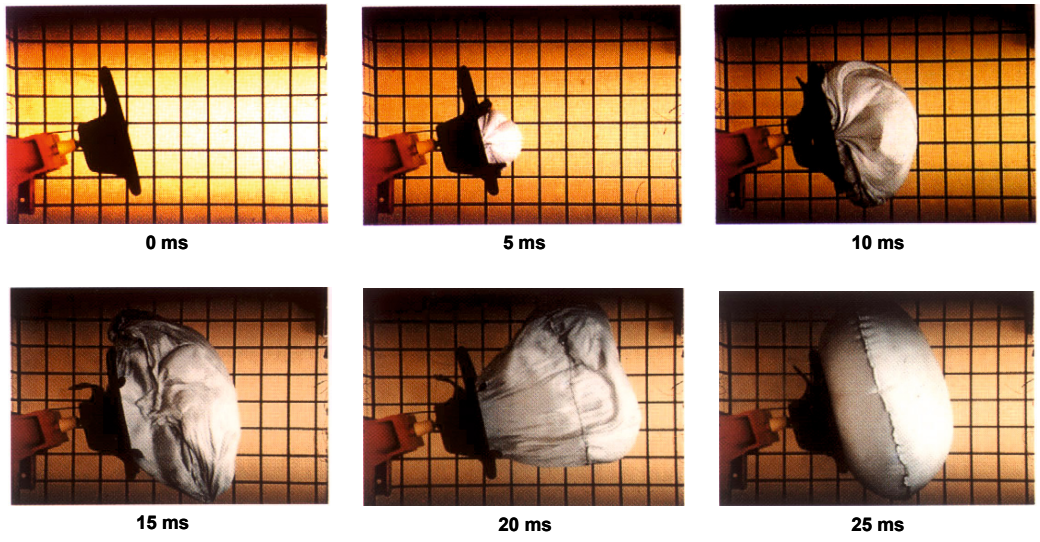


Bild C3-2 Entfaltungsvorgang des Fahrer-Airbags vom Zeitpunkt der Zündung bis zur vollständigen Ausbildung des Luftsacks [3]

3 Sensierung und Auslösekriterien

Bei den Sensoren zur Aktivierung der verschiedenen Airbags sind zu unterscheiden einerseits diejenigen, die das Unfallereignis in frontaler oder in lateraler (seitlicher) Richtung detektieren, und andererseits die Sensoren zur Insassenerkennung. Während erstere üblicherweise auf dem Prinzip der Beschleunigungsmessung basieren und die Unfallschwere bewerten, werden die Systeme zur Insassenerkennung dazu verwendet, das Verletzungsrisiko der Insassen im Falle einer Airbag-Auslösung so gering wie möglich zu halten. Den Hintergrund bildet die US-amerikanische Sicherheitsgesetzgebung, nach der ein geringes Risiko bei Airbag-Entfaltung (Low risk deployment) und/oder eine Airbag-Abschaltung (Suppression of airbags) bei OoP-(Out of Position-)Situationen oder bei Anwesenheit kindlicher Insassen gefordert wird [4].

Zur Detektierung von Frontalkollisionen sind im Frontbereich des Fahrzeugs Sensoren, so genannte Up Front-Sensoren, angebracht. Ihre Aufgabe besteht darin, eine Kollision zu einem möglichst frühen Zeitpunkt zu erkennen. Dabei wird das Ziel verfolgt, eine sicherheitstechnisch orientierte Abstufung verschiedener Crash-Szenarien zu erreichen, insbesondere aber die Schwere eines Unfalls zu detektieren. Das aufgenommene Signal wird digital an die Airbag-Elektronik im Steuergerät übertragen und über einen geeigneten Crash-Algorithmus bewertet [4]. Damit wird erreicht, in Abhängigkeit von der Unfallschwere angepasste, so genannte adaptive Insassenschutz-Systeme, zeitgerecht und abgestuft zu aktivieren. Mit der Einführung der Seiten-Airbags wurden zusätzliche Sensoren erforderlich, um Seitenkollisionen rechtzeitig detektieren zu können. Sie befinden sich in exponierter Stelle, und zwar in der Tür- oder in der Seitenstruktur, da die zeitgerechte Erkennung einer drohenden Kollision sehr kurze Signallaufzeiten erfordert. Zur Unterscheidung der Front-Sensoren werden diese ausgelagerten Sensoren auch Seiten-Sensoren genannt.

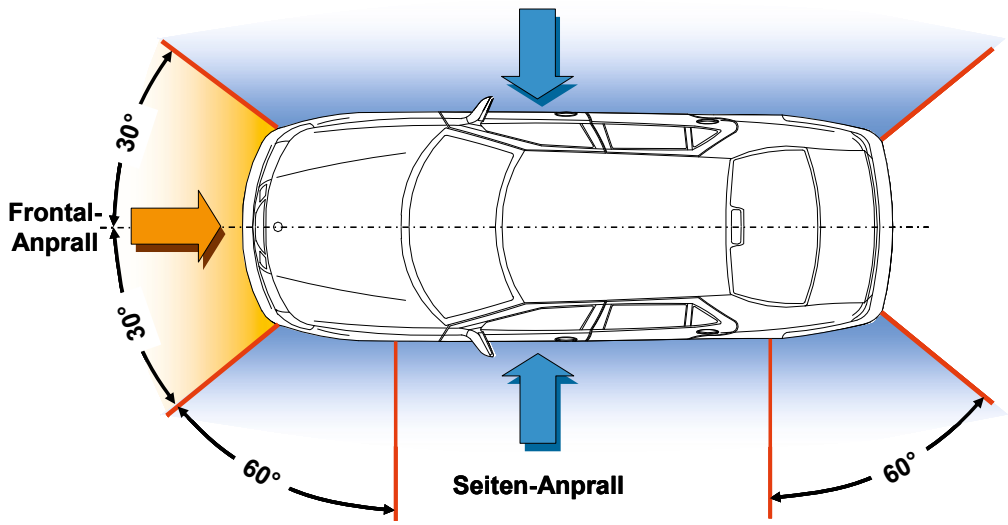


Bild C3-3 Kriterien zur Auslösung von Airbags [5]

Bei den Kriterien zur Auslösung der Airbags sind Einflussfaktoren von Bedeutung, nach denen zunächst unterschieden wird, in welcher Richtung – frontal oder seitlich – der Anprall erfolgt (**Bild C3-3**). Zudem sind die Absatzmärkte von Bedeutung, in dem Sinne nämlich, welche gesetzlichen und Verbraucherschutz-Anforderungen anzuwenden sind bzw. erfüllt werden müssen. Davon und von hersteller-spezifischen Vorgaben schließlich hängt ab, welche Auslegungsphilosophie verfolgt und vorangetrieben wird. Aus dieser Vielzahl recht unterschiedlicher Rahmenbedingungen ist verständlich, dass die Auslösekriterien sich ebenfalls unterscheiden und nicht durch allgemeingültige Aussage angegeben werden können. Dennoch lassen sich Anhaltspunkte formulieren, die eine Einschätzung der Auslöseschwellen zulassen.

4 Fragestellung aus der Sicht des Gutachters

Muss der Airbag bei Unfällen mit starker Beschädigung auslösen? Diese Frage stellt sich bei der Begutachtung von kollidierten Autos häufig. In besonderen Fällen kann aber bei Kollisionen eine erhebliche Deformation auftreten ohne dass die zur Auslösung erforderliche Schwelle überschritten wurde, d. h., die Beschädigung von Karosserieteilen stellt nicht unbedingt ein zutreffendes Maß für die Unfallschwere dar. Andererseits kann es theoretisch zu Fehlauslösungen von Airbags kommen, ohne dass die vorgesehenen Kriterien erreicht wurden. Dies allerdings ist äußerst unwahrscheinlich, dies beweisen zahlreiche Versuche unter extremen Bedingungen, aber auch die vorliegenden Erfahrungen aus mittlerweile millionenfach ausgelieferten Airbag-Fahrzeugen.

Was passiert bei Rettungsarbeiten an Unfallfahrzeugen, bei denen die Airbags nicht ausgelöst wurden? Grundsätzlich gilt, dass bei derartigen Situationen zunächst die Stromklemmen von der Batterie gelöst werden müssen, bei einigen neueren Fahrzeugen erfolgt dies automatisch. In seltenen Fällen kann es durch große Hitzeentwicklung, z. B. bei Fahrzeugbränden, oder unsachgemäßem Hantieren zur Auslösung der Airbags kommen. Automobilhersteller haben bereits spezielles Informationsmaterial für Rettungsdienste veröffentlicht, die Hinweise auf die Lage der Airbag-Generatoren geben und die Handhabung im Rettungsfall erläutern.

Was passiert, wenn man ganz vorne, also ganz nahe am Airbag sitzt? Der Airbag entfaltet sich in Unfallsituationen mit einer sehr hohen Geschwindigkeit. Das bedeutet, dass Insassen, die sich im Entfaltungsbereich befinden, z. B. nach vorne gebeugt sind, oder Gegenstände in diesen Bereich halten, z. B. Buch oder Flasche, äußerst gefährdet sind. Man spricht dabei von Out-of-Position- oder OoP-Situationen. Airbags können ihre Schutzwirkung nur entfalten, wenn sich die Insassen in „normaler“ Sitzposition befinden, vor allem aber angegurtet sind.

Lassen sich auch nicht benutzte Airbag-Module ausbauen? Grundsätzlich ja, doch schützen sie nur in eingebautem Zustand. Ihre Wiederverwendung in zu reparierenden Fahrzeugen ist jedoch nicht unproblematisch und sollte daher besser unterbleiben, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass sie durch einen Unfall in Mitleidenschaft gezogen wurden und ihre einwandfreie Funktionalität und Wirksamkeit zweifelhaft ist.

Lassen sich aus dem Steuergerät Informationen auslesen, die Auskunft über das richtige Auslöseverhalten geben? Grundsätzlich liegen im Steuergerät Informationen vor, die Aufschluss über die Auslösebedingungen geben können. Die Auslesemöglichkeit ist allerdings nur durch den jeweiligen Hersteller gegeben, der auch die Auslösestrategie und die entsprechenden Auslöseschwellen festlegt.

Welche Aufzeichnungen können bei (Gurtstraffer- und/oder) Airbag-Auslösung erwartet werden? Die Beantwortung ist vom Fahrzeughersteller und -typ abhängig, sie lässt sich somit nicht eindeutig beantworten. Generell aber werden bei modernen Pkw folgende Größen sensiert [6]:

- Vorgelegene Störungen vor der aktuellen Kollision nach Art und Zeitpunkt,
- Auslösefreigabe bei der aktuellen Kollision auf niedrigem Verzögerungsniveau,
- Verzögerungsverlauf vor und nach der Kollision,
- aus der Verzögerung errechnete Geschwindigkeitsänderung,
- Zündsignale nach Zeit und Größe für die Airbags (und für die Gurtstraffer) sowie
- Bestätigung der Auslösung von Airbags (und Gurtsystemen).

Gelegentlich werden bei manchen Fahrzeugen bereits zusätzlich Bremsdaten, Raddrehzahlen, Gierrate, Motordrehzahl, Außentemperatur und andere Größen aufgenommen. Die Speicherung der für die Unfallrekonstruktion relevanten Daten ist aus Kostengründen jedoch eingeschränkt, sie dient vorzugsweise den System-Diagnoseerfordernissen. Die Auskünfte von Automobilherstellern und -zulieferern erlauben jedoch keine einheitliche Festlegung.

Literatur

[1] Kramer, F.: Passive Sicherheit/Biomechanik II. Vorlesungsskript der gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), Dresden 2006
[2] Wagner, F.: Sicherheit von Kopf bis Fuß. TOYOTA-Magazin 1/2004
[3] „Die passive Sicherheit des AUDI 100“. Informationsservice der AUDI AG, Ingolstadt 1994
[4] Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. 2. erweiterte und überarbeitete Auflage. Vieweg Verlag, Wiesbaden 2006
[5] Kramer, F.: Airbags bei Seitenkollisionen – Funktionalität, Wirksamkeit und Auslöse-Kriterien. Vortrag bei der AREC-Tagung in Neumünster, 2006
[6] Larl, W.: Digitale Spuren – Neue Möglichkeiten in der Sachbeweisführung am Beispiel der Kfz-Airbag-Steuerung. Im InterNet >http://www.jpcity.de/digitale_spu-ren.htm<. 2006

C4 Schutzhelme

Jörg Arnold

1 Einleitung

Bei Verkehrsunfällen mit Zweirädern (Fahrräder, Motorräder) ist die Untersuchung der Schutzhelme im Zusammenhang mit der Frage bedeutsam, ob und wie der Helm beim Unfall getragen wurde.

Der Grund weshalb diese Frage beantwortet werden muss, sind die häufig sehr schweren oder tödlichen Verletzungen, die sich Zweiradfahrer bei Verkehrsunfällen zuziehen. Speziell falls während des Unfallverlaufs ein Helmverlust erfolgt, muss untersucht werden, ob der Helm getragen wurde oder ob es Anzeichen dafür gibt, dass z. B. der Kinnriemen nicht verschlossen war. Allenfalls ist zu beantworten, ob es zu einem spurenkundlich belegbaren Kontakt des Helms mit anderen Fahrzeugen oder Hindernissen oder der Fahrbahn kam.

Falls diese zweite Frage bejaht werden kann, sind als zweites häufig die Kontaktstelle(n) zu identifizieren und spurenkundlich zu verifizieren. Dies geschieht durch die Untersuchung der vorhandenen Mikrospuren, allenfalls bei geformten Beschädigungen durch die Identifizierung des Kollisionsgegners.

2 Erste Untersuchungen am Helm

Der Hersteller (Marke) und der Typ des Helms, die Größe und die Bauart (z. B. Integralhelm, Jet-Helm, Motocross-Helm etc.) sowie das für die Außenschale verwendete Material (z. B. glasfaserverstärktes Polyester, ABS, Carbonverstärkungen etc.) sowie die Außenlackierung sind zu ermitteln respektive genau zu dokumentieren.

Dann sind der visuell feststellbare Zustand des Helms (Außenschale, Innenseite, Polsterungen, Kinnriemen, Visier etc.) sowie die unfallbedingten Beschädigungen zu ermitteln und genau zu dokumentieren.

3 ECE-Typenprüfung von Helmen

Jeder Helm ist auf der Innenseite der Helmschale mit einem Prüfstempel gekennzeichnet.

Die Polystyrol-Schutzpolsterung im Bereich der Helmschale oben enthält eine Produktionsetikette. Auf der Polystyrol-Schutzpolsterung ist weiter die Größe vermerkt.
An der Komfortpolsterung der Polystyrol-Schutzpolsterung ist ein Prüfzeichen angenäht. Es enthält verschiedene Angaben gemäß der „ECE 324 Norm, Anlage 21, Regelung 22“ (Genehmigung der Schutzhelme und ihrer Visiere für Fahrer und Mitfahrer von Motorrädern und Motorfahrrädern, Stand bis und mit Ergänzungen vom 18.01.1998). Im „Anhang 3“ dieser Norm sind die Bedeutungen der verschiedenen Angaben (z. B. Herstellerland, Land, in dem die Typenprüfung erfolgte, Stand der Norm zum Zeitpunkt der Genehmigung etc.) vermerkt. Die Produktionsserie ist mit einer weiteren Nummer bezeichnet.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_36

Beim allenfalls vorhandenen Helmvisier ist zu prüfen, ob es sich um ein nicht getöntes oder ein getöntes Visier handelt, ob es auf den Helm passt und in welchem Zustand es ist (Kratzer, Verschmutzung, Beschädigungen etc.).



Bild C4-1 Beispiel für ein Genehmigungszeichen für einen Schutzhelm ohne oder mit Visier oder mehreren Visiertypen

4 Beschädigungen am Helm

Die festgestellten äußerlichen Beschädigung (z. B. am Kinnschutz links, auf der Helmrückseite etc.) sind im Detail zu beschreiben.

Dann muss der Helm sorgfältig in seine Einzelteile zerlegt werden, wobei darauf zu achten ist, dass an der Polystyrol-Schutzpolsterung keine Spuren verursacht werden.

Dazu muss die Helmschale mittels einer Bandsäge möglichst schonend aufgetrennt werden.

Die einzelnen Teile des Helms wie z. B. die glasfaserverstärkte Helmschale, die Polystyrol-Schutzpolsterung mit Komfort-Polsterung, die Polsterungen für den seitlichen Gesichtsbereich (Wangen) und Kinnbereich, der Kinnriemen mit Polsterung und Helmschloss, der Nackenschutz und das Visier mit den Scharnierteilen sind wiederum genau zu dokumentieren.

Im Bereich von Bruchstellen in der Helmschale sind diese genau zu charakterisieren. Es ist nach Absplitterungen von Teilen der inneren Helmschale zu suchen.

Der Zustand der Polystyrol-Schutzpolsterung ist zu dokumentieren, ebenfalls der Zustand der Komfort-Polsterung (z. B. ausgeprägte Tragspuren).

An der Polystyrol-Schutzpolsterung (primär auf der Außenseite) können – korrespondierend mit der Beschädigung der Helmschale – charakteristische Beschädigungen auftreten. Wenn dort das Polystyrol lokal schlaggeschädigt und deutlich weicher als das umliegende Polystyrol ist, muss eine so starke Schlageinwirkung stattgefunden haben, dass irreversible, plastische Deformationen des Polystyrols erfolgt sind.

Aufgrund langjähriger Erfahrung ist bekannt, dass solche Schadenbilder an der Polystyrol-Polsterung nur entstehen, falls sich der Kopf des Trägers beim schadenverursachenden Anprall im Helm befand. Die Masse des Polsters alleine genügt nicht, um irreversible, plastische Deformationen auf der Außenseite des durch die Helmschale geschützten Polystyrols herbeizuführen.



Bild C4-2 Beschädigungen an der Polystyrol-Schutzpolsterung am Kinnteil eines Integralhelms hinter der ebenfalls beschädigten Helmschale

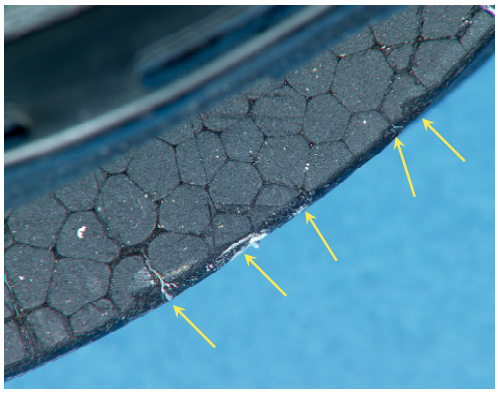


Bild C4-3 Irreversible Beschädigungen an der Polystyrol-Schutzpolsterung am Kinnteil eines Integralhelms hinter der ebenfalls beschädigten Helmschale

5 Untersuchungen am Kinnriemen und am Helmschloss

Der Zustand des Helmschlosses (z. B. eingesteckt, als der Sachverständige den Helm erhielt, Helmschloss funktioniert einwandfrei und weist Gebrauchsspuren auf) ist genau zu dokumentieren.

Die Untersuchung der Kinnriementeile in Bezug auf Tragspuren, sichtbaren Beschädigungen der Fasern der Kinnriementeile speziell im Bereich der Befestigungsteile der Helmschlossteile erfolgt unter der Stereolupe. Je nach Charakteristik der Beschädigungen an den einzelnen Fasern kann dies durch den normalen Gebrauch oder durch Unfalleinflüsse erklärt werden.

Häufig kann aber nicht gesagt werden, welche der Fasern schon vor dem Unfall beschädigt waren und welche allenfalls beim Unfall zusätzlich durchtrennt wurden.

Unregelmäßigkeiten der Webstruktur der Kinnriemen im Bereich der Befestigungsteile der Helmschlossteile können meist nicht eindeutig dem Gebrauch respektive dem Unfall zugeordnet werden.

Schmelzspuren, wie wir sie an Sicherheitsgurten nach Unfällen häufig finden, sind an einem Kinnriemen eines Helms nicht zu erwarten, da die Kräfte auf einen Kinnriemen mit den kollisionsbedingten Kräften auf Sicherheitsgurten nicht zu vergleichen sind.

Deutliche Tragspuren an den Kinnriemen, speziell im Bereich der Befestigungsteile der Helmschlossteile, deuten darauf hin, dass der Helm intensiv gebraucht wurde und dabei üblicherweise korrekt verschlossen war.

6 Literatur zu Helmverlusten bei Motorradunfällen

Es gibt verschiedene Studien in der Literatur, welche sich mit dem Thema „Helmverluste bei Motorradunfällen“ befassen.

Neben älteren Untersuchungen von Realunfällen (z. B. Richardson, H. A.: A Motorcycle Helmet Study, 1974, Thomas, C. et al.: Les lésions crâniennes des cyclomotoristes en accidents réels, 1976) hat die „Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik“ im Heft 294 im Jahr 1985 Resultate von Schlittenaufprallversuchen veröffentlicht, wo speziell das dynamische Beharrungsvermögen von Versuchshelmen auf Dummys untersucht wurde. In den beiden älteren Publikationen wird von 12 % der Fälle (Richardson) respektive neun von 33 Fällen (Thomas) von einem Verlust des Helms während des Unfallverlaufs berichtet.

Bei den Schlittenaufprallversuchen kam es zu keinem direkten Anprall des Helms während des Versuches, die Helme waren größenmäßig optimal angepasst und der Kinnriemen war mit einer definierten Kraft angezogen:

In 12,5 % der Versuche (sieben Fälle) wurde ein Abschleudern des Helms beobachtet.

In dieser Publikation wird auch dargelegt, dass es nahezu unmöglich ist, zu definieren, wann (mit welcher Kinnriemenkraft) ein Kinnriemen „korrekt angezogen“ ist.

D. Otte und E. G. Suren berichteten 1985 von Helmverlustzahlen von 16 % (Integralhelme) bis 25 % (Jethelme).

In der 1993 erschienenen Dissertation von W. Hell (Uni München) wurden 85 Unfälle untersucht, davon waren 21 Helme (24,7 %) während des Unfallverlaufs verloren worden. Davon waren bei zwölf die Kinnriemen sicher geschlossen (einer gerissen), bei sieben Fällen war es nicht klar und in zwei Fällen waren die Kinnriemen sicher nicht geschlossen gewesen.

Somit muss festgehalten werden, dass selbst bei korrekt angepasstem und korrekt mit geschlossenem Kinnriemen gesicherten Helm, in einem keineswegs zu vernachlässigenden Anteil von Motorradunfällen, mit einem Verlust des Helms während des Unfallverlaufs zu rechnen ist.

Videoaufzeichnungen von Crash-Versuchen mit Motorrädern und Dummys zeigen zudem, dass der Bewegungsablauf des Kopfes respektive des Helms eines Motorradfahrers bei und unmittelbar nach der Kollision hochgradig undefiniert ist und in weiten Bereichen variieren kann.

7 Zusammenfassung

Bei Unfällen mit verletzten oder getöteten Zweiradfahrern sind häufig Helme zu untersuchen. Zuerst müssen die genauen Daten des involvierten Helms ermittelt und die ECE-Kennzeichen entschlüsselt werden.

Aufgrund der Schadenbilder an der Polystyrol-Polsterung (z. B. im Kinnbereich) kann geklärt werden, ob sich der Kopf des Trägers beim schadenverursachenden Anprall im Helm befand. Die Masse des Polsters alleine genügt nicht, um irreversible, plastische Deformationen auf der Außenseite des durch die Helmschale geschützten Polystyrol-Schutzpolsterung herbeizuführen. Zusammen mit der beim Unfall getragenen übrigen Schutzbekleidung und aufgrund der gefundenen Tragspuren an der Komfort-Polsterung und der Tragspuren an den Kinnriemen, speziell im Bereich der Befestigungsteile der Helmschlossteile, ergeben sich verwertbare Hinweise, die darauf hindeuten, ob der Helm vor dem Unfall nicht oder nicht korrekt verschlossen getragen wurde.

8 Begriffsbestimmungen (Schutzhelme und Visiere ECE-R 22)

Im Sinn dieser Regelung bedeuten:

Schutzhelm: ein Helm, der vor allem dazu bestimmt ist, den Kopf des Benutzers gegen Stöße zu schützen. Bestimmte Helme können zusätzliche Schutzeinrichtungen besitzen;

Helmschale: der widerstandsfähige Teil des Schutzhelms, der ihm seine allgemeine Form gibt;

Schutzpolsterung: der Werkstoff zur Dämpfung der Aufprallenergie;

Komfortpolsterung: der Werkstoff, der dem Benutzer ein angenehmes Tragen gewährleistet;

Trageeinrichtung: alle Teile, die den Helm auf dem Kopf in der richtigen Lage halten, einschließlich gegebenenfalls vorhandener Teile für die Einstellung oder zur Verbesserung des Komforts;

Kinnriemen: ein Teil des Haltesystems, der unter dem Kinn des Benutzers verläuft, um den Helm in der richtigen Lage zu halten;

Kinnschutz: ein zusätzliches Teil des Kinnriemens, das sich an das Kinn des Benutzers anpasst;

Schild: der Vorsprung der Helmschale oberhalb der Augen;

Kinnbügel: der abnehmbare oder fest verbundene Teil des Helms, der den unteren Teil des Gesichts abdeckt;

Visier: ein vor den Augen angebrachter durchsichtiger Schild, der einen Teil des Gesichts abdeckt;

Augenschutz: durchsichtige Teile, die die Augen umgeben und abdecken;

Basisebene des menschlichen Kopfes: eine Ebene, die in Höhe der Öffnung der äußeren Gehörgänge und des unteren Randes der Augenhöhlen verläuft;

Basisebene des Prüfkopfes: eine der Basisebene des menschlichen Kopfes entsprechende Ebene;

Bezugsebene: eine parallel zur Basisebene des Prüfkopfes befindliche Konstruktionsebene, deren Abstand zur Basisebene des Prüfkopfes von der Größe des Prüfkopfes abhängig ist;

Schutzhelmtyp: Schutzhelme, die untereinander keine wesentlichen Unterschiede aufweisen, insbesondere hinsichtlich:

- der Fabrik- oder Handelsmarke oder
- der Werkstoffe oder der Abmessungen der Helmschale, der Trageeinrichtung oder der Schutzpolsterung. Ein Schutzhelm kann jedoch eine Reihe von Helmgrößen umfassen, sofern die Dicke des Schutzpolsters in jeder Größe aus der Reihe wenigstens gleich groß ist, wie jene des geprüften und den Vorschriften dieser Regelung entsprechenden Schutzhelms;

Visiertyp: Visiere, die sich voneinander in wesentlichen Einzelheiten wie den folgenden unterscheiden:

- Fabrik- oder Handelsmarke oder
- Werkstoffen, Abmessungen, Herstellungsverfahren (z. B. Strangpressverfahren), Farbe, Oberflächenbehandlung, Art der Befestigung am Helm;

Typprüfung: eine Prüfung zur Bestimmung, inwieweit der Helmtyp und/oder der Visiertyp, für den eine Genehmigung beantragt wurde, den Vorschriften entspricht;

Produktionskontrolle: eine Prüfung zur Kontrolle, ob der Hersteller in der Lage ist, Helme und/oder Visiere herzustellen, die genau denen entsprechen, für die eine Genehmigung beantragt wurde;

Laufende Überprüfung: die Prüfung einer bestimmten Anzahl Helme und/oder Visiere aus der gleichen Serie zur Prüfung, inwieweit sie den Vorschriften entsprechen.

Literatur

[1] ECE 324 Norm, Anlage 21, Regelung 22" (Genehmigung der Schutzhelme und ihrer Visiere für Fahrer und Mitfahrer von Motorrädern und Motorfahrrädern, Stand bis und mit Ergänzungen vom 18.01.1998) mit Anhängen

[2] Weitere Literaturverweise siehe Ziff. 6 dieses Kapitels.

C5 Reifen und Räder

Jörg Arnold

1 Einleitung

Bei Verkehrsunfällen erfolgt die Untersuchung von Rädern und Reifen primär im Zusammenhang mit der Frage, ob die Räder/Reifen als Unfallfolgen beschädigt wurden oder ob unfallursächliche Schäden an den Rädern/Reifen vor dem Unfall vorhanden gewesen sein könnten.

In diesem Kapitel werden nur unfallrelevante Spuren beschrieben, die durch den Betrieb des Fahrzeugs entstanden sind.

Falls solche Frage beantwortet werden müssen, sind ebenfalls allfällige Kontaktstelle(n) im Bereich der Unfallstelle zu identifizieren und spurenkundlich zu verifizieren.

Leider werden sehr häufig keine Spuren gesichert und insbesondere keine Mikrospuren von allfälligen Kontaktstelle(n) im Bereich der Unfallstelle. Das hängt damit zusammen, dass die Bedeutung solcher Mikrospuren nicht bekannt ist, dass die Mittel und Kenntnisse nicht vorhanden sind, um diese Mikrospuren sachgerecht zu sichern.

Für die Untersuchung von Reifen oder Felgen bezüglich unfallursächlicher Materialfehler oder Produktionsmängel verweisen wir auf die entsprechende Fachliteratur und speziell auf die Reifenspezialisten bei den Reifenherstellern.

2 Sicherstellung von Rädern und Reifen

Im Zusammenhang mit der Frage, ob die Räder/Reifen als Unfallfolgen beschädigt wurden oder ob unfallursächliche Schäden an den Rädern/Reifen vor dem Unfall vorhanden gewesen sein könnten ist es entscheidend, dass alle Räder sichergestellt werden.



Bild C5-1 Reifenschaden: Unfallursache oder Unfallfolge?



Bild C5-2 Reifen mit massiven Schäden: Produktionsfehler, Materialfehler oder das Resultat einer Fahrt mit (fast) drucklosem Reifen?

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_37

Nach der fotografischen Dokumentation des Zustands der möglicherweise unfallrelevanten Räder stehen so genannte „korrespondierende Schäden“ oder korrespondierende Spurenkomplexe an erster Stelle für die spurenkundliche Untersuchung der Räder.

3 Reifenschäden als Unfallfolgen

Korrespondierende Schäden entstehen primär bei Kollisionen gegen Hindernisse oder gegen andere Straßenfahrzeuge.

Es ist entscheidend, dass die entsprechenden Kontaktzonen an den Unfallfahrzeugen oder an ortsfesten Hindernissen gesucht und möglichst detailliert fotografiert werden.

4 Untersuchung von Rädern/Reifen

Der Zustand der zu untersuchenden Räder (Reifen/Felge/Ventil) muss bei Erhalt sauber dokumentiert respektive fotografiert werden.



Bild C5-3 Untersuchung von Rädern/Reifen: Dokumentation des Zustands der Räder/Reifen beim Erhalt des Rads



Bild C5-4 Untersuchung von Rädern/Reifen: Detail-Dokumentation des Zustands der Räder/Reifen beim Erhalt des Rads, Suche nach korrespondierenden Schäden



Bild C5-5 Spurenbild am Felgenhorn eines Rads, das über eine längere Strecke mit drucklosem Reifen gefahren wurde

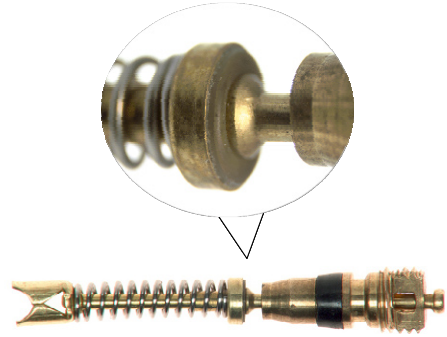


Bild C5-6 Überprüfung des Ventils: Beschädigungen des Ventilsitzes oder Verschmutzungen des Ventils können einen schleichenden Druckverlust verursachen

Bei der Untersuchung sind der Reifen und das Ventil zu kontrollieren. Schäden am Rad/Reifen können sowohl an der Außenseite (die vom Fahrzeug abgewandte Seite) oder an der Innenseite (die dem Fahrzeug zugewandte Seite) auftreten. Ebenso ist die Felge auf Beschädigungen zu untersuchen.

Zusätzlich müssen die Reifen auf Fremdkörper, wie eingefahrene Metallstücke, Nägel etc., die zu einem plötzlichen Druckverlust hätten führen können, überprüft werden.



Bild C5-7 Reifenspuren auf der Fahrbahn: Schleuderspuren eines Fahrzeugs mit drei intakten und eines drucklosen, stark walkenden Reifen (gelbe Pfeile). Charakteristisch sind die unregelmäßigen Ränder der Walkspur und die sehr unterschiedliche Spurzeichnungsintensität.

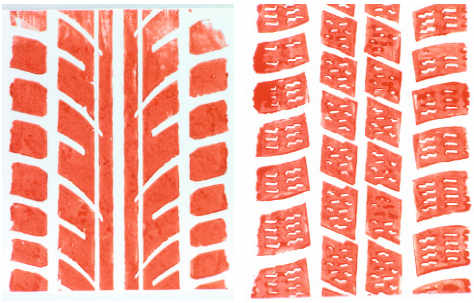


Bild C5-8 Beispiele von Reifenprofil-Abdrucken: Die Lamellen im Profil rechts sind typisch für Winterreifen.

5 Walkspuren an Rädern/Reifen

Tritt an einem Reifen aufgrund eines Luftverlustes ein langsamer Druckverlust ein, beginnt der Reifen zu walken und der Rollwiderstand beim Abrollen auf der Fahrbahn nimmt zu. Dabei wird der Pneu in der Aufstandsfläche bei jeder Radumdrehung übermäßig zusammengequetscht und geht nach der Bodenberührung wieder in seine Ursprungsform zurück – er wird gewalkt.

Die Walkarbeit vergrößert den Rollwiderstand beträchtlich. Bei der übermäßigen Verformung des Reifenkörpers wird dauernd sehr viel innere Reibung im Reifen überwunden, wobei ein großer Teil der Deformationsenergie in Wärme umgewandelt wird. Je deutlicher der Reifendruck unter dem geforderten Wert liegt, umso stärker nimmt die Walkarbeit zu und damit auch

der Rollwiderstand. Dies kann zur Folge haben, dass der Reifen undicht wird und die Restdruckluft plötzlich entweicht. Zudem bedeutet mehr Walkarbeit auch immer mehr Reibung und stark steigende Reifentemperatur, was im Extremfall zur Zerstörung des Reifens führen kann.

Charakteristische Spurenbilder, die beim übermäßigen Walken entstehen können, sind Rissbeschädigungen, Blaufärbungen und Wellenbildungen an der Reifenaußen- und/oder Reifeninnenseite (Innenseele, Schlauchersatz). Im Extremfall wird das Gummimaterial der Innenseele pulverisiert.



Bild C5-9 Walkspuren auf der Innenseite eines Reifens: Durch die übermäßige Erwärmung und das permanente starke Deformieren des Reifens, werden die Reifenwand und die Reifenschulter so heiß, dass sich das Grundmaterial thermisch zu zersetzen beginnt.

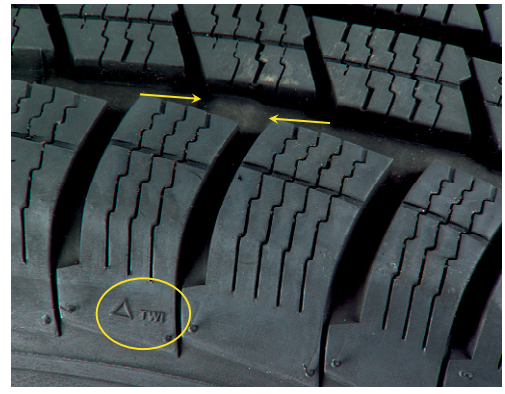


Bild C5-10 Abnützungs-Anzeiger (gelber Kreis): TWI steht für Tread Wear Indicator. Dabei handelt es sich um Abriebsindikatoren zur eindeutigen Erkennung der Reifen-Mindestprofiltiefe. Die Abriebsindikatoren befinden sich im Profilgrund der Reifen (gelbe Pfeile) und werden als durchgehende Stege sichtbar, wenn der Reifen die vorgeschriebene Restprofiltiefe erreicht hat.

Reifen mit zu geringem Fülldruck verlieren die Seitenführung und beeinflussen das Fahrverhalten des Fahrzeugs.

Wegen des enormen Rollwiderstands eines solchen verformungsanfälligen Reifens entstehen auf der Fahrbahn auch entsprechende Walkspuren, die am wellenförmigen und/oder intermittierenden Spurverlauf zu erkennen sind.

6 Zusammenfassung

Die Untersuchung von Rädern und Reifen erfolgt primär im Zusammenhang mit der Frage, ob die Räder/Reifen als Unfallfolgen beschädigt wurden oder ob unfallursächliche Schäden an den Rädern/Reifen vorhanden gewesen sein könnten.

Für die Untersuchung von Reifen oder Felgen bezüglich unfallursächlicher Materialfehler oder Produktionsmängel verweisen wir auf die entsprechende Fachliteratur und speziell auf die Reifenspezialisten bei den Reifenherstellern.



Bild C5-11 Dichtigkeitsprüfung nach einem Unfall mit Druckverlust: Nach dem Fotografieren wurde der Reifen neu aufgezogen, aufgepumpt und wird im Wassertank auf Dichtigkeit geprüft. Damit kann ein unfallursächlicher Druckverlust ausgeschlossen werden.



Bild C5-12 Fremdkörper im Reifen: Nach der Dokumentation des Fremdkörpers im Reifen (senkrecht zur Lauffläche, tangential und wenn möglich von Innen fotografieren) den Fremdkörper entfernen und ebenfalls fotografieren.

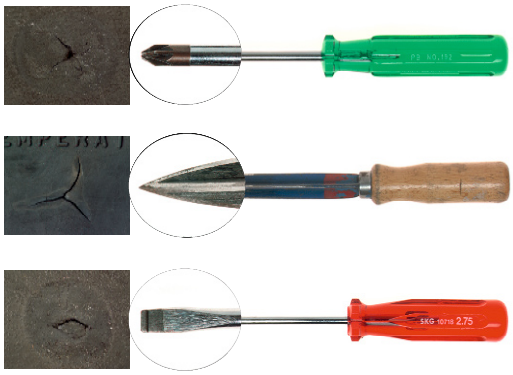


Bild C5-13 Sachbeschädigungen an Reifen: charakteristische Beschädigungen von verschiedenen Tatwerkzeugen

Literatur

[01] ETRTO, The European Tyre and Rim Technical Organisation, ETRTO Standards Manual 2005
[02] http://www.etrto.org
Einige Homepages von Reifenherstellern (nicht vollständig)
[03] http://www.dunlop.de
[04] http://www.michelin.com
[05] http://www.conti-online.com/generator/www/start/index_uv_de.html
[06] http://www.semperit.com/
[07] http://www.goodyear.com/
[08] http://www.harriger.com/tiremakers.htm (Übersicht über die allermeisten Reifenhersteller)

C6 Glühlampen

Jörg Arnold

1 Einleitung

Bei Verkehrsunfällen erfolgt die Untersuchung von Beleuchtungssystemen im Zusammenhang mit der Frage, ob ein an einem Unfall beteiligtes Fahrzeug (z. B. Zweirad, Personenwagen oder Nutzfahrzeug) oder ein feststehendes Objekt (z. B. Kandelaber) beleuchtet war oder ob einzelne Statusanzeigelampen wie Blinker, Bremslichter o. Ä. im Kollisionsmoment aktiviert waren oder nicht.

Um diese Frage beantworten zu können, müssen verschiedene Bedingungen erfüllt sein, um den Beleuchtungszustand spurenkundlich zu identifizieren und allenfalls das erhaltene Resultat zu verifizieren.

Leider werden sehr häufig die entsprechenden Glühlampen nicht gesichert oder lediglich ein Teil der interessierenden Glühlampen. Das hängt damit zusammen, dass die Bedeutung des Resultats solcher Untersuchungen nicht erkannt wird, dass die Mittel und Kenntnisse nicht vorhanden sind, um Glühlampen sachgerecht zu sichern oder dass die Möglichkeiten der Auswertung von Glühlampen nicht bekannt sind.

2 Sicherung von Glühlampen

Die zwei zentralen Probleme (neben der Nicht-Sicherstellung) bei einer solchen Fragestellung in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle sind:

1. Entweder ist nicht klar, dass der Zustand einzelner scheinbar „unbeschädigter“ Glühlampen strittig ist,
2. oder die interessierenden Glühlampen sind im Bereich mit starken Beschädigungen selber beschädigt oder nicht sofort auffindbar.

Für eine seriöse Untersuchung von Glühlampen ist man darauf angewiesen, dass möglichst auch „Vergleichsmaterial“ sichergestellt wird! Wenn immer möglich sollten alle parallel geschalteten Glühlampen, d. h. alle Glühlampen, die die gleiche Funktion haben, sichergestellt werden.

In sehr stark beschädigten Zonen von Unfallfahrzeugen sind allenfalls die Glühlampen ebenfalls zerstört. Dann kann es aber sein, dass im Armaturenbereich zumindest die Kontrolllampen zu den zerstörten Glühlampen in den Schadenzonen noch vorhanden sind.

Wir stellen bei vielen Kollisionen häufig stark unterschiedliche Spurenbilder respektive ungleiche Wendeldeformationen an den verschiedenen parallel geschalteten Glühlampen mit der gleichen Funktion fest. Die entsprechenden Spuren sind im unmittelbaren Bereich der Schaden- respektive der Kontaktzonen meist deutlich ausgeprägt und nehmen mit zunehmender Distanz von den Kontaktzonen rasch ab.

Dies hängt direkt damit zusammen, dass aktivierte Glühwendeln nur bei starken Erschütterungen und damit nur im Bereich der Kontaktzonen bleibend deformiert werden.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_38

Intakte Glühlampen können direkt in sauberen Plastiktütchen oder anderen geeigneten kleinen Behältern gesichert werden.

Defekte Glühlampen sollen nie direkt in Watte gesichert werden. Als Hilfsmittel können defekte Glühlampen in ein sauberes starkes Papier eingewickelt und dieses dann mit Klebeband gesichert werden.

3 Untersuchungen von Glühlampen

3.1 Visuelle und elektrische Untersuchung

In einem ersten Schritt werden die zu untersuchenden Glühlampen visuell beurteilt (z. B. auf äußerliche Beschädigungen, oxidierte oder korrodierte Kontakte, Schwärzung des Lampenkolbens, losen Glaskolben etc.).

Dann erfolgt mit einem Ohmmeter eine Durchgangsprüfung, um festzustellen, ob ein Stromdurchfluss durch die Glühlampe noch erfolgen könnte.

Erst nach diesen Voruntersuchungen erfolgt die eigentliche mikroskopische Untersuchung der Glühlampe.

3.2 Beurteilungskriterien bei Glühlampenuntersuchungen

Die im Glaskörper (Kolben) enthaltenen Wendeln sind aus Wolframdraht hergestellt und in kaltem Zustand – vor allem nach längerer Betriebszeit – sehr spröde. Durch eine stärkere Erschütterung kann eine solche Wendel an beliebigen Stellen brechen, wobei die Bruchflächen eine typische kristalline Struktur aufweisen.

In kaltem Zustand lässt sich eine Wendel durch Schlageinwirkungen auf die Lampe kaum deformieren, hingegen können durch direkte mechanische Einflüsse (Zug/Druck) in relativ seltenen Fällen Deformationen entstehen.

In heißem Zustand, d. h., wenn die Wendel stromdurchflossen ist, kann sie bei einer Schlageinwirkung bleibend deformiert werden. Diese Deformationen können bis zum „Reißen“ der Wendel führen, wobei die Trennstellen Verjüngungen und Schmelzperlen oder andere Schmelzspuren aufweisen können.

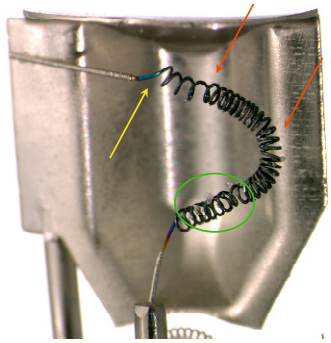


Bild C6-1 Zweifaden-Glühlampe (Abblendlicht/Scheinwerfer-Lampe, 12 V/55 W/55 W). Blaue Anlauffarben (Wolframblauoxid) sind ein Indiz für geringen Sauerstoffeintritt (gelber Pfeil). Deformationen der Wendel (Biegung, Dehnung, Stauchung) sind das Resultat einer stärkeren Erschütterung der heißen Glühwendel (rote Pfeile). An der Wendel angeschmolzene Glassplitter belegen, dass die Glühwendel heiß war, als der Glaskolben zerbrach (grüne Markierung).



Bild C6-2 Zweifaden-Glühlampe (Abblendlicht/Scheinwerfer-Lampe, 12 V/55 W/55 W). Gelbe Ablagerungen (Wolframoxid) auf der Abblendkappe und an der Wendel belegen Sauerstoffeintritt, Deformationen der Wendel (Biegung, Dehnung, Stauchung) bis zum Zerreißen oder Zusammenschmelzen sind das Resultat einer stärkeren Erschütterung der heißen Glühwendel.

Es ist zu berücksichtigen, dass erschütterungsbedingte Wendeldeformationen bei aktivierter Lampe nur leicht ausfallen oder ganz ausbleiben können, wenn der Anstoß nicht direkt auf die Glühlampe respektive auf den Lampenkörper erfolgte und/oder nicht genügend stark war, oder wenn der Anprall gegen eine weiche Fahrzeugzone erfolgte und dadurch gedämpft wurde.

Ferner ist bei Blinkerlampen zu beachten, dass bei einer Schlageinwirkung in der Dunkelphase, d. h. zwischen den Blinkimpulsen, eine geringfügig größere Energie erforderlich ist, um Wendeldeformationen herbeizuführen.

Alle diese Spurenbilder werden unter dem Stereomikroskop und, falls erforderlich, zusätzlich am Rasterelektronenmikroskop beurteilt.

Bei eingeschalteter Beleuchtung können entsprechende Spuren ausbleiben, wenn der Anstoß nicht genügend stark war und/oder nicht direkt auf die Lampen erfolgte.

Deshalb können bei fehlenden Deformationsspuren **keine** Aussagen über den Betriebszustand dieser Lampen bei der Kollision gemacht werden.



Bild C6-3 Raster-Elektronen-Mikroskopische Aufnahme eines kalten Wendelbruches: Typisch ist die kristalline Struktur der Bruchstelle (Vergrößerung ca. 1.000 x).



Bild C6-4 Blinkerbirne (12 V/21 W): Bei blinkender Lampe (60- bis 90-mal pro Minute) reagiert die Glühwendel immer wie eine heiße Wendel. Die Abkühlzeit bis unter 500° C liegt bei ca. 2 s.

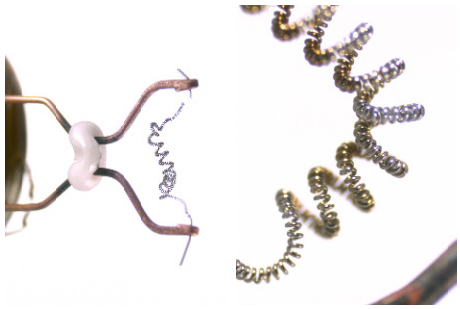


Bild C6-5 Wendeldeformationen und Oxidationsspuren: deutlich sichtbare Wendeldeformationen und Oxidationsspuren auf der Wendel (goldfarbene Verfärbungen)

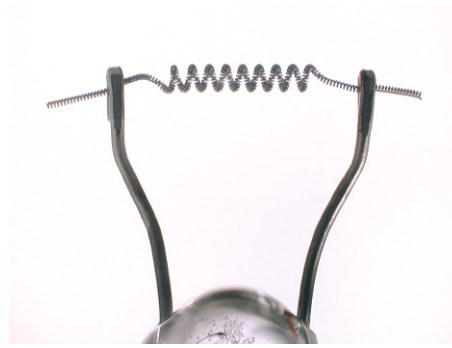


Bild C6-6 Abblend-Birne für einen Motorroller: Bei doppelt gewendelten Glühwendeln ist die erforderliche Minimalenergie (Anstoßheftigkeit) bis überhaupt Wendeldeformationen entstehen hoch.

3.3 Oxidationsspuren an Glühlampen

Wird der Glaskolben bei eingeschaltetem Licht zerstört oder undicht, tritt Luft-Sauerstoff in Kontakt mit der glühenden Wendel. Diese oxydiert, wobei sich gelbliches Wolframoxid bildet, welches abdampft und sich an kälteren Stellen, z. B. den Elektroden und der Abblendkappe, niederschlägt.

Ferner sind Anschmelzungen von Glasteilchen des Kolbens an den noch heißen Partien möglich.

Wird die Stromzufuhr unmittelbar vor dem Bruch des Kolbens unterbrochen, können Anlauffarben an der noch heißen Wendel und unter Umständen an der Abblendkappe entstehen.

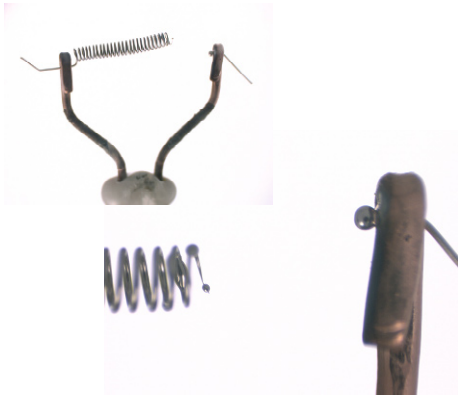


Bild C6-7 „Durchgebrannte“ Glühwendel: Wenn eine Glühwendel nach langem Gebrauch durchbrennt, entstehen an den Enden der Restwendeln charakteristische Schmelzspuren. Die Wendeln sind immer noch sehr regelmäßig gewendelt und nicht deformiert.

Fehlen alle diese Merkmale bei zerbrochenem oder undichtem Glaskolben, kann geschlossen werden, dass die Wendel beim Luftzutritt nicht unter Spannung stand.

3.4 Untersuchung von blauen Aufdampfungen an Glühwendeln

Die blauen Aufdampfungen können mit dem FT-IR-(FourierTransformations-InfraRot-)Spektrometer mit dem zugehörigen Mikroskop mit einer Transmissions-Messung im Wellenbereich von 4′000 cm^{-1} bis 700 cm^{-1} auf der Diamantzelle identifiziert werden. Die Spektren weisen auf eine anorganische Substanz wie ein Metallsalz oder ein Metalloxid hin.

Mit der energiedispersiven Röntgenfluoreszenz-Analyse kann festgestellt werden, dass die blaue Substanz zu einem beträchtlichen Anteil aus Wolfram besteht. Andere Elemente (mit einer Ordnungszahl größer als 11) können nicht nachgewiesen werden.

Gemäß „Römpp Lexikon Chemie – Version 2.0“ existiert ein Wolframblauoxid mit folgender Definition: „Wolframblauoxid ist ein Gemisch der Suboxide $W_{18}O_{49}$ und $W_{20}O_{58}$. Es wird in technischem Maßstab hergestellt durch Glühen von Ammoniumparawolframat unter Luftabschluss oder in wasserstoffhaltiger Atmosphäre. Die Farbe variiert von dunkelviolett ($W_{18}O_{49}$) bis dunkelblau ($W_{20}O_{58}$)“.

Bei der vorliegenden blauen Substanz handelt es sich also um Wolframblauoxid, welches durch Oxidation der Wolframwendel in sauerstoffarmer Atmosphäre entstanden ist.

Die Bildung von Wolframblauoxid in einer Glühlampe, welche während eines Unfalls beschädigt wird, ist ein seltenes Phänomen.

Normalerweise „glühen“ solche Glühlampen im normalen Fahrbetrieb unter wenig Sauerstoffzufuhr langsam „durch“ und werden dann – ohne Glühlampen-Untersuchung – ersetzt.

4 Bewertung von Spuren an Glühlampen

Bei der Beweiswertung gilt ganz speziell bei Spurenbildern an Glühwendeln die Regel aus der Kriminaltechnik: „Absence of evidence is not evidence of absence!“ oder anders gesagt: Beim Vorhandensein von Wendeldeformationen kann häufig der Beweis erbracht werden, dass die Glühwendel bei der Kollision aktiviert war.

Das Fehlen von Wendeldeformationen jedoch ist fast immer gleichbedeutend mit dem Befund, dass **keine Aussage** zum Beleuchtungszustand der entsprechenden Glühlampe gemacht werden kann: Entweder war die Glühlampe nicht aktiviert oder sie war aktiviert, aber die Kollisionserschütterung auf die Glühwendel war nicht heftig genug, um diese bleibend zu deformieren.

Bei nur ganz gering ausgeprägten Wendeldeformationen ist es häufig sehr schwierig, herauszufinden, ob die Unregelmäßigkeiten produktionsbedingte Schwankungen und in diesem Sinne „normal“ sind, oder ob es erste kollisionsbedingte Wendeldeformationen sind.

5 Fallversuche mit Glühlampen

Speziell die doppelt gewendelten Glühwendel von Mopeds und Motorrollern werden häufig erst bei sehr heftigen und direkt auf die Lampenfassung oder sogar die Glühlampe selbst wirkenden Anprallen deformiert.

Bei unklaren Spurenbildern können Fallversuche bei der Bewertung von Wendeldeformationen weiterhelfen.

Bei diesen Fallversuchen sind die Glühlampen so in der Fallapparatur zu orientieren und zu fixieren, dass die zwischen den Elektroden angebrachte Glühwendel entweder mit der Längsachse der Wendel in Fallrichtung oder quer zur Fallrichtung zeigt.

Die Versuche sollten mit mindestens zehn entsprechenden, fabrikneuen Glühlampen durchgeführt werden. Dabei werden die Lampen in eine Originalfassung für diesen Lampentyp montiert und diese fest mit der Fallapparatur verschraubt. Die Fallapparatur selber besteht komplett aus massiven Metallteilen und prallt ungebremst auf eine Holzauflage zu Boden.

Somit kann der ungebremste Anprall einer Glühlampe in ihrer Originalfassung gegen ein hartes Hindernis simuliert werden. Dies entspricht demnach den höchstmöglichen Verzögerungswerten bei einer Kollision „hart auf hart“ bei bekannter Anprallgeschwindigkeit. Die Anprallgeschwindigkeit ergibt sich aus der Fallhöhe nach dem Gesetz des freien Falls.

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \qquad g = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$$

In Realität verhalten sich Verkehrsunfallgegner mindestens zum Teil elastisch, wodurch der Aufprall gedämpft wird.

Durch Variation der Fallhöhe kann bestimmt werden, bis zu welcher Anprallgeschwindigkeit bei aktivierter Glühlampe überhaupt keine Deformationsspuren zu erwarten sind. Indem sowohl Versuche durchgeführt werden, in denen die Glühlampe so eingebaut war, dass die Wendel parallel zur Fallrichtung – z. B. entsprechend einer Frontalkollision – respektive senkrecht zur Fallrichtung – z. B. entsprechend einer 90° Seitenkollision – ausgerichtet sind, kann auch die Richtungsabhängigkeit der Deformationsspuren zumindest qualitativ bestimmt werden.

6 Blinkerlampen und Blinkfrequenz

Gemäß der ECE Regelung ECE-R 48 ist festgelegt „Die Richtungsblinker müssen spätestens eine Sekunde nach dem Einschalten aufleuchten und eine Blinkfrequenz von 90 ± 30 pro Minute (1 bis 2 Hz) aufweisen. Sie müssen je Seite vorn, seitlich und hinten gleichzeitig aufleuchten und erlöschen.“

Schweiz: Es gilt die Verordnung vom 19.06.1995 über die technischen Anforderungen an Straßenfahrzeuge (VTS): Die Blinkfrequenz für Motorfahrzeuge ist festgelegt (Artikel 79, Absatz 2) gemäß der ECE Regelung ECE-R 48.

Deutschland: Gemäß der StVZO, § 54 gilt: „Die Blinker müssen auf der jeweiligen Seite phasengleich mit einer Frequenz von 1,5 Hz ± 0,5 Hz (= 90 Impulse ± 30 Impulse pro Minute) blinken.“

Österreich: Gemäß Kraftfahrgesetz-Durchführungsverordnung 1967, § 15, gilt „Blinkleuchten von Fahrtrichtungsanzeigern müssen 60- bis 120-mal in der Minute aufleuchten; die erste Lichtausstrahlung darf nicht später als eine Sekunde nach dem Einschalten erfolgen.“

7 Xenon-Lampensysteme

Bei den Xenon-Lampensystemen sind gemäß aktuellem Kenntnisstand keine spurenkundlichen Untersuchungen möglich, die es erlauben würden, den Beleuchtungszustand im Kollisionsmoment zu rekonstruieren.

Da das Licht in einer mit Xenongas und Spuren von speziellen Salzen angereicherten Kavität zwischen zwei Elektroden als Plasma-Entladung respektive als Lichtbogen erzeugt wird, kann

keine materialkundliche oder spurenkundliche Untersuchung in Bezug auf den Beleuchtungszustand im Kollisionsmoment durchgeführt werden.

Bei den Xenon-Lampensystemen können nur in mit Datenaufzeichnungsgeräten ausgerüsteten Fahrzeugen Rückschlüsse auf den Beleuchtungszustand im Kollisionsmoment gezogen werden.





Bild C6-8 Beleuchtungseinheit mit einer Xenon-Lampe



Bild C6-9 Xenon-Lampen: verschiedene Bauformen mit oder ohne Reflektoren direkt am Lampenkörper



Bild C6-10 Xenon-Lampe: Kavität mit den zwei Elektroden. Das Licht wird durch eine Plasmaentladung respektive einen „Lichtbogen“ erzeugt. Spurenkundlich lässt sich der Beleuchtungszustand im Kollisionsmoment nicht ermitteln.

8 LED-Lampensysteme

Bei den LED-Lampensystemen sind gemäß aktuellem Kenntnisstand ebenfalls keine spurenkundlichen Untersuchungen möglich, die es erlauben würden, den Beleuchtungszustand im Kollisionsmoment zu rekonstruieren.

Da das Licht in LEDs (LED = light emitting diode) im Halbleiterkristall zwischen den zwei Elektroden durch den Übergang von Elektronen zwischen zwei Energieniveaus direkt erzeugt wird, kann keine materialkundliche oder spurenkundliche Untersuchung durchgeführt werden, um den Beleuchtungszustand im Kollisionsmoment zu bestimmen.

Bei den LED-Lampensystemen können nur in mit Datenaufzeichnungsgeräten ausgerüsteten Fahrzeugen Rückschlüsse auf den Beleuchtungszustand im Kollisionsmoment gezogen werden.

9 Zusammenfassung

Durch die Untersuchung der Glühlampen aus den verschiedenen Beleuchtungssystemen ist es bei den Unfällen, wo der Beleuchtungszustand an sich oder die Zustände von Statusanzeigen wie Blinker oder Bremslicht strittig sind, häufig möglich, den Beleuchtungszustand im Kollisionsmoment zu rekonstruieren.

Dabei sind, wenn irgend möglich, alle parallel geschalteten Glühlampen sicherzustellen, die dieselbe Funktion haben.

Die Sicherstellung von Glühlampen ist einfach und rasch ausgeführt.

Die Bewertung der gefundenen Spurenbilder erfordert viel Erfahrung, unfallanalytische Grundkenntnisse sowie entsprechende Laborausrüstung.

Bei eingeschalteter Beleuchtung können entsprechende Spuren ausbleiben, wenn der Anstoß nicht genügend stark war und/oder nicht direkt auf die Lampen erfolgte. Deshalb können bei fehlenden Deformationsspuren **keine** Aussagen über den Betriebszustand dieser Lampen bei der Kollision gemacht werden.

Literatur

[1] Binneweis, M.: Chemie in Glühlampen, Chemie in unserer Zeit, 20. JG 1986, VCH Verlagsgesellschaft mbh, D-6940 Weinheim, 1986, ISSN 0009-2851/86/0510-0141
[2] Bennicke, D., Goebel, R., Puchner, U.: Das Temperatur-Zeit-Verhalten von Glühwendeln aus Fahrzeuglampen Teil I: Scheinwerferlampen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1985/12, S. 343–346, ISSN 0724-2050
[3] Bennicke, D., Goebel, R., Puchner, U.: Das Temperatur-Zeit-Verhalten von Glühwendeln aus Fahrzeuglampen Teil II: Zusatzlichtlampen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1986/1, S. 9–12, ISSN 0724-2050
[4] Bennicke, D., Goebel, R., Puchner, U.: Das Temperatur-Zeit-Verhalten von Glühwendeln aus Fahrzeuglampen Teil III: 24-Volt Lampen, Verkehrsunfalll und Fahrzeugtechnik, 1987/5, S. 143–144, ISSN 0724-2050
[5] Bennicke, D.: Bewertung des Spurenbildes an Fahrzeuglampen nach Crashversuchen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1986/1, S. 9–12, ISSN 0724-2050
[6] Bennicke, D.: Untersuchung von Fahrzeuglampen nach einem Verkehrsunfall, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1991/4, S. 103–104, ISSN 0724-2050
[7] Bürger, H.: Der Nachweis des Schaltzustandes von KFZ-Lampen zum Unfallzeitpunkt, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1972/12, S. 237-246, ISSN 0724-2050
[8] Bürger, H.: Der Nachweis des Schaltzustandes von KFZ-Lampen zum Unfallzeitpunkt, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1973/1, S. 3–18, ISSN 0724-2050
[09] Halonbrenner, R.: Eine neu konstruierte Fallapparatur, Tagung über kriminaltechnische Untersuchungen, Tagungsband Bayrisches Landeskriminalamt München, März 1988, S. 1–5
[10] ECE Regelung ECE-R 48

Einige Homepages von Lampenherstellern (nicht vollständig)

[11] OSRAM Automobil-Beleuchtung: http://www.osram.de/produkte/automobil/index.html
[12] HELLA Automobil-Beleuchtung: http://www.hella.com/produktion/HellaDE/WebSite/Channels/Home/Home.jsp
[13] PHILIPS Automobil-Beleuchtung: http://www.lighting.philips.com/de_de/consumer/carlighting/index.php
[14] STANLEY Automobil-Beleuchtung: http://www.stanley.co.jp/e/product/car/index.html

Sämtliche ECE-Regelungen auf der UN-Homepage

[15] http:/www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html

C7 Fahrzeugschlüssel

Juergen Garbe, Matthias Martinsohn

1 Fragestellung

Schlüsseluntersuchungen werden meist von Versicherungen oder Staatsanwaltschaften im Zusammenhang mit der Entwendung von Fahrzeugen in Auftrag gegeben. Neben der Aufgabe, die sichergestellten oder vom Versicherungsnehmer eingereichten Fahrzeugschlüssel auf Vollständigkeit des Schlüsselsatzes zu überprüfen, stellt sich meist die Frage, ob weitere Schlüssel durch Kopieren der Originalschlüssel für das betreffende Fahrzeug hergestellt wurden. Für die Regulierung eines Schadens kann es von Interesse sein, ob die vom Halter angegebene Laufleistung nachvollziehbar ist. Im Einzelfall können je nach Ausführung der Schlüssel weitere Feststellungen getroffen werden.

2 Schlüssel und elektronische Sicherungssysteme

Mit der Weiterentwicklung der Fahrzeuge geht auch eine Entwicklung der Sicherungssysteme und damit der verwendeten Schlüssel einher. Neben dem mechanischen Schlüsselteil gewinnt der elektronische Teil moderner Schlüssel zunehmend an Bedeutung. Der Trend geht zu rein elektronischen Schlüsseln, ein Beispiel sind die in Serie eingeführten Keyless-Go-Karten.

2.1 Mechanischer Schlüsselteil

Einfache Knebelschlüssel (**Bild C7-1**), die für alle Zündschlösser eines Herstellers oder zumindest einer Baureihe passen, kommen heute nur noch bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen und Baumaschinen zum Einsatz. Ihr Zweck liegt nicht in einer effektiven Diebstahlsicherung, sondern in der Verhinderung der unbefugten Benutzung. Schlüssel mit offenen Schafteinschnitten (**Bild C7-2**) sind die klassischen Fahrzeugschlüssel und entsprechend weit verbreitet (Profilwende- und Profilschlüssel). Profilwendeschlüssel sind auch in modernen Fahrzeugen mit elektronischer Wegfahrsperre und Fernbedienung weiterhin im Einsatz. Einfache Profilschlüssel werden heute nur noch für Lenkerschlösser an Zweiradfahrzeugen verwendet.



Bild C7-1 Knebelschlüssel, hier ein Zündschlüssel eines Lkw (Mercedes-Benz L 508)



Bild C7-2 Profilwendeschlüssel (links) und Profilschlüssel (rechts)

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_39

Die zur Fertigung erforderlichen Fräswerkzeuge sind bei Zwei- (**Bild C7-3**) und Vierbahnenschlüsseln (**Bild C7-4**) sowie Innenbahnenschlüsseln (**Bild C7-5**) komplizierter als bei Profilschlüsseln. Bahnenschlüssel können auch nicht einfach mit einer Feile aus einem Rohling hergestellt werden. Vierbahnenschlüssel bieten gegenüber den Zweibahnen- und Profilschlüsseln den Vorteil, dass sich auf gleicher Länge eine größere Anzahl von Schließungskombinationen realisieren lässt.



Bild C7-3 Zweibahnenschlüssel



Bild C7-4 Vierbahnenschlüssel



Bild C7-5 Innenbahnenschlüssel

Erwähnenswert sind ferner Tibbe-Profilschlüssel (**Bild C7-6** bis **Bild C7-8**), Kreuzprofilschlüssel (**Bild C7-9**), Ringprofilschlüssel (**Bild C7-10** und **Bild C7-11**), Rundlochschlüssel (**Bild C7-12**) und Bohrmuldenschlüssel (**Bild C7-13**).



Bild C7-6 Tibbe-Profilschlüssel

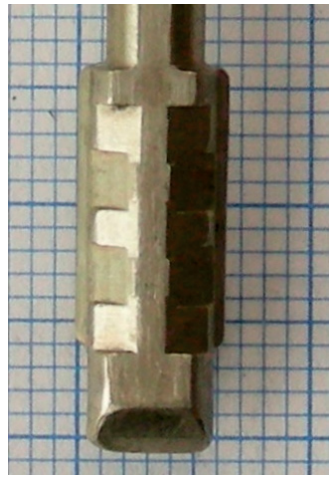


Bild C7-7 Tibbe-Profilschlüssel

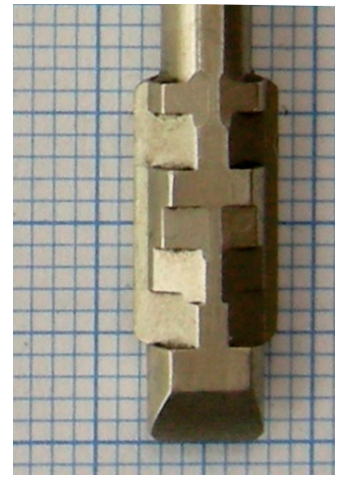


Bild C7-8 Tibbe-Profilschlüssel



Bild C7-9 Kreuzprofilschlüssel



Bild C7-10 Ringprofilschlüssel



Bild C7-11 Ringprofilschlüssel

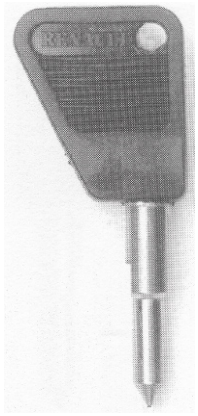


Bild C7-12 Rundlochschlüssel [1]



Bild C7-13 Bohrmuldenschlüssel, überwiegend Zubehör (Bremsscheibenschlösser)

Bei elektronischen Schlüsseln (**Bild C7-14**) wird der mechanische Zündschlüssel durch das Gehäuse des elektronischen Schlüssels oder einen Startschalter ersetzt. Hiermit übernimmt die als zusätzliche Sicherung eingeführte elektronische Wegfahrsperre allein die Diebstahlsicherung. Die weiterhin mitgelieferten Zwei- oder Vierbahnenschlüssel dienen nur noch als Notschlüssel für Türen und Deckel (spannungsloses Bordnetz).



Bild C7-14 Keyless-Go-Karten mit elektronischem Schlüssel: Der mechanische (Not-)Schlüssel befindet sich im Gehäuse des elektronischen Schlüssels oder wird in die Karte eingesteckt.

2.2 Elektronischer Schlüsselteil

Die in die Schlüsselreide integrierten IR-Fernbedienungen zum Betätigen der Zentralverriegelung dienen nicht primär der Sicherung des Fahrzeugs sondern vornehmlich dem Komfort. Erste Ansätze für die Integration von Elektronik in Fahrzeugschlüsseln mit dem Ziel einer erhöhten Diebstahlsicherheit wurden mit Fahrzeugschlüsseln realisiert, die mit Magnetstreifen versehenen waren und beim Abziehen die Diebstahlwarnanlage aktivierten (**Bild C7-15**).

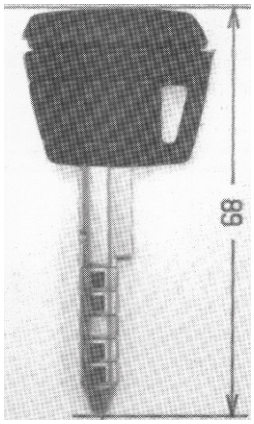


Bild C7-15 Rundschlüssel mit Magnetstreifen zur Aktivierung/Deaktivierung der Diebstahlwarnanlage [2]



Bild C7-16 Elektronischer Schlüssel

Der drastische Anstieg der Fahrzeugdiebstähle in Deutschland Anfang der 1990er Jahre führte zu der Forderung der Versicherungswirtschaft nach einer sich selbst aktivierenden elektronischen Wegfahrsperre mit den nachfolgenden wesentlichen Anforderungen [3]:

- Blockierung einer betriebsrelevanten Steuereinheit, z. B. Motormanagement, durch elektronisch codierten Eingriff;
- von mechanischen Schließsystemen unabhängige Wirkungsweise;
- Aktivierung ohne zusätzlichen, von der Handhabung des Fahrzeugs abweichenden Handgriff des Benutzers beim Verlassen, spätestens beim Verriegeln des Fahrzeugs;
- eine Möglichkeit, die Selbstschärfung zu deaktivieren, darf nicht gegeben sein.

1994 wurden die ersten elektronischen Wegfahrsperren eingeführt, bei denen ein Transponder in die Schlüsselreide integriert war. Im Zuge der Weiterentwicklung wurde ein Wechselcode Standard, der bei jeder Benutzung des Schlüssels neu generiert wird. Bei modernen/aktuellen Wegfahrsperren ist es bei einem Hersteller möglich, neben der Fahrzeug-Ident-Nummer auch den km-Stand bei der letzten Nutzung des Schlüssels in jeder entsprechend ausgerüsteten Fachwerkstatt auszulesen. Im Jahr 2006 wurden die im Schlüssel gespeicherten Informationen durch diesen Hersteller noch erweitert (**Bild C7-17**). Ein Ende dieser Entwicklung ist nicht absehbar.

Fahrzeugidentnr.	WBANC510X0CN
Typschlüssel:	525d
Leittyp:	NC61
Farbcode	0475
KM-Stand	25.253 km
Einlesedatum:	15.12.06 11:00
Schlüssel - Variante:	7
Polstercode	LCRK
Herkunft	KeyReader
Letzte Aktualisierung	14.12.06 08:38
Erstzulassung:	20.06.06
§ HU	07.09
§ AU	07.09
Batterie-Spannung:	12,03 Volt
Tankinhalt	54 Liter
Kühlmittel Temp.	79 °C
Aussentemperatur:	4,5 °C

Bild C7-17 Im Schlüssel gespeicherte Daten



Bild C7-18 Elektronischer Schlüssel

Zu beachten ist, dass mit dem Lesegerät der Vertragswerkstatt nur Daten aus dem ungeschützten Bereich des Schlüssels ausgelesen werden können, d. h. aber gleichzeitig, dass diese Daten mit entsprechender Software verändert werden könnten. Der geschützte Bereich kann nur vom Hersteller ausgelesen werden. In den elektronischen Teil des Schlüssels kann bei Benutzung des Fahrzeugs nur ein höherer Kilometerstand eingeschrieben werden als bereits eingetragen ist. Wenn die angezeigte Laufleistung eines Fahrzeugs durch eine „Tachojustierung“ manipuliert wird, bleibt der im Schlüssel eingetragene Kilometerstand so lange unverändert, bis der Kilometerzähler eine höhere Laufleistung anzeigt.

3 Schlüsseluntersuchung

Die klassische Schlüsseluntersuchung beschränkt sich auf eine mikroskopische Untersuchung bezüglich Duplizier- und Gebrauchsspuren. Zunehmende Bedeutung hat in den vergangenen Jahren die Untersuchung der elektronischen Bauteile und das Auslesen der in den Schlüsseln gespeicherten Daten gewonnen.

Derzeit ist die Mehrzahl der neu zugelassenen Motorräder, Quads und insbesondere der kleineren Zweiräder nicht mit einer elektronischen Wegfahrsperre ausgerüstet. Diese Fahrzeuge können also mit einem einfach anzufertigenden Nachschlüssel genutzt werden. Klassische Fahrzeuge und Youngtimer – alle durchweg ohne elektronische Wegfahrsperre – gewinnen zunehmend an Wert und werden damit noch über Jahrzehnte begehrte Objekte von Fahrzeugentwendungen – aber auch von fingierten Entwendungen – bleiben. Die Untersuchung auf mechanisch verursachte Spuren wird somit weiterhin ein wichtiger Bestandteil der Schlüsseluntersuchungen sein. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass ein Fahrzeugdiebstahl auch fingiert werden kann, wenn das Fahrzeug mit einer elektronischen Wegfahrsperre ausgerüstet ist, ein mechanischer Nachschlüssel mit einem Transponder aus einem der Originalschlüssel reicht aus. Insofern müssen auch Schlüssel von Fahrzeugen mit elektronischer Wegfahrsperre auf Duplizierspuren und ergänzend auf mechanisch verursachte Spuren beim Aus-/Einbau der Transponder untersucht werden. **Bild C7-19** bis **Bild C7-26** veranschaulichen, wie leicht zugänglich oftmals Transponder in Schlüsseln untergebracht sind.



Bild C7-19 Transponderfach ohne Werkzeug ausklappbar, der Transponder kann entnommen werden.

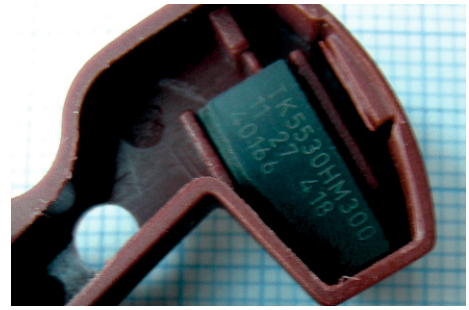


Bild C7-20 Vergrößerung aus **Bild C7-19**

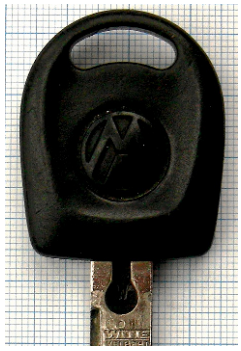


Bild C7-21 Die Transponder sind nach dem Öffnen der Gehäuse zugänglich, im Transponderfach werden sie nur von einem Klipp gegen Herausfallen gesichert.

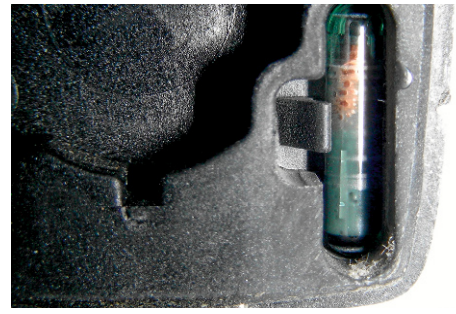


Bild C7-22 Detaildarstellung zu **Bild C7-21**



Bild C7-23 Aus dem Schlüssel eines Motorrads ist der Transponder nicht ohne Spuren zu entfernen, im Reserveschlüssel dagegen leicht zugänglich.

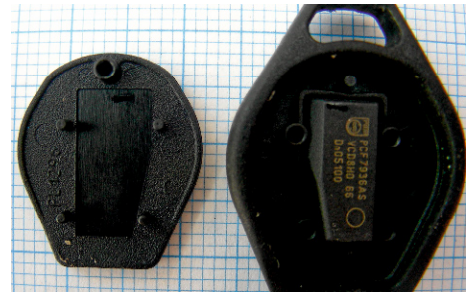


Bild C7-24 Detaildarstellung zu **Bild C7-23**



Bild C7-25 Das Transponderfach als separater Anhänger

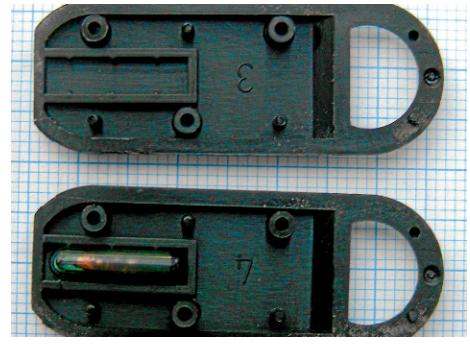


Bild C7-26 Detaildarstellung zu **Bild C7-25**

3.1 Zugehörigkeit zum Fahrzeug

Der erste Schritt bei jeder Schlüsseluntersuchung ist die Überprüfung der vorliegenden Schlüssel auf Zugehörigkeit zum Fahrzeug und Vollständigkeit des Schlüsselsatzes. Neben der hierfür unumgänglichen Informationsbeschaffung lohnt hier oft der Vergleich des Herstellungsdatums des Schlüssels (Gussuhren im Gehäuse von Fernbedienungen, aufgedruckte Daten auf den elektronischen Schlüsselteilen) mit dem Datum der ersten Zulassung (**Bild C7-27**).



Bild C7-27 Das aufgedruckte Herstelldatum (38. KW 2002) der Fernbedienung und die Gussuhr im Gehäuse (April 2002) müssen bei den Originalschlüsseln zum Fahrzeug in jedem Fall vor dem Datum der Erstzulassung liegen.

Tabelle C7.1 Überprüfungsmöglichkeiten von Fahrzeugschlüsseln (exemplarisch) nach [4] und Herstellerinformationen

Fahrzeughersteller	Mechanische Zuordnung	Elektronische Zuordnung	Anmerkungen
Audi	seit 1995	teilweise	
BMW	ja	ja, FIN u. km	siehe **Bild C7-17**
BMW Motorräder		nur mit Fahrzeug	voraussichtlich ab 2008 wie Pkw
Ford	nein		
Mercedes Benz	ja	ja, inklusive Fernbedienung	Anzahl der Zündschlossbetätigungen
Mercedes Benz Nutzfahrzeuge		nur mit Fahrzeug	Fahrzeuge mit elektronischen Schlüsseln, Auslesen ohne Fahrzeug, Zuordnung im Werk per E-Mail
Opel	ja		Schlüssel-Code im Fahrzeugbrief vermerkt
Porsche	ja	ja, inklusive Fernbedienung	
VW	seit 1995	typabhängig	Typen: 1T, 3C, (3D), (7L)

Einzelne Hersteller speichern im Transponder Informationen ab, die im Klartext ausgelesen oder eindeutig einem bestimmten Fahrzeug per Onlineabfrage zugeordnet werden können. Durch das Auslesen der Transponder ist damit eine konkrete Zuordnung möglich. Ein Hersteller sperrt bei Diebstahlmeldung den Onlinezugriff auf die Daten, so dass eine Zuordnung nur über eine (zeit- und kostenintensive) Schlüsseluntersuchung im Werk möglich ist. Überwiegend verzichten die Hersteller jedoch noch auf eine Dokumentation der in den Schlüsseln gespeicherten Informationen, so dass eine Zuordnung zu einem bestimmten Fahrzeug nicht möglich ist. Lediglich das Herstellungsdatum der Transponder kann bei allen Herstellern ermittelt werden. Eine Zuordnung des mechanischen Schlüsselteils ist bei nahezu allen Fahrzeugherstellern (Pkw) möglich, wobei die Zuordnung infolge der nur begrenzten Anzahl unterschiedlicher Schließkombinationen nur vom Fahrzeug zum Schließprofil erfolgen kann.

3.2 Duplizierspuren

Der Abtaststift von Kopierfräsmaschinen hinterlässt beim Kopiervorgang Spuren auf der Schlüsselbahn, die bei Profilschlüsseln deutlich von normalen Gebrauchsspuren zu unterscheiden sind (**Bild C7-28** bis **Bild C7-33**). Die Ausprägung dieser Abtastspuren – nicht ihr Spurverlauf – ist jedoch von der eingesetzten Maschine und dem Maschinenbediener abhängig, so dass solche Spuren teilweise nur bei mikroskopischer Untersuchung detektiert werden können.

Ferner werden beim Kopierfräsen oft Spannspuren verursacht, die anhand des regelmäßigen Musters der Spannbacken auf beiden Seiten des kopierten Schlüssels erkennbar bleiben (**Bild C7-32** und **Bild C7-33**).

Bei der lichtmikroskopischen Untersuchung erscheinen die Kopierspuren als Kratzspuren in Schlüssellängsrichtung, die – anders als normale Gebrauchsspuren – nahezu unabhängig von der Höhenlage des jeweiligen Profilabschnitts und über die gesamte Schlüssellänge gleichmäßig ausgeprägt sind.



Bild C7-28 Kopierspur auf einem Profilschlüssel

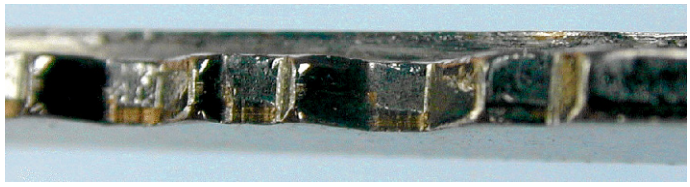


Bild C7-29 Makroaufnahme der Kopierspur

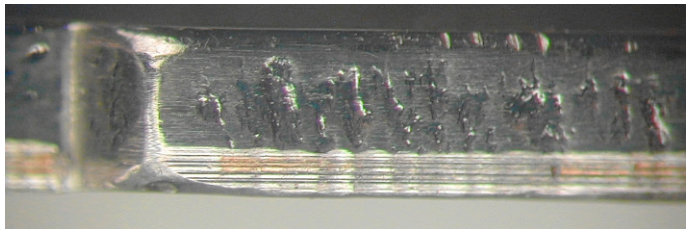


Bild C7-30 Lichtmikroskopische Aufnahme der Kopierspur im Bereich des ersten Plateaus nach der Schlüsselspitze

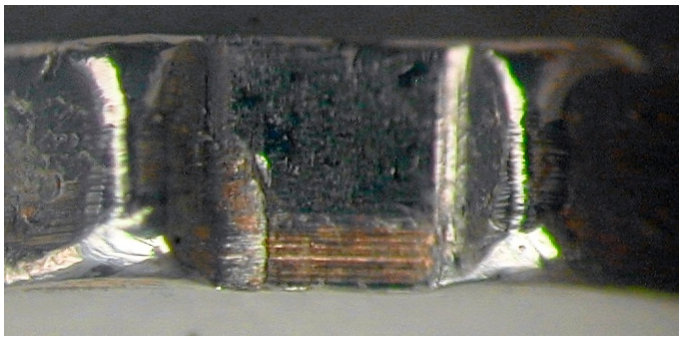


Bild C7-31 Lichtmikroskopische Aufnahme der Kopierspur im Bereich der letzten Senke vor dem Schlüsselschaft

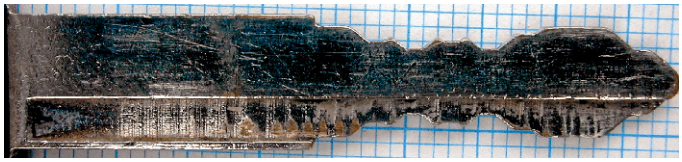


Bild C7-32 Spannspuren



Bild C7-33 Makroaufnahme der Spannspuren mit regelmäßigem Muster der Eindrückungen

Da beim Einschieben eines Profilschlüssels in den Schließzylinder die vordersten Profilteile den längsten Weg im Schließzylinder zurücklegen, während die hinteren Teile über entsprechend geringere Strecken Kontakt mit den Zuhaltungen haben, werden die Kopierspuren bei einer regelmäßigen Nutzung nach dem Kopiervorgang vorn deutlich schneller geglättet und von Gebrauchsspuren überlagert als hinten. Hieraus kann auf die Nutzungszeit nach dem Kopiervorgang geschlossen werden.

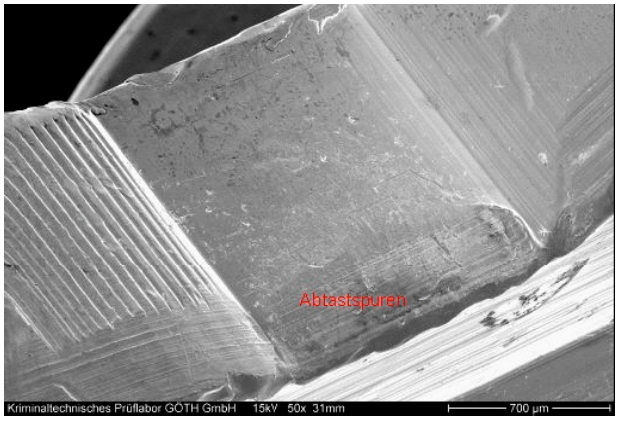


Bild C7-34 Aufnahme mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) einer Kopierspur mit überlagerten Gebrauchsspuren; REM-Untersuchungen erlauben eine Eingrenzung auf 0, 1 bis etwa 15, etwa 16 bis etwa 100 und über etwa 100 Schlossbetätigungen nach dem Kopieren [5].

3.3 Spuren durch Manipulationen an einem Transponder

Überwiegend sind die Transponder der elektronischen Wegfahrsperren in der Schlüsselreide oder dem Gehäuse der Fernbedienung untergebracht. Mechanisch verursachte Spuren einer Manipulation an einem Transponder sind in vielen Fällen jedoch nicht von „normalen“ Spuren durch das Öffnen der Gehäuse, z. B. zum Austausch einer Batterie, zu unterscheiden. Eine Ausnahme bilden lediglich die Schlüssel, bei denen die Transponder in der Schlüsselreide vergossen oder eingeklebt sind (**Bild C7-35**).

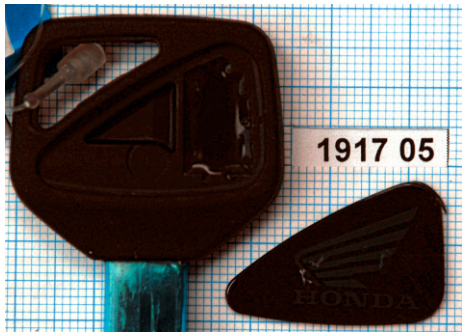


Bild C7-35 Transponder in der Schlüsselreide vergossen, ein Austausch ist ohne erkennbare Spuren nahezu auszuschließen.

Neben dem Austausch von Transpondern existieren zahlreiche Möglichkeiten zur Überwindung elektronischer Wegfahrsperren. Diese Manipulationsmöglichkeiten sind jedoch fahrzeugspezifisch, weil direkt in die Fahrzeugelektronik eingegriffen wird oder indirekt das Vorhandensein eines Originaltransponders simuliert wird. Diese Manipulationen sind im Rahmen einer Schlüsseluntersuchung ohne das entsprechende Fahrzeug meist nicht nachweisbar. Dies gilt beispielsweise auch für elektronische Wegfahrsperren, bei denen nachbestellte Schlüssel über einen sogenannten Masterschlüssel am Fahrzeug angelernt werden. Die Anzahl und Nummern der zum Fahrzeug gehörigen aktiven Schlüssel wird bei diesen Systemen nur in der Fahrzeugelektronik gespeichert, ist also ohne das Fahrzeug nicht feststellbar.

Literatur

[1] VDS Verband der Schadenversicherer e.V., Schlüsselkatalog 1996, Hamburg 1996
[2] HUK-Verband: Ausrüstung von Personenkraftwagen mit Originalschlüsseln, 1989
[3] www.allianz-azt.de
[4] Göth, M.: Aufstellung der Überprüfungsmöglichkeiten von Fahrzeugschlüsseln, RVSK, III. Kölner Betrugsforum, 2006 (www.goeth.com) (www.rvsk.de)
[5] Kriminaltechnisches Prüflabor GÖTH GmbH (www.goeth.com)

C8 Mikrospuren

A – Mikrospuren, Mikrospurensicherung, Mikrospurenauswertung

Jörg Arnold

1 Einleitung

Bei Verkehrsunfällen erfolgt die Untersuchung von Mikrospuren primär im Zusammenhang mit der Frage, ob es zwischen den am Unfall Beteiligten (Fahrzeuge, Zweiradfahrer, Fußgänger, Hindernisse oder feststehende Objekte etc.) zu einem spurenkundlich belegbaren Kontakt kam.

Falls diese Frage bejaht werden kann, sind als zweites häufig die Kontaktstelle(n) zu identifizieren und spurenkundlich verifizieren.

Leider werden sehr häufig keine Spuren gesichert und insbesondere keine Mikrospuren. Das hängt damit zusammen, dass die Bedeutung von Mikrospuren nicht bekannt ist, dass die Mittel und Kenntnisse nicht vorhanden sind, um Mikrospuren sachgerecht zu sichern und dass häufig die Möglichkeiten der Mikrospurenauswertung nicht bekannt sind.

Neben dieser Frage kann es auch sein, dass zu identifizieren und spurenkundlich zu verifizieren ist, wer im Fahrzeug wo gesessen ist, respektive welcher Fahrzeuginsasse zum Unfallzeitpunkt der Lenker war.

2 Sicherung von Mikrospuren

Die zwei zentralen Probleme (neben der Nichtspurensicherung) in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle mit dieser Fragestellung sind:

1. Entweder ist nicht klar, wo genau der strittige Kontakt oder die Kontakte erfolgten,
2. oder die Fremd-Spuren sind von Auge nicht erkennbar.

Damit ist man auf eine Methode angewiesen, die „blind“ angewendet werden kann!

Sehr häufig befindet sich neben wenig Fremd-Material sehr viel Eigenmaterial des beschädigten Fahrzeugs in den Schadenzonen.

Wir stellen bei derartigen Kollisionen häufig einseitige Spurenübertragungen bzw. ungleiche Beschädigungen fest, insbesondere wenn die Kontaktzonen nicht aus ähnlichen Materialien (Festigkeit/Elastizität etc.) bestehen und/oder wenn es sich um ungleiche Kollisionspartner (z. B. hart/weich, steif/elastisch, aktiv/passiv) handelt.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_40

3 Auswertung von Mikrospuren

Eine Mikrospuren-Auswertung basiert auf den unmittelbar nach einem Unfall asservierten Spuren. Spuren, die nicht sichergestellt wurden, können nicht ausgewertet werden.

Es ist zu berücksichtigen, dass bei tiefen Fahrzeuggeschwindigkeiten und/oder ungünstigen Materialkombinationen trotz einem Kontakt eine Spurenübertragung ausbleiben kann.

Es ist zu unterscheiden zwischen einer gezielten Spurenabnahme an speziellen, relevanten Zonen am Objekt und einer flächendeckenden Spurensicherung, bei welcher grundsätzlich alle möglichen Kontaktbereiche am Objekt eine Spurensicherung durchgeführt wird.

Beispiel: Bei einem Fußgängerunfall kann sich die Mikro-Spurensicherung an einem Fahrzeug im Ausnahmefall auf eine lokale Stelle beschränken, wenn z. B. an einem Kotflügel die am Fahrzeug visuell erkennbare Staubschicht lokal weggewischt ist und/oder in der fraglichen Zone aufgeriebene Textilfasern von Auge erkennbar sind.

In diesen Fällen lässt sich aufgrund der offensichtlichen Spuren die Anprallstelle der Kollisionspartner spurenmäßig klar erkennen.

Diese Vorgehensweise ist jedoch nur zweckmäßig, wenn sich zum Unfallablauf – allenfalls auch bestätigt durch Angaben der Beteiligten und der Zeugen – keine Zweifel ergeben.

Wenn bei der Spurensicherung die Anprallstelle des Fußgängers am Fahrzeug visuell nicht erkannt werden kann und/oder der genaue Unfallablauf nicht klar ist, so muss eine flächendeckende Spurensicherung durchgeführt werden.

Bei der flächendeckenden Spurensicherung müssen alle möglichen Zonen des Unfallfahrzeugs, an welchen ein Kontakt zwischen dem Fahrzeug und dem Fußgänger möglich ist, in die Spurensicherung miteinbezogen werden.

Damit eine vergleichende Untersuchung der gefundenen Mikrospuren möglich ist, müssen auch die Kleider, Schuhe, Taschen etc., die der Fußgänger zum Unfallzeitpunkt getragen hat, asserviert werden.

Zur Beantwortung der Frage, welcher Fahrzeuginsasse zum Unfallzeitpunkt wo gesessen hat, können neben den Faserspuren auf den einzelnen Sitzen auch entsprechende Anprallspuren mit Fasern-/Kunststoffanschmelzungen untersucht werden.

4 Bewertung von Mikrospuren

Bei der Beweiswertung gilt die Regel aus der Kriminaltechnik: „Absence of evidence is not evidence of absence!“ oder anders gesagt:

Beim Vorhandensein von Spurenübertragungen kann häufig der Beweis des Kontaktes erbracht werden. Das Fehlen von Spurenübertragungen jedoch ist nicht der Beweis, dass kein Kontakt erfolgte.

5 Arten von Mikrospuren

Bei Verkehrsunfällen findet man die gleichen Mikrospurenarten wie bei Kriminalfällen.

1. Lackspuren, einschichtig/mehrschichtig
2. Kunststoff-Mikrospuren als Abriebe oder Antragungen
3. Textile Fasern
4. Biologische Spuren (Pflanzenfasern, Moose, Holz etc.)
5. Menschliche und tierische Haare
6. Blut, Speichel, Sperma und Gewebespuren (inklusive DNA-Material)
7. Glas (Splitter, Scherben)
8. Schmauch (Zündsätze von Airbags etc.)

Wie bereits in Ziffer 2 gesagt, sind viele dieser Spuren von Auge nicht oder nur sehr schwierig zu finden. Man spricht deshalb häufig von latenten Spuren.

Falls die Spuren von Auge sichtbar sind, können sie mittels Pinzette in saubere Plastik- oder Papiertütchen gesichert werden.

Diese Voraussetzungen sind aber in den allerwenigsten Fällen gegeben.

Speziell bei Spurenmaterial, das sich statisch auflädt (z. B. Haare, Kunststoff- und Lackspuren) sind die Papiertütchen (Pergamentpapier) geeigneter als Plastiktütchen. Als Hilfsmittel können die Spuren in ein sauberes (fuselfreies) Papiertüchlein gefaltet und dann in die Tütchen gesichert werden.

6 Einsatz des Spurensicherungsklebebands

Der Einsatz des Spurensicherungsklebebandes bietet sich bei allen Unfällen, wo der Kontakt an sich oder die Kontaktstelle(n) und/oder die Kontaktgegner strittig sind als Methode der ersten Wahl an. Dabei hat der Einsatz zonenweise, flächendeckend und mit Druck in allen in Frage kommenden Kontaktzonen zu erfolgen.

Als Alternative kann selbstverständlich der ganze Spurenträger (mithin das ganze Fahrzeug) sichergestellt werden.

Aus unserer Sicht, die auf mehreren Jahrzehnten praktischer Erfahrung sowohl bei der Spurensicherung als auch bei der Laborauswertung basiert, bedeutet der Nicht-Einsatz des Spurensicherungsklebebandes in den meisten Fällen, dass gar keine auswertbaren Spuren vorhanden sein werden. Die Diskussion über die praktische Handhabung des Spurensicherungsbandes ist so alt wie die Methode selber.

Das Falten die Klebebänder hat den Vorteil, dass damit gewährleistet ist, dass nach der Spurensicherung keine Kontamination des Spurenmaterials erfolgen kann.

Wenn die Klebebänder auf Trägerfolien aufgeklebt werden, ist das auch in Ordnung – die Entnahme von Spuren darf dann aber nur in sehr sauberen Räumen gemacht werden. Die Sauberkeit solcher Räume muss durch regelmäßige Kontrollen (Entnahme von Nullproben) belegt werden können.

7 Stereomikroskopische Vor-Untersuchungen

Unter dem Stereomikroskop sind die ab den verschiedenen Objekten abgenommenen Klebbandasservate zu durchmustern und in Bezug auf die Eigenmaterialien und allfällige relevante Übertragungsspuren zu untersuchen.

Für die nachfolgenden mikroskopischen und/oder instrumental-analytischen Vergleichsuntersuchungen sind den entsprechenden Klebbandabzügen Eigenmaterialproben und bei der stereomikroskopischen Voruntersuchung gleich erscheinende inkriminierte Spuren zu entnehmen.

Dieser Schritt ist (zeit-)aufwändig und erfordert viel Erfahrung und manuelles Geschick sowie entsprechende Laborausrüstung.

Ein Stereomikroskop mit Fluoreszenzbeleuchtung (HG-Hochdrucklampe mit diversen Bandpassfiltern) erlaubt bereits unter dem Stereomikroskop eine Vergleichuntersuchung des Fluoreszenzverhaltens des Spurenmaterials.

8 Beeinflussung des Spurenmaterials durch die Klebebänder respektive den Klebstoff

Eine Beeinflussung des Spurenmaterials durch die Klebebänder respektive den Klebstoff kann a priori nicht ausgeschlossen werden. Dabei sind folgende Aspekte von Bedeutung:

1. Wenn das Spurenmaterial in Spurensicherungsband gesichert wird, muss das Vergleichsmaterial (Eigenmaterial ab einer bekannten Quelle) ebenfalls in Spurensicherungsband gesichert werden.
2. Nach der Entnahme von Spurenmaterial respektive Eigenmaterial aus dem Spurensicherungsband müssen beide Materialien gleich behandelt respektive vom Klebstoff gereinigt werden.

9 Mikroskopische Untersuchungen

Die mikroskopischen Vergleichsanalysen werden am Lichtmikroskop im Auflicht respektive Durchlicht unter Anwendung folgender Beleuchtungsarten durchgeführt:

- weißes Licht,
- polarisiertes Licht,
- Fluoreszenzverfahren unter Anwendung verschiedener Anregungsfilter (Bandpassfilter).

Die zu vergleichenden Spuren werden in Bezug auf gleiche Beschaffenheit, gleichen Farbeindruck, Aufbau und Struktur etc., also die ganze Morphologie untersucht (**Bilder C8-1** bis **C8-6**).

1. Die mikroskopische Vergleichsuntersuchung von Spurenmaterial respektive Eigenmaterial muss unter den gleichen optischen Bedingungen erfolgen. Die Proben müssen bei der Untersuchung auf dem gleichen Objektträger und im gleichen Blickfeld liegen.
2. Die Form und Größe der Spuren ist so zu wählen, dass deren Herkunft jederzeit unverwechselbar rekonstruierbar ist.

Falls das Spurenmaterial nicht gut vom Klebstoff gereinigt wurde, kann es zu Fluoreszenzeffekten im Bereich der Leimrückstände kommen.

9.1 UV/VIS-Spektroskopie (Lackspuren, textile Fasern)

Bei den mikroskopischen Untersuchungen nicht unterscheidbare Proben können mit einem Diodenarray-Mikrospektral-Fotometer (z. B. TIDAS 800 im ultravioletten (UV) und sichtbaren (VIS) Wellenlängenbereich von 280 nm bis 740 nm) untersucht werden.

Es ergeben sich Spektren mit übereinstimmendem Kurvenverlauf bei identischen Farbstoffen.

9.2 FourierTransformierte-InfraRot-(FT-IR-)Spektroskopie (Lackspuren, Kunststoffe)

Das Spurenmaterial kann instrumentalanalytisch mit Hilfe der FT-IR-Spektroskopie untersucht werden. Das Untersuchungsgut wird dabei auf Durchlässigkeit von Infrarotstrahlung in Abhängigkeit von der Wellenzahl über einem ausgewählten Spektralbereich analysiert. Es ergeben sich entsprechende Spektren mit charakteristischen Bandenmustern.

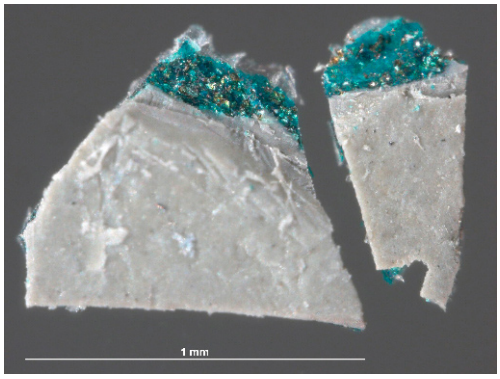


Bild C8-1 Blaugrüner Lacksplitter mit 4 Schichten im Weißlicht

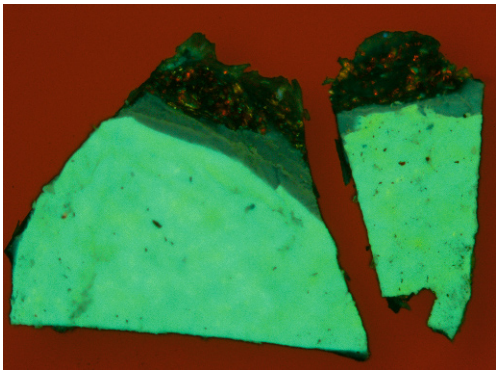


Bild C8-2 Gleicher blaugrüner Lacksplitter mit vier Schichten mit Fluoreszenzbeleuchtung, Zwischenschicht wird sichtbar

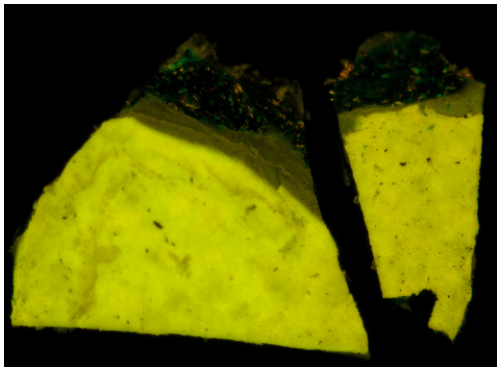


Bild C8-3 Gleicher blaugrüner Lacksplitter mit fünf Schichten mit Fluoreszenzbeleuchtung, Zwischenschicht wird sichtbar



Bild C8-4 Lacksplitter mit zwei Schichten im Weißlicht, Vergleich Spurenmaterial (Mitte) und Eigenmaterialproben (oben und unten)

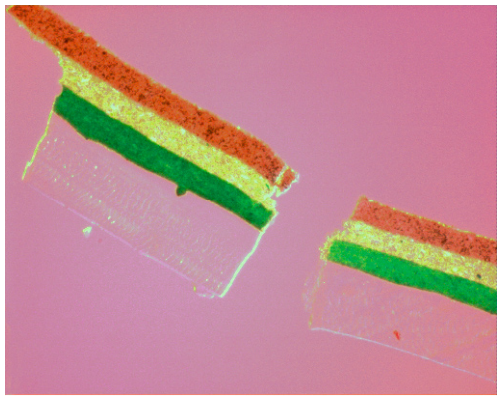


Bild C8-5 Querschnitt durch Lacksplitter mit vier Schichten im Weißlicht

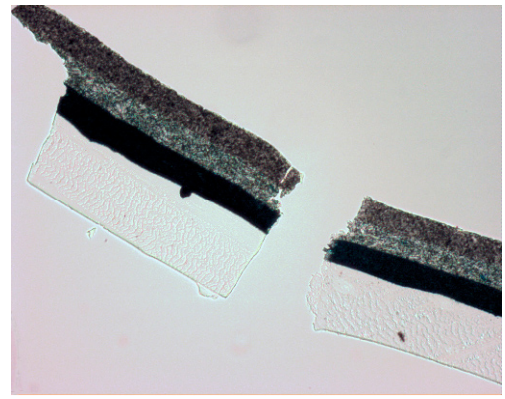


Bild C8-6 Querschnitt durch gleichen Lacksplitter mit vier Schichten im Dunkelfeld

Die FT-IR-Spektroskopie eignet sich speziell für die Identifizierung von Kunststoffen und Lacken und einen rechten Teil der in Kunststoffen verwendeten (häufig anorganischen) Füllstoffe.

Die Proben werden üblicherweise auf einer Diamantzelle präpariert und anschließend auf der offenen Diamantzelle im Spektralbereich von 4′000 cm^{-1} bis 700 cm^{-1} in Transmission ausgemessen.

Aufgrund der geringen Dimension der Probe erfolgt die Analyse mit Hilfe eines Infrarot-Mikroskops. Damit ist es möglich, den Infrarotstrahl auf eine kleine Fläche zu fokussieren.

Falls das Spurenmaterial nicht gut vom Klebstoff gereinigt wurde, treten bei den Spektren selbstverständlich die entsprechenden Banden des Acrylat-Klebstoffs ab dem Spurensicherungsband auf.

Bei der FT-IR-Spektroskopie muss vorausgesetzt werden können, dass solche Verunreinigungen als solche erkannt werden, da sowohl die Spurensicherungsmethode dokumentiert und bekannt ist als auch das FT-IR-Spektrum des verwendeten Acrylat-Klebstoffs genau bekannt und in den Spektren-Bibliotheken vorhanden ist.

9.3 Pyrolyse-GC-MS (Pyrolyse-Gas-Chromatografie-Massenspektroskopie) (Lackspuren, Kunststoffe)

Die Pyrolyse-GC-MS eignet sich speziell für die Identifizierung von Additiven in Kunststoffen und Lacken und ermöglicht eine Unterscheidung von identischen Kunststoffen über die allenfalls vorhandenen Additive wie Weichmacher, UV-Blocker, Flammhemmmittel etc.

Bei Anwendung der Pyrolyse-GC-MS kommt es bei Verunreinigungen des Spurenmaterials mit Acrylat-Klebstoff ab dem Spurensicherungsband auch zu einer Beeinflussung der Resultate.

Diese Methode wird bei Lack- und Kunststoffuntersuchungen selten (nur an wenigen LKÄs und dem BKA) verwendet, da nur wenige dieser Analysegeräte im Einsatz sind und häufig nicht genügend Material für die (zerstörende) Untersuchung vorhanden ist.

Ob sich alleine durch den Kontakt des Spurenmaterials mit dem Klebstoff mit Pyrolyse-GC-MS nachweisbare Veränderungen des Spurenmaterials ergeben, können wir nicht a priori ausschließen.

Da das Vergleichmaterial ebenfalls mit Spurensicherungsband gesichert werden soll und Pyrolyse-GC-MS fast nur bei vergleichenden Untersuchungen in der Fallarbeit eingesetzt wird, beurteilen wir diese Problematik als unkritisch.

9.4 Biologische Spuren (Pflanzenfasern, Moose, Holz etc.)

Biologische Spuren pflanzlichen Ursprungs werden häufig gefunden, wenn ein Fahrzeug in eine Kollision gegen ein feststehendes Hindernis verwickelt war.

Auf Steinen und Mauern wachsen häufig Moose und Flechten, die bei einer Kollision auf das Fahrzeug übertragen werden können.

Bei Kollisionen gegen Bäume oder Holzpfosten können in den Kontaktzonen häufig Spuren von Holzfasern und eventuell wieder Moose und Flechten gefunden werden.

Bei Fahrzeugüberschlägen oder Fahrten neben befestigten Wegen oder Straßen können ebenfalls Pflanzenspuren auf ein Fahrzeug übertragen werden.

Biologische Spuren pflanzlichen Ursprungs sind sehr vielfältig. Ist der mutmaßliche Kollisionsort bekannt, kann durch vergleichende Untersuchung festgestellt werden, ob die gefundenen biologischen Spuren ab dem Fahrzeug und Referenzmaterial ab dem Hindernis korrespondieren.

9.5 Anorganische Spuren (Straßenschmutz, Steinchen, Mauerabrieb, metallische Spuren etc.)

Anorganische Spuren werden häufig gefunden, wenn ein Fahrzeug in eine Kollision gegen ein steinernes oder metallenes, feststehendes Hindernis verwickelt war.

Bei Kollisionen gegen Mauern oder Steine können in den Kontaktzonen häufig mineralische Spuren gefunden werden.

Bei Kollisionen gegen Kandelaber oder Leitplanken können in den Kontaktzonen häufig metallische Spuren oder Spuren von Korrosionsschutz-Überzügen gefunden werden.

Ist der mutmaßliche Kollisionsort bekannt, kann durch vergleichende Untersuchung festgestellt werden, ob die gefundenen anorganischen Spuren ab dem Fahrzeug und Referenzmaterial ab dem Hindernis korrespondieren.

Sehr häufig handelt es sich aber um unspezifischen Straßenschutz, der sich nirgends konkret zuordnen lässt.

9.6 Menschliche und tierische Haare

Die mikroskopische Untersuchung von Haaren basiert primär auf den auf farblichen und morphologischen Merkmalen wie Färbung, Länge, Querschnittsform, Markstrukturierung, Anordnung der Oberflächenbeschuppung (Cuticula).

Es ist zu beachten, dass bei Haaruntersuchungen in der Regel nur Ausschlüsse beweisend sind. Zuordnungen können – mit Ausnahme von Besonderheiten, wie z. B. krankheitsbedingten

Erscheinungsformen oder Färbungen der Haare – immer nur approximativ erfolgen. Die Haare einer Person weisen eine farbliche Variationsbreite auf und in der Regel variieren auch die morphologischen Merkmale.

Mit den heutigen Methoden zur DNA-Profilbestimmung können einerseits von den Haaren selber DNA-Profile bestimmt (allerdings nur von den mütterlichen DNA-Komponenten) werden. Aus den Wurzeln der Haare können komplette DNA-Profile bestimmt werden.

Bei Tierhaaren wird mit den mikroskopischen Untersuchungen in der Regel die Tierart bestimmt. Eine individuelle Zuordnung der Haare ist im Normalfall nicht möglich. Dabei werden die Haare in unpräpariertem Zustand und als Mikroskoppräparate auf farbliche und morphologische Merkmale beurteilt.

Daneben kann mit analytischen Methoden untersucht werden, ob es sich um unbehandelte Tierhaare und damit meist um Haare lebender Tiere handelt oder ob die Tierhaare von einem gegerbten Fell stammen.

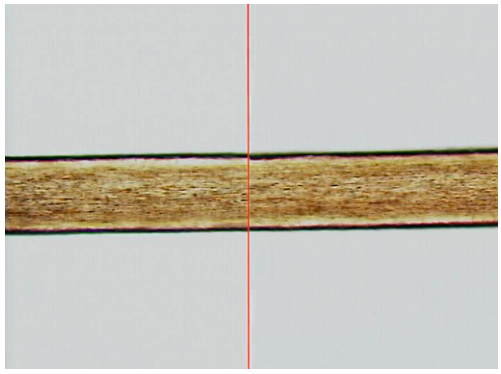


Bild C8-7 Vergleich zweier aufgeschnittener Haare ein und derselben Person (innen Haarmark, außen Cuticula/Oberflächenbeschuppung)



Bild C8-8 Menschliche Haare: oben mit Wurzel, unten „ausgefallenes Haar mit verkümmerter „Wurzel“

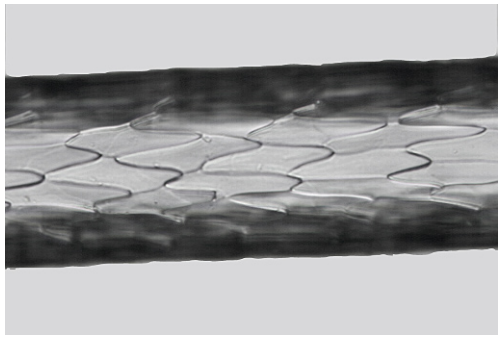


Bild C8-9 Haar eines Fuchses



Bild C8-10 Haar einer Gämse

9.7 Blut, Speichel, Sperma und Gewebespuren (inklusive DNA-Material)

Die heutigen Methoden zur DNA-Profilbestimmung erlauben es, aus einigen wenigen Zellen ein komplettes DNA-Profil zu bestimmen. Diese heute in der Kriminaltechnik sehr erfolgreich zur Identifikation von Personen eingesetzte Methode kann auch bei der Klärung eines Verkehrsunfalls sehr wertvolle Dienste leisten, um festzustellen, wer der Lenker eines Fahrzeugs war oder ob jemand Insasse eines Fahrzeugs war. Allerdings muss eingeschränkt werden, dass die meisten Unfälle durch die Fahrzeughalter selber verursacht werden – und deren DNA wird selbstverständlich überall im Fahrzeug vorhanden sein. Es müssen also DNA-Spuren gesichert werden, die nur im Unfallmoment (z. B. auf einem ausgelösten Airbag) oder nur im Zusammenhang mit dem Lenken eines Fahrzeugs deponiert werden können (z. B. am Lenkradkranz oder am Schaltknüppel).

9.8 Glas (Splitter, Scherben)

Glas hat die Eigenschaft beim Bruch auch eine große Menge von kleinsten Splittern zu erzeugen. Solche kleinen Glassplitter können – wenn sie von Kriminaltechnikern fachgerecht gesichert wurden – ebenfalls helfen, die Anwesenheit einer Person im Moment des Bruchs des Glases zu belegen. Mit speziellen Messgeräten wird dazu einerseits der optische Brechungsindex bis auf 10^{-5} genau bestimmt und mit Vergleichsgläsern verglichen. Anderseits kann die elementare Zusammensetzung des Glases bestimmt und zur Zuordnung des Glases verwendet werden.

Daneben können insbesondere von den Streuscheiben der Scheinwerfergläser und der anderen Beleuchtungseinheiten an einem Fahrzeug größere Scherben entstehen, die in Fällen von Fluchterflucht sehr hilfreich sein können, um die Marke und den Fahrzeugtyp zu bestimmen oder einzuschränken. Die so genannten LUNA Datenbank des Bundeskriminalamtes in Wiesbaden umfasst abertausende von Streuscheibenmustern, die nach einer Vielzahl von Kriterien gesucht und verglichen werden können, und es häufig erlauben, die Marke, den Fahrzeugtyp, die Fahrzeugseite, das Produktionsland und manchmal sogar die Produktionswoche einer Streuscheibe zu bestimmen.



Bild C8-11 Komplette Beleuchtungseinheit mit Streuscheibe



Bild C8-12 Detailaufnahme der Streuscheibe mit Zulassungszeichen und Produktions-Angaben

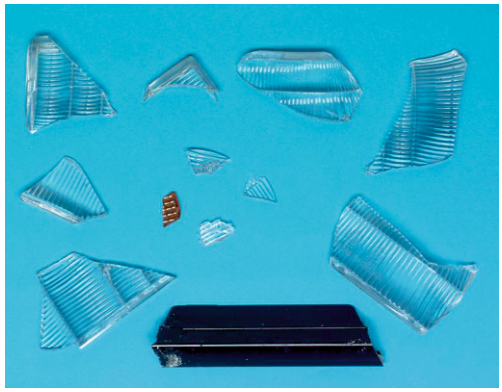


Bild C8-13 Scherbe, Splitter und Trümmerteile auf einer Unfallstelle sind in zweierlei Hinsicht sehr interessante Spuren: Sie können einerseits zur Identifikation eines unfallbeteiligten Fahrzeugs führen. Andererseits kann die Lage und die Ausdehnung des Splitterfeldes unfallanalytisch zur Bestimmung des Kollisionsbereichs und/oder der Kollisionsgeschwindigkeit(en) verwendet werden.

10 Lackspuren/Lackdatenbank

Ein zentrales Problem bei der Untersuchung und speziell bei der Bewertung von Lackspuren ergibt sich aus der Tatsache, dass Autos und damit auch Fahrzeuglacke Massenprodukte sind.

Für die Identifizierung und insbesondere für die Bewertung der vorhandenen Lackspuren müssen Informationen zu den sich im Umlauf befindenden Lackarten verfügbar sein. Ist ein Lack sehr häufig, ist ein Lack sehr selten, mit was für Schichtaufbauten ist zu rechnen etc.

Verschiedenen europäische Kriminaltechnische Institute haben unter Federführung des BKA Wiesbaden (KT 13) unter dem Namen EUCAP (**EU**ropean **CA**r **P**aint Database) eine große Lackdatenbank aufgebaut, in der von mehreren zehntausend Fahrzeuglacken Daten und FT-IR-Spektren verfügbar sind.

Die älteste Lackdatenbank stammt von der kanadischen berittenen Polizei RCMP.

In Ergänzung dazu hat das Labor der französischen Gendarmerie (IRCGN) eine Datenbank unter dem Namen FRCAP erstellt, in der nach den Schichtfolgen von verschiedensten Fahrzeuglackierungen gesucht werden kann.

Bei vergleichenden Untersuchungen, wenn es also darum geht, die Frage zu beantworten ob zwei Lacke unterschieden werden können (z. B. Spurenmaterial von Eigenmaterial), ist man nicht so stark von solchen Datenbanken abhängig. Sobald aber Fragen nach der Häufigkeit eines Lacks respektive nach der Beweiskraft von vorgefundenen Spuren beantwortet werden müssen, kommt man um die Arbeit mit den Lackdatenbanken nicht herum.

11 Zusammenfassung

Das Spurensicherungsklebeband ist bei allen Unfällen, wo der Kontakt an sich oder die Kontaktstelle(n) und/oder die Kontaktgegner strittig sind, die Methode der ersten Wahl für die Spurensicherung.

Dabei hat der Einsatz zonenweise, flächendeckend und mit Druck in allen in Frage kommenden Kontaktzonen zu erfolgen.

Als Alternative kann selbstverständlich der ganze Spurenträger (mithin das ganze Fahrzeug) sichergestellt oder die Lacksplitter, falls sie so groß sind, dass sie mit der Pinzette erfasst werden können, direkt in Säckchen sichergestellt werden. In den meisten Fällen bedeutet der Nicht-Einsatz des Spurensicherungsklebebandes, keine auswertbaren Spuren zu haben.

Die Entnahme und Reinigung der Spuren aus dem Spurensicherungsklebeband ist (zeit-)aufwändig und erfordert viel Erfahrung und manuelles Geschick sowie entsprechende Laborausrüstung.

Literatur

[01] Frei-Sulzer, Dr. M.: Die Sicherung von Mikrospuren mit Klebband, Kriminalistik, 1951, Bd./Vol. 5, Heft 19/20, S. 190–1947

[02] Frei-Sulzer, Dr. M.: Vor- und Nachteile der Spurensicherung mit Klebband, Kriminalistik, 1966, Bd./Vol. 20, Heft 8, S. 385–387

[03] Frei-Sulzer, Dr. M.: Wie lange bleibt die Beweiskraft von Mikrospuren?, Kriminalistik, 1971, Bd./Vol. 25, Heft 3, S. 113–114

[04] Bernhard, Dr. W. R.: Tape Collection and Storage of Microtraces of Paint in Adhesive Tape, Journal of Forensic Sciences, 2000, vol. 45, nr. 6, p. 1312–1315 [9] Smith, R. A., and Noga, J. T., „Examples of Staged Collisions in Accident Reconstruction“, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, 1980

[05] Atlas „Poils de Mammifères d'Europe“, S. Debrat, F. N. Nr. 93.604-81 Faculté des Sciences, Université de Neuchâtel

[06] www.enfsi.org, Suchbegriff EUCAP

[07] Halonbrenner, R., Nüesch, A.: Ein Beitrag zur Frage der Sitzposition von Fahrzeuginsassen, Archiv für Kriminologie, Band 184, 1989, Heft 1/2, S. 24–29

[08] Hubmann, M., Halonbrenner: Die Anwendung kriminaltechnischer Methoden bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen, Kriminalistisches Institut des Kantons Zürich, Seminarreihe 1976/77, S. 1–35

[09] Halonbrenner, R., Aufklärung eines fingierten Autodiebstahls, Archiv für Kriminologie, Band 193, 1989, Heft 1/2, S. 29–36

[10] Halonbrenner, R.: The Investigation of Traffic Accidents by the Police, Tagungsband, Proceedings of IRCOBI, 1986, p. 53 ff.

[11] Arnold, J.: Spurensicherung mittels Spurensicherungsklebeband, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vol. 44, Heft 12/2006, S. 313–316

B – Spurensicherung mit der Spurfix-Folie

Jochen Lehmkuhl, Dr. Heinz Burg

1 Einleitung

Viele, vor allem kleinere Bagatellunfälle, hinterlassen nur wenige objektive Spuren. Oft geht es um Unfallflucht, bei denen der Tatort nicht eindeutig festzustellen ist, weil sich der Täter schnell entfernt und das Opfer sein Fahrzeug ebenfalls nicht dort stehen lässt, wo sich der Unfall ereignet hat oder haben soll.

Die Chancen zur Aufklärung von solchen Delikten gelingt daher meist nur unter sehr hohem Ermittlungs- und Auswerteaufwand. Vorrangig hat man sich dabei auf die Sicherung und Abgleich von Lackpartikeln konzentriert. Moderne Fahrzeuge verfügen jedoch vielfach über unlackierte Stoßfängerabdeckungen, Zierleisten oder große folierte Kontaktbereiche.

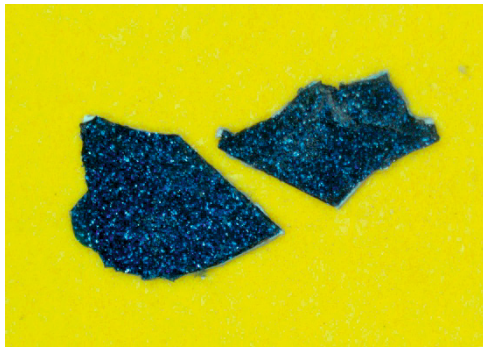


Bild C8-14 Abgleich von Lackpartikel

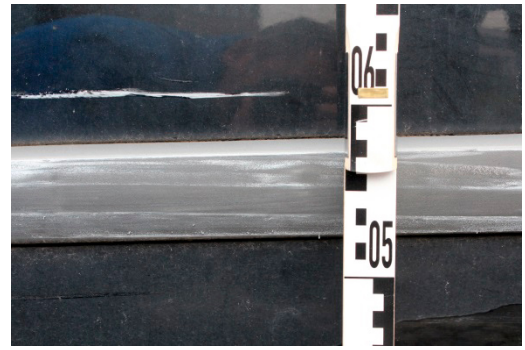


Bild C8-15 Fremdsubstanz auf einer Zierleiste

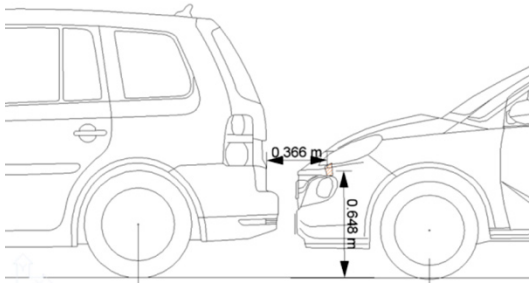


Bild C8-16 Abgleich Anstoßhöhen



Bild C8-17 Gegenüberstellung mit allen Parteien

Die Sicherung von Lackpartikeln ist bei der Vielzahl der Schäden eher selten vorzufinden, weshalb dem Sachverständigen später oft nur Aussagen zu korrespondierenden Anstoßhöhen von beschädigten Fahrzeugen oder Angaben von Zeugen zur Erstellung von Gutachten vorlie-

gen [1]. Eine Gegenüberstellung von Fahrzeugen nach mehreren Tagen oder Wochen macht wenig Sinn, weil die Fahrzeuge z. B. die Stoßstangen in ähnlicher Höhe haben und auch sonst ähnlich gebaut sind und der Austausch von Teilen nicht festgestellt werden kann oder es werden andere Gründe dafür genannt, warum z. B. ein Kotflügel erneuert wurde.

Bisherige Beweismittel (Fotos, Zeugen) sind meist nicht geeignet den konkreten Zusammenstoß und damit einen Kontakt von zwei vermuteten Kollisionspartnern zweifelsfrei zu beweisen.

Während man bei Kapitalverbrechen sich mit dem individuellen Spurenübertrag durch Fingerabdrücke und DNA ausgiebig beschäftigt, bleibt die Beweissicherung bei kleineren Delikten unbeachtet und spiegelt sich daher in geringen Aufklärungsquoten wieder. Diese für Sachverständige und sowohl Geschädigte als auch Verdächtigte nicht erfreuliche Situation hat einen von uns (J. Lehmkuhl) schon seit vielen Jahren beschäftigt.

Das Ergebnis dieses Nachdenkens, Ausprobierens und Verbesserns hat zu der Erkenntnis geführt, dass mit einer speziellen Spurensicherungsfolie die kleinen Mikrospuren, die bei solchen Unfällen entstehen, gesichert werden können und erstaunlich viele Dinge an den Tag bringen. Lackierte oder unlackierte Stoßstangen, Zierleisten oder sonstige Anbauteile sind ideale Spurenträger.

Führt man sich einen typischen Pkw-Pkw Unfall in Zeitraffer vor Augen, so ist das ein Vorgang, bei dem die Geschwindigkeit, der Druck und die Oberflächenbeschaffenheit einmalig und somit individuell an Kontaktflächen auftreten. Eine Spurenreproduktion aus einem solchen Ereignis kann durch einen Versuch mit nahezu 100% Wahrscheinlichkeit nicht erzielt werden. Ein solcher Kontakt hat Einmaligkeitscharakter.

Aus jedem noch so kleinen Kontakt leitet sich eine Individualspurenlage an beiden Kontaktpartnern ab. Dieses Teilchenübertragungsprinzip erkannte bereits Anfang des 19. Jahrhunderts der Physiker Dr. Edmond Locard und führte damit den Fingerabdruck bei den Ermittlungsbehörden ein. Später entwickelte sich daraus der DNA-Abgleich.

Nicht viel anders verhält es sich bei Kontakten zwischen Fahrzeugen oder Fahrzeugen und anderen Körpern bzw. Gegenständen. Auch hier entsteht eine Art „Fingerabdruck“, der durch analytische Methoden einen Nachweis über die Kontaktpartner liefert.

Zur Sicherung von Spuren jedweder Art auf Kontaktflächen braucht man eine spezielle Klebefolie. Diese wurde in vielen Versuchen zusammen mit einem industriellen Partner entwickelt und trägt den urheberrechtlich geschützten Namen „Spurfix-Folie“. Zusätzlich zu den bisherigen Empfehlungen der Landeskriminalämter zur Sicherung von Lackpartikeln bei der Unfallaufnahme werden eben nicht nur Lackpartikel in gekratzter Form entnommen, sondern es wird eine großflächige Gesamtspurenlage gesichert.

Die Folien können sehr zeitnah durch geschulte Polizisten oder später durch qualifizierten Sachverständigen ausgewertet werden [3]. Für erste Erkenntnisse reicht dazu bereits ein handelsübliches USB Mikroskop. Damit kann man schon grob Spuren bewerten, z. B. war ein anderer Pkw gegen den Pkw des Geschädigten gestoßen, war der Kontaktpartner eine Mauer, war es ein pflanzliches Hindernis usw. Die Suche nach dem verursachenden Gegenstand engt sich damit schon deutlich ein.

Nach Einführung der Spurfix-Methode in einem Bundesland in Deutschland zeigten sich bei der polizeilichen Anwendung sehr schnell deutlich steigende Aufklärungserfolge.

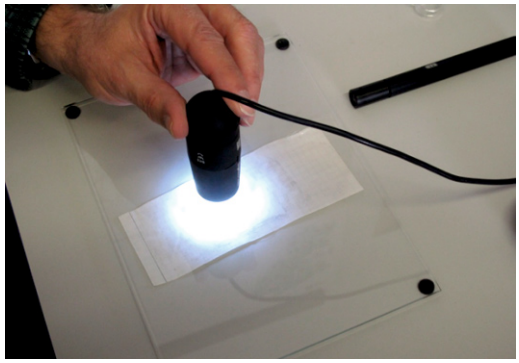


Bild C8-18 USB Mikroskop

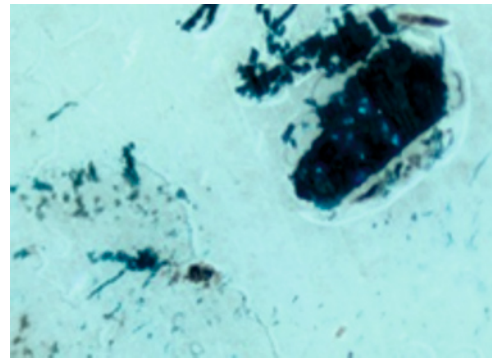


Bild C8-19 Blauer Fremdlackpartikel

Schwere Unfallereignisse und damit verbundene Spurenlagen brauchen Spezialisten und sehr gute Ausrüstung zur Analyse von teilweise sehr speziellen Spuren. Hierzu gehören hochwertige Stereomikroskope und weitere analytische Geräte zur Bestimmung elementarer oder molekularer Substanzeigenschaften.

2 Anwendungsfälle der SpurFix-Methode

Im polizeilichen Alltag und bei der Sachverständigentätigkeit ist die Spurfix-Folie ein sehr guter Helfer, sie liefert ein meist eindeutiges Beweismittel. Die Anwendungsgebiete lassen sich grob einteilen:

Echte Unfallflucht	– tatsächlicher Unfall	Bei allen Fällen sind das geschädigte und das verursachende Fahrzeug vorhanden. An diesen können Spuren mit der Folie gesichert. Das richtige Sichern ist wichtig! Nach dem Sichern und einer ersten Analyse kann der „Unfallgegner“ zugeordnet oder ausgeschlossen werden.
Vorgetäuschte Unfallflucht	Das Fahrzeug wurde z. B. vom Besitzer beschädigt. Um die Kosten für die Instandsetzung nicht selbst tragen zu müssen, wird ein „Verursacher“ gesucht und beschuldigt.	Diese Fälle lassen sich sehr gut aufklären, weil die mit der Folie gesicherten Spuren am „geschädigten“ Fahrzeug nicht zu den mit der Folie gesicherten Spuren am Verursacherfahrzeug zusammenpassen. Individualspurenlage!
Manipulierte Unfälle	– fingierter Unfall – fingierte Wildunfälle – fingierte Hagelschaden	Hier geht es darum, durch falsche Behauptungen Geld von einer Versicherung zu erhalten. Die Erscheinungsformen sind sehr verschieden.
Schäden, die nicht unmittelbar im Straßenverkehr entstanden sind		Sturmschäden mit Bestimmung der Teile, die den Schaden verursacht haben. Diebstahl, Insassen, Gurttragespuren etc.

3 Spurensicherung mit der Spurfix-Folie

Für den Erfolg der Ermittlungsarbeit ist es sinnvoll, die Spurensicherung nach einem festen Arbeitsablauf wie folgt durchzuführen:

Schaden detailliert und zusammen mit einem Maßstab in Übersicht und im Detail fotografieren und beschreiben.

Foliengröße so wählen, dass sie dazu geeignet ist, den Anstoßbereich möglichst vollständig abzukleben, ggf. können auch mehrere Folien geklebt werden. Alle Folien nummerieren und beschriften und Fotos von den aufgeklebten Folien machen, am besten zusammen mit einem Maßstab.

Folien sorgfältig verpacken, nicht darauf schreiben, dafür sorgen, dass nicht über die Folien gekratzt wird.

Im Büro oder Labor eine erste Sichtung durchführen und danach entscheiden, welche Untersuchungen sich ggf. anschließen sollten.



Bild C8-20 Lage mehrerer Folien am Objekt

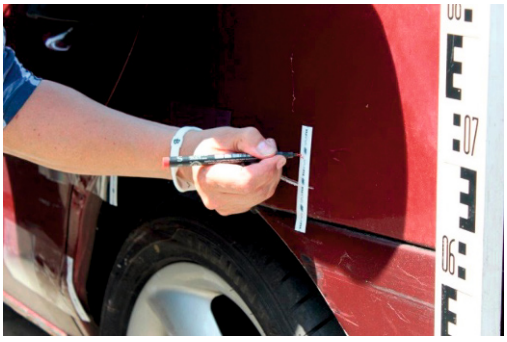


Bild C8-21 Beschriftung der Folien am Seitenrand

4 Besonderheiten der Spurfix-Folie

Das Sortiment an Klebefolien mit unterschiedlichen Klebern und Größen ist im polizeilichen Bereich kaum noch überschaubar. Jedoch ist nicht jedes Stück Klebeband gleich einer „Spurfix-Folie“ für die Beweissicherung von Mikrospuren bei Verkehrsunfällen. Ungeeignete Folien reagieren mit der Umgebung oder mit dem gesicherten Material. Hierzu zwei Beispiele in **Bild C8-22** und **Bild C8-23**.

Das einfache Handling und ein spezieller Kleber ermöglichen die optische und analytische Auswertung solcher Individualspuren durch ausgebildete Spurenexperten – den Spurfix-Sachverständigen. Mit der Verwendung falscher Folien kann eine Spurenlage sehr schnell für immer vernichtet werden. Für den Bereich der Unfallanalyse hat sich die Spurfix-Folie der Fa. Coloprint etabliert.

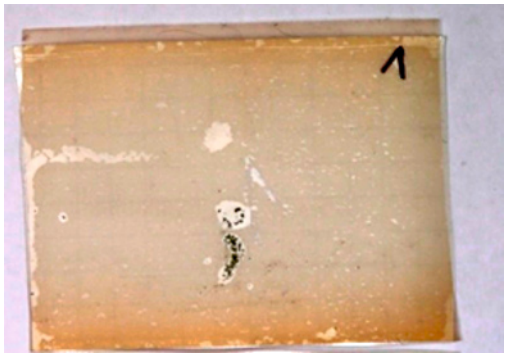


Bild C8-22 Kleber reagiert mit Umgebungsluft

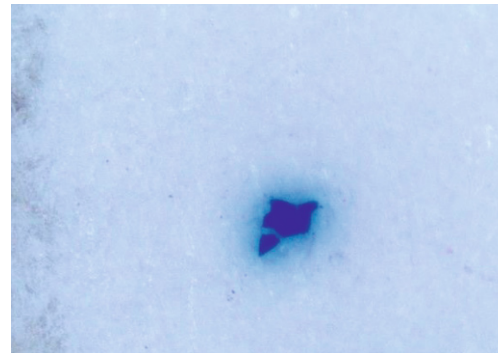
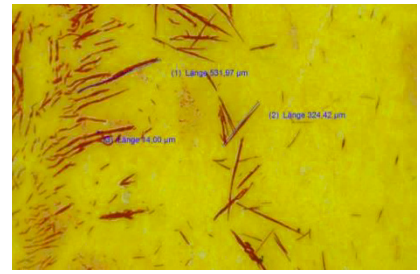
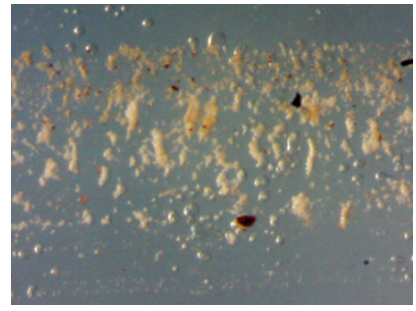
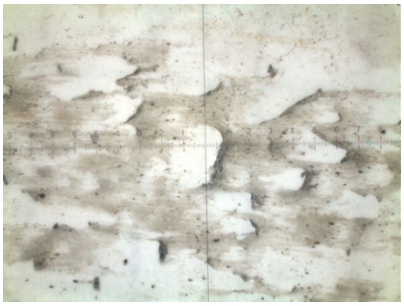
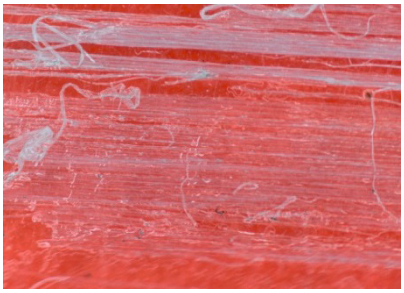
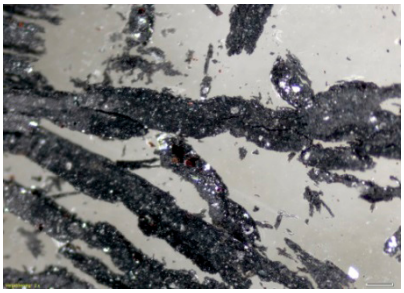


Bild C8-23 Reaktion eines Lackpartikels mit Kleber

5 Typische Spuren

Bei der stereomikroskopischen Betrachtung wird die Erscheinungsform von anhaftenden Partikeln untersucht. So existiert eine Vielzahl von Individualspuren, die bei direktem Kontakt an charakteristische Oberflächen erzeugt wird. Einige typische Individualspuren werden nachfolgend beschrieben werden.

Würmchen Aus Lack erzeugte Würmchen werden als Kollisionswürmchen bezeichnet und dokumentieren einen Reibkontakt	
Stäbchen Kurze und dicke Stäbchen, die durch einen Reibkontakt erzeugt werden, jedoch nicht aus Lack bestehen	

Naseneffekt Dieser Effekt zeichnet die Anstoßrichtung eines Fahrzeuges. Im Bild rechts ist die Anstoßrichtung von links nach rechts.	
Fäden Entstehen durch Kontakt mit Kunststoff – z.b. mit Leitpfosten , Außenspiegeln oder folierten Flächen.	
Brockenartige Strukturen Leiten sich aus dem Kontakt mit eisenhaltigen Industriebeschichtungen ab (Laterne, Pfosten)	

Die vorstehende kleine Auswahl lässt erkennen, dass zum Beispiel abgekratzte „Lackpartikel“ bei der Auswertung von Mikrospuren nicht die führende Rolle haben. Die Erstuntersuchung (optische Sichtung) konzentriert sich auf markante Spurenlagen, welche sich aus den Kollisionskörpern bzw. deren Oberflächen oder Zusammensetzung ableiten.

6 Weiterführende Untersuchungen

Nach der optischen Betrachtung folgt vielfach eine analytische Auswertung von Substanzen. Dem Sachverständigen kommt dabei die verantwortungsvolle Aufgabe zu, Teile aus der Folie an exakt definierten Abschnitten auszulösen. Aufgrund der morphologischen Merkmale ist über das weitere analytische Verfahren zu entscheiden [2]. Dazu existiert eine spezielle Datenbank. Hier sind neben Lackarten auch zahlreiche Daten von Beschichtungen von Fassaden, Leitplanken und Industrielacken zum Abgleich vorhanden.

REM-EDX	Mit dem REM = Rasterelektronenmikroskop mit EDX (energiedispensive Röntgenspektroskopie engl. x=xray) wird eine Zuordnung der Partikel direkt über die detektierten chemischen Elemente der Partikel vollzogen. Somit sind gegenüber der Lichtmikroskopie weitere Abgleiche möglich.
FTIR	Bei der FTIR (Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer) wird die Anregung von Energiezuständen in Molekülen untersucht. Je nach Struktur der Moleküle werden dabei unterschiedliche Energien absorbiert. Somit eignet sich die Infrarotspektroskopie zur quantitativen Bestimmung von bekannten Substanzen. Die Identifikation von unbekannten Substanzen erfolgt mittels Spektrenbibliotheken.
RAMAN	Die Raman-Spektroskopie ist eine berührungsfreie Analysenmethode zur Materialcharakterisierung. Diese Untersuchung liefert Informationen über die Molekularstruktur. Hierbei können die räumliche Anordnung, die qualitative und quantitative Analyse vollzogen werden.

7 Zusammenfassung

Kontakte zwischen kollidierenden Körpern führen zu einem Teilchentransport zwischen den Kontaktflächen. Bei Verkehrsunfällen jedweder Art kommt es zu solchen Teilchentransporten. Vorrangig ist es Aufgabe der Polizei alle Beweise zu sichern. Dazu reichen nicht nur Fotos von den Schäden und das Ausmessen der Höhen über dem Boden.

Seit den 80-er Jahren ist die Spurensicherung, insbesondere bei kleinen Verkehrsunfällen, vernachlässigt worden. Erst mit der Entwicklung und Anwendung einer speziellen Spurensicherungsfolie - der Spurfix-Folie - gelingt eine zeitnahe und langfristige Sicherung von individuellen Spurenlagen. Der Focus liegt dabei weniger in der Auswertung von Lackpartikeln, sondern in der Sicherung von markanten Spurenausprägungen.

Die Polizei NRW hat seit 2013 diese Folie im Einsatz und verzeichnet im bundesweiten Vergleich überdurchschnittlich hohen Aufklärungsqouten. Namhafte Versicherungen haben das Potenzial des konservierten Sachbeweises ebenfalls erkannt und Nutzen diese Art der Beweissicherung erfolgreich zur Aufklärung von Manipulationen und Betrugsabsichten.

Fast 10 Jahre sind seit der Entdeckung von markanten Spurenlagen durch einen der Verfasser (Lehmkuhl) vergangen. Dieser hat auch Forschungen zu einer gut geeigneten Folie betrieben und deren Entwicklung betrieben. Das gesamte Anwendungsverfahren ist unter dem Namen „Spurfix-Methode“ bekannt. Der Name „Spurfix“ ist patentrechtlich geschützt.

Literatur

[1] Jochen Lehmkuhl, K.-H Willems Mikrospurensicherung bei Verkehrsunfallfluchten, Verkehrsunfall- und Fahrzeugtechnik 07-2011
[2] Jörg Arnold, Unfallaufnahme, Spurensicherung, Verkehrsunfall-und Fahrzeugtechnik 11-2006
[3] Jochen Lehmkuhl, Heinz Morfeld, Die Kriminalpolizei Ausgabe 12-2013

Alles für präzise Erkenntnisse.
DEKRA Sondergutachten und Laboruntersuchungen.

DEKRA

Bei der Rekonstruktion von Verkehrsunfällen ergeben sich häufig Fragestellungen, die ohne weitergehende Untersuchungen nicht zu beantworten sind. Hierfür gibt es bei DEKRA besonders geschulte Sachverständige denen modernste Labortechnik zur Verfügung steht.

Reifen und technische Gummiwaren
Untersuchung der Ausfallursache des Bauteils.

Lackuntersuchung
Analyse von Lacken und Lackantragungen hinsichtlich Schichtaufbau und chemischer Zusammensetzung im Rahmen unfallanalytischer Fragen, auch anhand von Spurensicherungsfolie.

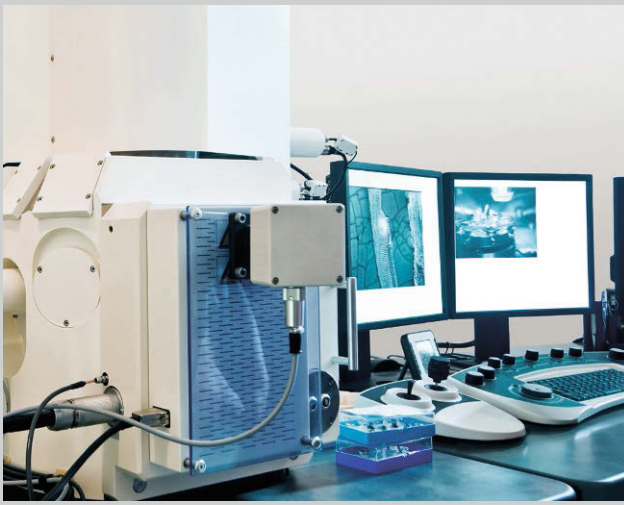
Lampen
Untersuchung des Brennzustands zum Zeitpunkt des Unfalls.

Identifizierung von Haaren bei Wildschäden
Bestimmung der Tierart zur Klärung des Versicherungsanspruchs.

Diebstahlspuren
Analyse von Zündschlüsseln und Zündschlössern zur Klärung der behaupteten Entwendung des Fahrzeugs.

Sicherheitsgurte, Motorradhelme
Klärung des Anlege- bzw. Tragezustands zum Unfallzeitpunkt.

Bruchflächenuntersuchung
Erkennen der Versagensart von Bauteilen.



Zur Verfügung stehen vielfältige Untersuchungsmethoden

> Begutachtung mit Auflicht-und Stereomikroskopen
> Untersuchung am Rasterelektronenmikroskop in Kombination mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie
> Röntgenuntersuchungen
> Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie

Sie erhalten neutrale, umfassende, verkehrsfähige und prozesstaugliche Gutachten. Informieren Sie sich jetzt oder beauftragen Sie uns gleich unter der Service-Hotline 0800.333 333 33.

www.dekra.de

C9 Elektronik im Kraftfahrzeug

A – Übersicht

Jürgen Gallus

1 Einführung

In den vergangen Jahren ist der Anteil von elektronischen Systemen und Komponenten in Kraftfahrzeugen stark angestiegen. Dies betrifft neben den herkömmlichen Systemen wie Motor- und Getriebesteuerung insbesondere auch Systeme der Sicherheits- und Komfortelektronik. In Luxusfahrzeugen steuern heute bis zu 70 elektronische Steuergeräte, verbunden durch Bussysteme, die Wünsche des Fahrers. Der Anteil von Elektronikkomponenten im Fahrzeug beträgt bereits 20 bis 30 % der Herstellkosten und der Wertschöpfung. In den nächsten Jahren wird dieser Anteil nach Schätzungen von Experten die Marke von 40 % erreichen.

Mit „Drive-by-Wire"-, „Shift-by-Wire"-, „Steer-by-Wire"- und „Brake-by-Wire"-Systemen werden zunehmend Hardwarekomponenten durch Software und Elektronik unterstützt bzw. ersetzt.

Diese Entwicklung führt dazu, dass bei Ausfällen und Defekten neben den Hardwarekomponenten auch die Elektronik sowie die Funktionalität von Steuergeräten und deren Vernetzung geprüft werden muss. Hierzu ist ein erhebliches Fachwissen mit dem Umgang der Fahrzeugelektronik sowie mit entsprechenden Testgeräten und Diagnosetools notwendig.

Die Fragestellungen, mit denen sich der technische Sachverständige bei der Untersuchung von Elektronikkomponenten auseinandersetzen muss, sind sehr komplex und oftmals nicht ohne umfangreiche Fahrzeuguntersuchungen zu beantworten.

Insbesondere ist darauf zu achten, dass nach Unfällen nicht Gebrauchtteile eingebaut werden, die womöglich nicht zum Fahrzeugtyp passen oder deren Funktionsfähigkeit nicht vollständig gewährleistet ist. Dies kann z. B. aufgrund falscher Parameter zu Fehlfunktionen im gesamten Elektronikverbund im Fahrzeug führen. Nach dem Tausch oder Update von Steuergeräten kann eine „Wiederinbetriebnahme" oder „Konfiguration" der Systeme notwendig sein, wozu entsprechende Diagnosetools benötigt werden.

2 Anwendungsgebiete

Die Anwendungsgebiete von elektronischen Komponenten und Systemen in Fahrzeugen sind vielseitig. Anhand einiger Beispiele sollen die Zusammenhänge dargestellt werden.

Wenn der Fahrer zu zaghaft auf die Bremse tritt, das entsprechende Steuergerät aber anhand des Gradienten des Pedalwerts erkennt, dass eine Notbremsung eingeleitet wurde, dann wird durch die Elektronik die Bremswirkung erhöht. Das ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm, Robert Bosch GmbH) hält das Fahrzeug dabei in der Spur und das ABS (Anti-Blockier-System, Robert Bosch GmbH) sorgt für den kürzesten Bremsweg.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_41

Assistenzsysteme bewirken, dass die Fahrgeschwindigkeit gedrosselt wird, wenn der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu gering wird. Beim Parken warnt die „Einparkhilfe“ vor nahenden Hindernissen. Bei Nachtfahrten verbessert das adaptive Kurvenlicht die Sicht, indem sich die schwenkbaren Scheinwerfer an den Lenkwinkel anpassen und die Kurve ausleuchten. Das Navigationssystem ermittelt den schnellsten Weg zum Ziel und teilt dies dem Fahrer optisch bzw. akustisch mit.

Der Einsatz von mechatronischen Lenksystemen führt zu einer mechanischen Entkopplung zwischen Fahrwerk und Lenkrad. Durch den Entfall der mechanischen Lenksäule wird unter anderem die Verletzungsgefahr für den Fahrer bei einem Aufprall verringert. Zudem beeinflusst das Lenksystem die Anordnung von Motor und Getriebe. Anregungen von außen, wie Fahrbahnunebenheiten und Anstöße der Räder werden folglich nicht mehr haptisch durch die Handoberflächen am Lenkrad wahrnehmbar sein. Weiterhin erlaubt ein mechatronisches Lenksystem Eingriffe durch das ESP, das nicht nur durch Bremsen sondern auch durch Gegenlenken zur Fahrstabilität beitragen könnte. Auch der Einfluss von Seitenwind und Spurrillen könnte durch ein elektronisch geregeltes Lenksystem weitgehend kompensiert werden.

Die Elektronik sorgt für steigende Sicherheit, bessere Abgaswerte und mehr Komfort. Während der Fahrer dabei entlastet wird, nehmen Komplexität und Fehlermöglichkeiten der elektronischen Systeme zu.

3 Vernetzung und Bussysteme

Um einen sicheren Datenaustausch der elektronischen Komponenten und Steuergeräte im Fahrzeug sicherzustellen, müssen Kabel durch das gesamte Fahrzeug gelegt werden. Dies nimmt viel Platz in Anspruch, erhöht das Fahrzeuggewicht und die Fehlermöglichkeiten.

Diese konventionelle Verkabelungstechnik stößt bei modernen Fahrzeugen an die Grenzen, da die Anzahl der Leitungen im Kabelbaum und der Steckverbindungen begrenzt sind. Heute kommen Datenbussysteme zum Einsatz, die Steuergeräte und elektronische Komponenten miteinander verbinden. Hierdurch werden Antriebs- und Motorsysteme sowie Sicherheits-, Komfort-, Kommunikations- und Kontrollsysteme miteinander vernetzt. Damit besteht die Möglichkeit, dass Signale, die über ein Steuergerät eingelesen und aufbereitet werden, für mehrere Steuergeräte und Systeme im Fahrzeug genutzt werden können.

Zum Austausch der Daten werden unter anderem CAN-Datenbussysteme (Controller Area Network) verwendet. Ähnliche Bussysteme (Datenleitungen) werden in der Computer- und Netzwerktechnologie eingesetzt. Alle Steuergeräte und Elektronikkomponenten, die am CAN-Datenbussystem angeschlossen sind, verfügen über einen eigenen Controller, der mit einer zweiadrigen Datenleitung (CAN-Low und CAN-High) am Datenbussystem angeschlossen ist. Zusätzlich benötigen die Steuergeräte eine Stromversorgung. Auf diese Weise lassen sich Kabelbäume schlanker gestalten.

In Abhängigkeit von der benötigten Übertragungsrate werden verschiedene Datenbussysteme im Fahrzeug eingesetzt. Die Verbindung zwischen den Datenbussystemen erfolgt durch ein Gateway. CAN-Netzwerke mit hohen Übertragungsraten kommen z. B. bei der Fahrdynamik-, Motor- und Getriebesteuerung zur Anwendung. Bei der Kommunikation von Systemen im Fahrzeuginnenraum (z. B. Schiebedach, Fensterheber, Alarmanlage usw.) können hingegen kostengünstigere LIN-Bussysteme (Local Interconnect Network) mit geringeren Übertragungsraten verwendet werden.

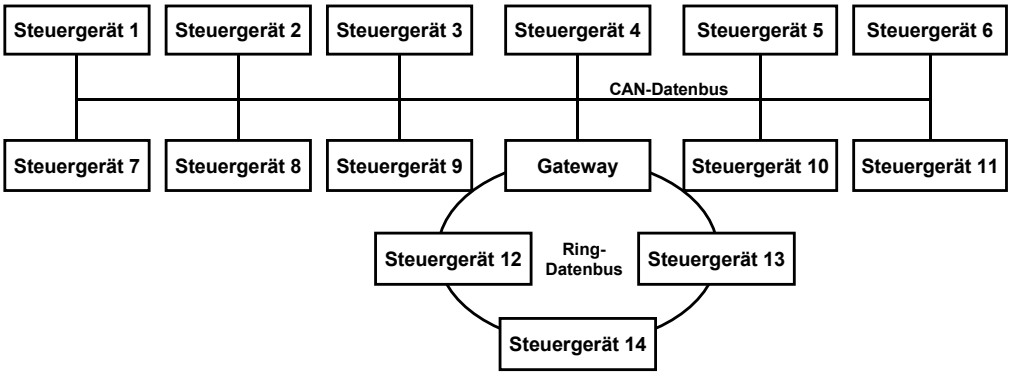


Bild C9-1 Vernetzung Datenbussysteme (Beispiel)

Beispielsweise können die Signale der Raddrehzahlfühler vom ABS- bzw. ESP-Steuergerät eingelesen, auf Plausibilität geprüft und für die interne ABS bzw. ESP-Regelung verwendet werden. Zusätzlich werden die erfassten Drehzahlsignale der Radsensoren auf dem CAN anderen Steuergeräten zur Verfügung gestellt. Das Kombiinstrument empfängt diese Datensignale und visualisiert die Fahrgeschwindigkeit. Hat das ABS bzw. ESP-Steuergerät bei der Plausibilitätsprüfung (Diagnose) der Radsensorsignale einen Fehler erkannt, so wird ein entsprechender Fehlercode im ABS bzw. ESP-Steuergerät abgespeichert. Zeitgleich wird anderen Steuergeräten über die CAN-Datenleitung mitgeteilt, dass ein Fehler eines Radsensors identifiziert wurde. Das Kombiinstrument empfängt diese Signale und bringt die entsprechende Fehlermeldung, z. B. durch eine Warnlampe im Display, zur Anzeige.

Weiterhin können die Radsensorsignale z. B. von dem Getriebesteuergerät empfangen und zur Plausibilisierung von Schaltwünschen herangezogen werden. Auch für die Motorsteuerung, die Tempomatregelung und die geschwindigkeitsabhängige Lautstärkeregelung der Radio- und Audiosysteme können die Radsensorsignale zur internen Signalverarbeitung verwendet werden, wenn diese auf dem Datenbus verfügbar sind. Die am Datenbus angeschlossenen Steuergeräte überwachen das Datenbussystem. Die Fehlersuche erfolgt mit Diagnosetools.

4 Steuergeräte

Durch Sensoren (z. B. Motortemperaturfühler, Fahrpedalpotentiometer, Drehzahlfühler usw.) werden physikalische oder chemische Größen wie z. B. Winkel, Temperatur, Druck erfasst und in elektrische Größen (Strom, Spannung, Widerstand) umgewandelt. Diese elektrischen Größen werden dem jeweiligen Steuergerät zur Verfügung gestellt (Eingangsseite). Die Informationsverarbeitung der Daten erfolgt in den Steuergeräten durch hinterlegte Funktionen und Kennfelder. Anhand der berechneten Werte werden Aktuatoren bzw. Stellglieder (z. B. Einspritzventile, Elektromotoren, Regelventile usw.) durch elektrische Signale gesteuert bzw. geregelt (Ausgangsseite). Die Aktuatoren wandeln elektrische Größen in physikalische Größen (z. B. Drehung, Licht usw.) um.

Das Steuergerät besteht im Wesentlichen aus einem Gehäuse, Steckkontakten, einer bestückten Platine, einem Analog-Digital-Wandler sowie Ausgangsstufen. Mit dem Analog-Digital-Wandler werden Sensorsignale digitalisiert. Ausgangsstufen sind zur Ansteuerung von Stellgliedern (Aktuatoren) notwendig.

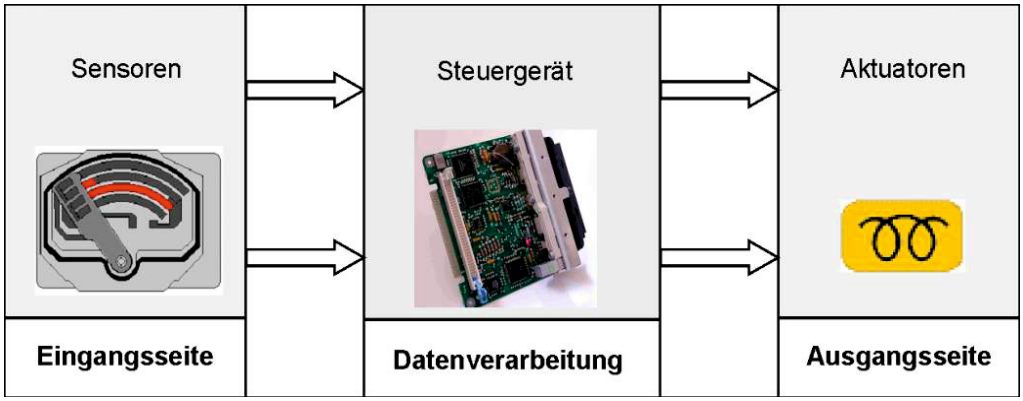


Bild C9-2 Datenverarbeitung

Im Inneren des Steuergeräts befinden sich der Funktionsrechner, das RAM, ein Flash-EPROM, ein EEPROM sowie ein Überwachungsrechner. Im Funktionsrechner läuft das Hauptprogramm für die Steuerung und Regelung ab. Im RAM (Random Access Memory) werden temporäre Daten abgelegt. Im Flash-EPROM (Erasable and Programable Read Only Memory) sind Kennfelder und Kennlinien abgelegt. Steuergeräte sind in der Regel diagnosefähig. Der Überwachungsrechner überprüft ständig die Sensordaten und die Rückmeldungen der Stellglieder auf Plausibilität. Liegt ein Fehler vor, so kann dieser z. B. im EEPROM (Elektrical Erasable and Programable Read Only Memory) des jeweiligen Steuergeräts abgespeichert und später mit einem Diagnosegerät ausgelesen werden.

Die Ursache für einen Fehlereintrag kann sowohl in der Peripherie (Sensor, Aktuator, Steckverbindung, Leitungssatz, Kurzschluss, Wassereintritt usw.) als auch am Steuergerät selbst liegen. Es empfiehlt sich vor dem Tausch eines Steuergeräts die Peripherie auf Defekte und Fehler zu prüfen.

Für den Sachverständigen ist es wichtig zu erkennen, ob an dem von ihm zu untersuchenden Fahrzeug bzw. Steuergerät Tuningmaßnahmen vorgenommen wurden. Von Tunern werden in der Regel die im Flash-EPROM abgelegten Kennfelder und Kennlinien verändert. Dies kann durch den Tausch eines Speicherchips auf der Platine, durch den Einsatz von Zusatzsteuergeräten oder durch das „umprogrammieren“ des Steuergeräts erfolgen.

Die folgenden Bilder zeigen typische Beschädigungsbilder an Steuergeräten:

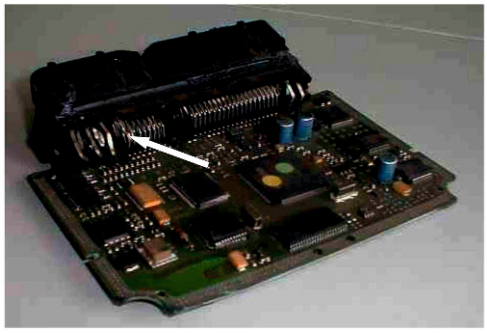


Bild C9-3 Mechanischer Defekt am Steuergerät

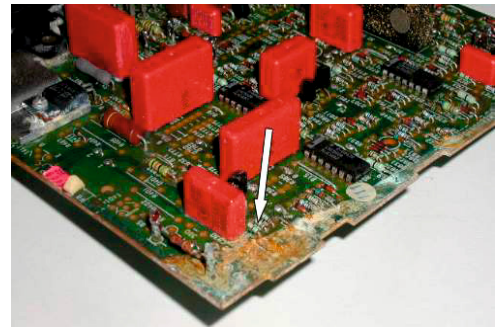


Bild C9-4 Wassereintritt im Steuergerät

5 Sensoren

Die Sensoren sind die „Sinnesorgane“ im Kraftfahrzeug. Sie liefern die Daten für Weg, Winkel, Temperatur, Drehzahl, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Druck, Gaskonzentration und andere Einflussgrößen an das jeweilige Steuergerät. Sensoren setzen eine physikalische oder chemische Größe, unter Berücksichtigung von Störgrößen, in elektrische Signale um, die von den Steuergeräten zur Signalverarbeitung benötigt werden.

Die Hauptanforderungen an Sensoren sind hohe Zuverlässigkeit, geringe Herstellkosten, kleine Bauweise, hohe Genauigkeit sowie hohe Betriebsfestigkeit gegen mechanische, klimatische und chemische Einflüsse.

Im Folgenden ist die Funktionsweise von verschiedenen Sensortypen kurz beschrieben.



Bild C9-5 Temperatursensor



Bild C9-6 Tankfüllstandsgeber

5.1 Temperatursensoren

Die Erfassung der Temperaturwerte für Kühlwasser, Getriebeöl, Ansaugluft, Abgas, Kraftstoff, Ladeluft usw. erfolgt z. B. durch ein Sensorelement mit physikalisch veränderbarem Widerstand. In dem Sensorgehäuse ist ein temperaturabhängiger Messwiderstand mit einem NTC (Negative Temperature Coefficient) integriert. Die am Messwiderstand gemessene Spannung verändert sich in Abhängigkeit von der Temperatur. Im entsprechenden Steuergerät ist eine Kennlinie gespeichert, durch die jedem Widerstand eine entsprechende Temperatur zugeordnet werden kann.

5.2 Positionssensoren

Durch Positionssensoren wird die Winkelstellung bzw. Position von Wellen und Klappen erfasst. Beispiele hierfür sind Drosselklappen-, Fahrpedalpotentiometer und Tankfüllstandsgeber. Zur Ermittlung der Position werden z. B. mechanisch veränderbare Widerstände verwendet, bei denen ein von einer Welle betätigter Schleifer Widerstandsbahnen abtastet. Durch die sich verändernde Länge der Widerstandsbahn verändert sich der Widerstandswert. Jedem Widerstandswert ist ein Winkel und somit eine Position zugeordnet (Potentiometer).

5.3 Optische Sensoren

Optische Sensoren bestehen aus Leuchtdioden, die Licht aussenden und aus Fotodioden, die Licht empfangen. Eine Veränderung der Reflexion erkennt das Steuergerät durch veränderten Lichtempfang der Fotodioden. Dadurch kann z. B. der Regensensor einen Wassertropfen auf der Windschutzscheibe erkennen und den Scheibenwischer automatisch betätigen oder ein Sensor erkennt die Verschmutzung bei Xenon-Scheinwerfern und aktiviert die automatische Reinigung des Scheinwerfers.

5.4 Induktive Drehzahlsensoren

Zur Messung von Drehzahlsignalen (z. B. Kurbelwellendrehzahl oder Raddrehzahl) werden induktive Drehzahlsensoren verwendet. Dieser Sensor besteht aus einem Weicheisenkern mit Kupferwicklung (Geberspule) und einem Dauermagneten. Zur Erfassung der Kurbelwellendrehzahl ist an der Kurbelwelle ein ferromagnetisches Inkrementenrad (Geberrad) angebracht. Bei Drehung der Kurbelwelle erzeugen die Zähne des Geberrads magnetische Flussänderungen in der Geberspule. Dadurch wird eine Wechselspannung induziert. Aus der Frequenz dieser Wechselspannung wird im Steuergerät die Drehzahl ermittelt. Wird in dem Geberrad eine größere Lücke als Bezugsmarke angebracht, so kann aufgrund der größeren magnetischen Flussänderung zusätzlich die Stellung der Kurbelwelle erfasst werden.

5.5 Beschleunigungssensoren

Diese Sensoren erfassen Beschleunigungen des Fahrzeugs in verschiedene Richtungen. Die Beschleunigungsänderung wird durch eine frei schwingende (seismische) Masse, die entsprechend verschoben wird, erfasst und dem jeweiligen Steuergerät mitgeteilt. Beim Überschreiten eines Grenzwertes können z. B. die Fahrdynamikregelsysteme aktiviert oder die Insassenrückhaltesysteme wie Gurtstraffer, Airbag oder Überrollbügel ausgelöst werden.

5.6 Ultraschallsensoren

Mit Ultraschallsensoren werden Abstände zu Hindernissen überwacht. Ein Ultraschallsensor besteht aus einer Sende-/Empfangseinheit, die Ultraschallwellen aussendet und die reflektierenden Wellen wieder empfängt sowie einer Auswerteelektronik. Bei der Innenraumüberwachung (Alarmanlage) werden die Sensoren im Fahrgastraum angebracht, um ein unberechtigtes Eindringen in das Fahrzeug zu erkennen. Die Einparkhilfe mit vier bis sechs Ultraschallsensoren im Stoßfänger überwacht den Abstand zwischen Hindernissen vor und hinter dem Fahrzeug. Der Fahrzeuglenker wird durch optische Anzeige oder/und akustische Signale über den Abstand zu dem Hindernis informiert.

5.7 Weitere Sensoren

Die Anwendungsgebiete von Sensoren im Fahrzeugbau sind vielfältig. So werden z. B. zur Ermittlung der Drehbewegung des Fahrzeugs um die Hochachse Drehratensensoren eingesetzt. Diese Sensoren sind in der Lage die bei der Kurvenfahrt oder beim Schleudern auftretenden Giermomente zu erfassen und diese dem ESP-Steuergerät mitzuteilen. Kraftsensoren in den Sitzen dienen zur Erkennung von Gewicht und Position der Insassen und bilden die Grundlage

für eine intelligente Airbagauslösung. Drucksensoren werden zur Erfassung des Saugrohrdrucks und zur Umsetzung von Reifendruck-Kontrollsystemen eingesetzt. Ölsensoren sind in der Lage die Leitfähigkeit und Temperatur sowie die Menge des Motoröls zu erfassen, wodurch flexible Inspektionsintervalle ermöglicht werden. Weiterhin kommen Lambdasonden, Klopfsensoren, Luftmassenmesser usw. zum Einsatz.

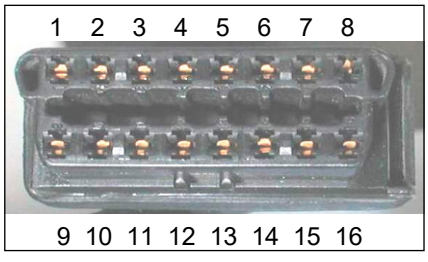
5.8 Schalter und Taster

Im Fahrzeug sind diverse Schalter und Taster (z. B. Fensterheber, elektrische Sitzverstellung, Warnblinkschalter, Ziffernblock für das Telefon usw.) verbaut. Diese werden mechanisch betätigt und liefern ein digitales Signal (ON oder OFF) an das jeweilige Steuergerät.

6 Diagnose und Prüfmöglichkeiten

Diagnosefähige Steuergeräte führen während des Fahrzeugbetriebs interne Selbsttests (Eigendiagnose) durch. Schon beim Einschalten der Zündung werden die Signale von Sensoren auf deren Vorhandensein geprüft. Während des Fahrbetriebs werden weitere Plausiblitäts- und Funktionsprüfungen, unter Berücksichtigung der Daten von Sensoren und Aktuatoren, durchgeführt. Hierbei wird der „Ist-Zustand“ festgestellt und mit dem „Soll-Zustand“ verglichen. Abweichungen werden plausibilisiert und dann einem Bauteil bzw. einer Komponente zugeordnet. Es können jedoch nur „vorgedachte“ Fehler erkannt werden, für die ein Grenzwert vorliegt. Kommt es zu einem Über- oder Unterschreiten von zuvor definierten Grenzwerten, so wird nach einer vorgegebenen Wartezeit im jeweiligen Steuergerät ein Fehlereintrag abgelegt. Abhängig von der Fehlerart und der Fehlerschwere kann aufgrund des Fehlereintrags eine Warnlampe aktiviert und ein Notlaufprogramm eingeleitet werden.

Die Notwendigkeit der Prüfung von elektronischen Systemen ergibt sich dann, wenn eine Fehlfunktion vermutet wird, oder wenn durch das Fahrzeugdiagnosesystem ein Fehler detektiert wurde. Von der Elektronik bereits erkannte Fehlfunktionen werden in der Regel durch Notlaufeigenschaften bzw. durch eine akustische oder optische Warnung vom Fahrer wahrgenommen. Fehler die vom Steuergerät erkannt und abgespeichert wurden, können mit Diagnosetools ausgelesen und zur Anzeige gebracht werden. Teilweise sind im Steuergerät auch noch Zusatzinformationen zu dem jeweiligen Fehler verfügbar. Die Auswertung und Analyse dieser Fehlerbilder, insbesondere die Aussage, in welchem Zusammenhang ein derartiger Fehlereintrag steht, bedarf sehr viel Expertenwissens. Die stetige Zunahme der Elektronikkomponenten und deren Vernetzung machen diese Fehleranalysen zunehmend komplexer.



Die Belegung der folgender Anschlüsse ist normiert:

Kontakt 02: Datenbus SAE J1850+
Kontakt 04: Fahrzeugmasse
Kontakt 05: Signalmasse
Kontakt 06: CAN-High
Kontakt 07: K-Line ISO 9141-2
Kontakt 10: Datenbus SAE J1850-
Kontakt 14: CAN-Low
Kontakt 15: L-Line ISO 9141-2
Kontakt 16: Batterieplus (+12 Volt)

Bild C9-7 Belegung Diagnosedose

Der Zugang zu der Elektronik und den Diagnosedaten erfolgt über eine standardisierte Schnittstelle (Diagnosedose), die bei Fahrzeugen ab 2001 genormt und standarisiert ist. Die 16-polige Diagnosedose befindet sich im Fahrzeuginnenraum im Bereich des Fahrersitzes zwischen Mittelkonsole und Fahrertür.

Wird ein Diagnosetool über diese Diagnoseschnittstelle mit den Steuergeräten des Fahrzeugs verbunden und Kommunikation aufgebaut, so können Daten aus dem jeweiligen Steuergerät ausgelesen bzw. an das Steuergerät übertragen werden. Neben dem Auslesen von Fehlerspeichereinträgen können häufig auch noch folgende Funktionen bzw. Tests durchgeführt werden:

- Auslesen von Identifikation und Konfiguration,
- Auslesen von Adaptionswerten,
- Auslesen von Ist-Werten der Sensoren,
- Ansteuern von Aktuatoren und Stellgliedern,
- Ansteuern von internen Testsequenzen,
- Löschen von Fehlerspeichereinträgen,
- Flashprogrammierung,
- Inbetriebnahme und Kalibrierung.

Durch das Abklemmen der Batterie können unter Umständen Informationen aus Steuergeräten verloren gehen, die dann nicht mehr ausgelesen werden können. Dies ist insbesondere bei dem Umgang mit Unfallfahrzeugen zu beachten.

Zum Auslesen der Daten sowie zur Durchführung der beschriebenen Tests stehen dem Anwender prinzipiell drei verschiedene Arten von Diagnosesystemen zur Verfügung:

Mit dem Generic Scantool können alle Daten ausgelesen werden, die im Zusammenhang mit der Vorschrift zur Überwachung abgasrelevanter Systeme (OBDII für USA bzw. EOBD für Europa) vom Gesetzgeber vorgeschrieben sind. Für diesen Datenumfang sind Generic Scantools für alle Fahrzeuge einsetzbar, die die EOBD bzw. OBDII-Vorschriften erfüllen (OBD: On Board Diagnose). Generic Scantools werden unter anderem im Zusammenhang mit der Abgasuntersuchung für EOBD-Fahrzeuge eingesetzt. Teilweise ist auch eine Erweiterung des Generic Scantools zum universellen Diagnosesystem möglich.

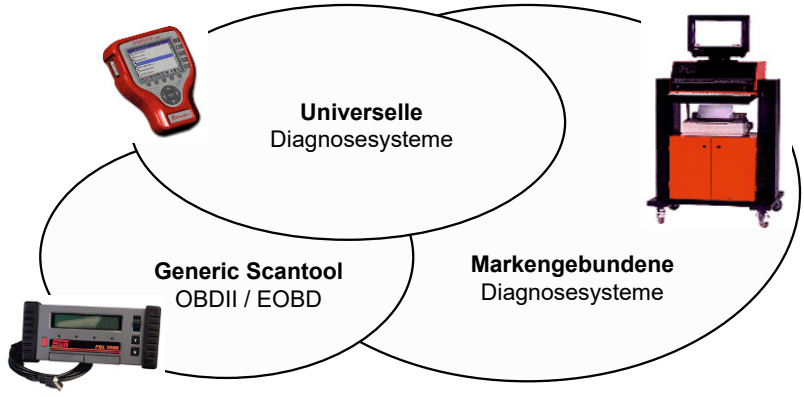


Bild C9-8 Diagnosesysteme

Mit universellen Diagnosesystemen können neben den Daten von abgasrelevanten Systemen auch die Daten weiterer Steuergeräte ausgelesen und diagnostiziert werden. Bei verschiedenen Systemen werden hierbei auch Informationen zur Fehlerbehebung bereitgestellt. Die Hersteller von universellen Diagnosesystemen benötigen hierfür spezifische Informationen von Fahrzeug- und Komponentenherstellern.

Markengebunde Diagnosesysteme werden insbesondere in Vertragswerkstätten des jeweiligen Fahrzeugherstellers eingesetzt. Sie bieten in der Regel die maximalen Prüfmöglichkeiten, sind jedoch markengebunden. Auch hier werden in der Regel ausführliche Informationen zur Fehlerbehebung bereitgestellt, die ständig aktualisiert und erweitert werden.

7 Optische Lichtleitersysteme

Zum Transport von großen Datenmengen (bewegte Bilder, Video, Navigation usw.) werden in der Kraftfahrzeugtechnik zunehmend optische Lichtleitersysteme (Media Oriented System Transport) MOST verwendet. Hierbei wird das Kupferkabel durch transparenten Kunststoff ersetzt und die Datenübertragung erfolgt durch Lichtblitze (Morsen). Lichtwellenleiter sind in der Regel als Ringstruktur aufgebaut und verbinden Steuergeräte der Komfortelektronik wie Handy, CD-Wechsler, Navigation, TV-Tuner, Radio-Tuner, Verstärker usw.

Lichtwellenleiter können von außen nur schwer von einem konventionellen Kupferkabel unterschieden werden. Sie sind Isolatoren und unterliegen keiner elektromagnetischen Beeinflussung. Es kommt weder zu Funkenbildung noch zu Kabelbrand, wenn sich das Kabel an der Karosserie aufscheuert.

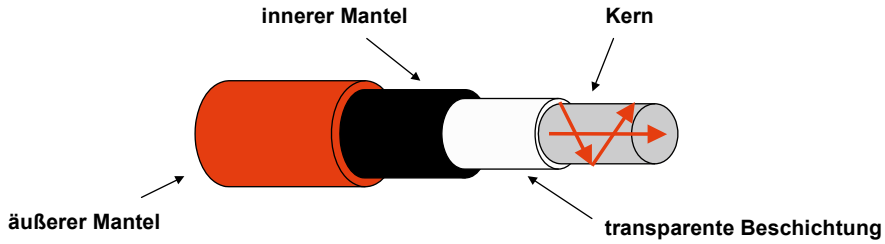


Bild C9-9 Aufbau Lichtwellenleiter

Der Transport der Lichtwellen erfolgt in einem Kern aus transparentem Kunststoff. Unmittelbar darüber befindet sich eine transparente Beschichtung, wodurch der Lichtstrahl verlustfrei reflektiert wird (Totalreflexion). Der innere Mantel schützt vor äußerer Lichteinstrahlung. Der äußere Mantel dient zur farblichen Kennzeichnung und zum Schutz gegen mechanische Einflüsse und Kräfte von außen. Lichtwellenleiter dürfen nicht geknickt oder durch Schellen bzw. Kabelbinder zusammengedrückt werden, da es sonst aufgrund von erhöhter Dämpfung zu Übertragungsfehlern kommen kann. Bei der Reparatur sind die Vorgaben der Fahrzeughersteller zu beachten und die vorgegebenen Biegeradien einzuhalten.

8 Lichttechnik

Neben den Metalldraht- und Halogenlampen werden in Fahrzeugen zunehmend Gasentladungslampen mit Xenon-Gas und Leuchtdioden eingesetzt.

Bei Gasentladungslampen wird, durch ein Vorschaltgerät, zwischen zwei Elektroden ein Hochspannungsimpuls gezündet. Dadurch entsteht, in dem mit Xenon-Gas gefüllten Lampenkolben, ein Lichtbogen. Gasentladungslampen bieten im Vergleich zu Halogenlampen eine bessere Lichtausbeute, was zu einer besseren Ausleuchtung der Straße führt. Bei höherer Lebensdauer wird eine tageslicht-ähnliche Lichtfarbe erzeugt. Das Licht der Xenon-Lampen ist unabhängig von Schwankungen der Bordspannung, da diese durch ein Vorschaltgerät konstant gehalten wird. Um die Blendung des Gegenverkehrs zu verhindern müssen Fahrzeuge mit Gasentladungslampen mit einer automatischen Leuchtweitenregulierung und mit einer Scheinwerferreinigungsanlage ausgerüstet sein.

Leuchtdioden sind unempfindlich gegenüber Erschütterungen, wartungsfrei und ermöglichen neue Scheinwerferformen und -anordungen. Die Lebensdauer von Leuchtdioden ist höher als bei konventionellen Glühlampen. In Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsfall und der benötigten Lichtstärke werden mehrere Leuchtdioden zusammengeschaltet. Die Hintergrundbeleuchtung von Bedienschaltern, Tastern, Radio, Kombiinstrument und anderen Komponenten der Informations- und Kommunikationstechnik wird überwiegend mit Leuchtdioden realisiert. Zunehmend werden Leuchtdioden in der Kfz-Technik bei Brems- und Rücklicht, sowie für die Begrenzungsbeleuchtung im Nutzfahrzeugsektor eingesetzt. Leuchtdioden haben im Vergleich zu Halogenlampen ein wesentlich schnelleres Ansprechverhalten. Die Einschaltzeit bei Halogenlampen liegt bei ca. 0,2 s, wobei diese bei Leuchtdioden nahezu vernachlässigbar ist. Dies führt bei der Anwendung als Bremsleuchte zu einer früheren Signalisierung für das dahinter fahrende Fahrzeug.

Adaptive Scheinwerfersysteme können sich verschiedenen Verkehrssituationen anpassen. Das dynamische Kurvenlicht ermöglicht beispielsweise ein Schwenken der Scheinwerfer um die Hochachse in Abhängigkeit vom Kurvenradius. Bei Kreuzungen wird zum Hauptlicht ein Zusatzscheinwerfer (statisches Abbiegelicht) eingeschaltet, der den Kreuzungsbereich ausleuchtet. Die Aktivierung von adaptiven Scheinwerfersystemen ist abhängig von Lenkwinkel und Raddrehzahlen (Kurvenradius), Fahrgeschwindigkeit sowie von der Betätigung des Blinkers. Auch „vorausschauende“ Navigationssysteme können zur Steuerung dieser adaptiven Scheinwerfersysteme eingesetzt werden.

9 Vorgehensweise bei Fehlersuche

Vor dem Beginn einer Reparatur und dem Tausch von Bauteilen sollte geklärt werden, ob bereits Maßnahmen zur Fehlerbehebung (z. B. Tausch von Komponenten, Messfahrt usw.) durchgeführt und welche Erkenntnisse daraus gewonnen wurden. Weiterhin sollte untersucht werden, ob der Fehler aktuell noch vorliegt und wie sich dieser auswirkt (z. B. Aktivierung von Warnlampen, Begrenzung von Gangstufen, Leistungsreduzierung, Liegenbleiber usw.). Ist dies nicht der Fall, empfiehlt es sich zu prüfen, wann, wie oft und unter welchen Randbedingungen der Fehler aufgetreten ist.

Bei der Untersuchung der Randbedingungen können neben örtlichen Abhängigkeiten (z. B. Steigung, Gefälle, Kurve, Fahrbahnunebenheiten usw.) auch wetterabhängige Faktoren wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit von Bedeutung sein. Weitere Randbedingungen wie z. B. Motortemperatur, Fahrgeschwindigkeit, Gangstufe, Zuschalten von Verbrauchern usw. können hierbei ebenfalls Einflüsse haben. Weiterhin sollte bei allen im Fahrzeug verbauten Steuergeräten untersucht werden, ob Fehlereinträge vorliegen. Sollte dies der Fall sein, ist zu klären, welche Fehlereinträge abgespeichert sind und ob diese in Zusammenhang mit dem zu untersuchenden Fehlerbild stehen. Zusatzinformationen, wie z. B. die Häufigkeit der Fehlereinträge oder die Fahrgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Fehlerauftritts können ebenfalls weiterführende Informationen liefern.

Auch die „Vorgeschichte“ des Fahrzeugs (z. B. Unfallschäden, durchgeführte Reparaturen, Tuningmaßnahmen usw.) kann bei der Fehlersuche von Bedeutung sein. Hierbei kann eine VIN-Abfrage zur Ermittlung des ursprünglichen Ausstattungszustands dienen.

Bei der Fahrzeugreparatur ist darauf zu achten, dass Stecker von elektronischen Bauteilen (Sensoren, Steuergeräte, Aktuatoren usw.) nicht bei eingeschalteter Zündung oder aktiven Systemen abgezogen werden. Die Gefahr von Spannungsspitzen könnte zum Zerstören von elektronischen Bauteilen führen. Vor Schweißarbeiten an der Karosserie empfiehlt es sich die Spannungsversorgung der Steuergeräte zu unterbrechen, um die Gefahr von Kurzschlüssen zu vermeiden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass beim Abklemmen der Batterie Fehlerspeichereinträge und Konfigurationswerte verloren gehen können. Bei Lackierarbeiten mit anschließendem Trocknen in der Lackierkabine sollte eine mögliche Überhitzung der Steuergeräte vermieden werden.

10 Zusammenfassung/Ausblick

Der Wunsch nach Sicherheits-, Komfort-, Kommunikations-, und Kontrollsystemen führt zu einer steigenden Anzahl von elektronischen Komponenten im Fahrzeug. Zur Reduzierung der Leitungssätze und zur Mehrfachnutzung von Sensorsignalen erfolgt die Vernetzung der Steuergeräte durch Datenbussysteme, wodurch komplexe Abhängigkeiten entstehen.

Sensoren erfassen physikalische oder chemische Größen, wandeln diese in elektrische Signale um und stellen diese den Steuergeräten (Eingangsseite) zur Verfügung. Diese Eingangswerte werden im jeweiligen Steuergerät überwacht, plausibilisiert (Eigendiagnose) und weiterverarbeitet. Anhand der im Steuergerät berechneten Werte werden die Aktuatoren und Stellglieder (Ausgangsseite) angesteuert. Aktuatoren wandeln elektrische Größen in physikalische Größen um.

Zur Fehlersuche und Fahrzeugprüfung werden Diagnosetools mit dem Fahrzeug über die Diagnosedose verbunden. Hierzu stehen dem Sachverständigen prinzipiell 3 verschiedene Arten von Diagnosesystemen (Generic Scantool, universelle und markengebundene Diagnosesysteme) zur Verfügung. Mit diesen Tools können Daten aus den Steuergeräten ausgelesen und in diese geschrieben werden.

Das Zusammenspiel von Hard- und Software sowie die Vernetzung und Abhängigkeiten der Steuergeräte untereinander führen bei Defekten zu vielfältigen und komplexen Fehlerbildern. Zur wirtschaftlichen Analyse und Bewertung dieser Fehler benötigt der Sachverständige zunehmend Systemkenntnisse im Bereich der Fahrzeugelektronik.

Literatur

[1] Verschiedene Autoren: Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik, Verlag Europa-Lehrmittel, 2004
[2] Ahlgrimm, Martin: Untersuchung von Elektronischen Systemen und Komponenten, EVU 2002
[3] Gallus: Vortragsskript „Elektronik und Diagnose im Kraftfahrzeug“, 2006
[4] Tomanik: Kfz-Chip-Tuning, Franzis’ Verlag GmbH, 2003
[5] Schiepeck, Ebner: Diagnose Elektrik/Elektronik für Kfz-Mechatroniker, EPV Verlag, 2005

B – Event Data Recorder (EDR) und Datenauslesung mit dem BOSCH CDR Tool

Dr. Heinz Burg

1 Einleitung

In USA, in Canada und in weiten Teilen der Welt hat es sich durchgesetzt, dass in Personenwagen unfallrelevante Daten gespeichert werden. Die Daten sind in einem Speicherbaustein als Hexadezimalzahlen gespeichert, wodurch sie vor einer absichtlichen Verfälschung weitgehend gesichert sind. Bei dem BOSCH CDR werden diese Hexadezimalzahlen erst nach einer Auslesung in lesbare Texte oder Diagramme umgewandelt.

Denkt man über das Problem der Verfälschung etwas nach, dann taucht sofort die Frage auf: wie stellt man sicher, dass ein ausgedruckter Bericht mit lesbaren Daten nicht gefälscht ist. Das ist ein eigenes, aber sehr wichtiges Thema. Das BOSCH CDR-Verfahren bietet die derzeit maximale Sicherheit.

Der Speicherbaustein für die unfallrelevanten Daten heißt Event Data Recorder (EDR) und wurde in das an gut geschützter Stelle untergebrachte Airbag-Steuergerät (ACM) eingebaut. Dort empfängt der Speicherbaustein Daten aus verschiedenen Quellen im Fahrzeug, meist über den CAN-Bus. Das ist eine wichtige Information, die bei der Dateninterpretation zu beachten ist.

Welche Daten werden denn gespeichert? In den USA gibt es eine Verordnung, die besagt, dass dann, wenn ein EDR in ein Fahrzeug eingebaut ist, bestimmte Mindest-Daten mit einer bestimmten Genauigkeit gespeichert werden müssen.

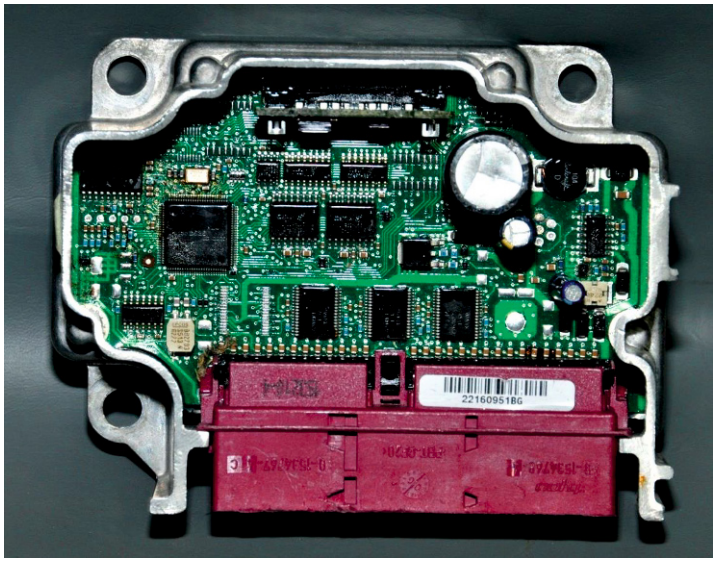


Bild C9-10 Airbag-Steuergerät (ACM)

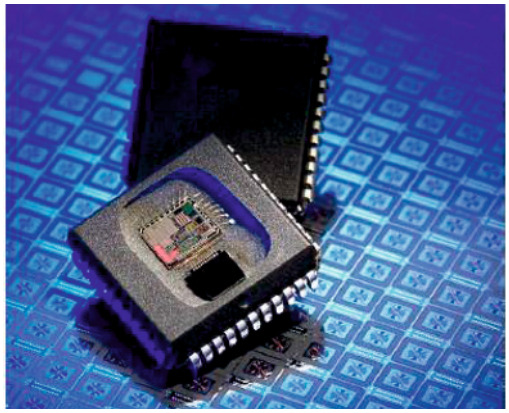


Bild C9-11 Flash Memory/Datenspeicherchip

Die Verordnung gibt es inzwischen in einer, dem Stand der Technik angepassten Version. Daraus folgt, dass es ältere Fahrzeuge gibt, deren EDR-Daten dem ersten Stand der Verordnung genügen und solche, die dem neueren Stand der Verordnung entsprechen. In absehbarer Zeit wird es einen weiteren Stand geben müssen und das kann nicht der letzte sein. Die Fahrzeugentwicklung unterliegt einer erstaunlichen Beschleunigung.

Warum werden unfallrelevante Daten gespeichert? Zu dieser Frage gibt es viele Antworten. Eine für die Sachverständigen für Unfallrekonstruktion bedeutsame ist die, dass die elektronischen Regelsysteme zur Aktiven Sicherheit die früher fast immer vorhandenen Reifenspuren vor der Kollision weitgehend verhindern. Heute kann fast nie etwas über das Fahrerverhalten vor einer Kollision anhand von objektiven Merkmalen rekonstruiert werden.

Die im Event Data Recorder gespeicherten Daten liefern bei den neueren Fahrzeugen Informationen über den Unfallhergang ab 5 s vor der Kollision bis etwa 2 s nach der Kollision. Elektronisch gespeicherte Daten sind objektive Merkmale, genauso wie z. B. Reifenspuren, Lackpartikel, Bruchflächen, Splitter oder Fahrzeugendlagen.

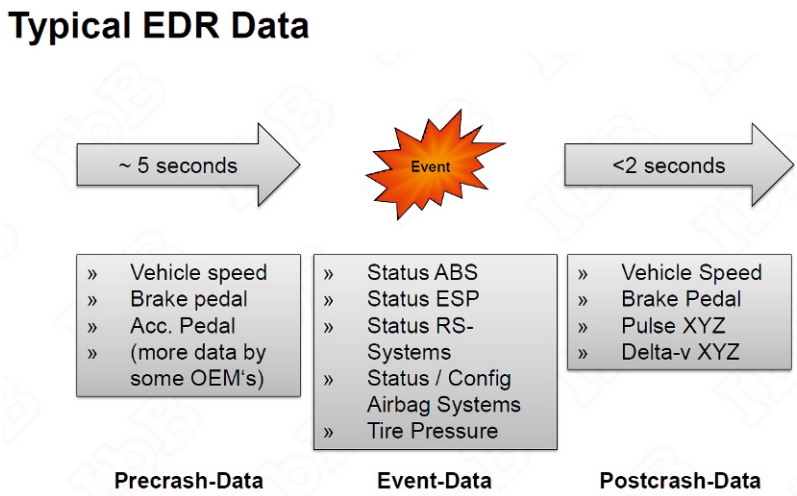


Bild C9-12 Speicherbereich über der Zeit und erfasste Daten

2 Auslesung von elektronischen Daten

Die Airbag-Steuergeräte (ACM) werden von den Zulieferfirmen entwickelt, gefertigt und an die Fahrzeughersteller ausgeliefert. Was wie gespeichert wird entscheiden die Fahrzeughersteller. Sie entscheiden auch über die Art der Auslesung der EDR-Daten.

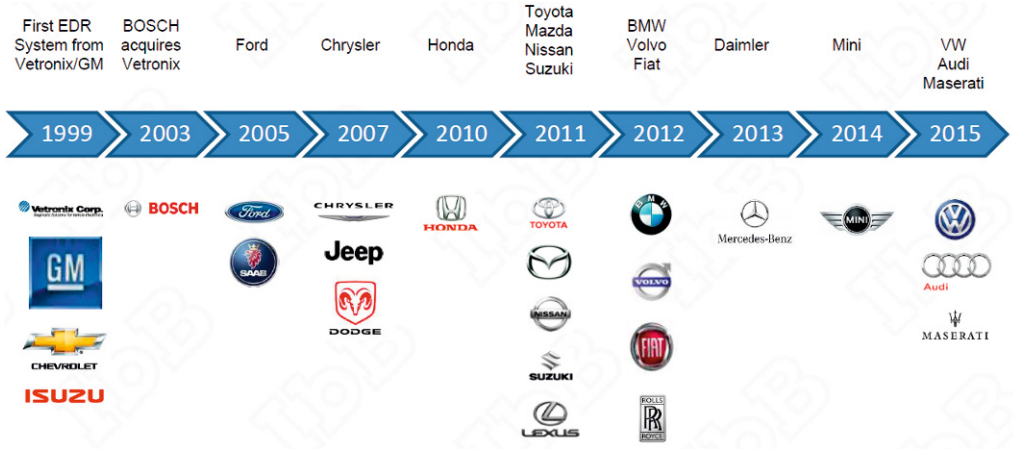


Bild C9-13 Historische Darstellung Herstellerbeteiligung

Die meisten Fahrzeughersteller haben sich für die Auslesung mit dem BOSCH Crash Data Retrieval Tool (CDR-Tool) entschieden.

Das folgende Bild zeigt den aktuellen Stand der Auslese-Tools für den US-Markt. Dieser Stand ist weltweit gültig. Jedoch haben manche Hersteller ihre Daten für Europa gesperrt oder sie haben die Datenaufzeichnung gar nicht aktiviert.

In diesem Vortrag wird nur das BOSCH CDR Tool betrachtet. Grundsätzlich gelten die Darlegungen aber auch für die anderen Auslesungsmethoden.

Manufacturer	12 months Sales end 2/16	Market Share	2016 EDR?	Tool?
GM	3,079,772	17.6%	YES	Bosch CDR
Ford	2,634,491	15.0%	YES	Bosch CDR
Toyota	2,498,889	14.3%	YES	Bosch CDR
Chrysler Group	2,273,230	13.0%	YES	Bosch CDR
Honda	1,598,383	9.1%	YES	Bosch CDR
Nissan	1,499,020	8.6%	YES	Bosch CDR
Hyundai	762,720	4.4%	YES	GIT tool co.
Kia	631,531	3.6%	YES	GIT tool co.
Subaru	583,617	3.3%	YES	Denso 2016+, was Hitachi
BMW	400,064	2.3%	2015	Bosch CDR
Mercedes-Benz	380,690	2.2%	2014	Bosch CDR
Volkswagen	342,626	2.0%	2015	Bosch CDR
Mazda	314,510	1.8%	YES	Bosch CDR
Audi	202,774	1.2%	2015	Bosch CDR
Mitsubishi	95,450	0.5%	YES	OTC/Bosch SPX
Tata (Jag, LR)	87,120	0.5%	YES	OTC/Bosch SPX
Geely (Volvo)	71,744	0.4%	NO	N/A
Porsche	52,532	0.3%	NO	N/A
Industry Total	17,509,163	100.0%	99.3%	Bosch CDR 87.0% [6]
updated April 4 2016				Non CDR 12.3%

Bild C9-14 Hersteller, die das BOSCH CDR Tool unterstützen und deren Marktanteil (Source: Ruth Consulting)

3 Datenauslesung über den OBD-Stecker

Zur Datenauslesung wird im einfachsten Fall ein universelles Kabel gebraucht, das den OBD-Stecker mit dem BOSCH DLC (grüner Kasten, Modem) verbindet. Der grüne Kasten wird mit einem Computer/Laptop/Tablet verbunden. Auf dem Computer befindet sich ein Programm von BOSCH (CDR-Software). Das Programm macht aus den Hexadezimalzahlen im Speicherbaustein einen lesbaren Bericht (CDR-Report), der in Einzelfällen über 100 Seiten lang sein kann.

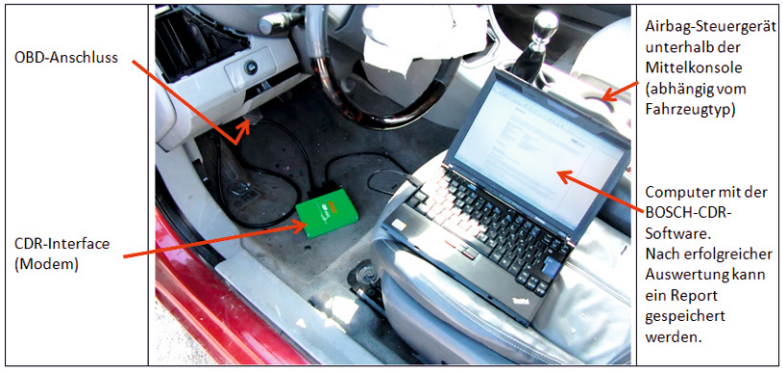


Bild C9-15 Ausrüstung und Anschluss bei einer OBD-Auslesung

Corolla (Toyota) 2002 and later **Market: 7**

Year	EDR Generation	CDR Cable & Adapter	Module	Module Location
2002 - 2005 (except US/Canada) 2003 - 2006 (US/Canada) (see note 2)	Gen 1 (02EDR)	F00K108613 (no adapter) F00K108617 (no adapter) Click here [?] to match the ACM part number to the correct cable	ACM	Under Center Stack
2006 - 2011 (except US/Canada) 2007 - 2011 (US/Canada)	Gen 1 & 2 (02EDR/04EDR/06EDR)	F00K108613 (no adapter) F00K108614 & F00K108387 Cable# 818 & F00K108387 (not US/Canada) Click here [?] to match the ACM part number to the correct cable	ACM	Under Center Stack
2012 and 2014 (all markets)	Gen 3 (12EDR/13EDR)	F00K108613 (no adapter) F00K108614 & F00K108387 Cable# 818 & F00K108387 (not US/Canada) Click here [?] to match the ACM part number to the correct cable	ACM	Under Center Stack
2015 and later (all markets)	Gen 3 (13EDR)	F00K108614 & F00K108387	ACM	Under Center Stack

< Models

Bild C9-16 Auszug aus dem BOSCH Help File

Manchmal wird zusätzlich ein Adapter benötigt; ob ein solcher benötigt wird, kann dem Help File der CDR-Software entnommen werden. Die Software kann zur Verwendung als Reader kostenlos von der BOSCH Webseite http://www.boschdiagnostics.com/cdr/software-downloads heruntergeladen werden. Damit ist sehr einfach festzustellen, ob sich der Aufwand für eine Auslesung lohnt.

Die Kosten für das CDR Kit sind aktuell 1.900 Euro netto und für die Software 899 Euro. Empfehlenswert ist es, die aktuellen Adapter gleich mit zu erwerben, weil diese teilweise dann doch gebraucht werden. Der Gesamtpreis ist dann 3.419 Euro netto.

Im **Bild C9-16** ist ein Auszug aus der BOSCH Software zu sehen, gelb markiert sind die Adapter.

4 Datenauslesung direkt vom Airbagsteuergerät (ACM)

Wenn die Stromleitungen unfallbedingt so stark zerstört sind, dass eine OBD-Auslesung nicht mehr möglich ist, sollte das Airbagsteuergerät ausgebaut werden. Man schließt es dann mit einem passenden Kabel an das CDR Kit an und liest dann aus wie bei der OBD Auslesung.

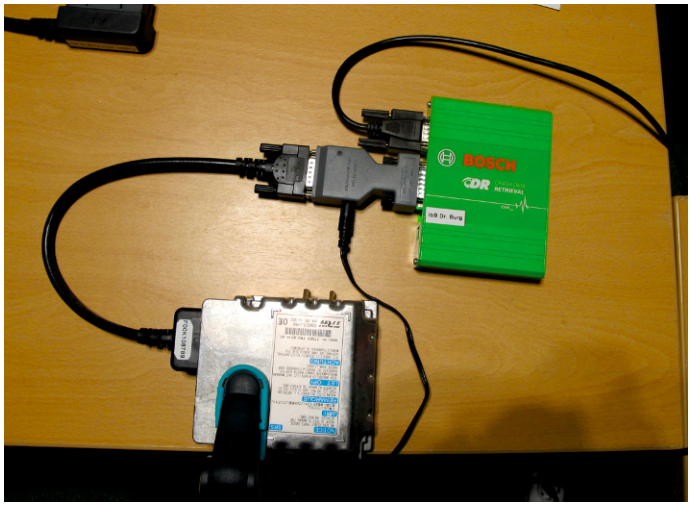


Bild C9-17 Beispiel für direkte Auslesung aus dem ACM, das ACM darf nicht bewegt werden, wenn es mit Strom versorgt wird

Es gibt auch noch zwei Methoden, das eingebaute ACM direkt mit Strom zu versorgen, wenn der Anschluss am OBD-Stecker nicht mehr funktioniert. Beide Methoden können zu Problemen führen, weshalb es besser ist, das Steuergerät auszubauen und am Schreibtisch oder an einer Werkbank auszulesen. Ein zusätzlicher Vorteil entsteht dadurch, dass man das Steuergerät an einem sicheren Platz aufbewahren kann, weil damit gleichzeitig Datensicherung und Nachvollziehbarkeit der Daten gewährleistet ist (Beweisführung durch forensische Kette).

Wenn die hier beschriebene Auslesung nicht funktioniert, dann kann der Hersteller des Steuergeräts eventuell noch helfen. Hierbei sind aber die Vorschriften über die Eigentumsrechte zu

beachten, wer da etwas falsch macht, kann schnell Probleme bekommen. Beispielsweise wird es keine gute Entscheidung sein, wenn man ein Steuergerät ohne Zustimmung der Staatsanwaltschaft an einen Hersteller schickt. Außerdem ist auf den Steuergeräten meist nur die Zeit von der Crasherkennung bis zur Airbagauslesung gespeichert (Beschleunigung über Zeit, wake up until deployment).

5 Allgemeine Hinweise

Bei der Dateninterpretation kann viel falsch gemacht werden, weil die Hersteller zwar die Vorschriften der Verordnungen (US-Regulations) einhalten, aber wie das geschieht ist total unterschiedlich. Es ist deshalb eine Hersteller- und Modell-abhängige Ausbildung erforderlich. Einige wichtige Hinweise sind:

- Bei jeder Auslesung durch CDR werden die Zähler für das Einschalten der Zündung (Ignition Cycle) und Anzahl der Auslesungen erhöht. Das ist u.a. indirekt ein Indikator für die Laufleistung des Fahrzeugs.
- Die Anzahl der Auslesungen (Ignition Cycles) kann sich erhöhen, wenn Stromversorgung für Backpowering angelegt wird.
- Kurzschluss kann zu mehreren Anläufen des Steuergeräts führen und zur Erhöhung der Ignition Counts.
- Bei manchen Steuergeräten mit externen Sensoren (Satellitensensoren) werden diese je nach Fahrzeugausstattung nicht angeschlossen und setzen Fehlercodes.
- Durch Manipulationen können die Inhalte von Steuergeräten verändert werden (erkennbar).
- Interpretationsschwierigkeiten bei komplexen Unfällen mit Mehrfachauslösungen.

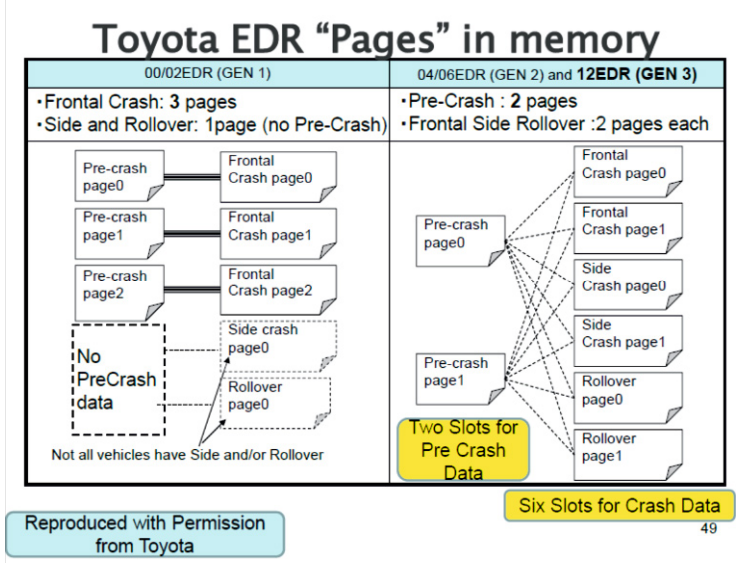


Bild C9-18 Toyota EDR Seiten im Speicher (Source: Ruth Consulting)

6 US Regulations (Verordnungen)

EDR – Part 563 Definition

Der Begriff "Ereignis-Daten-Rekorder" ist definiert als "ein Gerät oder eine Funktion in einem Fahrzeug, die unmittelbar vor einem Crash-Ereignis und/oder während eines Zusammenstoßes Zeitreihendaten erfasst (beispielsweise delta-v über der Zeit), so dass die Daten nach dem Crash-Ereignis ausgelesen werden können. Nach dieser Definition umfassen die Ereignisdaten keine Audio- und Videodaten (das ist aber in Diskussion).

EDR – Teil 563 – Mindestens-Datensatz falls mit EDR ausgerüstet (auszugsweise)

- Delta-v längs 0 bis 250 ms, alle 10ms
- Delta-v längs maximal 0-300 ms
- Angezeigte Geschwindigkeit des Fahrzeugs vor Kollision (5 sec, 2 Werte pro s)
- Motordrossel in % des Maximalwerts (5 sec, 2 Werte pro sec)
- Betriebsbremse Ein / Aus (5 sec, 2 Werte pro s)
- Zündzyklus zum Zeitpunkt der Kollision
- Zündzyklus zum Zeitpunkt des Downloads
- Sicherheitsgurt-Status für den Fahrer
- Frontal Airbag-Warnleuchte, Ein / Aus
- Frontal Airbag-Auslösung, Auslösezeit (Fahrer / Beifahrer / Zündstufen)
- Anzahl der Mehrfachauslösungen
- Zeit von "Ereignis 1" bis "Ereignis 2"
- Komplette Datei aufgezeichnet (ja / nein)

Part 563 – Table 1 *(partial list)*

TABLE I—DATA ELEMENTS REQUIRED FOR ALL VEHICLES EQUIPPED WITH AN EDR—Continued

Data element	Recording interval/time [1] (relative to time zero)	Data sample rate (samples per second)
Maximum delta-V, longitudinal	0–300 ms or 0 to End of Event Time plus 30 ms, whichever is shorter.	N/A
Time, maximum delta-V	0–300 ms or 0 to End of Event Time plus 30 ms, whichever is shorter.	N/A
Speed, vehicle indicated	−5.0 to 0 sec	2
Engine throttle, % full (or accelerator pedal, % full)	−5.0 to 0 sec	2
Service brake, on/off	−5.0 to 0 sec	2
Ignition cycle, crash	−1.0 sec	N/A
Ignition cycle, download	At time of download [3]	N/A
Safety belt status, driver	−1.0 sec	N/A
Frontal air bag warning lamp, on/off [2]	−1.0 sec	N/A
Frontal air bag deployment, time to deploy, in the case of a single stage air bag, or time to first stage deployment, in the case of a multi-stage air bag, driver.	Event	N/A
Frontal air bag deployment, time to deploy, in the case of a single stage air bag, or time to first stage deployment, in the case of a multi-stage air bag, right front passenger.	Event	N/A
Multi-event, number of event	Event	N/A
Time from event 1 to 2	As needed	N/A
Complete file recorded (yes, no)	Following other data	N/A

Bild C9-19 Daten, die nach der Part 563 Definition mindestens aufgezeichnet werden müssen

EDR – Teil 563 – Table 2 „falls aufgezeichnet“ (auszugsweise)

- Beschleunigung 0-250 ms @ 10 ms Intervalle
- Seitliches Delta-v (Seitenaufprall)
- Status Sicherheitsgurte der Insassen
- Motordrehzahl RPM
- Lenkwinkel, Rollwinkel
- ABS, ESP on / off
- Insassengröße und andere Ein- und Ausgänge von Rückhalte-Systemen

Part 563 - Table 2
“If recorded” (*partial* list)

Data element name	Condition for requirement	Recording interval/time [1] (relative to time zero)	Data sample rate (per second)
Lateral acceleration	If recorded [2]	N/A	N/A
Longitudinal acceleration	If recorded	N/A	N/A
Normal acceleration	If recorded	N/A	N/A
Delta-V, lateral	If recorded	0–250 ms or 0 to End of Event Time plus 30 ms, whichever is shorter.	100
Maximum delta-V, lateral	If recorded	0–300 ms or 0 to End of Event Time plus 30 ms, whichever is shorter.	N/A
Time maximum delta-V, lateral	If recorded	0–300 ms or 0 to End of Event Time plus 30 ms, whichever is shorter.	N/A
Time for maximum delta-V, resultant	If recorded	0–300 ms or 0 to End of Event Time plus 30 ms, whichever is shorter.	N/A
Engine rpm	If recorded	−5.0 to 0 sec	2
Vehicle roll angle	If recorded	−1.0 up to 5.0 sec [5]	10
ABS activity (engaged, non-engaged)	If recorded	−5.0 to 0 sec	2
Stability control (on, off, or engaged)	If recorded	−5.0 to 0 sec	2
Steering input	If recorded	−5.0 to 0 sec	2
Safety belt status, right front passenger (buckled, not buckled).	If recorded	−1.0 sec	N/A
Frontal air bag suppression switch status, right front passenger (on, off, or auto).	If recorded	−1.0 sec	N/A
Frontal air bag deployment, time to nth stage, driver [4].	If equipped with a driver's frontal air bag with a multi-stage inflator.	Event	N/A
Frontal air bag deployment, time to nth stage, right front passenger [4].	If equipped with a right front passenger's frontal air bag with a multi-stage inflator.	Event	N/A
Frontal air bag deployment, nth stage disposal, driver, Y/N (whether the nth	If recorded	Event	N/A

Bild C9-20 Daten, die nach der Part 563 Definition aufgezeichnet werden müssen, wenn sie im Fahrzeug vorhanden sind

EDR – Teil 563 – Table 3 Freiwillige Daten (auszugsweise)

Part 563 - Table 3
Data Element Format (*partial* list)

TABLE III—REPORTED DATA ELEMENT FORMAT

Data element	Minimum range	Accuracy [1]	Resolution
Lateral acceleration	At option of manufacturer	At option of manufacturer	At option of manufacturer.
Longitudinal acceleration	At option of manufacturer	At option of manufacturer	At option of manufacturer.
Normal Acceleration	At option of manufacturer	At option of manufacturer	At option of manufacturer.
Longitudinal delta-V	−100 km/h to + 100 km/h	+/−10%	1 km/h.
Lateral delta-V	−100 km/h to +100 km/h	+/−10%	1 km/h.
Maximum delta-V, longitudinal	−100 km/h to +100 km/h	+/−10%	1 km/h.
Maximum delta-V, lateral	−100 km/h to +100 km/h	+/−10%	1 km/h.
Time, maximum delta-V, longitudinal.	0–300 ms, or 0–End of Event Time plus 30 ms, whichever is shorter.	+/−3 ms	2.5 ms.
Time, maximum delta-V, lateral	0–300 ms, or 0—End of Event Time plus 30 ms, whichever is shorter.	+/−3 ms	2.5 ms.
Time, maximum delta-V, resultant	0–300 ms, or 0—End of Event Time plus 30 ms, whichever is shorter.	+/−3 ms	2.5 ms.
Vehicle Roll Angle	−1080 deg to +1080 deg	+/−10%	10 deg.
Speed, vehicle indicated	0 km/h to 200 km/h	+/−1 km/h	1 km/h.
Engine throttle, percent full (accelerator pedal percent full).	0 to 100%	+/−5%	1%.
Engine rpm	0 to 10,000 rpm	+/−100 rpm	100 rpm.
Service brake	On or Off	N/A	On or Off.
ABS activity	On or Off	N/A	On or Off.
Stability control	On, Off, or Engaged	N/A	On, Off, or Engaged.
Steering input	+/−100%	+/−5%	1%.
Ignition cycle, crash	0 to 60,000	+/−1 cycle	1 cycle.
Ignition cycle, download	0 to 60,000	+/−1 cycle	1 cycle.
Safety belt status, driver	On or Off	N/A	On or Off.

Bild C9-21 Daten, die nach der Part 563 Definition vom Herstelle freiwillig aufgezeichnet werden können

7 Beispiele aus Gutachten

Manchmal reicht die Auslesung der EDR-Daten mittels BOSCH CDR aus, um zu sagen, wie sich der Unfall ereignet hat.

Beispiel: Verwechslung von Brems- und Gaspedal

Mit den 5 s vor der Kollision ist dokumentiert, dass nicht gebremst, sondern Gas gegeben wurde.

Pre-Crash Data, -5 to 0 seconds (Most Recent Event, TRG 7)

Time (sec)	-4.6	-4.1	-3.6	-3.1	-2.6	-2.1	-1.6	-1.1	-0.6	-0.1	0 (TRG)
Vehicle Speed (MPH [km/h])	22.4 [36]	17.4 [28]	19.3 [31]	20.5 [33]	22.4 [36]	24.9 [40]	26.7 [43]	29.2 [47]	26.1 [42]	24.2 [39]	24.2 [39]
Accelerator Pedal, % Full (%)	100.0	62.5	100.0	98.5	100.0	10.0	100.0	100.0	2.0	4.0	52.5
Percentage of Engine Throttle	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid
Engine RPM (RPM)	3,700	3,700	3,300	3,500	3,700	3,900	3,300	4,200	3,500	2,900	2,900
Motor RPM (RPM)	2,700	2,100	2,400	2,600	2,700	3,100	3,300	3,500	3,400	2,900	3,000
Service Brake, ON/OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Brake Oil Pressure (Mpa)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Longitudinal Acceleration ,	0.144	0.000	1.005	1.364	1.795	2.441	2.225	1.795	-3.158	-2.297	-8.973
Yaw Rate (deg/sec)	56.61	35.62	35.62	26.35	12.20	8.30	1.46	21.96	35.14	38.55	40.99
Steering Input (degrees)	309	174	168	102	48	30	15	147	213	237	225
Shift Position	D	D	D	D	D	D	D	D	N	N	N
Sequential Shift Range	Undetermined	Undetermined	Undetermined	Undetermined	Undetermined	Undetermined	Undetermined	Undetermined	Undetermined	Undetermined	Undetermined
Cruise Control Status	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Drive Mode, PWR	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Drive Mode, ECO	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
Drive Mode, Sport	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Drive Mode, Snow	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Drive Mode, EV	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

Bild C9-22 Datensatz, aus dem sich unmittelbar ergibt, dass Gas- und Bremspedal verwechselt wurden. Damit ist die Unfallursache eindeutig definiert

7.1 Auffahrunfall

Falls eines der Fahrzeuge ausgelesen werden kann, dann kann bei diesem Fahrzeug die Geschwindigkeitsänderung entnommen werden; falls es das vordere Fahrzeug war, sieht man ggf. auch, ob es gestanden hat oder gefahren ist.

7.2 Komplexer Unfall

In einem solchen Fall muss man sehr genau die Daten-Begrenzungen und die Vorzeichenregelungen studieren. Auch muss eine genaue Auseinandersetzung mit den vielfältigen Daten erfolgen. Hierunter können auch die „Table 3-Daten“ fallen, beispielsweise für Fußgängererkennung. Erst im Zusammenhang mit einer konventionellen Unfallrekonstruktion kann man sicher sein, dass auch die EDR-Daten richtig bewertet wurden. Die EDR-Daten sind bei Auslesung mit dem BOSCH CDR Tool zuverlässig im Rahmen der definierten Toleranzen.

Nicht vergessen werden darf, dass in den 5 s vor der Kollision die am Tacho angezeigte Geschwindigkeit (indicated speed) angegeben wird. Da der Tacho nach den gesetzlichen Vorschriften innerhalb einer definierten Spanne vorgehen muss, kann angegeben werden, in wel-

chem Bereich sich die tatsächliche Geschwindigkeit bewegt haben kann. Dazu gibt es die folgende Vorschrift aus der Richtlinie 2000/7/EG: $0 <= (V1 - V2) <= 0{,}1 \cdot V2 + 4$ km/h, wobei V1 die angezeigte Geschwindigkeit ist und V2 die tatsächliche Geschwindigkeit.

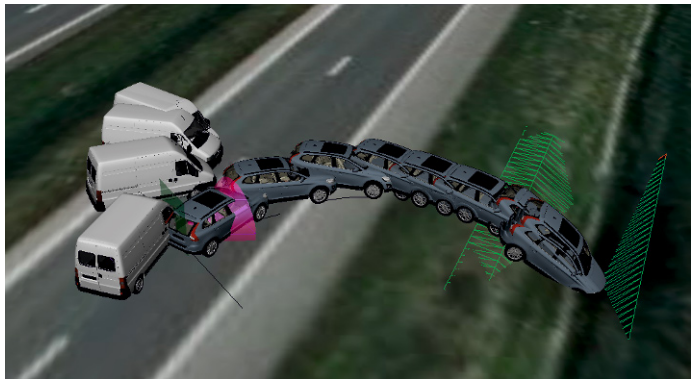


Bild C9-23 Unfallrekonstruktion unter Zuhilfenahme der EDR-Daten

8 Aus- und Weiterbildung

Von den, von BOSCH empfohlenen Trainings-Organisationen (http://www.boschdiagnostics.com/cdr/training) bieten verschiedene Aus- und Weiterbildungsstufen wie folgt an:

8.1 Operator Training

Hier wird vermittelt, wie die Datenauslesung vor Ort und ggf. kurz nach dem Unfall bei Komplikationen bei intakter Stromversorgung am besten durchgeführt werden kann. Datensicherung nach Unfällen ist primär eine Aufgabe der Polizei. Da es sich um eine neue Möglichkeit der Datensicherung zur späteren Unfallrekonstruktion handelt, kann es sein, dass die Polizei noch nicht in der Lage ist, diese Arbeit auszuführen. Es bietet sich dann an, die bereits ausgebildeten und mit den nötigen Geräten ausgerüsteten SV beizuziehen. Es handelt sich dabei um Personen, die zumindest eine 5-Tages-Grundausbildung durchlaufen haben. Die Adressen dieser Personen findet man auf https://www.ibb-engineering.org/index.php/ibb-cdr-experts:

8.2 Fünf-Tage Grundausbildung für Polizeibeamte und Sachverständige für Unfallrekonstruktion.

Es ist grundsätzlich schwierig, die Daten aus dem Event Data Recorder richtig zu interpretieren und sie in eine Unfallrekonstruktion einzubeziehen. Zusätzlich verkompliziert wird das dadurch, dass die Hersteller, wie schon erwähnt, zwar die US-Richtlinien befolgen, aber sie tun das auf sehr unterschiedliche Weise. Auch sind die Fahrzeugmodelle eines jeden Herstellers mehr oder weniger unterschiedlich. Dabei kommt es darauf an, wann die Modelle entwickelt wurden und welcher Stand der Technik zu dieser Zeit vorgelegen hat. Gerade die Elektronik und die Sensorik ist einem extrem schnellen Wandel unterzogen.



Name	Company	Postal code	City	Street
Aanerud	Ingeniorfirmaet Rekon DA	0164	Oslo	C.J.Hambros plass 5
Arnold	Forensisches Institut Zürich/Stadtpolizei Zürich	8004	Zürich	Zeughausstrasse 11
Behrens	Rickert GmbH & Co. KG	24536	Neumünster	Kieler Straße 463
Berg	Ingenieurbüro Sonntag u. Berg SSH Sachverständige für Kraftfahrzeuge	33100	Paderborn	Karl-Schurz-Str. 36
Berner	Ingenieurburo Berner GbR	16767	Leegebruch	Veltener Str. 30a
Blackwood	Transport Research Laboratory (TRL)	KY11 8UU	Dunfermline	Office 43, Pitreavie Court, Queensferry Road
Blanc	DTC Dynamic Test Center	2537	Vauffelin	Route Principale 127

Bild C9-24 Auszug aus der Liste ausgebildeter Experten (Polizei und Sachverständige)

Die Daten-Interpretation ist nur dann einigermaßen unproblematisch, wenn die 5 s vor Kollision, der Crash und der Post Crash aufgezeichnet wurden und es sich um eine „einfache“ Unfallart handelt, wie z. B. einen Auffahrunfall. Bei allen anderen Unfallarten werden gute Kenntnisse in Unfallrekonstruktion und Fahrzeugdynamik verlangt. Beispielsweise sind zu beachten:

- Wie arbeiten die Sensoren für Aktive und Passive Sicherheit?
- Welche Arten von elektronischer Datenübertragung gibt es?
- Für die Berechnung der tatsächlichen Geschwindigkeit bei Kollision braucht man Kenntnisse über die Räder: Größe, Verschleiß, Luftdruck, Beladung, Reifenschlupf bei Einsatz von ABS oder Auswirkungen von ESP bei schleuderndem Fahrzeug. Gespeichert wird nur die „Indicated Speed“, das ist die am Tacho angezeigte Geschwindigkeit, die zulässigen Abweichungen sind der entsprechenden EU-Richtlinie zu entnehmen.
- Schwierig sind Mehrfachauslösungen, überlappte Events, verborgene Events (Rollover).

CDR-Daten ersetzen in fast keinem Fall eine genaue konventionelle Spurensicherung und Unfallanalyse. Das ist die Erkenntnis der CDR-Spezialisten auf der ganzen Welt.

- Die Technik schreitet rasant voran, z. B. automatisiertes Fahren. Es kann deshalb nicht sein, dass es ohne permanente Weiterbildung gehen kann. Solche Weiterbildungen werden von den Trainings-Organisationen angeboten.

- Beispielsweise wird in Europa seit 2014 im jährlichen Abstand das „Europäische CDR User Summit“ angeboten. Dieses dient zum einen der Weiterbildung, zum anderen aber auch dazu, die Öffentlichkeit zu informieren. Die dabei entstandenen Unterlagen sind kostenlos über https://www.ibb-engineering.org/index.php/european-cdr-user-summits zugänglich.

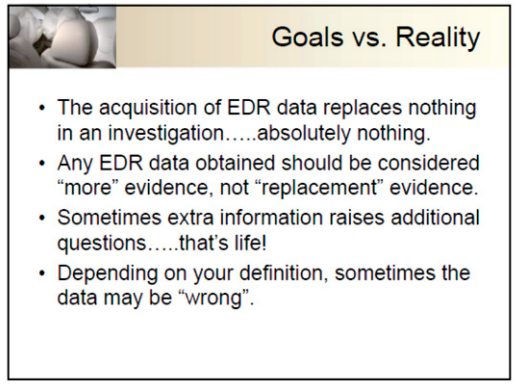


Bild C9-25 WREX Conference 2016, Orlando, Vortrag von Wesley Vandiver

9 Datenrechte/Privacy

Die Technik rund um den Event Data Recorder ist schon ziemlich kompliziert, die rechtlichen Belange sind noch deutlich komplizierter.

Es muss dabei in **Strafrecht und Zivilrecht** unterschieden werden.

Im **Strafrecht** scheint das Problem einigermaßen überschaubar zu sein. Wenn ein Unfall passiert und dieser von der Polizei aufgenommen wird, dann kann die Beschlagnahme des oder der Fahrzeuge bei der Staatsanwaltschaft beantragt werden. Wird diesem Antrag stattgegeben, dann kann das Fahrzeug untersucht und objektive Merkmale sichergestellt werden, ohne dass der Fahrer oder der Eigentümer etwas dagegen unternehmen kann. Da elektronische Daten als objektive Merkmale am oder im Fahrzeug anzusehen sind, können diese durch Auslesung sichergestellt werden. Ein gutes Beispiel dafür sind die Daten aus den elektronischen Tachographen.

Nach der ordnungsgemäßen Auslesung der Daten und Ausdruck und/oder Speicherung auf einem Datenträger werden diese Bestandteil der Ermittlungsakte. Die Daten können dann später ggf. für ein Unfallrekonstruktionsgutachten verwendet werden.

Falls keine Sicherstellung des Fahrzeugs mit Datenauslesung erfolgt, kann der Unfallbeteiligte sich selbst um die Auslesung bemühen. Welcher Weg gegangen werden muss, um die Ergebnisse der Auslesung in die Ermittlungsakte zu bekommen, ist noch unklar. Anwaltlicher Rat wird empfohlen.

Dem Sachverständigen wird geraten, den Auslesevorgang peinlich genau zu dokumentieren; auch die Randbedingungen (z. B. Bereifung, Softwarestand, Schadenumfang etc.). Ein ausgebildeter CDR-Sachverständiger sollte eine solche Arbeit übernehmen. Je nach prozessualer Situation kann es zu einem Gegengutachten kommen.

Im **Zivilprozess** können diverse Persönlichkeitsrechte einer Auslesung und Verwendung der Daten entgegenstehen.

Zunächst stellt sich die Frage, wem gehören die Daten?

Wenn jemand ein Auto kauft, dann ist er der Besitzer des Autos und Besitzer der Daten, die durch eingebaute elektronische Geräte erzeugt und gesammelt werden. Ob auf dem EDR gespeicherte Daten als persönliche Daten des Fahrers angesehen werden müssen, ist noch unklar und hängt auch von den Datenschutzgesetzten der einzelnen Länder / Staaten ab.

Wenn der Fahrer nicht der Besitzer des Fahrzeugs ist, muss geklärt werden, ob er ebenfalls ein Anrecht auf diese Daten hat. Urteile, insbesondere obergerichtliche Urteile fehlen in den meisten Ländern noch. Zu bedenken ist auch, dass die Rechtssysteme in Europa und erst recht über die Grenzen Europas hinaus sehr unterschiedlich sind.

Literatur

[1] Real World Experience with Event Data Recorders, Chidester, A. and Hinch, J. NHTSA 2001
[2] Analysis of Event Data Recorder Data for Vehicle Safety Improvement, NHTSA 2008, DOT HS 810 935
[3] Digitale Spuren in Fahrzeugen – die Zukunft ist bereits Realität. Arnold, Jörg, Forensisches Institut Zürich, Kriminalistik Heft 12, 2015
[4] Weitere umfangreiche Fachliteratur zum kostenfreien Download unter https://www.ibb-engineering.org/index.php/european-cdr-user-summits

C10 Zukünftige Methoden bei der Spurensicherung

Jörg Arnold, Marcel Braun

1 Einleitung

Bei der Aufnahme von Verkehrsunfällen werden seit Jahrzehnten photogrammetrische Methoden eingesetzt, um aus Bildern maßstäbliche Pläne herstellen zu können. Heute stehen zusätzlich die Lasertechnik zur Unfallstellenvermessung sowie 3D-Scanner und 3D-Photogrammetrie für die Unfallrekonstruktion zur Verfügung

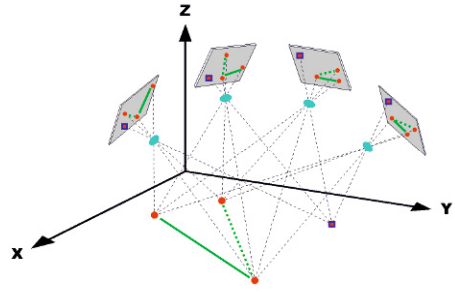
2 Geschichte und Grundlagen

Seit der Mensch begann sich schneller zu bewegen, als ihn seine Füße trugen, kam es zu Verkehrsunfällen. Für die Unfallrekonstruktion waren maßstäbliche Situationspläne immer eine der wichtigsten Grundlagen.



Photogrammetrie – Pläne aus Fotos

Das Grundprinzip der Photogrammetrie ist einfach. Von ein und demselben Objekt werden aus mehreren Richtungen und aus verschiedenen Distanzen Fotos aufgenommen. Über die Angabe von korrespondierenden Punkten und Referenzmassen können über die Strahlenbündel die Koordinaten der Objekte maßstäblich berechnet werden.

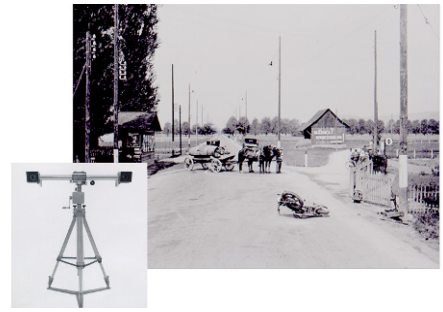


Prinzip der Mehrbildauswertung

Stereophotogrammetrie (seit 1933)

Bei der Stereokamera sind zwei kalibrierte Messkameras auf einer fixen Basis und in einem bekannten Winkel zueinander montiert.

Pro Aufnahme entsteht ein Bildpaar, dessen Bezugssystem vollständig definiert ist. Da pro Belichtung ein Bildpaar erzeugt wird, ist die Stereokamera speziell nachts sehr effizient.



© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_42

Mehrbildphotogrammetrie (RolleiMetric, Elcovision, ab 1989)

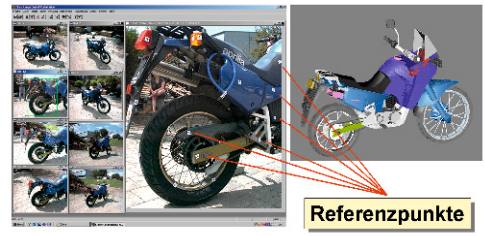
Bei der Mehrbildphotogrammetrie arbeitet man mit einer kalibrierten Messkamera (analog) oder bei den neueren Versionen mit einer normalen Digitalkamera mit kalibrierten Objektiven. In den Messaufnahmen müssen zur Kalibrierung abgemessene Referenzstrecken sichtbar sein. Durch das Bezeichnen von korrespondierenden Punkten werden die Strahlenbündel respektive die Koordinaten der Punkte berechnet.

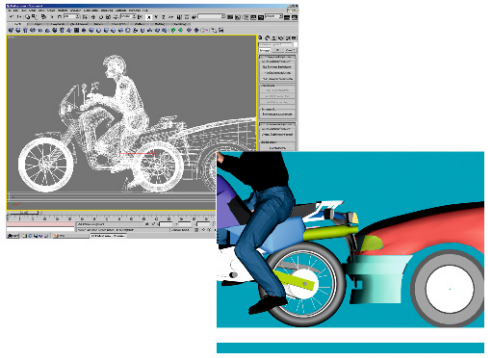


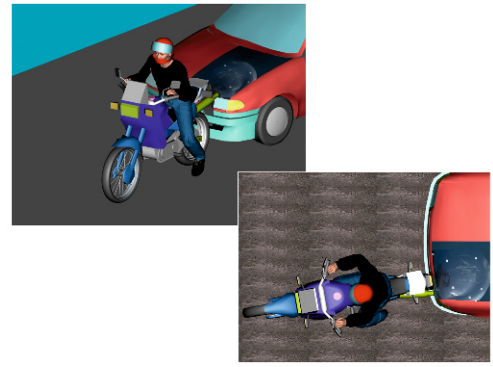
3 3D-Photogrammetrie

3D-Rekonstruktionen

Bei der photogrammetrischen Vermessung von 3D-Objekten gelangt man aufgrund der großen Datenmengen rasch an die Grenzen des Machbaren. Solange in einem Unfallereignis nur einzelne Bereiche dreidimensional vermessen werden müssen, genügt das manuelle Verfahren aber vollauf.







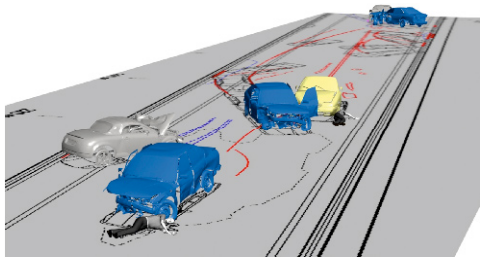
4 Neue Möglichkeiten und Bedürfnisse

Sowohl in der Kriminaltechnik wie in der Unfalltechnik sind die Anforderungen der Untersuchungsbehörden an die Rekonstruktion und an entsprechende Gutachten laufend gestiegen.

Die modernen Verfahren zur Dokumentation eines Ereignisorts helfen mit, diesen Anforderungen zu genügen.

Visualisierung der Resultate

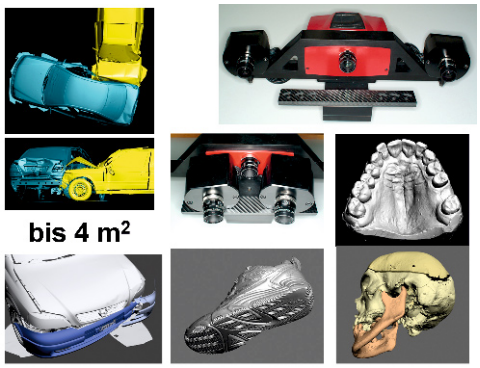
Für den Gutachter eröffnen sich neue Möglichkeiten, seine Resultate darzustellen. Die Resultate werden so für den interessierten Laien nachvollziehbar.



5 3D-Scanner-Technologien

Streifenlicht-Optometrie

Das System ATOS II von GOM erlaubt es, sowohl sehr kleine Objekte als auch ganze Fahrzeuge mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung 3D zu scannen. Dies eröffnet der Kriminaltechnik und der Unfalltechnik 3-dimensionale Objekte mit großer Präzision festzuhalten.



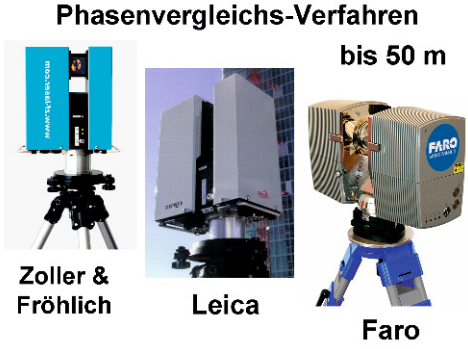
3D-LASER-Scanner (Pulslaufzeit-Verfahren)

Im Bergbau und in der Architektur respektive dem Denkmalschutz werden seit einigen Jahren 3D-LASER-Scanner mit dem Pulslaufzeit-Verfahren eingesetzt. Diese Systeme können Objekte bis zu 300 m und mehr Entfernung in einer Messung erfassen. Je nach Gerät und Auflösung dauert ein Scan bis zu 45 Minuten. Durch die hohe Reichweite können auch sehr ausgedehnte Unfallstellen einfach aufgenommen werden.



3D-LASER-Scanner (Phasenvergleichs-Verfahren)

Seit kurzem sind 3D-LASER-Scanner mit dem Phasenvergleichs-Verfahren erhältlich. Diese Systeme können Objekte bis zu 50 m und mehr Entfernung in einer Messung erfassen. Je nach Gerät und Auflösung dauert ein Scan bis zu 5 Minuten. Durch die hohe Aufnahmegeschwindigkeit und die kurze Minimalentfernung, bei der bereits gescannt werden kann, können sowohl Unfallstellen wie auch Fahrzeuge sehr rasch und einfach aufgenommen werden.



Streifenlicht-Optometrie

Das System ATOS II kann je nach gewählter Basis mit einer räumlichen Auflösung von Mikrometern bis Millimetern 3D-scannen.

3D-Photogrammetrie-System TriTop

Ein Teil des ganzen 3D-Scannersystems von GOM ist das 3D-Mehrbildphotogrammetrie-Modul Tritop, mit dem Mehrfach-Scans zusammengesetzt werden können.

3D-LASER-Scanner von ZF

Der 3D-LASER-Scanner von ZF (Phasenvergleichs- Verfahren) ist seit Anfang 2006 durch die Stadtpolizei Zürich gemietet. Bei optimalen Verhältnissen können Objekte bis zu 50 m Distanz in einer Messung erfasst werden. Wegen der hohen Aufnahmegeschwindigkeit und der kurzen Minimalentfernung, bei der bereits gescannt werden kann, setzen wir den 3D-LASER-Scanner sowohl für die Erfassung von Unfallstellen wie auch von Fahrzeugen ein.

Streifenlicht-Optometrie



ATOS II von GOM

3D-LASER-Scanner
(Phasenvergleich)

bis 50 m
360° horizontal
320° vertikal
3 bis 5 Minuten

von
Zoller & Fröhlich

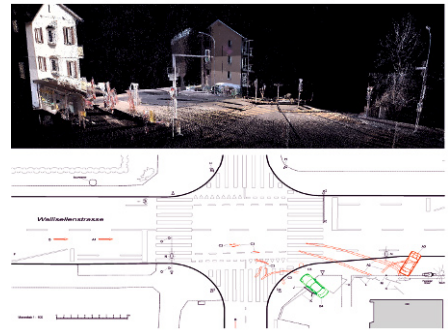


6 Anwendungsmöglichkeiten und Fallbeispiele

90° Kreuzungskollision zweier Pkws:

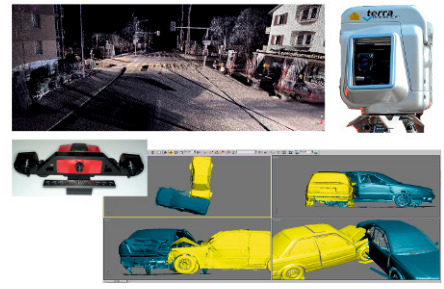
RolleiMetric und 3D-LASER-Scan

Die Unfallstelle und die Spuren respektive die Unfallendlagen der Fahrzeuge wurden in der Unfallnacht mit RolleiMetric photogrammetrisch aufgenommen. Einige Tage später wurde mit dem MENSI-Scanner (Pulslaufzeit-Verfahren) ein 3D-LASER-Scan erstellt.

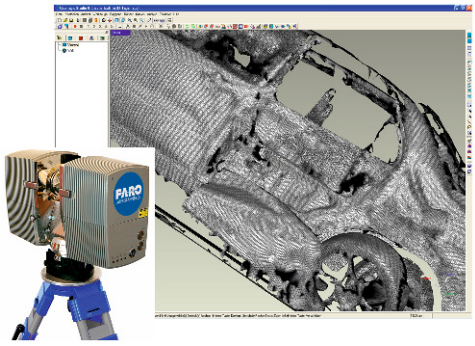


RolleiMetric und 3D-LASER-Scan und Streifenlicht-Scans

Die Schäden an den Fahrzeugen wurden einige Tage später mit dem ATOS II-Scanner (Streifenlicht-Optometrie) erfasst. All diese 3D-Daten sind maßstäblich und können nach Belieben kombiniert werden.



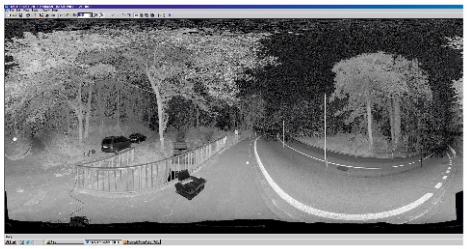
Alleinunfall eines Pkws:

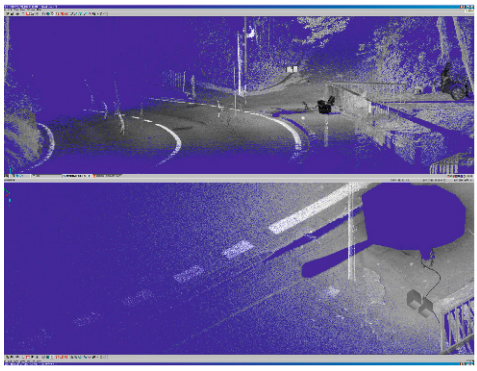


3D-LASER-Scanner von Faro

Der 3D-LASER-Scanner von Faro (Phasenvergleichs-Verfahren) wurde im Herbst 2005 durch die Stadtpolizei Zürich getestet. Bei optimalen Verhältnissen können Objekte bis zu 40 m Distanz in einer Messung erfasst werden, mit dem leistungsstärkeren LASER-Modul bis 80 m.

Die Unfallstelle wurde mit dem LASER-Scanner von Faro aufgenommen.

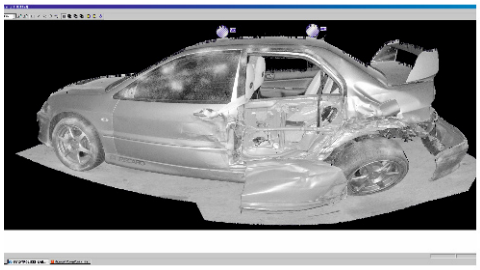




3D-Preview

Bei allen LASER-Scannern sind die 3D-Punktewolken sofort sichtbar und können sofort auf Vollständigkeit und Qualität beurteilt werden.

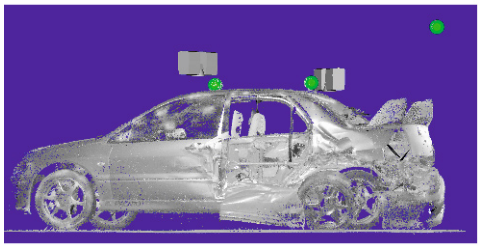
Bei einem zu scannenden Fahrzeug ist aufgrund von dessen Form sofortklar, dass es mehrer Scans braucht, um das ganze Fahrzeug zu erfassen.



Zusammensetzen von Mehrfach-Scans

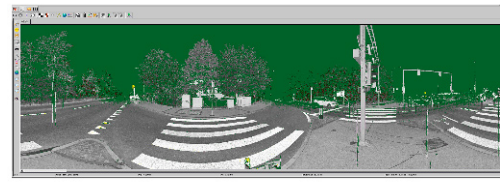
Das Zusammensetzen von Mehrfach-Scans über Targets im gescannten Raum ist einfach und problemlos möglich.

Diese Targets bilden wiederum korrespondierende Raumpunkte und dienen der räumlichen Verknüpfung der einzelnen Scans.

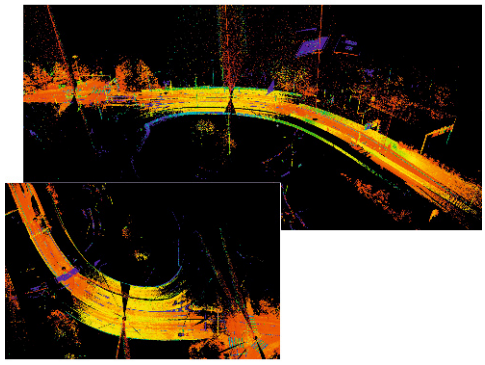


Alleinunfall eines Pkws:

Photogrammetrie:	RolleiMetric CDW
Scanner:	HDS 4500 (Zoller & Fröhlich)
CAD:	Cyclone MicroStation

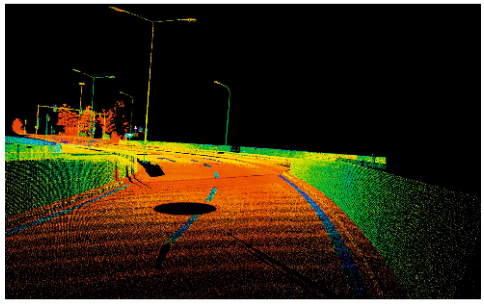




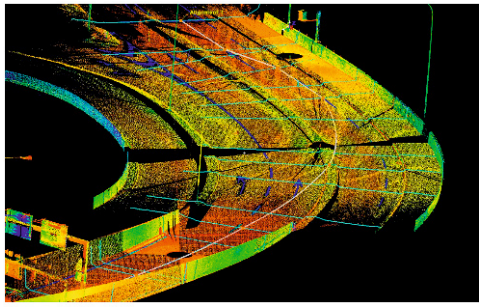


Mehrfach-Scans mit dem 3D-LASER-Scanner von ZF

Der 3D-LASER-Scanner von ZF wurde von fünf Standorten aus eingesetzt, da der ganze Unfallbereich über 150 m lang war. Wegen der hohen Aufnahmegeschwindigkeit dauerte die Erfassung der ganzen Unfallstelle weniger als eine Stunde.

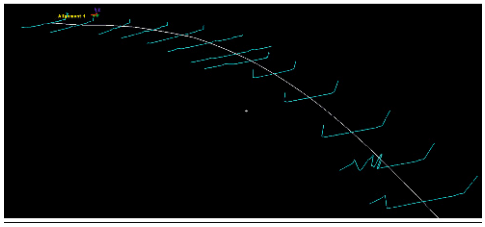


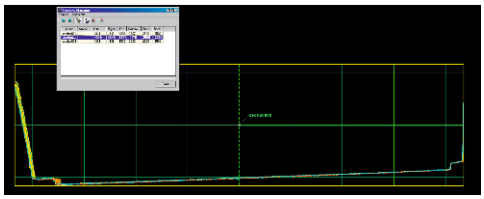
Nach dem Wegfiltern von nicht benötigten Teilen der Punktewolke im Hintergrund steht das 3D-Modell bereit für die Unfallauswertung.



Zusammensetzen von Mehrfach-Scans

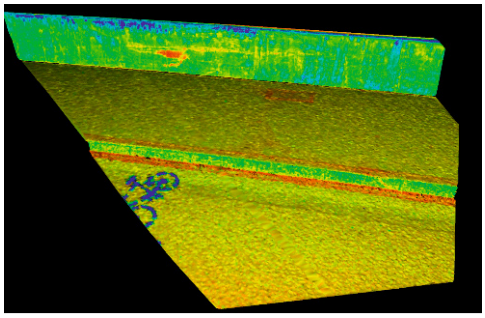
Die ganze Unfallstelle kann als ein zusammenhängendes 3D-Modell dargestellt werden, in dem sich der Betrachter an jede beliebige Stelle bewegen kann und in jede Richtung schauen kann.





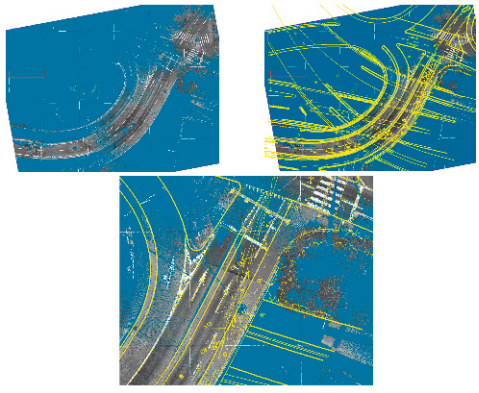
Auswerten der 3D-Daten

Durch einfaches Anklicken kann z. B. in regelmäßigen Abständen die Querneigung dargestellt werden.



Detaillierungsgrad der 3D-Daten

Die Auflösung der 3D-Daten ist sehr hoch, so können z. B. Anprallstellen oder Fahrbahnmarkierungen problemlos ausgewertet werde.



Kombination der 3D-Daten mit Katasterplänen und Unfallspuren

Da all diese 3D-Daten maßstäblich sind, können sie über korrespondierende Punkte zusammengefügt werden.

Grau: Ebenenschnitt durch die 3D-Punktewolke, Gelb: Katasterplan und Unfallspuren

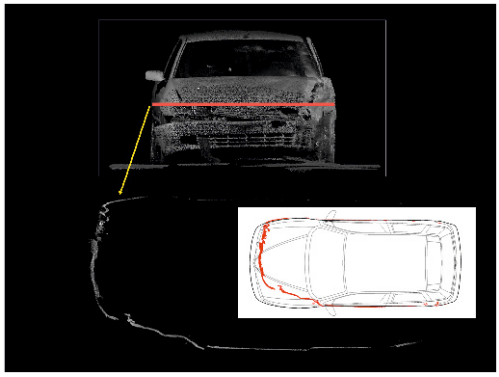
Kollision PKW/Polizeifahrzeug:

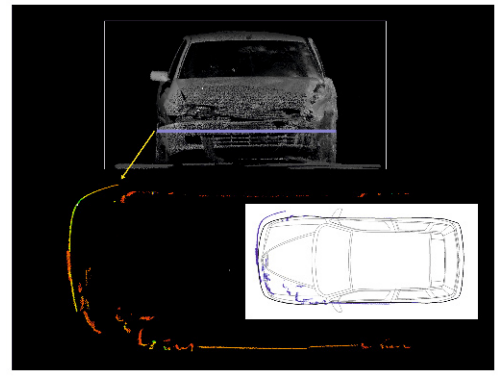
Photogrammetrie:	RolleiMetric CDW
Scanner:	HDS 4500 (Zoller & Fröhlich)
CAD:	MicroStation
	3D Studio Max



3D-Daten eines Unfallfahrzeugs

Die Detailtreue ist so hoch, dass die Formspuren innerhalb der Schadenzonen und die Schadentiefen ausgewertet werden können. Durch einfaches Definieren von Horizontalschnitten können die Konturen auf jeder beliebigen Höhe des Fahrzeugs ausgewertet werden.







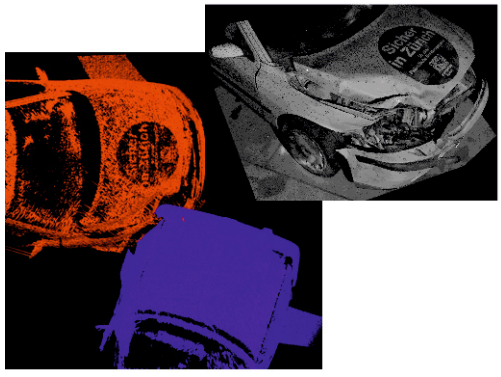


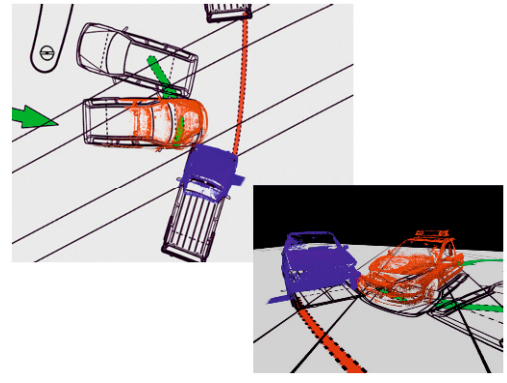
Kollision PKW/Polizeifahrzeug

Photogrammetrie:	RolleiMetric CDW
Scanner:	HDS 4500 (Zoller & Fröhlich)
CAD:	MicroStation 3D Studio Max

3D-Daten eines Polizeifahrzeugs nach einer Kollision

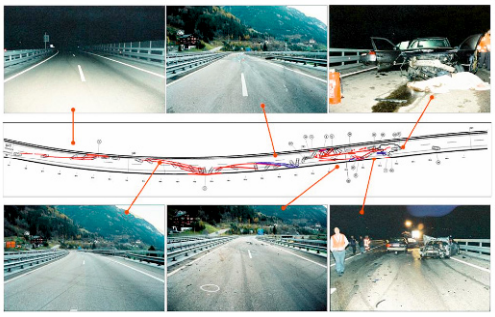
Die Formspuren innerhalb der Schadenzonen und die Schadentiefen können zur Rekonstruktion der Kollisionskonfiguration verwendet werden. Zusammen mit dem photogrammetrisch erstellten Situationsplan lässt sich der Kollisionsablauf spurenkundlich rekonstruieren.





Autobahnunfall mit 3 Fahrzeugen und 2 Fussgängern:

Photogrammetrie:	RolleiMetric CDW GOM: Tritop
Scanner:	GOM: ATOS II
CAD:	MicroStation 3D Studio Max GOM: ATOS



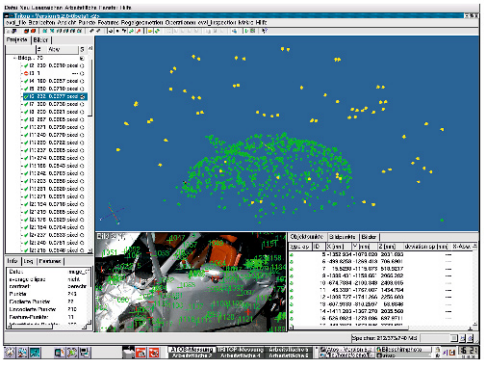
Kombinationen der verschiedenen Datensätze

Situationsplan, Unfallspuren, Fahrzeuggeometrien können kombiniert werden. Zwischenpositionen der Bewegungen lassen sich so spurenkundlich rekonstruieren. Für die genauen Kollisionskonfigurationen müssen die 3D-Datensätze der deformierten Fahrzeuge ausgewertet werden.

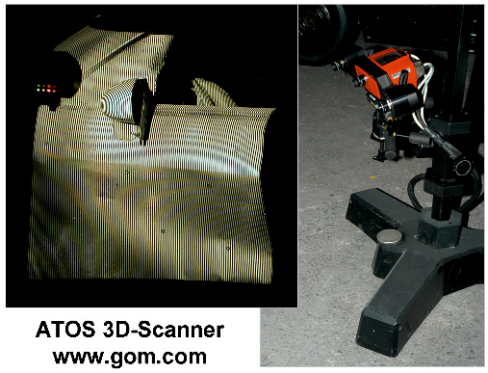


3D-Scannen der Unfallfahrzeuge und 3D-Photogrammetrie-System TriTop

In einem ersten Schritt wird über codierte Marken ein „grobes“ 3D-Modell des zu scannenden Objekts erstellt. Die codierten Marken werden über das ganze Objekt verteilt. Zusätzlich wird eine genügende Zahl von einfachen Punktmarken (Referenzpunkte) auf dem Objekt aufgeklebt. Ein ebenfalls codierter, geeichter Referenzmaßstab erlaubt die Kalibrierung des 3D-Modells.

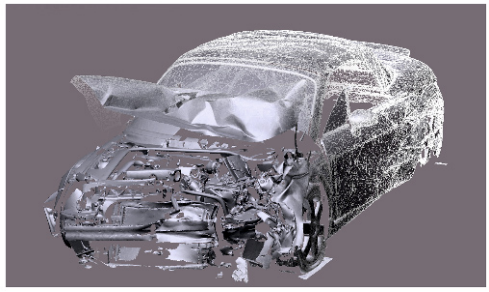


Nach dem Übertragen der Fotos in den PC und dem Starten eines Projektes werden die Koordinaten aller codierten Marken, der Referenzpunkte und die Kamerastandorte vollautomatisch berechnet. Das 3D-Modell kann jetzt bereits im virtuellen Raum gedreht und aus jeder beliebigen Richtung angeschaut werden.



Aufnehmen des Objekts mit mehreren Scans

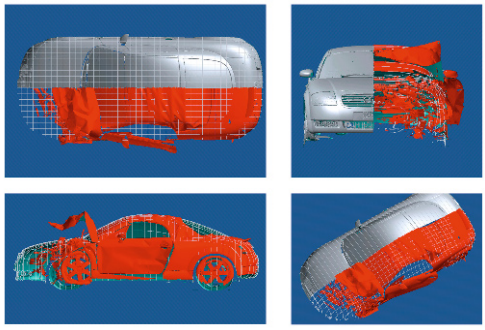
Die erfassten Scans werden über die Referenzpunkte in das „grobe“ 3D-Modell integriert. Anschließend erfolgt eine Datenreduktion, indem mehrfach erfasste Bereich der Objekt-Oberfläche zusammengefasst werden. Durch das Festlegen der räumlichen Auflösung der Punktewolke kann eine weitere Reduktion der Daten erfolgen.



3D-Punktewolke – 3D-Triangulation

Im letzten Schritt werden aus der Punktewolke durch Triangulation räumliche 3D-Daten berechnet, die sich mit jedem CAD-Programm weiter verarbeiten lassen.

Die Front des Audi ist als 3D-Punktewolke, das Heck als 3D-Dreiecksgitter (nach der Triangulation) dargestellt.



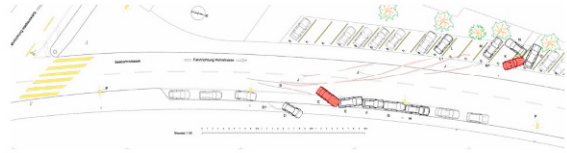
3D-Daten von Vergleichsfahrzeugen

Um die Deformationen der Fahrzeuge genau vermessen zu können, werden 3D-Daten intakter Vergleichsfahrzeuge mit den 3D-Daten der deformierten Fahrzeuge überlagert.

Mehrfachkollision nach Privatrennen

Photogrammetrie:	RolleiMetric CDW GOM: Tritop
Scanner:	GOM: ATOS II
CAD:	3D Studio Max GOM: ATOS



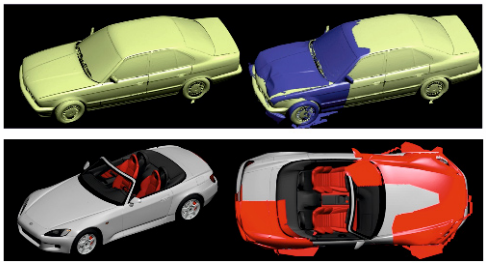


Kombinationen der verschiedenen Datensätze

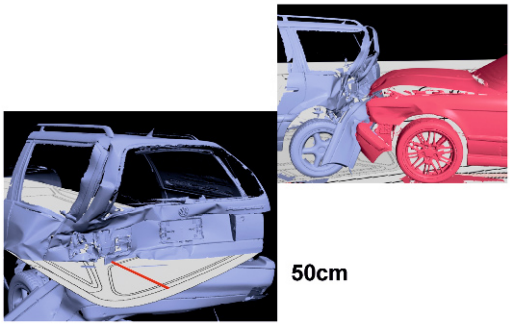
Situationsplan, Unfallspuren, Fahrzeuggeometrien können kombiniert werden. Zwischenpositionen der Bewegungen lassen sich so spurenkundlich rekonstruieren.

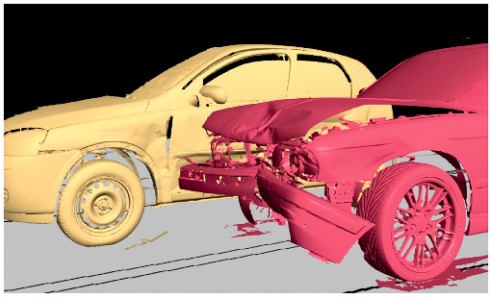
3D-Daten von Vergleichsfahrzeugen und Schadenzonen

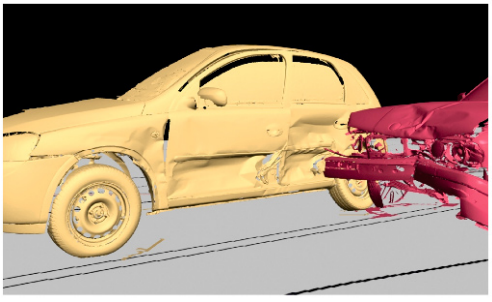
Für die genauen Kollisionskonfigurationen müssen die 3D-Datensätze der deformierten Fahrzeuge ausgewertet werden.













Formspuren und Deformationstiefen

Die 3D-Datensätze können mit Fahrzeugplänen kombiniert oder einander gegenüber gestellt werden.

Da viele Entwicklungen auf dem Gebiet der modernen Messtechnik sehr rasch erfolgen, verzichten wir auf eine klassische Literaturliste und nennen stattdessen eine Auswahl an Internet-Adressen:

Literatur/www-Adressen

[1] Unfallaufnahme-Forum: http://www.jpcity.de/Verkehrsunfallaufnahme.htm
[2] ROLLEIMETRIC: http://www.rollei.com/dt/produkte/index_metric.html
[3] ELCOVISION: http://www.elcovision.com
[4] EYEWITNESS: http://www.photometrix.com.au/products.html
[5] GOM / ATOS-Scanner: http://www.gom.com/DE/index.html
[6] Z+F 3D-LASER-Scanner: http://www.zf-laser.com/d_z_f-laserscanner.html
[7] LEICA Geosystems: http://www.leica-geosystems.com/corporate/de/ndef/lgs_5570.htm
[8] RIEGL 3D-LASER-Scanner: http://www.riegl.com
[9] TRIMBLE 3D-LASER-Scanner: http://www.trimble.com/3dlaserscanners.shtml
[10] FARO 3D-LASER-Scanner: http://www.iqvolution.com/de/Products/Laserscanners.php

C11 Biomechanische Daten

Dr. Ivan Prebil

1 Einleitung

Die Analyse von Verkehrsunfällen mit Personenbeteiligung erfordert eine umfassende Behandlung, bei der mehrere wichtige Gesichtspunkte berücksichtigt werden müssen. Bei Verkehrsunfällen beteiligte Personen sind meistens Fahrzeuginsassen, im geringeren Maße auch Fußgänger oder Benutzer anderer Verkehrsmittel.

Im Verlauf eines Verkehrsunfalls unterscheidet man mehrere Phasen: die Phase vor dem Aufprall, die eigentliche Aufprallphase sowie die Phase nach dem Aufprall. Die Analyse der Situation nach dem Aufprall und die an den Fahrzeugen entstandenen Schäden ermöglichen eine mehr oder weniger sichere Rekonstruktion des Verlaufs der Fahrdynamik und der Handhabung des Fahrzeugs vor dem Aufprall sowie der Bedingungen beim Aufprall. In der Aufprallphase ist der Körper des Fahrzeuginsassen heftigen Belastungen ausgesetzt, die zu Verletzungen führen können. Der Verletzungsumfang wird von den Anfangsbedingungen in der Aufprallphase, der relativen Bewegung der Fahrzeuginsassen hinsichtlich der Fahrzeugbewegung sowie der passiven Sicherheitsstufe der Fahrgastzelle beeinflusst. Die Verletzungen sind teilweise auch individuell bedingt, da sich individuelle Eigenschaften, wie beispielsweise der Körperbau und das Alter des Insassen, auf die Entstehung und den Umfang von Verletzungen auswirken können.

Bei Unfalluntersuchungen gelten Verletzungskriterien, die die Verbindung zwischen der Belastung der Insassen beim Aufprall und dem Verletzungsumfang mathematisch zu beschreiben versuchen. Diese Verletzungskriterien bestimmen bei bekannter Größe und Dauer der Beschleunigung oder der auf die Fahrzeuginsassen einwirkenden Kräfte den Verletzungsumfang. Die übernommenen kritischen Verletzungswerte beruhen auf experimentellen Untersuchungen.

Die Anwendung von Verletzungskriterien erfordert bekannte Daten über den Bewegungsverlauf und die Belastungen auf den Fahrzeuginsassen beim Aufprall. Da die Behandlung von Verkehrsunfällen erst post festum möglich ist, muss der Verlauf von Verkehrsunfällen aufgrund von bekannten Situationen nach dem Aufprall ermittelt werden. Eine notwendige Basis zur Beurteilung der Verletzungsmöglichkeit bei den Insassen und deren Umfang stellen Versuche mit freiwilligen Versuchspersonen oder verschiedenen Ersatzmodellen des menschlichen Körpers dar. Eine bessere Anpassung und individuelle Behandlung ermöglichen dabei computergestützte mathematische Modelle des menschlichen Körpers. Die Komplexität der modernen Analyse von Verkehrsunfällen ist ein weiteres Argument zugunsten von Computerprogrammen, die einzig und allein eine effiziente Behandlung ermöglichen.

In den anfänglichen Entwicklungsphasen von Simulationswerkzeugen wurden vor allem lebensgroße Kunststoffpuppen bzw. Dummys verwendet, da ihre Eigenschaften in der Regel gut definiert sind bzw. verhältnismäßig einfach anhand von Messungen ermittelt werden können. Der Gebrauch von Dummys als Ersatz für den menschlichen Körper bei der Entwicklung von Fahrzeugen wird heute von den Sicherheitsstandards und der europäischen Verbraucherschutzorganisation (EuroNCAP) vorgeschrieben. Anhand der Reaktionsanalyse von Dummys in kritischen Situationen, die im Verkehr entstehen können, kann eine entsprechende Anpassung

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_43

der passiven Sicherheitselemente im Fahrzeug erfolgen, sodass die Belastungen auf Dummys im Rahmen der laut Standards erlaubten Werte liegen. Der Dummy simuliert dabei einen Fahrzeuginsassen oder Fußgänger bei einem Aufprall mit einem Fahrzeug. Die Verwendung von Dummys hat in den letzten Jahren wesentlich zur Entwicklung der passiven Sicherheit im Fahrzeug beigetragen, wurden doch die meisten Sicherheitssysteme im Fahrzeug mithilfe von Dummys entwickelt [20]. Die Standards schreiben bei Frontalzusammenstößen die Verwendung des Dummy-Modells Hybrid III vor (EEC 96/79, ECE R94-01, FMVSS 208), den es in 5-, 50- und 95-perzentiler Lebensgröße gibt. Beim Seitenaufprall ist die Verwendung des Dummy-Modells EuroSID bzw. DOTSID (EEC 96/27, ECE R95-01, FMVSS 214) mit modifizierten oberen Extremitäten und Rumpf vorgeschrieben. Beim Heckaufprall wird das Dummy-Modell BioRID mit angepassten mechanischen Eigenschaften der Wirbelsäule verwendet, was eine zuverlässigere Belastungsanalyse der Halswirbelsäule ermöglicht, die beim Heckaufprall den stärksten Belastungen ausgesetzt ist. Es gibt auch verschiedene Ausführungen von Kinder-Dummys je nach Alterstufe und Dummys für Schwangere.

Computersimulationen von Versuchskollisionen haben extrem viel zur Entwicklung der passiven Sicherheit in den Fahrgastzellen beigetragen, da auf diese Weise verschiedene Aufprallszenarien schneller und kostengünstiger durchgeführt werden können, obwohl laut Standard eine physische Durchführung der Versuche erforderlich ist. Die numerischen Experimente ermöglichen auch die Untersuchung von Verhaltensweisen von Fahrzeugen und Unfallbeteiligten bei Bedingungen, die die Standards zwar nicht erfassen, jedoch in realen Verkehrssituationen auftreten können. Daher enthalten heute die meisten Softwarepakete zur Simulation der Aufpralldynamik mathematische Dummy-Modelle, die jedoch, wie schon die Dummys selbst, einige Schwächen aufweisen.

Versuchsdummys sind bei Kollisionsuntersuchungen das Grundwerkzeug zur Analyse der Dynamik des menschlichen Körpers beim Aufprall. Die Standardaufprallgeschwindigkeiten sind gewöhnlich relativ hoch, daher sind die Dummys vor allem solchen Versuchsbedingungen angepasst. Bei geringeren Geschwindigkeiten kann die Reaktion der Dummys wesentlich von der Reaktion des Fahrzeuginsassen beim Aufprall abweichen [12], [26], was wiederum bedeutet, dass die auf Dummy-Modellen basierenden Computerprogramme in einigen Fällen nur einen bedingten Gebrauchswert haben. Das Dummy-Modell ist den wiederholten Zusammenstößen bei relativ hoher Geschwindigkeit angepasst. Die Dummys berücksichtigen wegen ihrer passiven mechanischen Eigenschaften nicht den Einfluss der Muskeln auf die Reaktion des Körpers, was aber bei Zusammenstößen bei niedrigeren Geschwindigkeiten bedeutend ist, da es zu Verletzungen des Weichgewebes kommen kann. Außerdem weichen ihre geometrischen und mechanischen Eigenschaften wegen der beschränkten Konstruktionsmöglichkeiten teilweise von den Eigenschaften des menschlichen Körpers ab, sodass sich trotz verschiedener verfügbarer Größen nicht der ganze Umfang von bestehenden Lebensgrößen und Formen des menschlichen Körpers, die sich auf die Belastungen der Fahrzeuginsassen auswirken können, erfassen lässt. Das Modell des menschlichen Körpers weist im Gegensatz zum Modell des Versuchsdummys allgemein eine größere biologische Ähnlichkeit auf. So eröffnen sich ganz neue Fortschrittsmöglichkeiten auf dem Gebiet der passiven Sicherheit in Fahrzeugen sowie der besseren Anpassung von Sicherheitselementen.

Die mathematische Modellierung des menschlichen Körpers umfasst mehrere wesentliche Schritte und ist wesentlich schwieriger als das Modellieren von Dummys. So muss zuerst die Geometrie des Körpers bestimmt werden, wobei große Variationen in der Population auftreten können. Des Weiteren sind die mechanischen Eigenschaften der anatomischen Teile und Strukturen zu ermitteln sowie der Bewegungsbereich der Gelenke zu bestimmen. Das mathematische Modell muss auch durch Experimente verifiziert werden.

Eines der meistverwendeten Softwarepakete zur Simulation der Reaktion des menschlichen Körpers bei Verkehrsunfällen ist MADYMO (MAthematical DYnamical MOdeling) [30]. Es ist ein Programm zur Simulation der Dynamik von steifen oder deformierbaren Körpersystemen. Es gibt drei Möglichkeiten der Modellierung von Versuchsdummys bzw. des menschlichen Körpers sowie der Fahrgastzelle, die sich untereinander hinsichtlich der Modellierung der Geometrie der Körper und ihrer mechanischen Eigenschaften unterscheiden:

- Die geometrischen Eigenschaften der Körper sind mit Ellipsoiden, Zylindern und geraden Flächen beschrieben. Die Einwirkung von Deformationen aufgrund der Interaktion des Insassen mit der Fahrgastzelle ist mit Kontaktkräften im Abhängigkeitsverhältnis zu Kontaktcharakteristika erfasst. Diese Möglichkeit ist zum Modellieren von Starrkörpern geeignet und ist rechnerisch am effizientesten.
- Die Körperaußenfläche ist mit einem Gitter gerader Flächen beschrieben, das ein genaueres, jedoch rechnerisch schwierigeres Modellieren der Reaktion von starren und deformierbaren Körpern sowie den Kontakten untereinander ermöglicht.
- Das Modellieren der Körper mit finiten Elementen zur genaueren Simulation, deren Schwäche jedoch die große Anforderung an die Rechenleistung des Computers ist.

MADYMO enthält Modelle verschiedener Typen von Versuchsdummys und Modelle des menschlichen Körpers. Die Dummy-Modelle umfassen das gesamte Spektrum an Lebensgrößen, von Kindern bis zu Erwachsenen, ebenso ist eine Auswahl hinsichtlich der Anwendung bzw. der verschiedenen Kollisionsarten möglich. Die Modelle des menschlichen Körpers sind zur Simulation der Fahrzeuginsassen und Fußgänger gedacht und in verschiedenen Größen verfügbar (**Bild C11-1**).

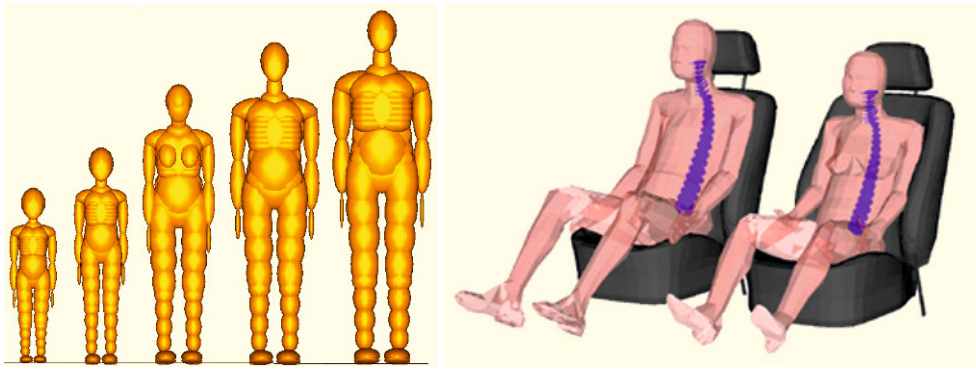


Bild C11-1 Modell des menschlichen Körpers MADYMO (links) Modell eines Fußgängers, (rechts) Modell eines Fahrzeuginsassen

Ein häufiger Ansatz zur Modellierung des menschlichen Körpers ist die kombinierte Verwendung von starren und deformierbaren Körpern, was rechnerisch am effizientesten ist, sowie der finiten Elemente, mit denen lokale Deformationen und Spannungen genauer beschrieben werden, die in einem anatomischen Teil oder Struktur auftreten und der unmittelbare Grund für das Entstehen von Verletzungen sind. Zu diesem Zweck hat MADYMO genauere Modelle der Halswirbelsäule, des Kopfes, der oberen und unteren Extremitäten ausgearbeitet, die aufgrund des Körpersystems je nach Bedarf an das Grundmodell angebracht werden können.

Außer MADYMO steht noch eine ganze Reihe von anderen Modellen des menschlichen Körpers auf der Grundlage von finiten Elementen zur Verfügung, mittels derer es möglich ist, die Dynamik und die Belastungen des Körpers bzw. des Gewebes bei einem Aufprall zu simulieren: WSU-Modell [27], THUMS-Modell [13], H-Modell [28].

2 Modellierung des menschlichen Körpers

Die Beschreibung des menschlichen Körpers muss so angepasst sein, dass sie die Computersimulation der dynamischen Reaktion des Fahrzeuginsassen beim Aufprall ermöglicht. Der Modellierungsprozess des menschlichen Körpers wird daher allgemein in zwei Schlüsselphasen unterteilt: die Formierung des mechanischen Modells sowie die mathematische Modellierung.

Das mechanische System verhält sich gemäß den Gesetzen der Mechanik. Als Folge der Einwirkung von äußeren Kräften oder Bewegungen können Bewegungen des Systems, innere Kräfte und Deformationen auftreten. Das mechanische Modell stellt die Idealisierung des realen Systems dar. Mit dem mechanischen Modell werden bestimmte Voraussetzungen übernommen, aufgrund derer wesentliche Charakteristika des realen Systems, die den größten Einfluss auf das Verhalten des Systems haben, zu beschreiben versucht, weniger einflussreiche Eigenschaften jedoch außer Acht gelassen werden. Dem gleichen mechanischen System können je nach Behandlungsaspekt mehrere mechanische Modelle zugeordnet werden. Ein wichtiger Faktor bei der Erschaffung des mechanischen Modells ist seine Komplexität. Ein komplexeres mechanisches Modell, das mehrere Charakteristika berücksichtigt, ermöglicht zwar eine genauere Analyse, trägt jedoch zur Steigerung der Schwierigkeit der mathematischen Beschreibung und der Rechenoperationen bei.

Die Folge einer ungenauen Formulierung des mechanischen Modells ist die Auswahl von unzutreffenden mathematischen Relationen zur Beschreibung des mechanischen Systems, was jedoch schon von vornherein eine Übereinstimmung der Simulationsdaten mit den gemessenen Daten über die Reaktion des Systems unmöglich macht. Ein weiterer Grund für Abweichungen zwischen den Reaktionen des Modells und des realen Systems können auch falsch bewertete Systemparameterwerte sein, die entweder aus der Fachliteratur übernommen oder auf der Grundlage von Messungen erhalten wurden. Direkte Messungen von Parameterwerten sind manchmal schwer auszuführen oder gar unmöglich. In solchen Fällen werden die Parameterwerte mit dem Vergleich zwischen verfügbaren Daten aus Experimenten und der Reaktion des Modells bestimmt. Mittels entsprechender Rechnungsmethoden kann der Unterschied zwischen der gemessenen und simulierten Reaktion des Systems minimiert werden. Der Prozess der Modellierung ist daher als umfassendes Verfahren zu betrachten, in den sowohl experimentelle als auch rechnerische Methoden mit ihren Stärken und Schwächen einbezogen sind.

Das Modellieren des menschlichen Körpers zur Simulation der dynamischen Reaktion in Aufprallbedingungen ist spezifisch. Beim Aufprall des Fahrzeugs entstehen Beschleunigungen, die sich auf den Insassen über die Fahrgastzelle, mit der der Insasse Kontakt hat, übertragen. Als Folge der Einwirkung von Belastungen kann der menschliche Körper Beschleunigungen und Deformationen ausgesetzt sein. Die Bewegungen des Insassen sind dabei stark ausgeprägt, einzelne anatomische Körperteile machen große relative Bewegungen, beschränkt durch die Gelenke, die die anatomischen Teile miteinander verbinden. Wegen dieser Charakteristika der Insassendynamik beim Aufprall wird der Körper des Insassen als ein System von Körpern, verbunden mit kinematischen Bindungen, behandelt. Der einzelne Körper im System – die Körpersegmente stellen einen entsprechend bestimmten anatomischen Körperteil dar, während die kinematischen Bindungen die Gelenkfunktion beschreiben.

Bei geringeren Deformationen können die Körpersegmente als vollkommen steife Teile behandelt werden und so eine Bewegungsanalyse auf der Grundlage der Festigkeitslehre ausgeführt werden. Die Auswirkungen auf die zu Verletzungen führenden Deformationen und Spannungsverhältnisse des einzelnen anatomischen Körperteils können unter Berücksichtigung der Deformierbarkeit der Körper oder nach der Methode der Finiten Elemente analysiert werden. Ein solcher Ansatz bei der Analyse erfordert außer größerer rechnerischer Anforderungen ein genaues Modellieren der anatomischen Teile, einschließlich des Weichgewebes. Das Modell des menschlichen Körpers wird daher oft als System von starren Körpern, die untereinander mit kinematischen Bindungen verbunden sind, definiert. Der Vorteil der Modellierung mit dem System der starren Körper ist eine Vereinfachung sowie eine geringere Rechenleistung des Computers, die zur Ausführung der Computersimulation benötigt wird.

Beim Aufprall des Fahrzeugs wirken sich auf die Bewegungen des Insassen auch konkrete Verhältnisse zwischen der Fahrgastzelle und dem Körper des Insassen aus. Hinzukommend können noch Kontakte zwischen den einzelnen anatomischen Körperteilen auftreten. Die Kontaktkräfte sind von der Geometrie der Körper und ihren mechanischen Eigenschaften abhängig. Da für diese Kontakte eine große rechnerische Leistung charakteristisch ist, zeigt sich dies in der Verlangsamung der Computersimulation. Die reale Geometrie des menschlichen Körpers ist daher oft mathematisch am einfachsten so zu beschreiben, dass die Form der einzelnen anatomischen Körperteile approximativ mit Hyperellipsoiden dargestellt ist.

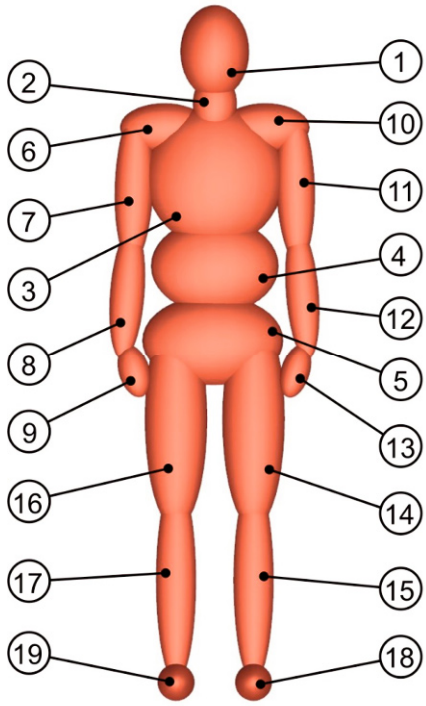
2.1 Körpersegmente

Die Diskretisierung auf Körpersegmente muss die anatomischen Charakteristika des menschlichen Körpers wiedergeben, die wesentlich auf die Bewegung bei einem Aufprall des Fahrzeugs einwirken. Als Körpersegmente werden jene anatomischen Teile des Körpers definiert, die große relative Bewegungen aufweisen und wegen ihrer Trägheit einen bedeutenden Einfluss auf die Reaktion des ganzen Körpers haben. Die Definition von Körpersegmenten schließt auch Gelenke mit ein, die bestimmte Körperteile verbinden und so beim mechanischen Modell berücksichtigt werden.

Bild C11-2 zeigt das Beispiel einer Diskretisierung des menschlichen Körpers auf 19 Körpersegmente [29]. Die Bestimmung der Charakteristika der Segmente und die Positionen der Gelenke erfordert eine klare und wiederholbare Abgrenzung zwischen den benachbarten Segmenten, daher werden bei ihrer Definition die realen anatomischen Charakteristika der Körperteile berücksichtigt.

2.1.1 Charakteristika von Körpersegmenten

Die Entwicklung des Modells des menschlichen Körpers beinhaltet unbedingt den Vergleich der gemessenen mit der simulierten Reaktion bei Aufprallbedingungen. Die individualisierte Behandlung der Dynamik des menschlichen Körpers erfordert die Berücksichtigung aller Bedingungen bei Experimenten, die auf die Reaktion Einfluss nehmen könnten. Zahlreiche Versuche an Leichen und freiwilligen Versuchspersonen zeigen, dass die Massenverteilung im Körper sich auf die Reaktion des Körpers auswirkt und damit verbunden auf die Belastungen, denen der Körper ausgesetzt ist. Einen bedeutenden Teil der Daten, die zur Modellierung des menschlichen Körpers notwendig sind, stellen daher Eigenschaft von Körpersegmenten dar: die Geometrie der einzelnen Segmente, der Massenmittelpunkt, die Trägheitsmatrix sowie die Position der Gelenke.



1	Kopf
2	Hals
3	Brustkorb
4	Bauch
5	Becken
6	rechte Schulter
7	rechter Oberarm
8	rechter Unterarm
9	rechte Hand
10	linke Schulter
11	linker Oberarm
12	linker Unterarm
13	linke Hand
14	linker Oberschenkel
15	linker Unterschenkel
16	rechter Oberschenkel
17	rechter Unterschenkel
18	linker Fuß
19	rechter Fuß

Bild C11-2 Modell des menschlichen Körpers mit 19 Körpersegmenten

2.2 Methoden zur Ermittlung der Charakteristika von Körpersegmenten

Die Methoden zur Ermittlung der Charakteristika von Körpersegmenten können in drei größere Gruppen unterteilt werden: die direkte Vermessung der Masse und der Trägheit, die auf Anthropometrie basierende Methode sowie die auf medizinischer Bildgebung basierende Methode.

2.2.1 Die Schwingungsmethode

Der Ansatz der direkten Vermessung basiert auf der Tatsache, dass mit dem Befestigen des Körpers (Segments) an ein Pendel und dem Messen der Schwingungsperiode der Massenmittelpunkt sowie die Elemente der Trägheitsmatrix bestimmt werden können. Das direkte Messen der Masse und der Trägheit jedoch erfordert die Zergliederung des Körpers, was nur bei Leichen möglich ist. Es handelt sich um eine destruktive Methode, da spätere Korrekturen oder weitere Versuche nicht mehr durchführbar sind. Die in der Fachliteratur angeführten mittels Schwingungsmethode erhaltenen Messergebnisse wurden in der Regel an einer kleinen und nicht repräsentativen Gruppe von Versuchspersonen ermittelt [3], [6], [7]. Trotzdem werden sie häufig als Quelle von Angaben über die Dichte von Körpersegmenten angeführt und stellen die Grundlage einiger Regressionsgleichungen dar [11].

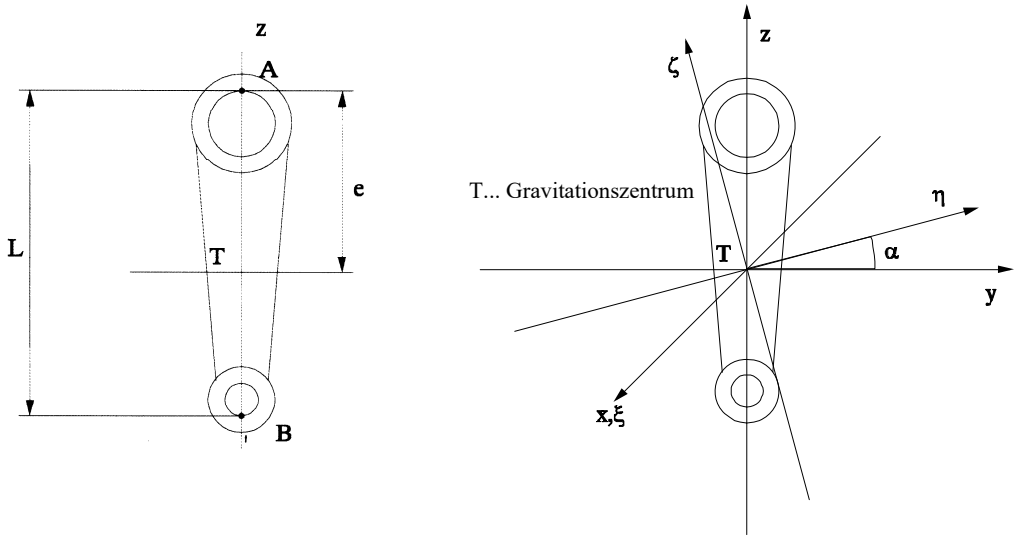


Bild C11-3 Befestigung eines Segments (links); das Koordinatensystem des Segments (rechts)

Der Trägheitstensor

$$J = \begin{pmatrix} J_\xi & -J_{\xi\eta} & -J_{\xi\zeta} \\ -J_{\eta\xi} & J_\eta & -J_{\eta\zeta} \\ -J_{\zeta\xi} & -J_{\zeta\eta} & J_\zeta \end{pmatrix} \qquad \text{(C11-1)}$$

ist eine physikalische Größe, die nicht unmittelbar gemessen werden kann. Da der Trägheitstensor symmetrisch ist, kann er mit der Hauptachse im Koordinatensystem ermittelt werden:

$$J_0 = \begin{pmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{pmatrix} \qquad \text{(C11-2)}$$

Die diagonalen Elemente sind die Hauptelemente der Trägheit des steifen Körpers. Die größte und zweitgrößte Komponente kann für jeden Körperteil aus seiner Masse sowie dem Abstand zwischen zwei Befestigungspunkten A und B, die die Oszillationsachse in der frontalen (xz) und sagittalen (yz) Ebene darstellen, berechnet werden. Die Komponenten J_x und J_y können indirekt gemessen werden, indem die Dauer der Oszillationsperiode T_A und T_B der kleinen Schwingungen für zwei verschiedene Punkte A und B in der frontalen and sagittalen Ebene gemessen wird. Für kleine Schwingungen gelten folgende Differenzialgleichungen:

$$\begin{aligned} J_A\ddot{\varphi}_A + mge\varphi_A &= 0 \\ J_B\ddot{\varphi}_B + mg\left(L-e\right)\varphi_B &= 0 \end{aligned} \qquad \text{(C11-3)}$$

Aus (C11-3) geht hervor:

$$\omega_A^2 = \frac{mge}{J_A}\ , \quad \omega_B^2 = \frac{mg\left(L-e\right)}{J_B} \qquad \text{(C11-4)}$$

wobei $\omega = 2\pi/T$ und T die Dauer für die einzelnen Perioden ist. Aus (C11-3) und (C11-4) ergibt sich:

$$J_A = \frac{T_A^2 mge}{4\pi^2} \quad , \quad J_B = \frac{T_B^2 mg(L-e)}{4\pi^2} \tag{C11-5}$$

Mit der Anwendung der Steiner-Regel für die Punkte A und B

$$J_A = J_x + me^2$$

$$J_B = J_x + m(L-e)^2$$

und der Formeln (C11-5), erhalten wir ein System von zwei Gleichungen

$$J_x + me^2 = \frac{T_A^2 mge}{4\pi^2} \quad , \quad J_x + m(L-e)^2 = \frac{T_B^2 mg(L-e)}{4\pi^2} \tag{C11-6}$$

Wenn die Zeiten T_A und T_B gemessen werden, stellt (C11-6) das System von zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten J_x (oder J_y) und e dar. Die Lösung von (C11-6) führt zu

$$e = \frac{4\pi^2 L^2 - gT_B^2 L}{8\pi^2 L - g\left(T_A^2 + T_B^2\right)} \tag{C11-7}$$

und

$$J_x = \frac{T_A^2 mge}{4\pi^2} - me^2 \tag{C11-8}$$

Bild C11-4 zeigt eine einfache Messvorrichtung. Die Vorrichtung besteht aus einem horizontalen Rahmen, an dem zwei vertikale Träger befestigt sind. An der Spitze jedes vertikalen Trägers befindet sich ein Auflager aus einer zylindrischen Stahlstange. Der zu vermessende Körperteil wird an der Edelstahlstange mit quadratischem Querschnitt angebracht, sodass seine Rotationsachse rechtwinklig zur Schwingungsebene liegt. Die Edelstahlstange mit dem daran befestigten Körperteil wird nun auf das zylindrische Auflager gelegt, sodass sie frei auf einer der Kanten liegt. Für jeden Körperteil werden die Schwingungszeiten in zwei Befestigungspunkten (proximal und distal) sowie zwei Ebenen (frontal and sagittal) gemessen. Nachdem die Edelstahlstange entfernt worden ist, wird der Körperteil gewogen, die absolute Länge sowie der Abstand zwischen beiden Befestigungspunkten in beiden Ebenen gemessen.



Bild C11-4 Messvorrichtung

Für jede Ebene und jeden Befestigungspunkt werden drei Messungen durchgeführt. Um die Schwingung zu erzielen, wird jeder Körperteil aus seiner Gravitationsposition geneigt und dann losgelassen, um frei zu schwingen. Die Amplitude wird mit dem am Ständer befestigten Goniometer und einem Zeiger, der am Träger mit dem Körperteil angebracht ist, gemessen, während die Zeitdauer der vollen Schwingungen (abhängig von der Masse und Länge des Körperteils) gemessen wird.

2.2.2 Anthropometrie und anthropometrische Datenbanken

Bei der zweiten Methodengruppe werden Körpersegmente mit einfacheren Geometriekörpern modelliert, wie beispielsweise Ellipsoide, Zylinder, Kegelstümpfe oder ihren Kombinationen, deren Masse und Trägheit einfach zu berechnen sind. Die Maße der geometrischen Modelle der Körpersegmente werden aufgrund anthropometrischer Angaben bestimmt. Die Arten der anatomischen Segmentierung unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl der erforderlichen anthropometrischen Daten und der Genauigkeit der Modellierung [25]. Einen weiten Anwendungsbereich im Bereich der Simulierung der Dynamik der Fahrzeuginsassen erzielte der Generator von Daten über Körpersegmente GEBOD [4], dessen Grundlage statistisch nachgewiesene Regressionsgleichungen darstellen.

Das Softwarepaket ATB-GEBOD besteht aus dem Modul ATB [5] zur Simulation der dynamischen Reaktion des Körpersystems sowie aus dem Modul GEBOD [4] zur Generierung von anthropometrischen Daten. Das ATB wird allgemein verwendet, obwohl sein bedeutendster Anwendungsbereich die Analyse der Reaktion des menschlichen Körpers bei dynamischen Belastungen ist. Zur Formulierung der geometrischen Eigenschaften und der Trägheit des menschlichen Körpers wird das Modul GEBOD gebraucht.

Das Modell des menschlichen Körpers wird von 17 Segmenten in Form von Ellipsoiden dargestellt, die untereinander mit sphärischen und rotatorischen kinematischen Bindungen verbunden sind. Die Segmente sind mit steifen Teilen modelliert. McConville et al. [18] und Young et al. [23] haben mit Hilfe der Stereophotogrammetrie Daten über die Körpergeometrie zahlreicher freiwilliger Versuchspersonen gesammelt. Mit der statistischen Analyse der erhaltenen Daten wurden Regressionsgleichungen für 32 Maße bestimmt, die die Dimensionen der Segmente sowie die Positionen der Gelenke, die die Segmente verbinden, angeben. Die Regressionsgleichungen sind lineare Gleichungen mit der Körpergröße und der Körpermasse als Parameter. Indirekt wird auf der Grundlage der Geometrie der Körpersegmente, unter Voraussetzung einer gleichmäßigen Dichte, die Masse, der Massenmittelpunkt sowie der Trägheitstensor der einzelnen Segmente bestimmt.

Das ATB-GEBOD-Programm wird durch das Dummy-Modell Hybrid III in 50-perzentiler Lebensgröße ergänzt und ermöglicht das Generieren der anthropometrischen Daten auch für Kindergrößen; in diesem Fall gehört neben der Körpergröße und Masse auch das Alter zu den unabhängigen Parametern der Regressionsgleichungen.

Die Datenbank der anthropometrischen Daten GEBOD wird auch bei LifeMOD verwendet und besteht in der Umgebung MSC.ADAMS™ als besonderes Modul [17]. MSC.ADAMS ist eines der meistverbreiteten Softwareprogramme zur Simulation der Dynamik von Körpersystemen. Das Grundmodell des menschlichen Körpers LifeMOD besteht aus 19 steifen, miteinander verbundenen Körpern. Das im LifeMOD eingebaute Modell unterscheidet sich vom ATB-GEBOD-Modell in zwei Zusatzsegmenten am Schultergürtel, ihre Definition ist jedoch nicht dokumentiert.

Die Schwäche des GEBOD-Modells ist, dass die Dimensionen von Körpersegmenten unabhängig voneinander berechnet werden. Die Definition der Körpersegmente ist der Bestimmungsart der geometrischen Eigenschaften und der Trägheit auf der Basis von anthropometrischen Messungen angepasst. Besonders ist dies bei Rumpfsegmenten erkennbar, die anatomisch nicht bewiesen sind. Da es mittels der Anthropometrie schwierig ist, den Schultergürtel vom Rumpf abzugrenzen, wird dieser gewöhnlich als Bestandteil des Rumpfs modelliert, obwohl seine Bewegungen recht selbstständig sind [10]. Schwachpunkte der anthropometrischen Methode sind auch die geometrische Idealisierung sowie die Nichtberücksichtigung der eigentlichen Verteilung der verschiedenen Gewebearten im Körper [22].

MADYMO verwendet für Modelle des menschlichen Körpers die neueste kommerzielle Datenbank über anthropometrische Eigenschaften RAMSIS™. Die Datenbank RAMSIS bietet eine vollständigere Beschreibung der Körpergeometrie und somit auch eine genauere Beschreibung der Kontakte zwischen dem Körpers des Insassen und der Fahrgastzelle. Der Massenmittelpunkt und der Trägheitstensor des einzelnen Körpersegments werden unter Voraussetzung einer gleichmäßigen Dichte bestimmt. Die Segmentgrößen sind untereinander nicht unabhängig, sondern werden durch drei Faktoren beeinflusst: der Körpergröße, der Fettmenge und den Körperproportionen, die die anthropometrische Datenbank bei der Bestimmung der geometrischen Eigenschaften und der Masse des menschlichen Körpers berücksichtigt.

2.2.3 Medizinische Bildgebung und Gewebesegmentierung

Die nächste größere Gruppe von Methoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Körpersegmenten nutzt verschiedene Techniken der medizinischen Bildgebung, die eigentlich zur Diagnostizierung angewandt werden: Magnetresonanztomographie (MRT), Computertomographie (CT) und Röntgenaufnahmen. MRT und CT können die Unterschiede in der Gewebedichte erkennen und so anatomische Strukturen genauer unterscheiden. Als extremen Vorteil der Bildgebungsmethode gilt es ihre Nicht-Invasivität hervorzuheben. Mit den Methoden MRT und CT lässt sich die Geometrie der Körpersegmente genauer bewerten als mit anthropometrischen Messungen [8], [19]. Dies wiederum führt zur genaueren Bewertung der Kontaktkräfte zwischen den Körpersegmenten und den Elementen in der Fahrgastzelle. Eine Einschränkung bei diesen Methoden bedeutet jedoch die Verfügbarkeit der Bildgebungsgeräte und der damit verbundene hohe Preis, die schädlichen Wirkungen der Strahlenbelastung sowie die schwierige und langwierige Bearbeitung der Aufnahmen [2].

Das Ergebnis der Bildgebung ist eine Serie von aufeinander folgenden Aufnahmen, die eine dreidimensionale Rekonstruktion der Geometrie des menschlichen Körpers ermöglichen. Die Auflösung der Aufnahmen und der Abstand zwischen den „Schnittbildern“ sind dabei abhängig vom technischen Leistungsvermögen des Geräts. Das Standardformat der Aufzeichnung der Aufnahmen ist DICOM mit getrennter Aufzeichnung der nicht komprimierten Aufnahmen und Aufnahmeparameter (Reihenfolge der Aufnahmen und Abstand zwischen den Schnittbildern).

Eine typische CT-Querschnittaufnahme des menschlichen Körpers im oberen Bauchbereich ist in **Bild C11-5** zu sehen. Die Konturen des Knochengewebes und der Hohlräume des Körpers sind klar zu erkennen, während das Weichgewebe der einzelnen Organe untereinander nicht klar abgegrenzt ist. Die Ursache dafür liegt in der Tatsache, dass das Funktionsprinzip der Computertomographie keine so genaue Segmentierung von Weichgewebe vornehmen kann wie beispielsweise die Magnetresonanztomographie (MRT). Das Weichgewebe ist bei einer Leichenaufnahme noch schwieriger zu unterscheiden, da aufgrund der Fixierung der Versuchsperson in Phenolformalinlösung, die ins Gewebe eindringt und so eine höhere Gleichmäßigkeit der Gewebedichte bewirkt, die Erkennbarkeit der Gewebeteile folglich noch erschwert wird.

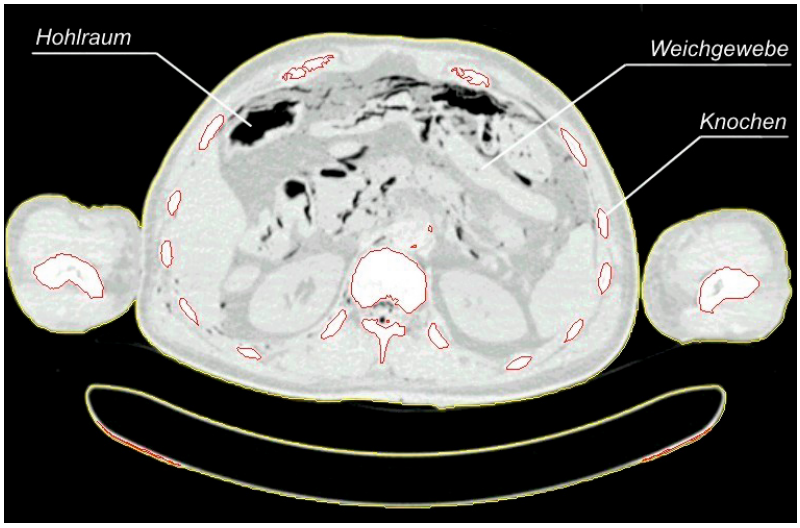


Bild C11-5 Querschnittaufnahme mit dem Computertomographen

Für die Bearbeitung der Aufnahmen stehen verschiedene kommerzielle Softwareprogramme [1] zur Verfügung, die die automatische oder manuelle Segmentierung des Gewebes und die Generierung der 3D-Flächen aufgrund von aufeinander folgenden Aufnahmen ermöglichen. Gewöhnlich stehen verschiedene Möglichkeiten der Darstellung und der Datenübertragung in CAD-Standardformaten zur Verfügung.

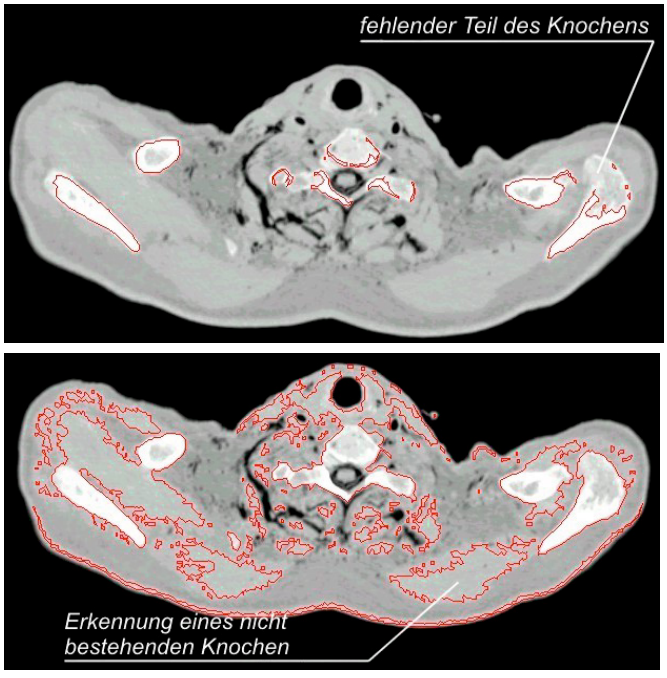


Bild C11-6 Fehler bei der Gewebesegmentierung. (Oben) Ein zu enger Erkennungsbereich des Gewebes; (unten) ein zu weiter Erkennungsbereich des Gewebes

Am Beispiel in **Bild C11-5** sind nur die Bereiche des Knochengewebes und die Hohlräume klar erkennbar, während die einzelnen Teile des Weichgewebes nicht klar abgetrennt sind. Daher kann die automatische Segmentierung auf zwei Gewebearten beschränkt werden: auf das Knochengewebe sowie das Weichgewebe, das nicht zu Knochen gehört und keine leeren Flächen in den verschiedenen Hohlräumen des Körpers bildet. Einen kritischen Schritt bei der automatischen Gewebesegmentierung stellt die Einstellung der Programmparameter dar, die dem Programm zur Erkennung der Konturen der einzelnen Gewebearten dienen. Im Falle einer ungenauen Einstellung kann das Programm einen zu engen oder zu weiten Gewebebereich erkennen (**Bild C11-6**). Ein zusätzliches Problem sind eventuelle Metallfremdkörper im Körper. Mit dem zeitaufwendigen Verfahren der manuellen Definition der Konturen der einzelnen Gewebearten ist eine zusätzliche Rekonstruktion der Geometrie der inneren Organe möglich [21].

Nach der Segmentierung des Gewebes folgt die Generierung der 3D-Fläche, die das Volumen des einzelnen Gewebes beschränkt. Die grobe Gewebegeometrie (**Bild C11-7**) kann in die kommerzielle CAD-Umgebung zur weiteren Bearbeitung übertragen werden. Das Programm erfordert folgende Vorgänge:

- Vereinigung des Knochengewebemodells und des Weichgewebemodells zum Modell des gesamten menschlichen Körpers,
- Entfernung von Teilen, die auf den Aufnahmen sichtbar sind, jedoch nicht zum menschlichen Körper gehören,
- Korrektur der Geometrie der Körpersegmente wegen der Fehler bei der automatischen Segmentierung und wegen auftretender Rauschgeräusche.

Das Ergebnis der Segmentierung des Knochen- und Weichgewebes einer auserwählten Versuchsperson zeigt **Bild C11-7**.

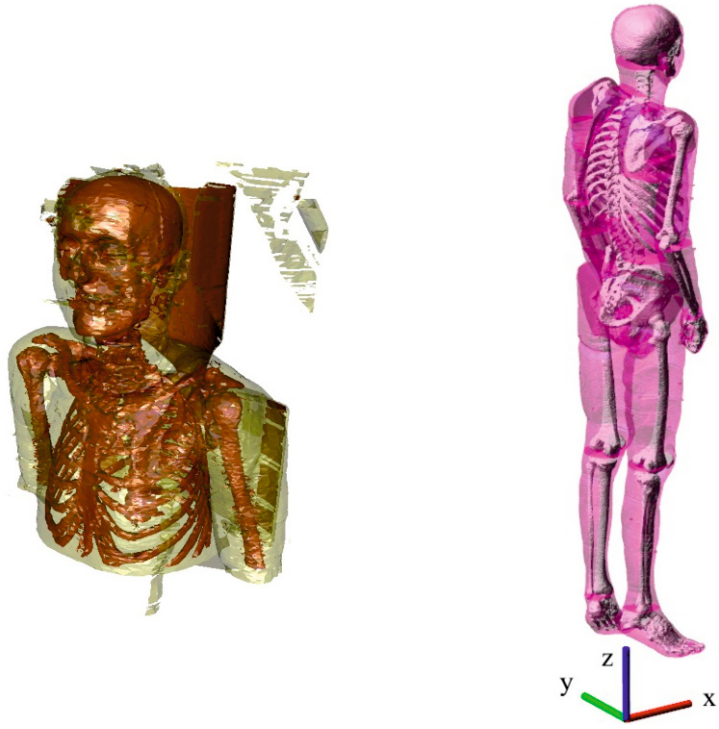


Bild C11-7 Rekonstruktion der Geometrie des menschlichen Körpers. (links) Grobe Rekonstruktion der CT-Aufnahme; (rechts) geometrisches Modell

Die anatomische Segmentierung in der CAD-Umgebung wurde gemäß der Definition der Körpersegmente durchgeführt. Die Bestimmung der Masse und der Trägheit der Körpersegmente erfordert die Darstellung des einzelnen Segments als geschlossenes Volumen in einem ununterbrochenen Polygongitter. Die Normale auf der vom Polygongitter gebildeten Ebene muss nach außen zeigen. Neue Grenzflächen zwischen den Körpersegmenten, die durch die Unterteilung des menschlichen Körpermodells entstehen, müssen an die ursprünglichen Außenflächen mit richtig orientierten Normalen angereiht werden. **Bild C11-8** zeigt die neue Grenzfläche am Berührungspunkt zwischen dem Segment des Brustkorbs, den Segmenten der linken und rechten Schulter sowie dem Hals- und Bauchsegment.

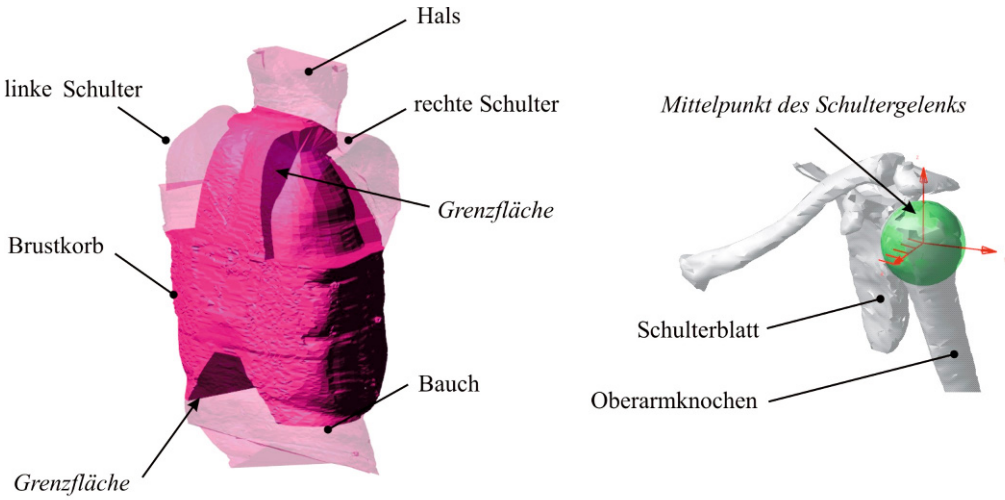


Bild C11-8 Anatomische Segmentierung (links); Grenzflächen bei der anatomischen Segmentierung (rechts) Bestimmung der Gelenkposition

Die Position der Gelenke wird in der Regel mit Hilfe von anatomischen Charakteristika beurteilt, die sich in der Umgebung der einzelnen Gelenke befinden und auf der Körperoberfläche sichtbar bzw. fühlbar sind. Hierfür gibt es in der Fachliteratur auch Empfehlungen [4], [14], [15], [16], [24].

Bei Gelenken, die die Körpersegmente an den Extremitäten verbinden (Ellbogen, Handgelenk, Knie, Sprunggelenk), sind die empfohlenen anatomischen Charakteristika leicht zu bestimmen. Bei den übrigen Gelenken, die im mechanischen Modell des menschlichen Körpers berücksichtigt werden (Kopf-Hals-Verbindung, Gelenke an der Wirbelsäule, Sternoclavicular-, Schulter- und Hüftgelenke), kann ihre Position nicht unmittelbar bestimmt werden, da eine zusätzliche Bewertung mindestens einer Koordinate noch erforderlich ist. Das geometrische Modell aufgrund der Computertomographie ermöglicht den Einblick in das Innere des Körpers und so in die Anatomie der Gelenke der Versuchsperson. Die Position der Gelenke und die Form der Gelenkflächen können daher zuverlässig aus der Rekonstruktion des Knochengewebes bestimmt werden, wie beispielsweise am Schultergelenk auf **Bild C11-8** zu erkennen.

Während der Bildaufnahme befindet sich die Versuchsperson in einer physiologischen Position, die nicht der anatomischen Standardposition entspricht [24], daher ist vor der Berechnung der Trägheit der Segmente eine Korrektur der Orientierung der Körpersegmente erforderlich.

Die Referenzposition des Körpers ist auf der **Bild C11-9** zu sehen. Die Körpersegmente am Rumpf sind so gerade gerückt, dass sich die Gelenke der Wirbelsäule und die Kopf-Hals-Verbindung in einer medianen Ebene befinden. Der Kopf zeigt nach vorne. Die Schultergelenkmittelpunkte liegen auf der gleichen lateromedialen (frontalen) Achse wie die beiden Hüftgelenkmittelpunkte. Das obere Glied ist im Ellbogengelenk und im Handgelenk durchgestreckt und hat eine medial orientierte Hand mit leicht gekrümmten Fingern. Das untere Glied befindet sich parallel zur longitudinalen Körperachse, die Füße zeigen nach vorn wie bei einer normalen Körperhaltung im Stehen.

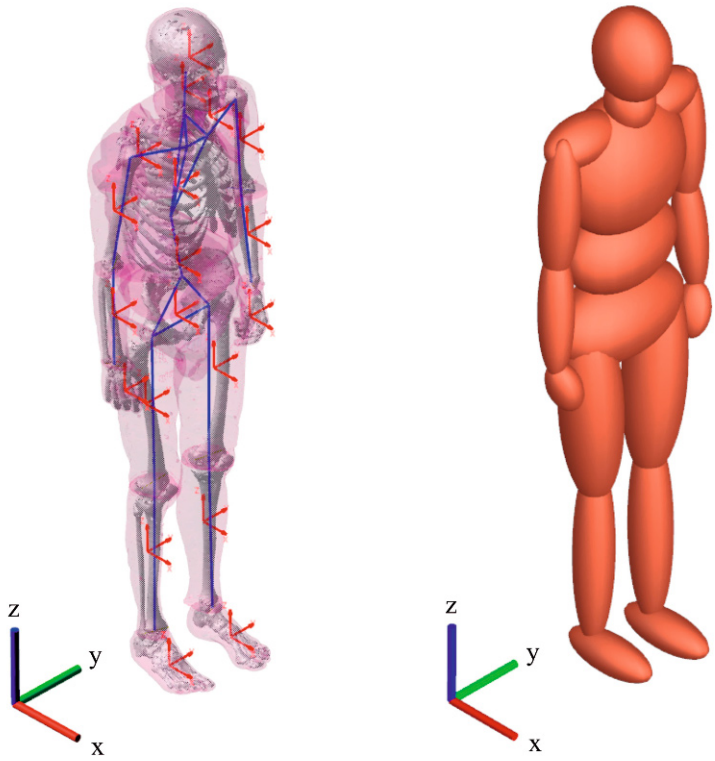


Bild C11-9 Modell des menschlichen Körpers: (links) die Versuchperson in Referenzposition; (rechts) Modell des Körpers der Versuchperson mit Kontaktellipsoiden

Unter Voraussetzung einer gleichmäßigen Dichte gemäß dem Volumen, das von den Außenflächen des einzelnen Segments begrenzt wird, ist die Durchschnittsdichte des einzelnen Segments von der Gewebeart sowie dem Gewebeanteil abhängig [7]. Die meisten kommerziellen CAD-Softwarepakete ermöglichen eine Berechnung des Volumens, der Masse und des Trägheitstensors aufgrund des geometrischen Modells des einzelnen Segments. Die berechnete Gesamtkörpermasse unterscheidet sich von der gemessenen Masse um weniger als 3 %, was auf eine gute Beurteilung der Massenverteilung im Körper hinweist [29]. Der Unterschied kann mit einem gleichmäßigen Skalieren der Masse und folglich der Dichte der einzelnen Segmente ausgeglichen werden, sodass die berechnete mit der gemessenen Körpermasse übereinstimmt.

Die reale Geometrie der Körpersegmente ist allgemein betrachtet kompliziert und kann sich bei der Entstehung von Kontakten stark auf die Reaktion des menschlichen Körpermodells auswirken [9]. Außer der Beschreibung der Außenflächen der Körpersegmente mit kleinen Flächen (engl. „facets“) werden bei Modellen des menschlichen Körpers aufgrund der Dynamik der

Körpersysteme oft Kontaktellipsoide benutzt [4], [30]. Die Kontaktellipsoide bzw. Hyperellipsoide sind fest an Körpersegmente gebunden und müssen im möglichst hohen Maße ihre Form und Dimensionen wiedergeben. Das Ellipsoid ist durch zwei Querdimensionen – einem kleineren und größeren Durchmesser des Körpersegments – und einer Längsdimension gekennzeichnet. Bei der Bestimmung der letzteren wird der Abstand zwischen den Gelenken, die die Segmente verbinden, berücksichtigt, gleichzeitig muss an den Gelenkstellen eine teilweise Überlappung der benachbarten Ellipsoide gewährleistet sein [4]. **Bild C11-9** stellt den Vergleich zwischen der tatsächlichen Geometrie der Versuchsperson und der durch Kontaktellipsoide approximativ bestimmten Geometrie dar.

Einen Fortschritt im Bereich der Individualisierung der menschlichen Körpermodelle bedeutet das Gemeinschaftsprojekt einiger europäischer Forschungsinstitutionen und Fahrzeughersteller HUMOS 1 und 2. Zu den Zielen des genannten Projekts gehört auch die Entwicklung eines Skalierungsprinzips der Geometrie von Außenflächen und inneren Organen des menschlichen Körpers. Bei zahlreichen Versuchpersonen und Leichen wurden die Koordinaten der Kontrollanatomiepunkte am Skelett bzw. an der Körperoberfläche sowie an den inneren Organen vermessen, die mit Hilfe der medizinischen Aufnahmen sichtbar waren [31]. Mit der statistischen Analyse der erhaltenen anthropometrischen Angaben wurde in Form von Regressionsgleichungen die Verbindung zwischen den Außen- und Innenmaßen des menschlichen Körpers ermittelt. Die Eingabe der Eingangsdaten (einige Außenmaße) ermöglicht so das Skalieren der restlichen Maße des menschlichen Körpers, einschließlich der Maße der inneren Organe. Damit wird die Definition des gesamten Gitters der finiten Elemente unter Berücksichtigung auftretender Variationen des menschlichen Körpers ermöglicht.

Es bleibt anzumerken, dass die verschiedenen Verfahren zur Ermittlung der Körpersegmente für den Gebrauch bei der Analyse von Verkehrunfällen in der Regel bei Erwachsenen angewandt wurden, während wesentlich weniger Angaben für Kinder und Schwangere bekannt sind. In neueren Studien wurde die Magnetresonanztomographie für die geometrische Rekonstruktion und für die Modellierung mit finiten Elementen auch bei Schwangeren angewandt [32].

2.2.4 Eigenschaften der Masse und Trägheit von Körpersegmenten

Angaben über die geschätzten Eigenschaften der Masse und Trägheit von Körpersegmenten für die Referenzposition der Versuchsperson wurden am Beispiel einer 1,70 m großen männlichen Person im Alter von 69 Jahren mit einem Körpergewicht von 69 kg gesammelt und sind in **Tabelle C11.1** dargestellt. Als Voraussetzung galt eine gleichmäßige Dichte gemäß dem Volumen, das von den Außenflächen des einzelnen Segments begrenzt wird. Die durchschnittliche Dichte des einzelnen Segments hängt von der Gewebeart sowie dem Gewebeanteil ab. Die Position des Massenmittelpunkts wird in einem festen Koordinatensystem angegeben. Gemäß dem Formalismus der Dynamik des Systems von Körpern muss im Massenmittelpunkt der Ausgangspunkt des beweglichen Koordinatensystems definiert werden, der in der Referenzposition die gleiche Orientierung wie das feste Koordinatensystem hat.

Für einen freibeweglichen Körper mit der Masse m_i und der Trägheitsmatrix J_i', auf den die resultierende Kraft F_i mit Angriffspunkt im Massenmittelpunkt und das resultierende Moment n_i' einwirken, gelten die Newton-Euler-Gleichungen

$$m_i \ddot{r}_i = F_i \qquad \text{(C11-9)}$$

$$J_i' \dot{\omega}_i' = n_i' - \tilde{\omega}_i' J_i' \omega_i' \qquad \text{(C11-10)}$$

wobei $\ddot{r}_i$ die Translationsbeschleunigung, ω_i' die Winkelgeschwindigkeit und $\dot{\omega}_i'$ die Winkelbeschleunigung darstellen.

Die Elemente der Trägheitsmatrix des einzelnen Segments sind hinsichtlich der allgemeinen Definition der Trägheitsmatrix angegeben:

$$J' \doteq -\int_m \left(\tilde{s}'^P\right)^2 dm(P) = \begin{bmatrix} J_{x'x'} & J_{x'y'} & J_{x'z'} \\ J_{x'y'} & J_{y'y'} & J_{y'z'} \\ J_{x'z'} & J_{y'z'} & J_{z'z'} \end{bmatrix} \qquad \text{(C11-11)}$$

wobei der Ausgangspunkt des beweglichen Koordinatensystems sich im Massenmittelpunkt befindet und s'^P den Ortsvektor des Punktes P am Körper darstellt.

Tabelle C11.1 Eigenschaften der Masse und Trägheit von Körpersegmenten

	Masse (in kg)	Massenmittelpunkt (in mm)			Trägheitsmatrix (in kg/m²)					
Segment		x	y	z	$J_{x'x'}$	$J_{y'y'}$	$J_{z'z'}$	$J_{x'y'}$	$J_{x'z'}$	$J_{y'z'}$
1	3,74	267,6	306,2	1.729,0	0,00910	0,01148	0,01428	0,00032	0,00076	0,00398
2	1,26	243,9	306,6	1.631,8	0,00245	0,00212	0,00276	–0,00009	–0,00005	0,00041
3	18,15	223,6	300,5	1.362,9	0,28372	0,23596	0,17556	–0,00162	–0,00059	0,01259
4	4,81	225,6	301,2	1.154,9	0,02958	0,01853	0,03298	0,00052	–0,00157	0,00286
5	6,98	219,2	300,6	1.012,7	0,05375	0,03797	0,04984	0,00098	–0,00019	0,00300
6	2,18	216,8	189,9	1.495,0	0,00684	0,01042	0,00803	–0,00036	–0,00114	–0,00034
7	2,43	229,0	100,0	1.394,7	0,02263	0,02373	0,00364	0,00003	–0,00180	0,00084
8	1,19	237,3	85,1	1.122,0	0,00560	0,00565	0,00100	0,00005	–0,00018	0,00045
9	0,54	259,6	98,3	921,5	0,00082	0,00085	0,00045	–0,00008	0,00009	0,00006
10	2,30	218,5	416,8	1.494,1	0,00691	0,01041	0,00825	0,00040	0,00093	–0,00001
11	2,35	226,7	503,6	1.393,5	0,01958	0,02020	0,00077	0,00023	0,00117	–0,00007
12	1,22	228,0	521,1	1.130,8	0,00583	0,00582	0,00102	–0,00002	0,00012	0,00033
13	0,53	253,5	501,7	927,9	0,00083	0,00091	0,00047	0,00009	–0,00009	0,00008
14	7,44	228,6	411,1	819,5	0,12550	0,12435	0,02167	–0,00032	–0,01199	–0,00096
15	2,58	204,3	396,5	398,7	0,03290	0,03299	0,00308	–0,00027	–0,00022	–0,00028
16	6,91	234,0	188,4	830,8	0,10971	0,10808	0,01956	0,00010	0,01185	0,00151
17	2,38	95,1	2,6	255,7	0,03128	0,03141	0,00263	0,00012	–0,00013	–0,00065
18	0,99	284,4	399,6	122,6	0,00103	0,00376	0,00354	–0.00004	0,00008	0,00063
19	0,93	290,6	199,1	143,2	0,00090	0,00343	0,00325	0,00003	–0,00006	0,00055

Die Masse des gesamten Körpers der Versuchperson wurde mittels Computertomographie und geometrischer Rekonstruktion auf 71,03 kg geschätzt, was die tatsächlich gemessene Masse 69,0 kg um 2,9 % übertrifft. Der Unterschied in der Masse wurde mit einem gleichmäßigen Skalieren der Masse und folglich der Dichte der einzelnen Segmente ausgeglichen, sodass die berechnete mit der gemessenen Körpermasse übereinstimmt. Aus Tabelle C11.1 geht auch eine

geringere Unsymmetrie in den Eigenschaften der Körpersegmente hervor. Dies ist eine normale Erscheinung und zeigt, wie wichtig eine genaue Ermittlung dieser Eigenschaften ist.

Literatur

[1] Able Software: 3D-Doctor for Windows, User's Manual, Able Software Corp., Lexington MA, 2003
[2] Caon, M.: Voxel-based computational models of real human anatomy: a review, Radiation and Environmental Biophysics 42, 2004, 229–235
[3] Chandler, R. F., Clauser, C. E., McConville, J. T., Reynolds H. M., Young J. W.: Investigation of inertial properties of the human body; DOT HS-801 430, WPAFB, USA, 1975
[4] Cheng, H., Obergefell, L., Rizer, A.: Generator of body data (GEBOD) manual; AL/CF-TR-1994-0051, 1998, WPAFB, USA, 1994
[5] Cheng, H., Rizer, A., Obergefell, L.: Articulated total body model version V; AFRL-HE-WP-TR-1998-0015, WPAFB, USA, 1998
[6] Clauser, C. E., McConville, J. T., Young, J. W.: Weight, volume and center of mass of segments of the human body; AMRL-TR-69-70, WPAFB, USA, 1969
[7] Dempster, W. T.: Space requirements of the seated operator; WADC technical report 55-159, WPAFB, USA, 1955
[8] Durkin, J. L., Dowling, J. J., Andrews, D. M.: The measurement of body segment inertial properties using dual energy X-ray absorptiometry, Journal of Biomechanics 35, 2002, 1575–1580
[9] Gordon, T. J., Hopkins R.: Parametric identification of multibody models for crash victim simulation, Multibody System Dynamics 1, 1997, 85–112
[10] Hatze, H.: A mathematical model for the computational determination of parameter values of anthropomorphic segments, Journal of Biomechanics 13, 1980, 833–843
[11] Hinrichs, R. N.: Regression equations to predict segmental moments of inertia from anthropometric measurements: an extension of the data of Chandler et al. (1975), Journal of Biomechanics 18 (8), 1985, 621–624
[12] HUMOS consortium: HUMOS Human Model for Safety, Project number BE96-4169, Public report, 2001
[13] Iwamoto, M., Kisanuki, Y., Watanabe, I., Furusu, K., Miki, K., Hasegava, J.: Development of finite element model of the total human model for safety (THUMS) and application to injury reconstruction, in 2002 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact, IRCOBI Secretariat, Bron, 2001
[14] Kapandji, I. A.: The Physiology of the Joints: Annotated Diagrams of the Mechanics of the Human Joints, Vol. 1, Upper Limb, 2. ed., Churchill Livingstone, Edinburgh, 1982
[15] Kapandji, I. A.: The Physiology of the Joints: Animated Diagrams of the Mechanics of the Human Joints, Vol. 2, Lower Limb, 5. ed., Churchill Livingstone, Edinburgh, 1987
[16] Kapandji, I. A.: The Physiology of the Joints: Annotated Diagrams of the Mechanics of the Human Joints, Vol. 3, The Trunk and the Vertebral Column, 2. ed., Churchill Livingstone, Edinburgh, 1974
[17] Biomechanics Research Group: LifeMOD Manual, Biomechanics Research Group, Inc., USA, 2005
[18] McConville, J. T., Clauser C. E., Churchill T. D., Cuzzi J., Kaleps I.: Anthropometric relationships of body and body segment properties; AFAMRL-TR-80-119, WPAFB, USA, 1980
[19] Norton, J., Donaldson, N., Dekker, L.: 3D whole body scanning to determine mass properties of legs, Journal of Biomechanics 35, 2002, 81–86
[20] Robin, S: HUMOS: Human model for safety – a joint effort towards the development of refined human-like car occupant models, 17. International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, NHTSA, USA, 2001, Paper 297
[21] Serre, T., Ghannouchi, S.-E., Cavallero, C.: The seated man: geometry acquisition and three-dimensional reconstruction, Surgical Radiological Anatomy 24, 2002, 382–387
[22] Wei C., Jensen R. K.: The application of segment axial density profiles to a human body inertial model, Journal of Biomechanics 28 (1), 1995, 103–108

[23] Young, J. W., Chandler, R. F., Snow, C. C., Robinette, K. M., Zehner, G. F., Lofberg, M. S.: Anthropometric nad mass distribution characteristics of the adult female; FAA-AM-83-16, Civil Aeromedical Institute, Federal Aviation Administration, USA, 1983
[24] Zatsiorsky, V. M.: Kinematics of Human Motion, Human Kinetics, Champaign IL, 1998
[25] Zatsiorsky, V. M.: Kinetics of Human Motion, Human Kinetics, Champaign IL, 2002
[26] Zhang, H., Parenteau, C. S., Katta, D., Raman, S. V.: Applications of human body model in a vehicle environment, in 9. International MADYMO User Conference, TNO, Delft, 2001
[27] Shah, C. S.: User's Manual Whole-body Human Finite Element Model, Bioengineering Center, Wayne State University, Detroit MI, 2004
[28] http://www.esi-group.com/SimulationSoftware/biomech.html, accessed on 30. sept. 2006
[29] Krašna, S., Ambrož, M., Prebil, I., Ravnik, D., Hribernik, M.: The multibody model – onfluence of model parameters on motions during simulation, in Proceedings of XIV. EVU Annual Conference, Bratislava, October 20-22, 2005
[30] MADYMO Human Models Manual, Version 6.2.1, TNO, Delft, 2004
[31] Vezin, P., Verriest, J. P.: Development of a set of numerical human models for safety. In Proceedings of The 19th. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Washington DC, June 6–9, 2005
[32] Delotte, J., Behr, M., Baque, P., Bourgeon, A., de Peretti, P., Brunet, C.: Modeling the pregnant woman in driving position, Surgical Radiological Anatomy 28, 2006, 359–363

C12 Bemerkbarkeit von Kleinkollisionen

Jürgen Gallus, Thomas Gut, Bernd Wolfer

1 Einführung

Kleinkollisionen entstehen insbesondere bei Park-, Rangier-, Passier- oder Wendevorgängen mit geringen Fahrgeschwindigkeiten wenn der Fahrer abgelenkt ist, oder wenn die Raumverhältnisse nicht ausreichend sind. Die Beschädigungen der am Unfall beteiligten Fahrzeuge werden oftmals auf den ersten Blick als geringfügig eingeschätzt, oder sind mit dem Auge auf den ersten Blick nicht erkennbar. Der Geschädigte steht nun vor der Aufgabe, den Unfallverursacher und dessen Fahrzeug zu ermitteln. Im günstigsten Fall hat ein Zeuge den Unfallhergang beobachtet und das Kennzeichen des stoßenden Fahrzeugs notiert, oder dieses Fahrzeug befindet sich noch in der danebenliegenden Parklücke. In vielen Fällen sind jedoch nur wenige oder gar keine Anknüpfungstatsachen vorhanden, die auf die Spur des Verursachers führen. Wird der Verursacher ermittelt, dann ist in der Regel zu klären, ob der Tatbestand nach § 142 StGB (Unerlaubtes Entfernen vom Unfallort) erfüllt ist.

2 Feststellen des Verursachers

Bestreitet der mutmaßliche Unfallverursacher, den Unfall verursacht zu haben, so ist neben dem Zeugenbeweis auch die technische Beweisführung durch einen Sachverständigen möglich. Hierbei wird untersucht, ob sich am Fahrzeug des mutmaßlichen Verursachers im möglichen Anstoßbereich Spuren und Beschädigungen befinden und ob die Beschädigungszonen an beiden Fahrzeugen in Übereinstimmung gebracht werden können. Dies kann durch eine Vermessung und Gegenüberstellung der Fahrzeuge erfolgen. Bei der Gegenüberstellung werden die Fahrzeuge unter Berücksichtigung der sich aus den Beschädigungsmerkmalen sowie dem Fahrbahnverlauf ergebenden Anstoßkonstellation aneinandergestellt. Hierbei werden Lage, Höhe, Struktur und Intensität der Beschädigungszonen verglichen. Stehen die am Unfall beteiligten Fahrzeuge für die Gegenüberstellung nicht mehr zur Verfügung, oder sind diese mittlerweile instandgesetzt, so kann die Fahrzeuggegenüberstellung auch mit baugleichen Fahrzeugen durchgeführt werden. Hierbei ist der tatsächliche Beladungszustand der Fahrzeuge zum Unfallzeitpunkt zu beachten. Auch die Unfallörtlichkeit, d. h. Fahrbahnoberfläche, Fahrbahnneigung usw. ist bei der Gegenüberstellung zu berücksichtigen.

Alternativ oder ergänzend kann die Zuordnung der Beschädigungsmerkmale durch eine Überlagerung der Beschädigungszonen mit dem PC erfolgen. Hierfür müssen die Fahrzeuge im Bereich der Beschädigungszonen zuvor mit Zollstöcken vermessen werden.

Oftmals können am Fahrzeug des mutmaßlichen Unfallverursachers auch Farbspuren an den Kontaktstellen vorgefunden werden, die dann mit der Farbe des geschädigten Fahrzeugs verglichen werden müssen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich der Lackaufbau meistens aus mehreren Schichten zusammensetzt. Weiße bzw. milchige Antragungen lassen nicht zwangsweise auf ein weiß lackiertes Fahrzeug schließen, sondern sind Spuren vom Klarlack des Unfallgegners.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_44

3 Möglichkeiten der Bemerkbarkeit von Kleinkollisionen

Wenn der Nachweis erbracht ist, dass die festgestellten Beschädigungen am Fahrzeug des Geschädigten durch einen Anstoß mit dem Fahrzeug des Unfallverursachers zurückzuführen sind, so ist im nächsten Schritt zu klären, ob der Anstoß vom Fahrzeuglenker bemerkt werden konnte oder nicht. Diese Frage ist insbesondere für die strafrechtliche Bewertung des Unfallhergangs von Bedeutung.

Von einem Unfall gehen optische, akustische und mechanische Signale aus, die der Mensch unter Umständen durch folgende Sinnesorgane wahrnehmen kann:

- das **Auge** (Gesichtssinn) → Optik,
- das **Ohr** (Gehörsinn) → Akustik,
- das **Gleichgewichtsorgan im Innenohr** (Gleichgewichtssinn) → Kinästhetik,
- die **Tastrezeptoren in der Haut** (Tastsinn) → taktile und haptische Wahrnehmbarkeit.

Vom Sachverständigen sind alle Möglichkeiten der Wahrnehmbarkeit für den Lenker des Verursacherfahrzeugs zu untersuchen. Hierbei sind folgende Parameter zu berücksichtigen:

- Typ des stoßenden Fahrzeugs,
- Geschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs,
- Anstoßwinkel und Fahrtrichtung,
- Schadensbild und Beschädigungsmerkmale,
- Verformungswiderstand der Kontaktzonen,
- Material der Kontaktzonen,
- Sichtverhältnisse,
- Fahrzeugmasse und Beladung,
- Geräusche in Fahrzeuginnenraum,
- Geräusche in Umgebung,
- Kollisionsgeräusch,
- Entfernung von Fahrer zu Kollisionsstelle,
- Bewegungsvorgänge der Fahrzeuge.

3.1 Optische Bemerkbarkeit

Durch das Auge kann der Mensch Form, Größe, Oberflächenbeschaffenheit, Farbe und Abstand von Gegenständen erfassen. Befindet sich die Kollisionsstelle bzw. das angestoßene Fahrzeug innerhalb des Blickwinkels des Beobachters, so ist durch das Auge eine Identifikation des Kollisionsablaufes möglich. Insbesondere trifft dies zu, wenn sich die Anstoßstelle im zentralen Sehfeld des Fahrzeuglenkers befindet. Weiter sind die Sichtverhältnisse durch die am Fahrzeug angebrachten Rück- und Außenspiegel bei einem Heckanstoß zu untersuchen und zu bewerten. Auch wenn die Anstoßstelle nicht direkt einsehbar ist, lässt sich häufig die extreme Annäherung der beiden Fahrzeuge erkennen. Kommt es durch den Anstoß zu einem „Wackeln“ des angestoßenen Fahrzeugs, so ist auch dies eine Möglichkeit für den Lenker des stoßenden Fahrzeugs, den Anstoß optisch wahrzunehmen. Es ist zu beachten, dass die Lage des Blickwinkels von der Stellung des Kopfes abhängig ist. Im Individualfall ist zu untersuchen, ob Sichtbehinderungen bestanden. Hierbei sind konstruktive Sichtbehinderungen (Spoiler, Heckrolle, Rückwandtür usw.) von temporär vorhandenen Sichtbehinderungen zu unterscheiden. Bei temporär vorhandenen Sichtbehinderungen sind fahrzeugspezifische Einflüsse (Ladung, beschlagene bzw. vereiste Scheiben usw.) von fahrerspezifischen Einflüssen (Alkohol, Drogen, Medikamente, Krankheit usw.) zu unterscheiden. Auch die Konzentrationsfähigkeit des Fah-

rers kann die optische Wahrnehmbarkeit beeinflussen. Diese medizinischen Einflüsse sind durch einen medizinischen Sachverständigen zu bewerten.

3.2 Akustische Bemerkbarkeit

Das Gehör nimmt Reize aus beliebiger Richtung auf, ohne dass die Aufmerksamkeit gezielt einer bestimmten Richtung zugewendet werden muss. Höreindrücke bei Menschen werden im Wesentlichen durch die Lautstärke, die Frequenz und die Zeitstruktur des Geräuschs bestimmt. Der Mensch ist in der Lage, bestimmte Geräuschstrukturen in seinem Gedächtnis aufzunehmen und abzuspeichern. Dadurch kann er Geräusche wiedererkennen und Ereignissen zuordnen. Bei einer Kollision entsteht, durch die in der Berührzone übertragenen Kräfte, ein Impuls. Dieser Impuls erzeugt an den beteiligten Fahrzeugteilen Schwingungen, die als Körperschall auf das gesamte Fahrzeug und auch in den Fahrzeuginnenraum übertragen werden und als Kratz-, Schabe-, Beul- oder Klirrgeräusch wahrgenommen werden können. Die Aufgabe des Sachverständigen ist es, zu untersuchen, ob sich dieses Kollisionsgeräusch von der übliche Geräuschkulisse im Fahrzeuginnenraum (Radio, Lüftungsgeräusch, Motordrehzahl, Nebenaggregate, Scheibenwischer usw.) und dem Umfeld (fließender Verkehr, Regen, Fußgänger usw.) abhebt und für den Fahrzeuglenker in seiner Sitzposition akustisch wahrnehmbar ist. Dabei spielt nicht nur die maximale Lautstärke des Geräuschs eine Rolle, sondern auch die „Geräuschmelodie“ bzw. das „Geräuschmuster“, das im hörbaren Terzspektrum liegt. So kann es durchaus sein, dass das Anstoßgeräusch nicht lauter ist, als die Umfeldgeräusche im Fahrzeug, aber trotzdem aufgrund seines abweichenden Geräuschmusters im Terzspektrums deutlich von diesen Umfeldgeräuschen zu unterscheiden ist. In dem folgend dargestellten Versuch hat sich die Lautstärke des Crash-Geräuschs kaum von den Umfeldgeräuschen unterschieden. Das Terzspektrum (Geräuschmuster) des Crash-Geräuschs (gelbe bzw. lila Linie) unterscheidet sich aber deutlich von der Situation vor bzw. nach dem Crash (blaue Linien). Vergleichbar ist diese Situation mit einem Misston in einem Orchester, der trotz nicht erhöhtem Schallpegel gegenüber dem Orchester durch seinen Missklang auffällt.

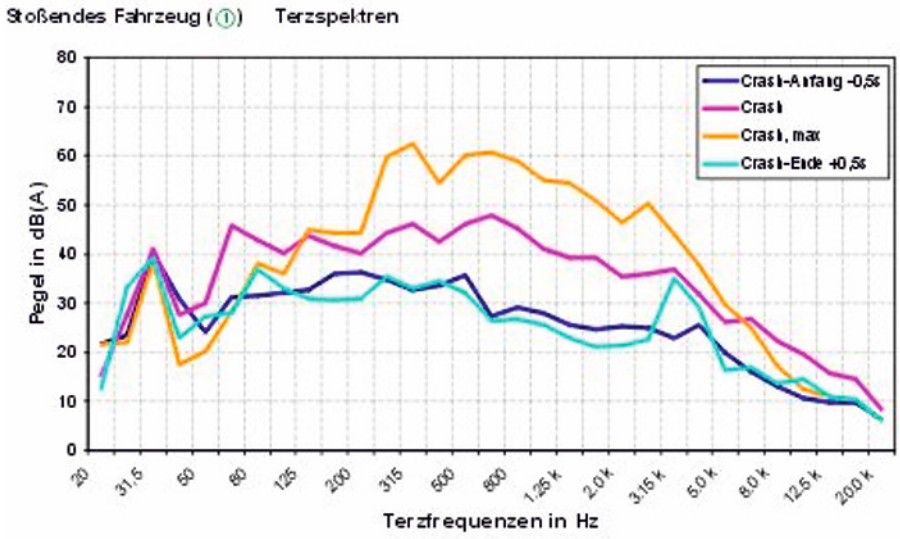


Bild C12-1 Terzspektren im stoßenden Fahrzeug

Weiterhin ist zu beachten, dass sich das von einem Zeugen wahrgenommene Kollisionsgeräusch, aufgrund des unterschiedlichen Übertragungsverhaltens des Geräuschs im Umfeld, von dem Geräusch, das in den Innenraum des stoßenden Fahrzeugs geleitet wird, unterscheidet. Hat ein Zeuge das Geräusch außerhalb des Fahrzeugs wahrgenommen, so ist nicht unbedingt sichergestellt, dass der Fahrer des stoßenden Fahrzeugs das Geräusch auch wahrnehmen konnte.

3.3 Taktile bzw. kinästhetische Bemerkbarkeit

Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen gelangen über den Sitz auf den Rücken und das Gesäß des Fahrers bzw. über das Lenkrad auf die Hände und über die Pedale an die Füße des Fahrers. Die an den Kontaktflächen auf den Körper einwirkenden Kräfte bzw. Druckänderungen werden von Rezeptoren in der Haut erfasst (taktile Bemerkbarkeit).

Das Gleichgewichtsorgan im Innenohr (Vestibulärapparat) registriert Beschleunigungen und Verzögerungen des Kopfes (kinästhetische Bemerkbarkeit).

Fährt ein Fahrzeug z. B. senkrecht auf ein stehendes Fahrzeug auf, so wird die Kollision selbst bei geringen Fahrgeschwindigkeiten für den Fahrzeuglenker kinästhetisch bemerkbar sein, da hohe Verzögerungen im Fahrzeuginnenraum entstehen. Streift der Fahrer ein Fahrzeug hingegen unter einem flachen Winkel oder erfolgt die Kollision bei einer Vorbeifahrt, so werden im Fahrzeuginnenraum nur geringe Verzögerungen wahrnehmbar sein.

Insbesondere bei spitzen Anstoßwinkeln ist darauf zu achten, welche Strukturen beim geschädigten Fahrzeug in Mitleidenschaft gezogen wurden. Handelt es sich um weiche Teile wie z. B. die Türaußenhaut, so kann die Beschädigung optisch sehr auffallend sein, ohne dass eine Bemerkbarkeit zwingend gegeben ist. Erfolgt der Anstoß im Bereich von Fahrzeugteilen mit hoher Struktursteifigkeit (Kotflügelverbreiterungen, Holme, Achsen), können schon geringe Beschädigungstiefen zu deutlichen Verzögerungsspitzen am stoßenden Fahrzeug führen. Kollisionsbedingte Schwingungen werden direkt in die Fahrzeugkarosserie eingeleitet. Schwingungen, die durch das Überfahren von Fahrbahnunebenheiten entstehen, werden hingegen über die Reifen an die Karosserie übertragen und durch das Feder/Dämpfersystem gemindert.

4 Beschädigungsmerkmale

Im Folgenden werden typische Beschädigungsmerkmale bei Kleinkollisionen aufgezeigt:



Bild C12-2 Berührung Stoßfänger beim Einparken



Bild C12-3 Berührung Fahrertür beim Ausparken



Bild C12-4 Berührung Stoßfänger beim Ausparken mit Lackübertragung

5 Verformungswiderstand

Unter dem Verformungswiderstand versteht man den Widerstand, den ein Bauteil seiner Verformung entgegensetzt. Der Verformungswiderstand der an der Kollision beteiligten Bauteile hat Einfluss auf die Bemerkbarkeitsschwelle von Kollisionsgeräuschen und Beschleunigungen. Werden bei der Kollision weiche Teile beschädigt, so treten nur geringe Beschleunigungen mit tiefen Eindringungen auf. Bei großem Verformungswiderstand kommt es hingegen zu größeren Beschleunigungen und geringeren Eindringungen, verbunden mit geringeren Kollisionsgeräuschen als bei weichen Bauteilen. Geringe Verformungswiderstände treten bei weichen und großflächigen Bauteilen (Türen, Seitenwände, Kotflügel usw.) auf. Eine Erhöhung des Verformungswiderstands erreicht man durch konstruktive Maßnahmen (Kanten, Sicken usw.) oder durch erhöhten Materialeinsatz an hochbelasteten Stellen (Erhöhung der Materialdicke an Rahmenteilen, Verwendung von Leisten usw.).

6 Kollisionsversuche

Zur Bemerkbarkeit von Kleinkollisionen wurden von verschiedenen Sachverständigen bzw. Sachverständigenorganisationen Kollisionsversuche durchgeführt. Dabei wurden folgende Erkenntnisse gewonnen.

- Mit steigender Geschwindigkeit steigen auch die kollisionsbedingten Verzögerungen und Geräusche.
- Bei kleinen Kollisionswinkeln kommt es oft zum Abgleiten. Die Verzögerungen bei Abgleitkollisionen sind in der Regel geringer, als bei Anstößen ohne Abgleiten.
- Bei Kollisionen mit Abgleiten kommt es häufig zu einem dominanten Schabe- bzw. Kratzgeräusch. Bei größeren Kollisionswinkeln kommt es eher zu einem Beulgeräusch.
- Kollisionen mit Deformation weicher Partien des Unfallgegners (z. B. Stoßfänger gegen Türblatt) sind kinästhetisch schlechter bemerkbar, als Kollisionen mit Überfahren von Sicken, Luftspalten oder Prägekanten (z. B. wenn ein Stoßfänger den Luftspalt zwischen Türblatthinterkante der Fahrertür und Türblattvorderkante der Fondtür bei einer Streifberührung überstreicht.)

- Aufgrund der Geräuschdämmung werden Frontkollisionen, bei Fahrzeugen mit Frontmotor, schlechter bemerkt als Heckkollisionen.
- Der Kofferraum wirkt als Resonanzraum, der Kollisionsgeräusche verstärkt. Bei leerem Kofferraum ist das Kollisionsgeräusch dominanter als bei beladenem Kofferraum.
- Aufgrund schlechterer Geräuschdämmung sind Kollisionsgeräusche in Kleinfahrzeugen besser bemerkbar als in Luxusfahrzeugen.
- Brechen bei einer Kollision Hartplastikteile, Scheinwerfer- oder Spiegelgläser, Blinker, Rückleuchten, dann ist in der Regel die akustische Bemerkbarkeitsschwelle überschritten.
- Kommt es zu einer Berührung der Außenrückspiegel, dann entstehen schon bei geringen Fahrgeschwindigkeiten dominante Kollisionsgeräusche, die im Innenraum des stoßenden Fahrzeugs wahrnehmbar sind. Die Tür wirkt in diesem Fall als Membran und verstärkt das Kollisionsgeräusch.
- Die äußeren Kollisionsgeräusche unterscheiden sich von denen im Fahrzeuginnenraum.
- Je kürzer die Distanz zwischen der Position des Fahrzeuglenkers und der Anstoßstelle ist, umso besser sind Fahrzeuganregungen bemerkbar.
- Kleinkollisionen sind für Lkw-Fahrer aufgrund der hohen Fahrzeugmasse, Steifigkeit und dem erhöhten Motorgeräusch nur sehr schwer wahrnehmbar.
- Beim Anstoß eines großen, steifen Fahrzeugs (z. B. Lkw) an den weichen Bereich eines Unfallgegners (z. B. Fahrzeugtür) ist die Bemerkbarkeit unwahrscheinlicher als beim Anstoß eines Pkw an einen harten Pfahl.
- Bei Überlagerung von Längs- und Querbeschleunigungen ist die Unterscheidung dieser beiden Anstoßkomponenten nicht immer sicher möglich.

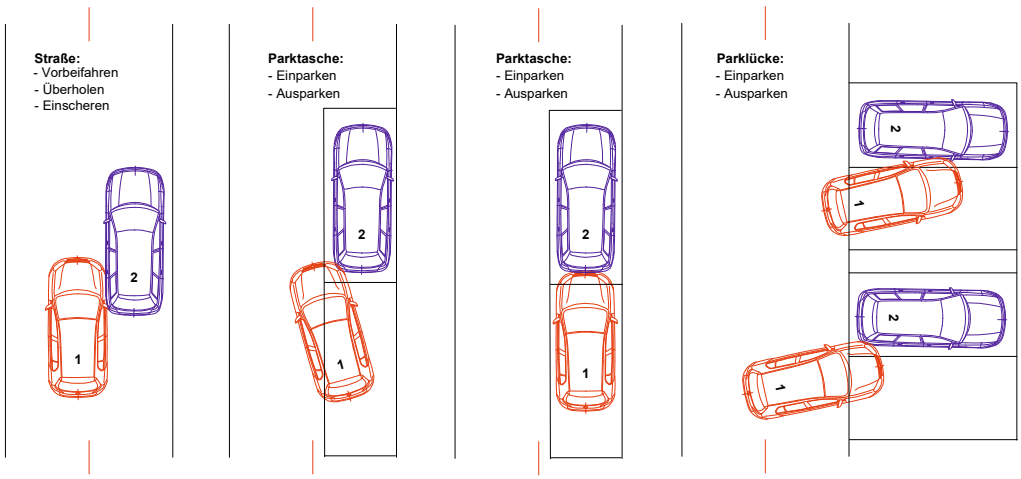


Bild C12-5 Mögliche Anstoßkonstellationen bei Kleinkollisionen

7 Zusammenfassung

Bei Kleinkollisionen in Verbindung mit dem Vorwurf des unerlaubten Entfernens von der Unfallstelle, hat der Sachverständige zu beurteilen, ob die Kollision für den Unfallverursacher wahrnehmbar war oder nicht. Von einem Unfall gehen optische, akustische und mechanische Signale aus, die der Mensch unter Umständen durch seine Sinnesorgane (Auge, Ohr, Tastsinn, Gleichgewichtsorgan) wahrnehmen kann. Im Individualfall sind unter Berücksichtigung von Anstoßkonstellation, Sichtverhältnissen, Geschwindigkeit, Verformungswiderstand sowie der örtlichen Gegebenheiten vom Sachverständigen alle Möglichkeiten der Wahrnehmbarkeit für den Unfallverursacher zu untersuchen und zu beurteilen.

Literatur

[1] Buhrmann, B.: Diplomarbeit: Bemerkbarkeit von Kleinkollisionen, 1992
[2] Burg, H.: Rekonstruktion von Verkehrsunfällen, Kapitel A4.8
[3] Wolff, H.: Möglichkeiten und Grenzen der Wahrnehmbarkeit leichter Pkw-Kollisionen, 1992
[4] Hugemann, B.: Wahrnehmbarkeit Kleinkollisionen (Bericht in www.unfallrekonstuktion.de)
[5] Welther, I.: Wahrnehmbarkeit leichter Fahrzeugkollisionen, Schweizer Verlag München, 1982
[6] Müller-Limmrot, W.: Die physiologischen Grundlagen für die Wahrnehmbarkeit leichter Fahrzeugkollisionen

C13 Dunkelheitsunfälle

Teil 1: Sichtbarkeit aus lichttechnischer Sicht, der Dunkelheitsunfall, Rekonstruktion durch Berechnung

Dr. Ulrich Carraro

1 Abgrenzung, Zielstellung

Die visuellen Aufgaben beim Führen eines Kfz lassen sich wie folgt einteilen ([1] zitiert nach [2]):

- visuelle Aufmerksamkeit,
- visuelles Wahrnehmen (Detektion),
- visuelles Erkennen (Diskrimination),
- Treffen der Entscheidung,
- visuell gerichtete Reaktion.

Visuelles Wahrnehmen (Detektion) bedeutet, der Beobachter wird gewahr, dass etwas vorhanden ist, ohne es genau identifizieren zu können, visuelles Erkennen (Diskrimination bedeutet, der Beobachter kann das Objekte identifizieren.

Detektion und Diskrimination sind nur möglich, wenn das Objekt nicht geometrisch verdeckt ist.

In diesem Kapitel wird die Frage des visuellen Erkennens (Diskrimination), vereinfacht auch als „Sichtbarkeit“ oder „sichtbar“ bezeichnet, behandelt.

2 Lichttechnische Größen

Die lichttechnischen Größen ergeben sich aus den entsprechenden strahlungsphysikalischen Größen durch deren Bewertung mit der relativen spektralen Hellempfindung des menschlichen Auges, der $V(\lambda)$-Kurve für das helladaptierte (hellangepasste) Auge eines 2°-Beobachters [1] (**Bild C13-1**). Allgemein gilt

$$X = K_m \cdot \int_0^\infty X_e \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \qquad \text{(C13-1)}$$

mit

X_e	strahlungsphysikalische Größe
X	lichttechnische Größe
K_m	fotometrisches Strahlungsäquivalent, K_m = 683 lm/W

1 Unter einem 2°-Beobachter versteht man einen Beobachter, dessen Gesichtsfeld 2° umfasst.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_45

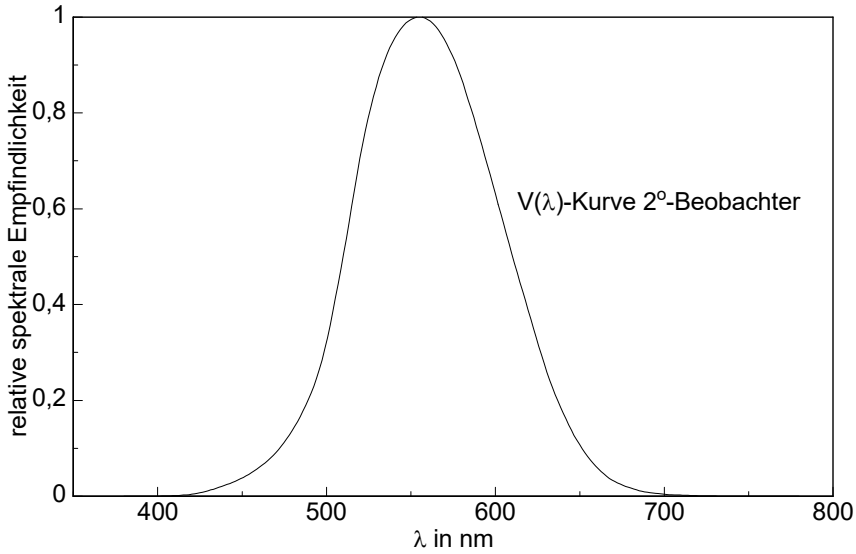


Bild C13-1 Relative spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges

Wichtige lichttechnische Größen für die Berechnung der Sichtbarkeit und die Bearbeitung von Dunkelheitsunfällen sind:

Lichttechnische Größe	Formelzeichen	Einheit	Abkürzung
Lichtstrom	Φ	Lumen	lm
Beleuchtungsstärke	E	Lux	lx
Lichtstärke	I	Candela	cd
Leuchtdichte	L	ohne	cd/m^2
Raumwinkel	Ω	Steradiant	sr oder Ω_0

2.1 Raumwinkel

Keine lichttechnische Größe, räumliches Analogon zum ebenen Winkel

Formelzeichen: Ω
Einheit: Steradiant (sr)

Für 1 sr wird häufig Ω_0 geschrieben.

Der Raumwinkel Ω unter dem ein Gegenstand von einem Bezugspunkt P aus erscheint, ist das Verhältnis des Flächeninhaltes der Zentralprojektion des Gegenstands auf die Oberfläche einer Kugel, deren Mittelpunkt der Bezugspunkt ist, zum Quadrat des Kugelradius R. **Bild C13-2** stellt das schematisch dar.

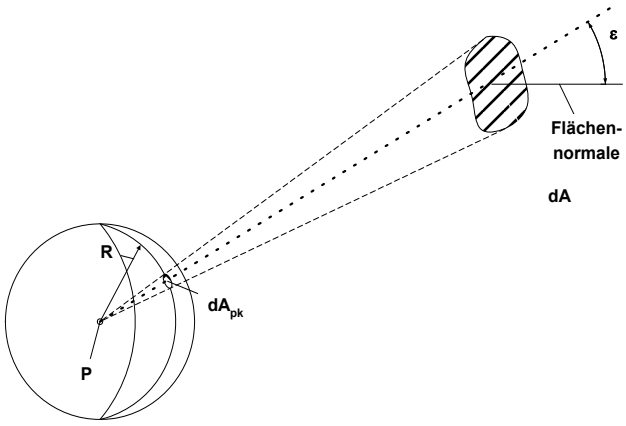


Bild C13-2 Definition des Raumwinkels

2.2 Lichtstrom Φ

Formelzeichen: Φ
Einheit: Lumen (lm)

Der Lichtstrom einer Lichtquelle drückt aus, wie viel „Licht, Lichtleistung“ insgesamt abgegeben wird. Es spielt keine Rolle, in welche Richtung des Raums die Aussendung erfolgt.

2.3 Beleuchtungsstärke E

Formelzeichen: E
Einheit: Lux (lx)

Die Beleuchtungsstärke ist der Quotient aus Lichtstrom Φ und bestrahlter Fläche A.

$$E = \frac{d\,\Phi}{d\,A} \qquad \text{(C13-2)}$$

2.4 Lichtstärke I

Formelzeichen: **I**
Einheit: Candela (cd)

Die Lichtstärke ist der Quotient aus Lichtstrom Φ und Raumwinkel Ω.

$$I = \frac{d\,\Phi}{d\,\Omega} \qquad \text{(C13-3)}$$

Die Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle in einer gegebenen Richtung, die eine monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 W/sr beträgt [3].

2.5 Leuchtdichte L

Formelzeichen: L
Einheit: ohne eigene Einheit, wird in cd/m^2 angegeben.

$$L = \frac{d\Phi}{d\Omega \cdot dA} \qquad \text{(C13-4)}$$

Die Leuchtdichte stellt den Lichtstromanteil $d\Phi$ in einer bestimmten Richtung dar, bezogen auf den erfassten Raumwinkel $d\Omega$ und auf das senkrecht durchstrahlte Flächenelement dA (**Bild C13-3**).

Die Leuchtdichte ist die für den Helligkeitseindruck maßgebende Größe.

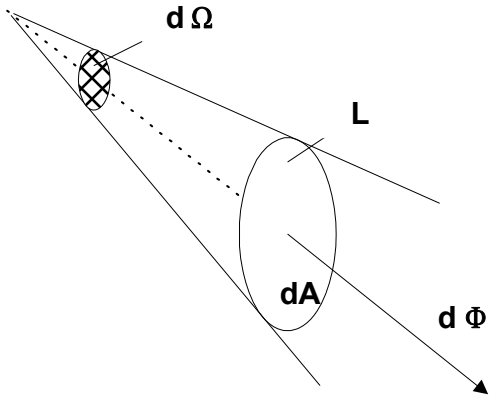


Bild C13-3 Leuchtdichtedefinition

3 Wahrnehmungsphysiologische Grundlagen, Wahrnehmungsmodell

Für den Sehvorgang sind zwei Arten von lichtempfindlichen Rezeptoren auf der Netzhaut des menschlichen Auges wichtig: Stäbchen und Zapfen.

Stäbchen

Die Stäbchen sind farbunempfindlich und bewirken das Schwarz-Weiß-Sehen (Graustufen).

Zapfen

Die Empfindlichkeit der Zapfen ist wellenlängenabhängig, sie bewirken das Farbensehen.

Die Stäbchen sind wesentlich empfindlicher als die Zapfen, deshalb bestimmen bei niedrigen Helligkeiten die Stäbchen den Helligkeitseindruck, das Farbensehen ist wegen der geringen Zapfenempfindlichkeit eingeschränkt bis gar nicht möglich.

Nach [4] wird folgende Helligkeitseinteilung verwendet:

skotopisches Sehen	$L < 0{,}001$ cd/m^2	(Zapfen-Sehen)
mesopisches Sehen	$0{,}001$ cd/m$^2 \le L \le 3$ cd/m^2	(Übergangsbereich, Zapfen- und Stäbchen-Sehen)
photopisches Sehen	3 cd/m$^2 < L$	(Stäbchen-Sehen)

Der Helligkeitsbereich, in dem sich der Dunkelheitsunfall meist ereignet, liegt im Bereich $L < 3$ cd/m^2 (sehr gut beleuchtete innerstädtische Verkehrsstraßen werden mit Leuchtdichten ca. 2 cd/m^2 beleuchtet). Der Leuchtdichtebereich bei künstlicher Beleuchtung liegt im mesopi-

schen Bereich, also in dem Bereich, in dem der Übergang vom Zapfen-Sehen zum Stäbchen-Sehen erfolgt.

Damit ein Objekt sichtbar ist, müssen mehrere Bedingungen erfüllt sein:

- Das wahrzunehmende Objekt muss eine Mindestleuchtdichte haben.
- Das wahrzunehmende Objekt muss einen Mindestkontrast bzw. Mindestleuchtdichte-Unterschied zur Umgebung haben.
- Das Auge des Beobachters muss an die Gesichtsfeldleuchtdichte angepasst sein.
- Das wahrzunehmende Objekt muss eine Mindestgröße besitzen.
- Die Darbietungsdauer muss ausreichend sein.

4 Wahrnehmung und Wahrnehmungsmodelle

4.1 Arten der Wahrnehmungsmodelle

Dem Wahrnehmungsvorgang werden bestimmte Modellvorstellungen zugrunde gelegt. Sie enthalten Idealisierungen und Vereinfachungen gegenüber dem realen Wahrnehmungsvorgang.

Wahrnehmungsmodelle sind Wahrnehmung nach

- Farbkontrast,
- Formkontrast,
- Bewegungskontrast,
- Helligkeitskontrast (Leuchtdichtekontrast).

Die Wahrnehmung bei künstlicher Beleuchtung beruht überwiegend auf dem Sehen von Helligkeitskontrasten (Leuchtdichte). Farbkontrast und Formkontrast sind hier nicht dominant.

Für den Leuchtdichtekontrast existieren mehrere unterschiedliche Definitionen. Hier soll die Kontrastdefinition

$$K = \frac{L_O - L_U}{L_U} \qquad \text{(C13-5)}$$

mit

L_O Objektleuchtdichte
L_U Umfeldleuchtdichte

verwendet werden.

Als Objekt gilt die Person, der Gegenstand, für den die Sichtbarkeitsuntersuchungen durchgeführt werden, Umfeld ist der Hintergrund, vor dem das Objekt zu bewerten ist. Sowohl Objekt als auch Umfeld erscheinen in der Regel nicht gleichmäßig hell. Grund dafür können unterschiedliche Beleuchtung oder unterschiedliches Reflexionsverhalten der Teilflächen von Objekt oder Umfeld sein.

Bild C13-4 stellt die wechselseitigen Beziehungen dar. Ein Objekt O_1 erscheint unter dem Sehwinkel 2′ und habe den Kontrast K = 40 %. Für die Umfeldleuchtdichte $L_U = 5$ cd/m² ergibt sich, dass das Objekt auf der Grenzkurve zwischen sichtbar und unsichtbar liegt. Wenn die Umfeldleuchtdichte auf 50 cd/m² bei ansonsten gleichen Bedingungen erhöht wird, ist das Objekt sichtbar, der Punkt O_1 liegt dann oberhalb der Grenzkurve für $L_U = 50$ cd/m² und damit im sichtbaren Bereich. Für $L_U = 0{,}5$ cd/m² ergibt sich, dass das Objekt nicht sichtbar ist.

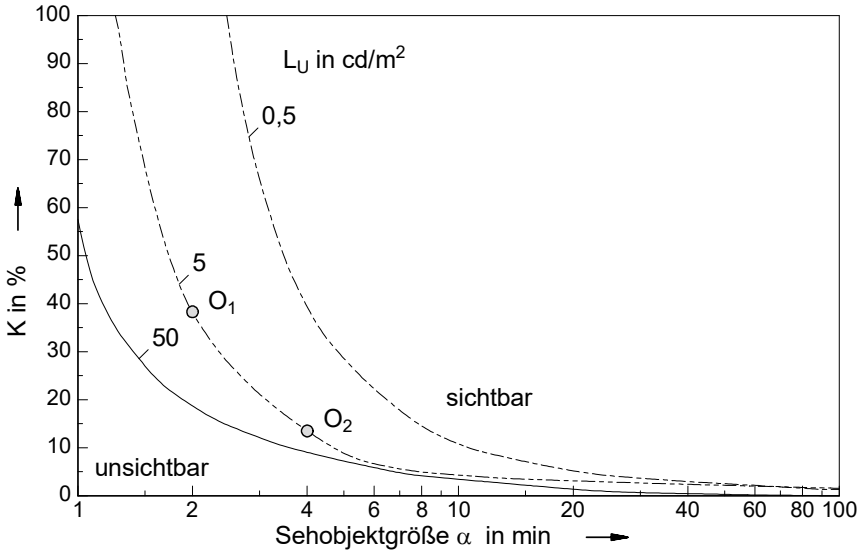


Bild C13-4 Beziehungen zur Sichtbarkeit (nach [5])

4.2 Wahrnehmungsmodell bei stationärer Beleuchtung

Bei der stationären Straßenbeleuchtung strebt man Negativkontrast an. Objekte auf der Fahrbahn (z. B. Fußgänger, Radfahrer, Hindernisse) sollen als Silhouette gegen den Hintergrund (Fahrbahn) wahrgenommen werden.

4.3 Wahrnehmungsmodell bei Kfz-Scheinwerferbeleuchtung

Durch den Kfz-Scheinwerfer wird das Objekt in der Regel aus der Beobachtungsrichtung des Fahrzeugführers beleuchtet, d. h., das Objekt wird „von vorn“ beleuchtet. Das Objekt erscheint in der Regel im Positivkontrast.

Im Zusammenspiel von stationärer Beleuchtung und Kfz-Scheinwerferbeleuchtung treten komplizierte Wechselverhältnisse auf. Die resultierenden Objekt- und Umfeldleuchtdichten können nur zum Teil berechnet werden, meist ist eine lichttechnische Unfallrekonstruktion erforderlich.

5 Berechnung der Wahrnehmung nach dem Kontrastwahrnehmungsmodell

5.1 Berechnung ohne Blendung

Ausgangspunkt zur Berechnung nach dem Kontrastwahrnehmungsmodell sind die Fragen:

- Konnte ein bestimmtes Objekt unter gegebenen Lichtverhältnissen gesehen werden?
- Ist er rechtzeitig gesehen worden oder aus welcher Entfernung konnte er gesehen werden?

Sichtbar ist ein Objekt dann, wenn

$$|\Delta L_{vorh}| > |\Delta L_S| \qquad \text{(C13-6)}$$

mit ΔL_{vorh} vorhandener Leuchtdichteunterschied
ΔL_S Schwellenleuchtdichteunterschied
ist.

Grundlegende Untersuchungen stammen von Blackwell [5]. Adrian [6] entwickelte aus den Daten von Blackwell die Funktion

$$\Delta L_S = f(\alpha, L_U) \qquad \text{(C13-7)}$$

mit der Sichtbarkeitsberechnungen durchgeführt werden können.

Es gilt

$$\Delta L_S = K \cdot C \cdot \left(\frac{A}{\alpha} + B\right)^2 \qquad \text{(C13-8)}$$

mit

ΔL_S	Schwellenleuchtdichteunterschied in cd/m²
α	Sehwinkel unter dem das Objekt dem Beobachter erscheint in Winkelminuten
L_U	Umfeldleuchtdichte in cd/m²
A; B	$A = f(L_U)$
	$B = f(L_U)$
	Beide Funktionen liegen tabelliert vor (**Tabelle C13.1**).
K	Faktor der Wahrnehmungswahrscheinlichkeit
$K = 3{,}1$	für nahezu 100 % Wahrnehmungswahrscheinlichkeit
C	Praxisfaktor, $C = 10$

Die Untersuchungen von Blackwell [5] wurden unter Laborbedingungen durchgeführt. Für die Bedingungen im Straßenverkehr (Unerwartetheit, begrenzte Darbietungszeit) sind höhere Leuchtdichteunterschiede als die unter Laborbedingungen ermittelten anzusetzen, ausgedrückt durch den Praxisfaktor. Der Praxisfaktor wird von verschiedenen Autoren mit 4–40 angesetzt. Neuere Untersuchungen [7] zeigen, dass $C = 10$ gesetzt werden sollte. **Bild C13-5** stellt den gefundenen Zusammenhang für den Schwellenkontrast C_N dar.

$$C_N = \frac{L_O - L_U}{L_U} = \frac{\Delta L}{L_U} \qquad \text{(C13-9)}$$

Sowohl für statische als auch dynamische Sehaufgaben ergeben sich für Praxisbedingungen um den Faktor 10 höhere Schwellenleuchtdichtekontraste C_N und damit auch um den Faktor 10 höhere Schwellenleuchtdichteunterschiede bei konstanter Umfeldleuchtdichte L_U als unter Laborbedingungen. Konsequenz eines zu niedrig angesetzten Praxisfaktors ist, dass die erforderlichen Leuchtdichteunterschiede zu niedrig berechnet werden.

Für den Leuchtdichtebereich $4{,}2 \cdot 10^{-3}$ cd/m² $< L_U < 2{,}6$ cd/m² können A und B mit guter Näherung berechnet werden:

$$\lg A = -0{,}072 + 0{,}3372 \cdot \lg\left[\left(L_U / \left(\text{cd/m}^2\right)\right)\right] + 0{,}0866 \cdot \left[\lg\left(L_U / \left(\text{cd/m}^2\right)\right)\right]^2 \qquad \text{(C13-10)}$$

$$\lg B = -1{,}256 + 0{,}319 \cdot \lg\left[L_U / \left(\text{cd/m}^2\right)\right] \qquad \text{(C13-11)}$$

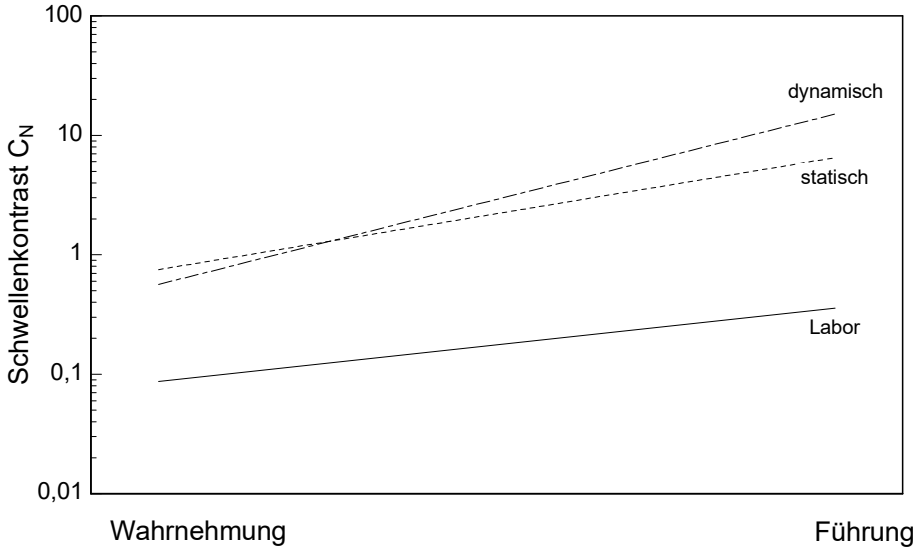


Bild C13-5 Schwellenkontrast Labor – Praxis nach [7]

Mittels Gl. **C13-8** wird der erforderliche Leuchtdichteunterschied ΔL_S berechnet. Dazu müssen der Sehwinkel, unter dem das wahrzunehmende Objekt erscheint, und die Umfeldleuchtdichte L_U bekannt sein. Um A und B zu bestimmen, benötigt man die Umfeldleuchtdichte L_U.

Die Umfeldleuchtdichte L_U und die Objektleuchtdichte L_O müssen messtechnisch ermittelt werden. Aus L_U wird nach Gl. **C13-8** der erforderliche Leuchtdichteunterschied, der Schwellenleuchtdichteunterschied, ΔL_S berechnet und mit dem vorhanden Leuchtdichteunterschied

$$\Delta L_{\text{vorh}} = L_O - L_U \qquad \text{(C13-12)}$$

verglichen. Aus Gl. **C13-6** ergibt sich dann, ob das Objekt bzw. Teilobjekt sichtbar ist.

5.2 Berechnung mit Blendung

Es wird unterschieden zwischen

- psychologischer Blendung und
- physiologischer Blendung.

Hier ist die physiologische Blendung, mit der eine Verschlechterung der Sehleistung einhergeht, wichtig. Streulicht, bedingt durch Trübungen im Auge, wird dem „Nutzbild“ überlagert (äquivalente Schleierleuchtdichte L_V). Es kommt zu einer Verringerung des Kontrasts auf der Netzhaut.

Ohne Blendung ist der Kontrast K_{oB}

$$K_{oB} = \frac{L_O - L_U}{L_U} \qquad \text{(C13-13)}$$

mit Blendung der Kontrast K_{mB}

$$K_{mB} = \frac{(L_O + L_V) - (L_U + L_V)}{(L_U + L_V)} = \frac{L_O - L_U}{L_U + L_V} \quad \text{(C13-14)}$$

$$K_{mB} = K_{oB} \frac{L_U}{L_U + L_V} \quad \text{(C13-15)}$$

vorhanden.

Damit ein Objekt unter Blendung sichtbar ist, muss dessen Leuchtdichteunterschied zum Umfeld größer sein als für den Fall ohne Blendung. Die erforderliche Erhöhung wird durch die prozentuale Schwellenwerterhöhung *TI* (threshold increment) angegeben.

TI kann berechnet werden [8].

Für Blendwinkel $\Theta = 1{,}5° \ldots 60°$

Blendbeleuchtungsstärken am Ort des Auge $E_{Bl} = 0{,}1 \ldots 500$ lx und
Objekt unter einem Winkel von 8′ sichtbar.

für $L_{UB} = 0{,}05 \ldots 5$ cd/m² (Dunkelheitsunfälle):

$$TI = 65 \cdot \frac{L_V}{L_{UB}^{0,8}} \,\% \quad \text{(C13-16)}$$

für $L_{UB} = 5 \ldots 2.000$ cd/m² (Unfälle in den Hellstunden):

$$TI = 95 \cdot \frac{L_V}{L_{UB}^{1,05}} \,\% \quad \text{(C13-17)}$$

L_{UB} mittlere Umfeldleuchtdichte eines Feldes mit Öffnungswinkel ± 30° um die Blickachse in cd/m².

Die äquivalente Schleierleuchtdichte L_V ist zu berechnen nach

$$L_V = K_V \cdot \frac{E_{Bl}}{\Theta^2} \text{ cd/m}^2 \quad \text{(C13-18)}$$

mit

E_{Bl} Blendbeleuchtungsstärke am Ort des Auges in lx
Θ Blendwinkel in °
K_V altersabhängige Konstante

Für K_V gilt nach [9]

$$K_V = 9{,}86 \left[1 + \left(\frac{A}{66{,}4} \right)^4 \right] \quad \text{(C13-19)}$$

A Lebensalter des geblendeten Beobachters in Jahren

Sind mehrere Blendquellen vorhanden, muss die äquivalente Schleierleuchtdichte aus der Summe der äquivalenten Schleierleuchtdichten der Einzelquellen ermittelt werden. Man berechnet den erforderlichen Leuchtdichteunterschied ΔL_S zunächst für den Fall ohne Blendung und multipliziert mit *TI* also

$$\Delta L_{SmB} = \Delta L_{SoB} \cdot TI / 100 \qquad \text{(C13-20)}$$

mit

ΔL_{SoB} Schwellenleuchtdichteunterschied ohne Blendung
ΔL_{SmB} Schwellenleuchtdichteunterschied mit Blendung.

6 Die lichttechnische Unfallrekonstruktion (prinzipielle Vorgehensweise)

Die Beurteilung der optischen Wahrnehmung und die Beantwortung der Frage der Sichtbarkeit erfordern eine Vielzahl von lichttechnischen Angaben. Die Beleuchtungsverhältnisse und damit die Sichtbarkeitsverhältnisse sind ein komplexes Wechselgeschehen zwischen der örtlichen Beleuchtung, den sich in Bewegung befindlichen Unfallbeteiligten in der Annäherung an den Unfallort, der Beleuchtung durch die Kfz-Scheinwerfer und der sich verändernden geometrischen Verhältnisse der Blickbeziehungen des Kfz-Führers. Die Berechnung der Sichtbarkeit ohne lichttechnische Rekonstruktion ist wegen der Komplexität der Lichtsituation nicht möglich.

Bei der lichttechnischen Unfallrekonstruktion werden lichttechnischen Ausgangswerte für die Sichtbarkeitsberechnung ermittelt.

Die Sichtbarkeit von Objekten muss aus der konkreten Position derjenigen Person heraus untersucht werden, für die die Sichtbarkeitsbetrachtungen angestellt werden. Reflexionseigenschaften, Kontraste, Leuchtdichteunterschiede sind von der Beobachtungsrichtung abhängig. Das führt dazu, dass aus unterschiedlichen Positionen ein und dasselbe Objekt unterschiedlich gut wahrgenommen bzw. erkannt wird. Aussagen zur Erkennbarkeit gelten deshalb nur für die konkrete Beobachterposition, für die die Untersuchungen durchgeführt werden. Aus anderen Blickpositionen können sich völlig abweichende Sichtbarkeiten ergeben. Ausgehend vom Kollisionspunkt sind die Positionen der Unfallbeteiligten vor der Kollision zu berechnen. Dafür müssen die entsprechenden Geschwindigkeiten beispielsweise aus unfallmechanischen Überlegungen bekannt sein. Für die gefundenen korrespondierenden Positionen erfolgen die entsprechende Sichtbarkeitsberechnungen (**Bild C13-6**).

In der Regel sind die Objekt- und Umfeldleuchtdichten inhomogen. Man muss deshalb die Sichtbarkeitsuntersuchungen für verschiedene Teilflächen des Objekts und den zugehörigen Umfeldteilflächen durchführen. **Bild C13-7** zeigt ein Beispiel für die Auswahl von Messpunkten. Auf Teilflächen der Person werden die Objektleuchtdichten, auf Teilflächen außerhalb die Umfeldleuchtdichten bestimmt. Eine feste Regel für die Lage der Messpunkte kann nicht gegeben werden.

Es ist ersichtlich, dass die Anzahl der auszuwählenden Messpunkte sehr groß werden kann. Deshalb kommt der geeigneten Messtechnik eine besondere Bedeutung zu.

Um die Blendung berechnen zu können benötigt man die Beleuchtungsstärke E_{Bl} am Auge der geblendeten Person. Die praktische Messung kann durch Fremdlicht extrem verfälscht werden, denn oft ist es nicht möglich am Rekonstruktionsort Fremdlichtquellen z. B. Straßenleuchten abzuschalten. Man muss dann an einem Ort ohne Fremdlichteinfluss an den Scheinwerfern des Blendfahrzeugs die entsprechenden Messungen vornehmen.

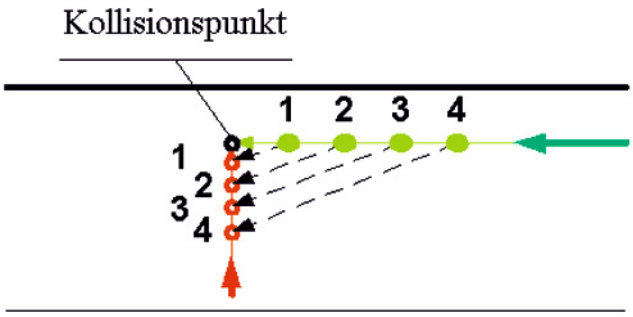


Bild C13-6 Ablauf der Rekonstruktion, Positionen der Unfallbeteiligten

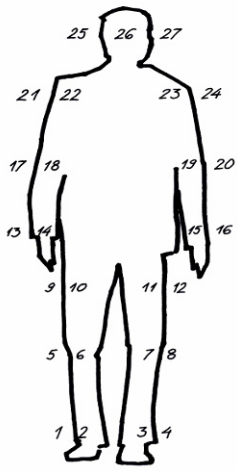


Bild C13-7 Beispiel für die Lage der Messpunkte

7 Messung lichttechnisch relevanter Größen

Die zu messenden lichttechnische Größen ergeben sich aus den bisher dargestellten theoretischen Ausführungen. Es sind:

- Leuchtdichten
  - Umfeldleuchtdichte L_U,
  - Objektleuchtdichte L_O,
  - mittlere Fahrbahnleuchtdichte L_m
- Beleuchtungsstärke
  - Blendbeleuchtungsstärke am Ort des Beobachterauges E_{Bl}

Auf die Erfassung von geometrischen Daten wird hier nicht eingegangen.

Die Messung der Leuchtdichte ist von zentraler Bedeutung. Äquivalente Schleierleuchtdichte L_V, mittlere Leuchtdichte L_m u. Ä. werden aus der Leuchtdichte verschiedener Flächen bzw. Teilflächen, deren Leuchtdichte gemessen wurde, berechnet.

7.1 Messung der Leuchtdichte

Die Leuchtdichtemessung ist eine Beleuchtungsstärkemessung unter einem definierten Raumwinkel Ω (vgl. Gl. (C13-4)). Der Raumwinkel wird durch optische Mittel im Messgerät realisiert und ist meist umschaltbar. Grundsätzlich muss unterschieden werden zwischen Leuchtdichtemessungen, bei denen die Leuchtdichte an einer dem Öffnungswinkel des Messgeräts entsprechenden Fläche direkt gemessen wird und solchen, die die Leuchtdichteverteilung einer größeren Fläche (bildauflösende Verfahren) erfassen.

Bei dem erstgenannten Verfahren erhält man die mittlere Leuchtdichte der Messfläche und bei dem letztgenannten in einem getrennten Prozessschritt die Leuchtdichte der interessierenden Flächenteile (z. B. fotografische Leuchtdichtemessung, Digital-Fotografie, CCD-Kamera).

7.1.1 Messung der Leuchtdichte mit direkt messenden Leuchtdichtemessern

Das Angebot bei diesen Messgeräten reicht von einfachen Vorsatztuben mit Linsen zum Aufstecken auf Beleuchtungsstärkemesser bis zu hochgenauen Messgeräten mit sehr großer Empfindlichkeit und kleinen Öffnungswinkeln.

Die Anforderungen ergeben sich aus den Bedürfnissen der Unfallanalyse und -rekonstruktion.

Genauigkeit:

In den meisten Fällen ist ein Messfehler < 10 % ausreichend.

Öffnungswinkel:

Der Öffnungswinkel muss so gewählt werden, dass die vom Messgerät erfasste Messfläche kleiner als die zu vermessende Fläche ist. Um eine 20 cm · 20 cm große Fläche aus 50 m Entfernung auszumessen darf der Öffnungswinkel α maximal

$$\alpha = 2 \arctan \frac{20\ \text{cm}}{2 \cdot 50\ \text{m}} = 0,229° \approx 0,2° \qquad \text{(C13-21)}$$

sein.

Empfindlichkeit:

Bei dem oben berechneten Öffnungswinkel α sollte das Leuchtdichtemessgerät die Messung von Leuchtdichten im Bereich 0,05…1 cd/m^2 gestatten, teilweise sind aber auch Leuchtdichten bis 0,001 cd/m^2 zu erfassen.

Handhabbarkeit:

Batteriebetrieb, leichte Stativmontage.

Bei der Handhabung von direkt messenden Leuchtdichtemessern während der Unfallrekonstruktion kann es zu praktischen Schwierigkeiten kommen, denn das Messfeld ist bei vielen Leuchtdichtemessgeräten im Sucher als schwarze Fläche sichtbar und hebt sich wegen der meist geringen Umfeldleuchtdichte nicht ab. (Beispiel: Dunkel gekleidetes Unfallopfer auf dunkler Fahrbahn liegend, keine Beleuchtung.) Die Ausrichtung des Leuchtdichtemessers ist deshalb oft schwierig und nur mit zusätzlich aufgestellten hellen Orientierungspunkten zu erreichen. Bei umfangreichen Rekonstruktionen ist die punktweise Leuchtdichtemessung sehr zeitaufwändig, die erforderlichen Straßensperrzeiten sind meist nicht realisierbar, die Umwelteinflüsse (z. B. Betauung der Fahrbahn in den Morgenstunden) bleiben nicht konstant.

7.1.2 Messung der Leuchtdichte mit bildauflösenden Verfahren

Bildauflösende Messverfahren sind für die Belange der lichttechnischen Unfallauswertung sehr gut geeignet. Mit ihnen kann in kurzer Zeit für viele Objekt- und Umfeldteilflächen gleichzeitig die Leuchtdichte ermittelt werden. Die Auswertung muss nicht am Unfallort erfolgen. Die Dauer der Unfallrekonstruktion verringert sich erheblich!

Bei der Abbildung von Objekten mittels Objektiven in die Bildebene einer Kamera ist die Beleuchtungsstärke auf der Bildebene der Leuchtdichte des entsprechenden Objekts proportional. Darauf basiert die Fotografie, bei der die Schwärzung des Filmes der Leuchtdichte des

Objekts annähernd proportional ist. Nur deshalb entspricht die Fotografie dem gesehenen Helligkeitseindruck der realen Szene. Gleiches gilt analog für die Fernsehaufnahme oder CCD-Kamera. Es sind CCD-Kameras und entsprechende Auswertesoftware verfügbar, die in idealer Weise in der Unfallaufnahme eingesetzt werden können. An derartige Systeme sind ähnliche Forderungen zu stellen, wie an die punktweise messenden elektronischen Leuchtdichtemesser. Die Winkelauflösung wird hier gegeben durch die Pixelanzahl der CCD-Matrix.

An dieser Stelle soll ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass normal angefertigte Fotografien oder Negative wegen der nichtlinearen Gradationskurve der Filme und der Fotopapiere absolut ungeeignet sind, um Aussagen zu Leuchtdichten oder Kontrasten zu machen.

Durch geeignete Wahl von Belichtungszeiten, Entwicklungsprozess usw. können auf Fotos Kontraste und Objekte unterscheidbar gemacht werden, die in der Realität nicht unterscheidbar sind, der gegenteilige Fall ist ebenso möglich!

Fotos sind zur Beurteilung der Sichtbarkeit ohne jeden Wert!

Für den praktisch tätigen Gutachter ist derzeit die fotografische Leuchtdichtemessung ein preisgünstiges Verfahren zur Leuchtdichtebestimmung im Straßenraum, sofern die erforderliche Genauigkeit, Helligkeitsabfall an den Bildrändern ($\cos^4$-Abfall), Empfindlichkeit, Anpassung an die spektrale Hellempfindung des Auges ($V(\lambda)$-Anpassung) sowie Reproduzierbarkeit der Kameraeinstellungen gegeben sind oder durch Kalibrierung rechnerisch berücksichtigt werden können.

Die Leuchtdichtemessung mit bildauflösenden Messkameras ist ein sehr komfortables und zeitsparendes Messverfahren. Die zur Anwendung kommenden Kameras sind $V(\lambda)$-angepasst und der $\cos^4$-Fehler ist korrigiert. Neben Profi-Varianten sind modifizierte Digitalkameras erhältlich[2].

7.2 Messung der Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke wird mit Beleuchtungsstärkemessern, auch als Lux-Meter bezeichnet, gemessen. Sie bestehen aus Messkopf und Anzeigegerät. Beleuchtungsstärkemesser sind in vielfältiger Ausführung auf dem Markt. Es muss bei der Geräteauswahl unbedingt auf gute $V(\lambda)$-und $\cos(\varphi)$-Anpassung geachtet werden (siehe oben).

Bei der $V(\lambda)$-Anpassung handelt es sich um die Anpassung der Messgeräteempfindlichkeit an die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges. Diese Anpassung ist kompliziert und aufwändig. Deshalb sind gut angepasste Geräte relativ teuer. Die $\cos(\varphi)$-Anpassung sagt etwas darüber aus, wie Licht aus unterschiedlichen Einfallsrichtungen bewertet wird. Unabhängig von der Einfallsrichtung auf den Messkopf muss ein gleich großer Lichtstrom die gleiche Beleuchtungsstärke ergeben. Um das zu erreichen, wird der Messkopf mit speziellen Diffusoren und Ringblenden ausgerüstet.

Neben den messgerätebedingten Fehlern können erhebliche Fehler durch falsche Messdurchführung auftreten. Unbedingt zu beachten ist bei praktischen Messungen:

- Die Messperson darf Lichtquellen, die für die Messung relevant sind, nicht abschatten.
- Durch Reflexion an der Kleidung der Messperson, insbesondere bei heller Kleidung, kann Fremdlicht zum Messempfänger gelangen und das Ergebnis verfälschen.

2 TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, D-98693 Ilmenau

Es ergeben sich als elementare Regeln für die Beleuchtungsstärkemessung:

- Qualitätsgeräte mit guter $V(\lambda)$- und cos(φ)-Anpassung verwenden,
- Abschattung und Streulicht durch geeignete Standortwahl der Messperson und Messung in Körperferne vermeiden.

Um die Blendung berechnen zu können benötigt man die Beleuchtungsstärke E_{Bl} am Auge der geblendeten Person (siehe Abschnitt 5.2). Die praktische Messung kann durch Fremdlicht extrem verfälscht werden, denn oft ist es nicht möglich am Rekonstruktionsort Fremdlichtquellen z. B. Straßenleuchten abzuschalten. Man muss dann an einem Ort ohne Fremdlichteinfluss an den Scheinwerfern des Blendfahrzeugs die entsprechenden Messungen vornehmen.

7.3 Folgen ungenügender $V(\lambda)$-Anpassung bei Leuchtdichte- und Beleuchtungsstärkemessgeräten

Insbesondere im Rot-Bereich ist die $V(\lambda)$-Anpassung der Messgeräte oft unzureichend. Es können durchaus Messfehler von 100 % und mehr bei schmalbandiger spektraler Strahlung der zu messenden Objekte (rote Fahrzeugrückleuchten, Bremsleuchten) auftreten!

Formelzeichen, Tabellen

α	Sehwinkel in Winkelminuten
ΔL_S	Schwellenleuchtdichteunterschied
$\Delta L_{S\,mB}$	Schwellenleuchtdichteunterschied mit Blendung
$\Delta L_{S\,oB}$	Schwellenleuchtdichteunterschied ohne Blendung
ΔL_{vorh}	vorhandener Leuchtdichteunterschied
A	Konstante, liegt tabelliert vor
B	Konstante, liegt tabelliert vor
C	Praxisfaktor
CN	Schwellenkontrast
K	Leuchtdichtekontrast
K	Faktor der Wahrnehmungswahrscheinlichkeit
K_m	fotometrisches Strahlungsäquivalent $K_m = 683$ lm/W
K_{mB}	Kontrast mit Blendung
K_{oB}	Kontrast ohne Blendung
K_V	Faktor für die Altersabhängigkeit der äquivalenten Schleierleuchtdichte
L_O	Objektleuchtdichte
L_U	Umfeldleuchtdichte
L_{UB}	mittlere Umfeldleuchtdichte eines Feldes mit Öffnungswinkel ± 30° um die Blickachse
L_V	äquivalente Schleierleuchtdichte
TI	prozentuale Schwellenwerterhöhung
$V(\lambda)$	relative spektrale Hellempfindung des menschlichen Auges
X	lichttechnische Größe
X_e	strahlungsphysikalische Größe

Tabelle C13.1 Werte zur Berechnung des Schwellenleuchtdichteunterschieds nach ADRIAN [6]

L_U in cd/m²	A	B	L_U in cd/m²	A	B
$1 \cdot 10^{-5}$	0,146	$0{,}110 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	0,544	$0{,}332 \cdot 10^{-1}$
$2 \cdot 10^{-5}$	0,164	$0{,}136 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$	0,684	$0{,}445 \cdot 10^{-1}$
$5 \cdot 10^{-5}$	0,192	$0{,}182 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{0}$	0,848	$0{,}555 \cdot 10^{-1}$
$1 \cdot 10^{-4}$	0,217	$0{,}231 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{0}$	1,090	$0{,}692 \cdot 10^{-1}$
$2 \cdot 10^{-4}$	0,244	$0{,}294 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{0}$	1,520	0,111
$5 \cdot 10^{-4}$	0,286	$0{,}413 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{1}$	1,920	0,163
$1 \cdot 10^{-3}$	0,323	$0{,}539 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{1}$	2,440	0,237
$2 \cdot 10^{-3}$	0,364	$0{,}710 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{1}$	3,340	0,374
$5 \cdot 10^{-3}$	0,380	$0{,}102 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{2}$	4,240	0,518
$1 \cdot 10^{-2}$	0,399	$0{,}128 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{2}$	5,370	0,702
$2 \cdot 10^{-2}$	0,403	$0{,}159 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{2}$	7,360	1,020
$5 \cdot 10^{-2}$	0,433	$0{,}213 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{3}$	9,330	1,320
$1 \cdot 10^{-1}$	0,476	$0{,}266 \cdot 10^{-1}$			

Literatur

[1] Schwab, R., Padmos, P.: Fundamentals of the visual tasks of night driving. CIE Report (4 Entwurf) TC 4-90

[2] Eckert, M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr. Verlag Technik, Berlin-München 1993

[3] Definition nach 16. Generalkonferenz für Maß und Gewicht, Paris 1979

[4] CIE-Publikation Nr. 41

[5] Blackwell, H. R.: Development and use of a quantitative method for specification of interior illuminatuons levels an the basis of performance data. Illum. Engng. 54 (1959) 6, S. 317–354

[6] Adrian, W.: Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung. Lichttechnik 21 (1969) 1, S. 2A–6A

[7] Dietz, S.: Anforderungen für die Sichtbarkeit von Fahrbahnmarkierungen auf Autobahnen, Licht'98 Tagungsband, S. 547–554, Interlaken 1998

[8] Baer, R. (Hrsg.): Beleuchtungstechnik, Grundlagen, Verlag Technik, Berlin 2006

[9] DIN EN 13201-3:2003, Abschnitt 8.5

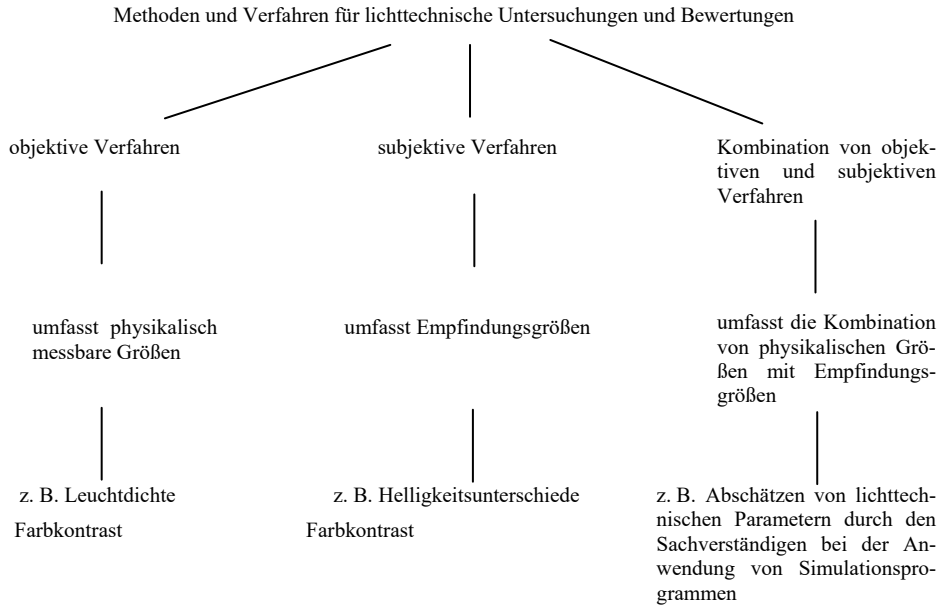
Teil 2: Übersicht und allgemeine Hinweise zur Bearbeitung von Dunkelheitsunfällen

Klaus Nitsche

1 Rekonstruktionsmethoden und Einflussgrößen für die lichttechnische Rekonstruktion

Um die optische Wahrnehmungs- bzw. Erkennungsweite zwischen dem Objekt und dem Beobachter bestimmen zu können, stehen dem Unfallanalytiker unterschiedliche Methoden und Verfahren zur Verfügung. Diese können wie folgt unterteilen:

Tabelle C13.2 Untersuchungsmethoden



Den objektiven Verfahren können folgende photometrische Messverfahren zugeordnet werden:

- Leuchtdichte-Messgeräte,
- bildgebende Lichtmesstechnik,
- bildauflösende Lichtmesstechnik.

Die subjektiven Verfahren umfassen lichttechnische Untersuchungen mittels Probanten um lichttechnische Größen qualitativ zu bestimmen (visuelle Bewertung).

Bei der dritten Verfahrensgruppe – Kombination von objektiven und subjektiven Parametern – handelt es sich um Computer-Simulationsprogramme zur Darstellung der Wahrnehm- und Erkennbarkeitsweite von Objekten für die Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen, bei

denen objektive Parameter durch den technischen SV subjektiv abzuschätzen bzw. zu bewerten sind.

Um Aussagen zur Wahrnehmbarkeit von Sehobjekten bei Tageslicht, Dämmerung, Dunkelheit treffen zu können sind in Abhängigkeit der Aufgabenstellung folgende lichttechnischen Größen im Rahmen der lichttechnischen Unfallrekonstruktion zu ermitteln:

- Leuchtdichte:
  - Umfeldleuchtdichte L_U in cd/m^2
  - Objektleuchtdichte L_O in cd/m^2
  - mittlere Leuchtdichte L_m in cd/m^2
  - Adaptationsleuchtdichte L_V
- Stoffkennzahl:
  - Reflektionsgrad ρ von Bekleidung oder Hindernissen
- Beleuchtungsstärke:
  - Blendbeleuchtungsstärke am Ort des Beobachterauges E_B in lx
  - horizontale Beleuchtungsstärke in E_H in lx
  - vertikale Beleuchtungsstärke E_V in lx
  - halbzylindrische Beleuchtungsstärke E_{ZH} in lx (nur für spezielle Begutachtungen wie Gesichtserkennung)

Erfassen von lichttechnischen Daten/Beweissicherung

Im Idealfall können am Unfallort alle Daten zur Unfallzeit erhoben werden. In der Praxis ist das allerdings kaum der Fall. Hierfür gibt es unterschiedliche Gründe. Diese können sein:

- Zum Unfallzeitpunkt war noch nicht erkennbar und abzusehen, ob ein Gutachten zur optischen Wahrnehmbarkeit erforderlich wird
- Zum Unfallzeitpunkt stand kein auf diesem Spezialgebiet erfahrener technischer Sachverständiger zur Verfügung
- Die erforderliche Messtechnik war zum Unfallzeitpunkt nicht vorhanden.

An der Unfallstelle sollten zur Unfallzeit folgende Einfluss- und Kenngrößen als Sofortmaßnahmen erfasst werden:

1. Allgemeine Daten:
   - Wann wurde die Beweissicherung/-aufnahme durchgeführt? (Ort, Tag, Uhrzeit – von wann bis wann sehr wichtig)
   - Welche Beleuchtungseinheiten waren am Fahrzeug beim Eintreffen des SV noch eingeschaltet? (Dokumentation und sofortiges Abschalten der Beleuchtungseinheiten)
2. Geometrischen Daten:
   - alle Entfernungen, Abstände, Endlagen der unfallbeteiligten Fahrzeuge, Personen, Gegenstände und sonstigen wichtigen Referenzgrößen
3. Meteorologische Daten/Witterung/Sichtverhältnisse:
   - Bewölkung, Mondstellung, Sonnenstand (Blendung) → Kompass
   - Sternenhimmel, Bewölkung, Regen, Nebel, Sichtweite u. a.
   - Niederschlag, z. B. Schneefall, Nebel, Regen (Nieselregen, schwach, mittel, stark)

- Fahrbahnoberfläche/Fahrbahnbelag (matt, glänzend, spiegelnd) und dessen Reflexionseigenschaften (Reflexionsgrad ρ)
- Fahrbahnzustand (trocken, nass, feucht)
- Sichtverhältnisse (Dunst, Nebel, Entfernungsangabe)

4. Ortsfeste Beleuchtung:
   - Art/Bestückung der Straßenleuchten (Typ – Glühlampen, Leuchtstoffröhren, Quecksilber-Hochdrucklampe, Natrium-Hochdrucklampe, Natrium-Niederdrucklampe, gelblich/Art der Farbe des erzeugten Lichtes)
   - Schaltzeiten der Straßenbeleuchtung zum Unfallzeitpunkt

   Zusatzdaten für lichttechnische Rekonstruktion:

   - Datum der letzten Leuchtenreinigung
   - Datum des letzten Lampentausches (beim Betreiber ermitteln, Hinweis an Betreiber: Möglichst keine Änderungen (Lampentausch, Mehrbestückung, Reinigung) der Beleuchtungsanlage bis zur Nachstellung des Unfalls vornehmen, ggf. Leuchtmittel sicherstellen lassen)
5. Umgebungsbeleuchtung:
   - Schaufenster, Tankstellenbeleuchtung, Reklame-Beleuchtung (Anzahl der Beleuchtungen, Farbe der Beleuchtung → mittels Fotos dokumentieren/Beweissicherung)
   - mögliche Blendquellen
   - Schaltzeiten der jeweiligen Zusatzbeleuchtungen feststellen (möglicherweise wurde vor dem Eintreffen der Polizei zu- oder abschalten)
   - sonstige Beleuchtungen in der Umgebung/Umfeld
6. Fahrzeug:
   - technische Fahrzeugdaten, Typ, Hersteller
   - Beladungszustand des Fahrzeugs (Insassenpositionierung, Anordnung und Masse der Zuladung des Gepäcks)
   - Farbe des Fahrzeugs bzw. Kollisionspartners (allgemeiner Verschmutzungszustand und -grad → trocken, nass, feucht)
   - Kennzeichen (Beleuchtung, reflektierend, Verschmutzung → trocken, nass, feucht)
   - Signalleuchten (Betriebszustand – ggf. Lampen sicherstellen für Lampengutachten, Verschmutzung → trocken, nass, feucht)
7. Fahrzeugbeleuchtung/Windschutzscheibe/Helmvisier:
   - Art und Typ der Scheinwerfer einschließlich eingebauter Lampen (gilt auch für Fahrräder)
   - Alterungszustand der Scheinwerfereinsätze (z. B. Rostflecken, Verspiegelung matt/blind, teilweise gelöste Verspiegelung)
   - Alterungszustand der Lampen (z. B. am Glaskolben sind helle bzw. dunkle Ablagerungen/„Schmutzschleier“)
   - Betriebszustand der montierten Lampen (vorschriftsmäßige Leistung, richtige Einbaulage)
   - bei Fahrrädern zusätzlich Reflektoren prüfen

- Scheinwerfereinstellung/Leuchtweitenregulierung
- Verschmutzungsgrad der Scheinwerfer
- Verschmutzungsgrad der Frontscheibe
- Art, Stellung und Funktion der Leuchtweitenregulierung (abhängig vom Fahrzeugbeladungszustand), Scheinwerfereinstellung korrekt,
- Verschmutzung (Messung der Abblend- und Fernlichtbeleuchtungsstärke mit und ohne Verschmutzung)
- Beleuchtungsstärke (Messung hinsichtlich des Alterungszustands)
- Beschädigung (ggf. Lampen sicherstellen für Lampengutachten)
- Windschutzscheibe/Helmvisier
- Tönung (Einfluss mit Beleuchtungsstärke-Messgerät – Lux-Meter – bestimmen)
- Einbauwinkel Frontscheibe/Visier
- Beschädigungen (Streulichtbildung – Kratzer, Krater von Steinschlägen)
- Verschmutzung – innen, außen, Schlierenbildung, Wischerblätter
- Scheibenwischergeschwindigkeit (prüfen + Funktion)

Wichtiger Hinweis:

- niemals die elektrische Anlage mit den zum Unfallzeitpunkt eingebauten Lampen auf Funktionstüchtigkeit prüfen
- alle eingebauten Lampen ausbauen und sicherstellen (für erforderliches Lampen-Gutachten und Gutachten zur optischen Wahrnehmbarkeit)

8. Verkehrsaufkommen
   - stark, mittel, schwach
   - Begegnungsverkehr (stark, mittel, schwach)
   - Blendung durch Begegnungsverkehr (stark, mittel, schwach)
9. Sehobjekt (Fußgänger, Zweirad-Fahrer, Sozius, weitere Gegenstände)
   - Fußgänger (Art der Bekleidung, Farbe der Bekleidung, Körpergröße, Gewicht, Hautfarbe, Haarfarbe, Hut, Kopftuch, Helm und Farbe, Oberbekleidung, Strümpfe, Schuhe)
   - weitere Gegenstände (Taschen, Tüten, Schirm und sonstige mitgeführte Gegenstände)
   - Nässegrad, Bekleidung/Gegenstände (hilfsweise im Regen zurückgelegte Wegstrecke)
   - Lage des Fußgängers, des Fahrrads u. a. (stehend, liegend)
   - für Rekonstruktion: Verhalten (Geschwindigkeiten, Bewegungsrichtung von Fußgänger, Roller, Skater, Fahrradfahrer)
10. Messen von lichttechnischen Kenngrößen
    - Ermitteln des Reflektionsgrads ρ von Kleidung und Hindernissen
    - Beleuchtungsstärke (Blendbeleuchtungsstärke) bestimmen
    - Beleuchtungsstärke von Referenzobjekten
    - Leuchtdichtemessung

2 Blickzuwendungszeit

Dr. Dr. Bernhard J. Lachenmayr, Klaus Nitsche

Die Blickzuwendungszeit ist Bestandteil der psycho-physischen Reaktionszeit. Befand sich das Gefahrenobjekt nicht am Fixationspunkt des Fahrers, so ist eine Blickzuwendungssakkade erforderlich. Die Blickzuwendungszeit hat folgende Definition:

Blickzuwendungszeit = Latenzzeit
+ Sakkadendauer
+ Sakkadische Suppression

Nicht mitgerechnet ist eine mögliche Wahrnehmungszeit, die für die Wahrnehmung des peripheren Stimulus notwendig ist. Über die hierfür erforderlichen Zeiten ist wenig oder nichts bekannt, so dass sie nicht weiter berücksichtigt werden.

Wird weiterhin berücksichtigt, dass die Latenzzeit zur Auslösung von Blickzuwendungssakkaden in Situationen, in denen der Betrachter einer erhöhten Aufmerksamkeitsbeanspruchung ausgesetzt ist, erheblich höher ausfallen kann, so resultieren daraus die noch deutlich längeren Gesamtreaktionszeiten von **Tabelle C13.4**. In **Tabelle C13.4** wurden nicht die in den experimentellen Untersuchungen von Lachenmayr [3] gemessenen Extremwerte, sondern lediglich die Mittelwerte zugrunde gelegt.

Es gilt somit zu beachten, dass immer dann, wenn für die Wahrnehmung eines Gefahrenobjekts eine Blickzuwendung notwendig und oder wenn der Fahrer einer erhöhten Aufmerksamkeitsbelastung ausgesetzt ist, z. B. in komplexen Situationen mit Mehrfachentscheidungen, mit einer Gesamtreaktionszeit für eine Notbremsung von weit über einer Sekunde zu rechnen ist.

Auch sollte bei einer gerichtlichen Klärung von Unfallsituationen in Form einer Ortsbesichtigung/Inaugenscheinnahme bedacht werden, dass beispielsweise der überfahrene Fußgänger oder Radfahrer im Rahmen der vorgegebenen Fahrbahnführung und der Beleuchtungsverhältnisse vom Fahrer aus in einem Abstand, der noch eine ausreichende Reaktion ermöglicht hätte (Anhalteweg), hätte gesehen werden können (Problem → lichttechnisches Gutachten, Wahrnehmen + Erkennen).

Derartige Begehungen (subjektive Bewertungen/Feststellungen) lassen aber die drei grundsätzlichen Beziehungen von Einflussfaktoren die eng miteinander verflochten sind/in Beziehung stehen außer Acht:

- physiologische Optik,
- Psychologie,
- Lichttechnik.

Der Fahrer wusste ja im Moment des Unfalls nicht, dass an der betreffenden Stelle kurze Zeit später ein Gefahrenobjekt auftauchen würde. Zusätzlich wird nicht berücksichtigt, dass das Gefahrenobjekt zunächst im peripheren Gesichtsfeld auftaucht und erst nach einer Blickzuwendungssakkade foveal verarbeitet werden kann.

Die Aufgabenstellung lässt sich somit nur unter Einbeziehung von lichttechnischer Messungen (Lichttechnisches Rekonstruktionsgutachten) fach- und sachgerecht beantworten.

Tabelle C13.3 Gesamtreaktionszeit mit Blickzuwendung ohne Aufmerksamkeitsbeanspruchung

Sakkadenamplitude	5 Grad	10 Grad	15 Grad	20 Grad
Latenzzeit (ms)	260	278	296	314
Dauer (ms)	128	153	178	203
Sakkadische Supression (ms)	50	50	50	50
Blickzuwendungszeit (ms)	438	481	524	567
Gesamtreaktionszeit (ms)	1.298	1.341	1.384	1.427

Tabelle C13.4 Gesamtreaktionszeit mit Blickzuwendung und erhöhter Aufmerksamkeitsbeanspruchung

Sakkadenamplitude	5 Grad	10 Grad	15 Grad	20 Grad
Latenzzeit (ms)	378	406	435	464
Dauer (ms)	128	153	178	203
Sakkadische Suppression (ms)	50	50	50	50
Blickzuwendung (ms)	556	609	663	717
Gesamtreaktionszeit (ms)	1.416	1.469	1.523	1.577

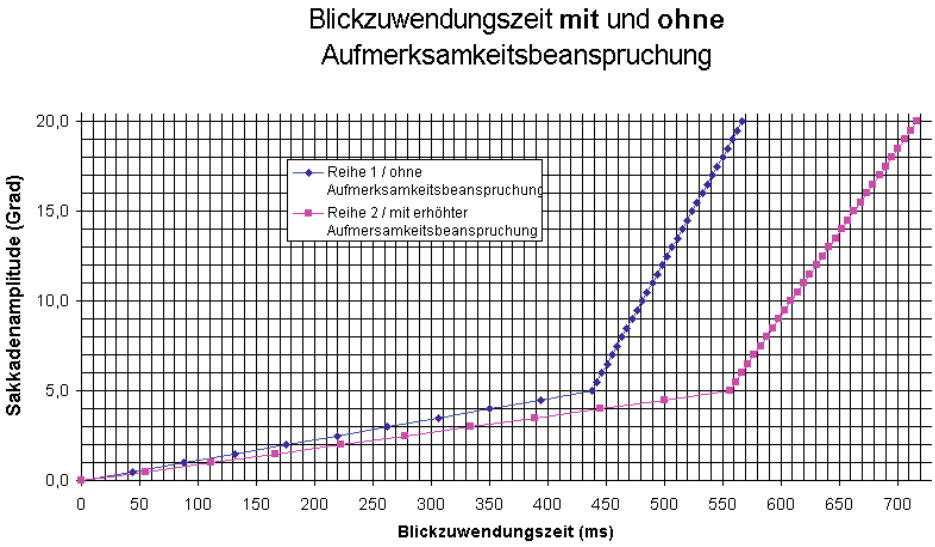


Bild C13-8 Blickzuwendungszeit in Abhängigkeit von Sakkadenamplitude und Aufmerksamkeitsbeanspruchung

Literatur

[1] Lachenmayr, B.: Sehen und gesehen werden: Sicher unterwegs im Straßenverkehr, Verlag Shaker, Aachen 1995, ISBN 3-8265-0845-9, ISBN 0945-0890
[2] Ingenieurbüro Schimmelpfennig+Becke: Der Dunkelheitsunfall, Seminar vom 30.11.1990, Seminarunterlagen (ursprüngliche Quelle: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Mai 1988, Heft 5)
[3] Lachenmayr, B.: Beeinflussung des peripheren Sehvermögens durch foveale Beanspruchung der Aufmerksamkeit, Dissertation, Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, 17. März 1981
[4] Wacker, J., Buser, A., Lachenmayr, B.: Influence of stimulus size and contrast on the temporal parameters of saccadic eye movents: implications für road traffic, German Journal of Ophthalmology, Springer-Verlag 1993, S. 246–250
[5] Lachenmayr, B.: Die Bedeutung des peripheren Sehens für den Kraftfahrer, Fortschritte der Ophthalmologie, Springer-Verlag 1986, S. 357–360
[6] Lachenmayr, B.: Die Bedeutung des peripheren Sehens, Deutsche Optikerzeitung, Heidelberg, Nr. 11/1981
[7] Lachenmayr, B.: Inhibition des Sakkadischen Systems durch eine visuelle Belastung, Fortschritte der Ophthalmologie, Springer-Verlag 1983, S. 542–544
[8] Lachenmayr, B.: Peripheres Sehen und Reaktionszeit im Straßenverkehr, Beeinflussung durch die Beanspruchung des Autofahrers, Zeitschrift für Verkehrssicherheit 33 (1987), S. 151–156

3 Physiologisch-optische Grundlagen und visueller Wahrnehmungsprozess

Dr. Michael Gebhardt, Dr. Hans-Jürgen Grein, Klaus Nitsche

Das Sehen und noch viel mehr der Wahrnehmungsprozess ist ein komplexer Vorgang. Im Folgenden sollen nur wenige, wichtige Eigenschaften des visuellen Systems, die für ein grundlegendes Verständnis des Sehvorgangs im Rahmen der Unfallrekonstruktion notwendig sind, aufgeführt werden.

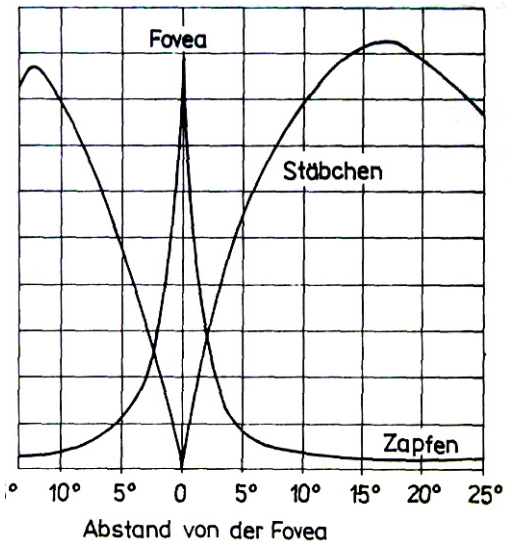
Das visuelle System arbeitet über einen Leuchtdichtebereich von zehn Größenordnungen (Zehnerpotenzen). Um diesen großen Bereich überdecken zu können, erfolgt eine Anpassung (Adaptation) durch vier Vorgänge:

- Veränderung der Pupillenweite,
- Übergang vom Zapfen- zum Stäbchensehen und umgekehrt,
- Veränderung der Empfindlichkeit von Zapfen und Stäbchen,
- neuronale Prozesse in der Netzhaut.

Nach Helligkeitsbereichen wird entsprechend der aktiven Photorezeptoren unterschieden in:

skotopisches Sehen	$L < 0{,}001$ cd/m²	Nachtsehen (nur Stäbchen)
mesopisches Sehen	$0{,}001$ cd/m² $\leq L \leq 10$ cd/m²	Dämmerungssehen (Stäbchen und Zapfen)
photopisches Sehen	$L > 10$ cd/m²	Tagsehen (nur Zapfen)

Für den Straßenverkehr kann tagsüber von photopischen bzw. bei Beleuchtung von Fahrbahnen mittels künstlichen Lichtes von mesopischen Bedingungen ausgegangen werden.



Im Auge selbst entsteht ein reelles, umgekehrtes und verkleinertes Bild des uns umgebenden Objektraums. Diese optische Abbildung wird durch die photosensiblen Zapfen und Stäbchen der Netzhaut in elektrische Signale umgewandelt und durch Nervenzellen weiter verarbeitet. Die Zapfen und Stäbchen sind nicht gleichmäßig über die Netzhaut verteilt (**Bild C13-9**).

Bild C13-9 Dichte der Zapfen und Stäbchen nach Osterberg sowie relative Sehschärfe in Abhängigkeit vom Netzhautort [1]

Im photopischen Sehen wird die größte Sehschärfen (bis > 2,0) und im skotopischen Bereich werden nur Werte < 0,1 erreicht. Die Sehschärfe hängt unter anderem von der unkorrigierten bzw. unkompensierten Fehlsichtigkeit ab (Tabelle C13.5).

Unter Sehschärfe (Visus) versteht man den Kehrwert der in Winkelminuten gemessenen Größe des kleinsten Details, das noch erkannt wird.

Tabelle C13.5 Reduzierung der Sehschärfewerte (Visus) in Abhängigkeit der unkorrigierten/unkompensierten Fernrefraktion [2]

Visus	Fernrefraktion
1,0	0
0,5	0,5
0,25	1,0
0,12	1,5
0,06	2,0

Der Augenöffnung (Pupille) gegenüber befindet sich der Netzhautgrube (Fovea centralis) gegenüber. Der innerste Teil der Netzhautgrube wird als Foveola bezeichnet. Auf der Foveola werden die fixierten Objekte abgebildet. In diesem Bereich ist, in Korrelation mit der Zapfendichte und der neuronalen Verschaltung, die höchste Sehschärfe (Maß für das räumliche Auflösungsvermögen) gegeben.

Eine weitere Größe zur Beurteilung der visuellen Leistungsfähigkeit stellt die örtliche Kontrastempfindlichkeitsfunktion (spatial CSF – Contrast sensivity funktion) dar. Diese widerspiegelt die Abhängigkeit der Erkennbarkeit von Objektkontrast und -größe. (Bild C13-10 und Bild C13-11).

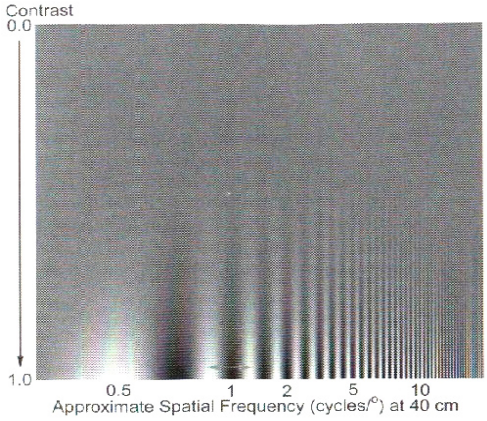


Bild C13-10 Kontrastempfindlichkeit in Abhängigkeit der Ortsfrequenz [3]

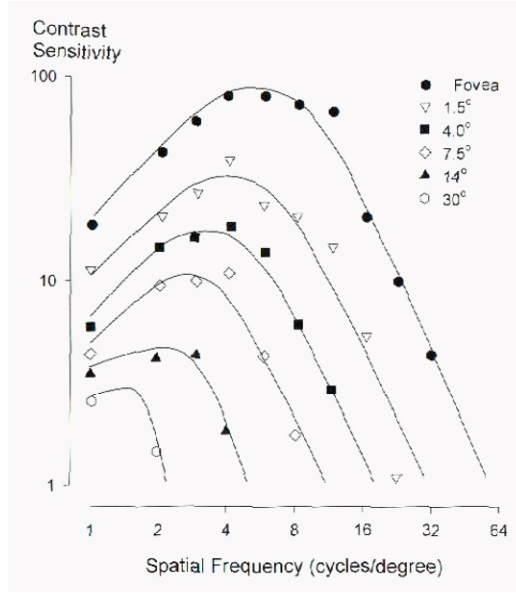


Bild C13-11 Kontrastempfindlichkeit in Abhängigkeit der Ortsfrequenz

Für die örtliche Kontrastempfindlichkeitsfunktion lassen sich wichtige Aussagen treffen:

- Die größte Kontrastempfindlichkeit liegt zwischen drei und zehn Perioden pro Grad.
- Die obere Grenzfrequenz der räumlichen CSF entspricht der Sehschärfe.
- Mit zunehmendem Abstand von der Fovea wird die Funktion zu geringeren Werten verschoben.
- Mit kleinerer Adaptationsleuchtdichte (Einstellleuchtdichte des Auges) wird die Funktion zu geringeren Werten verschoben.

Neben einer örtlichen Auflösung muss das Auge auch eine zeitliche Auflösung von veränderlichen bzw. aufeinander folgenden Reizen realisieren. Ein Maß für das zeitliche Auflösungsvermögen ist die Flimmerverschmelzungsfrequenz (**Bild C13-12**).

Wie aus **Bild C13-12** auch ersichtlich wird, ist die Flimmerverschmelzungsfrequenz in einem weiten peripheren Bereich höher als in der Fovea. Während die Sehschärfe zur Peripherie stark absinkt, steigt das zeitliche Auflösungsvermögen zunächst bis annähernd auf das doppelte an. Dieser Effekt sinkt mit dem Adaptationsniveau.

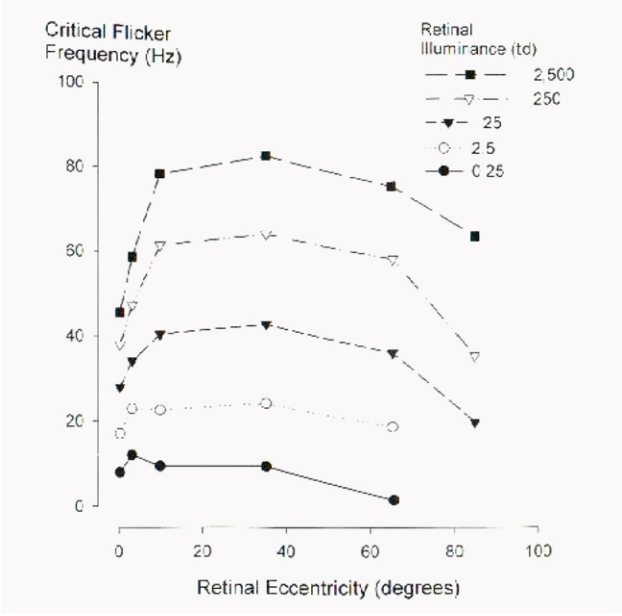


Bild C13-12 Flimmerverschmelzungsfrequenz in Abhängigkeit vom Netzhautort für verschiedene Adaptationszustände [3]

Untersuchungen zur Flimmerverschmelzungsfunktion [4], [5] haben gezeigt, dass die Flimmerverschmelzungsfrequenz logarithmisch mit der Intensität und der Fläche des flickernden Stimulus anwächst.

In Anlehnung an die spatial CSF (**Bild C13-10**) wurde eine zeitliche Kontrastempfindlichkeitsfunktion (temporal CSF) eingeführt (**Bild C13-13**). Hier zeigt sich ein ausgeprägter Bandpasscharakter. Man kann also geringe zeitliche Änderungen nur bei mittleren bis höheren Objektkontrasten sehen. Höherer Adaptationsleuchtdichten führen zum Erkennen zeitlicher Änderungen auch bei kleineren Kontrasten.

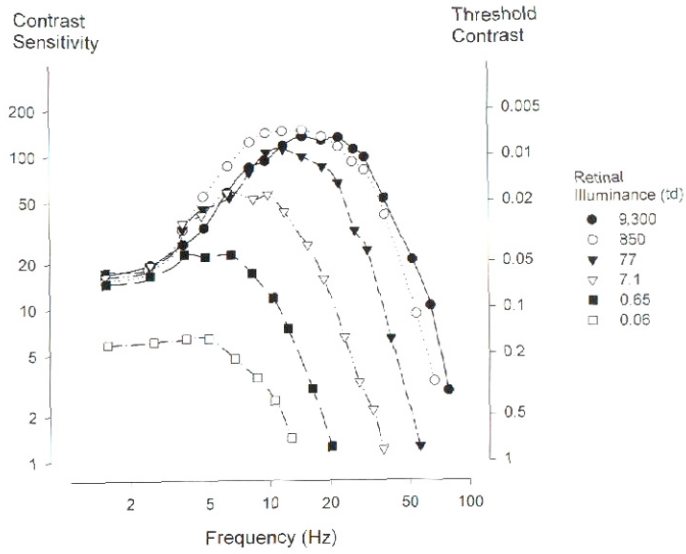


Bild C13-13 Zeitliche Kontrastempfindlichkeitsfunktion für verschiedene mittlere Leuchtdichten [3]

Ein Ausdruck für das zeitliche Auflösungsvermögen des visuellen Systems besteht in der Fähigkeit die Bewegung eines Objekts wahrzunehmen. Streng genommen ergibt sich die Feststellung von Bewegung jedoch aus dem Zusammenspiel örtlicher und zeitlicher Vorgänge. Man kann sich die Leuchtdichteverteilung eines Objekts aus einer Überlagerung von sinusförmigen Leuchtdichteverteilungen (verschiedene Ortsfrequenzen und Amplituden) vorstellen. Die einzelnen Wellen werden durch das optische System übertragen und im Bild wieder überlagert. Die Ortsfrequenzen eines über die so genannte Fourieranalyse „zerlegten" Objekts, bewegen sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit über die Netzhaut. Die zeitliche Frequenz für einen Punkt auf der Netzhaut ergibt sich dabei als Produkt von Ortsfrequenz und Geschwindigkeit. Damit ist der Anschluss an die zeitliche Kontrastempfindlichkeitsfunktion (**Bild C13-13**) hergestellt.

Literatur

[1] Eckert, M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr., 1. Aufl., Verlag Technik, Berlin München 1993
[2] Methling, D.: Bestimmen von Sehhilfen. 2. Aufl., Enke, Stuttgart 1996
[3] Noron, T. T., Corliss, D. A. et al.: The Psychophysical Measurement of Visual Functions. Woburn: Butterworth – Heinemann, 2002
[4] Tyler, C. W., Hammer, R. D.: Analysis of visual modulation sensitivity. IV. Validity of the Ferry-Porter law. Journal of the Optical Society of America 1990; 7; 743–758
[5] Granit, R., Harper, P.: Comparative studies on the peripheral and central retina: II. Synaptic reactions in the eye: American Journal of Physiology 1930; 95: 211–227

C14 Stahlleitplanken

Prof. Dr.-Ing. Ivan Prebil, Doc. Dr.-Ing. Robert Kunc

1 Einleitung

Die am Fahrbahnrand aufgestellten Leitplanken aus Metall müssen in kritischen Verkehrssituationen verhindern, dass Fahrzeuge von der Fahrbahn abkommen. Beim Verkehrsunfall muss die Leitplanke das beteiligte Fahrzeug zurück auf die Fahrbahn leiten bzw. standardgemäß im Bereich der plastischen Verformung der Metallleitplanke aufhalten. Die Art der Anordnung von Metallleitplanken und die Bedingungen (z. B. Anprall, Geschwindigkeit des Fahrzeugs beim Anprall usw.), unter denen die Leitplanken die Fahrzeuge im Straßenverkehr schützen sollen, sind in der Norm EN 1317 und der technischen Spezifikation für öffentliche Straßen festgelegt (**Bild C14-1**).

Reelle Situationen von Fahrzeuganprallen in Leitplanken haben gezeigt, dass beim Anprall der Kontakt des Fahrzeugs mit der Leitplanke nur selten unter den vorgeschriebenen Bedingungen auftritt, wie sie in der Norm EN 1317 für die Eignungsprüfung von Leitplanken empfohlen werden.



Bild C14-1 Anordnung von Leitplanken

2 Übersicht der Normen der EN 1317 und der technischen Spezifikation für öffentliche Straßen

Bei der Entwicklung bzw. der Prüfung von Leitplanken müssen die Bestimmungen der Norm EN 1317 berücksichtigt werden, die die zulässigen Grenzen der beim Anprall auftretenden Verzögerungen und die Wirkungsbereiche von Leitplanken regeln. Außer der Norm müssen auch alle technischen Spezifikationen für öffentliche Straßen, die die Bedingungen und Anordnungsarten von Leitplanken festlegen, beachtet werden.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_46

2.1 Empfehlungen der Norm EN 1317-1

Die Norm EN 1317-1 führt die bei der Analyse von Fahrzeuganprallen in Stahlleitplanken (SSP) zu berücksichtigenden Fahrzeugparameter an. Die Bedingungen werden in **Tabelle C14.1** beschrieben.

Tabelle C14.1 Spezifikation von Testfahrzeugen beim Anprall in Stahlleitplanken

Fahrzeugart	Pkw	Pkw	Pkw	Lkw	Bus	Lkw	Lkw	Lastzug
MASSE [kg]								
Fahrzeugmasse (1)	825	1300	1500	10 000	13 000	16 000	30 000	38 000
	± 40	± 65	± 75	± 300	± 400	± 500	± 900	± 1 100
mit Maximalbelastung (2)	100	160	180	–	–	–	—	–
Testdummy	75	–	—	–	–	–	–	–
Gesamttestmasse	900	1 300	1500	10 000	13 000	16 000	30 000	38 000
	± 40	± 65	± 75	± 300	± 400	± 500	± 900	± 1 100
DIMENSIONEN [m] (Grenzabweichung ± 5 %)								
Spur (vordere, hintere)	1,35	1,40	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Radumfang	–	–	–	0,46	0,52	0,52	0,55	0,55
Radstand (zwischen den am weitesten entfernten Achsen)	–	–	–	4,60	6,50	5,90	6,70	11,25
Achsenanzahl	1P+1(3)	1P+1	1P+1	1P+1	1P+1	1P+1/2	2P+2	1P+3/4
Abstand zum Boden (an der Fahrzeugecke bis zur Stoßstange gemessen)	–	–	–	0,58	–	0,58	0,58	0,58
LOKATION DES SCHWERPUNKT-ZENTRUMS [m] (Grenzabweichung ± 10 %)								
Längsabstand ab der ersten Achse (LTx) ± 10 %	0,90	1,10	1,24	2,70	3,80	3,10	4,14	6,20
Seitenabstand ab der Symmetrieachse des Fahrzeugs (LTy)	± 0,07	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10
ABSTAND ZUM BODEN (LTz)								
Fahrzeugmasse (± 10 %) (4)	0,49	0,53	0,53	–	–	–	–	–
Belastung / Widerstand (+15 %–5 %)	–	–	–	1,50	1,40	1,60	1,90	1,90

(1) einschließlich der Last für Lastkraftwagen
(2) einschließlich der Mess- und Aufnahmeausrüstung
(3) P– erste Achse (Lenkachse)
(4) Fahrzeugmasse

2.2 Index für die Schwere der Beschleunigung (ASI – accelaration severety index)

Der Index für die Schwere der Beschleunigung wird definiert durch die Grenzbeschleunigungen und die Beschleunigungen, die beim Fahrzeuganprall in die Stahlleitplanke auf das Fahrzeug und folglich auf die Insassen einwirken (C14-1). Die Empfehlung der EN 1317-1 sieht vor, dass die Fahrzeuginsassen angeschnallt sind. Dabei sind die Grenzbeschleunigungen des Fahrzeugs ($\hat{a}x, \hat{a}y, \hat{a}z$), die beim Anprall des Fahrzeug aufs Hindernis auftreten dürfen, schon festgelegt und betragen für die einzelnen Koordinatenachsen:

$$ASI(t) = \left[\left(\bar{a}x / \hat{a}x \right)^2 + \left(\bar{a}y / \hat{a}y \right)^2 + \left(\bar{a}z / \hat{a}z \right)^2 \right]^{1/2}, \qquad \text{(C14-1)}$$

$$\hat{a}x = 12g,\ \hat{a}y = 9g,\ \hat{a}z = 10g,\ g = 9{,}81 ms^{-2}.$$

$\bar{a}x, \bar{a}y, \bar{a}z$ sind durchschnittliche Beschleunigungswerte in der Zeitspanne 50 ms.

Das Messen von Beschleunigungen erfolgt in dem Punkt, der sich theoretisch im Fahrzeugschwerpunkt befindet (Bild C14-2). Wegen der Drehungen des Fahrzeugs kann es zu Abweichungen zwischen Ergebnissen kommen, die sich auf den Fahrzeugschwerpunkt beziehen, und jenen, die sich auf Punkte außerhalb des Schwerpunktes beziehen. Die Abweichungen werden in der Praxis mit dreiachsigen Beschleunigungsmessern festgelegt, die an der Längsachse des Fahrzeugs angebracht sind. Besondere Aufmerksamkeit gebührt längeren Fahrzeugen, wie beispielsweise Bussen, müssen doch die Simulationsergebnisse größtenteils mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen.

2.3 Normzusatz EN 1317-2: 1999/A:2006

Die Norm empfiehlt, dass der Grenzwert des Indexes für die Schwere der Beschleunigung ASI den Wert 1,0 für das Niveau A nicht überschreiten darf. Für das Niveau B muss er zwischen 1,0 < ASI ≤ 1,4 und für das Niveau C zwischen 1,4 < ASI ≤ 1,9 liegen (Tabelle C14.2). Das Kriterium hat seine Gültigkeit, wenn die theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes – THIV (theoretical head impact velocity) ≤ 33,0 km/h und die theoretische Kopfverzögerung nach dem Anprall – PHD (post-impact head deceleration) ≤ 20,0 g beträgt.

Der Wert des angeführten ASI-Parameters, bei dem es noch nicht zu Kopfverletzungen kommt, liegt bei ASI ≤ 1,0.

Die Niveaus A, B, C bestimmen die Sicherheitsgrenzen beim Zusammenstoß. Das Niveau A hat das höchste Sicherheitsniveau, gefolgt von Niveau B und C.

Tabelle C14.2 Niveaus der ASI-Parameterwerte

Niveaus	Parameterwerte	
A	ASI ≤ 1,0	THIV ≤ 33,0 [km/h] PHD ≤ 20,0 [g]
B	1,0 < ASI ≤ 1,4	
C	1,4 < ASI ≤ 1,9	

2.4 Theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes (THIV – theoretical head impact velocity)

Die theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes ist die Geschwindigkeit des Kopfes im Augenblick des Anpralls an die Fahrzeuginnenfläche. Mit *THIV* wird gemessen, wie ungünstig der Anprall beim Fahrzeugaufprall in die Leitplanke ist. *THIV* dient zur Bewertung der Belastungen und wird mit der Formel (C14-2) wiedergegeben, bei der v_x [m/s] die Geschwindigkeit des Kopfes in Richtung *X* und v_y [m/s] die Geschwindigkeit des Kopfes in Richtung *Y* bei einer Zeit *T* darstellt:

$$THIV = \left[v_x^2(T) + v_y^2(T) \right]^{1/2}. \qquad \text{(C14-2)}$$

Beim ersten Kontakt des Fahrzeugs mit der Leitplanke wird vorausgesetzt, dass die Geschwindigkeit des Kopfes und die des Fahrzeugs in Fahrtrichtung gleich sind. Die Fahrzeugbewegung in der Anprallphase verläuft vor allem in horizontaler Richtung (Bild C14-3).

Bei der Überprüfung der tatsächlichen Belastungen muss das Fahrzeug mit einem Beschleunigungsmesser zum Messen in Längs- und Querrichtung und einem System zur Prüfung der Winkelgeschwindigkeiten ausgestattet sein. Die Sensoren sollten in Punkt (C) (Bild C14-2) bzw. möglichst nahe dem Fahrzeugschwerpunkt angebracht sein. Der Drehwinkel um die Z-Achse soll mit einer Genauigkeit von mindestens 4,0° gemessen werden. Das Messmuster soll die Zeitspanne 50 ms nicht überschreiten. Der Parametergrenzwert, der die theoretische Anprallgeschwindigkeit des Kopfes bestimmt, soll die *THIV* ≤ 33,0 km/h nicht überschreiten.

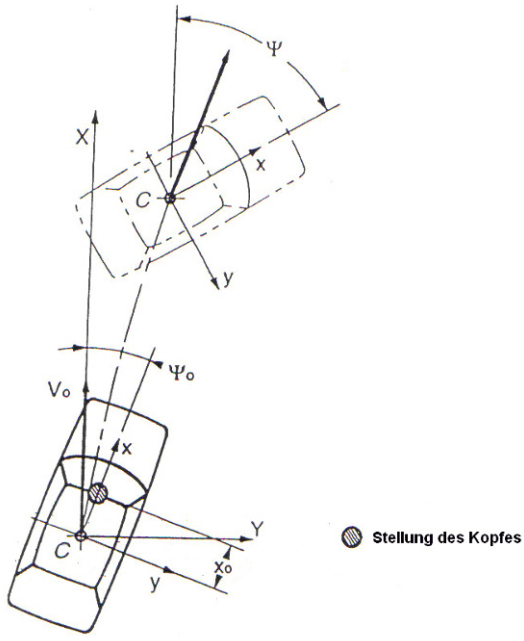


Bild C14-2 Fahrzeugschwerpunkt in Punkt C

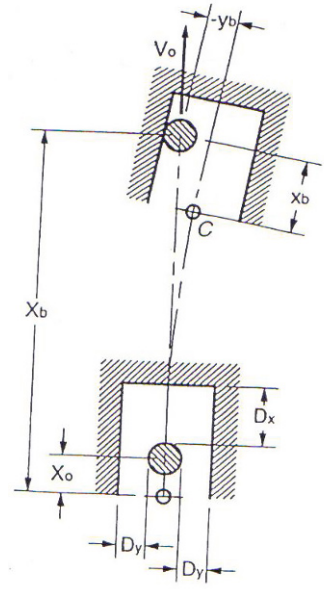


Bild C14-3 Anprall des Kopfes

2.5 Kopfverzögerung nach dem Anprall (PHD – post-impact head deceleration)

Untersuchungen zeigen, dass die Verzögerungen beim Anprall des Kopfes an die Fahrzeuginnenfläche den Verzögerungen beim Fahrzeuganprall in die Leitplanke gleich sind. Die *PHD* ist der höchste Wert der Verzögerung in Punkt C (**Bild C14-3**). Berechnet wird die *PHD* aus der durchschnittlichen Dauer der Verzögerung auf 10,0 ms, die sich auf die gemessenen Komponenten $\ddot{X}_C$ und $\ddot{Y}_C$ (**Bild C14-2**, **Bild C14-3**) bezieht. Der Parametergrenzwert wird aus den Daten der Fahrzeugsbewegung während und nach dem Anprall in die Leitplanke bestimmt und als relative Verzögerung in Bezug auf die Erdbeschleunigung g ausgedrückt. Der *PHD*-Grenzwert liegt bei 20,0 g und wird mit der Formel (**C14-3**) wiedergegeben, bei der X_C [m] und Y_C [m] die Bewegungen des Punktes C während und nach dem Anprall bedeuten.

$$PHD = MAX\left(\prec \ddot{X}_C \succ^2 + \prec \ddot{Y}_C \succ^2\right)^{1/2} \quad \text{za } t \succ T. \qquad \text{(C14-3)}$$

2.6 Index der Fahrzeugkabinenverformung (VCDI – vehicle cockpit deformation index)

Der Index der Fahrzeugkabinenverformung bezeichnet die Lage und die Dimension der Verformung des Fahrzeuginnenraums (**Bild C14-4**). Der VCDI gibt die Standardbeschreibung der als Folge des Anpralls aufgetretenen Deformation des Fahrzeuginnenraums an. Die Messung soll mit einer Genauigkeit von bis zu ± 0,02 m durchgeführt werden.

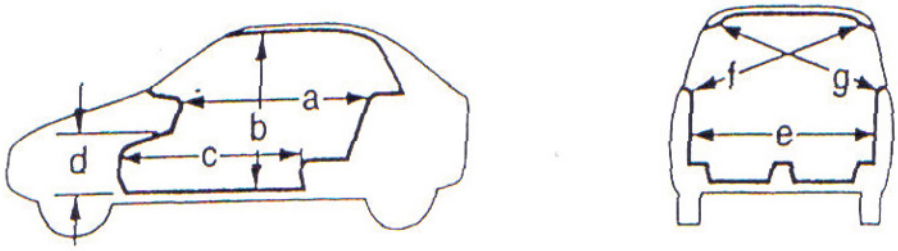


Bild C14-4 Messung der Fahrzeugkabinenverformung

2.7 Kinetische Energie und theoretische durchschnittliche Anprallkraft

Beim Aufprall von Lastkraftwagen in Leitplanken ist wichtig, dass die Leitplanke das Fahrzeug zurückhält. Es ist nicht erlaubt, dass das Fahrzeug die Leitplanke durchbricht oder überspringt (**Bild C14-5**). Bei Personenkraftwagen mit geringer Masse (m) ist außer dem schon Erwähnten noch die durchschnittliche Kraft ($\bar{F}$), die durchschnittliche Geschwindigkeit v_n und der Weg (S_n) beim Anprall wichtig, wobei die Leitplanke beim Anprall des Fahrzeugs eine möglichst große Menge kinetischer Energie (W_k) und eine möglichst geringe Verzögerung des Fahrzeugs beim Anprall in die Leitplanke (a_n) absorbieren muss (**C14-4** bis **C14-8**):

$$W_k = \frac{m \cdot v_n^2}{2} = \bar{F} \cdot S_n \left[kJ\right], \qquad \text{(C14-4)}$$

$$\bar{F} = \frac{m \cdot v_n^2}{2 \cdot S_n}[N], \tag{C14-5}$$

$$v_n = v \cdot \sin\alpha\,[m/s], \tag{C14-6}$$

$$S_n = c \cdot \sin\alpha + b \cdot (\cos\alpha - 1) + S_b\,[m], \tag{C14-7}$$

$$\bar{a}_n = \frac{v_n^2}{2 \cdot S_n}\left[m/s^2\right]. \tag{C14-8}$$

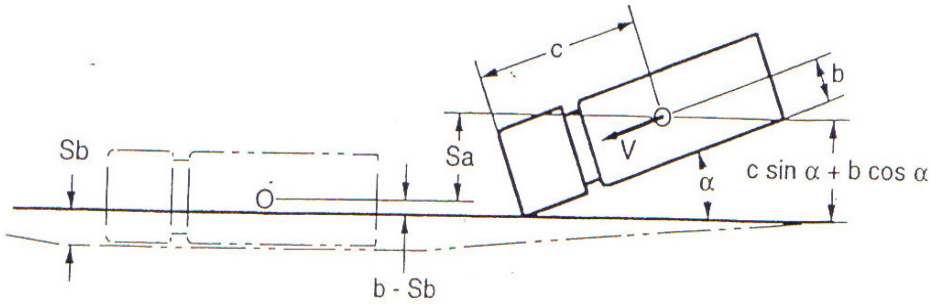


Bild C14-5 Verlagerung der Schwerpunktlage in der Anprallphase

2.8 Stufen der Fahrzeugrückhaltung

In **Tabelle C14.3** werden die Aufhaltestufen bestimmt, die als Voraussetzung für Leitplanken je nach Straßenkategorie gelten. Die Aufhaltestufen beeinflussen die kinetische Energie des Fahrzeugs beim Anprall und die Abweichung der Leitplanke. Die Abweichung der Leitplanke hängt von der durchschnittlichen Kraft ab, die auf die Leitplanke beim Fahrzeuganprall einwirkt.

Tabelle C14.3 Aufhaltestufen

Aufhaltestufen	Kinetische Energie [kJ]	Abweichung der Leitplanke Sb [m]					
		0,1	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
		Durchschnittliche Kraft F [kN]					
T1	6,2	16,8	9,3	5,8	4,2	3,3	2,7
T2	21,5	36,5	24,2	16,7	12,7	10,3	8,6
T3	36,6	46,7	33,8	24,7	19,4	16,0	13,6
N1	43,3	59,2	42,0	30,3	23,7	19,4	16,5
N2	81,9	112,0	79,4	57,2	44,7	36,7	31,1
H1	126,6	93,6	76,6	61,7	51,6	44,4	28,9
H2	287,5	133,0	116,8	100,4	88,1	78,5	70,8
H3	462,1	266,4	227,1	189,8	163,0	142,9	127,1
H4a	572,0	311,3	267,6	225,4	194,7	171,4	153,1
H4b	724,6	269,1	242,1	213,6	191,1	172,8	157,8

3 Übersicht der Norm EN 1317-2

3.1 Tragfähigkeitskriterien für Leitplanken und Testkriterien

Die Tragfähigkeitskriterien für Leitplanken werden anhand der Anforderungen aus **Tabelle C14.4** und in Übereinstimmung mit den in **Tabelle C14.5** definierten Anprallkriterien bestimmt.

Tabelle C14.4 Aufhaltevermögen von Leitplanken beim Fahrzeuganprall

Aufhaltestufen	Genehmigte Tests
Geringes Aufhaltevermögen	
T1	TB 21
T2	TB 22
T3	TB 41 und TB 21
Normales Aufhaltevermögen	
N1	TB 31
N2	TB 32 und TB 11
Hohes Aufhaltevermögen	
H1	TB 42 und TB 11
H2	TB 51 und TB 11
H3	TB 61 und TB 11
Sehr hohes Aufhaltevermögen	
H4a	TB 71 und TB11
H4b	TB 81 und TB 11

ANMERKUNG 1: Das geringe Aufhaltevermögen wird nur für zeitweilige Leitplanken angewandt. Diese temporären Leitplanken können ebenso auf ein hohes Aufhaltevermögen getestet werden.

ANMERKUNG 2: Eine erfolgreich durchgeführte Prüfung der Leitplanken bei gegebenem Aufhaltevermögen bedeutet, dass die Testbedingungen von geringen Aufhaltestufen berücksichtigt wurden, mit Ausnahme der Stufen N1 und N2, die die Stufe T3 nicht einbezieht.

ANMERKUNG 3: Wegen der Prüfung und Entwicklung sehr belastungsstarker Leitplanken in verschiedenen Ländern werden verschiedene Typen von Lastkraftwagen verwendet. Aus diesem Grund sind in der Norm beide Tests, TB 71 und TB 81, vorhanden. Ebenso darf die Gleichwertigkeit der Aufhaltestufen H4a und H4b nicht berücksichtigt werden, da unter ihnen keine Hierarchie besteht.

Tabelle C14.5 Testkriterien von Fahrzeuganprallen in Leitplanken

Prüfung	Anprall-geschwindigkeit [km/h]	Anprallwinkel [°]	Fahrzeug-gesamtmasse [kg]	Fahrzeugart
TB 11	100	20	900	Pkw
TB 21	80	8	1300	Pkw
TB 22	80	15	1300	Pkw
TB 31	80	20	1500	Pkw
TB 32	110	20	1500	Pkw
TB 41	70	8	10000	Lkw
TB 42	70	15	10000	Lkw
TB 51	70	20	13000	Bus
TB 61	80	20	16000	Lkw
TB 71	65	20	30000	Lkw
TB 81	65	20	38000	Sattelzug

Bei der Bewertung von Leitplanken bei den Aufhaltestufen T3, N2, H1, H2, H3, H4a und H4b müssen zwei verschiedene Prüfungen durchgeführt werden:

- Prüfung der höchsten Belastungsstufe für einzelne Leitplanken und
- Prüfung mit einem leichten Fahrzeug (900,0 kg), um die höchsten Sicherheitskriterien beim Aufprall eines leichten Fahrzeugs in die Leitplanke zu erfüllen.

3.2 Wirkungsbereich der Leitplanke

Der Wirkungsbereich der Leitplanke während der Aufprallanalyse wird durch die dynamische Durchbiegung des verformten Leitplankenbereichs bestimmt. Der Wirkungsbereich der Leitplanke stellt im Straßenquerschnitt die Distanz zwischen der eigentlichen Leitplanke vor dem Anprall des Fahrzeugs und dem am weitesten entfernten Punkt an der Leitplanke nach deren Verformung oder Abweichung von der ursprünglichen Lage wegen des Fahrzeugsanpralls dar. Die dynamische Durchbiegung der Leitplanke (D) (**Bild C14-6**) stellt die größte seitliche Verschiebung der verkehrszugewandten Leitplankenfläche dar. Eine genaue dynamische Durchbiegung ist beim Anprall schwer zu bestimmen, daher wird für die dynamische Durchbiegung der Wirkungsbereich der Verschiebung der Leitplanke (W) (**Bild C14-6**) berücksichtigt. Die Wirkungsbereiche von Leitplanken werden nach Wert in acht Klassen unterteilt (**Tabelle C14.6**).

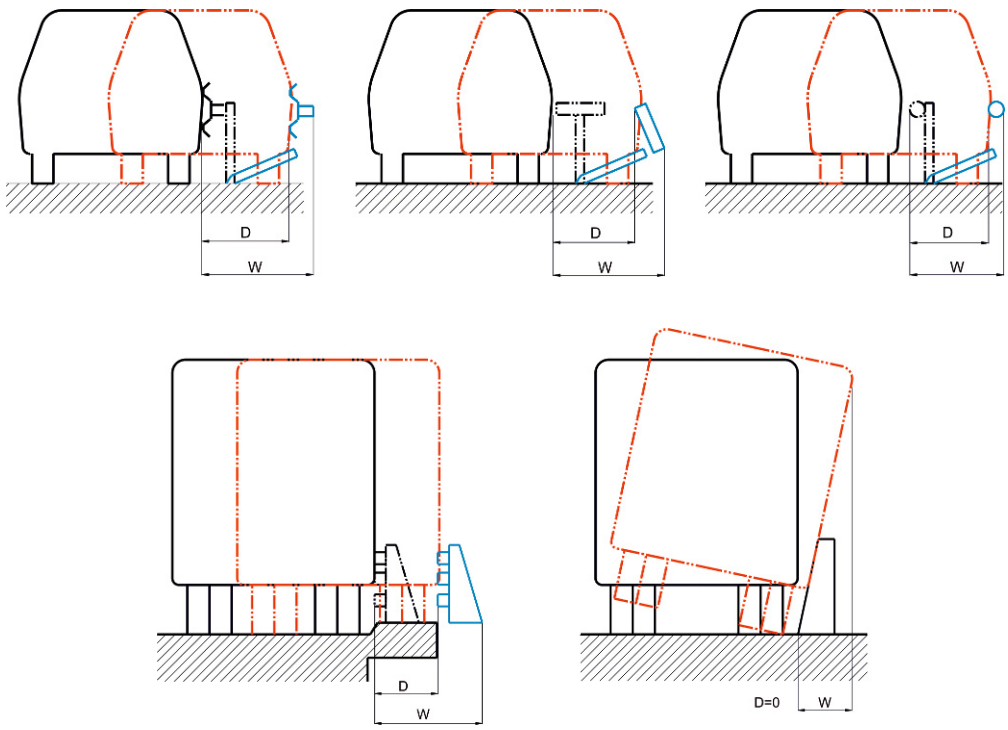


Bild C14-6 Verformungen der Leitplanke und Wirkungsbereich

Tabelle C14.6 Klassen von Wirkungsbereichen

Klassen von Wirkungsbereichen	Werte der Wirkungsbereiche [m]
W1	W ≤ 0,6
W2	W ≤ 0,8
W3	W ≤ 1,0
W4	W ≤ 1,3
W5	W ≤ 1,7
W6	W ≤ 2,1
W7	W ≤ 2,5
W8	W ≤ 3,5

ANMERKUNG 1: Die Wirkungsbereichsklasse unter W1 muss genauer gekennzeichnet werden.

ANMERKUNG 2: Die dynamische Durchbiegung und der Wirkungsbereich bestimmen die Bedingungen für die Anordnung und das richtige Funktionieren von Leitplanken.

ANMERKUNG 3: Die Verformung hängt vom Leitplankentyp und von den Testcharakteristika des Anpralls ab.

3.3 Parameter von Leitplanken

Die Belastungsanalyse beim Fahrzeuganprall in die Leitplanke berücksichtigt nicht die Fahrzeugrückhaltung. Nach dem Fahrzeuganprall in die Leitplanke dürfen sich einzelne Teile der beschädigten Leitplanke weder lösen noch in irgendeiner Form die übrigen Verkehrsteilnehmer behindern. Des Weiteren dürfen die Leitplankenteile weder den Fahrzeuginnenraum beschädigen noch Verformungen am Insassenraum verursachen, kann dies doch zu Verletzungen der Insassen führen. Der Fahrzeuganprall in die Leitplanke soll ungefähr im ersten Drittelpunkt der Aufstelllänge aus der Annäherungsrichtung zum Anprallpunkt hin erfolgen.

3.4 Fahrzeugparameter

Das Fahrzeug muss während und nach dem Anprall in die Leitplanke immerzu in der vertikalen Lage bleiben, erlaubt ist nur ein leichtes Schwingen um die drei Hauptachsen des Koordinatensystems (**Bild C14-7**) mit Ausgangspunkten im Fahrzeugschwerpunkt. Nach dem Anprall des Fahrzeugs in die Leitplanke dürfen die Fahrzeugspuren die parallel zur nichtverformten Leitplanke auf einer Distanz A verlaufende Linie nicht überschreiten (**Tabelle C14.7**). Zur Distanz A dazugerechnet wird noch die Fahrzeugbreite und 16 % der Spurlänge des Fahrzeugs im Bereich von Distanz B ab der letzten Unterbrechung der Spuren, die parallel zur nichtverformten Leitplanke verlaufen.

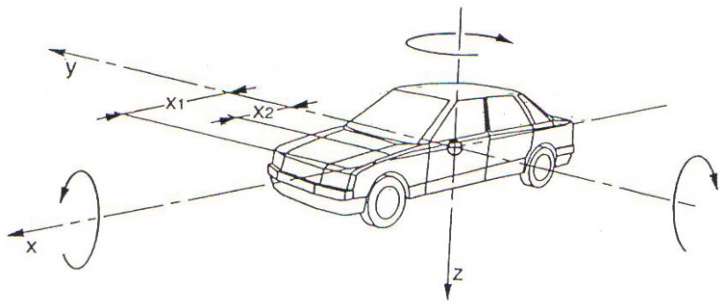


Bild C14-7 Erlaubtes leichtes Schaukeln in die markierten Richtungen

Tabelle C14.7 Kriterien für die Berechnung der erlaubten Grenze der Fahrzeugspur nach dem Anprall

Fahrzeugtyp	A [m]	B [m]
Pkw	2,2	10,0
Übrige Fahrzeuge	4,4	20,0

3.5 Testgelände

Gewöhnlich ist das Testgelände eben oder weist eine Steigung auf, die nicht mehr als 2,5 % beträgt. Während der Tests muss das Gelände fest sein. Dort darf sich kein Wasser, Eis oder Schnee befinden. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs muss kurz vor dem Anprall konstant sein.

4 Empfehlungen der Norm EN 1317-3

In werden die Testbedingungen des Anpralls in verschiedenen Geschwindigkeitsklassen (**Tabelle C14.8**) beschrieben. Die Testbedingungen werden durch folgende Kriterien bestimmt:

- die Widerstandfähigkeit des Fahrzeugs
- den Fahrzeugweg
- die Fahrzeugdeformation
- den Weg und die Anordnung des Fahrzeug auf der Fahrbahn sowie
- die Testbedingungen beim Fahrzeuganprall.

Tabelle C14.8 Testkriterien des Fahrzeuganpralls

Prüfung	Anprallart	Fahrzeuggesamt-masse [kg]	Anprallgeschwindig-keit [km/h]	Fahrtrichtung Bild C14-8
TC 1.1.A TC 1.1.B TC 1.1.C	Frontalanprall	900	50 80 100	1
TC 1.2.B TC 1.2.C		1300	80 100	1
TC 1.3.B TC 1.3.D		1500	80 110	1
TC 2.1.B TC 2.1.C	Frontalanprall, Verschiebung um 1/4 des Fahrzeugs	900	80 100	2
TC 3.2.B TC 3.2.C TC 3.3.D	Frontalanprall unter einem Winkel von 15°	1300 1300 1500	80 100 110	3
TC 4.2.A TC 4.2.B TC 4.2.C TC 4.2.D	Seitenanprall unter einem Winkel von 15°	1300 1300 1300 1500	50 80 100 110	4
TC 5.2.B TC 5.2.C TC 5.2.D	Seitenanprall unter einem Winkel von 165°	1300 1300 1500	80 10 110	5
ANMERKUNG 1: Die vertretbaren Kriterien für jede Klasse sind in **Tabelle C14.9** angeführt.				

Tabelle C14.9 Geschwindigkeitsklassen für Fahrzeuge

Geschwindigkeitsklasse	A	B	C	D
Geschwindigkeit [km/h]	50	80	100	110

Die Testbedingungen der angegebenen Klassen sind in **Tabelle C14.10** angegeben und nach Stärke der absorbierten kinetischen Energie des Fahrzeugs klassifiziert. Ein erfolgreicher Test der Leitplanke in einer bestimmten Klasse bestätigt auch die Eignung der Leitplanke für niedrigere Klassen, außer wenn die Reaktion bei niedrigeren Anprallklassen nicht zufriedenstellend wäre. In diesem Fall ist es notwendig, einen Zusatztest auf Niveau 1.1.A durchzuführen, bei dem die tatsächlichen Bedingungen der Leitplanke demonstriert werden.

Tabelle C14.10 Zusätzliche Bedingungen

Bedingungen		**Kriterien** (Annäherungsart zum Anprallpunkt/Masse/Geschwindigkeit)
Klasse	**Typ**	
A	NR	1.1.A
(50)	R	1.1.A, 4.2.A
B	NR	1.1.B, 1.2.B, 2.1.B, 3.2.B
(80)	R	1.1.B, 1.2.B, 2.1.B, 3.2.B, 4.2.B, 5.2.B*
B1	NR	1.2.B, 2.1.B
(80)	R	1.2.B, 2.1.B, 4.2.B
C	NR	1.1.C, 1.2.C, 2.1.C, 3.2.C
(100)	R	1.1.C, 1.2.C, 2.1.C, 3.2.C, 4.2.C, 5.2.C*
D	NR	1.1.C, 1.3.D, 2.1.C, 3.3.D
(110)	R	1.1.C, 1.3.D, 2.1.C, 3.3.D, 4.3.D, 5.3.D*

NR (non - redirective) => keine Rückleitung

R (redirective) => Rückleitung

ANMERKUNG 1: Die mit (*) gekennzeichneten Prüfungen sind nicht erforderlich, wenn ein Zugang mit Fahrzeugen nicht möglich ist.

ANMERKUNG 2: Die Anzahl der für Klasse B1 notwendigen Tests ist verringert, da die Verformungen der Leitplanke und das Fahrzeugverhalten nicht mit Klasse B kompatibel sind.

4.1 Anprallstufen

Die Anprallstufen (W1, W2, W3, W4) werden je nach Fahrzeugposition nach dem Anprall bestimmt. Die Fahrzeuge müssen nach dem Anprall in einem bestimmten Bereich bleiben, der durch die Distanzen Wa und Wb (**Tabelle C14.11**) eingegrenzt wird. Bei den Anprallstufen W1 und W2 sowie den Tests 1, 2, 3, 4, 5 (**Bild C14-8**) dürfen die Grenzen Wa und Wb, die durch die Linien Aa und Ab (**Bild C14-9**) bestimmt sind, nicht überschritten werden. Gleiches gilt für die Stufen W3 und W4, jedoch mit der Ausnahme, dass das Fahrzeug beim Test 3 die nichtspezifische Distanz auf der Ausgangsseite überqueren darf.

Tabelle C14.11 Anprallstufen mit Rückprallzonen Wa und Wb

Anprallstufen W	Anprallseite Wa [m]	Ausgangsseite Wb [m]
W1	4	4
W2	6	6
W3	4	≥ 4, Test 3 (**Bild C14-8**)
W4	6	≥ 6, Test 3 (**Bild C14-8**)

4.2 Verformungsklassen von Leitplanken nach dem Anprall

Die Verformungsklassen von Leitplanken nach dem Anprall werden durch das Ausmaß der dauerhaften Deformationen nach dem Anprall bestimmt und in sechs Klassen von D1 bis D6 beschrieben (**Tabelle C14.12**. Bei den Verformungsklassen D1 bis D3 darf das Fahrzeug bei den Tests 1, 2, 3, 4, 5 (**Bild C14-8**) die Grenzen Da und Db nicht überschreiten, die mit den Linien Aa und Ab (**Bild C14-9**) bestimmt sind. Gleiches gilt für die Klassen D4 bis D6, doch mit der Ausnahme, dass das Fahrzeug beim Test 3 die nichtspezifische Distanz auf der Ausgangsseite überqueren darf.

Tabelle C14.12 Verformungsklassen von Leitplanken nach dem Anprall

Verformungsklassen	Anprallseite Da [m]	Ausgangsseite Db [m]
D1	1	1
D2	2	2
D3	3	3
D4	1	≥ 1, Test 3 (**Bild C14-8**)
D5	2	≥ 2, Test 3 (**Bild C14-8**)
D6	3	≥ 3, Test 3 (**Bild C14-8**)

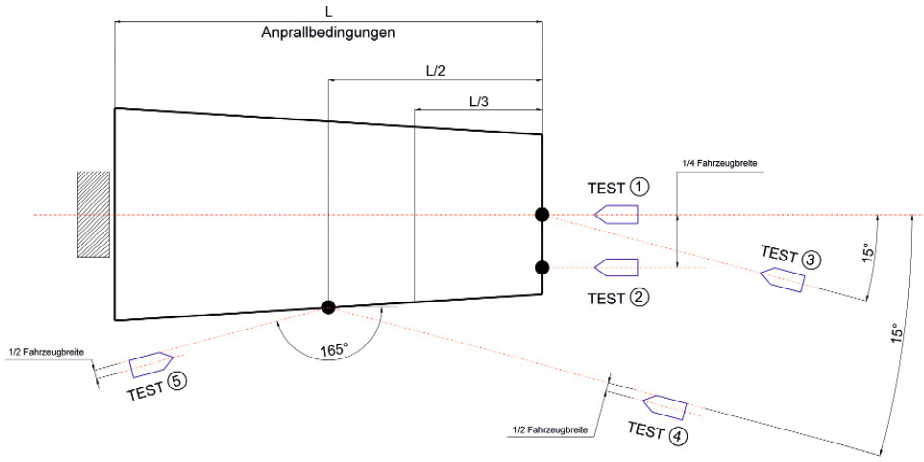


Bild C14-8 Annäherungswege von Fahrzeugen zur Leitplanke für die Aufpralltests 1 bis 5

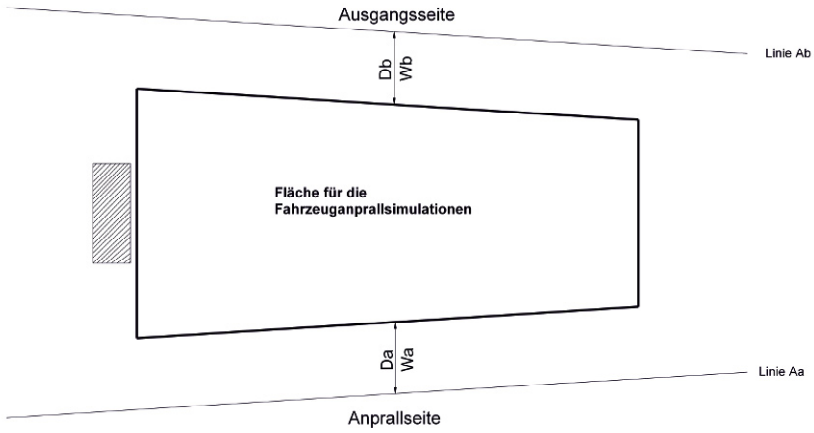


Bild C14-9 Grenzen für die Rückprallbereiche Wa/Da und Wb/Db beim Fahrzeuganprall

5 Empfehlungen der Norm EN 1317-4

Die Konstruktionsform des Endstücks muss einen Übergang haben, der von der Fahrbahn bis zur endgültigen Plankenhöhe ansteigt, wo er mit der Leitplanke ordnungsgemäß zusammengebaut ist (**Bild C14-10**). Die Anfangs- und die Endkonstruktion sind zwei wesentliche Teile des Leitplankensystems und dienen der aufgestellten Leitplanke als Stütze. Schlecht dimensionierte und eingebaute Endkonstruktionen können den Schwachpunkt der Leitplanke darstellen. Bei der Gestaltung von Leitplankenendstücken muss der Anforderung nach einer solchen Ausführung gerecht werden, die das Durchdringen der Leitplanke in den Fahrzeuginnenraum verhindert.

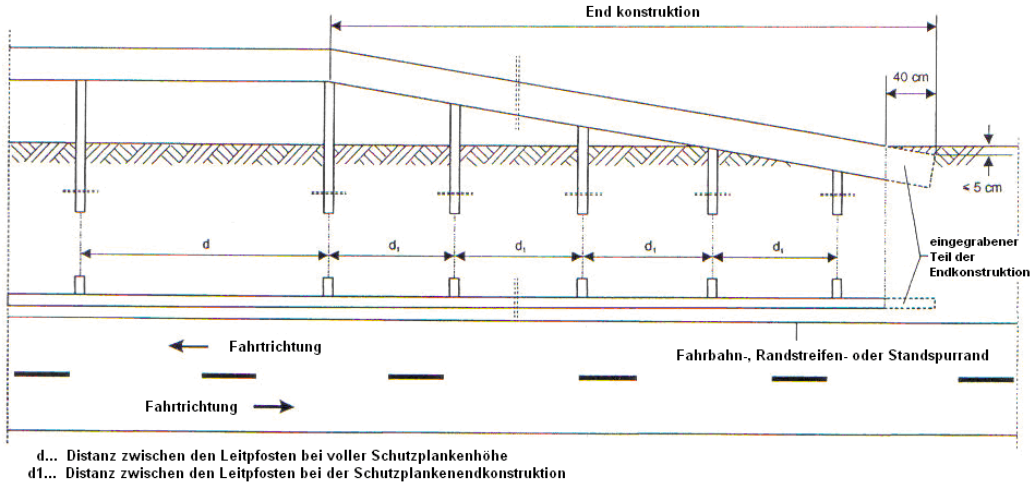


Bild C14-10 Endkonstruktion der Stahlleitplanke auf der Anprall- und Abschlussseite

Auf Autobahnen, Schnellstraßen und öffentlichen Straßen mit einem jahresdurchschnittlichen täglichen Verkehr (DJTV) von ≥ 3000 Fahrzeugen beträgt die empfohlene Länge des Leitplankenendstücks 12,0 m. Auf anderen Straßen mit einem DJTV von < 3000 liegt die Länge der Endkonstruktion auf der Anprall- und Abschlussseite bei 4,0 m. Die Leitpfosten des Leitplankenendstücks müssen in einer Distanz d_1 aufgestellt sein, um das gleiche Aufhaltevermögen zu erreichen wie bei voller Leitplankenhöhe. Bei einer Unterbrechung der Stahlleitplanke wegen eines Anschlusses ist es notwendig, das Leitplankenendstück mit einer Abrundung in voller Höhe zu versehen.

5.1 Aufprall des Fahrzeugs in die Endkonstruktion

Die Endkonstruktion hat den Test erfolgreich bestanden, wenn alle Bedingungen niedriger Niveaus erfüllt sind. Wenn Test 1 nicht durchgeführt werden kann, wird Test 2 durchgeführt (**Bild C14-11**, **Bild C14-12**). Bei den Tests 1 und 2 soll der gewählte Punkt nicht unter 0,25 m liegen. Die Testspezifikationen sind in **Tabelle C14.13** angeführt. Die Werte THIV, ASI und PHD sind in der Norm EN 1317-1 vorgeschrieben.

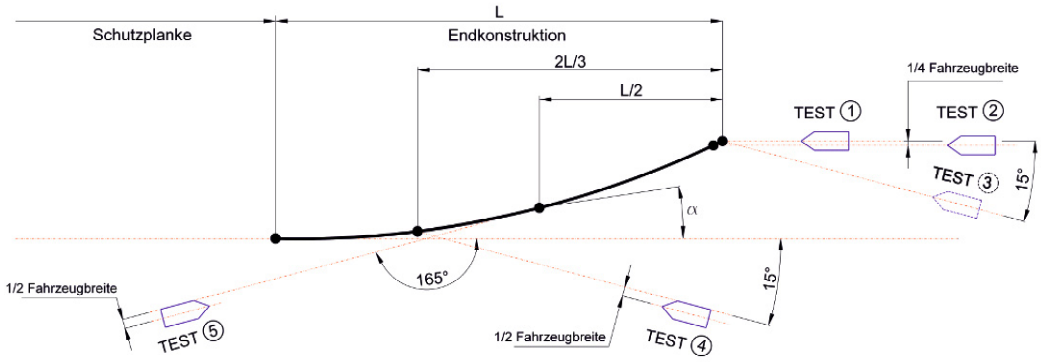


Bild C14-11 Annäherung des Fahrzeugs in die gekrümmte Endkonstruktion für die Aufpralltests 1 bis 5

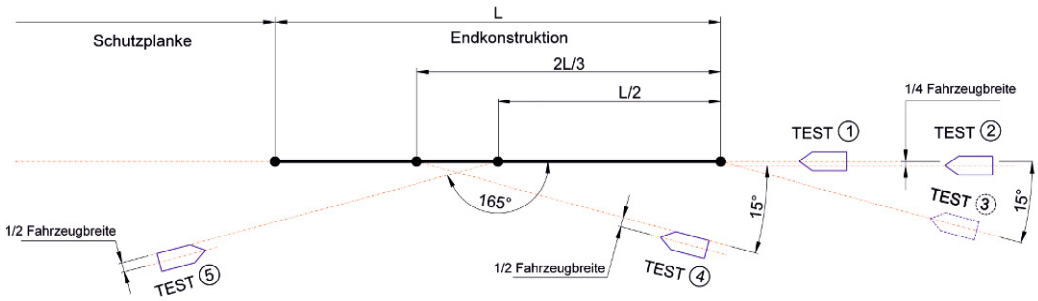


Bild C14-12 Annäherung des Fahrzeugs in die gerade Endkonstruktion für die Aufpralltests 1 bis 5

Tabelle C14.13 Testkriterien für Fahrzeuge beim Anprall in die Endkonstruktion

Niveau	Lokation		Tests			
			Anprallart	Test N°	Fahrzeug-masse [kg]	Geschwin-digkeit [km/h]
P1	A		Frontalanprall, Verschiebung um 1/4 des Fahrzeugs	2	900	80
P2	A	U	Frontalanprall, Verschiebung um 1/4 des Fahrzeugs	2	900	80
			Seitenanprall unter einem Winkel von 15° auf einer Länge von 2/3 L	4	1300	80
		D	Seitenanprall unter einem Winkel von 165° auf einer Länge von 1/2 L	5	900	80
P3	A	U	Frontalanprall, Verschiebung um 1/4 des Fahrzeugs	2	900	100
			Frontalanprall	1	1300	100
			Seitenanprall unter einem Winkel von 15° auf einer Länge von 2/3 L	4	1300	100
		D	Seitenanprall unter einem Winkel von 165° auf einer Länge von 1/2 L	5	900	100
P4	A	U	Frontalanprall, Verschiebung um 1/4 des Fahrzeugs	2	900	100
			Frontalanprall	1	1500	110
			Seitenanprall unter einem Winkel von 15° auf einer Länge von 2/3 L	4	1500	110
		D	Seitenanprall unter einem Winkel von 165° auf einer Länge von 1/2 L	5	900	100
U => Endkonstruktion bei Straßensteigung			A => Endkonstruktion bei Steigung und Gefälle			
D => Endkonstruktion bei Straßengefälle			L => Länge der Endkonstruktion			

5.2 Verformungen der Endkonstruktion

Die dauerhafte Deformation des Endstücks nach dem Anprall ist mit den Linien Aa und Ad definiert (**Bild C14-13**), die parallel zur Leitplanke und tangential zur verformten Endkonstruktion auf der Anprall- und Ausgangsseite verlaufen. In **Tabelle C14.14** werden die Abweichungsniveaus für die Abstände Da und Dd definiert, die mit den Linien Aa und Ad begrenzt sind (**Bild C14-13**).

Tabelle C14.14 Abweichungsniveaus

Abweichungsniveaus	Abstände der Abweichungsniveaus ZE [m]	
	Da [m]	Dd [m]
D1	0,5	0,5
D2	1,5	1,5
D3	3,0	3,0
D4	0,5	ohne Beschränkungen
D5	1,5	ohne Beschränkungen
D6	3,0	ohne Beschränkungen

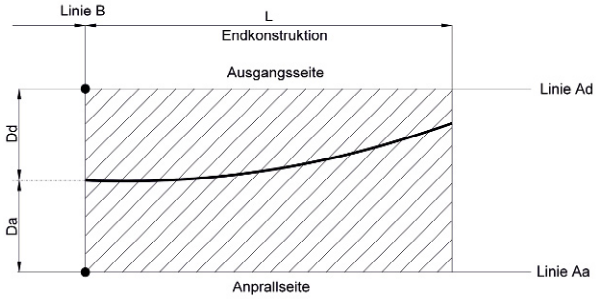


Bild C14-13 Grenzen der dauerhaften Verformungen der Endkonstruktion

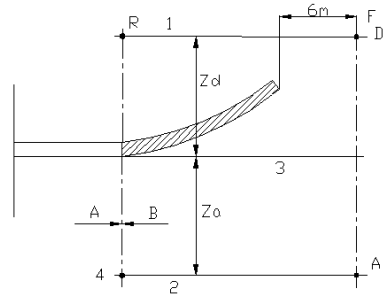


Bild C14-14 Grenzen des Testbereichs der Fahrzeugbewegung in die Endkonstruktion

5.3 Testparameter von Endkonstruktionen und Fahrzeugen

Nach dem Fahrzeuganprall in die Endkonstruktion dürfen wesentliche Teile der beschädigten Endkonstruktion sich weder lösen noch in irgendeiner Form die anderen Verkehrteilnehmer beinträchtigen. Des Weiteren dürfen Teile der Endkonstruktion weder den Fahrzeuginnenraum beschädigen noch Verformungen am Insassenraum verursachen.

Für das Testniveau Z1 (**Tabelle C14.16**) sind ein etwas größerer Schwingungswinkel des Testfahrzeugs um die Achse X erlaubt. Um die Achsen Y und Z ist nur ein mäßiges Schwingen erlaubt. Die Achsen des Koordinatensystems haben ihren Ausgangspunkt im Fahrzeugschwerpunkt (**Bild C14-7**). Im Falle, dass das Fahrzeug auf die Seite kippt, darf die Fahrzeuggeschwindigkeit entlang der Leitplanke im Augenblick des Kontakts der Fahrzeugseite mit dem Boden nicht den Wert von 15,0 km/h übersteigen. Für die übrigen Niveaus ist ein leichtes Schwingen um alle Achsen des Hauptkoordinatensystems erlaubt, und zwar während und nach dem Anprall des Fahrzeugs in die Endkonstruktion, das Fahrzeug darf jedoch auf keinen Fall auf die Seite kippen. Das Verlassen des Fahrzeugs aus dem Testbereich wird durch die Linien A und D bestimmt, die von den Distanzen Za und Zd begrenzt werden (**Bild C14-14**). Die Werte der Indizes ASI, THIV und PHD werden gemäß der Norm EN 1317-1 berücksichtigt:

- 1 Ausgangsseite
- 2 Anprallseite
- 3 verkehrszugewandte Seite der Leitplanke

- 4 Ende der Endkonstruktion
- A Leitplanke
- B Endkonstruktion

Bei den Tests 1, 2, 4 und 5 (**Bild C14-11**, **Bild C14-12**) darf das Testfahrzeug die in **Tabelle C14.15** bestimmten Linien nicht überschreiten, außer die Testgeschwindigkeit liegt um 10 % unter der vorgeschriebenen Geschwindigkeit. Bei den Tests 4 und 5 (**Bild C14-11**, **Bild C14-12**) darf das Testfahrzeug die in **Tabelle C14.15** bestimmten Linien nicht überschreiten, außerdem muss das Fahrzeug bei Test 4 auf der Anprallseite des Testbereichs bleiben.

Tabelle C14.15 Grenze des Testbereichs, die nicht überschritten werden darf

Test	Grenze des Testbereichs, die nicht überschritten werden darf
1, 2	F, A, D
4, 5	A

Tabelle C14.16 Grenzen beim Anprall in die Endkonstruktion

Anprallstufe	Anprallseite Za [m]	Ausgangsseite Zd [m]
Z_1	4	4
Z_2	6	6
Z_3	4	Ohne Beschränkungen
Z_4	6	Ohne Beschränkungen

6 Technische Spezifikation für öffentliche Straßen TSC 02.210: 2008; Leit-Planken, Bedingungen und Montagearten

Die **Höhe** des oberen Leitplankenrandes muss mindestens 0,75 m über dem Fahrbahnrand liegen (gemessen von einer am Fahrbahnrand angebrachten Waagerechten) (**Bild C14-15** bis **Bild C14-30**).

Der Leitpfosten der Stahlleitplanke wird in den Boden eingeschlagen und ist in der Regel 1,9 m lang. Die Leitpfosten sind je nach erforderlichem Aufhaltevermögen in einer Entfernung von 1,33 m, 2,0 m und 4,0 m angeordnet. Im Fall, dass die Pfosten nicht in den Boden eingeschlagen werden können bzw. wenn die Leitplanken an einem Übergang über den Mittelstreifen verlaufen, ist es notwendig, die Leitpfosten mit einer Unterlegplatte an eine im Fundament eingebaute und verankerte Platte zu befestigen (**Bild C14-28**).

Wo ein Fundament nicht möglich ist, ist es sinnvoll, Metalleinsätze in den Fahrbahnkörper einzubauen, in die die Leitpfosten der Stahlleitplanke gestellt werden (**Bild C14-28**). Dabei muss eine geeignete Abdeckung der Einsatzöffnung gewährleistet werden, und zwar sowohl dann, wenn die Leitplanke steht, als auch beim Entfernen der Stahlleitplanke.

Die Entfernung der Leitplanke von der Fahrbahn muss mindestens 0,50 m vom Fahrbahn- oder Standspurrand betragen (**Bild C14-25**). Bei einem 0,07 m hohen Randstein kann diese gemäß den Montagebedingungen von Stahlleitplanken auch beliebig größer sein (**Bild C14-15**).

Bei der Aufstellung von Stahlleitplanken vor einem Hindernis, wie beispielweise einer Lärmschutzwand, muss die Entfernung der Leitplanke zum Hindernis mindestens 1,0 m betragen (Bild C14-22). Auf einem ≥ 2,8 m breiten Mittelstreifen werden einseitige Stahlleitplanken mit Distanzhalter aufgestellt. Im Falle einer Raumbeschränkung können auch doppelseitige Stahlleitplanken mit einem Distanzhalter aufgestellt werden, jedoch muss dabei der Wirkungsbereich (W) berücksichtigt werden (Bild C14-29).

Leitplanken für Fußgänger und Radfahrer dienen dem Schutz von Fußgängern zwischen der Fahrbahn und der für Fußgänger und Radfahrer bestimmten Zone und haben einen Aufsatz (Bild C14-26). Bei der Schutzplanke zum Schutz von Radfahrern ist in Plankenhöhe noch eine zusätzliche Leitplanke für Radfahrer angebracht. Im Falle einer gemischten Nutzungsfläche wird in die gleiche Sicherung wie bei Leitplanken für Radfahrer vorgenommen. Die Leitplankenhöhe liegt bei 1,1 m ≤ h ≤ 1,2 m (gemessen vom Rand der Fußgänger- und Radfahrerzone bis zum obersten Rand der Leitplanke).

Leitplanken für Motorradfahrer haben einen zusätzliche Leitplanke (Führungsschiene) am unteren Teil der Leitplankenkonstruktion, der dem Schutz von Motorradfahrern beim eventuellen Aufprall in die Leitplanke auf öffentlichen Straßen dient (Bild C14-25).

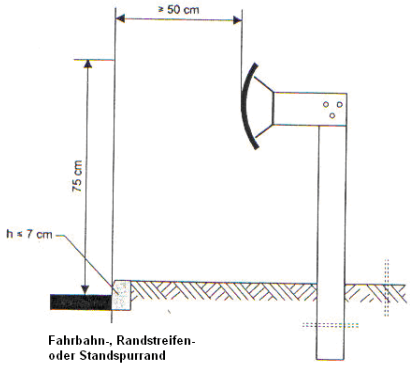


Bild C14-15 Einseitige Stahlleitplanke mit Distanzhalter

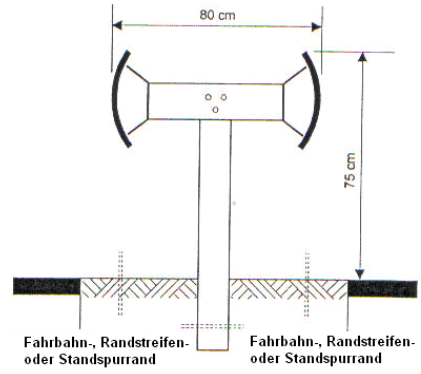


Bild C14-16 Doppelseitige Stahlleitplanke mit Distanzhalter

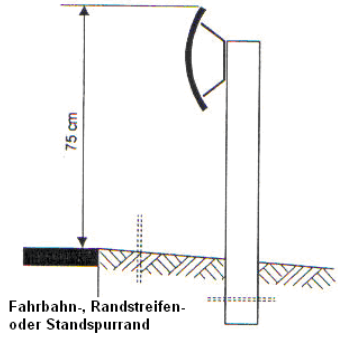


Bild C14-17 Einseitige Stahlleitplanke ohne Distanzhalter

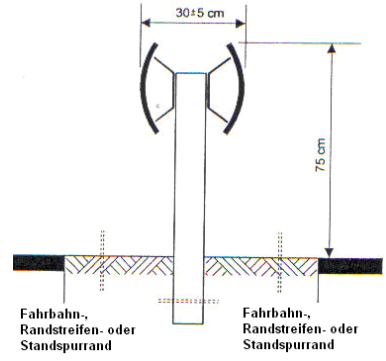


Bild C14-18 Doppelseitige Stahlleitplanke ohne Distanzhalter

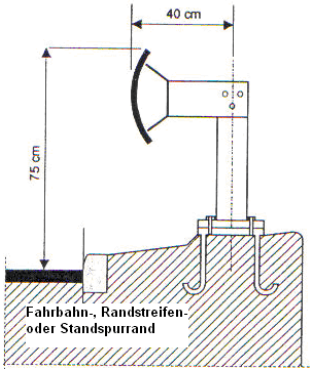


Bild C14-19 Einseitige Stahlleitplanke mit Distanzhalter am Objekt

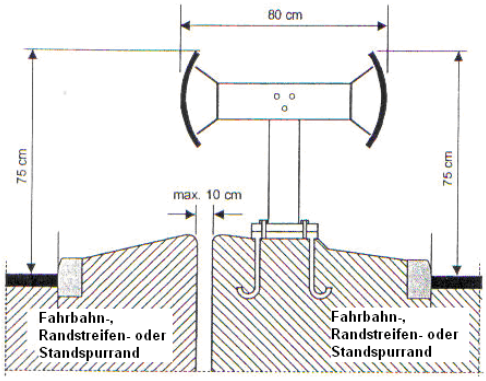


Bild C14-20 Doppelseitige Stahlleitplanke mit Distanzhalter am Objekt

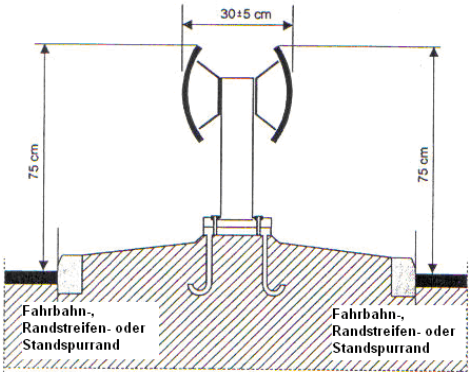


Bild C14-21 Doppelseitige Stahlleitplanke ohne Distanzhalter am Objekt

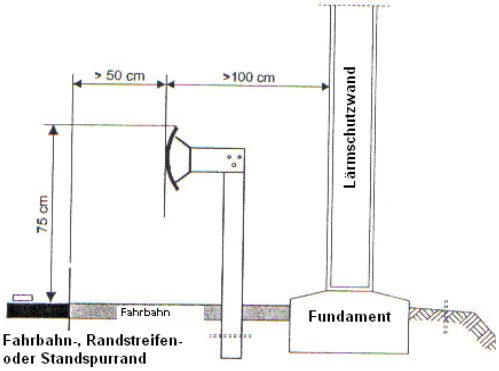


Bild C14-22 Einseitige Stahlleitplanke mit Distanzhalter an einer Fahrbahn mit Hindernis

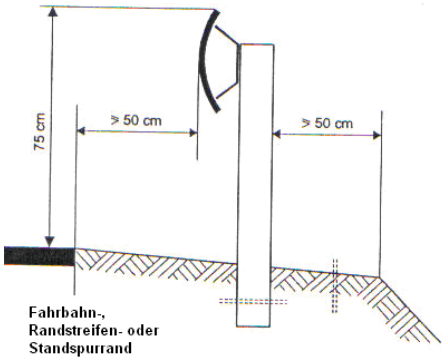


Bild C14-23 Einseitige Stahlleitplanke ohne Distanzhalter an einer Bankette

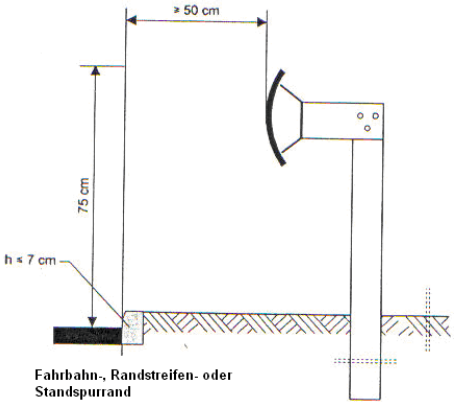


Bild C14-24 Einseitige Stahlleitplanke mit Distanzhalter am Randstein

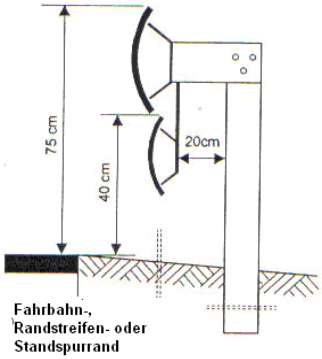


Bild C14-25 Zusätzlicher Leit für Motorradfahrer

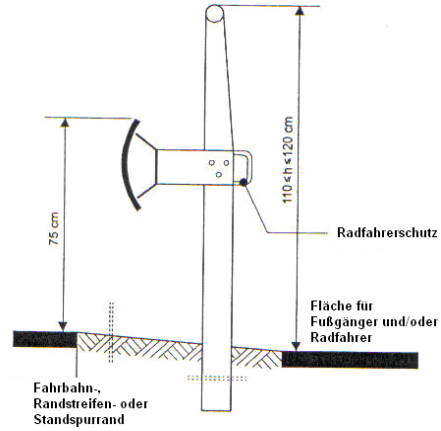


Bild C14-26 Zusätzlicher Leit für Radfahrer und Fußgänger

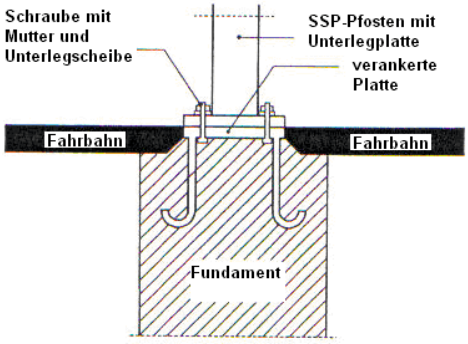


Bild C14-27 Befestigung der Stahlleitplanke im Fundament mit Schrauben

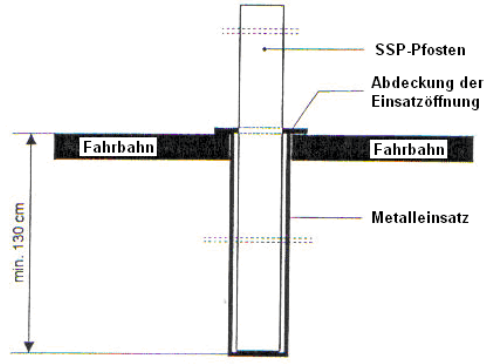


Bild C14-28 Befestigung der Stahlleitplanke im Fundament mit Metalleinsatz

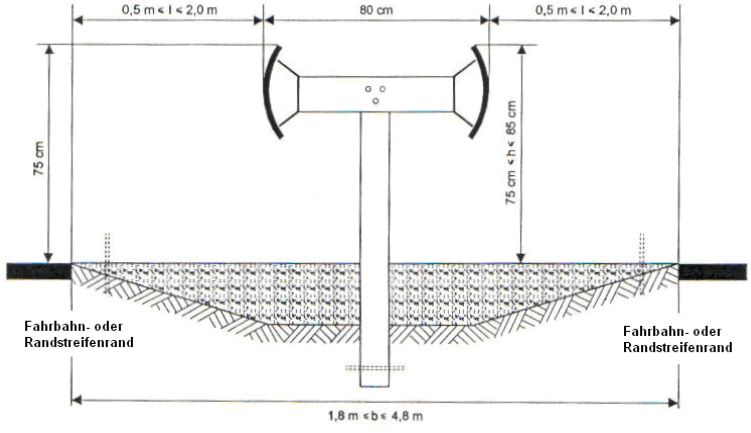


Bild C14-29 Doppelseitige Stahlleitplanke mit Distanzhalter auf dem Mittelstreifen

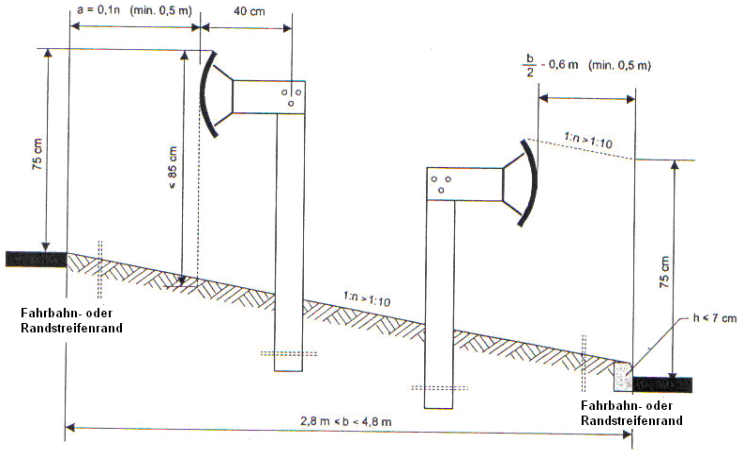


Bild C14-30 Stahlleitplanke mit Distanzhalter auf dem Mittelstreifen unter einem Winkel

7 Verlauf der numerischen Testsimulation der Leitplanke

7.1 Numerische Modelle der Testfahrzeuge

Zur Gewährleistung der verschiedenen in der Norm festgelegten Testkriterien ist es notwendig, verschiedene numerische Modelle von Testfahrzeugen zu erstellen. In der Norm wird die Form von Testfahrzeugen nicht festgelegt, definiert werden jedoch deren Masse, Geschwindigkeit und der Anprallwinkel in die Leitplanke.

Im Fall der Vergleichsanalyse mit dem Softwareprogramm LS-DYNA wurden der Lastkraftwagen Ford F800 (TB 42) und der Personenkraftwagen Dodge Neon (TB 22) ausgewählt.

7.2 Der Lastkraftwagen Ford F800

Mit dem Modell des Lastkraftwagens (**Bild C14-32**) wird die Stahlleitplanke hinsichtlich der Aufhaltestufe und des Wirkungsbereiches der Leitplanke geprüft. Die Prüfungen mit dem Lastkraftwagen werden gemäß dem Test TB 42 durchgeführt. Die Gesamtmasse des Lastkraftwagens entspricht den im Test TB 42 angeführten Anforderungen. Das Modell des Lastkraftwagens) ist in 21.400 Einzelelemente diskretisiert (**Bild C14-31**). Mit den Schalenelementen (SHELL 163) werden alle Blechteile des Lastkraftwagens, mit den Volumenelementen (SOLID 162) alle starren Bestandteile (Teile des Verbrennungsmotors, Kardanübertragung, Last usw.) und mit den Linienelementen alle Tragelemente diskretisiert (BEAM 161) (Achsen, Verstärkungen usw.). Mit der richtigen Verteilung der Massenpunkte werden reelle dynamische Fahrzeugcharakteristika (Masse, Schwerpunkt, Trägheitsmomente) erhalten. Für eine leichtere Überprüfung der Beschleunigungen an den Fahrzeugeinzelteilen sind im diskretisierten Fahrzeugmodell auch Beschleunigungsmesser eingebaut. Das Modell des Ford F800 ist zusammenfassend auf der Internetseite: http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html dargestellt.

Länge	8.42 m
Breite	2.44 m
Achsabstand	3.32 m
vordere Spurweite	1.77 m
hintere Spurweite	2.31 m
Überhang vorne	0.85 m
Schwerpunktlage hinten	4.60 m
Schwerpunkthöhe	1.05 m
Masse des leeren Fahrzeugs	8000 kg
Gewicht der Last – TB 42	2000 kg
Anprallmasse – TB 42	10 000 kg

Bild C14-31 Grundcharakteristika des Lastkraftwagens

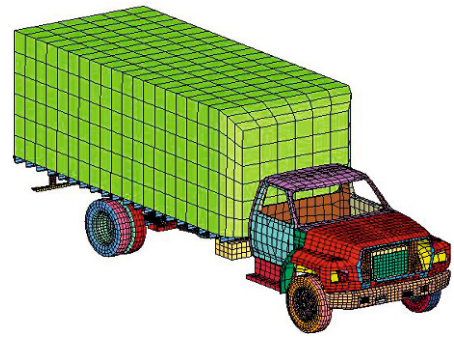


Bild C14-32 LKW-Modell Ford F800

7.2.1 Der Personenkraftwagen Dodge Neon

Mit dem Modell des Personenkraftwagens Dodge Neon (**Bild C14-34**) wird die Stahlleitplanke hinsichtlich der Verzögerungen beim Fahrzeuganprall und der Kopfverzögerungen beim Anprall getestet. Beim Personenkraftwagen sind die Verformungen der Stahlleitplanke geringer und von geringer Bedeutung. Der Pkw-Test wird gemäß dem Test TB 22 durchgeführt. Das Modell Dodge Neon besteht aus 336 Bestandteilen (**Bild C14-33**). Das Modell ist in 270.768 Einzelelemente diskretisiert. Mit den Schalenelementen (SHELL 163) werden alle Blechteile des Fahrzeugs, mit den Volumenelementen (SOLID 162) die starren Bestandteile (Teile des Verbrennungsmotors, Bremsplatten, Bremstrommel usw.) und mit den Linienelementen (BEAM 161) alle Tragelemente (Achsen usw.) diskretisiert. Mit der richtigen Verteilung der Massenpunkte am Fahrzeug werden reelle dynamische Fahrzeugcharakteristika (Masse, Schwerpunkt, Trägheitsmomente) erhalten. Für eine leichtere Beschleunigungsanalyse der Fahrzeugeinzelteile sind im diskretisierten Fahrzeugmodell auch Beschleunigungsmesser eingebaut. Das Fahrzeugmodell Dodge Neon ist zusammenfassend auf der Internetseite: http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html dargestellt.

Länge	4.43 m
Breite	1.89 m
Achsabstand	2.67 m
vordere Spurweite	1.42 m
hintere Spurweite	1.42 m
Überhang vorne	0.82 m
Schwerpunktlage hinten	2.52 m
Schwerpunkthöhe	0.54 m
Fahrzeugmasse – TB 22	1300 kg

Bild C14-33 Grundcharakteristika des Personenkraftwagens

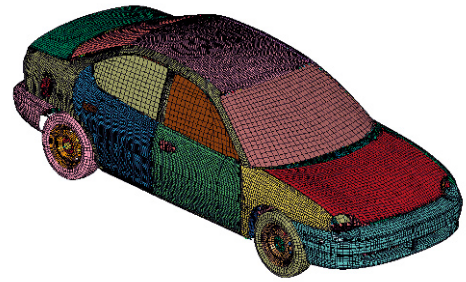


Bild C14-34 PKW-Modell Dodge Neon

7.3 Modellierung von Stahlleitplanken

7.3.1 Geometrische Modelle von Leitplankenelementen

Geometrische Modelle von Stahlleitplankenelementen stellen den reellen Geometriezustand dar. Sie sind im Softwareprogramm CAD als parametrische Modelle erstellt, sodass ihre Dimensionen einfach zu verändern sind. Die geometrischen Modelle von Stahlleitplanken bestehen aus vier Bestandteilen: Leitplanke, Distanzhalter, Führungsschiene und Leitpfosten (**Bild C14-35**), jedoch ohne die vorgespannte Schraubenverbindung. Die vorgespannte Schraubenverbindung wird numerische modelliert, womit zusätzliche Charakteristika definiert werden können, die eine Simulation der Vorspannung in der Schraubenverbindung ermöglichen. Das elementare geometrische Modell der Stahlleitplanke ist ein 2,0 m langer Abschnitt, bestehend aus einer Leitplanke, einem Distanzhalter, einem Leitpfosten und einer Führungsschiene.

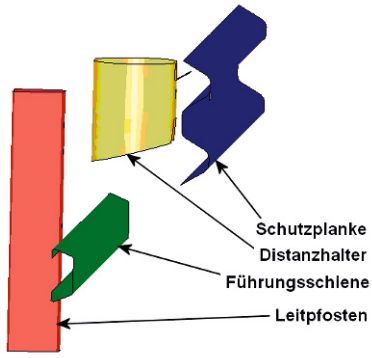


Bild C14-35 Geometrisches Modell einer Stahlleitplanke

7.3.2 Numerisches Modell einer Stahlleitplanke

Die numerischen Modelle von Stahlleitplanken (**Bild 14-36** – vorne; **Bild 14-37** – hinten) sind im Softwareprogramm LS-DYNA (Ansys LS-DYNA) erstellt. Die Modelle von Einzelelementen werden miteinander durch Daten verbunden, die in der Norm EN 1317 empfohlen und vom Programm für die Durchführung einer dynamischen numerischen Simulation eines Fahrzeuganpralls in die Stahlleitplanke gefordert werden. Das numerische Modell einer Stahlleitplanke behandelt einen 34,0 m langen Leitplankenabschnitt. Alle Elemente der Leitplanke sind mit Schalenendelementen (SHELL Elemente) erstellt, außer den Schrauben M10 und M16, die mit Linienendelementen (BEAM Elemente) erstellt sind. Die Befestigung des Distanzhalters und der Führungsschiene am Leitpfosten erfolgt mittels der Schrauben M10, während die Leitplanke mit den Schrauben M16 [SIST ISO 898-1 bzw. DIN EN 20898-1] an den Distanzhalter angebracht wird. Da vorausgesetzt wird, dass die Verbindungen beim Verlängern der Leitplanke und der Führungsschiene nicht kritisch sind, besteht doch eine genügende Überlappung (0,2 mm), sind Leitplanke und Führungsschiene aus einem Teil erstellt. Das Stahlleitplankenmodell besteht aus 17 Leitpfosten und Distanzhaltern, die in einem Abstand von 2,0 m voneinander angeordnet sind. Der Distanzhalter ist am Leitpfosten mit zwei Schrauben M10 befestigt, während die Leitplanke und die Führungsschiene mit nur einer Schraube M16 befestigt sind.

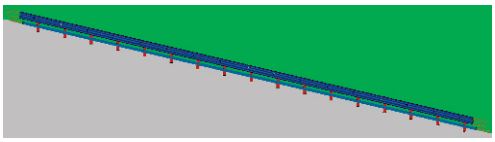


Bild 14-36 Numerisches Modell einer Stahlleitplanke (Ansicht von der Fahrbahnseite)

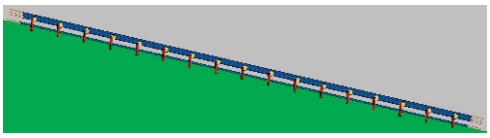


Bild 14-37 Numerisches Modell einer Stahlleitplanke (Ansicht zur Fahrbahn)

Das numerische Modell der Stahlleitplanke umfasst auch Leitplankenendkonstruktionen, die mit Linienelementen erstellt sind und die Fortsetzung der Stahlleitplanke simulieren. Die Blechelemente sind mit Schaleneinzelelementen Belytschko-Tsay mit drei Integrationspunkten entlang der Elementendicke diskretisiert. Das einzelne numerische Stahlleitplankenmodell besteht je nach Plankenkonstruktion aus circa 80.000 Elementen und rund 80.000 Knotenpunkten.

7.3.3 Materialmodell

Alle Elemente der Stahlleitplanke sind aus Konstruktionsstahl S 235 gefertigt. Bei der Modellierung der Leitplanke wurde zum Modellieren der Blechelemente das plastische kinematische Materialmodell (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC*) ausgewählt (**Tabelle C14.17**). Das plastische kinematische Materialmodell wird durch die Dichte (ρ), den Elastizitätsmodul (E), die Poissonsche Konstante (ν), die Elastizitätsgrenze (σ_{pl}), den Tangentenmodul (E_t) und die Grenze der Materialzerstörung (ε_F) definiert. Die Zerstörungsgrenze legt fest, um wie viel Prozent das Material deformiert (gestreckt) werden kann, bevor es zerstört wird. Die Schraubenverbindung wird mithilfe eines mechanischen und eines temperaturabhängigen Systems modelliert. Den mechanischen Schraubenteil übernimmt das plastische kinematische Materialmodell, den Temperaturenteil der Schraube das elastische plastische temperaturabhängige Materialmodell (*MAT_ELASTIC_PLASTIC_THERMAL*). Das elastische plastische temperaturabhängige Materialmodell wird durch die Dichte (ρ), den Temperaturbereich der Erhitzung oder Abkühlung (ΔT), den Elastizitätsmodul (E), die Poissonsche Konstante (ν), den linearen Temperaturkoeffizienten (α_T), die Elastizitätsgrenze (σ_{pl}) und den Tangentenmaterialmodul (E_t) definiert.

Tabelle C14.17 Materialeigenschaften [7]

D [mm] Blechstärke	E [G Pa] Elastizitäts-modul	ν Poissonsche Konstante	σ_y [M Pa] Elastizitäts-grenze	E_t [M Pa] Tangenten-modul	εF [%] Reißgrenze
3	190	0,29	285	696	0,41
4	200	0,29	330	969	0,41
5 ÷ 6	210	0,29	380	1200	0,41

7.3.4 Modell von Linienelementen

Bei den numerischen Modellen von Stahlleitplanken sind die Leitplanken und die Führungsschienen mit 1,0 m langen Linienelementen befestigt und simulieren weitere 30,0 m der Stahlleitplanke (**Bild C14-38**). Die Materialeigenschaften von Linienelementen an der Leitplanke und an der Führungsschiene sind in **Tabelle C14.18** angeführt.

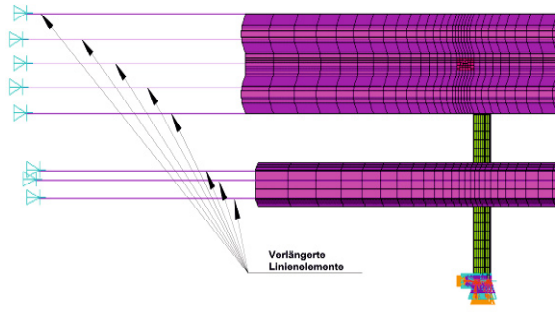


Bild C14-38 Modell von Linienelementen

Tabelle C14.18 Materialeigenschaften von Linienelementen

D [mm] Durchmesser	E [Pa] Elastizitätsmodul	ν Poissonsche Konstante	σ_y [M Pa] Elastizitätsgrenze	E_t [M Pa] Tangentenmodul
19	6333	0,29	285	696

7.3.5 Modellierung des Erdreichs

Da die Erde ein inhomogener Bestandteil ist, ist es schwierig ein numerisches Modell des Erdreichs zu erstellen, wird dies doch von der Bodenart, der Feuchtigkeit, der Festigkeit, der Struktur, der Porösität usw. beeinflusst. Wegen der angeführten Parameter verändert sich je nach Tiefe der Elastizitätsmodul (**Tabelle C14.19**), die Dichte (**Tabelle C14.20**) die Plastizität (Feuchtigkeitsfunktion), der Schermodul, der Bodenreaktionsmodul (Federkonstante) der Erde usw. Bei der Erdreichsimulation kommt es zu Schwierigkeiten, können doch nicht alle Veränderungen in der Erdstruktur in der Gesamttiefe vorhergesehen werden.

Tabelle C14.19 Elastizitätsmodul nach Bodenart

Bodenart	E_s [kN/m^2]
Torf	100 – 400
Organische Tonerden	500 – 3000
Stark wasserhaltige Tonerden	200 – 1000
Weiche Tonerden	1500 – 3000
Mittelweiche Tonerden	2000 – 5000
Weniger weiche Tonerden	3000 – 6000
Halbfeste Tonerden	6000 – 50000
Feste Tonerden	8000 – 50000
Schutte	3000 – 8000
Löß	4000 – 8000
Feiner, gerundeter Sand	40000 – 80000

Tabelle C14.20 Erddichte

Erde, Sand, Lehm	Dichte [kg/m^3]
nass	2100
natürlich feucht	1800
trocken	1600
Aufschüttmaterial (Kies)	Dichte [kg/m^3]
trocken	1700
nass	2000

Das Erdreichmodell wird mit Federn simuliert (**Bild C14-39**), in dem die Federn an zwei rechtwinklig aufgestellten Pfostenkanten befestigt sind, was eine Anprallsimulation aus allen Richtungen ermöglicht. Die zusammengefassten Federcharakteristika sind unter www.ncac.gwu.edu/vml/models.html zu finden (**Bild C14-40** , **Bild C14-41**).

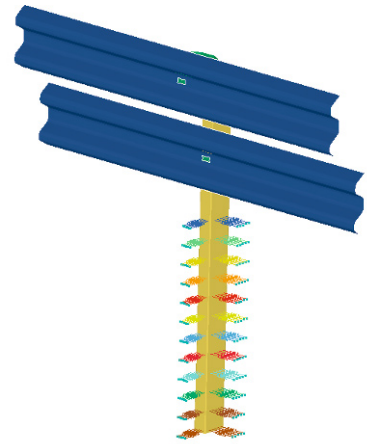


Bild C14-39 Numerisches Erdreichmodell

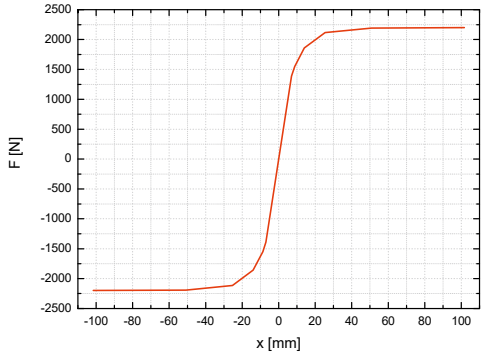


Bild C14-40 Federcharakteristikum – 0,1 m Tiefe

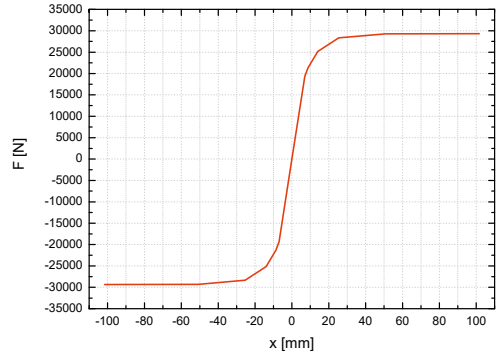


Bild C14-41 Federcharakteristikum – 1,2 m Tiefe

7.4 Rand- und Anfangsbedingungen

7.4.1 Anprall des Lastkraftwagens Ford F800

Der Anprall des Lastkraftwagens in die Stahlleitplanken wurde unter den in der Norm EN 1317 festgelegten Bedingungen durchgeführt. Mit dem Lastkraftwagen wird das Aufpralltestkriterium TB 42 getestet, das zur Prüfung eines hohen Aufhaltevermögens (H1) gedacht ist. Die Anprallversuche mit dem Lastkraftwagen mit hoher Tragkraft und einer Masse von 10.000 kg wurden in einem Winkel von 15° und mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h durchgeführt (**Bild C14-42**). Die Leitplankenhöhe bei der Aufprallanalyse von Lastkraftwagen ist 0,85 m, gemessen von der Fahrbahn bis zum obersten Leitplankenrand. Die Norm EN 1317 schreibt eine Plankenmindesthöhe von 0,75 m vor. Die bei der Analyse verwendeten Stahlleitplanken sind 34,0 m lang und haben Leitpfosten im Abstand von 2,0 m. Die Leitpfosten sind konsolenartig in das Betonfundament eingespannt. Die Planken sind an den Enden der Leitplanke und der Führungsschiene mit Linienelementen verlängert, die die Leitplankenenden simulieren. Die verlängerten Linienelemente sind an den Enden fest abgestützt.

Die Kontakte zwischen den einzelnen Leitplankenteilen umfassen alle Flächen unter Berücksichtigung der Stärke der Blechelemente und der Reibung zwischen den Flächen mit dem statischen Reibungskoeffizienten in Höhe von 0,2 und dem dynamischen Reibungskoeffizienten in Höhe von 0,15. Die Kontakte zwischen dem Fahrzeug und der Leitplanke beim Anprall umfassen ebenfalls alle Plankenflächen und alle Flächen des Lastkraftwagens, die beim Anprall mit der Leitplanke in Berührung kommen. Bei den Kontakten zwischen dem Fahrzeug und der Leitplanke werden der statische Reibungskoeffizient 0,1 und der dynamische Reibungskoeffizient 0,05 berücksichtigt.

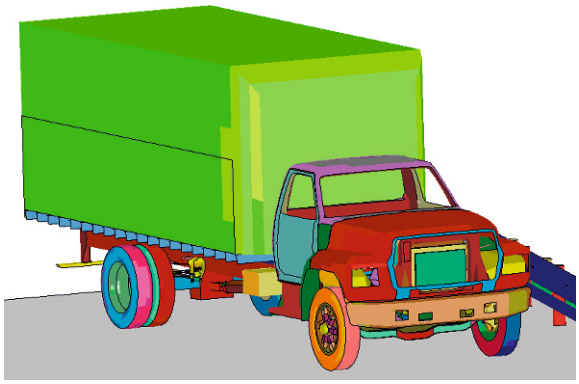


Bild C14-42 Numerisches Modell einer Stahlleitplanke und dem Lastkraftwagen Ford F800

7.4.2 Anprall des Personenkraftwagens Dodge Neon

Der Anprall des Personenkraftwagens in die Stahlleitplanken wurde unter den in der Norm EN 1317 festgelegten Bedingungen durchgeführt. Mit dem Personenkraftwagen wird das Aufprallltestkriterium TB 22 getestet, das zur Prüfung eines geringeren Aufhaltevermögens (T2) gedacht ist. Die Anprallversuche mit dem Personenkraftwagen und einer Masse von 1.300 kg wurden in einem Winkel von 15,0° und mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h durchgeführt (**Bild C14-43**). Die Eigenschaften der Stahlleitplanke und die Anprallbedingungen bei Anprallen von Personenkraftwagen gleichen denen bei Lastkraftwagenanprallen.

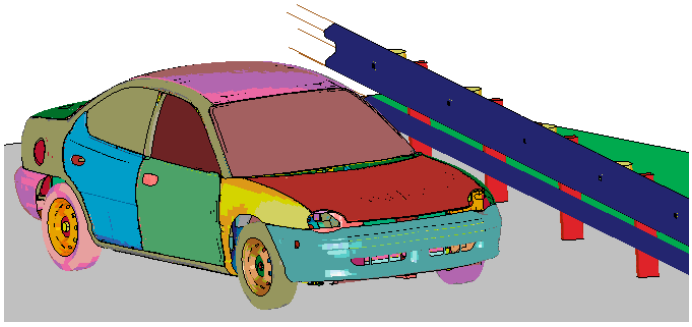


Bild C14-43 Numerisches Modell einer Stahlleitplanke und des Personenkraftwagens Dodge Neon

7.4.3 Anprall des Personenkraftwagens Dodge Neon in einer Kurve

Der Anprall eines Personenkraftwagens in die Leitplanke in einer Kurve ist kein standardisiertes Verfahren zur Prüfung von Stahlleitplanken, daher gibt es keine vorgeschriebenen Bedingungen für die Durchführung des Tests. Der Aufpralltest des Personenkraftwagens in einer Kurve wurde unter tatsächlichen Fahrtbedingungen bei einer scharfen Rechtskurve durchgeführt. Die Tests wurden mit dem Personenkraftwagen Dodge Neon bei einer Geschwindigkeit von 80,0 km/h und in einem Anprallwinkel von 20,0° (**Bild C14-44**) durchgeführt.

Der Anprallwinkel des Personenkraftwagens in die Leitplanke wird zwischen der Fahrtrichtung des Pkws und der Tangente der Leitplanke definiert. Der Kurvenradius beträgt 23,0 m und wird durch eine Leitplanke mit 22 Leitpfosten geschützt, die in einem Abstand von 2,0 m aufgestellt sind. Die Plankenhöhe liegt bei 0,85 m, gemessen von der Fahrbahn bis zum obersten Leitplankenrand. Die Leitpfosten sind konsolenartig in die Unterlegplatte (Fundament) eingespannt. Die Enden der Leitplanke und der Führungsschiene sind Linienelemente, die die Fortsetzung der Leitplanke simulieren und in alle Richtungen abgestützt sind.

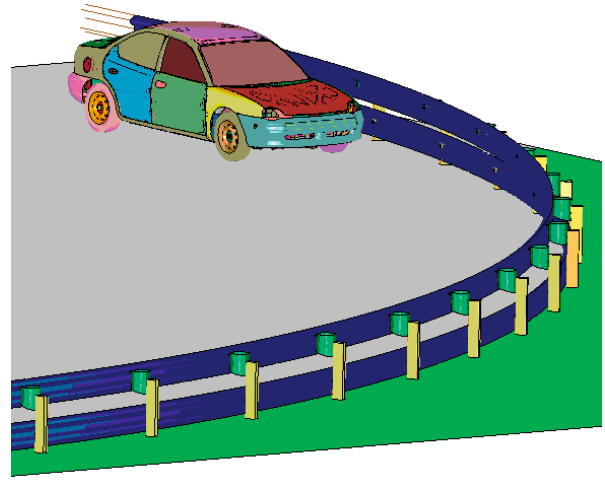


Bild C14-44 Numerisches Modell eines Anpralls des Personenkraftwagens Dodge Neon in einer Kurve

8 Dynamische Analyse

Die dynamische Analyse von Fahrzeuganprallen (Lastkraftwagen Ford F800, Personenkraftwagen Dodge Neon) in Stahlleitplanken wurde mit dem Softwareprogramm Ansys LS-Dyna durchgeführt. Bei den dynamischen Analysen wurden die geometrische Nichtlinearität (große Verschiebungen und Drehungen) und die strukturelle Nichtlinearität (Kontakte) berücksichtigt. Die Gesamtzeitspanne der Analyse des Lkw-Anpralls in die Leitplanke lag bei 1,6 s. Bei der Analyse des Anpralls des Pkws Dodge Neon betrug die Gesamtzeitspanne 1,0 s.

8.1 Analyseergebnisse

8.1.1 Prüfung der Stahlleitplanken nach dem Testkriterium TB 42

In diesem Fall wurde die Prüfung der Stahlleitplanke beim Anprall mit einem Lastkraftwagen mit der Masse 10.000 kg durchgeführt (**Bild C14-45**). Die Stahlleitplanke wurde auf die Indizes für die Schwere der Beschleunigung (ASI), für die theoretische Kopfverzögerung nach dem Anprall (PHD) und auf den größten Wirkungsbereich der Leitplanke (W_{max}) getestet. Die erlaubten Höchstgrenzen von ASI, PHD und W_{max} sind gemäß der Norm EN 1317 vorgeschrieben.

Bild C14-46 zeigt den Index für die Schwere der Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit. Beim Anprall des Lastkraftwagens in die Stahlleitplanken erreicht der ASI einen Wert von 0,98 in einer Zeit von 0,34 s nach dem Anprall des Fahrzeugs in die Leitplanke. Der unter 1,0 liegende ASI-Wert stuft die Leitplanke ins Sicherheitsniveau A ein. Lastkraftwagen sind schwer und können so die Distanzhalter der Leitplanken leicht deformieren. Wenn die Distanzhalter zu schwach sind, übernehmen sie beim Anprall eine geringe kinetische Energie, was große Verzögerungen des Fahrzeugs verursacht.

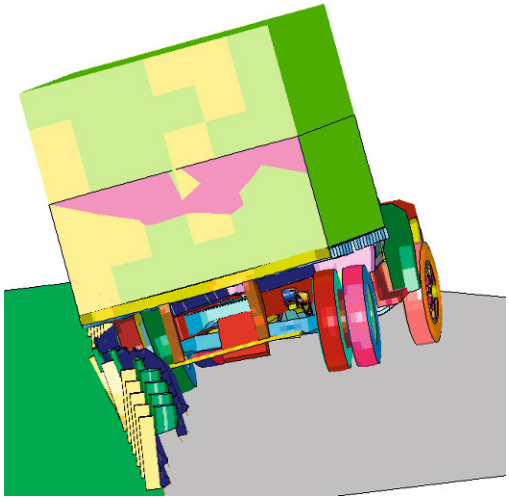


Bild C14-45 Neigung des Lastkraftwagens über die Leitplanke

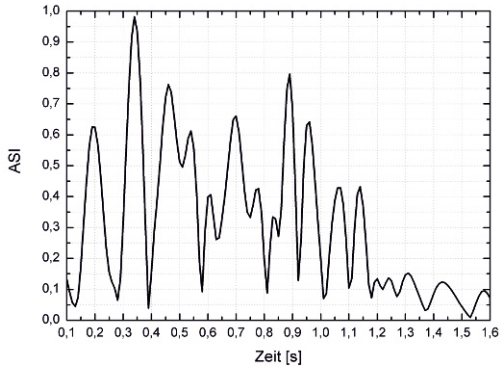


Bild C14-46 ASI beim Anprall eines Lastkraftwagens

Bild C14-47 zeigt den Verlauf der Kopfverzögerungen nach dem Anprall und die Richtungsänderung der Resultante der Kopfverzögerung beim Anprall. Beim Anprall des Lastkraftwagens in die Leitplanke entsteht der höchste PHD-Wert von 5,55 g bei einer Zeit von 0,48 s, der Winkel der Kopfbewegung liegt zwischen –45° in 55°. Der erlaubte PHD-Grenzwert, bei dem keine am Aufprall beteiligten Personen verletzt werden, liegt bei 20,0 g. Ein PHD-Wert unter 20,0 g besagt, dass die Leitplanke den von der Norm empfohlenen Kriterien entspricht. Die PHD-Werte sind bei Lastkraftwagen niedrig, in den meisten Fällen liegen sie unter einem Wert von 20 g.

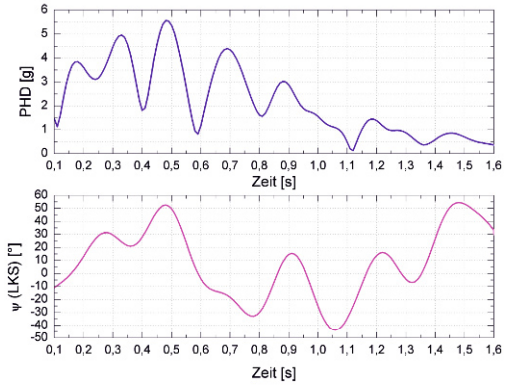


Bild C14-47 PHD und Richtung der Resultante der Kopfverzögerung (ψ) beim Anprall des Lastkraftwagens

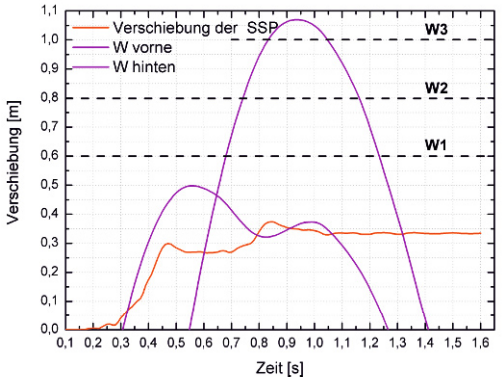


Bild C14-48 W_{max} beim Anprall des Lastkraftwagens

Bild C14-48 zeigt den Verlauf des größten Wirkungsbereiches in Abhängigkeit von der Zeit. Der größte Wirkungsbereich ist die Entfernung zwischen der Leitplankeninnenfläche vor dem

Anprall und der Fahrzeuglage bei der größten seitlichen Verschiebung während des Anpralls (EN 1317-2). Den größten Wirkungsbereich von 1,07 m erreicht der hintere Teil des Lastkraftwagens, der über die Leitplanke schwingt (**Bild C14-45**), was die Leitplanken in die vierte Klasse der Wirkungsbereiche einreiht (1,0 m ≤ W4 ≤ 1,3 m).

8.1.2 Prüfung der Leitplanke nach dem Testkriterium TB 22

In diesem Fall wurden die Prüfungen der Leitplanken beim Anprall mit einem Personenkraftwagen (Dodge Neon) durchgeführt, dessen Fahrzeugmasse 1.300 kg beträgt. Die Leitplanke wurde auf die Indizes für die Schwere der Beschleunigung (ASI), die theoretische Kopfverzögerung nach dem Anprall (PHD) und auf den größten Wirkungsbereich (W_{max}) getestet. Die erlaubten Höchstgrenzen von ASI, PHD und W_{max} sind in der Norm EN 1317 bestimmt.

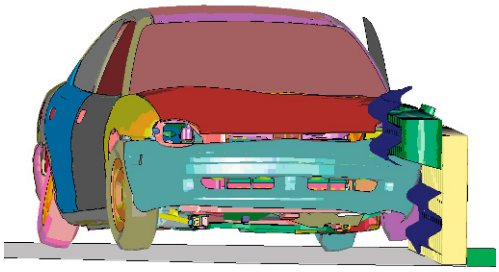


Bild C14-49 Anprall des Personenkraftwagens Dodge Neon

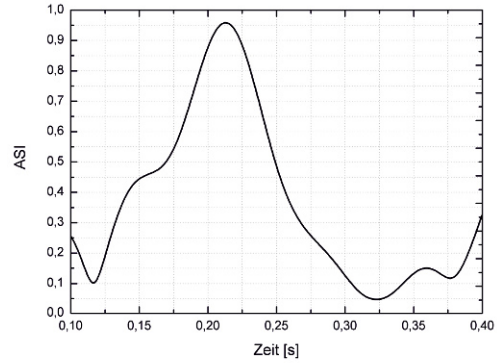


Bild C14-50 ASI beim Anprall eines Personenkraftwagens

Bild C14-50 zeigt den Index für die Schwere der Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit. Beim Anprall des Personenkraftwagens in die Leitplanke erreicht ASI einen Wert von 0,96 in einer Zeit von 0,21 s nach dem Anprall des Fahrzeugs in die Leitplanke. Der unter 1,0 liegende ASI-Wert stuft die Leitplanke ins Sicherheitsniveau A ein. Wegen der geringeren Masse des Personenkraftwagens sind die Ergebnisse der Analyse mit den weicheren Distanzhaltern günstiger, weil die weicheren Distanzhalter die kinetische Energie des Fahrzeugs gut absorbieren.

Bild C14-51 zeigt den Verlauf der Kopfverzögerungen nach dem Anprall und die Richtungsänderung der Resultante der Kopfverzögerung beim Anprall. Beim Anprall eines Personenkraftwagens in die Leitplanke entsteht der größte PHD-Wert von 14,05 g bei einer Zeit von 0,21 s, der Winkel der Kopfbewegung verändert sich zwischen –60° und 35°. Der erlaubte PHD-Grenzwert, bei dem am Aufprall beteiligte Personen keine Verletzungen erleiden, liegt bei 20,0 g.

Bild C14-52 zeigt den Verlauf des größten Wirkungsbereiches der Leitplanke in Abhängigkeit von der Zeit bzw. die größte Entfernung zwischen der Leitplankeninnenfläche vor dem Anprall und der Fahrzeuglage bzw. der Leitplanke bei der größten seitlichen Verschiebung (EN 1317-2). Beim Anprall des Personenkraftwagens schwingt kein Teil des Fahrzeugs über die Planke (**Bild C14-49**), daher bestimmt der Leitplankenpfosten den größten Wirkungsbereich. In den meisten Fällen liegen die größten Wirkungsbereiche bei Anprallen von Personenkraftwagen unter 0,6 m bzw. in der ersten Klasse der Wirkungsbereiche von Leitplanken (W1 ≤ 0,6 m).

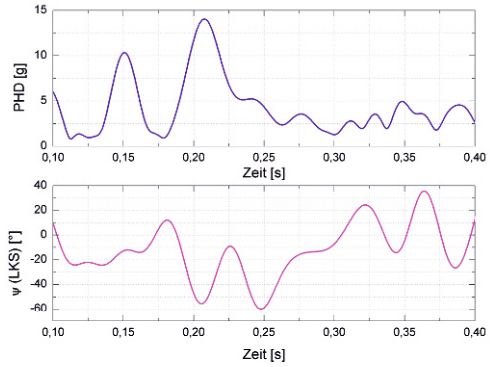


Bild C14-51 PHD und Richtung der Resultante der Kopfverzögerung (ψ) beim Anprall eines Personenkraftwagens

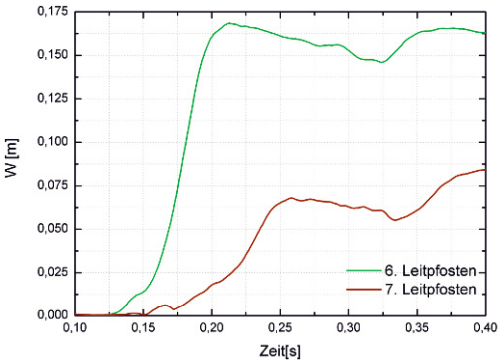


Bild C14-52 W_{max} beim Anprall eines Personenkraftwagens

8.1.3 Anprall des Personenkraftwagens Dodge Neon in einer Kurve in einem Winkel von 20°

Beim Anprall eines Personenkraftwagens in die Leitplanke in einer Kurve in einem Winkel von 20° werden die Indizes für die Schwere der Beschleunigungen (ASI) und die theoretische Kopfverzögerung nach dem Aufprall (PHD) analysiert, die auch den Winkel des Kopfes des Fahrers beim Anprall und den größten Wirkungsbereich (W_{max}) umfasst. **Bild C14-53** zeigt den Index für die Schwere der Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit. Beim Anprall des Personenkraftwagens in die Leitplanke in einer Kurve in einem Winkel von 20° entsteht der höchste ASI-Wert von 1,95 in einer Zeit von 0,15 s nach dem Anprall des linken Vorderrads des Personenkraftwagens in den Leitpfosten (**Bild C14-54**). Der ASI übersteigt den erlaubten Grenzwert, jedoch wären die ASI-Werte noch höher, wenn sich das Rad hinter den Leitpfosten verkeilen würde.

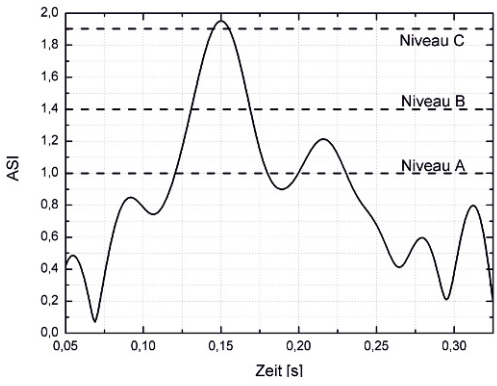


Bild C14-53 ASI bei Anprall eines Personenkraftwagens in einer Kurve in einem Winkel von 20°

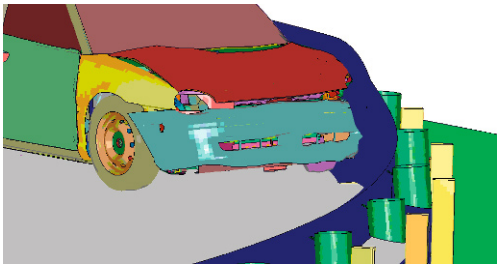


Bild C14-54 Anprall eines Personenkraftwagens in einer Kurve in einem Winkel von 20°

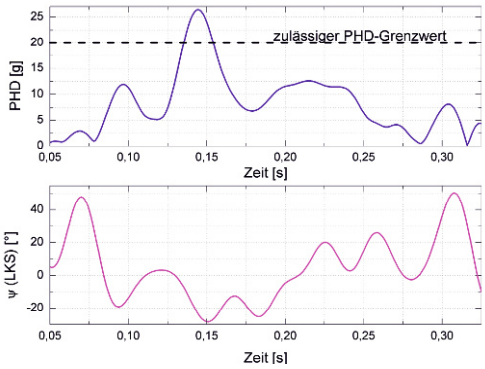


Bild C14-55 PHD und Richtung der Resultante der Kopfverzögerung (ψ) beim Anprall eines Personenkraftwagens in einer Kurve in einem Winkel von 20°

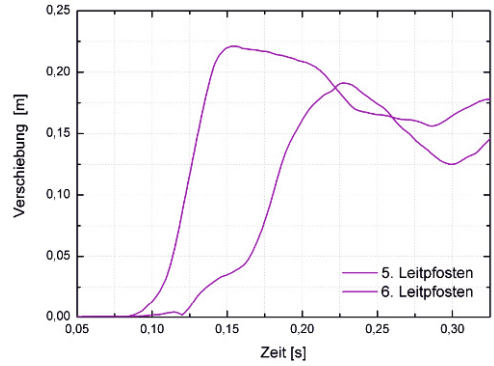


Bild C14-56 Der Wirkungsbereich der Leitplanke beim Anprall eines Personenkraftwagens in einer Kurve in einem Winkel von 20°

Bild C14-55 zeigt die theoretische Kopfverzögerung nach dem Anprall in Abhängigkeit von der Zeit und schließt auch die Richtung der Resultante der Kopfverzögerung des Fahrers während des Anpralls nach dem lokalen Koordinatensystem des Fahrzeugs mit ein. Der höchste PHD-Wert 26,41 g übersteigt den erlaubten Wert 20 g in einer Zeit von 0,14 s nach dem Anprall des Fahrzeugs in den Pfosten. Der Winkel des Kopfes des Fahrers bewegt sich beim Fahrzeuganprall nach dem lokalen Koordinatensystem des Fahrzeugs zwischen –28° und 50°.

Bild C14-56 zeigt den Verlauf des größten Wirkungsbereiches der Leitplanke in Abhängigkeit von der Zeit. Beim Anprall des Personenkraftwagens schwingt kein Teil des Fahrzeugs über die Leitplanke, der größte Wirkungsbereich erreicht einen Wert von circa 0,22 m, gemessen an dem am stärksten verformten Pfosten. Der Wirkungsbereich der Leitplanke befindet sich im Rahmen der ersten Klasse, da er unter 0,6 m liegt (W1 ≤ 0,6 m).

9 Schlussfolgerungen

Bei der Prüfung beziehungsweise bei der Entwicklung von Stahlleitplanken wird deren Qualität hinsichtlich der Parameter der Norm EN 1317 und der technischen Spezifikationen für öffentliche Straßen bestimmt. Vergleichsanalysen von getesteten Stahlleitplanken werden hinsichtlich der Schwere der Beschleunigung beim Anprall (ASI), der Kopfverzögerungen nach dem Anprall (PHD) und des Wirkungsbereiches der Leitplanken (W) durchgeführt.

Die Analysen von Anprallen in Leitplanken zeigten, dass die Qualität der Fahrzeugrückhaltung vor allem von der Form, der Blechstärke und der Leitpfostenhöhe abhängt. Mit starreren Pfosten verringert sich der Wirkungsbereich der Stahlleitplanken, dabei werden jedoch die Verzögerungen von LKW als auch von PKW nicht wesentlich erhöht. Die Eignung zur Absorption der kinetischen Energie des Fahrzeugs wird überwiegend durch die Verformungsfähigkeit der Distanzhalter definiert. Die geringste Verzögerung bei Anprallen wird durch die verformbaren Distanzhalter erreicht, jedoch erweisen sie sich beim Lkw-Anprall als zu schwach, werden sie doch vollständig deformiert. Die Leitplanke lehnt sich an den Leitpfosten, noch bevor sich die Quergeschwindigkeit des Lkws verringert, und daher übernimmt der starrere Leitpfosten die

Absorptionsfunktion. Die Folge sind erhöhte Verzögerungen des Fahrzeugs, die die erlaubten Werte übersteigen können.

Die Ursache für das Verkeilen von Fahrzeugreifen hinter Leitpfosten ist häufig eine zu schwache (zu stark deformierte) Konstruktion der Führungsschiene, die die erwartete Aufgabe der Reifenführung am Pfosten nicht erfüllt. Um die Verkeilung der Reifen hinter den Leitpfosten zu verhindern, ist eine genügend starke und breite Führungsschiene notwendig.

Mit der Aufstellung einer größeren (breiteren) oder zusätzlichen Führungsschiene wird eine bessere Sicherheit für Motorradfahrer erreicht. Breitere Führungsschienen verhindern in größerem Maße einen eventuellen Kontakt einzelner Körperteile mit dem Pfosten.

Die Aufprallanalysen bei nichtstandardmäßigen Testversuchen zeigten, dass die Kopfverzögerungen die in der Norm festgelegten Grenzwerte übersteigen. Beim Anprall eines Pkws wird auch der Grenzwert des Indexes für die Schwere der Beschleunigung überstiegen. Die Standardaufpralltests von Pkw und Lkw jedoch erfüllen überwiegend die in der Norm vorgeschriebenen Bedingungen.

Die aus den Analysen von Fahrzeuganprallen in Sicherheitsplanken erhaltenen Daten können auch für weitere Analysen verwendet werden. Die beim Anprall auftretenden Verzögerungen und Verschiebungen können auf das Dummymodel übertragen und so die beim Anprall in die Stahlleitplanken entstandenen Verletzungen der Insassen analysierte werden.

Literatur

[1] EUROPÄISCHES NORMINSTITUT: Europäische Norm EN 1317-1, Terminology and general criteria for test methods – Rue de Stassart 36, Brüssel 2002

[2] EUROPÄISCHES NORMINSTITUT: Europäische Norm EN 1317-2, Performance classes, impact-test accsptance criteria and test methods for seafety barriers – Rue de Stassart 36, Brüssel 2002

[3] EUROPÄISCHES NORMINSTITUT: Europäische Norm EN 1317-3, Crash cushions – Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods - Rue de Stassart 36, Brüssel 2003

[4] EUROPÄISCHES NORMINSTITUT: Europäische Norm EN 1317-4, Crash cushions – Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for terminals and transitions of safety barriers, Central Secretariat – Rue de Stassart 36, Brüssel 2003

[5] SLOWENISCHE STRASSENDIREKTION: Varnostne ograje, pogoji in načini postavitve (*Leitplanken, Bedingungen und Montagearten*) – Ljubljana 2003

[6] ZUPIN, Matej: Snovanje jeklenih varnostnih ograj (*Entwicklung von Stahlleitplanken*): Diplomarbeit; Ljubljana 2008

[7] ZSIS SVM (*Verband slowenischer Maschinenbauingenieure, Gruppe für Fahrzeuge und Motorräder*) Fakultät für Maschinenbau – LAVEK: Inovativna Avtomobilska tehnologija (*Innovative Automobiltechnologie*); Referatsammelband 2003 – Portorož 2003

[8] PREBIL I. und andere, RAZVOJ JEKLENE VARNOSTNE OGRAJE, SKLADNE S STANDARDI SIST EN 1317-1,2,5, (*Entwicklung von Stahlleitplanken gemäß den Normen SIST EN 1317-1,2,5*), Abschlussbericht

[9] Manuals LS-DYNA, http://www2.lstc.com/

[10] Finite element models, http://www.ncac.gwu.edu/index.html

Teil D:
Begriffe, Tabellen

D1 Fachbegriffe nach DIN 75204 Straßenfahrzeuge

DIN 75204 Straßenfahrzeuge:

Verkehrsunfallrekonstruktion und Verletzungsmechanik
Begriffe der Unfallrekonstruktion

Teil 1

1 Bewegungsvorgang
2 Weg-Zeit-Betrachtung
3 Kollisionsvorgang

Teil 2

1 Spur
2 Spuren an/von Personen und Sachen (Tieren)
3 Spezielle Spuren an Personen (= Verletzungsarten)
4 Spezielle Spuren an Fahrzeug und Fahrzeugteilen
5 Spezielle Spuren im Unfallumfeld

Teil 3

1 Unfallumstände
2 Fahrzeug
3 Person

1 Teil 1 – Bewegungsvorgang, Weg-Zeit-Betrachtung, Kollisionsvorgang

Abbremsung: Verhältnis zwischen gesamter Bremskraft und der auf der Achse oder den Achsen des Fahrzeugs ruhenden statischen Gesamtgewichtskraft. Siehe DIN ISO 611.

Abwicklung des Fußgängers: Nicht zu verwendende Benennung: Abwickellänge.

Achslastverteilung: Verhältnis der Achslasten im statischen Zustand. Die Achslastverteilung wird wie folgt angegeben, 60 : 40 bei Zweiachsfahrzeugen wie z. B. Pkw (30 : 35 : 35 bei Dreiachsfahrzeugen). Das bedeutet, die Vorderachse wird mit 60 %, die Hinterachse mit 40 % des tatsächlichen Gesamtgewichts (Summe der Radaufstandskräfte) belastet.

Achslastverteilung: Infolge dynamischer Einflüsse auftretende Verlagerung vertikaler Kraftanteile von einer Achse zur anderen.

AIS (Abbreviated Injury Scale): International verbreitete abgekürzte Verletzungsskala. Die Skala klassifiziert Verletzungen in einer Originalskala von 1 bis 6 mit zunehmender Schwere, wobei die von einer Verletzung ausgehende Lebensbedrohung das wichtigste Beurteilungskriterium darstellt.

Aktive Sicherheit: Sachlage, die durch die Summe aller Fahrzeugeigenschaften zur Reduzierung des Risikos, zu verunfallen, gegeben ist.

Allradantrieb: Motor und Getriebe vorn oder hinten, Antriebsräder vorn oder hinten.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_47

Ambulant behandelt: Bedeutet nach Definition der amtlichen Verkehrsunfallstatistik, nicht über einen Tag hinaus (Zeitgrenze 0 Uhr) medizinisch behandelt worden zu sein.

Anfahren: Beginn einer Fahrbewegung aus dem Stillstand heraus.

Anfangsgeschwindigkeit: Geschwindigkeit bei Beginn eines Vorgangs. Anfangsgeschwindigkeit (Ausgangsgeschwindigkeit) z. B. bei folgenden Vorgängen: Beschleunigen, Bremsen, Schleudern.

Anhalten: Beenden einer Fahrbewegung.

Anhängerwiderstand: Kraft, die vom Anhänger entgegen der Fahrtrichtung auf das Zugfahrzeug einwirkt.

Anlegen: Überwinden der Spiele und der Elastizitäten in der Bremseinrichtung bis zum Einsetzen der Bremskraft.

Anpassungsbeschleunigung: Durch Bremsung oder Rücknahme der Beschleunigung.

Anpassvorgang: Das Angleichen der eigenen Bewegung an eine andere durch kontrollierte Beschleunigung oder Verzögerung.

Ansprechdauer: Ansprechdauer der Bremsanlage ist die Zeit, die vom Beginn der Bewegung der Betätigungseinrichtung, auf das die Betätigungskraft wirkt bis zum Einsetzen der Bremskraft vergeht. Siehe DIN ISO 611.

Ansprechverhalten: Zeitliche Reaktion einer Anlage (z. B. Bremsanlage) auf eine Bewegung der Betätigungseinrichtung (z. B. Bremspedal). Auch andere Fahrzeugsysteme (Federung, Lenkung, Dämpfung) haben ein Ansprechverhalten.

Anstoßbereich: Größerer Kontaktbereich von unfallbeteiligten Verkehrsteilnehmern. Nicht zu verwendende Benennungen: Anstoßfläche, Kontaktfläche, Kontaktzone.

Anstoßstelle: Engerer, begrenzter Anstoßbereich.

Antriebsarten: Je nach Lage von Motor, Getriebe und Antriebsrädern wird unterschieden zwischen Front-, Heck- oder Allradantrieb.

Antriebs-Balance-Verfahren: Verfahren, bei dem die Stoßantriebe in Richtung und Größe aus den Impulsdreiecken mit den Ein- und Auslaufimpulsen durch Ausbalancieren grafisch ermittelt werden. Die Kontrolle erfolgt über den Drallsatz. Nicht zu verwendende Benennungen: Antriebs-Balance-Diagramm, Impulsdiagramm, Impulsdreieckskonstruktion.

Antriebsstrang: Strang, der die Motorleistung zu den Antriebsrädern überträgt. Umfasst z. B. Antriebsmotor, Kupplung, Getriebe, Wellen und Differential.

Antriebsstrangwiderstand: Kraft, die durch Bremswirkung des Antriebes entsteht und der Fahrtrichtung des Fahrzeugs entgegenwirkt, wenn der Antriebsmotor in Leerlast betrieben wird.

Aufprallgeschwindigkeit: Geschwindigkeit, mit der ein Körperteil eines äußeren Verkehrsteilnehmers auf das Fahrzeug aufprallt. Nicht zu verwendende Benennungen: Kollisionsgeschwindigkeit, Anstoßgeschwindigkeit, Anprallgeschwindigkeit, Hinweis: Nur in speziellen Fällen identisch mit der Kollisionsgeschwindigkeit.

Aufprallwinkel: Von zwei senkrechten Ebenen gebildeter Winkel, wobei eine Ebene die Mittellängsebene des Fahrzeugs bildet und die andere die auf dieses Fahrzeug einwirkende Hauptkraft enthält. Dieser Winkel wird am Fahrzeug, von vorn ausgehend, nach rechts und links gemessen und ist kleiner als 180°.

Aufschaufeln: Vorgang bei Kollisionen zwischen äußeren Verkehrsteilnehmern und Fahrzeugen mit Fronthauben, bei dem sich der Fußgänger oder Zweiradaufsasse in der Aufprall oder Kontaktphase relativ zur Fronthaube in Richtung Frontscheibe bewegt. Nicht zu verwendende Benennungen: Aufrutschen, Aufgleiten, Dieser Effekt tritt bei keilförmigen Fahrzeugkonturen und Erwachsenen in besonderem Maße auf.

Auftrieb: Vertikale Kraftkomponente, die durch die Luftumströmung am Fahrzeug entsteht. Kann zur Verminderung oder zur Erhöhung der Radlasten führen.

Aufwurfweite: Abstand der Vertikalebenen zwischen dem vordersten Punkt am Fahrzeug und der Kopfaufprallstelle des äußeren Verkehrsteilnehmers im Fronthaubenbereich. Aufwurfweite wird beeinflusst von der Kollisionsgeschwindigkeit und der Körpergröße des äußeren Verkehrsteilnehmers.

Augpunktbahn: Bewegungsbahn des Augpunktes.

Augpunkte des Fahrers: Zwei Punkte, die 65 mm voneinander entfernt sind und in 635 mm Höhe senkrecht über dem R-Punkt des Führersitzes liegen (nach Richtlinie 85/205/EWG). Für die Unfallanalyse im Weg-Zeit-Diagramm ist hinreichend genau davon auszugehen, dass die Augpunkte zusammengefasst in der Mitte als einziger Punkt berücksichtigt werden.

Ausbrechen: Unkontrolliertes Verlassen der vorgegebenen Fahrspur einer oder mehrerer Achsen.

Auslaufdrehwinkelgeschwindigkeit: Rotationsgeschwindigkeit des Fahrzeugs um seine Hochachse zu Beginn der Auslaufphase.

Auslaufgeschwindigkeit: Translatorische Geschwindigkeit der Unfallbeteiligten zu Beginn des Auslaufs.

Auslaufrichtung: Wird durch den Auslaufwinkel beschrieben.

Auslaufstellung: Position zu Beginn des Auslaufes in einem fahrzeugfesten Koordinatensystem relativ zum ortsfesten Koordinatensystem. Nicht im Zusammenhang mit dem Auslaufwinkel und der Auslaufrichtung zu betrachten.

Auslaufwinkel: Kurswinkel nach DIN 70 000 eines unfallbeteiligten Fahrzeugs zum Zeitpunkt des Lösens des Unfallbeteiligten.

Ausscheren/Einscheren: Gewollte Querbewegung eines Fahrzeugs infolge eines Lenkmanövers bei gleichzeitiger Längsbewegung. Erforderlich z. B. bei Überholvorgängen.

Äußere Deformation: Deformation im äußeren Bereich eines Fahrzeugs.

Äußere Sicherheit: Summe aller Maßnahmen, die dazu beitragen können, die passive Sicherheit für die anderen Unfallbeteiligten zu verbessern (Partnerschutz).

Äußere Verkehrsteilnehmer: Andere Verkehrsteilnehmer als Fahrzeuginsassen.

Beckendrehwinkel: Änderung der Lage des Beckens um dessen Querachse – gemessen an einer definierten Bezugsebene – während der Vorverlagerung eines Insassen bei einem Unfall. Vor allem bedeutend in Verbindung mit Submarining.

Beckengurtwinkel: Winkel zwischen der Horizontalebene und der Ebene des Beckengurtverlaufs am Insassen. Gilt nur für symmetrisch angeordnete untereffektive Gurtverankerungen.

Belastungskriterien: Größen zur Beschreibung der während eines realen oder simulierten Unfalls auftretenden Belastung, wobei die Belastung durch einzelne mechanische Größen über definierte Verfahren, die physikalische Größen verknüpfen, ausgedrückt wird. Zurzeit international übliche Belastungskriterien sind Beschleunigungen, Kräfte, Eindrückungen, Flächenpressungen und Beschleunigungs-Zeit-Berechnungen wie der HIC (Head Injury Criterion).

Beschleunigung: Vergrößern der Geschwindigkeit je Zeiteinheit. Neben kontrollierten Beschleunigungen treten auch unkontrollierte Beschleunigungen auf.

Beschleunigung, maximale: Ist die größte mögliche Geschwindigkeitsverzögerung je Zeiteinheit.

Beschleunigung, mittlere: Mittelwert der veränderlichen Beschleunigung. Man unterscheidet eine weg- und zeitbezogene Beschleunigung mit gegebenenfalls unterschiedlichen Zahlenwerten.

Beschleunigungsvermögen: Fähigkeit eines Fahrzeugs, in Abhängigkeit von der bisherigen Geschwindigkeit und der eingelegten Fahrstufe, die Geschwindigkeit zu vergrößern. Physikalisch wird positive und negative Beschleunigung unterschieden. Im technischen Sprachgebrauch wird für positive Beschleunigung die Benennung „Beschleunigung“ und für die negative Beschleunigung die Benennung „Verzögerung“ verwendet.

Bewegungsbahn: Bahn, auf der sich eine Person, ein Augpunkt, ein Fahrzeugpunkt oder ein Gegenstand bewegen. Bewegungsbahnen werden üblicherweise in einer Skizze der Örtlichkeit als Draufsicht maßstäblich dargestellt.

Bewegungslinie: Linie im Weg-Zeit-Diagramm, die eine Bewegung beschreibt.

Bleibende Deformation: Nach dem teilelastischen Rückprall verbleibende Deformation. Grundlage für die Bestimmung der EES. Nicht zu verwendende Benennung: Statische Deformation.

Brandversuch: Überprüfung des Verhaltens von Fahrzeugkomponenten bei Feuer- und Hitzeeinwirkung.

Bremsanlage: Nicht zu verwendende Benennung: Bremseinrichtung. Die Bremsanlage besteht aus der Betätigungseinrichtung, der Übertragungseinrichtung und der eigentlichen Bremse. Man unterscheidet zwischen verschiedenen Bremsanlagen (siehe DIN ISO 611), wie Betriebsbremsanlage, Hilfsbremsanlage, Feststellbremsanlage, Dauerbremsanlage, automatische Bremsanlage.

Bremsen: Erzeugung von Kräften, die der Fahrzeugbewegung entgegen wirken.

Bremskraft: Von der Bremsanlage erzeugte Kräfte, die in der Radaufstandsfläche wirken.

Bremsleistung: Produkt aus der augenblicklichen Bremskraft und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Siehe DIN ISO 611.

Bremsung: Benutzung einer Bremsanlage zur Beeinflussung der Fahrgeschwindigkeit.

Bremsvermögen: Summe der Möglichkeiten der Bremsanlagen, der Fahrtrichtung des Fahrzeugs entgegenwirkende Kräfte zu erzeugen, um die Geschwindigkeit zu verringern.

Bremsversagen: Vollständiger oder teilweiser Ausfall einer Bremsanlage. Nicht zu verwendende Benennung: Bremsausfall (beim Zweirad gegeben beim Ausfall aller unabhängigen Bremssysteme.

Bremsvorgang: Vorgänge, die zwischen dem Beginn der Betätigung der Betätigungseinrichtung oder dem Ende der Bremsung auftreten. Siehe DIN ISO 611.

Bremswirkung: Nutzbarer bzw. genutzter Anteil des Bremsvermögens. Nutzbarer Anteil reduziert sich z. B. durch Ausfall eines Bremskreises, Fahrbahneinflüsse, Fehlbedienung.

Dachaufprallarten: Es wird unterschieden: Überschlag, Dachfalltest.

Dämpfung: Unterdrückung oder Reduzierung von Schwingungen einzelner Fahrzeugteile oder des ganzen Fahrzeugs durch Energieentzug aus dem schwingenden System.

Dauer: Zeitspanne zwischen Anfang und Ende eines Vorgangs.

Deformationsenergie: Formänderungsarbeit, die als Folge der Umwandlung von kinetischer Energie zur bleibenden Deformation an Unfallbeteiligten oder sonstigen Objekten führt.

Deformationslage: Örtliche Beschreibung einer Deformation an einem Fahrzeug oder Objekt.

Deformationsrichtung: Richtung der Krafteinwirkung, unter der die Deformation stattgefunden hat.

Deformationszone: Fahrzeugbereich, der bei einem Unfall durch Deformation zur Energieabsorption beiträgt. Nicht zu verwendende Benennung: Deformationsbereich.

Dreidimensionales mathematisches Modell: Modell, das räumliche Bewegungen zulässt.

Driften: Kontrollierte Kurvenfahrt mit bewusstem Ausnutzen des Übersteuern. Häufig im Motorsport angewandte Kurvenfahrtechnik, auch als Powerslide bezeichnet.

Dynamische Abwicklung: Abstand zwischen Kopfaufprall und Hüftanstoßstelle und der Fahrbahn (Fußaufstandspunkt), gemessen entlang der beschädigten Fahrzeugkontur.

Dynamische Deformation: Maximale Deformation während des Verformungsvorgangs.

EBS (Equivalent Barrier Speed): Geschwindigkeit, mit der ein Fahrzeug bei einem Fahrzeug-Aufprallversuch (siehe Nr. 3.6.1) rechtwinklig gegen eine starre ebene Barriere prallt. Für Unfallrekonstruktion nicht direkt verwendbar. Beim Fahrzeug-Aufprallversuch messbar. Dient unter anderem der Bestimmung der EES.

EES (Energy Equivalent Speed): Energie-äquivalente Geschwindigkeit als Maß für die Deformationsenergie $WD = 1/2\ m \cdot EES^2$, die bei einer beliebigen Verformung eines Fahrzeugs mit der Masse m von der Struktur aufgenommen wird. Für Unfallrekonstruktion direkt verwendbar, beim Fahrzeug-Aufprallversuch nicht messbar, jedoch bestimmbar aus: Energiebilanz, Verformungskennlinie, Energieraster.

EES-Unfallrekonstruktionsmethode: Verfahren, bei dem man wahlweise mit der Kombination von Energie- und Impulssatz oder dem Impulssatz allein rechnet. Die Kontrolle erfolgt in beiden Zweigen über den Drallsatz bzw. bei ausschließlicher Anwendung des Impulssatzes zusätzlich über die ermittelten EES-Werte. Weitere Kontrollmöglichkeiten wie zum Beispiel über Kontaktpunktgeschwindigkeiten sind möglich. Im englischsprachigen Raum unter der Abk. EES-ARM (EES-Accident Research Method) veröffentlicht.

Eigenlenkverhalten: Gewollte oder ungewollte konstruktionsbedingte Beeinflussung der Geradeausfahrt oder des Kurvenfahrverhaltens eines Fahrzeugs ohne Eingriff des Fahrers in die Lenkung. Das Eigenlenkverhalten kann durch Umbaumaßnahmen (z. B. geänderte Reifendimension), technischen Zustand oder durch Beladung beeinflusst werden.

Eigenschwingungsverhalten: Schwingungen einzelner Fahrzeugteile oder des ganzen Fahrzeugs nach äußerer (z. B. Fahrbahnanstöße) oder innerer (z. B. durch Triebwerkstelle) Anregung. Die auftretenden Schwingungsfrequenzen sind unter anderem konstruktionsbedingt. Die Schwingung kann abklingend, stationär, aufklingend sein. Die Abstimmung von Federung und Dämpfung beeinflusst das Schwingungsverhalten.

Eindimensionales mathematisches Modell: Modell, das geradlinige Bewegungen zulässt.

Einholvorgang: Erreichen eines anderen Verkehrsteilnehmers, welcher sich in die gleiche Richtung bewegt.

Einknicken: Unkontrollierte Drehbewegung von Zugfahrzeug und/oder Anhänger um die Hochachsen. Bei Fahrzeugen mit Anhänger kann z. B. das Blockieren der Zugmaschinen-Hinterachse zum Einknicken führen.

Einlaufrichtung: Wird durch den Einlaufwinkel beschrieben. Bei äußeren Verkehrsteilnehmern: Geh- bzw. Laufrichtung. Nicht zu verwendende Benennungen: Anstoßrichtung, Anfahrrichtung.

Einlaufwinkel: Kurswinkel nach DIN 70 000 eines unfallbeteiligten Fahrzeugs zum Zeitpunkt des Erstkontakts. Nicht zu verwendende Benennung: Kollisionswinkel.

Elastischer Stoß: Die Stoßkräfte erzeugen keine bleibenden Deformationen. Der Newtonsche Restitutionskoeffizient ist $k = 1$, d. h., der Kompressionsimpuls ist so groß wie der Restitutionsimpuls.

Elastisch-plastischer Stoß: Die Stoßkräfte werden teilweise in bleibende Deformationen umgesetzt.. Der Newtonsche Restitutionskoeffizient ist $1 > k > 0$, d. h., der Kompressionsimpuls ist immer größer als der Restitutionsimpuls.

Endgeschwindigkeit: Geschwindigkeit bei Beendigung eines Vorgangs.

Energieraster: Eine Aufteilung der Fahrzeugdeformationszonen in Flächen, deren Deformationsenergieinhalte anhand von Aufprallversuchen bestimmt werden.. Bei der Unfallrekonstruktion werden die Deformationen im Grundriss eingezeichnet und daraus die EES errechnet (eingeschränkte Anwendbarkeit bei vertikal ungleicher Deformationstiefe).

Entscheidung: Endgütige Festlegung für eine unter mehreren Möglichkeiten.

Entscheidung, einfach: Bei subjektiv eindeutiger Sachlage.

Entscheidung, mehrfach: Bei bestehender Unsicherheit und/oder komplexer Sachlage.

Entscheidung, spontan: Handlung ohne Überlegung.

Erkennen: Erfassung und Bewertung einer wahrgenommenen Situation. Der Erkennungsvorgang endet mit der Reaktionsaufforderung (= Reaktionspunkt).

ETS (Equivalent Test Speed): Aufprallgeschwindigkeit gegen starre Barriere oder bewegliche starre Barriere gegen stehendes Fahrzeug bei einem beliebigen Fahrzeug-Aufprallversuch (Equivalent Test ET). Für Unfallrekonstruktion nicht direkt verwendbar. Beim Fahrzeug-Aufprallversuch messbar. Dient unter anderem der Bestimmung der EES.

Exzentrischer Stoß: Die Vektoren der Stoßkräfte gehen nicht durch die Schwerpunkte und erzeugen deshalb Impulsmomente (Drall). Nicht zu verwendende Benennungen: Nichtzentraler Stoß, Teilstoß.

Fahrgrenzen: Durch physikalische Gesetze vorgegebene Grenzen der Fahrdynamik. Überschreiten der Fahrgrenzen z. B. durch nicht ausreichenden Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn oder durch Erreichen der Kippgrenze.

Fahrleistung: Leistungsvermögen eines Kraftfahrzeuges. Wird beschrieben durch erreichbare Höchstgeschwindigkeit (nach DIN 70 020 Teil 3) und Beschleunigungsvermögen; nicht identisch mit Fahrstrecke/Zeitraum.

Fahrlinie: Bewegungslinie, die einen Fahrvorgang eines Fahrzeugs darstellt.

Fahrstabilität: Verhalten des Fahrzeugs nach Einleitung einer äußeren oder inneren Störung (Destabilisierung). Störungen der Fahrstabilität z. B. durch Flatter oder Pendelschwingungen, Radblockieren, Windeinflüsse oder Fahrbahnunebenheiten.

Fahrverhalten: Reaktion eines Fahrzeugs auf eingeleitete Fahrmanöver. Es beschreibt die Aktion und Reaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug/Umwelt. Standardisierte Fahrmanöver zur Beschreibung des Fahrverhaltens sind z. B.: – „stationäre Kreisfahrt“ (Über/Untersteuertendenz), – „Bremsen in der Kurve“ (Schleudertendenz), – „Lenkwinkelsprung“.

Fahrwiderstand: Summe der Kräfte, die auf das Fahrzeug entgegen der Fahrtrichtung einwirken.

Fahrzeug-Aufprallversuch: Experimentelle Unfallsimulation mit einem oder mehreren Fahrzeugen. Nicht zu verwendende Benennung: Crash-Test.

Fahrzeugkontur: Umrisslinie der in eine für das Unfallgeschehen bedeutsame Ebene projizierten Außenteile des betreffenden Fahrzeugs. Zur Charakterisierung eines Fahrzeugs wird meist die senkrechte Mittenlängsebene verwendet. Es werden unterschieden: – keilförmige Fahrzeugkontur, – pontonförmige Fahrzeugkontur, – trapezförmige Fahrzeugkontur, – kastenförmige Fahrzeugkontur.

Fahrzeugreaktion: Änderung der Fahrzeugbewegung, die sich aufgrund einer inneren oder äußeren Einwirkung auf das Fahrzeug ergibt. Innere Einwirkung: z. B. Lenken Äußere Einwirkung: z. B. Windkräfte.

Fahrzeugsicherheit: Sachlage, die durch die Gesamtheit aller Maßnahmen am Fahrzeug zur Vermeidung von Unfällen bzw. zur Verminderung von Unfallfolgen gegeben ist.

Flattern: Drehschwingung der gelenkten Räder (des gelenkten Rades) um die Lenkzapfen (die Lenkachse). Resonanz tritt bei Zusammentreffen von Radeigenfrequenz und flatterkritischer Fahrgeschwindigkeit auf.

Flugdauer: Zeitdauer der Flugphase des äußeren Verkehrsteilnehmers. Nicht zu verwendende Benennung: Flugzeit.

Flugphase: Zeitabschnitt zwischen dem Lösen eines äußeren Verkehrsteilnehmers vom Fahrzeug nach der Kontaktphase und dem ersten Aufprall eines Körperteils auf die Fahrbahn bzw. den Boden.

Flugweite: Vom äußeren Verkehrsteilnehmer in der Flugphase zurückgelegter Weg. Nicht zu verwendende Benennung: Flugweg.

Frontalaufprallarten: Es wird unterschieden: Barrierenaufprall, 0°-Barriere-Aufprall, 30°-Barriere-Aufprall, Offset-Barriere-Aufprall, Mastaufprall, Fahrzeug-Fahrzeug-Frontalaufprall. Nicht zu verwendende Benennungen: Wandaufprall, Schrägaufprall, Stufen-Barriere-Aufprall, (z. B. Pfahl (runder Querschnitt))

Frontantrieb: Motor und Getriebe vorn, Antriebsräder vorn.

Frontlinie: Bewegungslinie der Fahrzeugfront.

Gehlinie: Bewegungslinie, die eine Gehbewegung darstellt.

Gerader Stoß: Die Einlaufrichtungen der z. B. Fahrzeuge verlaufen parallel. Die Einlaufrichtungen können gegenläufig (z. B. Frontalauffahrunfall) bzw. gleichmäßig (z. B. Reihenauffahrunfall) sein.

Geschwindigkeit: Wegänderung je Zeiteinheit.

Geschwindigkeitsänderung Delta-V: Betrag der Differenz von Anfangs- und Endgeschwindigkeitsvektoren eines Verkehrsteilnehmers während eines bestimmten Zeitabschnittes innerhalb eines gewählten Koordinatensystems. Überwiegend verwendet bei Fahrzeugen als Differenz von Einlauf- und Auslaufgeschwindigkeitsvektoren. Nicht zu verwendende Benennungen: Geschwindigkeitsverlust, Geschwindigkeitsminderung, Geschwindigkeitsabbau.

Geschwindigkeitslinie: Bewegungslinie mit Angabe einer bestimmten Geschwindigkeit.

Getötet: Der Begriff „als Folge eines Unfalls getötet“ wird in verschiedenen Staaten unterschiedlich definiert, je nach dem maximalen Zeitraum, der zwischen Unfallereignis und Eintritt des Todes liegen darf. In der amtlichen Verkehrsunfallstatistik wird ein Zeitraum von 30 Tagen zugrunde gelegt.

Gieren: Drehbewegung des Fahrzeugs um die Fahrzeughochachse.

Gurtgeometrie: Räumliche Anordnung des Gurtsystems, bedingt durch die Lage der effektiven Gurtbefestigungs- bzw. Umlenkungspunkte in Fahrzeugen, bezogen auf den H-Punkt. Verfahren zur Bestimmung des H-Punktes siehe ECE-R 14.

Gurtkraft: Die in Längsrichtung des Gurtbandes wirkende Kraft.

Gurtlose: Summe aller wirkungslosen Gurtbandteillängen die dem Insassen bei einem Unfall eine Vorverlagerung ermöglichen, ohne dass wesentliche Gurtkräfte übertragen werden.

Gurtsyndrom: Verletzungsmuster, das infolge eines durch den Sicherheitsgurt verursachten Verletzungsmechanismus erzeugt wird. Nicht zu verwendende Benennung: Gurtverletzungsbild.

Gurtverlauf: Lage des Gurtbandes auf dem Körper von Fahrzeuginsassen, beeinflusst durch dessen Sitzposition, sachgemäße Handhabung, die Gurtgeometrie und unfallbedingte Insassenkinematik.

Heckantrieb: Motor und Getriebe hinten, Antriebsräder hinten.

Heckaufprallarten: Es wird unterschieden: Starre Barriere gegen Fahrzeug, Fahrzeug-Fahrzeug-Heckaufprall.

Hecklinie: Bewegungslinie des Fahrzeughecks.

Innere Deformation: Deformation im Fahrzeuginnenraum.

Innere Sicherheit: Summe aller Maßnahmen, die dazu beitragen können, die passive Sicherheit für die Fahrzeuginsassen zu verbessern (Selbstschutz).

Interaktion: Gegenseitige Belastung von Fahrzeuginsassen.

ISS (Injury Severity Score): Verletzungsschwere-Einstufung von mehrfach verletzten Personen auf der Basis der AIS. Die Zahlenangabe von 1 bis 75 stellt die Summe der Quadrate der schwersten Einzelverletzungen für die drei am schwersten verletzten Körperregionen (von insgesamt sechs) dar.

Kinematik in der Aufprallphase: Bewegung der Unfallbeteiligten während ihres Kontakts. Nicht zu verwendende Benennung: Kollisionskinematik.

Kinematik in der Auslaufphase: Bewegung der Unfallbeteiligten nach dem Zeitpunkt des Lösens.

Kinematik in der Auslaufphase von äußeren Verkehrsteilnehmern: Resultierender Abstand zwischen Kollisionspunkt und Endlage des äußeren Verkehrsteilnehmers bei der Kollision mit einem Fahrzeug. Nicht zu verwendende Benennung: Wurfweg Hinweis: Setzt sich aus Kontaktweg, Flug- und Rutschweite des äußeren Verkehrsteilnehmer zusammen.

Kippen: Drehen eines Fahrzeugs um die Verbindungslinie der Radaufstandspunkte einer Fahrzeugseite und Abheben der Räder der anderen Fahrzeugseite. Kippen kann statisch (durch Hangabtrieb) oder dynamisch (z. B. durch Fliehkräfte bei Kurvenfahrt) erfolgen: Umkippen Fahrzeug fällt auf die Seite, Seitlicher Überschlag: Fahrzeug dreht sich um mindestens 180 Grad um die Längsachse.

Kollisionsarten nach zeitlicher Reihenfolge: Man unterscheidet in Primärkollisionen, Sekundärkollisionen und Tertiärkollisionen, wenn sich während der Kollision die Kollisionsart geändert hat oder, bei gleicher Kollisionsart, ein ein- oder mehrmaliger deutlicher Einbruch der die Beschädigungen auslösenden Stoßkräfte mit einem nachfolgenden deutlichen Wiederanstieg der Stoßkräfte aufgetreten ist.

Kollisionsgeschwindigkeit/Einlaufgeschwindigkeit: Geschwindigkeit eines Verkehrsteilnehmers zum Zeitpunkt des Erstkontakts mit einem anderen Fahrzeug, Lebewesen oder Objekt. Folgende Benennungen sind im Zusammenhang mit Fußgängerunfällen nicht zu verwenden: Anfahrgeschwindigkeit, Anstoßgeschwindigkeit, Auffahrgeschwindigkeit, Anprallgeschwindigkeit, Aufprallgeschwindigkeit.

Kollisionspunkt: Die rekonstruierte Lage des Kraftangriffspunktes der Unfallbeteiligten an der Unfallstelle. Nicht zu verwendende Begriffe: Kollisionslage, -ort, -stelle.

Kollisionsstellung: Stellung der Unfallbeteiligten zueinander zum Zeitpunkt des Erstkontakts innerhalb eines ortsfesten Koordinatensystems. Nicht zu verwendende Begriffe: Anstoßstellung, Kollisionskonstellation, Kollisionsposition, Anstoßgeometrie.

Kollisionswinkel: Zwischen zwei Fahrzeugen: Winkel zum Zeitpunkt des Erstkontakts zwischen beiden senkrechten Ebene, die jeweils der Mittenlängsebene eines Fahrzeugs entsprechen. Zwischen einem Fahrzeug und einem starren oder beweglichen Hindernis: Winkel zum Zeitpunkt des Erstkontakts zwischen zwei senkrechten Ebenen, von denen die eine der senkrechten Mittenlängsebene des Fahrzeugs und die andere einer zur senkrechten und ebenen Oberfläche senkrechten Ebene entspricht. Der Kollisionswinkel kann zwischen 0 und 180° betragen (rechts oder links), wobei die Frontalkollision als 0° und die Heckkollision als 180° definiert sind.

Kontaktdauer: Dauer der Kontaktphase. Nicht zu verwendende Benennungen: Kontaktzeit, Stoßdauer.

Kontaktphase: Zeitabschnitt zwischen der Erstberührung des äußeren Verkehrsteilnehmers und dem Lösen vom Fahrzeug. Nicht zu verwendende Benennung: Aufprallphase.

Kontaktpunktbahn: Bewegungsbahn des Kontaktpunktes.

Kontaktpunktlinie: Bewegungslinie des Kontaktpunktes.

Kontaktweg: Zurückgelegter Weg eines Fahrzeugs während der Kontaktphase mit dem äußeren Verkehrsteilnehmer.

Koordinatensystem: ist ein rechtwinkliges Bezugssystem mit frei wählbarem Koordinatenursprung. Man unterscheidet: – fahrzeugfestes Koordinatensystem (nach DIN 70 000/08.83, Nr. 39), – horizontiertes Koordinatensystem (nach DIN 70 000/08.83, Nr. 40), – ortsfestes Koordinatensystem (nach DIN 70 000/08.83, Nr. 41), Die Winkellage eines Koordinatensystems wird durch die Winkeldrehung der einzelnen Achsen, bezogen auf ein Vergleichssystem, angegeben (siehe DIN 70 000/08.83, Nr. 42 bis 44).

Kraftangriffspunkt: Theoretischer Punkt, an dem Kräfte einer Kollision mit verhaktem oder streifendem Stoß eingeleitet werden. dies ist häufig der Punkt im Bereich von zerstörten Fahrzeugteilen, in dem die größte Festigkeit der Fahrzeugstruktur vorhanden ist. Nicht zu verwendende Benennung: Hauptanstoßstelle.

Kurvengrenzgeschwindigkeit: ist die bei stabilem Durchfahren einer Kurve maximal mögliche konstante Geschwindigkeit, bezogen auf den jeweiligen Radius einer Kurve oder eines Kurvenabschnittes. Trifft zu für Fahrzustände ohne Bremsen und Beschleunigen.

Kurvenverhalten: . Das Kurvenfahrverhalten kann über-, untersteuernd oder neutral sein. Es ist unter anderem abhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Beim Übersteuern fährt das Fahrzeug einen kleineren Kurvenradius als den, der dem Lenkeinschlag entspricht. Beim Untersteuern befährt es einen größeren Radius. Beim neutralen Kurvenfahrverhalten entspricht der durchfahrene Kurvenradius dem Lenkeinschlag.

Längsdynamik: In Fahrzeuglängsrichtung auftretende Fahrzeugreaktionen infolge innerer oder äußerer Krafteinflüsse.

Längsrutschweite: Parallel zur Schwerpunktbewegungsbahn gemessene Rutschweite. Nicht zu verwendende Benennung: Längsrutschweg.

Längswurfweite:

Lastverlagerung: Infolge dynamischer Einflüsse auftretende Umverteilung vertikaler Kraftanteile. Die Last setzt sich zusammen aus der Gesamtmasse von Fahrzeug und gegebenenfalls Zuladung.

Lastwechsel: Übergang vom angetriebenen zum geschobenen Fahrzeugzustand und umgekehrt.

Leicht verletzt: Bei der AIS handelt es sich um Verletzungen des Grades 1, bei der amtlichen Verkehrsunfall-Statistik wird ambulante Behandlung vorausgesetzt.

Lenkeinschlag: Abweichung der Räder bzw. des Rades von der Position, die das Geradeauslaufen des Fahrzeugs bewirkt.

Lenken: Bewegung der Lenkeinrichtung zur Erreichung oder Einhaltung eines gewünschten bzw. vorgegebenen Fahrzeugkurses. Die Lenkeinrichtung besteht in der Regel aus Lenkrad bzw. Lenker, Lenkgetriebe und Übertragungsteilen. Durch Lenkhilfen kann die erforderliche Lenkkraft reduziert werden.

Lenkermoment: Um die Drehachse des Lenkers auftretendes Moment.

Lenkmoment: Summe der Momente um die Lenkachsen der gelenkten Räder. Siehe auch DIN 70 000.

Lenkradmoment: Das Moment um die Drehachse des Lenkrades. Siehe auch DIN 70 000 Das Lenkradmoment ergibt in Abhängigkeit vom Lenkraddurchmesser die Lenkradkraft.

Lenkradwinkel: Der von der Geradeausstellung aus gemessene Drehwinkel am Lenkrad. Siehe auch DIN 70 000.

Lösen: Entlastung der Bremseinrichtung bis zum Aussetzen der Bremskraft.

Luftwiderstand: Kraft, die bei der Umströmung des Fahrzeugs durch Luft entsteht und der Fahrtrichtung des Fahrzeugs entgegenwirkt.

MAIS (Maximum Abbreviated Injury Scale): Verletzungsschwere der schwersten Einzelverletzung von mehrfach verletzten Personen.

Mathematische Modelle: System von Gleichungen, mit dem das kinematische Verhalten von Unfallbeteiligten bei einem Unfallereignis wirklichkeitsnah simuliert wird.

Nicken: Drehschwingung des Fahrzeugaufbaues um die Nickachse, die im Allgemeinen parallel zur Fahrzeugquerachse liegt. Nicken z. B. beim Bremsen oder beim Beschleunigen durch Änderung der dynamischen Radlasten.

Notbremsung: Notbremsung ist das Aufbringen der individuell maximal möglichen Betätigungskraft bei Straßenfahrzeugen bzw. das Betätigen der dafür vorgesehenen Einrichtungen bei Schienenfahrzeugen zur Abwehr einer (vermeintlichen) Gefahrensituation. Nicht zu verwendende Benennung: Panikbremsung

OAIS (Overall Abbreviated Injury Scale): Einschätzung der Gesamtverletzungsschwere von mehrfach verletzten Personen. Inzwischen abgelöst durch die Begriffe MAIS und ISS.

Overload: Zusätzlich über die Rückenlehne erfolgende Belastung eines Insassen durch dahinter befindliche Insassen oder Teile der Ladung bei einer Fahrzeugkollision. Nicht zu verwendende Benennung: Überlastung.

Passive Sicherheit: Sachlage, die durch die Summe aller Fahrzeugeigenschaften zur Verminderung von Unfallfolgen gegeben ist.

Pendeln: Gekoppelte Lenk-, Gier- und Rollschwingung von gelenkig verbundenen Fahrzeugsystemen.. Gelenkig verbundene Fahrzeugssysteme sind z. B. Motorrad mit Vorderrad- und Hauptrahmensystem, Pkw mit Wohnanhänger, Sattelfahrzeug mit Auflieger. Pendeln führt zur Beeinträchtigung der Fahrstabilität durch Verringerung der Reifenkraftschlussreserven, im Allgemeinen mit der Fahrgeschwindigkeit zunehmend.

Pendeltest: Auf bestimmte Fahrzeugbereiche prallt ein definiertes Pendel mit einer bestimmten Aufprallenergie.

Plastischer Stoß: Die Stoßkräfte werden vollständig in bleibende Deformationen umgesetzt. Der Newtonsche Restitutionskoeffizient ist k = 0, d. h., es tritt nur ein Kompressionsimpuls auf.

Primärstoß: Erster Aufprall des äußeren Verkehrsteilnehmers auf ein Fahrzeug oder anderes Objekt.

Prüfschlitten-Aufprallversuch: Auf einem Prüfschlitten montierte Fahrzeugteile werden einem definierten Beschleunigungsverlauf unterworfen. Überwiegend Versuche mit Fahrgastzellen zur Erprobung der Haltesysteme (z. B. Gurte) mit Dummys.

Quasistatischer Test: Auf bestimmte Fahrzeugbereiche wird innerhalb einer bestimmten Zeitspanne eine definierte Kraft aufgebracht und über eine gewisse Dauer aufrechterhalten. Es wird unterschieden: Dacheindrücktest, Türeindrücktest.

Querdynamik: Quer zur Fahrzeuglängsrichtung auftretende Fahrzeugreaktionen infolge innerer oder äußerer Krafteinflüsse.

Querkraft: In Fahrzeugquerrichtung wirkende, durch innere oder äußere Einwirkung entstehende Kraft.

Querrutschweite: Rechtwinklig zur Schwerpunktbewegungsbahn gemessene Rutschweite. Nicht zu verwendende Benennung: Querrutschweg.

Querversetzen: Ungewollte seitliche Verschiebung des Fahrzeugs parallel zu seiner Längsachse durch Reaktion des Fahrwerks auf äußere Störeinflüsse. Kann z. B. durch Seitenwind ausgelöst werden und nimmt im Allgemeinen mit der Fahrgeschwindigkeit zu.

Querwurfweite: Siehe Wurfweite) Rechtwinklig zur Schwerpunktbewegung des Fahrzeugs gemessener Abstand. Nicht zu verwendende Benennung: Querwurfweg.

Radlastverteilung: Radlastverteilung längs, Radlastverteilung quer.

Radlastverteilung: Infolge dynamischer Einflüsse auftretende Verlagerung vertikaler Kraftanteile an den Rädern in Längs- oder Querrichtung.

Radwiderstand: Kraft, die beim Abrollen des Rades entsteht und der Fahrtrichtung des Fahrzeugs entgegenwirkt. Unter Radwiderstand fallen unter anderem Rollwiderstand, Kurven- und Vorspurwiderstand, Fahrbahnwiderstand, Bewehrungswiderstand, Schallwiderstand, Hinderniswiderstand.

Rasterfeldmethode: Verfahren zur Ermittlung der Deformationsenergie aus den Fahrzeugdeformationen.

Räumliche Vermeidbarkeit: Gekennzeichnet dadurch, dass das betrachtete Fahrzeug vor dem Kollisionspunkt zum Stillstand gebracht werden kann.

Reaktion: Das nach Wahrnehmen und Erkennen einer Veränderung oder Gefahr ausgelöste Verhalten. Eine Reaktion kann z. B. erfolgen auf eine vermeintliche oder tatsächliche Gefahr und soll der Gefahrabwehr dienen.

Reaktionsort: Örtliche Lage des Reaktionspunktes.

Reaktionspunkt: Ende des Erkennungsvorgangs und Einleitung der Reaktion. Es ist zu unterscheiden zwischen frühest möglichem und aus dem Geschehen ermittelten Reaktionspunkt.

Reaktionsverzug: Dauer zwischen frühest möglichem und tatsächlichem Reaktionspunkt.

Reaktionszeitpunkt: Zeitliche Zuordnung des Reaktionspunktes.

Reibungskegel-Verfahren: Verfahren, das die Gleitreibung für streifende Kollision verwendet.

Relativgeschwindigkeit: Betrag der Differenz der (Kollisions-) Geschwindigkeitsvektoren.

Rhomboid-Schnittverfahren: Rechnerischgrafisches Verfahren, bei dem die drei Erhaltungssätze (Impuls, Drall und Energie mit Toleranzen) berücksichtigt werden.

Rollen: Bewegung eines Fahrzeugs ohne Antriebs- bzw. Bremseinfluss in Längsrichtung. Nicht identisch mit Rollen als Beschreibung des Eigenschwindungsverhaltens.

Rückwärtsrechnungen: Der Unfallablauf wird rückwärts – beginnend mit der Endstellung der Unfallbeteiligten und endend zum Beispiel mit der Ausgangssituation – betrachtet.

Rutschdauer: Zeitdauer der Rutschphase des äußeren Verkehrsteilnehmers. Nicht zu verwendende Benennung: Rutschzeit.

Rutschphase: Zeitabschnitt zwischen dem ersten Aufprall eines Körperteils des äußeren Verkehrsteilnehmers nach der Flugphase bis in seine Endlage auf der Fahrbahn bzw. dem Boden. Auch in der Rutschphase von äußeren Verkehrsteilnehmern können kurzzeitige Flugphasen auftreten.

Rutschweite: Vom äußeren Verkehrsteilnehmer zurückgelegter resultierender Weg in der Rutschphase. Nicht zu verwendende Benennung: Rutschweg.

Schadenkriterien: Belastungskriterien, die in bekanntem Zusammenhang mit Schäden an menschlichen Leichen stehen. Im Zusammenhang mit Versuchen mit menschlichen Leichen ist der Begriff „Verletzung“ zu vermeiden.

Schadenkriteriumsgrenze: Grenzwert des Schadenkriteriums, bis zu dem an menschlichen Leichen bestimmte Schäden mit bestimmter Wahrscheinlichkeit auftreten.

Schiefer Stoß: Die Einlaufrichtungen der z. B. Fahrzeuge verlaufen nicht parallel.

Schleudern: Unkontrollierte, instationäre Fahrzeugbewegung um eine Hochachse.

Schlupf: Auf die Fahrzeuggeschwindigkeit bezogene Differenz zwischen Fahrzeug- und Radumfangsgeschwindigkeit. Siehe DIN 74 250.

Schräglauf: Abweichung der Bewegungsrichtung eines Rades von der Radebene unter Querkraftwirkung. Im Allgemeinen in Kurvenfahrt durch Fliehkraftwirkung; der Schräglauf wird durch den Schräglaufwinkel gekennzeichnet.

Schutzkriterien: Für anthropomorphe Prüfeinrichtungen (so genannte Dummys) definierte Belastungskriterien, die in bekanntem Zusammenhang mit Verletzungs- und Schadenkriterien stehen.

Schutzkriteriumsgrenze: In Prüfvorschriften verankerte Grenzwerte der Schutzkriterien.

Schwellen: Anstieg der Bremskraft bis zum Erreichen eines annähernd konstanten Wertes.

Schwer verletzt: Bei der AIS handelt es sich um Verletzungen des Grades 3, bei der amtlichen Verkehrsunfall-Statistik wird stationäre Behandlung in einem Krankenhaus vorausgesetzt. Die Bezeichnung AIS 3+ fasst schwer verletzt bis tödlich verletzt zusammen.

Schwerpunktlinie: Bewegungslinie des Schwerpunktes.

Seitenaufprallarten: Es wird unterschieden: 90°-Seitenaufprall, schräger Seitenaufprall, Mastanprall, Fahrzeug-Fahrzeug-Seitenaufprall, Seitenaufprall mit starrem Stoßwagen Crab-Barriere: Seitenaufprall mit deformierbarem Stoßwagen (Deformierbarer Stoßwagen mit gegenüber der Fahrzeuglängsachse verdrehter Bewegungsrichtung trifft das zu prüfende Fahrzeug in die Seite).

Sekundärstoß: Nach dem Primärstoß folgender 2. Aufprall des äußeren Verkehrsteilnehmers auf die Straße oder sonstiges Objekt.

Sichtbarkeitslinie: Die Verbindung aller Punkte im Weg-Zeit-Diagramm des beobachteten Verkehrsteilnehmers, an denen dieser vom Beobachter frühestens gesehen werden konnte. Sie gibt an, zu welchem Zeitpunkt und an welchem Ort das zu beobachtende Fahrzeug zum ersten Mal gesehen werden konnte. Nicht zu verwendende Benennungen: Sichtbegrenzungslinie, Sichtschattenlinie.

Sichtgrenze: Begrenzung der Sicht durch Sichthindernisse oder durch schlechte Sichtverhältnisse wie Nebel, Dunkelheit usw.

Sichtpunkt: Punkt eines Körpers oder eines Gegenstandes der beim Auftauchen hinter einem Hindernis zuerst sichtbar wird.

Sichtpunktbahn: Bewegungsbahn des Sichtpunktes.

Sichtstrahl: Vom Augpunkt ausgehende Gerade. Nicht zu verwendende Benennung: Sehstrahl.

Spurwechsel: Durch gewolltes Lenken eingeleitetes Querversetzen des Fahrzeugs. Beim Überholvorgang werden sowohl Ausscher- als auch Einschervorgang jeweils als Spurwechsel bezeichnet.

Standardantrieb: Motor und Getriebe vorn, Antriebsräder hinten.

Stationär behandelt: Nach Definition der amtlichen Verkehrsunfallstatistik Behandlung über eine Nacht (0-Uhr-Grenze) in einem Krankenhaus.

Statische Abwicklung: Die von der Fahrbahn bis zur Lage des Kopfes auf der beschädigten Fahrzeugkontur abgewickelte Fußgängergröße.

Steigungswiderstand: Kraft, die zum Erreichen einer größeren geodätischen Höhe erforderlich ist und der Fahrtrichtung des Fahrzeugs entgegenwirkt.

Stoßantrieb: Zeitliches Integral der Stoßkraft über der Kontaktdauer. Nicht zu verwendende Benennungen: Impulsverlust, Impulsbetrachtung

Stoßdauer: Dauer der Aufprallphase. Es wird unterschieden bei verhaktem Stoß: unendlich kurze Kontaktdauer bei streifendem Stoß: Dauer bis zum Lösen oder bis zu einem zweiten Stoß Nicht zu verwendende Benennung: Kontaktdauer.

Stoßpunkt: Kraftangriffspunkt beim verhakten Stoß.

Strecke: Entfernung zweier Wegpunkte voneinander.

Streifender Stoß: Lage des Kraftangriffspunktes verändert sich während der Stoßdauer. Nicht zu verwendende Benennung: Stoß mit Reibung.

Streifstoß: Kontaktflächen durch den streifenden Aufprall des äußeren Verkehrsteilnehmers am Fahrzeug liegen parallel zur Bewegungsrichtung des Fahrzeugs.. Beispiel: Fußgänger läuft seitlich in ein Fahrzeug. Geringe Wurfweiten, selten Flugphasen, sondern nur seitliches Entlanggleiten des äußeren Verkehrsteilnehmers.

Submarining: Verlagerung des Beckengurtes (bzw. Beckengurtteils eines Dreipunktgurtes) in den Abdominalbereich durch Aufgleiten über die Beckenknochen. Nicht zu verwendende Benennungen: Untertauchen, Aufgleiten.

Teilbremsung: Die Teilbremsung ist das kontrollierte Herbeiführen einer Verzögerung.

Teilstoß: Kontaktflächen durch den unvollständigen Aufprall des äußeren Verkehrsteilnehmers auf das Fahrzeug liegen quer zur Bewegungsrichtung des Fahrzeugs.. Beispiel: Fußgänger wird beim Hinein- oder Herauslaufen in den bzw. aus dem Verkehrsraum des Fahrzeugs nur teilweise erfasst. Kann auch Streifstoß sein.

Trampeln: Drehschwingung starrer Achsen um eine Achse parallel zur Fahrzeuglängsachse.

Transaxle-Antrieb: Motor vorn, Getriebe und Antriebsräder hinten.

Überdeckungsgrad: Prozentualer Anteil der beaufschlagten Fahrzeugbreite, der bei einem seitlich versetzten (Offset-)Aufprall getroffen wird.. Übliche Überdeckungsgrade bei Front- und Heck-Offset-Aufprallversuch sind 30, 40 und 50 %.

Überholvorgang: Setzt sich zusammen aus den Vorgängen Ausscheren, Vorbeifahren und Einscheren.

Unfallart: . Nicht einheitlich definiert

a) Im Straßenverkehrsunfallgesetz werden die folgenden zehn Unfallarten unterschieden:
   01. Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht.
   02. Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das vorausfährt oder wartet.
   03. Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt.
   04. Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das entgegen kommt.
   05. Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt.
   06. Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger.
   07. Aufprall auf ein Hindernis auf der Fahrbahn.
   08. Abkommen von der Fahrbahn nach rechts.
   09. Abkommen von der Fahrbahn nach links.
   10. Unfall anderer Art.

b) Nach ISO 6813 keine eindeutige Unterscheidung
   Folgende Begriffe werden verwendet:
   Abkommen von der Straße, Überschlagen, anderer Unfall ohne Kollision, Einknicken, unbeabsichtigtes Abkuppeln des Anhängers, Verlust der Ladung, Brand, Frontalkollision, seitliche Kollision, Heckaufprall.

c) Unterfahren
   Darüber hinaus gebräuchlicher Begriff:
   Ein Fahrzeug erfährt Stoßkräfte, die oberhalb der dafür vorgesehenen Zonen zur Energieaufnahme wirksam werden.

Unfallkinematik: Bewegung der Unfallbeteiligten während des Unfallvorgangs.

Unfallkinematik am Ende der Einlaufphase: Bewegung der Unfallbeteiligten zum Zeitpunkt des Erstkontakts.

Unfallort: Gemeindegebiet, in welchem der Unfall stattfand. ÖNORM V 5050.

Unfallstelle: Begrenzter Bereich eines Unfallortes.

VDI/DCD (Vehicle Deformation Index/Collision Deformation Classification): SAEJ 224 beschreibt in einem siebenziffrigen Index die Fahrzeugbeschädigung so, dass ein Beschädigungsbild nach Art und Ausmaß der Unfallbeschädigungen vergleichbar klassifiziert werden kann.

Verformungskennlinie: Der Kraftverlauf über dem Deformationsweg.

Verhakter Stoß: Lage des Kraftangriffspunktes bleibt während der Stoßdauer erhalten oder ändert sich nur wenig.

Verletzungskriterien: Für den Menschen definierte Belastungskriterien, die in bekanntem Zusammenhang mit der Verletzungsschwere eines Menschen stehen.

Verletzungskriteriumsgrenze: Grenzwert des Verletzungskriteriums, bis zu dem beim Menschen Verletzungen bestimmter Schwere mit bestimmter Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden. Nicht zu verwendende Benennungen: Biomechanische Toleranzgrenze, Erträglichkeitsgrenze, Belastbarkeitsgrenze.

Verletzungsmechanismus: Physikalischer Vorgang, der zu einer Verletzung, meist zu einem typischen Verletzungsmuster führt.

Verletzungsmuster: Sammelbegriff für eine Reihe von typischen Verletzungen, die meist auf einen bestimmten Verletzungsmechanismus schließen lassen.

Verletzungsschwere: Klassifizierung von Verletzungen nach verschiedenen Bewertungskriterien.

Vermeidbarkeit: Möglichkeit, ein Ereignis zu vermeiden.. Bei einem untersuchten Unfall bedeutet dies die theoretische Möglichkeit unter bestimmten realistischen Annahmen, dass der Unfall hätte vermieden werden können.

Vertikaldynamik: Bewegung und Bewegungsänderung des Fahrzeugs in Richtung der Fahrzeughochachse. Hervorgerufen z. B. durch Querrinnen oder Änderungen der Fahrbahnneigung sowie durch Kräfte infolge der Fahrzeugströmung oder aufgrund einer Kollision. Fahrzeugbewegungen: Ein-/Ausfedern, Eintauchen, Nicken, Trampeln.

Verzögerung: Verringerung der Geschwindigkeit in der Zeiteinheit.

Verzögerung, maximale: Höchstwert der während eines Bremsvorgangs oder einer Kollision auftretenden Verzögerung.

Verzögerung, mittlere: Mittelwert des während des Brems- oder Kollisionsvorgangs veränderlichen Verzögerung.. Man unterscheidet eine weg- und zeitbezogene Verzögerung mit gegebenenfalls unterschiedlichen Zahlenwerten.

Verzögerungslinie: Bewegungslinie, die eine Verzögerung beschreibt (parabelförmig). Nicht zu verwendende Benennung: Bremsparabel.

Vierrad-Modell: Modell eines Fahrzeugs, bei dem das Verhalten einer Achse durch jeweils nur ein Rad simuliert wird.

Vollbremsung: Vollbremsung ist das kontrollierte Herbeiführen der physikalisch maximal möglichen Verzögerung.

Vollstoß: Kontaktflächen durch den vollständigen Aufprall des äußeren Verkehrsteilnehmers liegen quer zur Bewegungsrichtung des Fahrzeugs. Beispiel: Fußgänger wird vom Fahrzeug vollständig erfasst. Ist mit hohen Wurfweiten verbunden.

Voll-Verzögerung, maximale: Maximal erzielter Verzögerungswert während eines Bremsvorgangs. Maximale Vollverzögerung tritt sowohl bei Teil- als auch bei Vollbremsung auf.

Voll-Verzögerung, mittlere: Mittelwert der erzielten Verzögerung vom Ende der Schwellzeit bis Ende der Bremsung.

Vorverlagerung: Durch Fahrzeugverzögerung verursachte Vorwärtsbewegung eines Insassen relativ zu seinem Fahrzeug.

Vorwärtsrechnung: Der Unfallablauf wird vorwärts, beginnend mit der Ausgangssituation der Unfallbeteiligten und enden zum Beispiel mit der Endstellung mit Hilfe eines mathematischen Modells, betrachtet. In den USA veröffentlichtes Verfahren ist SMAC.

Wahrnehmen: Bemerken eines Objektes oder einer Situation. Die der Wahrnehmung folgende optische Erkennbarkeit wird beeinflusst durch Blickzuwendung (peripher/foveal) und Augenpassung (Adaption/Akkommodation).

Wanken: Drehschwingung des Fahrzeugaufbaus um die Wankachse, die im Allgemeinen etwa parallel zur Fahrzeuglängsachse liegt. Das Wanken (auch Rollen) kann konstruktiv zur Änderung des Eigenlenkverhaltens genutzt werden (siehe Wanksteuerung).

Wanksteuerung: Lenkbewegung des Fahrzeugs ohne Lenkeingriff des Fahrers, bewirkt durch Radstellungsänderungen in folge Aufbaubewegung um die Wankachse (Rollbewegung). Die Wanksteuerung (Rollsteuerung) kann als konstruktives Hilfsmittel zur Beeinflussung des Eigenlenkverhaltens eingesetzt werden.

Wegachse: Weg-Koordinate im Weg-Zeit-Diagramm.

Weglinie: Gerade, die einen konstanten Weg im Diagramm abbildet.

Weg-Zeit-Diagramm: Darstellung des Weges als Funktion der Zeit in einem kartesischen Koordinatensystem mit Weg- und Zeitachse. Nicht zu verwendende Benennung: Zeit-Weg-Diagramm.

Wogen: Drehschwingung des Fahrzeugaufbaues um eine fahrzeugferne, parallel zur Fahrzeugquerachse liegende Achse.

Wurfweite: Parallel zur Schwerpunktbewegung des Fahrzeugs gemessener Abstand. Nicht zu verwendende Benennung: Längswurfweg.

Zeitachse: Zeit-Koordinate im Weg-Zeit-Diagramm.

Zeitliche Vermeidbarkeit: Gekennzeichnet dadurch, dass das betrachtete Fahrzeug den eventuellen Kollisionspunkt nach dem Unfallpartner passiert. Kollisionspunkte deshalb, weil sich der Kollisionspunkt durch die Bewegung der Unfallpartner in der Zeitbetrachtung verschieben kann.

Zeitlinie: Gerade, die eine konstante Zeit im Weg-Zeit-Diagramm abbildet.

Zentrischer Stoß: Die Vektoren der Stoßkräfte gehen durch die Schwerpunkte und erzeugen deshalb Impulsmomente (Drall). Nicht zu verwendende Benennungen: Zentraler Stoß, Vollstoß.

Zucken: Geradlinie (translatorische) Schwingung des Fahrzeugs in Richtung der Fahrzeuglängsachse.

Zweidimensionales mathematisches Modell: Modell, das Bewegungen in einer Ebene zulässt.

2 Teil 2 – Spuren

Abplattung: Druckstelle am metallenen Teil des Steckschlosses.

Abriebspur: Veränderung an Unfallfaktoren, bei der durch Gleitbewegung Substanz abgenommen bzw. abgetragen wurde.

Antragung: Anhaftung einer Substanz an Unfallfaktoren.

Aufrieb-/Anriebspur: Veränderung an Unfallfaktoren, bei der durch Gleitbewegung Substanz aufgebracht bzw. aufgetragen wurde.

Auftreffstelle: Bereich, der als erste Kontaktstelle während der zur Endlage führenden Bewegung erkennbar ist.

Auftrennung: Zerstörung des Gewebes über einen Teil der Breite des Gurtbandes.

Aufweitung: Veränderung der ursprünglichen Form von Beschlag- und Gehäuseteilen infolge Gurtbandbeanspruchung.

Beleuchtungen: Begriffe labormäßiger Lampenanalysen sind nicht einbezogen.

Beschleunigungsspur: Spur eines Reifens der Antriebsräder beim Durchdrehen oder im Bereich beginnenden Durchdrehens.

Beule: Aufwölbung oder Vertiefung an einem glattflächigen Bauteil.

Blutspur: Ansammlung oder An-/Auftragung von Blut.

Brandspur: Durch Einwirkung offenen Feuers entstandene Veränderung eines ursprünglichen Zustandes.

Bremsplatte: Lokale Oberflächenabtragung an der Reifenlauffläche, die nicht dem üblichen Reifeneinsatz zugeordnet werden kann.

Bremsspur: Spur eines in einer Längsrichtung unter Schlupf abrollenden Reifens.

Bruch: Durch Belastung entstandene gewaltsame Teilung eines Bauteils.

Deformation: Unfallbedingte Veränderung der geometrischen Form eines Bauteils.

Driftspur: Reifenspur eines Rades, das sich unter merklichem Schräglaufwinkel – also mit Querschlupf – bewegt, wobei der Fahrzeug-Schwimmwinkel und seine zeitliche Änderung begrenzt bleiben. Bei stark anwachsendem Schwimmwinkel und mit intensivem Gieren eines Fahrzeugs – unter Umständen mit Bremsungen – verursachen Reifen „Schleuderspuren“.

Druckspur: Lokale, oberflächliche Gurtbandveränderung wie Gewebeabplattung, -quetschung.

Durchtrennung: Zerstörung des Gewebes über die volle Breite des Gurtbandes durch Zerschneiden.

Endlage: Position von Personen (eventuell Tieren) am Ende der unfallbedingten Bewegung. Die z. B. von der Polizei vorgefundene „Endlage“ kann infolge Umlagerung (durch Ersthelfer usw.) gegenüber der unfallbedingten Endlage stark verändert sein.

Fahrspur: Spur eines abrollenden Reifens mit deutlichem, unverzerrtem Profilabdruck.

Faltung: Entstehung eines oder mehrerer Knicke durch Zusammenpressen eines Bauteils.

Felgenbruch: Zerstörung einer Fahrzeug-Radfelge.

Felgenverformung: Verbiegung oder Knickung der runden und ebenen Form einer Felge. Bei Begrenzung der Beschädigung auf die äußeren Felgenränder lautet die Benennung „Felgenhornverformung“.

Flankenverletzung: Sichtbare oder von außen unsichtbare Verletzungen im Flankenbereich.

Flüssigkeitsspur: Ansammlung oder An-/Auftragung von Flüssigkeiten.

Fraktur: Bruch eines Knochens in geschlossener oder offener Form. Hervorgerufen durch Biegung, Torsion, Kompression oder Scherung.

Fremdkörpereindringung: Beschädigung durch Teile, die in den Reifenkörper eingedrungen sind.

Fußspuren: Durch Form (Eindruck) oder Substanz (Antragung) bestimmte Veränderung, die von Schuhwerk oder Füßen hervorgerufen wurde.

Gabelverformung: Verbiegung oder Abknickung der Vorderradgabel eines Zweirades. Knickstelle liegt meist am Ansatz zum Gabelkopf (Folge ist eine Radstandsverkürzung; gelegentlich auch Radstandsvergrößerung bei Gabelverformung nach vorn).

Glaskolbenbruch: Zerstörung der gläsernen Umhüllung einer Fahrzeuglampe.

Glaskolbentrübung: Niederschlag an der Innenseite des Glaskolbens einer Fahrzeuglampe. Unfallbedingt: gelblicher WO3-Niederschlag altersbedingt: schwärzlicher Niederschlag.

Gurtbandbeschädigung: Gewebeschädigung des Gurtbandes wie Aufrauung, Zerreißung.

Gurtbandlage: Position des Gurtbandes nach dem Unfall, z. B. aufgerollt, ausgezogen, verdreht, arretiert.

Gurtfaltung: Veränderung, bei der das Gurtband gefaltet bzw. geknickt ist.

Gurtmarke: Lokale Veränderung des Gurtbandes infolge der Beanspruchung in den Umlaufbeschlägen in Form von Aufrauungen oder Antragungen, unter anderem von Kunststoff.

Gurtspur: Veränderung an Fahrzeugteilen oder an Körper und Kleidung der Insassen als Unfallfolge bei angelegtem Sicherheitsgurt.

Hitzespur: Veränderung eines ursprünglichen Zustandes, der auf die Einwirkung von hohen Temperaturen (ohne Entzündung) zurückzuführen ist.

Intrusion: Eindringen von Bauteilen, z. B. Lenksäule, in den Fahrgastraum während der Kollision.

Knick: Scharfe Biegung eines Bauteils.

Kontaktmarke: Sichtbare Oberflächenveränderung, Berührungszeichen aus Kontakt im Unfallgeschehen.

Kontaktspur (1.1): Veränderung, die durch unmittelbare, im Unfallzusammenhang stehende Berührungen entstanden ist: der Kontakt kann unter starker Krafteinwirkung eine ausgeprägte Gestalt- oder Formveränderung (= Formspur) oder unter nur oberflächlichem, formbeständigem Gleitvorgang eine Veränderung der Oberfläche (= Reibspur) durch Abtragung des Materiales bzw. durch Antragung und Anhaftung von Fremdsubstanz hervorrufen. Unmittelbar nach Kollisionsvorgängen durch fahrbahnkontaktierende, deformierte Fahrzeugteile oder insbesondere verklemmte, gekippte und druckverminderte Reifen entstehende Kollisionsfolgespuren liefern wichtige Richtungsinformationen über die Bewegung nach dem Kollisionsvorgang.

Korrespondenzspur: In Form und/oder Substanz übereinstimmende Veränderung an Unfallfaktoren, die wechselseitig hervorgerufen wurden.

Kratzspur: Punkt- und linienförmige Zerstörung einer Oberfläche.

Lackspur: An-/Auftragung von Lack oder Ansammlung von Lackteilen/-splittern.

Loch: Durch Deformation entstandene Öffnung bzw. Lücke in einem Bauteil.

Pendelspur: Spur eines Reifens (von Krad, Wohnwagen-Anhänger oder ähnlichen Fahrzeugen) durch Pendeln in einer bestimmten Frequenz.

Prellung: Geschlossene Weichteilverletzung mit Unterblutung (Färbung/Hämatom) der Haut. Hervorgerufen durch rasche, stumpfe Beanspruchung unter Druckbelastung.

Profilausbruch: Loslösung von Gummistücken aus der Lauffläche.

Profilspur: Negativbild des Reifenprofils.

Radstandsverkürzung: Differenz des Abstandes zwischen Hinter- und Vorderradachse eines Zweirades vor und nach einer Vorderrad-Gabelverformung.

Reifenabdruck: Druckspur der Fahrzeug-Bereifung mit mehr oder weniger ausgeprägten Profilkonturen. Ein durch kurzzeitig vorliegende Entstehungsbedingungen abgezeichnetes Fahrspurfragment Ein durch stoßartiges Aufpressen (z. B. eines Krad-Vorderrades) an der Karosserie eines Kollisionsgegners „abgestempelter“ Kontaktbereich der Reifenoberfläche.

Riss-quetschwunde: Weichteilzerstörung mit Quetschung und Aufplatzung des Gewebes, gegebenenfalls Teilablösung der Haut. Hervorgerufen durch Kraftansatz im Bereich der Wunde mit Zerreißung der Haut und deutlichem Quetschungscharakter, auch als „Platzwunde“ und „Quetschwunde“ bezeichnet.

Risswunde: Weichteilzerstörung ohne Quetschung, jedoch mit Aufreißen der Haut mit unregelmäßigem Wundrand. Hervorgerufen durch Krafteinsatz fern der Wunde.

Ruptur: Zerreißung eines Organs/Gefäßes. Hervorgerufen durch Zug, Torsion, Kompression.

Schadenspuren am Rad: Rad umfasst Radkörper und Bereifung.

Scheuerstelle: Oberflächenabtragungen an den Reifenseitenwänden. Diese ist erkennbar an z. B. beschädigten Seitenwandbeschriftungen.

Schleifspur: Flächenhafte Abtragung und Verschiebung durch Gleitbewegung.

Schleudertrauma, Schleuderverletzung, Whiplash: In der klinischen Diagnostik eine Bezeichnung für ein röntgenologisch nicht feststellbares Verletzungsbild (unter anderem Schmerzen im Nackenbereich, meistens reine Distorsionen) Biomechanisch-wissenschaftlich eine Bezeichnung für eine auf eine Schleuderbewegung zurückzuführende Verletzung, die alle Verletzungsbilder (Distorsionen, knöcherne, ligamentäre) einschließt.

Schmutzspur: Ansammlung oder Auftragung von Staub, Erdreich, Gras, Fahrbahnschmutz.

Schnitt: Linienförmige Durchtrennung eines Bauteils bzw. seiner Bauteilzone.

Schnittwunde: Offene Weichteilschädigung in Form einer glatten Durchtrennung der Haut mit glatten Wundrändern. Hervorgerufen durch scharfkantigen Gegenstand.

Schürfung: Offene Weichteilschädigung in Form einer Aufrauung der Haut. Hervorgerufen durch stumpfe Beanspruchung unter Tangentialbewegung; auch als „Hautabschürfung“ bezeichnet.

Separation: Ablösung der Lauffläche (unter Umständen mit Teilen des Gürtels) oder Trennung in der Karkasse.

Situationsspur: Unfallbedingte Lage oder unfallrelevanter Zustand von/an Personen (Tieren), Fahrzeugen, Umfeld oder deren Teilen.

Spezielle Spuren an Personen (= Verletzungsarten): Verletzungen (Verletzungsarten) sind als "Spuren" nur soweit erfasst, als sie ohne ärztliche Diagnose erkannt und identifiziert bzw. ohne medizinische Fachkenntnis benannt werden können.

Spur: Veränderung, die im Bewegungsverlauf an Lebewesen, Sachen und Umfeld („Fahrer – Fahrzeug – Straße“) durch Einwirkung auf- und aneinander entstanden ist. Spuren bilden gleichrangig mit Identitäts- und Individualitätsmerkmalen die zur Unfallrekonstruktion erforderlichen objektiven Daten und Fakten

Spuren an/von Personen und Sachen (eventuell auch Tieren): Diese Spurenarten, die sich allgemein und austauschbar an allen Unfallelementen („Fahrer – Fahrzeug – Straße“) zeigen und von ihnen stammen können, sind in der ÖNORM 5050, Anhang B nach Spurenträgern und -gebern geordnet; die nur speziell zu einem einzigen Element gehörenden Spurenbegriffe sind unter den Nummern 3 bis 5 geordnet.

Spurenintervall: Sich wiederholendes Merkmal im Spurenbild.

Spurenknick: Durch Einwirkung äußerer Kräfte (z. B. Kollision) entstandene Richtungsänderung im Spurenverlauf.

Spurenkreuzung: Schnittstelle unterschiedlicher Spurverläufe.

Spurenüberlagerung: Überdeckung von Spuren im Längs- oder auch Querbereich.

Spurenunstetigkeit: Örtlich begrenzte Veränderung im Aussehen oder Richtungsverlauf einer Spur.

Stauchung: Veränderung der geometrischen Form eines Bauteils durch Zusammenpressen.

Trennung: Lösen einer Verbindung von Bauteilen.

Umlaufbeschläge: Umlaufbeschläge sind Führungselemente des Gurtbandes.

Ventilschaden: Erkennbare Veränderungen – insbesondere an Gummiventilen – wie Einrisse, Schürfungen o. Ä.

Verbiegung: Durch Deformation entstandene Krümmung eines Bauteils.

Verbrennung: Lokale Hitzeeinwirkung verschiedener Art auf einem Teil der Körperoberfläche.

Walkspur: Spur eines mit stark vermindertem Luftdruck abrollenden Reifens.

Wendeldeformation: Verformung der Wendelspiralen im Glühzustand durch mittelbare, stoßartige Belastung.

Wendespur: Spur eines Reifens bei Fahrzeug-Wendemanövern auf kleinem Radius.

Zerreißung: Zerstörung des Gewebes über die volle Breite des Gurtbandes durch Zerreißen.

3 Teil 3 – Unfallumstände, Fahrzeug, Person

Airbag: Vorhanden, entfaltet.

Alkohol : BAK.

Anstoß: Anstoßpunkt primär/sekundär, Anstoßrichtung primär/sekundär, Überdeckung.

Antriebsart: Frontantrieb, Heckantrieb, Standardantrieb, permanenter Allradantrieb, zuschaltbarer Allradantrieb, automatische Schlupfregelung. Definition Heckantrieb: Motor und Antrieb hinten.

Bauartveränderung: genehmigungspflichtig, genehmigungsfähig, manipuliert (bei Zweirädern), nicht genehmigungspflichtig.

Beladungsart: Vollbeladen, teilbeladen.

Beladungsort: Fahrgastzelle, separater Laderaum (innerhalb des Fahrzeugs, außerhalb des Fahrzeugs).

Beschädigungsstelle: Front, Seite, Heck, Dach, Bodengruppe.

Bewegungsablauf bei Zweiradunfällen: Verhaken, Überflug, Aufprall auf Gegner, Aufprall und Abrutschen, Überrollen.

Bremsart: Trommelbremsen, Scheibenbremsen, Trommel-/Scheibenbremsen-Kombination, ABV/ABS, Retarder.

Bremsung: Ohne Reaktion, Vollbremsung, Teilbremsung, Ausrollen, Beschleunigung, Bremsspur.

Fahrbahnzustand: Trocken, nass mit Wasserlachen, nass ohne Wasserlachen, Glatteis, Schnee, Schmutz, Rollsplitt.

Fahrerlaubnis: Ohne Führerschein.

Fahrzeugachsen: Gesamtzahl der Achsen Anzahl und Anordnung der angetriebenen Achsen Anzahl und Anordnung der gelenkten Achsen.

Fahrzeugart: Pkw, Lkw, KOM, motorisiertes Zweirad, Fahrrad, Schienenfahrzeug, Sattelkraftfahrzeug. Gegebenenfalls mit Anhänger bzw. bei Zweirad mit Seitenwagen.

Fahrzeugaufbau: Limousine, Coupe (Fließheck), Cabriolet, Kombinationskraftwagen Pritschenaufbau, Container, Tieflader, Kastenaufbau, Sonderaufbau, Tankaufbau, Anzahl der Türen Zweirad-Normalausführung, Rennmaschine, Chopper, Motorroller.

Fahrzeugbeladung: . Gegebenenfalls Art der Ladungssicherung erfassen.

Fahrzeugbereifung: Hersteller, Dimension, Geschwindigkeitsklasse, Belastbarkeit, DOT-Nummer, runderneuert Sommerreifen, Winterreifen, Ganzjahresreifen, Sonderprofil Schneeketten, Spikes.

Fahrzeugbesetzung: Anzahl.

Fahrzeugbrand: Fahrgastzelle, Gepäckraum, Motorraum, außen.

Fahrzeuggeschwindigkeit: Fahrgeschwindigkeit, Kollisionsgeschwindigkeit, Relativgeschwindigkeit, kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Delta V.

Fahrzeugidentifikation: Fahrzeughersteller, Fahrzeugtyp, KBA-Schlüssel, Fahrgestell-Nummer, amtliches Kennzeichen, Erstzulassung.

Fahrzeugmaße: Länge, Breite, Höhe.

Fahrzeugmasse: Leergewicht, zulässiges Gesamtgewicht.

Getriebe: Automatisch geschaltet, manuell geschaltet.

Gurtstraffer: Vorhanden, ausgelöst.

Hindernis: Tier, Baum/Pfahl, Mauerwerk, Leitplanke.

Kinderhalteeinrichtung: Babyliege, Sicherheitssitz.

Klasse: 1 bis 5, Prüfbescheinigung.

Konstruktive Besonderheiten: Unterfahrschutz:. vorne, hinten, seitlich, rechts, links, Beschädigung, klappbar/Stellung beim Unfall Verkleidung: Art, Beschädigung, Tourenverkleidung, Rennverkleidung, Lampenbereich Scheibenart: Kunststoff, ESG, VSG, klar, getönt.

Kupplungsart: Keine (Solo-Kfz), Sattelkupplung, feste Deichsel, bewegliche Deichsel, Beiwagen.

Lenkung: Mit/ohne Lenkhilfe bzw. Servounterstützung.

Lichtverhältnisse: Tageslicht, Dämmerung, Dunkelheit.

Linienführung: Gerade, Linkskurve, Rechtskurve, Kreisbogen, Übergangsbogen, Wanne, Kuppe.

Motordaten: Motorleistung, Motorhubraum, Zylinderzahl, Kraftstoffart, Einbauart (längs, quer).

Niederschlag: niederschlagsfrei, Regen, Schneefall/Hagel, Nebel.

Ort innerhalb des Fahrzeugs, teilweise herausgeschleudert, vollständig herausgeschleudert, Ort des Herausschleuderns.

Ortslage: Innerorts, außerorts.

Personen: Alter/Geschlecht, Körpermaße, Gewicht.

Reifenzustand: Profiltiefe, Innendruck, Schaden, Sicherheitsreifen.

Rückhaltesysteme: Bei der Gestaltung des Erhebungsbogens ist die Nutzung im Einzelfall abzufragen.

Schlafkojen-Gurte/Netz: vorhanden, eingehängt.

Schutzhelm: Integralhelm, Jethelm, Halbschale.

Schutzkleidung: Jacke, Hose, einteilige Kombination.

Sicherheitsgurt: Beckengurt, Schultergurt, Dreipunktgurt, Tragespuren erkennbar, Defekt erkennbar.

Sitzposition: Sitzreihe, Sitzplatz, Stehplatz, Notsitz, Fahrersitz, Beifahrersitz, hinten (links, mittig, rechts), Schlafkoje oben, Schlafkoje unten, Topsleeper. Nummer der Fahrerposition = 01. Nummer der Fahrer-Sitzreihe = 0″

Sitzstellung: Sitzkissenposition: Längseinstellung hinten/vorne, Höheneinstellung, Neigungseinstellung (falls beschädigt) Rücklehnenposition: Neigungseinstellung (falls beschädigt) Kopfstützenposition: fest integriert/verstellbar, integrier, aufsetzbar (falls beschädigt) Beschädigungen: des Sitzes, der Lehne, der Kopfstütze (falls beschädigt)

Sonderausstattung: Sportlenkrad, rechter Außenspiegel, Zentralverriegelung, Spoiler, Dachgepäckträger, Tankrucksack, Sturzbügel.

Straßenart: BAB, Bundesstraße, Landesstraße, Kreisstraße, Gemeindestraße, Feldweg, Radweg, Fußweg. Nicht zu verwendende Benennungen: Stadtstraße, Ortsstraße, Landstraße, Weg.

Straßendecke: Befestigt, unbefestigt.

Straßenknoten: Einmündung, Kreuzung, Ein-/Ausfahrt.

Straßenumfeld: Baustelle.

Technischer Fahrzeugzustand: Technische Mängel – unfallursächliche, Funktionseinschränkung, detaillierte Beschädigungen, Verschleiß (Art und Umfang).

Unfallgruppe: Fahrzeug/Fahrzeug-Kollision, Fahrzeug/Fußgänger-Kollision, Fahrzeug Alleinunfall, Mehrfachkollision.

Unfallort: Nicht zu verwendende Bemerkungen: Unfallstelle, Örtlichkeit.

Unfallzeitpunkt: Datum, Wochentag, Uhrzeit.

Verkehrsführung: Einbahnig, mehrbahnig

Trennung der Richtungsfahrbahn

Einbahnig bedeutet: in Fahrtrichtung, eine Fahrbahn. Nicht zu verwendende Benennung: Einspurig (weil diese Benennung zur Bezeichnung bei Fahrzeugen verwendet wird).

Verkehrsregelung: Verkehrszeichen, zulässige Höchstgeschwindigkeit.

Verkehrsteilnahme: Fahrer, Beifahrer, sonstige Mitfahrer, Fußgänger, Reiter.

Verkehrsteilnehmer: Pkw, Fußgänger, Lkw, Omnibus, Zweirad (Motor-/Fahrrad).

Verletzte Körperregionen: Kopf, Hals, Brust, Abdomen, Becken, Arm, Bein.

Verletzungsart: Weichteilverletzung (Prellung, Hämatom, Risswunde), Fraktur, Organverletzung.

Verletzungsschwere: Getötet, schwerverletzt und/oder stationär behandelt, leichtverletzt und/oder ambulant behandelt, unverletzt.

4 In Befund und Gutachten zu verwendende Benennungen (ÖNorm 5050 – Anhang B)

Lichtverhältnisse	
– Tageslicht – Dämmerung – dunkel – sternklar – Mondlicht	– Straßenbeleuchtung – Reklamebeleuchtung – sonstige Lichtquellen – Blendung für …, durch …
Wetterverhältnisse	
– sonnig – bewölkt (… %) – bedeckt – trüb – dunstig – Nebelreißen – Nieseln – Nebel – Regen – Platzregen	– Hagel – Schneeregen – Schneefall – Schneetreiben – Schneesturm – Schneewehen (ohne Schneefall) – Wind – Böen – Sturm – Sichteinschränkung auf … m
Verkehrsflächen	

– Autobahn
– Autostraße
– Bundesstraße
  – mit oder ohne Vorrang
– Landeshauptstraße
– Landesstraße
– Freilandstraße
– im Ortsgebiet
– Einbahn
– Platz
– Ortsstraße
– Gemeindestraße
– Privatstraße
– Mautstraße
– Forststraße
– Güterweg
– Feldweg
– Waldweg
– Zufahrt (im Fahrbahnniveau)
– Einfahrt (in Gehsteigniveau)
– Radweg
– Gehweg
– Gehsteig
– Fußgängerzone
– Fahrstreifen:
  – (äußerster) rechter
  – mittlerer rechter mittlerer
  – mittlerer linker
  – (äußerster) linker
– Abbiegestreifen
	– Parkplatz
	– Parkstreifen
	– Abstellstreifen
	– Abstellfläche
	– Schrägparkzone
	– Radfahrstreifen
	– Bankett
	– Haltestellenbucht
	– Tankstellenbucht
	– Begrenzung der Fahrbahnbefestigung
	  – geradlinig
	  – scharfkantig
	  – ausgezackt
	  – durch Pflasterreihe
	  – durch Rinnsal
	– niveaugleich oder durch Längsstufe (Abschrägung)
	– gegen die Fahrbahn abgegrenzt
	– erhöht
	– abgesenkt
	– Straßenbahninsel
	– Schutzinsel
	– Fahrbahnteiler durch Rinnsal
	– niveaugleich oder durch Längsstufe (Abschrägung)
	– gegen die Fahrbahn abgegrenzt
	– erhöht
	– abgesenkt
	– Straßenbahninsel
	– Schutzinsel

– Fahrbahnteiler – Zunge des Fahrbahnteilers – Gleisbereich – Kanaldeckel – Kanalgitter	– Brücke – Unterführung – Tunnel – Gleisbereich – selbstständiger Gleiskörper
Straßenverlauf	

– horizontal (nicht „eben“)
– Steigung
– Gefälle
– Quergefälle (auch Kurvenüberhöhung) mit ... % in Richtung…
– Krümmung
– Bogen
– Kurve
– Kuppe
– Senke
	– Einmündung
	– Kreuzung
	– Eisenbahnkreuzung
	– Gabelung
	– Engstelle
	– Baustelle
	  – übersichtlich
	  – unübersichtlich
	– Sichtbehinderung durch ...

Fahrfläche	

– Fahrbahnbefestigung
  – in Bau
  – Schotter
  – Macadam
  – Sand
  – lehmige Erde
  – Beton
  – Schwarzdecke
  – Asphalt
  – Teer
	– Bitumen
	– Würfelpflaster
	– Kleinsteinpflaster
	– Klinkerpflaster
	– Holzbohlen (Brücke)
	– unbefestigt
	– Fahrrinnen mit Grasstreifen

Beschaffenheit der Fahrbahnbefestigung (länger dauernd)	
– gut – mittel – schlecht – schadhaft – rissig – ausgebessert	– Schlaglöcher – (un)eben – griffig (rau) – glatt – gewölbt – Fahrrinnen (Längsmulden)
Zustand der Fahrbahn (vorübergehend)	

– verschmutzt
  – Sandauflagerung
  – Auspuffauswurf
  – Ölflecke
  – Ölspur
  – Bindemittelsprühung (Baustelle)
  – Laub
  – Lehm
  – Erde
  – Streugut
  – schlüpfrig
  – versandet
– trocken
– feucht
	– Lachen (Pfützen)
	– teilweise nass
	– nass
	– Neuschnee
	– schneeglatt
	– Fahrrinnen
	– matschig
	– vereist
	  – Glatteis
	  – Eisflächen
	– gesalzen
	– gestreut
	– Schneewälle (längs)
	– Schneewächten (quer)

Verkehrsleiteintichtungen

- Verkehrszeichen
- Leitpflock
- Schneestange
- Leitplanke
- Rüttelstreifen
- Stuttgarter Schwelle
- VLSA (automatische) Verkehrslichtsignal-anlage
  - Lichtphase
  - Phasenwechsel
  - Grünphase
  - Grünblinkphase
  - Gelbphase
  - Rotphase
  - Rot-Gelb-Phase
  - Dunkelphase (im Lichtwechsel des Blinkens)
  - Gelbblinkphase
- Blinkfrequenz
- Schutzweg
- Randlinie (weiß durchgehend)
- Begrenzungslinie (weiß unterbrochen)
- Leitlinie
- Haltelinie
- Sperrlinie
  - einfach
  - doppelt
  - einseitig für …
- Sperrfläche
- Fahrstreifenmarkierung
  - mit Geradeausfahrgebot
  - mit Rechtsabbiegegebot
  - mit Linksabbiegegebot
- mit Alternativgebot
  - gerade und rechts
  - gerade und links
  - rechts und links

Begrenzung und Umfeld

- aufsteigende, abfallende
  - Böschung
  - Stufe
  - Mauer (Befestigungsmauer)
- Felswand
- Randstreifen
- Grünstreifen
- Rinnsal
- Saumpflaster (auch neben Schienen)
- Straßengraben
  - spitz
  - muldenförmig
  - schachtförmig
  - gemauert
- Kilometerstein
- Leitpflöcke
- Leitschienen
- Slibarzaun
- Notrufsäulen
- Geländer
  - Eisen
  - Rohr
  - T-Profil
  - Holz
  - Beton
- Feld
- Wald
- Wiese
- Auland
- Verbauung
  - offen
  - geschlossen
  - gemischt
- Alleebaum
- Hecke
- Bretterzaun
- Lattenzaun
- Jägerzaun
- Gitterzaun
- Weidezaun
- Maschenzaun
- Eternitzaun
  - mit oder ohne Mauersockel
- Betonzaun
- Plakatwand
- Begrenzungsmauer
- Hausmauer
- Hausfluchtlinie
- Baufluchtlinie
- Grundstückfluchtlinie
- Kuppe
- Senke
- (einstämmiger) Mast
- A-Mast
- Doppelmast
- Gittermast
- Telefonmast
  - Holz mit Betonsockel
  - Beton
  - Stahl
- Lichtmast
- Peitschenmast …armig
- Laternenmast
- Spannmast
- Verkehrszeichenmast
- Verkehrsampel
  - Hängeampel
  - Ständerampel
  - Fußgängerampel
- Bahntrasse
- Rohrdurchlass

Örtliche Bezeichnungen

- bergseitig
- talseitig
- kurvenaußenseitig
- kurveninnenseitig
- ortsferner
- ortsnäher
- auf Seite der geraden oder
- ungeraden Hausnummern

Verkehrsaukommen

- stark
- mittel
- schwach
- Verkehr
  - zügig
  - flüssig
  - zähflüssig
  - stockend
- Stau

Fahrzeuge

- laut gesetzlicher Definitionen (KFG)
- Beschuldigtenfahrzeug
- Privatbeteiligtenfahrzeug
- Zweitbeteiligtenfahrzeug
- Klagfahrzeug (Klägerfahrzeug)
- Beklagtenfahrzeug
- Zeugenfahrzeug

Spuren

- Reifenspur
  - Fahr-
  - Brems-
  - Blockier-
  - Schleuder-
  - Drift-
  - Walk-
- Kotspur (z. B. aus den Radmulden)
- Wisch-, Schleif-, Kratz-, Schürf-, Kerb- und Farbspur
- Plastikabrieb
- Gummiabrieb
- Flüssigkeitsspur
  - ausgelaufene Kühlflüssigkeit
  - ausgelaufener Treibstoff Ölspur
  - Ölfleck
  - Blutspur
  - Blutspitzer
  - Blutlache
- abgerissene Teile
- Glas- und Plastiksplitter
  - Verbundscheibe
  - Glaskrümel
  - Scheinwerferglas
  - Decklichtcellon
- Lacksplitter

Zustand und Beschädigungen

- abgehoben
- Abnützung
  - gleichmäßig
  - ungleichmäßig
  - stark
  - mäßig
  - gering
  - normal
- abgeplatzt
- abgequetscht
- abgerissen
- abgewinkelt
- abgezogen
- angedrückt
- angerissen
- angeschabt
- angescheuert
- angestochen
- angeschnitten
- aufgebogen
- aufgeplatzt
- aufgerissen
- aufgeschnitten
- ausgebaucht
- ausgerissen
- ausgekreidet (Lack)
- ausgeschlagen
- blind (Spiegel oder Reflektor)
- blockiert
- craqueliert (oberflächenrissig)
- defekt (allein unpräzise)
- deformiert (allein unpräzise)
- drucklos (Reifen)
- durchgescheuert

– eingebeult – eingedrückt – eingekerbt – eingerissen – eingezogen – faltig – fehlt – festgefressen – fleckig (Lack) – gebrochen – gedehnt – gelöst – gekippt – geknickt – geplatzt – gestaucht – kantig – locker – lose – matt (Lack) – muldenförmig – spielfrei – stumpf (Lack) – undicht – unwirksam – unwuchtig – verbogen – verdreht – verkratzt – verrostet – verschlissen – verschmutzt – verschürft – verschwenkt – verwunden – verzogen – vorgezogen – wellenförmig – wirkungslos – zerstört (allein unpräzise)	– Abdruck – Abrieb – Ausblühungen – Beulen – Blasen – Blutspuren – Deformation (allein unpräzise) – Durchrostung – Eindrückung – Einkerbung – Farbauftragung – Folgeschaden – Fressstelle – Höhenschlag – Kontaktspur – Korrosion – Lackabrinnspur – Lackabtragung – Lackblase – Lackorangenhaut – Lacktropfen – Lacksprünge – Lackwolken – Primärdeformation – Sekundärdeformation – Primärkontaktspur (von der Erstkollision) – Sekundärkontaktspur (von der Folgekollision) – Quetschriss (Reifen) – Unterrostung – Rostblasen – Rostloch – Rostpusteln – Rostschuppen – Seitenschlag – Spiel – Sprung – Streifschaden – Streifspur – Unterrostung – Unwucht – Verschleiß – Vertiefung

D2 Begriffe und Abkürzungen

1 Wichtige Abkürzungen in der Fahrzeugsicherheit

AAAM	Association for the Advancement of Automotive Medicine
AAM	Alliance of Auto Manufacturers (OSRP, USCAR)
ACEA	Association of European Automotive Manufacturers
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil Club
AIS	Abbreviated Injury Scale
ATD	Anthropomorphic Test Device
AZT	Allianz Zentrum Technik (GDV)
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
CCIS	Co-operative Crash Injury Servey
CDC	Collision Deformation Scale
CFR	Code of Federal Regulations (Gesetze in USA)
ECE	Economic Commission for Europe (Unterorganisation der UN)
EEVC	European Enhanced Vehicle-Safety Committee
ESC	Enhanced Experimental Vehicles Safety Program/Enhanced Safety of Vehicles Programm
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
ETSC	European Transport Safety Council
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.
FARS	Fatality Analysis Reporting System
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standards
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
GRSP	Groupe de Rapporteurs sur la Sécurité Passive (Expertengremium für WP29)
HLDI	Highway Loss Data Institute
HIC	Head Injury Criteria
HPC	Head Performance Criteria
IARV	Injury Assessment Reference Value
ICPL	Injury Criteria Protection Level
IHRA	International Harmonized Research Activities
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
INRETS	Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
IRCOBI	International Research Council on the Biomechanics of Impact
ISS	Injury Severity Score
JAMA	Japan Automotive Manufacturers Association
JARI	Japan Automobile Research Institute
MAIS	Maximale AIS (Abbreviated Injury Scale)
MDB	Mobile Deformable Barrier
MHH	Medizinische Hochschule Hannover
NASS	National Automotive Sampling System
NASS	CDS NASS Crashworthiness Data System
NASS GES	NASS General Estimates System
NASVA	National Agency for Automotive Safety & Victims' Aid (Japan)
NCAP	New Car Assessment Program (USA)

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_48

NCSA	National Center for Statistics and Analysis (an Office of NHTSA)
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration (USA)
NIC	Neck Injury Criteria
NPRM	Notice of Proposed RuleMaking
ODB	Offset Deformable Barrier
OoP	Out of Position
OSRP	Office of Sponsored Research and Programs (North Carolina Central University)
PTS	Poly Trauma Score
RESIKO (GDV)	Retrospektive Sicherheitsanalyse von PKW-Kollisionen mit Schwerverletzten
RHS	Rückhaltesystem
SRS	Supplementary Restraint System
TRL	Transport Research Laboratory (UK)
USCAR	The United States Council for Automotive Research

2 Firmen und Institutionen

Firma/Institution	Adresse
EASi Engineering GmbH	www.easi.de
AAAM – Assoc. for the Advancement of Autom. Medicine (AIS)	www.carcrash.org
ACEA European Automotive Manufacturers Association	www.acea.be
ADAC	www.adac.de/Tests/Crash_Tests
Allianz Zentrum Technik (AZT-Tests)	www.allianz-azt.de
ANCAP (Australian NCAP)	www.nrma.com.au/crashtests
ASTC – Applied Safety Technology Corporation	www.astc.org
BASt – Bundesanstalt für Straßenwesen	www.bast.de/htdocs/fachthemen
Bundesministerium für Verkehr (ECE Richtlinien in deutsch)	www.bmvbw.de/Technische-Vorschriften-fuer-KFZ-.772.htm
Crash-Network	www.crash-network.com
crashtest-service.com	www.crashtestservice.com
Crash-Test-World	www.crashtestworld.com
Crash Test Results, Insurance Ratings and Auto Safety Information	www.crashtest.com
DEKRA	www.dekra.de
DENTON – Robert A. Denton, Inc. (Messinstr. Dummys)	www.dentonatd.com
DOT – Department of Transportation (USA)	www.dot.gov
DSD – Dr. Steffan Datentechnik	www.dsd.at

DWG – Dr. Werner Gratzer	www.analyzer.at
ECE-Regelungen Europa, aktuelle Diskussionen	www.unece.org/trans/main/welcwp29.htm
ECE-Transport Division Road Traffic Safety – Links	www.unece.org/trans/roadsafe/rslin.html
EEVC – European Enhanced Vehicle-safety Committee	www.eevc.org
ENDEVCO (Meßinstr. Dummys)	www.endevco.de
ESV – IHRA	www-ihra.nhtsa.dot.gov/
ETHZ Zürich, Institut for Biomechanical Engineering	www.biomed.ee.ethz.ch
ETSC – European Transport Safety Council	www.etsc.be
Euro NCAP	www.euroncap.com
European Passive Safety Network	www.passivesafety.com
EVU – Europäischer Verein für Unfallforschung und Unfall-analyse e.V.	www.evuonline.org
Federal Highway Administration, Department of Transportation	www.fhwa.dot.gov
FTSS First Technology Safety Systems (Dummy-Produzent)	www.ftss.com
GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirt-schaft e. V.	www.gdv.de
IBB Forensic Engineering Association	www.ibb-forensic.de
IIHS – Injurance Institute for Highway Safety (USA)	www.highwaysafety.org
J-NCAP (Japan NCAP)	www.nasva.go.jp/asses/indexe.html
IRCOBI	www.ircobi.org
Med. Hochschule Hannover/ARU Hannover Unfallforschung	www.mh-hannover.de/forschung/ unfallforschung/index.htm
RESIKO und andere Studien	www.gdv.de/fachservice/5470.htm
SAE Society of Automotive Engineers	www.sae.org
STAPP Car Crash Conference	www.stapp.org
VDA – Verband der Automobilindustrie e. V.	www.vda.de
VDI – Verband Deutscher Ingenieure	www.vdi.de
WorldSID	www.worldsid.org

D3 Medizinische Fachausdrücke

A	
Abdomen	Bauch
Abduktion	Abspreizen, Wegführen (z. B. Armabduktion = Abspreizen des Arms)
Abszess	lokale Eiteransammlung
Adaptation	Anpassung
Adduktion	Heranführen, Anspreizen (Gegensatz: Abduktion)
Adipositas	Fettleibigkeit
Adnexe	wörtlich: Anhang, gemeint sind i. d. R. Eierstöcke und Eileiter der Frau
Adsorption	oberflächliche Bindung
Adynamie	Körperschwäche, Kraftlosigkeit
Aequivalent	Gleichwertigkeit
Aethylalkohol	verzehrbarer Alkohol (im Gegensatz zum toxischen Methylalkohol)
Affekt	Gemütsbewegung
Affektion	krankhafte Schädigung
aggressiv	angriffslustig
Agrypnie	Schlaflosigkeit, veralteter Ausdruck, siehe Asomnie
AIS	Abkürzung für Abbreviated Injury Scale (anatomisches Scoring-system um die Schwere einer Einzelverletzung zu bewerten, siehe Anhang)
Akinesie	Bewegungsarmut des Rumpfes. der Glieder, der Gesichtsmuskeln
Akme	Höhepunkt einer Krankheit bzw. Krankheitserscheinung
Akren	äußerstes Ende der Extremitäten oder des Organismus (z. B. Fingerspitzen, Nasenspitze)
Algesie	Schmerzhaftigkeit
-algie	Wortanhang für Schmerz (z. B. Cephalgie: Kopfschmerz, Neuralgie: Nervenschmerz)
Allergie	erworbene, überschießende Immunantwort auf bestimmte Substanzen (Allergene)
Allergen	Antigen, das Überempfindlichkeitsreaktionen auslösen kann
Allopathie	Bezeichnung für Schulmedizin (Gegensatz Homöopathie)
Alteration	krankhafte Veränderung, Aufregung
Alveole	Lungenbläschen (kleinste anatomische Einheit der Lunge, hier findet der Gasaustausch statt)

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9_49

Amaurose	Erblindung
Amblyopie	anlagebedingte Herabsetzung des Sehvermögens ohne organischen Fehler
Amentia	selten verwandt für Verwirrtheit, Wahnsinn, Geistesstörung (siehe Demenz)
Amnesie	zeitlich oder inhaltlich begrenzte Erinnerungslücke, Gedächtnisstörung
Amputation	Synonym für Ablatio: Abtrennen eines Körperteils
Amyloidose	krankhafte Einlagerung von Amyloid (Eiweiß) in Gewebe
Anaemie	Blutarmut (Mangel an roten Blutkörperchen, sog. Erythrozyten)
anaerob	ohne Sauerstoff lebend (anaerobe Bakterien: Bakterienarten, die nur in Abwesenheit von Sauerstoff wachsen)
Anaesthesie	Unempfindlichkeit gegenüber Schmerz-, Temperatur- und Berührungsreizen, Gefühllosigkeit, Betäubung
Anaesthetika	Schmerz- oder Betäubungsmittel
Anakusis	Taubheit
Analgesie	Schmerzlosigkeit
Analgetika	schmerzstillende Medikamente
Analyse	Untersuchung
Anamnese	Krankheitsgeschichte
Anaphylaxie	Überempfindlichkeitsreaktion eines Organismus nach Wiederkontakt mit einem Allergen, die zum Kreislaufzusammenbruch führen kann
Anastomose	angeborene oder operativ angelegte Verbindung von zwei Hohlorganen (meistens operativ angelegte End-zu-End- oder Seit-zu-End/Seit-zu-Seit Darmanastomose)
Anatomie	Lehre vom Bau des Körperteile und Körperhöhlen
Aneurysma	umschriebene Ausweitung/Aussackung der Wand eines arteriellen Gefäßes oder des Herzmuskels
Angina	Krankheiten, die mit einem Gefühl der Enge einhergehen
Angina pectoris	wörtl.: Brustenge, Schmerzsymptom bei Durchblutungsstörungen der Herzkranzgefäße
Angina tonsillaris	Gaumenmandelentzündung
Angiographie	Röntgenologische Darstellung der Gefäße mit Kontrastmittel
Angiom	geschwulstartige Neubildung von Gefäßgewebe (Lymphgefäße: Lymphangiom, Blutgefäße: Hämangiom)
Angopathie	Oberbegriff für Gefäßkrankheiten
Ankylose	Versteifung eines Gelenks
Anomalie	Unregelmäßigkeit, Entwicklungsstörung, von der Norm abweichend

Anopie	mangelnde Sehfähigkeit
Anorexie	Appetitlosigkeit
Anosmie	völlige Aufhebung des Geruchsvermögens
Anostose	Störung des Knochenwachstums, Knochenschwund
Anoxie	Fehlen von Sauerstoff
Antebrachium	Unterarm
anterior	Richtungsangabe: vorne (Gegensatz: posterior = hinten)
Antidot	Gegenmittel
Antigen	Substanz, die in einem Organismus eine Immunreaktion auslösen kann (meistens Eiweiße)
Antiphlogistika	Medikamente, die gegen eine Entzündung wirken
Antispasmodica	Medikamente gegen Krämpfe
Antitoxin	Antikörper mit der Fähigkeit pflanzliche, tierische oder mikrobielle Toxine in der Blutbahn zu binden
Anus	Jahr
Anurie	fehlende Urinproduktion (z. B. bei Nierenversagen)
Anus	Ring, After (Begriff für den Darmausgang)
Aorta	Hauptschlagader
Aortitis	Entzündung der Hauptschlagader
apallisches Syndrom	Mittelhirnsyndrom, charakterisiert durch funktionelle Trennung von Hirnrinde und übrigen Hirnzentren (so genannte Wachkoma)
Apathie	Teilnahmslosigkeit
apathisch	teilnahmslos
Apertura	Öffnung
Aphasie	Störung der Sprachbildung bei erhaltener Funktion der sprachbildenden Muskulatur
Aphonie	Stimmlosigkeit (z. B. durch Entzündung der Stimmbänder), Flüsterstimme
Apnoe	Atemstillstand
Aponeurose	Sehnenhaut, flächige Sehne
Apoplex	Schlaganfall (auch apoplektischer Insult)
Apraxie	Unfähigkeit bei erhaltener Beweglichkeit zu handeln
Arcus aortae	Aortenbogen
Arrhythmie	Unregelmäßigkeit des Herzschlages
Arterien	alle vom Herzen wegführenden Gefäße (Singular: Arteria)
arterielle Blutung	Blutung, die durch Verletzung einer Arterie entsteht

Arteriosklerose	Arterienverkalkung
Arthritis	Gelenkentzündung
Arthrodese	Versteifung eines Gelenks
Arthropathie	Gelenkleiden
Arthrose	Gelenkverschleiß
Asepsis	Keimfreiheit
aseptisch	keimfrei
Asomnie	Schlaflosigkeit
Asthenie	Schwäche, Kraftlosigkeit
asthenischer Habitus	muskelschwacher Konstitutionstyp
Asthenopie	Schwachsichtigkeit
ataktisch	zitternd, unregelmäßig
Ataxie	Störung der Bewegungskoordination
Ätiologie	Ursache, Herkunft (auch Ätiopathogenese)
Atonie	Schlaffheit, Erschlaffung
Atrophie	Schwund, Verminderung (z. B. Muskelatrophie)
atypisch	untypisch
Audiometrie	Hördiagnostik
Auskultation	Abhorchen der im Körper entstehenden Schallzeichen (Herz, Lunge, Darm)
autonom	selbstständig, eigenständig, unabhängig
autonomes Nervensystem	Synonym für vegetatives Nervensystem (Nervensystem, welches nicht bewusst und willentlich beeinflusst werden kann)
Autopsie	Obduktion (Leichenschau)
B	
Bakterien	einzellige Kleinlebewesen
benignus/benigne	gutartig (Gegensatz: malignus/maligne: bösartig)
Biceps	zweiköpfiger Muskel (Oberarm und Oberschenkel)
bilateral	beidseits
binocular	mit beiden Augen
blande	nicht entzündlich, nicht infiziert
Blastom	echte Geschwulst
Blepharitis	Lidrandentzündung
Bone bruise	Knochenmarködem, Knochenmarkeinblutung (traumatisch bedingt)
Bronchus	Ast der Luftröhre (Plural: Bronchien)

bronchial	die Bronchien betreffend
Bronchitis	Entzündung der Bronchien
Bulbus oculi	Augapfel
Bursa	Beutel (Synonym für Schleimbeutel)
Bursa mucosae	Schleimbeutel
Bursitis	Schleimbeutelentzündung
C	
Calcaneus	Fersenbein
Calculus felleus	Gallenstein
Callus	siehe Kallus
Calvaria	Schädeldecke (siehe auch Kalotte)
Capillus	Haar
Capillaren	haarfeine Gefäße
Caput	Kopf
Carcinom	bösartige Geschwulst
Cardia	Herz, Magenmund
cardial	auf Herz bezüglich
Cardiologie	siehe Kardiologie
Cardiotonika	selten verwandt für herzstärkende Medikamente
cardiovaskulär	auf Herz und Gefäße bezüglich
Caries	Fäulnis
Carotis	Arteria carotis = Kopfschlagader
Carpalgelenke	alle Gelenke der Hand, die mit dem Carpus kommunizieren
Carpus	Handwurzel
Cartilago	Knorpel
Caruncula	Fleischwärzchen
Carcinom	siehe Karzinom
Cauda	Schwanz (Cauda equina: Nervenfaserbündel, das vom Ende des Rückenmarkes sich verjüngend durch den untersten Teil des Wirbelkanals läuft)
caudal	Richtungsangabe: nach unten weisend (siehe auch: cranial)
Causa	Ursache
causal	ursächlich
Cavum	Höhle (auch Cavitas)
Cavum cranii	Schädelhöhle
Cellulitis	Zellgewebsentzündung

centrifugal	vom Mittelpunkt wegführend, fliehend (Gegenteil: centripetal)
Cephalgie	Kopfschmerz
Cerebellum	Kleinhirn
cerebral	auf das Gehirn bezüglich
Cerebrum	Gehirn
Cerumen	Ohrenschmalz
cervical	auf den Hals bezüglich
Cervix	Hals, Nacken, Gebärmutterhals
Chalazion	wörtlich: Hagelkorn, erbsgroße Entzündung einer Lidranddrüse
Charakter	Wesensart, persönliche Haltung
Chemotherapie	Behandlung von Infektionskrankheiten oder Geschwulsten durch synthetische Arzneimittel
Chondrektomie	Knorpelentfernung
chondral	auf den Knorpel bezüglich
Chondrom	Geschwulst aus Knorpelgewebe
Chopart-Gelenklinie	Gelenklinie zwischen Sprung- und Fersenbein einerseits sowie Kahn- und Würfelbein andererseits (Fuß)
Chorda	Strang, Saite
Chorion	Zottenhaut, Eihaut
chronisch	langsam verlaufend, andauernd
Cicatrix	Narbe
Circulation	Kreislauf
Circulus vitiosus	Teufelskreis (Zustand in dem ein krankhaftes Geschehen ein anderes auslöst oder steigert)
Claudicatio	Hinken
Clavicula	Schlüsselbein
Coelia	Bauchhöhle
Coelioskopie	Bauchhöhlenspiegelung (siehe Laparoskopie)
Collum	Hals
Colon	Dickdarm
Columna vertebralis	Wirbelsäule
Commotio	Erschütterung
Commotio cerebri	Gehirnerschütterung
Compliance	Einwilligung, Bereitschaft
compositus	zusammengesetzt
Condylom	warzenförmige Geschwulst

Condylus	Knorren, Gelenkkopf
congenital	angeboren
Conjunctivitis	Bindehautentzündung des Auge
Contusio	Quetschung
Contusio cerebri	Gehirnquetschung
contusus	gequetscht
Cor	Herz
Corium	Lederhaut
Cornea	Hornhaut des Auges
Coronarsklerose	Verkalkung der Herzkranzgefäße
Corpus	Körper (Plural: Corpora)
Cortex	Rinde
Cortex cerebri	Hirnrinde
Costa	Rippe (Plural: costae)
costal	auf die Rippe bezüglich
intercostal	zwischen den Rippen
Coxa	Hüfte
Coxa valga/vara	x- bzw. o-förmige Schenkelhalsdeformität
Coxarthrose	Hüftgelenkverschleiß
Crampus	Krampf, Muskelkrampf
cranial	auf den Schädel bezüglich, als Richtungsangabe: zum Kopf hinweisend (Gegenteil: caudal)
Craniotomie	Eröffnung der Schädelhöhle
Cranium	knöcherner Schädel
Crepitatio	Knistern, Knacken (sicheres Zeichen eines Knochenbruches, das durch die Bewegung der Bruchenden gegeneinander entsteht)
Crinis	Haar
Crus	Schenkel, Unterschenkel
Crusta	Kruste
cubital	in Bezug auf den Ellenbogen
Cubitus	Ellenbogen
Curvatur	Krümmung, Kurve (Magen)
Cutis	Haut
Cyanose	blaurote Verfärbung von Haut und Schleimhäuten durch Sauerstoffmangel (auch Zyanose)
Cyste/Zyste	ein- oder mehrkammriger nicht präformierter Hohlraum, i. d. R. mit Flüssigkeit gefüllt

D	
Damm	Gegend zwischen After und äußeren Geschlechtsteilen
Darmbein	Teil des Beckens (Os ilium)
Debridement	Wundtoilette, Wundausschneidung
Defatigatio	Ermüdung, Erschöpfung
Defäkation	Stuhlentleerung
Defekt	Verlust, Mangel, Fehler
Definition	Begriffsbestimmung
Deformation	Verunstaltung, Entstellung
Degeneration	Entartung, Veränderung, Ersatz vollwertiger Substanz durch minderwertige
Dekadenz	Verfall
Dekubitus	Wundliegen, Druckgeschwür
Delirium	Desorientiertheit, Verwirrtheit (häufig Folge eines Alkohol- oder Rauschmittelentzugs)
Demenz	erworbene Verblödung
Dens	Zahn
Dens axis	zahnartiger knöcherner Fortsatz des 2. Wirbelkörpers
Depression	Gemütsverstimmung, Traurigkeit, Eindellung (z. B. am Knochen)
depressiv	traurig, verstimmt
Derivatio	Ableitung
Derma	Haut
Dermatitis	Hautentzündung
Dermatologie	Wissenschaft von den Hauterkrankungen
Dermatom	Hautabschnitt, Innervationsgebiet einzelner Rückenmarkswurzeln
Dermatose	Hauterkrankung
desensibilisieren	unempfindlich machen gegen Allergene
destruieren	zerstören
destruktiv	abbauend, zerstörend
Diabetes mellitus	wörtlich: honigsüßer Durchfluss, gemeint ist Zuckerkrankheit, bei der es durch hohe Blutzuckerwerte zum Ausscheiden des Zuckers kommt, sodass der Urin süß ist
Diabetiker	Bezeichnung für einen Zuckerkranken
Diagnose	Krankheitserkennung, Krankheitsbefund
Diagnostik	Lehre von den Mitteln und Wegen zur Diagnose
Diarrhö	Durchfall

diffus	ausgebreitet, ohne bestimmte Grenze
Diffusion	Durchdringung
Digestion	Verdauung
digital	mit den Fingern, auf die Finger bezüglich
Digitus	Finger
Dignität	Wertigkeit z. B. einer Geschwulst (gut (benigne) – oder bösartig (maligne))
Dioptrie	Brechkrafteinheit, Brechkraft einer Linse von 1 m Brennweite
Diplegie	doppelseitige Lähmung
Diplopie	Doppeltsehen
diskordant	nicht übereinstimmend
Dislokation	Verschiebung, Verlagerung
dislozierd	verschoben
dispers	zerstreut
Disposition	Veranlagung, Krankheitsbereitschaft
distal	Richtungsangabe: weiter vom Rumpf entfernte Teile der Extremitäten (Gegensatz: proximal)
Distorsion	Verstauchung, Zerrung, Verdrehung
Distraktion	Auseinanderziehen, Streckverband
Diurese	Urinausscheidung
Divulsio	selten: gewaltsame Sprengung, Zerreißung
Dolor	Schmerz
dominant	beherrschend
Dominante	richtungsgebender, beherrschender Einfluss
dorsal	Richtungsangabe: zum Rücken weisend, rückseitig gelegen
Dorsum	Rücken
Dosierung	Einteilung eines Arzneimittels
Drainage	Ableitung (z. B. von Wundsekret)
Dura	harte Hirnhaut (umschließt Gehirn und Rückenmark)
Duodenum	Zwölffingerdarm
Durchgangsarzt	von den gesetzlichen Unfallversicherern beauftragter Arzt, der über das Heilverfahren von Arbeits- und Wegeunfällen sowie Berufskrankheiten entscheidet
Dysaesthesie	qualitative Sensibilitätsstörung, bei der Reize anders oder unangenehm empfunden werden
Dysbasie	Hinken infolge Gehstörung

Dyschromatopsie	partielle Farbenblindheit
Dysenterie	Ruhr (bakterielle Durchfallerkrankung)
Dyskinesie	Bewegungsstörung
Dyspepsie	Verdauungsstörung
Dysphagie	Schluckstörung
Dysphasie	Sprachstörung
Dysplasie	Missgestalt, Fehlbildung, minderwertige Anlage
Dyspnoe	Atemnot, Atemstörung
Dystonie	fehlerhafter Spannungszustand von Muskeln und Gefäßen
Dystrophie	chronische Ernährungsstörung
E	
Effloreszenz	Formen krankhafter Hautveränderungen
Ekzem	Juckflechte, Hautausschlag
elektiv	ausgewählt
Elektroenzephalographie (EEG)	Aufzeichnung der elektrischen Tätigkeit des Hirnes (Hirnstromwellen)
Elektrokardiogramm (EKG)	Aufzeichnung der bei der Herztätigkeit entstehenden elektrischen Vorgänge
Elektromyographie (EMG)	Aufzeichnung von Muskelaktionspotenzialen
Elektroneurographie (ENG)	Messung der Nervenleitgeschwindigkeit (NLG)
Elektrotherapie	Reizstrombehandlung bei peripheren Nervenlähmungen zur Vermeidung von Muskelschwund
Elevation	Anheben, Hochheben
Elimination	Ausscheidung
Embolie	Verstopfung von Blutgefäßen durch Gerinnsel
Embryo	ungeborene Leibesfrucht
Emesis	Erbrechen
Eminentia	Vorsprung, Höcker, Erhöhung
Emission	Ausstrahlung, Abgabe
Emotion	Gemütsbewegung
empirisch	auf Erfahrung beruhend
Emphysem	Aufblähung, Überblähung (z. B. Lungenemphysem: Überblähung der Alveolen durch chronische Entzündung der kleinsten Bronchien, die das Abatmen der Luft erschweren)
Emplastrum	Pflaster
Empyem	eitriger Gelenkinfekt
Encephalitis	Gehirnentzündung

Encephalocele	angeborener Defekt, bei dem es zur Herniation von Hirnanteilen durch eine Knochenlücke des Schädels kommt
Encephalon	Gehirn
Encephalopathie	Gehirnleiden
Encephalorrhagie	Hirnblutung
Endokard	Herzinnenhaut, innerste Wandschicht des Herzens
Endoprothese	Gelenkersatz durch Fremdmaterial
Endoskopie	Untersuchung der Innenflächen von Hohlorganen (Magen, Darm) mittels spezieller Instrumente (Endoskop)
Enteralgie	Leibschmerz
Enteritis	Darmentzündung
ephemer	eintägig, kurz dauernd
Ephemera	Eintagsfieber
Epidermis	äußerste Schicht der Haut, sog. Oberhaut
epidural	auf der Dura (harte Hirnhaut) gelegen
Epigastrium	Oberbauchgegend
Epikrise	zusammenfassender, abschließender Bericht
Epilepsie	Kramfanfallleiden
Epistaxis	Nasenbluten
Epithel	ein- oder mehrschichtiger Zellverband, der innere oder äußere Körperoberflächen bedeckt
Erosion	Abschürfung
Erysipel	Lymphrose, eine auf dem Lymphweg zur Ausbreitung neigende Infektion der Haut
Erythrozyten	rote Blutkörperchen (Sauerstoffträger)
Eupnoe	gesunde Atmung
Evolution	Entwicklung
Exanthem	auf größere Körperoberflächen verbreitete entzündliche Hautveränderungen
Exazerbation	Ausbruch/Verschlimmerung eines Leidens
Exaltation	krankhaft gehobene Gemütsstimmung
Exartikulation	Abnahme einer Gliedmaße im Gelenkbereich
Exitus	Ausgang, Tod (Exitus letalis: tödlicher Ausgang)
Exzision	Ausschneiden von Gewebe
Exkoriation	Hautabschürfung
Exkretion	Aussonderung, Ausscheidung
exogen	durch äußere Einflüsse bedingt, von außen

Exostose	spornartige Knochenneubildung
Explantation	Entnahme von Körpergewebe oder -organen
Exploration	Untersuchung
Extension	Streckung (Gegensatz: Flexion: Beugung)
extensiv	ausgedehnt
Extensor	Streckmuskel
Extremitäten	Gliedmaßen
Exzitation	Erregung
F	
Facialis	zum Gesicht gehörend
Facies	Gesicht, Oberfläche
Fallhand	durch Nervenlähmung entstandene Unfähigkeit, die Hand zu heben (Nervus-radialis-Lähmung)
Fasciculus	kleines Bündel (von Nerven- oder Muskelfasern)
Faszie	wenig dehnbare, aus kollagenen gekreuzten Fasern bestehende Muskelhülle
Febris	Fieber (siehe auch Fieber)
feminin	weiblich
Femur	Oberschenkelknochen
femoral	zum Oberschenkel gehörend
Fibrom	Bindegewebsgeschwulst
Fibula	Wadenbein
Fieber	Körpertemperaturerhöhung > 38 °C
Fissur	Riss, Spalte
Fixation	Befestigung
Flake fracture	Abscherfraktur im Gelenkbereich (Fragment besteht aus Knorpel- und Knochenanteilen)
Flatus	Blähungen
flexibel	beweglich, biegsam
Flexion	Beugung (Gegensatz: Extension: Streckung)
Flexor	Beugemuskel
Flexur	Biegung
floride	stark ausgeprägt (z. B. das Stadium einer Krankheit)
fluidus	flüssig
Foetor	übler Geruch (Foetor ex ore: Mundgeruch)
Fokus	Herd, Brennpunkt

Foramen	Loch, Öffnung
forensisch	gerichtlich, gerichtsmedizinisch
Fossa	Grube, Vertiefung
fragil	zerbrechlich
Fragment	Bruchstück
fraktioniert	stückweise, unterbrochen
Fraktur	Bruch
Fremitus	Erschütterung des Brustkorbs, Schwirren
Friktion	Reibung, Massagegriff
Frons	Stirn
frontal	Richtungsangabe: von stirnseitig, von vorne
frustran	vergeblich
fulminant	plötzlich
Functio laesa	gestörte Funktionsfähigkeit
Fundus	Grund
Funktion	Arbeitsleistung, Verrichtung
G	
Galea	Helm, Haube
Galea aponeurotica	dem Schädeldach haubenartig aufsitzende Sehne
Galle	Sekret der Leber, die in der Gallenblase zwischengespeichert wird und nach den Mahlzeiten in den Darm abgegeben wird
Ganglien	aus Nervenzellen bestehender Knoten
Ganglion	Knoten, Überbein (ausgehend von der Gelenkkapsel)
Gangraen	Brand, Gewebefäulnis
Gaster	Magen
Gastralgie	Magenschmerzen
Gastrektomie	operative Entfernung des Magens
Gastritis	Magenschleimhautentzündung
Gastropathie	Magenleiden
Gastroskopie	Magenspiegelung
Genese	Entstehung, Ursache
genetisch	erblich
Genital	Geschlechtsorgan
Genu	Kniegelenk
Genu valgus/varus	X-Bein- bzw. O-Bein-Deformität

Genus	Gattung, Geschlecht
Gestation	Schwangerschaft
Glandula	Drüse
Glaukom	grüner Star (Augeninnendruckerhöhung)
Glukose	Traubenzucker
Gonagra	Kniegicht
Gonalgie	Knieschmerz
Gonarthritis	Kniegelenkentzündung
Granulum	Körnchen (Plural: Granula)
Granulation	gefäßreiches, körnchenartiges Bindegewebe, das bei der Wundheilung entsteht
gravide	schwanger
Gravida	schwangere Frau
Gravidität	Schwangerschaft
H	
habituell	gewohnheitsmäßig, öfter auftretend
Habitus	äußere Erscheinung, Körperhaltung
Haemangiom	gutartiges Blutgefäßschwulst, Blutschwamm
Haemarthros	blutiger Gelenkerguss
Haematemesis	Bluterbrechen
haematoid	blutähnlich
Haematom	Bluterguss, Blutung
Haematothorax	Blutansammlung im Brustkorb (i. d. R. bei Frakturen der Rippen)
Haematorrhoe	Blutsturz, starke Blutung
Haematurie	Ausscheidung von Blut im Urin
Haemolyse	Zerfall der roten Blutkörperchen
Haemophthalmus	Bluterguss im Auge
Haemoptoe	Bluthusten, blutiger Auswurf beim Husten
Haemorrhagie	starke Blutung
Haemorrhoiden	knotenförmige Erweiterung des Gefäßgeflechts am Anus
Haemostyptika	blutstillende Mittel
Hallux	Großzehe
Halluzination	Wahnvorstellung
Haphalgesie	Berührungsschmerz der Haut bei Psychopathen
Hedonie	krankhafte Heiterkeit

Helkom	Geschwür
Hemialgie	wörtlich: Halbseitenschmerz, Migräne
Hemianaesthesie	einseitige Gefühllosigkeit
Hemianopsie	Halbseitenblindheit
Hemiplegie	Halbseitenlähmung
Hepar	Leber
Hepatitis	Leberentzündung
hereditär	erblich
Heredität	Erblichkeit
Hernia	Bruch, Vortreten von Eingeweide aus der Bauchhöhle in eine abnorme Ausstülpung des Bauchfells
Herniotomie	Bruchoperation
Herzinsuffizienz	Herzmuskelschwäche
heterolog	abweichend, nicht übereinstimmend
Heterophorie	Neigung zum Schielen
Hidrosis	Schwitzen
Histologie	Lehre von den Geweben des Körpers
Homo	Mensch
Homoioplastik	Gewebeübertragung (Transplantation), wenn das Gewebe von einem artgleichen Individuum stammt
homogen	gleichmäßig, gleichartig
Hormone	Botenstoffe, die von Drüsen in die Blutbahn abgesondert werden und bestimmte Lebensvorgänge regeln
Hüftluxation	Hüftgelenkverrenkung
human	menschlich
Humerus	Oberarmknochen
HWS	Abkürzung für Halswirbelsäule
Hydrops	Wassersucht
Hypalgesie	Verminderung des Schmerzempfindens
Hyperalgesie	gesteigerte Schmerzempfindlichkeit
Hyperemesis	überstarkes Erbrechen (z. B. während der Schwangerschaft)
Hyperfunktion	Überfunktion
Hypertension	erhöhter Druck (z. B. Bluthochdruck)
Hyphaema	Blutansammlung in der vorderen Augenkammer
hypnagoger Zustand	Dämmerzustand
Hypnos	Schlaf

Hypnotika	Schlafmittel
Hypochondrie	krankhafte nervös-seelische Verfassung mit gesteigerter Selbstbeobachtung und Krankheitseinbildung
Hypogastrium	Unterbauch
Hypomobilität	verminderte Bewegungsfähigkeit
Hypophrenium	Bauchraum (wörtlich: unterhalb des Zwerchfells)
Hypoplasie	Entwicklungshemmung, -störung eines Gewebes oder Organes
Hypostase	passive Blutfülle abhängiger Teile, verminderter Blutfluss
Hypothermie	Unterkühlung, verminderte Körpertemperatur
Hypothese	Annahme
Hysterie	psychogener Anfall
I	
Icterus/Ikterus	Gelbsucht
Ictus	plötzlich eintretende Krankheitserscheinung
Id	Erbanlage, Erbeinheit
idiopathisch	ohne erkennbare Ursache entstanden
Idioplasma	Erbmasse, Erbsubstanz
Ileum	an das Jejunum anschließender Darmanteil
Ileus	Darmverschluss
imaginär	unwirklich, nur in der Vorstellung vorhanden
Immobilisierung	Einschränkung der Beweglichkeit
Immunisierung	Auslösen einer Immunantwort, Erzeugung von Immunität
Immunität	Resistenz gegenüber pathogenen Organismen oder deren Stoffwechselprodukte
impermeabel	undurchlässig
Implantation	Einpflanzung von Fremdteilen in den Körper, Einnistung der Eizelle nach Befruchtung
Impression	Eindruck, Vertiefung einer Fläche
Impuls	Antrieb
inaequal	ungleich
inaktiv	unwirksam, untätig
Inaktivitätsatrophie	Muskelschwund durch Mindergebrauch
incarnatus	eingewachsen (z. B. Unguis incarnatus: eingewachsener Zehennagel)
Incisores	Schneidezähne

Indikation	zwingender Grund zur Anwendung eines bestimmten therapeutischen oder diagnostischen Verfahrens
individualisieren	auf das einzelne Individuum abstimmen
indiziert	angezeigt (siehe Indikation)
indolent	gleichgültig, schmerzunempfindlich
Induktion	Ableitung allgemeingültiger Regeln aus Erfahrung
Induratio	Verhärtung von Gewebe
indurativ	verhärtet
induziert	durch etwas anderes hervorgerufen
Infans	Kind
infantil	kindlich
Infarkt	durch Verschluss einer Arterie in Folge Blutleere abgestorbener Gewebebezirk
infaust	aussichtslos
Infektion	Übertragung und Haftenbleiben von Mikroorganismen in einem Makroorganismus
Inflammatio	Entzündung
Infraktion	unvollständiger Knochenbruch
Infusion	tropfenweises Einfließenlassen von Flüssigkeit
Inhalation	Einatmung
Inhibition	Hemmung
Injektion	Einspritzung
injizieren	einspritzen
Inkarzeration	Einklemmung
inkompatibel	unverträglich, unvereinbar
Inkongruenz	fehlende Übereinstimmung
Inkontinenz	Unvermögen zur willkürlichen Kontrolle des Stuhlganges und der Harnausscheidung
inkurabel	unheilbar
inoperabel	nicht operierbar
Inopexie	verstärkte Gerinnungsneigung des Blutes
insanabel	unheilbar
insensibel	unempfindlich
Insuffizienz	verminderte Leistungsfähigkeit
Insult	Anfall (i. d. R. gemeint ist Apoplex)
intakt	unversehrt

integrierend	einschließend
Integument	Haut, Decke, Hülle
Intentio	Absicht, Streben
Intervall	Zwischenzeit, Zwischenraum
intra	innerhalb
intraartikulär	innerhalb eines Gelenks
intraocular	innerhalb des Auges
intravenös	in eine Vene hinein (z. B. intravenöse Infusion)
intermittierend	zeitweise, stoßweise
Intervention	Einmischung, Eingriff
Intubation	Einführen eines Rohres durch Mund oder Nase in die Luftröhre (zum Zwecke der Beatmung) bzw. Speiseröhre/Magen (zum Zwecke des Sekretabsaugung
Inunktion	Einreibung
invers	umkehrbar
Inzidenz	Anzahl der Neuerkrankungen in einer Population
Iris	Regenbogenhaut (Auge)
irregulär	unregelmäßig
irreparabel	nicht wiederherstellbar, unheilbar
irreponibel	nicht einrenkbar
irreversibel	nicht rückgängig zu machen
Irritabilität	Erregbarkeit, Reizbarkeit
Ischaemie	örtliche Blutleere (kann zum Infarkt führen)
Ischias	i. d. R. gemeint ist Nervus ischiadicus (großer Nerv, der an der Hinterseite des Beines verläuft und die dortige Muskulatur innerviert)
Ischialgie	Schmerzen im Bereich des Nervus ischiadicus (Ischiassyndrom)
Ischium	Hüftbein, Sitzbein
Iso-	gleich-
isoton	von gleichem Druck
ISS	Injury Severity Scale (1974 von Baker erstmalig veröffentlichter anatomischer Score zur Bewertung einer Gesamtverletzungsschwere, beruht auf dem AIS)
Isthmus	Engpass, verengte Stelle
J	
Jejunum	an den Zwölffingerdarm anschließender Dünndarmanteil

K	
kalamieren	beruhigen, lindern
Kalium	positiv geladenes Ion (Kation), das im Körper eine wesentliche Funktion für die Zellerregbarkeit hat
Kapillare	haarfeines Gefäß, feinste Ausläufer der Blutgefäße
Kardiologie	Lehre vom Herzen und seinen Erkrankungen
Karpaltunnel	im Bereich der Handwurzel gelegener Tunnel, durch den der Nervus medianus läuft
kartilaginär	knorpelig
Karzinom	bösartige epitheliale Geschwulst
Katamnese	kritischer Bericht über eine Krankheit nach deren Beendigung
Kataplasie	Rückbildung
Katarakt	grauer Star, Hornhauttrübung
Katarrh	Virusinfekt
kaudal	siehe caudal
Kausalgie	brennender Schmerz
Kautelen	Vorsichtsmaßnahmen
KHK	Abkürzung für koronare Herzerkrankung (Durchblutungsstörung der Herzkranzgefäße)
Kinetik	Lehre von der Bewegung
kinetisch	auf Bewegung bezüglich
Kleido	Schlüsselbein
Koagulation	Gerinnung
Koagulum	Gerinnsel
Koeffizient	Verhältniszahl
kohaerent	zusammenhängend
Kolik	anfallsartig auftretender Schmerz durch Muskelkrämpfe von Hohlorganen (Darm, Magen)
kollabieren	zusammenbrechen
Kollaps	Zusammenbruch, Zerfall
Kolon	siehe Colon
Koma	Zustand tiefster Bewusstlosigkeit
Kommotio	siehe Commotio
kommunizierend	miteinander in Verbindung stehen
kompatibel	passend, übereinstimmend
Kompensation	Ausgleich

kompensiert	ausgeglichen
komplementär	ergänzend
komplizierte Brüche	Brüche mit Komplikation (z. B. Weichteilverletzung, Gefäß-Nervenverletzung, offene Brüche)
Komponente	Bestandteil eines Ganzen
kompressibel	zusammendrückbar
Kompression	Druck, Verdichtung
Kompressionsverband	Druckverband
komprimieren	zusammendrücken
Konfiguration	Gestalt
kongenital	siehe congenital
konsekutiv	nachfolgernd, folgerichtig
konservativ	erhaltend, unter Vermeidung einer Operation (Gegensatz: operativ)
Konsolidation	Verfestigung
konstant	beständig
Konstitution	Zustand, Beschaffenheit
konstitutionell	auf die Konstitution bezüglich
konträr	gegensätzlich
kontrovers	strittig
Kontusion	Quetschung, Prellung
konzentrisch	auf den Mittelpunkt eingestellt
Konzeption	Empfängnis (Antikonzeptiva: Verhütungsmittel)
Koordination	Zusammenspiel
Korrelation	Wechselbeziehung
korrespondierend	entsprechend, miteinander übereinstimmend
Korrosion	Verätzung durch Entzündungsvorgänge
Kortikalis	harte äußere Knochensubstanz (Gegensatz: Spongiosa)
Koxarthrose	siehe Coxarthrose
Kulmination	Höhepunkt
Kumulation	Anhäufung
kupieren	abschneiden, abkürzen (in Bezug auf eine Krankheit)
kurativ	heilend
Kyphose	Buckel, Wirbelsäulenverkrümmung nach hinten konvex

L	
Labia	Lippen
lanzinierende Schmerzen	blitzartige Schmerzen (bei Tabes dorsalis)
Larynx	Kehlkopf
lasziv	geil
latent	im Verborgenen vorhanden
Latenz	zeitweiliges Verborgensein einer Krankheit
lateral	seitlich (Gegensatz: medial: mittig)
Latus	Seite
Lavage	Spülung
leniens	lindernd
Lens	Linse
lentikulär	linsenförmig
letal	tödlich
Letalität	tödlicher Verlauf
Lethargie	Gleichgültigkeit, Abgeschlagenheit
Leukämie	maligne Erkrankung der weißen Blutzellen
Leukozyten	weiße Blutkörperchen
Leukozytose	Vermehrung der weißen Blutkörperchen
levis	leicht (Steigerungsform: levissimus)
Libido	sexuelle Erregbarkeit, Begierde
Ligatur	Unterbindung von Blutgefäßen
Ligament	Band (i. d. R. aus kollagenen Fasern bestehender Strang, der Gelenke stabilisiert oder der Organfixierung im Bauchraum dient)
Limbus	Rand, Saum
Linea	Linie
Lingua	Zunge, Sprache
lingualis	zur Zunge gehörig
Liparocele	Fettbruch
Liquor	Flüssigkeit
Liquorrhoe	Entleerung von Hirnwasser aus Nase oder Gehörgang (z. B. bei Schädelbruch)
livide	blässlich, bleifarben
Lobus	Lappen (Verkleinerungsform: Lobulus)
Locus	Ort, Stelle

lokal	örtlich begrenzt
Lokalanaesthesie	örtliche Betäubung
lokalisiert	an einen bestimmten Ort gebunden
Lordose	nach vorn konvexe Verbiegung der Wirbelsäule (Gegensatz: Kyphose)
Lumbago	Hexenschuss, Schmerzen im Bereich der Lenden
Luxatio/Luxation	Verrenkung eines Gelenks
luxieren	verrenken
luxurians	wuchernd
LWS	Abkürzung für Lendenwirbelsäule
Lymphknoten	in die Strombahn der Lymphgefäße eingeschaltete linsengroße Organe (Funktion: Filter für körperfremde Stoffe, Bildung von Lymphozyten)
Lyse	Auflösung, Zerfall
M	
Maisonneuve-Fraktur	nach ihrem Erstbeschreiber benannte Sonderform einer Sprunggelenksfraktur (hohe Wadenbeinfraktur)
makro	Vorsilbe: groß
Maladie	Krankheit
Malazie	Erweichung (z. B. Osteomalazie: Knochenerweichung)
malignus/maligne	bösartig
Malignität	Bösartigkeit
Malleolus	Knöchel am Sprunggelenk
Malum	Leiden, Übel, Krankheit
Mamilla	Brustwarze
mamillaris	zur Brustwarze gehörig
Mamma	weibliche Brust
Mandibula	Unterkiefer
Manie	psychische Erkrankung, die durch einen Zustand mit Antriebssteigerung und gehobener Stimmungslage gekennzeichnete ist (Gegensatz: Depression)
manifest	offenbar, offensichtlich
manifestieren	offenbaren
Manubrium sterni	oberster Teil des Brustbeines
Manus	Hand
Marasmus	Verfall, Kräfteschwund, Abmagerung
manuell	mit der Hand

Margo	Rand
marode	ermattet, erschöpft, krank
maskulin	männlich
mastoideus	warzenförmig, zum Processus mastoideus gehörig
Materie	Stoff
materiell	stofflich
Matrix	Mutterboden, Keimschicht
Maturation	Reifung
Maxilla	Oberkiefer
Mazeration	Aufweichung, Erweichung
Meatus	Gang, Kanal
Media	Mitte
medial	mittig (Gegensatz: lateral: seitig)
median	in der Mittellinie des Körper
Medianebene	Ebene, die den Körper in eine rechte und eine linke Hälfte teilt
Medianus	Nervus medianus (innerviert Handmuskulatur, Lähmung führt zur so genannten Schwurhand (Beugehemmung des 2. und 3. Fingers)
Mediastinum	mittleres Gebiet des Brustraumes
Medium	Mittel, Grundlage, Umgebung
Medulla	Mark
Medulla spinalis	Rückenmark
Mega-	groß, Abkürzung für den Faktor 10 hoch 6
Megalomanie	Größenwahn
Melancholia	Traurigkeit
Membrana	Wand, Membran (Membrana tympani: Trommelfell)
Meninges	Gehirn-, Rückenmarkhaut
Meningitis	Gehirn-, Rückenmarkshautentzündung
Meningoenzephalitis	Entzündung der Hirnhaut und des Gehirns
Menstruation	Monatsblutung der Frau, Regel, Periode
mental(is)	geistig, auf das Kinn bezüglich
Mentum	Kinn
Mesencephalon	Mittelhirn
Mesenterium	Aufhängeband des Dünndarms im Bauch
Metabolismus	Stoffwechsel
Metacarpophalangealgelenke	Gelenke zwischen Mittelhandknochen und Fingern

Metacarpus	Mittelhand (Teil zwischen Handwurzel und Fingern)
Metastase	Tochtergeschwulst, die durch Verschleppung von Zellen einer Geschwulst (Primästumor) entsteht
Metatarsus	Mittelfuß
migrans	wandernd
Migräne	anfallsweise auftretende halbseitige Kopfschmerzen
mikro	klein (Gegensatz: makro: groß)
Milz	größtes lymphatisches Organ im linken Oberbauch
Miosis	Engstellung der Pupillen (Gegensatz: Mydriasis: Weitstellung der Pupille)
Mitella	Armschlinge, Armtrageband
mitigatus	gemildert
Mitra hippokrates	mützenartiger Kopfverband
Mneme	Gedächtnis
mobilis	beweglich, mobil
mobilisieren	beweglich machen
Modifikation	Abwandlung, Beeinflussung der Merkmalsausprägung durch Umwelteinflüsse
Molimina	Beschwerden bei der Regelblutung
Monarthritis	auf ein Gelenk beschränkte Entzündung z. B. bei Arthrose oder Infektionserkrankungen (Gegensatz: Polyarthritis: viele Gelenk betreffende Entzündung z. B. bei Rheuma)
mono	allein, nur, einzig
Monophasie	Sprachstörung, bei der immer nur ein Wort gesprochen werden kann
monoton	einförmig
Monstra	Missbildung
Morbidität	Krankheitshäufigkeit, Krankheitsgeschehen innerhalb einer Population
Morbus	Krankheit
moribund	krank, sterbend
Mors	Tod
Mors subita	plötzlicher Tod
Mucosa	Schleimhaut
Multiple Sklerose	chronische, in Schüben verlaufende Erkrankung des Nervensystems
Musculus	Muskel

Muskelatrophie	Muskelschwund
Muskeldystrophie	seltene Erkrankung des Muskelsystems, die mit Atrophie und Hypertrophie einhergehen kann
muskulär	auf Muskeln bezüglich
Mutilation	Verstümmelung
multipel	häufig
Multipara	Mehrfachgebärende (Mutter mehrerer Kinder)
mutuell	wechselseitig
Myalgie	Muskelschmerz
Myo-	Muskel-
Myocard	Herzmuskel
Myoparalyse	Muskellähmung
Myorrhexis	Muskelzerreißung
Myrinx	Trommelfell
N	
Naevus	Muttermal
Nares	Nasenlöcher
Narkose	ein durch Medikamente (Narkotika) induzierter reversibler Zustand, der zur Bewusstlosigkeit und Schmerzlosigkeit führt, sodass chirurgische Eingriffe möglich sind
Nasus	Nasenlöcher
Nates	Gesäß, Hinterbacken
nativ	angeboren, natürlich, unverändert
Nekropsie	Leichenschau
Nekrose	Absterben von Körpergeweben
Nekrotomie	Sektion, Leichenöffnung
Nekrosektomie	Entfernung von abgestorbenem Gewebe
Neoplasie	Neubildung, Geschwulst, Tumor
Nephrologie	Lehre von den Krankheiten der Niere
Nervus	Nerv
Neuralgia	Nervenschmerz
neuralgisch	auf Nervenschmerz beruhend
Neurasthenie	Nervenschwäche, psychische Überlastung, Erschöpfung
Neuraxon	Nervenfortsatz
Neuritis	Nervenentzündung

Neurologie	Lehre von den Krankheiten der Nerven
Neurose	Form der abnormen Erlebnisreaktion
neurotisch	auf Neurose bezogen
Nodus	Knoten (Verkleinerung: Nodulus = Knötchen)
nodosus	knotig
nosokomial	im Krankenhaus erworben
Nostalgie	Heimweh
Notalgie	Rückenschmerz
Noxe	Schadstoff
Nucha	Nacken
Nullipara	nicht Gebärende (Frau, die noch nicht entbunden hat)
Nystagmus	Augenzittern, unwillkürliches rhythmisches Zucken der Augäpfel
O	
Obduktion	Leicheneröffnung zur Feststellung der Todesursache
Obesitas	Fettleibigkeit, Fettsucht
occipital	zum Hinterhaupt gehörig
Occiput	Hinterhaupt
Occlusio	Verschluss
occultus	verborgen
Odontalgie	Zahnschmerz
Odynophagie	Schmerzhaftes Schlucken
Oedem	durch Wassereinlagerung entstandene Schwellung
Oesophagus	Speiseröhre
Omalgie	Schulterschmerz
Omarthritis	Schultergelenkentzündung
Omentum	Netz
Omoplata	Schulterblatt
Onkotomie	Eröffnung eines Geschwulst
Orbita	Augenhöhle
Orchis	Hoden
Ordination	ärztliche Verordnung, Sprechstunde
Organ	ein zu einer Arbeitsgemeinschaft aus Zellen und Geweben zusammengeschlossenes Ganzes im Körper
organisch	auf Lebewesen bezüglich
Organismus	Lebewesen, Körper

Orthese	orthopädisches Hilfsmittel zur Stabilisierung von Gelenken, Extremitäten oder der Wirbelsäule
Orthopädie	Lehre von der Entstehung, Verhütung und Behandlung angeborener oder erworbener Fehler in Form und Funktion des Bewegungsapparats
Orthopnoe	Atemnot, die zum Aufrechtsitzen zwingt
Os	Mund
Os	Knochen (Plural: Ossa)
Os coccygis	Steißbein
Ossiculum	Knöchelchen
Ostealgie	Knochenschmerz
Osteoarthropathie	Erkrankung eines Knochens und des dazugehörigen Gelenks
Osteochondrose	Knochen- und Knorpelverschleiß
Osteocranium	knöcherner Schädel
Osteogenese	Knochenentstehung
Osteolyse	lokaler Knochenschwund
Osteomalazie	Knochenerweichung
Oesteomyelitis	Knochenmarkentzündung (häufig chronisch verlaufend)
P	
Paediatrie	Kinderheilkunde
Painful Arc	wörtlich: Schmerzhafter Bogen, gemeint ist eine Bewegungseinschränkung bei Abduktion des Arms durch Verletzungen oder Entzündungen im Schultergelenk
palliativ	lindernd, jedoch nicht gegen die Ursache einer Krankheit wirkend (Gegensatz: kurativ = heilend)
pallidus	bleich, blass
Palma	die Hand
palmar	handflächenseitig
palpieren	tasten, fühlen
palpatorisch	getastet, ertastet, gefühlt
Palpebra	Augenlid
pan	ganz, komplett
Pankreas	Bauchspeicheldrüse
Pannus	Ausbildung eines großflächigen Granulationsgewebes
Papilla	warzenartige Erhebung
para	daneben, neben
Paraesthesie	krankhaftes Empfinden, z. B. Kribbelgefühl, Prickeln, Taubsein

paradox	widersinnig, widersprüchlich
Paralyse	vollständige Lähmung
Paraneoplasie	spezifische Krankheitszustände und Funktionsstörungen bei Tumorkranken, die weder metastatisch noch durch primäres Tumorzellwachstum zustande kommen, d. h. deren Genese unklar ist
Paranoia	Wahnsinn, Verrücktheit, Größenwahn
Paraparese	unvollständige Lähmung von zwei Gliedmaßen
Paraplegie	Lähmung beider Arme oder beider Beine
Parasympathikus	Teil des vegetativen Nervensystem
paravertebral	neben der Wirbelsäule
Parese	motorische Schwäche, unvollständige Lähmung (siehe Plegie: vollständige Lähmung)
paretisch	motorisch geschwächt
Parkinson	sog. Schüttellähmung
paroxysmal	in Anfällen auftretend
Patella	Kniescheibe
Patellarsehnenreflex	durch Schlag auf die Patellarsehne des gebeugten Beines kommt es zum Ausschlagen des Beines nach oben
Patholgie	Krankheitslehre
pectoralis	zur Brust gehörend
Pectus	Brust
Pedunculus	Stiel
pelvin	zum Becken gehörend
Pelvis	Becken
Penetration	Durchdringung, Durchbruch
penetrieren	durchdringen, durchbrechen
perakut	sehr akut
percutan	durch die Haut
Perforation	Durchlöcherung
Perineum	Damm (Gegend zwischen After und äußeren Geschlechtsteilen)
perioral	um den Mund herum
Periost	Knochenhaut
periostal	auf die Knochenhaut bezüglich
Periostitis	Knochenhautentzündung
Periostose	nicht gebräuchlich, streichen
Peripneumonie	nicht gebräuchlich, streichen

Peritoneum	Bauchfell (Haut, die den Bauchraum auskleidet)
permanent	andauernd
permeabel	durchlässig
Permeabilität	Durchlässigkeit
perniziös	verderblich
peronaeus	zum Wadenbein gehörig
Perone	Wadenbein
perpetuus	ununterbrochen
persistierend	anhaltend, bleibend, dauernd
Perzeption	Wahrnehmung, Empfindung
perzeptieren	wahrnehmen, empfinden
Pes	Fuß
Phalanx	Finger-, Zehenglied (Plural: Phalangen)
Phantomschmerz	Schmerz bei Amputation (Schmerzwahrnehmung in der nicht mehr vorhandenen Extremität
Phlebitis	Venenentzündung
Phlebo-	Wortteil mit der Bedeutung Venen
Phlebographie	Darstellung des Venensystems mit Kontrastmittel
Phlegmone	flächige Entzündung/Infektion des Haut und Unterhaut, die zur Eitereinschmelzung (Abszess) führen kann
phlogistisch	entzündlich
Phyma	knotiger Auswuchs (z. B. Rhinophym: knollige Veränderung der Nasenhaut)
Pili	Haare
pilosus	behaart
piriformis	birnenförmig
Planta pedis	Fußsohle
Plasma	Lebensgrundsubstanz der Zellen
plastisch	formend, bildend
plastisches Sehen	räumliches Sehen
Pleura	Brustfell, Lungenfell, Rippenfell (Haut, die die Thoraxwand auskleidet)
Pleuralgie	Brustfellschmerz
Pleuritis	Entzündung des Brustfells
Plexus	Geflecht von Nerven-, Blut- oder Lymphgefäßen
Pneumarthrosis	nicht gebräuchlich, streichen

Pneumathaemie	nicht gebräuchlich, streichen
pneumatisch	auf Luft/Atem bezüglich
Pneumokokken	Erreger der Lungenentzündung und anderen Erkrankungen
Pneumonie	Lungenentzündung
Pneumorrhagie	Lungenblutung
Pneumothorax	Ansammlung von Luft zwischen Brustwand und Lunge
Pollex	Daumen
pollicis	zum Daumen gehörig
Polyarthritis	Entzündung mehrerer Gelenke
Polyp	gestieltes Geschwulst
popliteal	Kniekehle betreffend
postmortal	nach dem Tode
postoperativ	nach der Operation
posttraumatisch	nach dem Unfall, nach der Verletzung
Potentia	Kraft, Vermögen
praeformiert	vorgebildet
praemorbid	einer Erkrankung vorausgehende Zeichen
praeventiv	vorbeugend
primär	zuerst auftretend
primordial	ursprünglich
Processus	Vorsprung, Fortsatz
prodromal	einer Erkrankung vorausgehend
Prodrome	Vorboten, einer Erkrankung vorausgehende Erscheinungen
profundus	tief liegend, tief reichend
Prognose	Vorhersage
progredient	fortschreitend
progressiv	fortschreitend
Pronation	Einwärtsdrehung von Füßen oder Händen (Drehung des Unterarms, sodass die Handinnenfläche nach unten zeigt)
Prophylaxe	Vorbeugung
proprius	eigentümlich, charakteristisch, eigen
Prostration	hochgradige Erschöpfung
Prothese	künstlicher Ersatz fehlender Körperteile
protrahiert	hinausgezogen, längere Zeit dauernd
Provokation	Herausforderung

Pruritus	Hautjucken
Pseudo-	Wortteil mit der Bedeutung falsch
psychisch/psychologisch	auf die Seele/das Seelenleben bezüglich
psychopatisch	seelisch, geistig gestört
Psychose	zentral bedingte Störung der psychischen Funktionen
Pulmo	Lunge
pulmonal	auf die Lunge bezüglich, zur Lunge gehörig
Pulsation	Pulsschlag
Pulsus	Puls
Purpura	multiple exanthemische Hautblutungen bei Erkrankungen des Gerinnungssystem
purulent	eitrig
Pus	Eiter
putride	eitrig
Pyrexie	Fieberzustand
Q	
Quadriceps	vierköpfiger Muskel am Oberschenkel
Quadriplegie	Lähmung aller vier Extremitäten (besser: Tetraplegie)
R	
radiär	strahlenförmig
radialis	zum Radius gehörig
Radialislähmung	Lähmung der durch den Nervus radialis innervierten Muskeln (Symptom: Fallhand, Unfähigkeit, die Hand zu heben)
Radiatio	Bestrahlung
radiculär	zu einer Wurzel gehörig
Radius	Speiche
Radix	Wurzel
Ramus	Ast (Plural: Rami = Äste)
Raptus	psychopathalogisches Symptom nach Entführung oder Vergewaltigung
Raptus	Ausbruch, plötzlicher und rasch abklingender Wutanfall
Recidiv/Rezidiv	Wiederauftreten, Rückfall
Rectum	Enddarm
recurrens	wiederkehrend
Reduktion	Verminderung, Abnahme, Verringerung

reduziert	vermindert
reflektieren	zurückbeugen, spiegeln, wiedergeben
Regeneration	Erholung, Heilung, Wiederherstellung
regionär	in einem Gebiet lokalisiert
Regression	Rückbildung
regressiv	in Rückbildung befindlich
reimplantieren	wieder einpflanzen, wieder einsetzen
Rekonvaleszenz	Genesungszeit
relativ	verhältnismäßig
Relaxatio	Entspannung
Ren	Niere
renalis	zur Niere gehörig
Reparation	Wiederherstellung
reparativ	wiederherstellend
Reposition	Einrenken, Einrichten
Resektion	Entfernung, Ausschneidung, operative Entfernung von Gewebe oder Organen
residual	übriggeblieben, restlich
Residuum	Rest, Rückstand
Resistenz	Widerstand, Verhärtung
resorbieren	wiederaufnehmen
Resorption	Wiederaufnahme, Aufnahme von Stoffen in den Blut- oder Lymphkreislauf
Respiration	Atmung
Restitutio	Wiederherstellung (Restitutio ad integrum: völlige Wiederherstellung des Ausgangszustandes)
Retardation	Verzögerung der geistigen Entwicklung
reticulär	netzförmig
Retina	Netzhaut
retiniert	zurückgehalten
Retro	rückwärts, zurück
reversibel	umkehrbar, heilbar
Revulsio	Ableitung
Raphe	Naht

S	
sacral	zum Kreuzbein gehörig
sacrolumbal	auf Kreuz- und Lendengegend bezüglich
Sacrum	Kreuzbein
Saliva	Speichel
Salpinx	Eileiter der Frau
Sanatio	Heilung
Sanguis	Blut
Scaphoid	Kahnbein (Handwurzelknochen)
Scapula	Schulterblatt
Schanz-Krawatte	weiche Halskrawatte nach Schanz bei HWS-Distorsion
Scheuermann (Morbus Scheuermann)	Wachstumsstörung der Wirbelkörper an der Wirbelkörper-Bandscheibengrenze, die zu einer kyphotischen Verbiegung der Wirbelsäule (meist BWS, selten LWS) führen kann
Schizophrenie	Bewusstseinsspaltung i. S. des Neben- und Miteinanders von gesunden und krankhaften Empfindungen und Verhaltensweisen (typische Symptome: Wahn und Halluzinationen)
Schock	Kollaps (durch Blutung, Nervenlähmung, Herzversagen, Allergene oder Krankheitserreger induzierter Kreislaufzusammenbruch)
sebaceus	teigartig
Sectio	Schnitt, Sektion (Sectio caesarea = Kaiserschnittentbindung)
Sedativa	Beruhigungsmittel
Sediment	Niederschlag
Segment	Ausschnitt, Abschnitt
segmentär/segmental	abschnittsweise, auf Segmente bezüglich
Segmentation	Segmentbildung
Sekret	Absonderungsprodukt der Drüsen
Sekretion	Absonderungsprodukt der Drüsen
Sektion	Leicheneröffnung
sekundär	an zweiter Stelle folgend
Selektion	Auswahl, Auslese
selektiv	ausgewählt, auslesend
semilunaris	halbmondförmig
semipermeabel	halbdurchlässig
senilis	greisenhaft, alt
Sensation	Empfindung

sensibilisieren	empfindlich machen
Sensibilität	Empfindsamkeit
Sensorum	Sinnesapparat, Bewusstsein
Sepsis	sog. Blutvergiftung, schwere Allgemeininfektion, die durch Mikrobenaussaat von einem Infektionsherd in die Blutbahn entsteht und zum Organversagen (Herz, Niere, Lunge, Leber u. a.) führen kann
septisch	auf Sepsis bezüglich
Septum	Scheidewand
Sequester	abgestorbener Knochen- oder Gewebeteil
Sequestration	Ablösung abgestorbener Gewebeanteile aus der gesunden Umgebung
Serum	wässriger Bestandteil des Blutes
Sesambeine	in Sehnen, Bändern oder Kapselanteilen von Gelenken eingefügte rundliche Schaltknochen (meist Hände und Füße)
sessil	sesshaft
sezernieren	absondern
Shunt	Kurzschlussverbindung zwischen Blutgefäßen
Signum	Zeichen
similis	ähnlich
simplex	einfach
Simulation	Verstellung, Vortäuschung von Krankheiten
simultan	gleichzeitig
sinister	links
Sinus	Bucht, Ausbuchtung, Hohlraum
Sinusitis	Entzündung eines Sinus (Nasennebenhöhlenentzündung)
Sklera	Lederhaut, äußere Hülle des Augapfels
Sklerodermie	Hautverhärtung
Sklerom	Verhärtung
Sklerose	krankhafte Verhärtung eines Organs (z. B. Blutgefäße: Arteriosklerose)
sklerotisch	verhärtet
Skoliose	seitliche Verbiegung der Wirbelsäule mit Rotationskomponente
solidus	fest
solitär	einzeln
Solutio	Lösung
Solventia	Schleim lösende Mittel

Soma	Körper
Somnolenz	Benommenheit, Schläfrigkeit
Sopor	Steigerungsform der Somnolenz: Schläfrigkeit mit fehlender Erweckbarkeit
Spasmus	Krampf, erhöhte Spannung
Spatium	Zwischenraum
Specificum	spezifisch wirkendes Mittel
Sphincter	Schließmuskel
sphygmo	auf den Puls bezüglich
Spina	Dorn, Stachel
spinal	auf das Rückenmark oder die Wirbelsäule bezüglich
Splen	Milz
Spondylitis/Spondylodiszitis	Entzündung eines Wirbels und/oder der Bandscheiben
Spondylodese	Versteifungsoperation von Wirbelsäulensegmenten
Spondylus	Wirbel
Spongiosa	weiche schwammartige Knochensubstanz, die von einer harten Knochenhülle (Kortikalis) umgeben wird
spongiös	schwammartig, auf die Spongiosa bezüglich
spontan	von selbst
sporadisch	selten, vereinzelt auftretend
stabil	beständig, fest
Staphyle	Zäpfchen am Gaumen
Stase	Stauung, Stillstand, Blutstockung
Status	Zustand
Status praesens	der sich bei einer Untersuchung darbietende Zustand
Stella	Stern
Stenocardie	Herzenge, Angina pectoris
Stenose	Verengung, Enge
stereotyp	gleichbleibend
Sternum	Brustbein
Stilicidium	Tröpfeln, Träufeln
Stoma	Öffnung, Mund
Strabismus	Schielen
Stridor	pfeifendes Atemgeräusch bei Verengung der oberen Luftwege
Struktur	Aufbau, Gefüge

Struma	Kropf, Drüsenschwellung (Schilddrüsenvergrößerung)
Stupor	Zustand geistig-körperlicher Erstarrung (häufig bei Schizophrenen)
subakut	mäßig heftig
subfebril	Körpertemperaturerhöhung zwischen 37 und 38° (noch kein Fieber)
Substitution	Ersatz, Ergänzung
subtilis	fein
Suggillatio	Blutunterlaufung
Suizid	Selbstmord
Supercilium	Augenbraue
superficiell	oberflächlich
superior	oberhalb, der obere
Supination	Auswärtsdrehung von Händen oder Füßen (Drehung des Unterarms, sodass die Handinnenfläche nach oben zeigt (Gegensatz: Pronation))
supraspinatus	oberhalb der Schulterblattgräte gelegen, Musculus supraspinatus: Obergrätenmuskel im Schulterbereich
Suppuratio	Eiterung
suspekt	verdächtig
Suspension	Aufhängung in der Schwebe, Aufschwemmen von feinen Teilchen
Sympathikus	Teil des vegetativen Nervensystem (siehe auch Parasympathikus)
Symphyse	Vereinigung der Schambeinäste im vorderen Beckenringbereich
Symptom	Erscheinungsform
symptomatisch	auf Symptome bezüglich, offenkundig
Syndrom	Symptomenkomplex
Synkope	kurz dauernder Bewusstseinsverlust
Synovia	Gelenkbinnenhaut, Gelenkschmiere
Synovialitis	Entzündung der Synovia
Synthese	Zusammensetzung
T	
Tachycardie	Beschleunigung der Herzfrequenz auf > 100 Schläge/Minute
Tachypnoe	beschleunigte Atmung
taktil	auf den Tastsinn bezüglich
Talus	Sprungbein (bildet mit den Gelenkflächen der Waden- und Schienbeinspitzen das obere Sprunggelenk und mit dem Fersenbein das untere Sprunggelenk)
tardus	langsam, verspätet

temporär	zeitweilig
Tenalgie	Sehnenschmerz
Tendinitis	Sehnenentzündung
Tendo	Sehne
Tetanie	neuromuskuläre Übererregbarkeit mit Krampfneigung durch Infektion mit Tetanuserregern
Tetraparese	unvollständige Lähmung aller vier Gliedmaßen (vgl. Paraparese)
Tetraplegie	Lähmung aller vier Gliedmaßen
Terminus	Begriff, Ausdruck
terminal	zum Ende führend
thoracalis	auf den Brustkorb bezüglich
thoracicus	auf den Brustkorb bezüglich
Thorax	Brustkorb
Thrombozyten	Blutplättchen
Thrombose	Blutpfropfbildung
Thrombus	Blutpfropfbildung
Thyreoidea	Schilddrüse
Tibia	Schienbein
tibialis	zum Schienbein gehörig
Toleranz	Verträglichkeit
Tonsillitis	Mandelentzündung (Rachenmandel)
topisch	örtlich
Torsion	Drehung
Torus	Wulst
touchieren	berühren
toxisch	giftig
Trachea	Luftröhre
Tractus	Zug, Strang
Transfusion	Blutübertragung
transversal/transversus	quer verlaufend
Trauma	Unfall, Wunde, Verletzung
traumatisch	auf Verletzung, Unfall beruhend
Tremor	Zittern
Trigonum	Dreieck
Trochanter	Rollhügel am Oberschenkelknochen (Trochanter major und minor: großer und kleiner Rollhügel)

Trochlea	Rolle (Trochlea humeri: Rolle des Oberarms, die ein Gelenkanteil des Ellenbogengelenks bildet)
Truncus	Rumpf, Stamm
Tuber	Höcker, Vorsprung
Tuberculum	Höckerchen
tuberös	knotenförmig
Tubus	Rohr, Beatmungsschlauch
Tumeszenz	diffuse Anschwellung
Tumor	Schwellung, Geschwulst
Tunica	Gewebeschicht
Turgor	Spannungszustand des Gewebes
Tussis	Husten
U	
ubiquitär	überall vorkommend
Ulcera	Geschwüre
Ulceration	geschwürartige Veränderung
Ulcus	Geschwür (Ulcus ventriculi: Magengeschwür, Ulcus duodeni: Zwölffingerdarmgeschwür)
Ulna	Elle
ulnaris	zur Elle gehörig
ultima ratio	letzte Maßnahme, letztes Mittel
undulierend	hin und her gewogen
Unguis	Nagel
unilateral	einseitig
universell	allgemein, umfassend
Ureter	Harnleiter
Urethra	Harnröhre
urogenital	Harn- und Geschlechtsteile betreffend
Urologie	Lehre von den Krankheiten der Harnorgane
Urtikaria	Nesselsucht, juckende, schubweise auftretende Quaddeln
Uterus	Gebärmutter
Uvula	Zäpfchen am Gaumen
V	
Vacuum	luftleerer Raum
vage	unbestimmt, undeutlich

valgus	x-förmig (Genua valga: X-Beine)
Vallecula	kleines Tal
Valvula	Klappe (z. B. Valvula cordis = Herzklappe)
valvulär	auf eine Klappe bezüglich
Variation	Abweichung, Abänderung eines Merkmals
Varikose	ausgedehnte Krampfaderbildung
varus	o-förmig (Genua vara = O-Beine)
Vas	Gefäß
vascularis	zum Gefäß gehörig
vasomotorisch	auf Gefäßnerven bezüglich
Vegetation	Wucherung
Venter	Magen
Ventilation	Belüftung
ventral	bauchwärts gelegen, zum Bauch gehörig
Ventriculus	kleiner Magen
Version	Wendung
Vertebra	Wirbel
vertebralis	auf den Wirbel bezüglich
Vertigo	Schwindel
verus	wahr, echt
versus	entgegen, anders
Vesicula	Bläschen
vesiculär	bläschenartig
Vigilanz	Wachheit, Bewusstseinslage
Vis	Kraft, Gewalt
Viscera	Eingeweide
visuell	auf das Sehen bezüglich, das Auge bezüglich
Visus	Sehkraft
vital	lebendig, auf das Leben bezüglich
Vitalität	Lebenskraft, -fähigkeit
Vitium	Fehler
vivipar	lebendig gebärend
voluntarius	freiwillig
Volvulus	Stiel- oder Achsdrehung eines Organ (z. B. Darmverschlingung)

Vomitus	Erbrechen
Vortex	Wirbel (z. B. Haarwirbel)
Vox	Stimme
vulnerabel	verwundbar, empfindlich
Vulnerabilität	Verletzlichkeit
Vulnus	Wunde
X	
Xanthom	gelbe Knoten in der Haut, die durch Fetteinlagerung entstehen
Xerosis	Trockenheit der Schleimhäute
Xerostomie	Trockenheit der Mundschleimhäute
Z	
Zellulose	Zuckermolekül von Pflanzen und Tieren
zentral	im Mittelpunkt stehend
zentrifugal	vom Mittelpunkt fliehend
zentripetal	zum Mittelpunkt hinführend
zerebral	siehe cerebral
Zerumen	Ohrenschmalz (auch Cerumen)
Zervix	Gebärmutterhals
zirkulär	kreisförmig
Zirkulationsstörung	Störungen im Blutkreislauf
zirkumscript	umschrieben, begrenzt
Zona	Zone, Gürtel, Gegend
zyklisch	kreisförmig
Zyste/Cyste	ein- oder mehrkammriger nicht präformierter Hohlraum, i. d. R. mit Flüssigkeit gefüllt
Zystektomie	Entfernung einer Zyste, Herausschneiden einer Zyste
Zystitis	Harnblasenentzündung
zytotoxisch	zellschädigend

Anhang 1

Abbreviated Injury Scale (AIS)	AIS Wert	Verletzungsschwere	zu bewertende Regionen
	0	unverletzt, (no injury)	
	1	gering, leicht, geringfügig (minor)	Kopf/Hals
	2	mäßig, mittelschwer (moderate)	Gesicht
	3	schwer, ernst (serious)	Thorax
	4	bedeutend (Überleben wahrscheinlich), sehr schwer (severe)	Abdomen
	5	kritisch (Überleben unsicher.), schwerst, akute Lebensgefahr (critical)	Extremitäten
	6	maximal (praktisch nicht überlebbar), tödlich (maximum injury virtually unsurvivable)	Weichteilmantel
	9	unbekannt (unknown)	
Injury Severity Scale (ISS)	bei Mehrfachverletzten kann jeder verletzten Körperregion ein AIS-Wert zugeordnet werden, die Gesamtverletzungsschwere (ISS) ergibt sich dann aus der Summe der Quadrate der drei am schwersten verletzten Regionen		
	ISS > 15	entspricht einem „Polytrauma“	
	ISS 75	Maximalwert, nicht zu überlebende Verletzungsschwere	
Beispiel	Verletzter mit folgenden Diagnosen: Lungenkontusion, offener Femurfraktur und Milzblutung sowie SHT 1°, geschlossenem Unterarmbruch und multiplen Schürfungen		
	AIS Kopf/Hals	1	
	AIS Thorax	3	
	AIS Abdomen	3	
	AIS Extremitäten	3	
	AIS Weichteil	1	
	ISS	27	

Anatomische Ebenen	Schnittrichtung
transversal/horizontal	waagerecht (parallel) zur ebenen Bodenfläche, von links nach rechts
sagittal/ventrodorsal/anterior-posterior	waagerecht (parallel) zur ebenen Bodenfläche, von vorne nach hinten
longitudinal/vertikal	senkrecht zur ebenen Bodenfläche
	Ebenen
transversal/axial	waagerecht zur Bodenfläche, teilt den Raum in oben und unten, von sagittaler und transversaler Achse aufgespannt
sagittal	senkrecht zur Bodenfläche, teilt den Raum in links und rechts, von sagittaler und vertikaler Achse aufgespannt
frontal/coronar	senkrecht zur Bodenfläche, teilt den Raum in vorne und hinten, von transversaler und vertikaler Achse aufgespannt
Median	diejenige Sagittalebene, die den Menschen in zwei symmetrische Hälften teilt

Allgemeine Richtungs- und Lagebezeichnungen	
supra	obern, oberhalb
infra	unten, unterhalb
superior	weiter oben gelegen
inferior	weiter unten gelegen
anterior	vorne
posterior	hinten
rostral	zur Nasenspitze hin (wörtlich: schnabelwärts)
occipital	zum Hinterhaupt hin
profundus	in der Tiefe, tief
superficial	oberflächlich
intern	innen gelegen
extern	außen gelegen
parietal	zur Körperwand hin gelegen
visceral	zu den Körpereingeweiden hin gelegen
dexter	rechts
sinister	links
cranial	kopfwärts, nach oben gelegen

Allgemeine Richtungs- und Lagebezeichnungen	
caudal	steißwärts, nach unten gelegen
ventral	bauchwärts, vorne gelegen
dorsal	rückenwärts, hinten gelegen
median	mittelständig, in der Medianebene
medial	zur Medianebene hin gelegen
lateral	seitlich, von der Medianebene weg gelegen
central	auf das Körperinnere zu, innen
peripher	auf das Körperäußere zu, außen
intern	zwischen
intra	innerhalb
apical	spitzenwärts
basal	unten

	Lagebezeichnung an den Extremitäten	
Rumpf	distal	rumpffern
	proximal	rumpfnah
Hand	palmar/volar	zur Handinnenfläche hin
	dorsal	zum Handrücken hin
Unterarm	radial	speichenwärts
	ulnar	ellenwärts
Fuß	plantar	zur Fußsohle hin
	dorsal	zum Fußrücken hin
Unterschenkel	tibial	zum Schienbein hin
	fibular	zum Wadenbein hin

Anhang 2

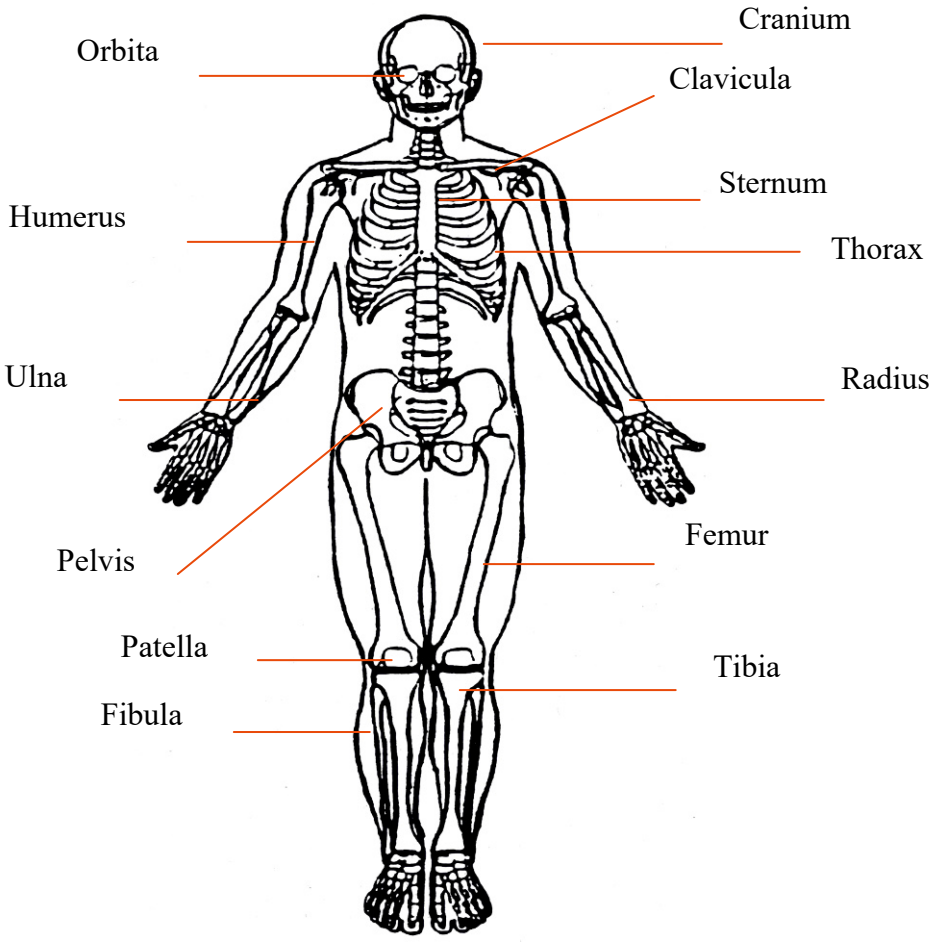


Bild D3-1 Skelettschema

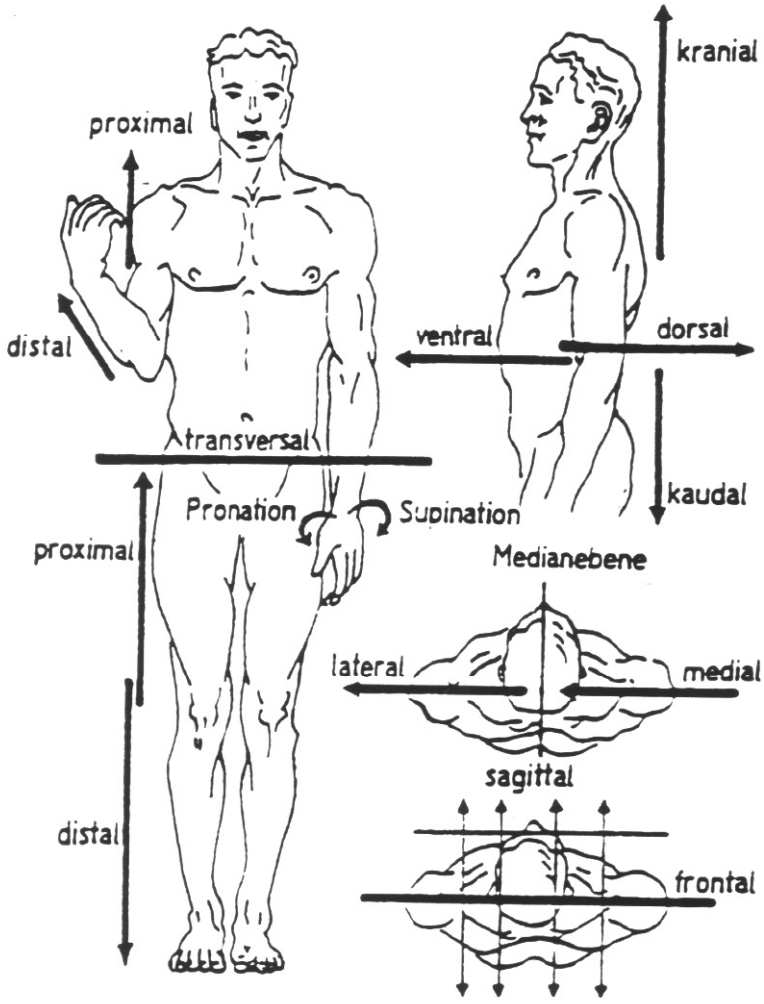


Bild D3-2 Ebenen und Richtungen im Bereich des Körpers nach Tittel

Literatur

American Association for Automotive Medicine (1995) Abbreviated Injury Scale – Revision 90. Am Ass F Autom Med , Morton Grove, Illinois, USA
Baker ST, O'Neill B, Heddon W, Long EB (1974) The Injury Severity Score: A method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care. J Trauma 14187–195
Wolfgang Dauber: Feneis' Bildlexikon der Anatomie, 9. überarbeitete Auflage 2004, Thieme Verlag
Pschyrembel Klinisches Wörterbuch, Verlag de Gruyter, 258. Auflage

Empfehlung:

www.anatomie-online.com/
http://www.mnsu.edu/emuseum/biology/humananatomy/index.shtml
http://flexicon.doccheck.com/
Wolfgang Dauber: Feneis' Bildlexikon der Anatomie, Thieme Verlag

Sachwortverzeichnis

A

AAAM 971
AAM 971
Abbiegevorgang 168 f.
Abbildung 52 f., 56 ff., 72, 74 ff., 530 f.
Abbreviated Injury Scale (AIS) 556, 971, 1015
Abbruch des Überholvorganges 179
Abgleitkollision 333
Abriss 28
ABS *siehe* Anti-Blockier-System
Abschleppfahrzeug 70
Abschleudern 394
Abschnittsaufnahme 64, 68 f., 73 f.
Abstand,ausreichender 287
Abstellplatz 70
Absturz 499
Abtastrate 93, 98 f., 101, 104
Abtastspuren 794
Abwehrhandlung 537
Abwehrmaßnahme 287
Abwehrreaktion 613
Abwicklung 395
ACEA 971
Achskraftverteilungsdiagramm 241, 250
Achsteilen 523
Ackermannwinkel 115
ADAC 971
ADAC-Korkenzieher-(Corkscrew-)Test 502
Adhäsionskomponente 234
Aggregateschäden 532
AGU 311
Ähnlichkeit 527
Airbag 761, 762, 763, 764, 765
Airbag-Modul 762
Airbagsystem 761
AIS *siehe* Abbreviated Injury Scale
Aktionsprinzip 300
ALB-Regelventil 657
Alleinunfall 581, 701
Allrounder 110
alternative Testprozedur 502
Alterungsvorgang 274
Altteile 67 f.
Ampelphase 184
amtliche Unfallstatistik 455
Anfahrbeschleunigung 490, 634
Anfahren 464
Anfahrentschluss 636
Anfangsbedingungen 230 ff.
angemietet 526
Angriffspunkt 336
Anhänger
– gelenkter 228
– ungelenkter 225 f., 231
Anhängerfahrzeug 108
Anhängerkupplungskraft 210, 214, 221, 225
Anhängermodell 225
Anhängerzugmaschine 108
Animation 571 f., 575 ff.
Anknüpfungsinformationen 56, 540 f.
Anlegedauer 289
Annäherungsgeschwindigkeit 518, 538
Anprallgeschwindigkeit 347 ff.
Anriebspuren 415
Anschmelzung 782
Anspruchsteller 537, 542
Anstoßanordnung 53, 55, 57, 531
Anstoßbereich 69, 71, 73, 80, 528
Anstoßfaktor 413 f.
Anstoßstelle 872, 876
Anthropometrie 858, 861 f.
anthropometrische Daten 423
Anti-Blockier-System (ABS) 220, 519
Antriebs-Balance-Diagramm 317, 321
Antriebs-Balance-Verfahren 318
Anwender 62
Arbeitsmaschine 487, 490
Arbeitszeiten 527
AREC 316, 320, 335, 349
Artefakten 62
ASR 519
AST-Fahrzeug 71, 520, 525, 528, 532, 538
ATB-GEBOD 861
ATD 971
ATV 111
Aufbruch 67
Aufdampfung 783
Auffahren 526
Auffahrkollision 70, 535
Auffälligkeit 530, 535
Aufholstrecke 172 ff., 176, 178 f.
Aufladen 394, 399 f.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017
H. Burg, A. Moser (Hrsg.), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-658-16143-9

Auflösung 62, 64, 67, 72 f., 77, 94, 98, 104
Aufmerksamkeit 879
Aufnahme 64, 69
Aufplatzung 67, 525
Aufschöpfen 397, 399
Aufschriebe 483
Auftraggeber 537, 541 f.
Auftragsannahme 9
Auftragung 525
Aufwurfweite 395
Aufzeichnungsbeginn 485
Aufzeichnungszeit 94
Augenschutz 771
Ausbremsen 530
Ausfransung 70 f.
Ausgangsgeschwindigkeit 607, 613
ausgenutzt 517, 532, 541 f.
Auslaufimpuls 317 ff., 321 f., 324
Auslösekriterien 749, 763 f.
ausparkend 521
Ausprägung 86, 527, 533
Ausrichten 54, 73 f.
– und Lage 114
Ausrollen von Pkw 477
Ausrückweg 658
Aussagesicherheit 12, 17
Ausschermaß 668
Ausschervorgang 172, 180
Außentrommelprüfstand 235
Ausstattung 64, 66
Ausweichbewegung 521, 538
Ausweichen 441, 454
Ausweichweg 442
Auswertung 55, 61, 537
Azimutwinkel 60
AZT 971

B

Bahnkurve 114
Bahnradius 114
Ballastierung 490
Bandbreite 317
barrier equivalent velocity 348
BASt 971
Begriffe der Unfallrekonstruktion 941
Beladung 250, 537
Belastungsgrenze 560, 567
Beleuchtungsstärke 810, 880, 888 ff.
Beleuchtungsverhältnisse 77
Beleuchtungszustand 779, 783 ff.
Bemerkbarkeit 871 ff.
Bemerkbarkeitsschwelle 875 f.
Beobachtungsfehler 156 f.
Berührbeginn 394, 415
Berührpunktsgeschwindigkeit 342
Berührtangente 329, 334
Beschädigung 28, 56 f., 62, 65, 67, 69, 72, 86, 517 ff., 521, 523, 527 ff., 535, 542
Beschädigungsbereich 54, 64, 68 f., 72, 78
Beschädigungsbild 525
Beschädigungsmerkmal 871 f., 874
Beschädigungsumfang 187 f., 190, 205, 527, 528, 532 f.
Beschädigungszone 58, 871
Beschleunigen 464
Beschleunigung-/Verzögerungsmessung 97
Beschleunigungskraft 218
Beschleunigungsverletzung 555
Besetzung 537
Besichtigung 62, 69, 79, 528, 532, 537, 542
Besichtigungsort 73
Beteiligte 79, 80, 199, 517 f., 520, 527, 537 f., 541 f.
Betrachtung 52, 55, 72, 79, 194, 199, 535, 537, 540
Betrugsverdacht 581
Betrugsversuch 529
Beulenversatz 395
BEV 348
Bewegungsablauf 519 f., 532
Bewegungsart 391
Bewegungsgleichung 220 ff., 225, 230, 257, 548
Bewegungsrichtung 391, 409
Bewegungsvorgang 941
Bewegungszustand 209, 227, 229, 231
Bezugspunkt 633
Bildausnutzung 75 f.
Bildbearbeitungsprogramm 53, 74
Bilddatei 62
Bildentzerrung 33
Bildfehler 62
Bildfertigung 62, 72, 76 f.
Bildmanipulation 61
Bildmaterial 52, 55, 57 ff., 62, 64, 72 f., 76, 79 f., 523, 529, 532 f., 536 f.
Bildmitte 72 f.
Bildoptimierung 62
Bildüberlagerung 52 ff., 60, 75 f., 79, 198, 200
billig 530
Billigreparatur 530
Biomechanik 555
biomechanische Daten 853

Blendung 884, 886 ff., 892
Blickverhalten 277
Blickwinkel 67
Blickzuwendung 290 f.
Blickzuwendungszeit 291
Blitzlicht 69 f.
Blockierspur 609
Bodenunebenheit 73, 205
Bohrmuldenschlüssel 788 f.
Bordstein-Test 503
Bremskraft 218 ff., 241 ff., 246, 250 ff., 254 f.
Bremskraft-Steuereinrichtung 250
Bremskraftverteilung 241, 243 ff.
Bremskraftverteilungsdiagramm 245, 247 ff.
Bremsmanöver 518
Bremspedalkraft 249
Bremsschlupf 234
Bremsschwellphase 153 f.
Bremssicherheit 246
Bremsspuren 133, 135, 599 ff., 606
Bremstrommel 658 f.
Bremsverzögerung 134, 140, 154 ff., 182, 471
Bremsvorgang 133
Brennweite 59, 73 ff., 78
Brennweiten 72 ff.
Brennweitenbereich 73, 75
Bruch 28
Bruchfläche 780
Bruchlinie 536
Brückenzug 108
Busanhänger 108

C

Calspan Institute 297
Campbell 347, 354
CARAT 210 f., 257 f.
Caravan 108
CCIS 971
CDC 971
CFR 971
Computersimulation 463
Computertomographie (CT) 862
Corkscrew 502
Corrsys/Datron 99
Coulomb'sche Reibung 334
Coupé 107
Crash Puls 550
Crash3 314
Crashtest 297, 347, 371 f., 385, 492
Crashversuch 443 ff.
Cross 111
Cruiser 111
Curb trip test 503
Custom 111

D

Dacheindrückung 500
Dachfalltest, inverser 501
Dämpfungscharakteristik 209
Dateigröße 62, 64, 77
Datenaufzeichnungsgeräten 785
Datenerhebung 29
Datenreduktion 850
Datenträger 62
Deformation 28, 317, 355, 357, 359 ff., 371, 374, 376 f., 379 ff., 383, 387
– bleibende 376, 383 f.
Deformationsarbeit 308 f., 376
Deformationsbereich 350, 353
Deformationsbreite 347 f., 350
Deformationsenergie 309, 317, 327, 344, 347 ff., 351, 353, 371, 378, 381, 383 ff.
Deformationsprofil 350
Deformationstiefe 347 f., 350 f.
Deformationszone 347, 349
Deichsel 228 ff., 233
Dellenversatz 395
Detailaufnahmen 34, 64, 69
Details 62, 64, 66, 73
Detektion 879
DGPS 102
Diagrammscheibe 483 ff., 652, 662, 664
Diebstahlsicherheit 790
Diebstahlsicherung 787, 789
Differentialgleichung 222
Differenz
– der Berührpunktsgeschwindigkeiten 343
– der Giergeschwindigkeiten 344
Differenzgeschwindigkeit 172, 175 f., 178
Digitalbild 61
Digitalfotografie 62
Digitalkamera 59, 72
Digitalkameratechnik 69
DIN 75204 941
Diskrimination 879
Distanz-Schranke 416
Dokumentation 35, 59, 62, 64 ff., 69, 79 f., 537, 542
– fotografische 30
– von Unfalldaten 29
Doppelabrechnung 525
Doppelgrünsperre 185

Drallerhaltung 303, 330, 332
Drallerhaltungssatz 303
Drallsatz 221, 242, 297, 317, 321, 323
Drallspiegelverfahren 644
Draufsicht 60, 70
Drehbewegung 70
Drehgelenk 228, 230
Drehgeschwindigkeit 147 f., 150, 152
Drehimpulssatz 330
Drehimpuls-Spiegel-Verfahren 321, 323, 325, 327 f.
3D-Fotogrammetrie 841 ff., 849
3D-LASER-Scanner 843, 845 f.
3D-Modell 846, 849 f.
3D-Punktewolke 847, 850
3D-Rekonstruktionen 842
3D-Scanner 841, 843
3D-Triangulation 850
3D-Verfahren 59
dreidimensionaler exzentrischer Stoß 330
Dreieck-Messverfahren 37
3 ms-Wert 559
Druckfeder 661
Druckverlust 775, 777
– schleichender 774
Dummy 394, 402 ff., 410, 418, 853 f.
Dunkelheitsunfall 879, 887
Duplizierspur 791, 794
Dynamik 209, 240, 259
dynamische Deformation 377
dynamische Fahrsicherheit (Dynamic Safety) 234
dynamischer Einfluss 209
dynamischer Rollradius 116
dynamische Überschlagsbedingung 495
dynamische Verformung 378

E

EBS 347 ff., 353
ECE 971
– Regelung Nr. 13 109, 139
– Typenprüfung von Helmen 767
EDCrash 314
ED-SMAC 210
EEBS 348
EES 297, 299, 304, 306, 339 f., 345 f., 349, 353 f., 371, 383, 387
– Einstufung 309
EEVC 971
Effektivwert 94
EG-Betriebserlaubnis 491
EGNOS 103
Eichung 92
Eigengeschwindigkeit 538
Eigenlenkgradient 116
Eindringtiefenverhältnis 345
Eindringung 302
Einlaufphase 432, 443
Einmaligkeitscharakter 527
Einmündungsbereich 531
Einriss 28
Einscheren 171 ff., 176, 178 f., 182 f., 521
Einschervorgang 179 f.
Einschlagzeit 180
Einstellschraube 659
Einwegkupplung 661
Einzelspur 70
Einzelspurzeichnung 534
Ejection 495
Ellipsoid 355 ff.
– Modell 355
– -Ebenen-Kontakt 357
– -Ellipsoid-Kontakt 356
E-Mail 62
Endlage 519, 531 f., 538 f.
Endlage 537 f.
Endstellung 317
Enduro 111
Energieerhaltungssatz 304, 371
Energie-Ring-Verfahren 318, 324, 326
Energiesatz 308, 317, 324 f., 344
energy equivalent barrier speed 348
Energy Equivalent Speed 297, 304
Entscheidungsdauer 289 f.
equivalent barrier speed 348
Ergänzungshypothese 305
Erhaltungssatz 303, 332
Erkenntnistheorie 427
Erkennungsdauer 289 f.
Erlebtes 539
Ermittlungsansatz 531
Erneuerung 80, 521, 530, 536
Ersatzteilbeschaffung 528
Erstberührung 320
ESC 971
ESP 519
ETSC 971
Euro NCAP 971
EuroSID 854
EXIF-Daten 59
experimentell 81, 207, 540
exzentrischer Stoß 310

F

fachgerecht 527 f., 530
Fachwerkstatt 521
Fahrbahnbeschaffenheit 234
Fahrbahnverhältnisse 537
Fahrbewegung 70
Fahrdynamik 258
– nach DIN 70 000 113
Fahrdynamiksimulation 211
Fahrer? 546
Fahrereinfluss 134 f.
fahrfähig 69, 77
Fahrfehler 521, 704
Fahrmodell 209 ff.
Fahrphase 495 f.
Fahrrad 529
– mit Hilfsmotor 107
Fahrspurwechsel 530
Fahrtrichtung 60 f., 519
Fahrtrichtung 537
Fahrvorgang 153, 171
Fahrzeugbatterie 71
Fahrzeugbeschleunigung 113
Fahrzeugbrief 65
Fahrzeugeinfluss 135
Fahrzeugfront 53 ff., 70, 73 f., 76 ff., 521, 523, 526 ff., 531 f., 535 f.
Fahrzeugführer 59 f., 69, 84, 86, 518, 520, 526, 531, 538, 542
Fahrzeugführerin 196, 199, 531, 538 f.
Fahrzeuggeschwindigkeit 113, 115
Fahrzeugheck 53, 55, 73 ff., 79, 521, 523 ff., 527
Fahrzeug-Ident-Nummer 65 f.
Fahrzeuginsassen 853 ff., 861
Fahrzeugkabinenverformung 909
Fahrzeugkombination 108
Fahrzeuglängsachse 76, 518 f.
Fahrzeugposition 73
Fahrzeugschein 65
Fahrzeugschlüssel 787
Fahrzeugseite 53 f., 68 f., 76 ff., 187, 190, 196 f., 199 f., 202 f., 518 f., 521, 529 ff., 533 f., 536, 538 f.
Fahrzeugstruktur 348, 372
Fahrzeugtechnik 107
Fahrzeugteile 71, 194, 518
Fahrzeugüberschlag 495 f.
Fahrzeuguntersuchung 62
Fahrzeugverzögerung 135
Fahrzeugzusammenstellung 79 f.
Fallgestaltung 537
Faltbeule 523
Farbe 62 ff.
FARS 971
FAT 971
Feder- und Dämpferkraft 215
Federachse 213, 215 f.
Federanschlag 216
Federkonstante 371
Federsteifigkeit 215 f., 374 f., 377 f.
Federungscharakteristik 209
Federweg 213, 215
Fehlreaktion 704
Felge 774 f.
Felgenhorn 774
Fernbedienung 787, 790, 793, 796
Festbrennweite 73, 75
Feststellbremsanlage 657 f.
Feststellbremse 657 ff.
Fiktion 14, 17
fiktive 517, 528
fingierte 517, 525
Firmenfahrzeug 520
First phase of roll 495
Flugphase 394, 396, 400 f.
Flugweite 400
FMVSS 971
– 201 Occupant protection in interior impact 501
– 208 500, 501, 503
– 216 Roofcrush 500
Form 64, 86, 200, 518, 527, 533 f.
Formspuren 848, 852
Foto 69, 537
Fotografieren 77
Fotogrammetrie 841
fotogrammetrische Methode 841
Fragebogen 537
Freiheitsgrad 209, 548
Fremdkörper 775, 777
Fremdmaterialantragung 70, 189 f., 196, 202
Frontalkollision 518
Frontkraftheber 490
Full scale tests 502
Fußgänger 391 ff., 395 ff., 403, 405 ff., 413 f., 417 ff., 599, 604
Fußgänger-Kollision 391
Fußgängerunfall 391, 416, 418
Fußgängerverletzung 392

G

Galileo 103
GDV 971 f.
GEBOD 861 f., 869
Gebrauchsspuren 769, 791, 794 f.
Gebrauchtteil 518, 525
gebremster Vollstoß 392
gebremstes Rad 219
Gefährdung 171
Gefahrenabwehr 287
Gefahrensignal 604
Gegenverkehr 518
Gegenverkehrskollision 316, 320 f., 325 f.
Gehen 419
– schnelles 420
Gehörsinn 872
Gelenkbus 108
Gelenk-Deichselanhänger 108
Gelenke 546, 548
Gelenkgleichungen 548 f.
Genauigkeit/Fehler 93
Geo-Koordinate 59
Geräuschdämmung 876
Gesamtdeformationstiefe 445
Gesamtreaktionsdauer 289
Geschehensablauf 187, 537, 542
Geschwindigkeit 202, 537
Geschwindigkeitsänderung 337, 341, 345
Geschwindigkeitsaufschrieb 484 f.
Geschwindigkeitsdifferenz 376, 379, 381
Geschwindigkeits-Differenz-Faktor 338, 346
Geschwindigkeitsmessung 96
Geschwindigkeitsschranke 417
Geschwindigkeitsverlust 413
Gesichtssinn 872
gespachtelt 525
Gestängesteller 660 f.
gestohlen 529
GEV 345
Gewinnmaximierung 523
Giergeschwindigkeit 113
– induzierte 344
Gierwinkel 113 f., 341
Glassplitter 536
gleichförmige Bewegung 117
gleichmäßig beschleunigte Bewegung 118
gleichmäßige Änderung der Beschleunigung 118
Gleitbeiwert in Querrichtung 116
Gleiten 328, 334
Gleithypothese von Kudlich 306
Glühlampen 779 f., 782, 783 f., 786
Glühlampenuntersuchung 780
Glühwendeln 779, 782 f., 786
GMT 59, 60
Google Earth 52
GPS 96, 101 ff.
grafische Verfahren 316
Grenzgeschwindigkeit 661
Größe der linearen Bewegung 113
Großtraktor 488, 491
GRSP 971
Grundgesetz der Dynamik 300
Grundstrecke 174
Gurtanlege-Quote 747
Gurtband 747 ff.
Gurtbenutzung 546
Gurtdehnung 747
Gurtspule 747, 749
Gurtstraffer 747 f.
Gutachten 5 ff., 9, 11 ff., 18, 89, 530, 535, 541 f., 543
– mündliches 8
– schriftliches 8
– verkehrspsychologisches 702
Gutachtenerstellung 11, 541

H

Haften 328, 334
Haftpflichtschaden 518
Halswirbelsäulen-(HWS-)Verletzung 562
Hebebühne 67
Heckkraftheber 490
Helm 767 ff.
Helmschale 767 ff.
Helmschloss 768f.
Helmverlust 767
Herbeiführung 517
HIC (Head Injury Criterion) 559, 971

Hilfsmittel 72
Hinterachse 73
Hinterrad 86, 198, 523
HLDI 971
Höhenlage 56, 73, 77, 198
Horizontalmaßstab 72 ff., 76
HPC 971
HWS-Beschwerde 567
HWS-Distorsion 532
HWS-Verletzung 567

Hyperellipsoide 547
Hypothese 12 ff.
– nach Slibar 306
Hysteresekomponente 234

I

IARV 971
ICPL 971
Identifizierung 64 f.
IHRA 971
IIHS 971
Impulserhaltung 303, 332
Impulserhaltungssatz 303
Impulsmethode 298
Impulsrechnung 330, 334
Impulssatz 221, 317, 321, 330
Impuls-Spiegel-Verfahren 321, 324
in dubio pro reo 7
Individualisierung 64 f.
Induktionsschluss 17
Information 61 f., 69, 199, 525, 537, 542
Informationsaufnahme 269
Informationsdichte 73
Informationsgehalt 70
Informationsgewinn 67, 69
Injury Severity Scale (ISS) 1015
Innenbahnenschlüssel 788
Innenraum 66
Innenraummodellierung 552 f.
Innenseele 776
INRETS 971
Insassenbelastung 545 f., 550 f.
Insassenbewegung 545 f., 551
Insassenschutz 501
Insassensimulation 545 f., 550, 552 ff.
Insassenverletzung 749
instandgesetzt 518, 523
Integralhelm 767
Integration 210 f., 222 f., 227, 230
Integrationsschritt 361
Integrationszeitschritt 223
Inverted Drop Test 501
IPG-Tyre 238
IRCOBI 971
ISO 133
– 13232 431
– Wert 66
ISS (Injury Severity Score) 557, 971

J

JAMA 971
JARI 971

K

Kabrio 107
Kabriolett 107
Kalibrierung 92
Kalkulation 518
Kamera 59, 62, 66 f., 72 ff.
Karosserie 189, 194, 205, 521, 523
Karosseriestruktur 521, 525
Karosserieteil 518
Karosseriezonen 521
Kaufrechnung 529
Keyless Go Karte 787, 789
k-Faktor 343
Kinästhetik 872
Kinematik 117, 209, 225, 227, 233
kinematische Simulation 574
kinematische Wanksteifigkeit 115
Kinetik 209
kinetische Energie 303 f.
kinetische Simulation 575
Kinnbügel 771
Kinnriemen 767 ff.
Kinnschutz 768, 771
Kippen 440, 453
Klasse L 109
Klasse M 109
Klasse N 109
Klasse O 109
Klasseneinteilung nach Vorschriften 109
Klebeband 72 f.
Kleinbus 107
Kleinkollision 871 f., 874 ff.
Kleinkraftrad 428
Kleinstanstoß 536
Knebelschlüssel 787
Knickwinkel 671
Knochenbruch 532
Knoteneigenschaft 360
Knotensteifigkeit 360
Knotenverschiebung 360
Kognition 271
Kohäsionskomponente 234
kollineare Abbildung 43
Kollision 307 f., 311
– mit Abgleiten 299
– mit Verhakung 299
– ohne Abgleiten 299, 333, 334

Kollisionsanalyse 117, 145, 152, 297 f., 634
Kollisionsanordnung 80, 518, 521, 532, 538
Kollisionsbereich 537
Kollisionsdauer 371, 374 ff., 389
Kollisionsgeräusch 876
Kollisionsgeschwindigkeit 392, 394, 398, 402, 404, 407, 415 f., 417
Kollisionsmechanik 297
Kollisionsort 71
Kollisionspartner 207, 528
Kollisionsphase 301, 443
Kollisionsrechnung 297
Kollisionssituation 517
Kollisionsstelle 599, 605 f.
Kollisionsversuch 875
Kollisionsvorgang 941, 959
Kollisionswinkel 325
Kombi 107
Komfortpolsterung 767, 771
kompatibel 528
Kompatibilität 197, 200, 540 f.
Kompensationsstellung 318, 320, 335
Kompression 62, 72 f., 301 f., 355
Kompressionsfaktor 62, 64
Kompressionsphase 320, 331 ff., 335, 374 ff., 380 f.
Kontakt 545, 549, 552
Kontaktart 391
Kontaktellipsoide 355, 358
Kontaktkraft 347, 355, 359 ff., 546, 549
Kontaktmodell 546
Kontaktnetz 359
Kontaktphase 394, 396, 397, 399
Kontaktpunkt 328 f.
Kontaktpunktgeschwindigkeit 332
Kontaktreibung 550, 552
Kontaktspur 202, 207, 521
Kontaktverletzung 555
kontraproduktiv 68, 72, 518
Kontrollgröße 341
Konusverzahnung 660 f.
Koordinatensystem 211 f.
– fahrzeugfestes 113
– horizontiertes 113
– ortsfestes 113
– radfestes 113
Kopfaufprall 599
Kopfaufschlag 406
Kopfaufschlagstelle 395, 398
Körper, starrer 209, 211
Körperschaden 532
Kosten 62, 523
Kostenfaktor 69
Kraft 114
Kraftfahrzeug 107
Kraftomnibus 107
Kraftrad 107, 428, 436 ff., 443 f., 448 f.
Kraftrechnung 298, 334, 355
Kraftroller 428
Kraftschluss 316
Kraftschlussbeiwert 234
Kraftwagen 107
Kraft-Weg-Zusammenhang 355, 372, 376
Kreide 72
Kreisverkehr 666
Kreuzhebelschaltung 489
Kreuzprofilschlüssel 788 f.
Kreuzungskollision 316, 318
Kriminaltechnik 842 f.
kritischer Punkt 495
kritische Situation 287
Krümmungsradius 164 f., 167
Kudlich-Slibar 339, 341
Kupplungskraft 225 ff.
Kupplungspunkt 211, 225 ff.
Kurswinkel 114
Kurvenfahrt 160, 167, 432 f., 436
Kurvengrenzgeschwindigkeit 701, 705 f., 715
Kurvenradius 38, 162, 164, 167, 169 f., 180 f.

L

Lackabklebekante 67
Lackdickenmessung 104
lackiert 525
Lageveränderung 320
Lamellen 775
land- oder forstwirtschaftliches (lof-) Fahrzeug 487 f., 490
Landschaft 69
Längsachse 58, 72 f.
Längsgeschwindigkeit 113
Längskraft 114
Längsrutschweite 394, 403, 407 f.
Längswurfweite 394, 402 ff.
Lasertechnik 841
Lastanhänger 108
Lastkraftwagen 108, 112
Lastkraftwagenzug 108
Laufen 420
Laufleistung 66, 528
LED-Lampensystem 785
Leichtkraftrad 110, 428
Leistungsgewicht 490 f.

Leitplanke 202 f., 518 ff., 534, 538 f., 905
– Entfernung von der Autobahn 921
– für Fußgänger und Radfahrer 922
– für Motorradfahrer 922
– numerisches Modell einer 927
– Tragfähigkeitskriterien 911
– Wirkungsbereich 912
Leitplankenkontakt 534
Lenkachse 114
Lenkbewegung 70, 518
Lenkeinschlag 162, 167
Lenkrad 526
Lenkradwinkel 115
Lenkrollhalbmesser 115
Lenk- und Ruhezeiten 483, 486
Lenkung 115
Lenkungsgeometrie 210
Leuchtdichte 880, 883, 889 f., 892
Lex Prima 300
Lex Seconda 300
Lex Tertia 301
Lichtbogen 784 f.
Lichtstärke 810, 880
Lichtstrom 880 f., 891
lichttechnische Größe 879
Lichtverhältnisse 72
Lichtzeichenanlage 184
Limousine 107
Linearität 93
Linienbus 107
lof-Fahrzeug 487 f., 490
Losfahren - Umsetzen - Abbremsen 158
Lösungsfeld 324, 328
Low-g sled 503
Luftbild 51, 601
Luftbildphotogrammetrie 41
Luftdruck 490, 492
Luftwiderstand 214, 221, 252
Luftwiderstandsbeiwert 240

M

Mackay 348
MADYMO 855 f., 862, 870
Magic Formula 238
Magnet 72
Magnetpfeile 72
Magnetresonanztomographie (MRT) 862
MAIS 971
Manipulation 529, 532
Manipulationsspur 71
manipuliert 515, 523
markant 527
Marquardt & McHenry 149 f.
Massenmittelpunkt 222, 225, 230 ff., 857 f., 861 f., 867 f.
Maßstab 52, 57, 64, 72 f., 77, 204
Master Fahrzeug 361
Masterschlüssel 796
Materialfehler 773, 777
Maximum 68, 518
Maximum AIS (MAIS) 557
MDB 971
Mean Fully Developed Deceleration (MFDD) 139
medizinisch 526
medizinische Fachausdrücke 975
Megapixel 62
Mehrbildfotogrammetrie 842 f.
Mehrfach-Scan 843, 845 f.
Mehrkörpermodell 546
Mehrkörpersimulationsmodul 545
Merkmal 536
Mesh Modell 359
Mesokosmos 427 f., 454
Messbereich 93, 99 ff., 104
Messgerät 91
Messtechnik 91, 94
Messtischverfahren 39
Messung
– direkte 91
– indirekte 91
Messwertkorrektur 92
Methode 529
MHH 971
Miet-Pkw 71, 526 f.
Miet-Transporters 78
Mietwagen 527
Minderbremsleistung 658
Mindestanforderung an Bremsanlagen 133
Mindestprofiltiefe 776
Mindestverzögerung 602
Minimum 62, 518
Missbrauchstest 503
Miss-use-test 503
Mitleidenschaft 521
Modell 14 f.
Modellbildung 236
Modifiziertes Lineares Modell 153
Mofa 107, 428 f.
Moment 114
Moped 107
Motometer 100, 104 f.
Motorbremswirkung 251

motorische Phase 289
Motorrad 107, 427, 430 ff., 453 f.
Motorraum 66
Motorroller 107
MSC.ADAMS 861
Multibody 298
Muskelaktivierung 289

N

Nachbesichtigung 76, 521, 525, 529
Nachlaufwinkel 115
Nachvollziehbarkeit 12, 577
Nackenschutz 768
Nahbereichs-Photogrammetrie 41
Näherungsformel 141 f., 145 f., 150
Naked 110
NASS 971
NASVA 971
Naturgesetz 14 f.
naturwissenschaftliche Grundlage 13
Navigationssystem 59
NCAP 971
NCSA 972
Negativfilm 73
Netzoberfläche 360
neutrales Fahrverhalten 116
Neuzulassung 456
Newton 307
Newton-Euler-Gleichung 329
Newton'sches Axiom 300
NHTSA 351, 353 f., 972
NIC (Neck Injury Criterion) 560, 972
Nickgeschwindigkeit 114
Nickwinkel 113
Nivellierstab 72
Nkw 107 f.
NPRM 972
Nutzfahrzeug 483
Nutzfahrzeugunfall 483
Nutzkraftwagen 107

O

OBD 103
Oberleitungsbus 108
Objektiv 72 ff.
ODB 972
Offsetfehler 94
Omnibuss 112
Omnibuszug 108
ÖNorm 5050 965
OoP 972
Optimierungspotential 62
Orientierung
– äußere 42
– innere 42
Original 64
Originalbildmaterial 537
Orthofoto 51
Örtlichkeit 517, 526
Ortsbesichtigung 635

Ortstermin 79 f.
OSRP 971 f.
Oxidationsspur 782

P

Panoramabild 32 f.
Paradigma 14, 16
Parteigutachten 515, 541
PC-Crash 210 f., 258 f., 352 f., 355, 405 f., 419
PC-Rect 44
PDF-Datei 64
Pedaldämpfung 135
Pedalhysterese 135
Pedalkraft 135
Pedalweg 135
Peiseler-Rad 486
Personen 515, 517, 521, 538, 542
Personenkraftwagen 107
Personenkraftwagenzug 108
Personenschaden 27
Phasendiagramm 185
Phasenplan 186
Phasenschaltung 185
Phasenschiebeverfahren 48
Phasenvergleichs-Verfahren 843
Photogrammetrie 40
PICDaq 98
PICDaq-GPS 98
Pkw 111
Plasma-Entladung 784
plausibel 518
Plausibilität 540
PocketDAQ 98, 460 f.
Point of no return 495
Poisson 307
Polizei 515, 531, 542
Polizeibeamter 71, 526
Positionierung 56, 72 f.
potenzielle Energie 304

Pre-Roll-Phase 495
Prellung 532
Primärkontakt 397 f.
Prinzipielle 81, 540
Produktionsmängel 773, 777
Professionalität 526
Profilwendeschlüssel 787
Projektionszentrum 45
Provozierer 517, 541
provoziert 517, 530 f.
PTS 972
Pullman 107
Pulslaufzeit-Verfahren 843 f.

Q

Quad 111
Qualität 57, 62, 64, 75, 78, 80, 525
Qualitätssicherung 460, 463
Qualitätssteigerung 62, 463
Quantität 62, 80, 525
Querbeschleunigung, fühlbare 162
Quergeschwindigkeit 113
Querkraft 114, 115
Querrutschweite 394, 403, 407 f.
Querwurfweite 394, 403, 407 ff.

R

Racelogic 99
Rad 773 f., 777
– angetriebenes 220
Radaufhängung 210, 215 f., 259
Radaufstandsbereich 73
Radaufstandskraft 214 ff., 219
Radaufstandspunkt 114 f., 213 f.
Radhausschalen 70
Radkontaktspur 76, 81, 187 f., 190 f., 196, 198, 199 ff., 205, 207, 519 f., 523
Radkraft 214 f., 220
Radlast 116
Radlasständerung 73
Radlastveränderung 575
Radlenkwinkel 115
– Änderung infolge Elastizitäten 115
Radmittelebene 114
Radmittelpunkt 114
Radseitenkraft 215, 228
Radstand 114 f.
Radstandverkürzung 446
Radsturzwinkel 116
Radumfangskraft 218 f.
Rahmenlängsträger 523 ff.
Rahmenstruktur 523
Rampen-Rollover 497
Randbedingung 210, 217
Rasterelektronenmikroskop 781
Räumstrecke 605
Raumwinkel 880, 889
Reaktion 537
Reaktionsaufforderung 288 ff., 604
Reaktionsdauer 140, 153 ff., 160, 176, 179, 181, 183, 287 ff.
Reaktionsgeschwindigkeit 288, 290
Reaktionsprinzip 301
Reaktionsverhalten 288
Realtest 502
rechnerisches Verfahren 328
Rechnung 529
Rechtsfahrgebot 287
Rechtssicherheit 27
Rechts-vor-links-Situation 530, 531
Rechtwinkel-Koordinaten-Messverfahren 36
reduzierte Masse 310
Referenzlänge 44
Reflexion 66, 891
Regressionsgleichung 404 f.
Regulierung 515, 532
Reibung 298
– statische 334
Reibungsfaktor 334
Reibungskoeffizient 478
Reibungskraft 308, 355
Reibungskuchen 239
Reibungstheorie 334
Reibwert 340 f., 344
Reifen 73, 116, 189 f., 194, 207, 234 f., 238 f., 521, 773 ff.
Reifenaufstandsfläche 234
Reifendimension 66, 205
Reifeneigenschaft 217, 234 ff.
Reifeninnenseite 776
Reifenkennfeld 209, 218
Reifenkontaktkraft 216
Reifenlatsch 238 f.
Reifenmodell 217, 238
Reifenprofil 775
Reifenrollwiderstand 116
Reifenseitenkraft 235
Reifenspur 775
Reifentragfähigkeit 235
Reisebus 108
Reizleitung 289
Rekonstruktion 62, 187, 543, 571, 573

Relativgeschwindigkeit der Stoßpunkte 307
Rennen 421
Reparatur 62, 518, 521, 523, 525, 527 ff., 542
Reparaturbestätigung 530
Reparaturdurchführung 62, 67, 80, 524 f., 528, 530
Reparaturkostenkalkulation 521, 527
Reparaturspur 67, 530
RESIKO 972
Restbeschädigung 530
Restitution 298, 301 f., 333, 355, 360
Restitutionskoeffizient 307 ff., 327, 329
Restitutionsphase 374 ff., 380
Retraktor 747, 750
Rettungspersonal 526
Rhomboid-Schnittverfahren 317, 321, 328, 639, 644, 646
RHS 972
Richtung 70, 192 ff., 534
Richtungshypothese nach Marquard 305
Ringprofilschlüssel 788
Ringtest 460, 462
Ringversuch 574
Risiko 743
Rissbeschädigung 776
RolleiMetric 842, 844, 846 ff.
Rollenprüfstand 245, 658 f.
Roller 110
Rolling phase 495
Rollover 495, 502 ff.
– fahrzeugdynamischer 498
– mit Zusammenstoß 497
– verhakter (Trip over) 498
Rollwiderstand 775
Rollwiderstandsbeiwert 116
Rollwinkel 495
Rollwinkelgeschwindigkeit 495
Rotation 320
rotatorische Bewegung 119
rückgeformt 525
Rückhaltesystem 550
Rückstellmoment 236, 238
Rückverformung 301 f., 374, 376, 378 f., 381 ff.
– massenproportionale 378
– nicht massenproportionale 378
Rückwärtsrechnung 298 f., 607
Rutschphase 392, 394, 396, 400 f.
Rutschverzögerung 450 ff., 454
Rutschweite 402, 418, 450, 452

S

Sachschaden 27
Sachverhaltsdokumentation 61
Sachverständigenwesen 3, 19
Sachverständiger 4 ff., 8, 12, 18, 86, 529 f., 532, 541
– Arten 4 f.
– bei Gericht 7
SAE 464, 481
SAE J2114 Dolly test 500
Sattelanhänger 108 f., 666, 668 f., 671
Sattelanhängers 669, 671 f.
Sattelkraftfahrzeug 108, 112, 227
Sattelzug 108
Sattelzugmaschine 108
Saugklemme 72
Schaden 77, 86, 199, 518, 525, 528 f., 533 f., 541
Schadenakte 537
Schadenanzeige 537
Schadenaufklärung 81, 89, 515, 540, 542
Schadenausweitung 532 f.
Schadenbereich 68 f., 79 f., 519
Schadenbild 59, 84 f., 200, 520 f., 523, 526 ff., 531, 536
Schadenereignis 84, 86, 515, 517 f., 523, 525, 528 f., 533, 537, 541 f.
Schadenersatz 517
Schadenfall 53, 58 ff., 78, 80, 202, 515, 521 ff., 525 ff., 535 f.
Schadengutachten 58, 62, 69, 79, 521, 523, 525, 527, 530, 532 f., 535 f.
Schadenhäufung 530
Schadenhergang 84, 520, 537, 539
Schadenlinie 335 f.
Schadenort 71, 79 f., 84, 517, 537, 539
Schadenörtlichkeit 60, 79, 86, 515, 518 f., 537, 539, 542
Schadentiefe 848
Schadenumfang 58, 87 f., 524, 528, 532 f.
Schadenverursachung 523
Schadenzeitpunkt 59 f., 86
Schattenschlag 69
Scheinwerfer 535 f.
Schichtdickemessung 67
Schichtdicke 67, 80, 525
Schild 771
Schlämmkreide 529
Schleierleuchtdichte 886 f., 889, 892
Schleudervorgang 141, 149
Schlupf 217, 234 f., 238
Schlüsselreide 790, 796

Schlüsselteil, elektronischer 790
Schlüsseluntersuchung 787, 791, 793, 796
Schmelzspur 70 f.
Schnittfelder 322
Schräglaufwinkel 116, 217, 219 f., 234 f., 238
Schrankenverfahren 415 ff.
Schreibstifte 483 f.
Schulteraufschlag 406
Schürfspur Helm 621
Schutzhelm 767 f., 771
Schutzhelmtyp 771
Schutzpolsterung 767 ff.
Schwelldauer 289
Schwerlasttransporter 666
Schwimmwinkel 113 f., 143 f., 146, 151, 163
Schwingungsbelastung 489
Scooter 110
Sehen, peripheres 276
Sehfeldumfang, nutzbarer 278
Sehnen-Höhen-Messverfahren 37
Sehnenmodell 150
Sehschärfe
– dynamische 275
– statische 274
Seiten-Airbag 761, 763
Seitenkraft 116, 214 f., 217 ff., 235 f., 238 f.
Seitenkraftbeiwert 116
– maximaler 116
Seitenreibwert 160, 162, 167
Seitensteifigkeit 116
Seitenteil 68, 79, 534
Sensomotorik 270
Sensorik 274
Serienkollision 371
Sicherheit 743 ff.
– aktive 743 f.
– passive 743 f.
Sicherheitsbatterieklemme 71
Sicherheitsgurt 747, 797
Sicherungssystem, elektronisches 787
Sicherheitsvorschrift 492
Sichtbarkeit 879, 880, 884, 888, 891, 893
Sichtbarkeitsuntersuchung 883, 888
Sichtbegrenzungslinie 131 f.
Sichtbehinderung 872
Sichtgrenze 131
Sichthindernis 604
Sichtlinie 604, 631, 636
Sicken 58
Signalsteuerung
– verkehrsabhängige 184
– zeitplanabhängige 184
Signalzeitenplan 184
Simulation 463 f., 481, 545 ff., 571 ff.
Simulationsberechnung 633
Simulationsmodell 545 f., 572 ff.
Simulationsprogramm 463 f., 543, 573 f., 577
Sinuslinie 165 ff., 180 f.
Sitzposition der Insassen 749
Slave Fahrzeug 361
Slibar 306, 317 f., 321, 328
sliding case 328
SLR-Kamera 62, 72 f.
SMAC 209, 298
Software 64, 543
Sommerzeit 60
Sonne 59 ff., 69
Sonnenlicht 69
Sonnenschein 69
Sonnenstand 59 f.
Sonnenstandberechnung 60
Spachtelmaterial 67, 525
Spaltmaß 58
Speichern 62, 64
Speichertiefe 94
Spekulation 14, 16
Spezialanhänger 108
Spezialbus 108
Spezielle 84, 540
Spezial-Lkw 108
Spiegelung 72
Splitter 71
Sport 110
Sporttourer 111
Spreizung 114
Spurast 643
Spurbreite 114
Spuren 55, 187, 527
Spurenbilder 715
Spurendetail 69
Spurenlage 70, 77 f., 87 f., 197, 199, 201 ff., 533 f.
Spurensicherung 841
– kriminalistische 36
Spurenunregelmäßigkeit 415
Spurlänge 607
Spurverfolgung 141, 150
Spurwechsel 163, 166
Spurwechselvorgang 163 f., 180
Spurzeichnungen 56 f., 59, 69, 86, 519, 528, 531
SRS 972
Staatsanwaltschaft, Aufgabe der 20
Standardausrüstung 35

Starr-Deichselanhänger 108
Starrkörper 209, 211
statischer Gesamtvorspurwinkel 115
statische Überschlagsbedingung 495
Steifigkeit 347, 351, 353, 550, 552
Steifigkeitsfunktion 355
Steifigkeitsparameter 348 f.
Steifigkeitsunterschied 534
Stereofotogrammetrie 841
Stereomikroskop 781
Stereophotogrametrie 40, 861
sticking case 328
Stillstandsposition 636
Stoß
– gerader zentraler 307
– zweidimensionaler 310
– zweidimensionaler exzentrischer 328
Stoßangriffspunkt 318 f., 336
Stoßantrieb 307 ff., 318, 320 ff., 327 f., 330 f., 343
Stoßantriebs-Reduktions-Faktor (SRF) 338
Stoßantriebsvektor 318
Stoßdauer 328, 334 f., 375
Stoßfängerverkleidung 530
Stoßhypothese 298, 329, 331 ff.
Stoßimpulsfeld 322, 324, 328
Stoßkraft 330, 336
Stoßkrafthebelarm 323 f., 326
Stoßmodell 297
– steifigkeitsbasiertes 355
Stoßpunktslösegeschwindigkeit 353
Stoßrechnung 330 ff., 341
Stoßtheorie 305
– klassische 305
Stoßzahl 307
Stoßzahlhypothese
– nach Newton 305
– nach Poisson 305
Stoßziffer 333 f.
Strafprozess 7 f.
Straße, gekrümmte 166
Straßenverkehr in Deutschland 455, 457
Streifen, seitliches 393
streifend 58, 518 f., 536, 538
Streifenlichttopometrie 47, 843 f.
Streifenprojektionsverfahren 47
Streifkollision 57, 59, 76, 191, 197, 199 f., 518, 520 f., 523, 534, 538 f.
Streifschaden 62, 518, 529, 533
Streifstoß 391 f.
Stronge 308, 315
Strukturformel 376
Struktursteifigkeit 54, 329, 371 f., 375, 378 ff., 382 f., 386, 389, 525
Strukturversagen 333, 339 f.
stumpfe Gewalt 555
Sturwinkeländerung infolge Elastizitäten 115
Sturzwinkel 115
Supersport 110
Systematik der Kraftfahrzeuge 107
Szene 80, 517, 526

T

Tachograph 483 f., 486
Tachometer 66
Tachoscheibenauswertung 486
Tageslicht 69
Tageszeitung 530
Technik, Stand der 67, 543
Techniker 205, 537
Teilbremsfaktor 146 f., 151 ff.
Teleskopnivellierstab 72
Terminvereinbarung 528
Terzspektrum 873
Test- und Evaluierungsmethode, experimentelle 500
theoretisch 86, 540
Theorie 6, 14 ff., 18
Tiefenabstand 180, 182
Tier 521, 538
Tierdummy 597
Tierhalter 581
TM-Easy 239
Toleranz 316, 318 f., 321
Totalstation (Tachymeter) 39
Tourer 111
Trageeinrichtung 771
Trägheitsmoment 217
Trägheitsprinzip 300
Trägheitsradius 310
Trägheitstensor 222
Traktionsverbesserung 492
Traktor 108, 488 f., 491
Traktorenkonzept 488
Traktorentechnologie 488
Transformation eines Bildpunktes 46
Transformationsparameter 44
Transformationsvorschrift 224
translatorische Bewegung 118
Transponder 790 ff., 794, 796
Transpondermanipulation 796
Transporter 112
Transportphase 394, 396

Transportstrecke 395 f., 399
Tread Wear Indicator 776
Tretlager 608, 610, 612
Trial 111
TRL 972
Tuning 431, 435
Typprüfung 772

U

Überblick 537
Überfahren 391, 393, 410
Überhitzungserscheinung 660
Überholbeginn 117, 173, 175 ff.
Überholer 171 ff., 178 f., 181 f.
Überholstrecke 174 ff.
Überholvorgang 163, 168, 171 ff., 180 ff.
überlagernd 534
Überlandlinienbus 107
Überrollen 391, 393, 410, 412
Überschlag 495 ff., 501 f., 504
– Arten 497
– nach vorne 499
Überschlagsbedingung 495
Überschlagsbeginn 495
Überschlagskriterien 495 f.
Überschlagsphase 495 f.
Überschlagssimulation 358
Übersichtsaufnahme 32, 64 f., 67, 69 f., 525
Übersteuern 116
UDS-Auswertung 486
Umfangskraft 116, 214 f., 217, 235 ff., 241
Umfangsschlupf 116, 217
Umfeld 541 f.
Umfeldgeräusch 873
Umlaufdauer 185
Umsetzdauer 289
unaufmerksam 520
unbeabsichtigt 523
Unfall
– mit Kleintransportern 639
– mit motorisierten Zweirädern 615
– mit Tieren 581
– mit Zweirädern 427
Unfallaufnahme 27, 35, 526, 652, 657
Unfalldaten 28
Unfalldatenspeicher (UDS) 99
Unfallgutachten
– Erwartungen an ein 23
– in der Strafuntersuchung 23
Unfallprovokation 530
Unfallrekonstruktion 297, 299, 633
Unfallstatistik 455
Unfallstelle 79, 531, 542
Unfallstellenvermessung 30, 841
Unfallumstände 941, 962
Unfallursache 458, 652, 656, 665
unfallursächlich 517
Unfallvermeidung 287, 292
Unfallversuch 316
Unfallverursacher 871, 877
ungebremst 55, 526
Unterboden 67
Unterlagen 61 f., 537, 542
Untersteuern 116
Untersuchung 64, 74, 80 f., 84, 89, 205, 539 f.
Unterzieheffekt 397 f.
USCAR 971 f.

V

V(λ)-Anpassung 891 f.
Validierung 405, 463 f.
VC (Viscous Criterion) 560
VC2000/VC3000 101
Ventil 774 f.
Verdeckungsproblematik 604
Verfahrensschritte 551
Verformung, bleibende 347 ff.
Verformungsarbeit 297
Verformungslinie 318, 325
Verformungswiderstand 872, 875, 877
Verglasung 536
Verifikation 12, 16, 463, 573, 578
Verifizierung 463
Verkehrssicherheit 518
Verkehrsteilnehmer 517, 530
Verletzung 532, 853 ff., 857
– viskose 555
– Zuordnung 545
Verletzungsbeeinträchtigungsskala IIS 558
Verletzungskriterien 853
Verletzungsmechanismus 545 f.
Verletzungsschwere 1015
Verletzungsumfang 853
Vermeidbarkeit 518, 604 ff., 614, 634, 636, 652, 664
Vermeidbarkeitsbetrachtung 287
Vermeidbarkeitsgeschwindigkeit, zeitliche 606
Vermeidbarkeitsmöglichkeit 292
Vermeidbarkeitsrechnung 607, 614
Vermessung 59, 79, 89, 542
– von Unfallstellen 36

Verschweigen 532
Versicherung 529 f., 543
Versicherungsbetrug 515, 543
Versicherungsnehmer 518 f., 529, 532, 542
Versuch 81, 200, 523
Versuchsdatenbank 351, 354
Vertikalgeschwindigkeit 113
Vertikalkraft 114
Vertikalmaßstab 54, 72 ff., 76 ff.
Verursacherfahrzeug 187, 523, 528
Verursachung 518, 520 f., 531
Verzögerungsschlitten 503
Videosequenz 537
Vielzweck-Lkw 108
Vierbahnenschlüssel 788 f.
Vierradblockierspur 249
Vierradfahrzeug 111
Visier 767 f., 771
Visiertyp 771 f.
Viskosekomponente 234
Visualisierung 843
VN-Fahrzeug 518 f., 528 f., 538
Vollbremsung 287
Vollkaskoversicherung 518
Vollstoß, ungebremster 392
vorbeschädigt 527
Vorderrad 71, 86, 187, 198, 202, 205, 523
Vorderrad 70, 76
Vorfahrtsverletzung 538
Vorgehensweise 53, 56 f., 64, 515, 538, 542
Vorschaden 67, 80, 521, 525, 530, 532
Vorwärtsrechnung 298, 299, 330
VZM100 100, 104

W

Wahrnehmbarkeit 872 f., 877
Wahrnehmung 883 f., 888
Wahrnehmungsdauer 289
Wahrnehmungsmodell 883
Walkspur 775
Wankachse 115
Wankgeschwindigkeit 114
Wankwinkel 113, 115
Wankzentrum 115
Wechselwirkungsprinzip 301
Wegaufschrieb 484
Wegfahrsperre 787, 789 ff.
Wegmessung 96
Wegschranke 417
Wegstreckenaufschrieb 486
Weg-Zeit-Analyse 117
Weg-Zeit-Betrachtung 941
Weg-Zeit-Diagramm 117 f., 131, 183, 185
Weibull 291
weiterverkauft 526, 530
Wellenbildung 776
Wendeldeformation 779, 781 ff.
Werkzeug 534
Wetter 537
Widerspruch 197, 538
Wiedereinschervorgang 175
Wiederherstellung 518
Wiederverwendung des Gurtsystems nach einem Unfall 750
Wildtiere 581, 597
Windschutzscheibe 526
Winkelbeschleunigung 222 f., 225
Winkelgeschwindigkeit 113
wirtschaftliches Interesse 518, 531
Wurfweite 392, 394, 402, 404 f., 416, 444, 450, 613
Wurfweitendiagramm 394, 417

X

Xenon-Lampensystem 784
XLMeter 97

Z

Zahnstangengetriebe 661
Zapfwellenkupplung 489
Zeitraum 55, 187, 202, 525, 528
Zeitschritt 355
Zeitumstellung 59
Zentralachsanhänger 108, 112
Zentralprojektion 42
Zentrifugalkraft 160
Zentripetalkraft 160
Zerreißung von Strukturen 337
Zeuge 84, 86, 515, 537
Zivilprozess 7 f.
Zoom-Objektiv 73, 75
Zugangsvoraussetzung 5 f.
Zugmaschine 108
Zugmaschinenzug 108
Zurechnungsfähigkeit 711
Zusatzgleichung 332 f.
Zustand 54, 62, 64, 66, 521, 536
Zweiräder, Einteilung der 428
Zweiradfahrzeug 110