



Hartmann · Kahl-Scholz · Vockelmann

Fachwissen MTRA

für Ausbildung,
Studium
und Beruf

 Springer

Springer-Lehrbuch

Tina Hartmann
Martina Kahl-Scholz
Christel Vockelmann
(Hrsg.)

Fachwissen MTRA

Für Ausbildung, Studium und Beruf

Mit 328 Abbildungen und 142 Tabellen

Herausgeber

Tina Hartmann

Schule für Gesundheitsberufe, Bereich MTRA

Klinikum Dortmund gGmbH

Dortmund, Deutschland

Dr. med. Martina Kahl-Scholz

Möhnesee, Deutschland

Dr. med. Christel Vockelmann

Radiologische Klinik

Christophorus-Kliniken GmbH

Coesfeld, Deutschland

Ergänzendes Material finden Sie unter

<http://www.springermedizin.de/vzb-Hartmann>

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-662-43712-4

ISBN 978-3-662-43713-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-43713-1

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

Springer Medizin

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

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.

Produkthaftung: Für Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen kann vom Verlag keine Gewähr übernommen werden. Derartige Angaben müssen vom jeweiligen Anwender im Einzelfall anhand anderer Literaturstellen auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

Planung: Daniel Quiñones, Heidelberg

Projektmanagement: Christiane Beisel, Heidelberg

Lektorat: Dr.med. Dipl. Päd. Martina Kahl-Scholz, Möhnesee

Projektkoordination: Eva Schoeler, Heidelberg

Umschlaggestaltung: deblik Berlin

Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Medizin ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

www.springer.com

Man muß nichts im Leben fürchten, man muß nur alles verstehen.
Marie Curie (1867–1934)

Geleitwort

Der MTRA-Beruf mit seiner fast 120-jährigen Geschichte hat eine Vielzahl von Wandlungen erlebt und war immer ein Spiegelbild der medizinisch-technischen Entwicklung. Daraus resultierten veränderte Ausbildungsinhalte und notwendige Spezialisierungen. So ist es heute nicht mehr möglich, die Radiologie und Laboratoriumsmedizin in einem MTA-Beruf auszubilden.

Schülerinnen und Schülern in der MTRA-Ausbildung haben die Qual der Wahl, sich für einen der mehr als 700 Ausbildungsberufe zu entscheiden, schon hinter sich.

Dass die beruflichen Handlungsfelder in der Radiologie so umfangreich und spezialisiert sind, ist dann häufig schon eine Überraschung. Allein die Fülle von Fachbüchern, die den zukünftigen MTRA zur Verfügung stehen, ist überwältigend.

Insofern haben die Autorinnen und Autoren mit diesem Buch ein ganz neues Konzept kreiert. Sie erheben nicht den Anspruch, alle Fachgebiete vollumfänglich darzustellen, sondern einen Gesamtüberblick über das komplette Berufsfeld zu geben und verweisen zur Vertiefung auf die entsprechende Fachliteratur.

Das Buch soll die Schülerinnen und Schüler durch die gesamte Ausbildung begleiten, von der Berufsgeschichte über medizinisch-technische Fakten, der interdisziplinären Sicht aller MTRA-Fachgebiete im Sinne von „Was macht man wann?“ bis hin zu Qualitätsmanagement, Karriere und Arbeitsrecht. Anschaulich ergänzt werden die einzelnen Kapitel u. a. durch die Geschichten von Marco und Katrin.

Marco fand die erste Woche in der MTRA-Schule nicht so prickelnd, weil so viel Organisatorisches und Geschichtliches vorkam. Aber die Erfahrungsberichte einiger MTRA haben ihn beeindruckt. Ihm war vorher nicht klar, welchen wichtigen Beitrag sie für die Diagnostik und Therapie leisten, obwohl er sich schon gut informiert gefühlt hatte.

Während Marco noch am Anfang steht, hat Katrin schon einige Jahre Berufserfahrung. Sie hat bereits eine Weiterbildung zur Qualitätsmanagementbeauftragten hinter sich und soll nun für ihre Abteilung das jährliche Audit auf den Weg bringen. Der erhebliche Umfang an Konstanzprüfungen und Qualitätssicherungsmaßnahmen in allen Berufsbereichen der MTRA ist hier auf die wesentlichen Prüfungen zusammengefasst und gut nachvollziehbar.

Angehende MTRA erhalten viel medizinisch-technisches Faktenwissen während der Ausbildung. Die Kunst ist allerdings, den Zusammenhang herzustellen und den roten Faden zu behalten. Ebenfalls ist es eine Herausforderung, die Auszubildenden sprachlich mitzunehmen, nicht zu viel „Fachchinesisch“ zu sprechen – und das, ohne die notwendigen Fachbegriffe zu vernachlässigen. Dies alles miteinander zu verbinden, ist dem Herausgeberteam sehr gut gelungen.

Anke Ohmstedt

Präsidentin des DVTA e. V.

Vorwort zur 1. Auflage

Moderne Medizin ohne bildgebende Diagnostik und Therapie ist heute nicht mehr vorstellbar. Die Mehrheit der Patienten in Krankenhaus und Praxis werden mit radiologischen oder nuklearmedizinischen Methoden untersucht. Und nicht wenige Patienten werden strahlentherapeutisch, nuklearmedizinisch oder mittlerweile auch nicht selten radiologisch behandelt. Mit zunehmender Spezialisierung der Methoden erleben Sie immer neue Herausforderungen in Ihrer Fachdisziplin. Trotzdem müssen Sie als MTRA oder Radiologie-Technologe das gesamte Spektrum der bildgebenden Diagnostik und Therapie abdecken und neben der Radiologie auch die Nuklearmedizin und Strahlentherapie beherrschen. Und auch als Student in der Radiologie oder in der Facharztausbildung müssen Sie nicht nur die medizinischen Erkrankungsbilder mit ihrer Diagnostik und Therapie erlernen, sondern auch Technik und rechtliche Rahmenbedingungen beim Umgang mit ionisierenden Strahlen kennen.

Die Ausbildung zum MTRA und auch die spätere Berufspraxis sind also anspruchsvolle Bereiche, die von Ihnen technisches, diagnostisches und therapeutisches Wissen fordern. Sie arbeiten mit moderner Technik ebenso wie mit Menschen, müssen über die grundlegenden rechtlichen Aspekte informiert sein und sich mit den hygienischen Maßnahmen ebenso auskennen wie mit dem Umgang mit Notfallsituationen. Auch auf Schlagwörter wie „Qualitätsmanagement“ oder „Fachkunde“ werden Sie treffen.

Wir haben versucht, dieses breite Spektrum Ihrer Aufgabenfelder komprimiert und verständlich in einer praxisnahen Sprache zusammenzufassen. Es bietet Ihnen einen Überblick über die aktuelle Technik, Diagnostik und Therapie in Radiologie, Strahlentherapie und Nuklearmedizin. Wir haben Wert darauf gelegt, die Praktiken, denen Sie tatsächlich in Ihrem Berufsleben begegnen, vorzustellen. Auf Methoden, die im beruflichen Alltag nicht mehr relevant sind, wie z. B. Film-Folien-Systeme und deren Entwicklung, sind wir bewusst nur am Rande eingegangen.

Neben diesem technischen Teil lernen Sie Standarduntersuchungsverfahren aus allen drei Bereichen kennen. Ein kompaktes Lehrbuch kann hier nur Ergänzung zu Lehrbüchern der röntgendiagnostischen Einstelltechnik und der praktischen Ausbildung und Tätigkeit sein, denn jede Subdisziplin füllt für sich genommen schon Buch um Buch. Trotzdem haben wir uns bemüht, die derzeit gängigen Standarduntersuchungen und -therapien vorzustellen und sie Ihnen Schritt für Schritt leicht verständlich und über Praxisbeispiele anschaulich zu machen.

Einen weiteren Schwerpunkt bilden Themen, die Sie bisher nicht in Lehrbüchern für die MTRA-Ausbildung finden konnten. So erhalten Sie einen Überblick über das Berufsbild, aktuelle Bildungs- und Karrieremöglichkeiten für MTRA, über mögliche Arbeitsfelder, Qualitätsmanagement und Hygiene sowie gesetzliche Vorgaben und Grundlagen des wissenschaftlichen Arbeitens. Auch medizinisches Hintergrundwissen, das Ihnen die Arbeit als MTRA verständlicher machen und erleichtern kann, wie Pharmakologie, Anatomie und Krankheitslehre, haben wir in das Buch aufgenommen, um einen Überblick über alle relevanten Themen Ihres Berufes zu geben.

Ein ganz besonderer Dank gilt dabei unseren Autorenkolleginnen und -kollegen, ohne die dieses Buch nicht mit so viel Fachkompetenz ausgestattet wäre: Frau Dr. Blum, Frau Dr. Dohr, Frau Kara, Frau Marks, Frau Nowarra, Frau Offenhäusser, Frau Thiele sowie Herrn Reiter und Herrn Döring. Ferner bedanken wir uns bei all jenen, die uns mit Rat und Tat, mit guten Anregungen und mit den ein oder anderen ergänzenden Beispielen und Arbeitsabläufen zur Seite gestanden haben. Ein weiterer Dank gilt den Mitarbeitern beim Springer Verlag für die Möglichkeit, dieses Buch Wirklichkeit werden zu lassen.

Wenn wir von „Ihnen als MTRA“ sprechen, meinen wir selbstverständlich Männer wie Frauen – denn auch, wenn dieser Berufszweig sich zunächst als reine Frauendomäne entwickelt hat, ist er nunmehr glücklicherweise zunehmend auch für männliche Auszubildende interessant.

Gerne nehmen wir Anregungen und Kommentare von Ihnen entgegen, um das Buch weiterzuentwickeln und den Bedürfnissen unserer Leser, also Ihnen, die Sie sich in Ausbildung und Berufspraxis befinden, anzupassen (feedback@mtra-wissen.de).

Wir hoffen, dass Ihnen als MTRA oder auch Student oder Assistenzarzt in der Radiologie sowohl in Deutschland, Österreich aber auch der Schweiz dieses Buch ein wertvoller Begleiter in Ausbildung, Studium und Beruf sein wird.

Tina Hartmann, Martina Kahl-Scholz, Christel Vockelmann
Bönen, im Mai 2014

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional	DVT	Digitale Volumentomographie
3D	Dreidimensional	DVTA e. V.	Dachverband der Technologen/innen und Analytiker/innen in der Medizin Deutschland e. V.
A	Ampere	DXA	Dual-Röntgen-Absorptiometrie
AAW	Arbeitsanweisung	EBM	Evidenzbasierte Medizin
ACH	Acetylcholin	EBP	Evidenzbasierte Praxis
AMG	Arzneimittelgesetz	EF	Extendend-field
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz	EIA	Enzyme im Enzymimmonoassay
aSi	Amorphes Silizium	EK	Empfindlichkeitsklassen
BaFBr	Bariumfluorobromid	EKG	Elektrokardiogramm
BBiG	Berufsbildungsgesetz	ELISA	Enzyme-linked immunosorbet assay
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz	EPD	Elektronisches Personendosimeter
BMG	Bundesministerium für Gesundheit	EPID	Electronic portal imaging device
BP	Belichtungspunkt	ETL	Echozuglänge
BPH	Benigne Prostatahyperplasie	eV	Elektronenvolt
Bq	Bequerel	FDA	Fokus-Detektor-Abstand
BRCA	Breast cancer	FFA	Fokus-Film-Abstand
BtMG	Betäubungsmittelgesetz	FHA	Fokus-Haut-Abstand
BV	Bildverstärker	FID	Freier Induktionsabfall Signal
BWS	Brustwirbelsäule	FKDS	Farbkodierte Duplexsonographie
C	Coulomb	FLAIR	Fluid Attenuated Inversion Recovery
CCC	Cholangiozelluläres Karzinom	FOV	Field of view
CBCT	Cone-Beam-CT	GOÄ	Gebührenordnung für Ärzte
CEUS	Kontrastmittelverstärkte Sonographie	GTV	Gross tumor volume
CFoV	Center Field of View	Gy	Gray
CIN	Kontrastmittelinduzierte Nephropathie	GyE	Gray Equivalent
Co	Kobalt	HAT	Hormonablativ Therapie
COR	Center of Rotation	HCC	Hepatozelluläres Karzinom
CsJ	Cäsiumiodid	HE	Hounsfieldseinheiten
CT-A	CT-Angiographie	HF	Hochfrequenz
CT	Computertomographie	HHC	Hepatozelluläres Karzinom
CTDI	Computed Tomography Dose Index	HIFU	Hochintensivierter fokussierter Ultraschall
CTV	Clinical tumor volume	HIT	Heparininduzierte Thrombozytopenie
DAS	Daten-Akquisitions-Systeme	HU	Hounsfield Units
DEGRO	Deutsche Gesellschaft für Radioonkologie	HWS	Halswirbelsäule
DFP	Dosisflächenprodukt	HWZ	Halbwertszeit
DICOM	Digital imaging and communications in medicine	Hz	Hertz
DKG	Deutsche Krebsgesellschaft, Deutsche Krankenhausgesellschaft	ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurement
DLP	Dosislängenprodukt	IF	Involved-field
DNA	Desoxyribonukleinsäure	IfSG	Infektionsschutzgesetz
DRG	Diagnosis related group, Deutsche Röntgengesellschaft	IGEL	Individuelle Gesundheitsleistung
DRW	Diagnostische Referenzwerte	IGRT	Image guided radiotherapy
DSA	Digitale Subtraktionsangiographie	IMRT	Intensitätsmodulierte Radiotherapie
DS-CT	Dual-Source-CT	IORT	Intraoperative Radiotherapie
DTPH	Diethylenetriaminpentaessigsäure	IRCP	Internationale Strahlenschutzkommission
DQE	Dosis-Quanten-Effektivität	IRMA	Immunradiometrischer Assay

IR-Sequenz	Inversion-Recovery-Sequenzen	MV	Megavolt
i.v.	intravenös	MWPC	Multi-wire proportional chamber
IVP	Intravenöses Pyelogramm	M_{xy}	Transversale Magnetisierung
		M_z	Längsmagnetisierung
J	Iod		
Kerma	Kinetic energy released in matter	NaCl	Natriumchlorid
Kg	Kilogramm	NHL	Non-Hodgkin-Lymphom
kHz	Kilohertz	NHS	National Health Service
KI	Kontraindikation	NPV	Negativ prädiktiver Wert
KIS	Krankenhausinformationssystem	NW	Nebenwirkung
KM	Kontrastmittel		
KTQ	Kooperation für Transparenz und Qualität	OAR	Organs at risk
kV	Kilovolt	ODA	Objekt-Detektor-Abstand
		OFA	Objekt-Film-Abstand
LET	Linearer Energietransfer	OP	Operation
LIH	Last-Image-Hold	OPG	Orthopantomographie
lp	Linienpaare	OPT	Orthopantomographie
LUT	Look-up-Tabelle		
		p	Pitchfaktor
mAs	Milliamperesekunden	PACS	Picture archiving and communication system
MCU	Miktionszysturethrogramm	PAT	Parallele Akquisitionstechnik
MeV	Megaelektronenvolt	PET	Positronenemissionstomographie
MFA	Medizinische Fachangestellte	PM	Photomultiplier
MFT	Modulations-Transfer-Funktion	PMMP	Polymethylmethacrylat
mg	Milligramm	ppm	Parts per million
MHz	Megahertz	PPV	Positiver prädiktiver Wert
MIBG	Meta-iodo-benzyl-guanidin	PRG	Patientenrechtsgesetz
min	Minute	PSA	Panoramaschichtaufnahme
minIP	Minimum Intensity Projektion	PTV	Planning target volume
MIP	Maximum Intensity Projectionm		
ml	Milliliter	QM	Qualitätsmanagement
MLC	Multileaf-Kollimator	QMB	Qualitätsmanagementbeauftragte
mm	Millimeter		
Mo	Molybdän	RbBr	Rhobidiumbromid
MPE	Medizinphysikexperte	RBW	Relative biologische Wirksamkeit
MPG	Medizinproduktgesetz	RCT	Randomised Controlled Trial
MPR	Multiplanare Reformation	rd	Rad
MR-A	MR-Angiographie	REAL	Revised European American Lymphoma
MRCP	Magnetresonanztomographie	RFA	Radiofrequenzablation
	Cholangiopankreatikographie	RIA	Radio-Immuno-Assay
MRSA	Methicillin-resistenter Staphylococcus aureus	RIS	Radiologieinformationssystem
MRT	Magnetresonanztomographie	RIStrSch	Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin
ms	Millisekunden	RKI	Robert-Koch-Institut
MSCT	Multislice-CT	RöV	Röntgenverordnung
mSv	Millisievert	RSO	Radiosynoviorthese
MTA	Medizinisch technische Assistenten	RT	Radiotherapie
MTA-G	MTA-Gesetz	RV	Reverberation
MTA-APrV	Ausbildungs- und Prüfungsverordnung für MTA		
MTF	Modulations-Transfer-Funktion	s	Sekunden
MTRA	Medizinisch technischer Radiologieassistent/technische Radiologieassistentin	SAR	Spezifische Absorptionsrate
		SC	Speed Clases
MuSchG	Mutterschutzgesetz	SDS	Summed Difference Score
		SEV	Sekundärelektronenvervielfacher
		SIB	Simultan integrierter Boost
		SIRT	Selektive interne Radiotherapie
		SLN	Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie

Abkürzungsverzeichnis

SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
SOP	Standard Operating Procedure
SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography
SPIR	Spektral selektive Inversion Recovery
SRS	Summed Rest Score
StrSchV	Strahlenschutzverordnung
SS-CT	Singleslice-CT
SSD	Shaded Surface Display, Source skin distance
SSFSE-Sequenz	Single Shot Fast Spin Echo Sequenz
SSK	Strahlenschutzkommission
SSS	Summed Stress Score
StGB	Strafgesetzbuch
STIR	Short TI Inversion Recovery
Sv	Sievert
T	Tesla
TACE	Transarterielle Chemoembolisation
TB	Terabyte
Tc	Technetium
TD	Toleranzdosis
TE	Echozeit
TF	Turbofaktor
TIRM	Turbo Inversion Recovery Measurement
TLD	Thermo-Lumineszenz-Detektoren
ToF	Time of Flight
TR	Repetitionszeit
TVöD	Tarifvertrag für den öffentlichen Dienst
UAW	Unerwünschte Arzneimittelwirkung
UEW	Unerwünschte Wirkung
UFoV	Useful Field of View
UICC	Union internationale contre le cancer
US	Ultraschall
V	Volt
VC	Virtuelle Colonoskopie
VMAT	Volumetric modulated arc therapy
VR	Volume Rendering
W	Watt
WW	Window Width
ZVK	Zentraler Venenkatheter

Inhaltsverzeichnis

I Berufsbild

1	Berufsbild und Berufsgeschichte	3
	<i>T. Hartmann</i>	
1.1	Entwicklung des Berufsbildes MTRA	4
1.2	Gesetz über die Berufsausübung als technischer Assistent/technische Assistentin in der Medizin (MTA-G)	8
1.2.1	Die Abschnitte des MTA-Gesetz (MTA-G)	8
1.3	Ausbildungs- und Prüfungsverordnung für technische Assistenten in der Medizin (MTA-APrV)	13
1.3.1	Allgemeine Ausbildungsorganisation	13
1.3.2	Staatliche Abschlussprüfung	14
1.4	Ausbildungsrelevante Gesetze und Verordnungen	17
1.4.1	Strahlenschutz	18
1.4.2	Infektionsschutz und Hygiene	18
1.5	Arbeitsschutz	19
1.6	Patientenrechtegesetz	21
1.7	Das berufliche Handlungsfeld der MTRA	21
	Literatur	25

II Technik

2	Strahlenarten und Strahlenbiologie	29
	<i>T. Hartmann, I. Offenhäusser, C. Vockelmann</i>	
2.1	Radioaktivität und deren Wechselwirkungen	31
2.1.1	Historischer Hintergrund	31
2.1.2	Physikalische Grundlagen	32
2.1.3	Physikalische Wechselwirkungsprozesse elektromagnetischer Strahlung mit Materie	35
2.2	Röntgenstrahlung	39
2.3	Dosisbegriffe	41
2.3.1	Kerma = Kinetic energy released in matter	41
2.3.2	Ionendosis	41
2.3.3	Energiedosis	41
2.3.4	Äquivalentdosis	42
2.3.5	Einfalldosis	42
2.3.6	Oberflächendosis	42
2.3.7	Tiefendosis	43
2.3.8	Dosisflächenprodukt	43
2.3.9	Dosislängenprodukt	43
2.3.10	Organdosis	44

2.3.11	Effektive Dosis (auch effektive Äquivalentdosis)	44
2.3.12	Personendosis und Körperdosis	44
2.3.13	Dosimetrische Verfahren in der klinischen Praxis	45
2.4	Wirkung ionisierender Strahlung auf den Organismus	48
2.4.1	Zellaufbau	49
2.4.2	Strahlenwirkungen	49
2.4.3	Phasen der Strahlenwirkung	52
2.5	Gesetze, Verordnungen und Richtlinien	55
2.5.1	Gesetze	55
2.5.2	Röntgenverordnung	56
2.5.3	Strahlenschutzverordnung	56
2.5.4	Strahlenschutzbereiche	56
2.5.5	Beruflich strahlenexponierte Personen	58
	Literatur	61
3	Konventionelle Röntgendiagnostik	63
	<i>T. Doering, Ch. Nowarra</i>	
3.1	Geschichtlicher Rückblick	65
3.2	Aufbau und Funktionsweise einer Röntgenanlage	66
3.2.1	Physikalische Grundlagen	66
3.2.2	Der Röntgenstrahler	68
3.2.3	Der Röntgengenerator	71
3.2.4	Strahlenqualität und -quantität, Belichtungsautomatik	72
3.2.5	Abbildungsgesetze	76
3.2.6	Qualität des Röntgenbildes und qualitätsverbessernde Maßnahmen	77
3.2.7	Aufbau eines Bucky-Arbeitsplatzes	81
3.2.8	Patientenbetreuung und -lagerung	82
3.2.9	Mobile Röntgengeräte	83
3.2.10	Besondere Strahlenschutzmaßnahmen	83
3.3	Digitale Bildaufnahmeverfahren	87
3.3.1	Rückblick – Röntgenfilme	87
3.3.2	Verstärkerfolien	88
3.3.3	Speicherfolien	88
3.3.4	Festkörperdetektoren	89
3.3.5	Kennzahlen einer Röntgenanlage/eines Detektorsystems	90
3.4	Digitale Bildverarbeitung	91
3.4.1	Aufbau eines digitalen Bildes	91
3.4.2	Fehlerkorrektur	93
3.4.3	Auswahl des Bildausschnittes/Blenden	93
3.4.4	Die Look-up-Tabelle (LUT)	93
3.4.5	Fensterung	96
3.4.6	Rauschreduktion	96
3.4.7	Kantenanhebung	96
3.4.8	Messungen im Bild	96
3.5	Spezialaufnahmegeräte	98
3.5.1	Panoramaschichtgeräte	98
3.5.2	DVT, CBCT	98

3.5.3	DXA (Knochendichtemessung, Osteodensitometrie)	99
3.5.4	Ganzbeinaufnahme, Achsenbestimmungen	100
3.5.5	Ganzkörperscanner (EOS, Wirbelsäulenbalance)	101
	Literatur	103
4	Durchleuchtung und Subtraktionsangiographie	105
	<i>T. Doering, Ch. Nowarra</i>	
4.1	Bildverstärker inklusive aktueller technischer Entwicklungen	106
4.1.1	Aufbau des Bildverstärkers (BV)	106
4.1.2	Der Röntgenstrahler einer Durchleuchtungsanlage	108
4.1.3	Aufbau eines Durchleuchtungsgerätes	108
4.1.4	Aufbau einer Angiographieanlage	109
4.1.5	Patientenlagerung	110
4.2	DSA-Technik	110
4.2.1	Subtraktion	111
4.3	Rotationsangiographie/Angio-CT	113
4.4	Besondere Strahlenschutzmaßnahmen	113
4.4.1	Strahlenschutz für das Personal	113
4.4.2	Strahlenschutz durch die Röntgentechnik	115
4.5	Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien der Bundesärztekammer	116
4.5.1	Ärztliche Qualitätsanforderungen	116
	Literatur	117
5	Computertomographie (CT)	119
	<i>K. Kara, Ch. Nowarra</i>	
5.1	Aufbau und Funktionsweise eines Computertomographen	120
5.1.1	Allgemeines und Möglichkeiten	120
5.1.2	Geschichte	120
5.1.3	Aufbau	121
5.1.4	Gerätegeneration	123
5.1.5	Untersuchungstechniken	124
5.2	Bildentstehung	132
5.2.1	Post-Processing	134
5.2.2	Artefakte	138
5.3	Besondere Strahlenschutzmaßnahmen und Dosisreduktion	140
5.3.1	Dosisgrößen CTDIvol vs. DLP	141
5.4	Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien der Bundesärztekammer	142
5.4.1	Ärztliche Qualitätsanforderungen	142
5.4.2	Aufnahmetechnische Qualitätsanforderungen	143
	Literatur	144
6	Kernspintomographie	145
	<i>Ch. Nowarra, K. Reiter</i>	
6.1	Physikalische Grundlagen der Kernspintomographie	147
6.1.1	Magnetresonanztomographie = Kernspintomographie	147
6.1.2	Atommodell	148
6.1.3	Wasserstoffprotonen im MRT	148
6.1.4	Sequenz	149

6.1.5	Longitudinalrelaxation (T1-Relaxation)	150
6.1.6	Transversalrelaxation (T2-Relaxation)	151
6.1.7	Transversalrelaxation (T2*-Relaxation)	151
6.1.8	Schichtselektion	151
6.1.9	Schichtdicke	151
6.1.10	Ortskodierung	152
6.1.11	K-Raum	152
6.1.12	Sequenz	153
6.1.13	Repetitionszeit TR und Echozeit TE	154
6.2	Aufbau eines Kernspintomographen	155
6.2.1	Hauptmagnet	155
6.2.2	Gradientenspule	156
6.2.3	Hochfrequenzsystem	156
6.2.4	Bedienungskonsole und Bildrechner	157
6.3	Sicherheit am MRT	158
6.3.1	Hauptmagnetfeld B_0	158
6.3.2	Gradientenfelder	158
6.3.3	Hochfrequenzfeld B_1	159
6.3.4	Kryogene Flüssigkeiten und Gase	159
6.4	Sequenzen	159
6.4.1	Die Familie der Spin-Echo-Sequenzen	160
6.4.2	Die Familie der Gradienten-Echo-Sequenzen	162
6.5	Bildqualität und Sequenzoptimierung	164
6.5.1	Signal-Rausch-Verhältnis	164
6.5.2	Parallele Akquisitionstechnik (PAT)	165
6.6	Artefakte	165
6.6.1	Patienten-verursachte Artefakte	166
6.6.2	Messmethoden-bedingte Artefakt	167
6.6.3	Durch das System verursachte Artefakte	168
6.7	MR-Angiographie	168
6.8	Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien der Bundesärztekammer	170
6.8.1	Allgemeine Qualitätsanforderungen	170
6.8.2	Spezielle Anforderungen an Indikationsstellung, dargestellte Strukturen und Kontraste	171
6.8.3	Allgemeine Anforderung an die Untersuchungstechnik	171
6.8.4	Technisch-physikalische Qualitätsanforderungen	172
	Literatur	173
7	Sonographie	175
	<i>C. Vockelmann</i>	
7.1	Physikalische Grundlagen der Sonographie	176
7.1.1	Ultraschallwellen	176
7.1.2	Verfahren	178
7.2	Aufbau und Funktionsweise eines Sonographiegerätes	180
7.2.1	Schallköpfe	180
7.2.2	Wo muss ich drücken	181
7.3	Möglichkeiten und Grenzen der Ultraschalldiagnostik	182
	Literatur	183

8	Kontrastmittel und Pharmakologie	185
	<i>M. Kahl-Scholz, K. Kara</i>	
8.1	Allgemeine Pharmakologie	187
8.1.1	Pharmakokinetik	187
8.1.2	Pharmakodynamik	187
8.1.3	Begriffe rund um ein Medikament	188
8.1.4	Wichtige Wirkstoffgruppen im MTRA-Arbeitsalltag	190
8.2	Röntgenkontrastmittel	192
8.2.1	Einteilung der Röntgen-KM	193
8.3	MR-Kontrastmittel	200
8.3.1	Gadolinium	200
8.3.2	Leberspezifische Kontrastmittel	202
8.4	Sonographie-Kontrastmittel	202
8.5	Applikationssysteme und Kontrastmittelanwendung	202
8.5.1	Patientenvorbereitung	204
8.5.2	Einzelkolbensystem	205
8.5.3	Doppelkolbensystemen	205
8.5.4	KM-Protokolle für CT-Untersuchungen	205
8.5.5	Zugänge, Port, ZVK	206
8.5.6	Paravasat! Was nun?	207
8.6	Kontrastmittelzwischenfall und Notfallmedikation	208
8.6.1	Durchführung einer (iodhaltigen) Kontrastmittelanwendung	208
8.6.2	Kontraindikationen	208
8.6.3	Nebenwirkungen	209
8.6.4	Schwangerschaft und Stillzeit	212
8.7	Andere Medikamente in der Radiologie und Nuklearmedizin	212
8.7.1	Glucagon	212
8.7.2	Butylscopolamin (Buscopan®)	212
8.7.3	Metoclopramid (Paspertin®)	213
8.7.4	Metamizol (Novalgine®)	213
8.7.5	Diazepam	213
8.7.6	Metoprolol	213
8.7.7	Adenosin	214
8.7.8	Dobutamin	214
8.7.9	Piritramid (Dipidolor®)	214
8.7.10	Heparin	215
8.7.11	Furosemid	215
8.7.12	Lidocain	215
8.8	Rechtslage	215
8.8.1	Kontrastmittelinjektion	216
8.8.2	Aufklärung zu medizinischen Untersuchungen und Eingriffen	216
	Literatur	218
9	Strahlentherapie	221
	<i>D. Dohr, C. Marks, J. Thiele</i>	
9.1	Historische Entwicklung	223
9.1.1	Die „Neue Art von Strahlen“ und deren Nebenwirkung	223

9.1.2	Die Entdeckung der Radioaktivität	224
9.1.3	Die Telekobalttherapie.....	224
9.1.4	Der Linearbeschleuniger.....	224
9.1.5	Die Geschichte der Bestrahlungsplanung.....	225
9.2	MTRA in der Strahlentherapie mit speziellem Strahlenschutz	225
9.2.1	Aufgaben der MTRA in der Strahlentherapie	225
9.2.2	Strahlenschutz in der Strahlentherapie	227
9.3	Aufbau und Funktion radioonkologischer Bestrahlungsgeräte	230
9.3.1	Linearbeschleuniger	230
9.3.2	Dosisverteilung im Gewebe.....	234
9.3.3	Dosisverteilung im Bestrahlungsplan.....	236
9.3.4	Bestrahlungstechniken	237
9.3.5	Linearbeschleuniger speziellen Bautyps	240
9.3.6	Röntgentherapiegeräte.....	241
9.3.7	Brachytherapie.....	242
9.3.8	Partikeltherapie	243
9.4	Tumorpathologie	247
9.4.1	Ursprung und Wachstum der Krebszelle	247
9.4.2	Histo-pathologische Begutachtung	249
9.4.3	Krebsentstehung.....	250
9.4.4	Tumorklassifikationen	251
9.4.5	Zellreaktionen bei Strahleneinwirkung	253
9.4.6	Wirkung der Bestrahlung auf Krebszellen	254
9.4.7	Das linearquadratische Modell zur Beschreibung der Zell-Schädigung bzw. Zell- Erholung nach Bestrahlung	256
9.4.8	Wirkung der Bestrahlung auf gesunde Zellen	257
9.5	Möglichkeiten und Prinzipien der Radioonkologie	258
9.5.1	Therapiekonzepte in der Radioonkologie	258
9.5.2	Fraktionierungskonzepte	260
9.6	Bestrahlungsplanung	261
9.6.1	Diagnose und Vorstellung im Tumorboard	261
9.6.2	Information des Patienten, Einschätzung der Durchführbarkeit, spezielle Vorbereitungen ..	261
9.6.3	Bestrahlungsverordnung	262
9.6.4	Lagerung des Patienten und Planungs-CT	262
9.6.5	3D-CT-Planung.....	263
9.6.6	Weiterverarbeitung des CT: Fusion und Konturierung	264
9.6.7	Erstellen des Bestrahlungsplanes.....	265
9.6.8	Beurteilung und Freigabe des Bestrahlungsplanes	265
9.6.9	Erste Bestrahlung mit Verifikation	266
9.7	Der Patient in der Radioonkologie	267
9.7.1	Information der Patienten	267
9.7.2	Psychoonkologische Betreuung.....	268
9.7.3	Einschränkungen während der Bestrahlung.....	269
9.7.4	Ängste des Patienten	271
9.7.5	Maßnahmen zur Vermeidung/Behandlung radiogener Nebenwirkungen	272
9.8	Allgemeine Qualitätskriterien nach Leitlinien	274
9.8.1	Richtlinien, Leitlinien und Empfehlungen	274

9.8.2	Evidenzbasierte Medizin (EBM)	275
9.8.3	Standard Operating Procedure (SOP)	275
	Literatur	277
10	Nuklearmedizin	281
	<i>U. Blum, T. Hartmann, I. Offenhäusser</i>	
10.1	Historische Entwicklung, Abbildungs- und Therapiemöglichkeiten	282
10.1.1	Abbildungsmöglichkeiten	282
10.1.2	Therapiemöglichkeiten	283
10.2	MTRA in der Nuklearmedizin mit speziellem Strahlenschutz	286
10.2.1	Heißlabor	286
10.2.2	Gammakamera	287
10.2.3	Verlassen der Abteilung	288
10.3	Detektion von Radioaktivität	288
10.3.1	Grundlagen	288
10.3.2	Szintillationsdetektoren	289
10.3.3	Messsysteme im Strahlenschutz	291
10.4	Bildentstehungssysteme	293
10.4.1	Gammakamera	293
10.4.2	Qualitätskontrolle der Gammakamera	301
10.5	Radionukleotide in der medizinischen Anwendung	303
10.5.1	Diagnostische Bildgebung	304
10.6	Radiopharmakologie	305
10.7	Qualitätssicherungsmaßnahmen von Radiopharmaka	305
10.7.1	Radioisotopenreinheit	306
10.7.2	Chemische Reinheit	307
10.7.3	Radiochemische Reinheit	307
10.7.4	Spezifische Aktivität	309
10.7.5	Stabilität	309
10.7.6	Mikrobiologische Reinheit	309
10.8	Kontamination und Dekontaminationsmaßnahmen	309
10.9	Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien	311
	Literatur	312

III MTRA im Gesundheitswesen

11	Stellenwert der MTRA im Gesundheitswesen	315
	<i>T. Hartmann, M. Kahl-Scholz, Ch. Nowarra, C. Vockelmann</i>	
11.1	Organisation des Gesundheitswesen in Deutschland	316
11.2	Finanzierungsmöglichkeiten einer Radiologie	317
11.2.1	Ambulanter Sektor	317
11.2.2	Stationärer Sektor	318
11.3	Arbeiten im interdisziplinären Team	319
11.4	Entstehung von Gesundheit und Krankheit	322
11.4.1	Das innere Milieu	322
11.4.2	Grundbegriffe der Krankheitslehre	323

11.4.3 Krankheitsursachen 324

11.4.4 Wachstum und Wachstumsstörungen 325

11.5 **Hygienemaßnahmen** 327

11.5.1 Übertragungswege von Infektionskrankheiten 328

11.5.2 Krankenhausinfektionen 328

11.5.3 Verfahren zur Desinfektion 329

11.5.4 Umsetzung von Hygienestandards für MTRA 330

11.6 **Steriles Arbeiten** 336

11.6.1 Verpackung von Sterilgut 337

11.6.2 Lagerung von Sterilgut 337

11.6.3 Umgang mit Sterilgut 337

11.6.4 Vorbereitung von Injektionen und Infusionen 338

11.6.5 Steriles Ankleiden 338

11.7 **Der Patient im Krankenhaus** 340

11.8 **Gesund bleiben im MTRA-Beruf** 344

11.8.1 Belastungen im MTRA-Beruf 344

11.8.2 Hautschutz 345

11.8.3 Rückengerechtes Arbeiten 346

11.8.4 Stressbewältigung 346

Literatur 348

IV Diagnostik und medizinische Anwendungen

12 Diagnostik und Therapie – allgemein 353

T. Hartmann, M. Kahl-Scholz

12.1 **Einführung in die medizinische Fachsprache** 354

12.2 **Topographische Anatomie** 361

12.2.1 Grundlagen 362

12.2.2 Obere Extremität/Rumpf 364

12.2.3 Untere Extremität 377

12.2.4 Situs 383

12.2.5 Kopf und Hals 391

12.2.6 ZNS 397

12.2.7 Wichtige Gefäßbahnen auf einen Blick 398

12.3 **Voraussetzungen zu Diagnostik und Therapie** 401

12.3.1 Anamnese 402

12.3.2 Klinische Untersuchung 402

12.3.3 Aufklärung 403

12.3.4 Anleitung des Patienten zur Untersuchung 405

12.4 **Besonderheiten in der Pädiatrie** 405

12.4.1 Anatomie und Strahlenempfindlichkeit bei Kindern 405

12.4.2 Proportionen und Wachstum 405

12.4.3 Dichteverhältnisse 405

12.4.4 Strahlensensibilität 406

12.4.5 Angewandter Strahlenschutz 406

Literatur 408

13	Muskuloskelettales System	409
	<i>M. Kahl-Scholz, I. Offenhäusser, C. Vockelmann</i>	
13.1	Allgemeines	410
13.1.1	Topographische Anatomie	410
13.1.2	Voraussetzungen zu Diagnostik und Therapie	410
13.2	Radiologische Diagnostik	411
13.2.1	Sonographie	411
13.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	411
13.2.3	Durchleuchtung/Angiographie	412
13.2.4	Computertomographie (CT)	412
13.2.5	Kernspintomographie (MRT)	414
13.3	Nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie	415
13.3.1	Untersuchungen des Knochens	415
13.4	Wertigkeit	421
13.5	Therapeutische Möglichkeiten	421
13.5.1	Radiologische Therapie	421
13.5.2	Strahlentherapie	422
13.5.3	Nuklearmedizinische Therapie	424
13.6	Fallbeispiel	425
	Literatur	426
14	Herz und Blutgefäße	427
	<i>U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Vockelmann</i>	
14.1	Allgemeines	428
14.1.1	Topographische Anatomie	428
14.1.2	Funktion	428
14.2	Radiologische Diagnostik	428
14.2.1	Sonographie	428
14.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	429
14.2.3	Durchleuchtung/Angiographie	430
14.2.4	Computertomographie	431
14.2.5	Kernspintomographie	433
14.3	Nuklearmedizinische Diagnostik	433
14.3.1	Herz-SPECT und -PET	433
14.4	Wertigkeit	437
14.5	Therapeutische Möglichkeiten	437
14.5.1	Angiographie	437
14.6	Fallbeispiele	438
	Literatur	439
15	Diagnostik und Therapie – Neurologie	441
	<i>U. Blum, D. Dohr, M. Kahl-Scholz, C. Marks, C. Vockelmann</i>	
15.1	Allgemeines	442
15.1.1	Topographische Anatomie	442
15.1.2	Funktion	442
15.2	Radiologische Diagnostik	442
15.2.1	Sonographie	442
15.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	442

15.2.3	Durchleuchtung/Angiographie	443
15.2.4	Computertomographie	443
15.2.5	Kernspintomographie	445
15.3	Nuklearmedizinische Diagnostik	446
15.3.1	Gehirn	446
15.3.2	Liquorraum	451
15.4	Wertigkeit	451
15.5	Therapeutische Möglichkeiten	451
15.5.1	Radiologische Therapie	451
15.5.2	Strahlentherapie bei Hirntumoren und -metastasen	452
15.6	Fallbeispiele	458
	Literatur	459
16	Diagnostik und Therapie – Kopf/Hals	461
	<i>U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Marks, C. Vockelmann</i>	
16.1	Allgemeines	462
16.1.1	Topographische Anatomie	462
16.1.2	Funktion	462
16.2	Radiologische Diagnostik	462
16.2.1	Sonographie	462
16.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	462
16.2.3	Durchleuchtung/Angiographie	462
16.2.4	Computertomographie (CT)	463
16.2.5	Kernspintomographie (MRT)	464
16.3	Nuklearmedizinische Diagnostik	464
16.3.1	Tränenwegsszintigraphie	464
16.3.2	Speicheldrüsenszintigraphie	465
16.3.3	HNO-Tumore	465
16.4	Wertigkeit	466
16.5	Strahlentherapeutische Möglichkeiten	466
16.5.1	Kopf-/Halstumore	466
16.5.2	Einzelne Tumorentitäten im Überblick	468
16.6	Fallbeispiele	469
	Literatur	469
17	Diagnostik und Therapie – Respiratorisches System	471
	<i>J. Thiele, I. Offenhäusser, C. Vockelmann</i>	
17.1	Allgemeines	472
17.1.1	Topographische Anatomie	472
17.2	Radiologische Diagnostik	472
17.2.1	Sonographie	472
17.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	472
17.2.3	Durchleuchtung/Angiographie	472
17.2.4	Computertomographie	473
17.2.5	Kernspintomographie	473
17.3	Nuklearmedizinische Diagnostik	474
17.3.1	Voraussetzungen zur Diagnostik	474
17.3.2	Lungenventilations/-perfusionsszintigraphie	474

17.3.3	Bestimmung der postoperativen Lungenfunktion	476
17.3.4	Rechts-Links-Shunt	476
17.3.5	Pulmonale Hypertonie	477
17.3.6	Mukoziliäre Clearance	477
17.3.7	Lungen-PET	478
17.4	Wertigkeit	478
17.5	Therapeutische Möglichkeiten	478
17.5.1	Radiologische Therapie	478
17.5.2	Strahlentherapie	479
17.6	Fallbeispiele	481
	Literatur	482
18	Diagnostik und Therapie – Gastrointestinales System	483
	<i>U. Blum, D. Dohr, M. Kahl-Scholz, C. Vockelmann</i>	
18.1	Allgemeines	484
18.1.1	Topographische Anatomie	484
18.1.2	Funktion	484
18.2	Radiologische Diagnostik	485
18.2.1	Sonographie	485
18.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	485
18.2.3	Durchleuchtung/Angiographie	486
18.2.4	Computertomographie	487
18.2.5	Kernspintomographie	488
18.3	Nuklearmedizinische Diagnostik	490
18.3.1	Oesophagus	490
18.3.2	Magen	491
18.3.3	Leber	491
18.3.4	Darm	494
18.3.5	Pankreas	496
18.3.6	Resorptionstest	497
18.4	Wertigkeit	497
18.5	Therapeutische Möglichkeiten	497
18.5.1	Radiologische Therapie	497
18.5.2	Strahlentherapie	498
18.6	Fallbeispiele	504
	Literatur	505
19	Diagnostik und Therapie – Urogenitales System	507
	<i>U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Marks, C. Vockelmann</i>	
19.1	Allgemeines	508
19.1.1	Topographische Anatomie	508
19.1.2	Funktion	508
19.2	Radiologische Diagnostik	508
19.2.1	Sonographie	508
19.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	508
19.2.3	Durchleuchtung/Angiographie	509
19.2.4	Computertomographie	509
19.2.5	Kernspintomographie	510

19.3	Nuklearmedizinische Diagnostik	510
19.3.1	Nierenzintigraphie	510
19.3.2	Hodenzintigraphie	515
19.4	Wertigkeit	515
19.5	Therapeutische Möglichkeiten	516
19.5.1	Radiologische Therapie	516
19.5.2	Strahlentherapie	516
19.6	Fallbeispiele	521
	Literatur	521
20	Diagnostik und Therapie – Gynäkologie	523
	<i>U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Marks, J. Thiele, C. Vockelmann</i>	
20.1	Allgemeines	524
20.1.1	Topographische Anatomie	524
20.1.2	Funktion	524
20.2	Radiologische Diagnostik	524
20.2.1	Sonographie	524
20.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	524
20.2.3	Computertomographie	527
20.2.4	Kernspintomographie	527
20.3	Nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie	528
20.3.1	Mammakarzinom	528
20.3.2	Vulvakarzinom	529
20.3.3	SLN-Diagnostik bei anderen gynäkologischen Tumoren	530
20.3.4	Ovarialkarzinome	530
20.4	Wertigkeit	530
20.5	Therapeutische Möglichkeiten	530
20.5.1	Radiologische Therapie	530
20.5.2	Strahlentherapie	532
20.6	Fallbeispiele	536
	Literatur	537
21	Diagnostik und Therapie – Endokrinologisches System	539
	<i>D. Dohr, I. Offenhäuser, C. Marks, C. Vockelmann</i>	
21.1	Allgemeines	540
21.1.1	Schilddrüse	540
21.1.2	Nebenschilddrüsen	540
21.1.3	Nebennieren	540
21.2	Radiologische Diagnostik	541
21.2.1	Sonographie	541
21.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	541
21.2.3	Durchleuchtung/Angiographie	542
21.2.4	Computertomographie	542
21.2.5	Kernspintomographie	543
21.3	Nuklearmedizinische Diagnostik	544
21.3.1	Schilddrüse (Glandula thyroidea)	544
21.3.2	Nebenschilddrüsen (Glandulae parathyroideae)	548
21.3.3	Nebenniere (Glandula suprarenalis)	548

21.4	Wertigkeit	549
21.5	Therapeutische Möglichkeiten	549
21.5.1	Strahlentherapie	549
21.5.2	Nuklearmedizinische Therapie	550
21.6	Fallbeispiele	552
	Literatur	553
22	Diagnostik und Therapie – Lymphatisches System	555
	<i>M. Kahl-Scholz, I. Offenhäusser, J. Thiele, C. Vockelmann</i>	
22.1	Allgemeines	556
22.1.1	Topographische Anatomie	556
22.1.2	Funktion	556
22.2	Radiologische Diagnostik	556
22.2.1	Sonographie	556
22.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	556
22.2.3	Durchleuchtung/Angiographie	557
22.2.4	Computertomographie	557
22.2.5	Kernspintomographie	558
22.3	Nuklearmedizinische Diagnostik	559
22.3.1	Einführung in die Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie	559
22.3.2	Topographische Anatomie am Beispiel des Mammakarzinoms	559
22.3.3	Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie am Beispiel des Mammakarzinoms	560
22.4	Wertigkeit	565
22.5	Therapeutische Möglichkeiten	565
22.5.1	Radiologische Therapieverfahren	565
22.5.2	Strahlentherapie	566
22.5.3	Radioimmuntherapie	568
22.6	Fallbeispiele	568
	Literatur	569
23	Diagnostik und Therapie – Haut und Hautanhangsgebilde	571
	<i>U. Blum, D. Dohr C. Vockelmann</i>	
23.1	Allgemeines	572
23.2	Radiologische Diagnostik	572
23.3	Nuklearmedizinische Diagnostik	572
23.3.1	Malignes Melanom	572
23.3.2	Kutane Lymphome	574
23.3.3	Merkelzellkarzinom	574
23.3.4	Weichteilraumforderungen	574
23.4	Wertigkeit	574
23.5	Therapeutische Möglichkeiten	575
23.5.1	Strahlentherapie der Hauttumore	575
23.6	Fallbeispiele	576
	Literatur	578

V Qualitätsmanagement und Berufspraxis

24	Qualitätssicherung und Management	581
	<i>T. Hartmann, Ch. Nowarra, C. Vockelmann</i>	
24.1	Konstanzprüfung in der Radiologischen Diagnostik	582
24.1.1	Allgemeine Rechtsvorschriften nach § 16 RöV	582
24.1.2	Messmittel und Prüfkörper	583
24.1.3	Kenngößen	583
24.1.4	Aufbewahrungsfristen	584
24.1.5	MTRA-relevante Konstanzprüfungen	585
24.2	Konstanzprüfung in der Strahlentherapie	586
24.2.1	Überprüfung der bildgebenden Verfahren zur Bestrahlungsplanung	586
24.2.2	Überprüfung der mechanischen und geometrischen Sicherheit von Bestrahlungsgeräten	586
24.2.3	Überprüfung der Dosisverteilung innerhalb des Bestrahlungsfeldes	587
24.2.4	Konstanzprüfung am Simulator	587
24.2.5	Tägliche Konstanzprüfung am Linearbeschleuniger	587
24.2.6	Kontrolle des Bestrahlungsfeldes	589
24.2.7	Weitere Konstanzprüfungen	589
24.3	Konstanzprüfungen in der Nuklearmedizin	589
24.3.1	Gammakamera	590
24.3.2	Aktivimeter	593
24.3.3	Sondenmessplätze	594
24.3.4	Positronenemissionstomographen (PET)	595
24.4	RIS/PACS inklusive Datenschutz	596
24.5	Qualitätsmanagement	598
24.5.1	Historische Entwicklung	599
24.5.2	Qualitätsbegriffe im Gesundheitswesen	600
24.5.3	Aufbau eines QM-Systems	602
	Literatur	605
25	Im Beruf	607
	<i>T. Hartmann, K. Kara, C. Vockelmann</i>	
25.1	Lebenslanges Lernen	608
25.2	Karriereplanung und alternative Berufsfelder	610
25.3	Wissenschaftliches Arbeiten	612
25.3.1	Notwendigkeit und Definition	613
25.3.2	Grundlagen der Evidenz-basierten Praxis	614
25.3.3	Diagnostische Genauigkeitsstudien	616
25.4	Arbeits- und Tarifrecht	618
25.4.1	Arbeitsrecht	618
25.4.2	Tarifrecht	622
25.5	Extremsituationen	624
25.5.1	Polytrauma	624
25.5.2	Anaphylaktoide Reaktion	624
25.5.3	CT-gesteuerte Punktion	624
25.5.4	Krampfanfall während Stentangioplastie	625
25.5.5	CT-gesteuerte virtuelle Autopsie/Post-mortem CT	625
	Literatur	627

Serviceteil 629

Webquellen und hilfreiche Links 630

Glossar technischer und physikalischer Begriffe 632

Stichwortverzeichnis 640

Mitarbeiterverzeichnis

Dr. med. Ursula Blum

Praxis für Nuklearmedizin
Strassburger Allee 2-4
45481 Mülheim
ublum@nuk-mh.de

Torsten Doering

Hüttemannstr. 18
44137 Dortmund
t.doering@gmx.net

Dr. med. Dagmar Dohr

Christiansgasse 14
8750 Glarus
Schweiz
Dagmar.dohr@yahoo.de

Kismet Kara

Bremener Str. 40
46145 Oberhausen
kismetkara@hotmail.de

Claudia Marks

Klinik für Radioonkologie
Universitätsklinikum Tübingen
Hoppe-Seyler-Str. 3
72076 Tübingen
Claudia.Marks@med.uni-tuebingen.de

Christine Nowarra

Klinik für Radiologie und Neuroradiologie
Klinikum Dortmund gGmbH
Beurhausstr. 30
44137 Dortmund
christine.nowarra@klinikumdo.de

Ingrid Offenhäusser

Stellv. Schulleitung, MTRA, Medizinpädagogin/
Fachlehrerin an MTA-Schulen
Universitätsklinikum Aachen
Pauwelsstr. 30
52074 Aachen

Kai Reiter

Amundsenweg 35
45472 Mülheim an der Ruhr
kai.reiter@googlemail.com

Julia Thiele

MTRA
Klinik für Strahlentherapie und Radioonkologie
Universitätsklinikum Carl Gustav Carus
an der Technischen Universität Dresden
Fetscherstr. 74
01307 Dresden

Berufsbild

Kapitel 1 Berufsbild und Berufsgeschichte – 3
T. Hartmann

Berufsbild und Berufsgeschichte

T. Hartmann

- 1.1 Entwicklung des Berufsbildes MTRA – 4**
- 1.2 Gesetz über die Berufsausübung als technischer Assistent/
technische Assistentin in der Medizin (MTA-G) – 8**
 - 1.2.1 Die Abschnitte des MTA-Gesetz (MTA-G) – 8
- 1.3 Ausbildungs- und Prüfungsverordnung für technische
Assistenten in der Medizin (MTA-APrV) – 13**
 - 1.3.1 Allgemeine Ausbildungsorganisation – 13
 - 1.3.2 Staatliche Abschlussprüfung – 14
- 1.4 Ausbildungsrelevante Gesetze und Verordnungen – 17**
 - 1.4.1 Strahlenschutz – 18
 - 1.4.2 Infektionsschutz und Hygiene – 18
- 1.5 Arbeitsschutz – 19**
- 1.6 Patientenrechtegesetz – 21**
- 1.7 Das berufliche Handlungsfeld der MTRA – 21**
 - Literatur – 25**

Marco hat gerade seine erste Woche der MTRA-Ausbildung hinter sich. Vor einem Jahr hat er seinen Realschulabschluss gemacht und danach ein freiwilliges soziales Jahr. Bei der Gelegenheit hat er auch mal kurz in die verschiedenen Bereiche des Krankenhauses geschnuppert. Jetzt versucht er, alle neuen Eindrücke zu verarbeiten und ist froh, dass er diese Ausbildung machen kann. Marco hat sich selbst schon immer in einem sozialen Beruf gesehen, aber nicht in der Pflege. Und bei den Physiotherapeuten muss man so viel lernen, hat ihm ein Freund erzählt. Außerdem verbringt er seine Freizeit am liebsten am Computer, da passt die Radiologie seiner Meinung nach am besten.

Seine Freundin findet die Berufswahl nicht so gut, da Marco nun drei Jahre kein Geld bekommt. Wenigstens muss er an seiner Schule nicht noch Schulgeld zahlen, wie an einigen anderen MTRA-Schulen. Außerdem ist sie der Meinung, dass man im Gesundheitswesen zu viel Verantwortung tragen muss und eigentlich immer „mit einem Bein im Knast“ steht. Wenn man einen Fehler macht, kann der Patient klagen. Diesen Einwand hatte Marco mit einem „Du guckst zu viele Serien“ abgetan.

Abends ruft Marcos Oma an und will wissen, wie die erste Woche so gelaufen ist. „Ich weiß nicht genau“, berichtet Marco, „viel Organisation und Geschichte und so. Das fand ich ziemlich langweilig, Geschichte war noch nie so mein Ding. Warum immer auf den alten Sachen rumhacken? Und dann dieses Gerede vom Frauenberuf und „höheren Töchtern“, dabei geht es doch um Technik. Außerdem gibt es da auch viele Jungs, was soll das also? Ich bin gespannt, wann wir endlich richtig loslegen, in der Praxis arbeiten und lernen, die Bilder zu machen.“

„Ich kann mich noch an eine Freundin erinnern, die das vor vielen Jahren auch gelernt hat“, erwidert Oma. „Aber im Labor. Das sind doch auch MTA, oder? Jedenfalls war die dann immer mit den schicken jungen Ärzten unterwegs und ganz stolz darauf. Ich glaube, die hat später auch einen geheiratet.“

„Ne Oma, MTA ist nicht gleich MTA! Ich bekomme ein R und die anderen ein L“, unterbricht Marco sie. „Die Ausbildung gibt es auch an unserer Schule. Keine Ahnung, warum die alle MTA heißen, wir haben doch nix miteinander zu tun!“

„Dafür erzählen die euch ja auch was zur Geschichte“, nimmt Oma den Faden wieder auf. „Ich fand Geschichte früher auch doof. Irgendwann habe ich dann

meine Meinung geändert. Wie heißt es so schön? Nur wenn man weiß, woher man kommt, weiß man auch, wohin man will!“

1.1 Entwicklung des Berufsbildes MTRA

Die Entstehung des Berufsbildes der MTRA wird meist mit der Entdeckung der Röntgenstrahlen am 08. November 1895 in Verbindung gebracht. Aber die ersten Wurzeln sind bereits in der Mitte des 19. Jahrhunderts zu finden. In dieser Zeit begannen Frauen aus „besserem Hause“ nach Erwerbsmöglichkeiten zu suchen. Es gab kaum Ausbildungsperspektiven und während Frauen aus den unteren Schichten in Fabriken oder als Mägde arbeiteten, blieb den bürgerlichen Frauen die Auswahl zwischen Gouvernante, Hauswirtschafterin oder Lehrerin. Bei letzterer kamen auf eine freie Stelle ca. 100 Bewerberinnen.

1865 begann **Wilhelm Adolph Lette** sich für diese Gruppe einzusetzen, in dem er die Denkschrift „Die Eröffnung und die Verbesserung der bisherigen Erwerbsquellen des weiblichen Geschlechts“ veröffentlichte und vom Einsatz der Frauen in industriellen, gewerblichen und medizinischen Hilfsberufen sprach. Als logische Folge seiner Forderungen gründete Lette 1866 in Berlin den „Verein zur Förderung der Erwerbstätigkeit für das weibliche Geschlecht“ und eröffnete das „Lette-Haus“, in dem auch heute noch u. a. MTRA ausgebildet werden.

Die Anbindung an die medizinischen Berufsgruppen erhielt der „Lette-Verein“ 1870/71, indem die Berufsausbildung für Krankenpflege aufgenommen wurde. 1890 wurde an gleicher Stelle die „photographische Lehranstalt“ für 32 Schülerinnen eröffnet. Damit waren die Fundamente für die weitere Entwicklung gelegt.

Nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen und den ersten Veröffentlichungen im Jahr 1896 reagierte nicht nur die Ärzteschaft euphorisch. Die Berufsgruppe der Photographen fühlte sich ebenfalls unmittelbar angesprochen. Schon weniger als einen Monat nach der Veröffentlichung durch Wilhelm Conrad Röntgen veranstaltet die „Deutsche Gesellschaft von Freunden der Photographie“ am 29. Januar 1896 einen Vortragsabend. Zur Veran-

schaulichung der neuen Möglichkeiten wurde der Abend durch praktische Vorführungen ergänzt. Diese übernahm der Leiter der photographischen Lehranstalt des Lette-Vereins, Dankmar Schultz Hencke, der zu diesem Zweck seine Assistentin Marie Kundt mitbrachte.

Marie Kundt gilt als die „Urmutter“ des MTA-Berufes. Sie war nicht nur die Nichte des Lehrers von W. C. Röntgen, August Kundt, sondern eben auch noch die Assistentin des Leiters der photographischen Lehranstalt. Was lag da näher als die „Erfindung“ eines neuen Berufes?

Marie Kundt gilt als maßgeblich mitverantwortlich für die Erstellung eines entsprechenden Lehrplanes. Ihr Verdienst ist die Schnelligkeit, mit der sie damit einen Beruf schuf, der gezielt als Tätigkeitsfeld für Frauen erschlossen wurde und gleichzeitig eine Konkurrenz zur Männerdomäne der „Fachphotographen“ bildete. Diese veröffentlichten auch gleich einen Aufruf der „die Einführung der Frau in die photographische Praxis ausser zu den untergeordneten Beschäftigungen“ verhindern sollte.

Marie Kundt war nicht nur schnell, sondern auch erfinderisch. Neben dem Ausbildungskonzept erreichte sie sogar, dass der Lette-Verein noch im Februar 1896 seine eigene Röntgenanlage bekam, und die „Photographie mit X-Strahlen“ in den Unterricht aufgenommen wurde. Dafür ließ sie in einer öffentlichen Veranstaltung ihre Hand röntgen und nutzte das Eintrittsgeld für die Anschaffung der notwendigen Gerätschaften.

Bereits 1897 erhielt die erste ausgebildete Röntgenphotographin **Paula Chelius** eine Festanstellung an der Eppendorfer Krankenanstalt in Hamburg. Und das Beste daran – sie hatte auch noch eine Pensionsberechtigung. Das war in der damaligen Zeit mehr wert als heute eine unbefristete Anstellung im öffentlichen Dienst!

Der Versuch, die photographischen Verfahren in einem Krankenhaus von Assistentinnen durchführen zu lassen, war über alle Maßen erfolgreich. Und so wurde ein damals noch reiner Frauenberuf geboren, den es in dieser Form in anderen Ländern nicht gab. Zu dieser Zeit war es üblich, dass für nahezu alle Lehrberufe ein Lehrgeld durch den Lehrling bzw. seine Eltern bezahlt wurde. Auch für die Ausbildung am Lette-Verein wurde „Schulgeld“ erhoben.

Die Nachfrage nach der Ausbildung war bei den „höheren Töchtern“ so groß, dass man befürchtete, bald zu viele davon auf dem Arbeitsmarkt zu haben. So viele Röntgenanlagen gab es schließlich noch nicht.

Wie es der Zufall wollte, bekam Marie Kundt zu dieser Zeit die Information, dass an den Universitätskliniken mehr qualifizierte Hilfskräfte gesucht wurden, die den Assistenzärzten die unbeliebten Hilfsarbeiten abnahmen. So wurde der Lehrplan um die Fächer Analytische Chemie, Histologie, Mikroskopie und Mikrophotographie erweitert und der ausdrückliche Frauenberuf der „photographisch-technischen Hilfsarbeiterin an wissenschaftlichen Instituten“ geboren. Die Tätigkeiten erweiterten sich also auf den Laborbereich.

Auch wenn die Photographen diesen Erfolgsweg nicht stoppen konnten, eine kleine Genugtuung blieb ihnen: während Photographen sich nach der Gesellenprüfung selbstständig machen durften, blieb dies den Frauen untersagt, da sie ja „nur“ einen Hilfsberuf hatten.

Ihre Aufgaben bestanden in der Pflege der Röhren und Geräte, Vorbereitung und Lagerung der Patienten, Bedienung der Geräte bei Aufnahmen und Bestrahlungen (selbstverständlich nur nach Anweisungen des Arztes), Entwickeln, Trocknen und Putzen der Röntgenplatten, Schreiben der Befunde, Archivierung der Aufnahmen und der Korrespondenz des Arztes.

Anekdote für den Rand

Herr Prof. Zimmer-Brossy schrieb in der Mitte des letzten Jahrhunderts:

„Im Teamwork eines Röntgeninstitutes ist der Arzt die Hauptperson, die Röntgenassistentinnen haben dafür zu sorgen, dass er diese Stelle voll und ganz einnehmen kann. Sie müssen ihn in seiner Tätigkeit röntgentechnisch, organisatorisch und administrativ unterstützen. Die Assistentin hat sich seinen Anordnungen zu unterziehen. Sie handelt selbstständig nur auf ihrem ureigensten Gebiet, und durch Gewissenhaftigkeit schafft sie ein Vertrauensverhältnis zu ihrem Vorgesetzten ... Sie sorgt dafür, dass die Anamnese richtig aufgenommen wird, und vermerkt Besonderheiten, die ihr bei dem Patienten aufgefallen sind. ... Sie unterstützt den Chef, wo sie nur kann, und räumt alles aus dem Wege, was ihn diagnostisch zu einer Fehleinschätzung führen könnte.“

Seine Frau Marianne hat das stark verinnerlicht und in dem berühmten Standardwerk „Lehrbuch der röntgendiagnostischen Einstelltechnik“ die ideale MTRA im Jahr 1960 beschrieben.

Neben dem Lette-Verein wurden auch in anderen Städten Schulen gegründet. 24 Lehranstalten wurden allein in Berlin zwischen 1906 und 1930, meist an privaten Röntgenlaboratorien, eröffnet. Leipzig folgte 1909 und Jena 1912. Heute gibt es in Deutschland ca. 100 Schulen für MTRA, eine davon in Berlin am Lette-Verein.

Anfangs durfte jede Lehranstalt eine eigene Berufsbezeichnung ausbilden: von photographischer Schwester bis Röntgenschwester war alles dabei (die Bezeichnung „Röntgengehilfin“ als Synonym für eine MTRA war bei deutschen Arbeitsämtern noch 2009 zu finden!). Erst 1921 wurde in Preußen mittels Erlass die Ausbildungsdauer auf zwei Jahre und die Berufsbezeichnung als „Technische Assistentin an medizinischen Instituten“ festgelegt.

1929 erfolgte erstmals eine Trennung der Fachrichtungen Laboratoriumsmedizin und Radiologie, die 1940 wieder aufgehoben wurde. Die politischen Zustände in Deutschland erforderten in dieser Zeit nicht nur Soldaten, sondern auch medizinische Gehilfinnen, die unterschiedliche Aufgaben übernehmen konnten.

Erst 1940 wurden vorbehaltene Tätigkeiten und die Berufsbezeichnung MTA gesetzlich verankert. Der Grund dafür lag in den vielen unterschiedlichen Ausbildungen in Deutschland, die je nach Größe der Lehranstalt unterschiedlich teure und unterschiedlich gute MTA für den Arbeitsmarkt lieferten. Darüber hinaus wurde die selbstständige Berufsausübung im Bereich Laboratoriumsmedizin erlaubt.

Mitte der 1950er Jahre, mit dem Einsatz von Belichtungsautomaten, war die Ärzteschaft der Meinung, dass man gar keine MTA mehr bräuchte. Das bisschen „Knöpfchendrücken“ könnte doch auch eine angelernte Röntgengehilfin machen.

1958 wurde in der Bundesrepublik ein neues Berufsgesetz erlassen, das die gemeinsame Ausbildung in den Bereichen Radiologie und Laboratoriumsmedizin beibehielt. Die Aufgaben der MTA bestanden in der „Hilfeleistung bei der Anwendung ionisierender Strahlung“.

Anekdote für den Rand

Das Frauenimage des Berufes sorgte dafür, dass 1968 im Rahmen der Ausbildung sogar Rücksicht auf die privaten Bedürfnisse der Ärzte genommen wurde:

„Gute Röntgenassistentinnen sind selten und dafür gibt es mehrere Gründe. Ein Großteil von Ihnen wird schnell weggeheiratet. Ihre Zahl ist so groß, dass der kluge und menschenfreundliche Leiter einer MTA-Schule die Aufnahme vom Nachweis eines Haushaltsjahres abhängig machte. Die Ärzte, die eine Assistentin heiraten, sollten schließlich nicht völliger hauswirtschaftlicher Unkenntnis ausgeliefert sein.“

Vermutlich stammt daher die selbstironische Übersetzung der MTA-Abkürzung als „Medizinertröst am Abend“. Noch im Jahr 2012 hat ein Professor der Radiologie den Trend bedauert, dass für die Radiologen keine guten MTRA mehr zu heiraten seien: entweder zu alt, oder zu hässlich oder mit einem MTRA verheiratet ...

Die **Teilung Deutschlands** machte auch nicht vor der Teilung der Berufsbildung halt. Die Folge war eine zweijährige, fachrichtungsgetrennte Ausbildung (ohne praktische Ausbildung, lediglich theoretischer und praktischer Unterricht) „im Westen“. Zusätzlich wurde die Fachrichtung Veterinärmedizin gesetzlich verankert.

Die selbstständige Berufsausübung wurde gänzlich untersagt.

In der ehemaligen DDR hingegen wurde 1974 ein Gesetz erlassen, in dem eine dreijährige, fachrichtungsgetrennte Ausbildung (inkl. praktischer Ausbildung) verankert wurde.

Der heute bestehende **MTA-Beruf** findet seine gesetzliche Regelung im **MTA-Gesetz** von 1993. Der Beruf besteht aus den **vier Fachrichtungen**:

1. Radiologie
2. Laboratoriumsmedizin
3. Funktionsdiagnostik
4. Veterinärmedizin

Die selbstständige Berufsausübung ist nicht mehr untersagt. Allerdings erschweren andere Gesetze (z. B. Röntgenverordnung) diesen Weg. Theoretisch kann jede MTA eine Praxis eröffnen und einen Arzt anstellen.

➤ **Wer mehr über die anderen Berufsgruppen erfahren möchte:** ► www.dvta.de oder ► www.mta-werden.de.

Das „höhere-Töchter-Image“ des Berufes bestand noch bis in die 1970er Jahre hinein und löste sich erst mit den Emanzipationsbewegungen langsam auf. Seitdem entwickelt sich ein eigenes Berufsverständnis, und die MTA werden sich ihrer Schlüs-

selbste im Gesundheitswesen mehr und mehr bewusst. Inzwischen finden auch Männer zunehmend den Weg an die MTA-Schulen. In einer nach wie vor männerdominierten Gesellschaft kann das nur gut für die Karrierechancen des Berufes sein.

Vom „Knöpfchendrucker“ hat sich der Beruf längst entfernt. Hochkomplexe Untersuchungen an Großgeräten, Begriffe wie KIS, RIS, PACS, DICOM, Systemadministration und Management bestimmen den Berufsalltag.

Radiologen, Nuklearmediziner und Radioonkologen sind gleichermaßen „aufgeschmissen“, wenn keine MTRA anwesend sind. Wer soll dann die Geräte bedienen? Selbst ausgebildete MTRA brauchen mindestens sechs Monate Einarbeitungszeit an einem MRT, um alle Untersuchungen sicher zu beherrschen.

Während durch die medizinisch-technische Entwicklung ein Krankenhaus ohne MTRA gar nicht mehr arbeitsfähig ist, hat sich der Begriff der „Assistenten“ hartnäckig gehalten. Und auch die schulische Ausbildung ohne Lohn ist ein Relikt aus alter Zeit. Heute wird das jedoch durch den Kostendruck im Gesundheitswesen erklärt. Die Schulform hat aber auch nicht zu unterschätzende Vorteile. Während z. B. Auszubildende der Gesundheits- und Krankenpflege auf den Stellenschlüssel einer Station angerechnet werden und dementsprechend quantitativ ihre Leistung bringen müssen, sind MTRA-Schüler zusätzlich zu den bestehenden Fachkräften eingeteilt und können mehr ausprobieren und lernen, statt einen Arbeitsplatz „abarbeiten“ zu müssen.

Aktuell wird diskutiert, ob und wie man den Beruf akademisieren kann. Selbst die Deutsche Röntgengesellschaft (DRG) fordert die **Weiterbildung auf akademischem Niveau**. Das ist deswegen so beachtlich, weil in allen anderen Gesundheitsfachberufen in Deutschland (Pflege, Physiotherapie etc.) auf dem Weg zu den Hochschulen erst einmal der Widerstand der Ärzte umgangen werden musste. Das unterstreicht die Bedeutung des Berufsstandes.

Selbst der Deutsche Wissenschaftsrat empfiehlt inzwischen die Akademisierung, wenn auch nur für bestimmte Aufgabenbereiche, wie Lehre, Leitung und Forschung. Eine der Begründungen gegen die vollständige Akademisierung ist der Berufszugang

über den erfolgreichen Realschulabschluss. Wenn man nur noch Abiturienten zur Ausbildung zulassen würde, so die Theorie, würde sich die Situation auf dem Arbeitsmarkt weiter verschärfen. Denn dort sind MTRA Mangelware. Heute ist bereits jede fünfte Stelle an den Krankenhäusern unbesetzt, Tendenz steigend!

Bereits in den 1930er Jahren war die Nachfrage nach MTA höher als das Angebot. Aus diesem Grund wurden Röntgegehilfen angelernt. Eine Entwicklung, die bis heute in der Zusatzausbildung „Röntgenschein“ für Medizinische Fachangestellte überlebt hat. 66 % der konventionellen Röntgenaufnahmen in Deutschland werden durch diese Berufsgruppe angefertigt. Das macht ca. 80 Mio. pro Jahr! Ungleich schwieriger dürfte allerdings die Anfertigung von Schnittbilduntersuchungen ohne MTRA sein. Ein zweiwöchiger Kurs klingt nicht nach einer adäquaten Vorbereitung - und das, wo die Zahlen für konventionelle Untersuchungen ab und für CT und MRT kontinuierlich zunehmen.

Auch wenn die Berufsgruppe noch nicht an die stringenten Karrierepläne anderer Berufe anknüpft, entwickeln sich die Aufstiegschancen des Berufes. Neben Tätigkeiten als Leitende MTA einer Abteilung, sind MTRA in der Industrie und anderen Bereichen gern gesehen (► Kap. 25).

Als MTRA des 21. Jahrhunderts kann man auf jeden Fall mit Selbstbewusstsein sagen:

„Ohne MTA keine Diagnostik, ohne Diagnostik keine Therapie!“

In Kürze

Der Beruf der MTRA entstand in Deutschland als reiner Frauenberuf. Damit war er nicht nur dem technischen Wandel unterworfen, sondern auch dem des Frauenbildes in der Gesellschaft. Noch heute kämpft der Beruf mit dem Frauenimage und der „Assistenz“ in der Berufsbezeichnung, obwohl die beruflichen Aufgaben selbstständig übernommen werden. Aktuell gibt es Bestrebungen, den Beruf weiterzuentwickeln und sogar auf ein akademisches Niveau zu bringen, wie es im Ausland schon lange üblich ist.

1.2 Gesetz über die Berufsausübung als technischer Assistent/technische Assistentin in der Medizin (MTA-G)

Das aktuell gültige MTA-Gesetz wurde am 02. August 1993 erlassen. Damals entstand die Notwendigkeit zur Gesetzesänderung zum einen durch die veränderten politischen Verhältnisse in Deutschland (in Ost und West gab es unterschiedliche Berufsgesetze). Zum anderen wurde die Gesetzesänderung schon seit längerem vom Deutschen Verband technischer Assistenten in der Medizin e. V. (seit 2012 Dachverband der Technologen/-innen und Analytiker/-innen in der Medizin Deutschland e. V.), medizinischen und ärztlichen Fachgesellschaften sowie den Bundesländern gefordert. Begründet wurden diese Forderungen in erster Linie dadurch, dass eine Anpassung des MTA-Gesetzes an die Entwicklung in der Medizintechnik und andere Gesetze für Gesundheitsfachberufe (damals bezeichnet als nicht-ärztliche Heilhilfsberufe) unumgänglich sei.

► Gründe für die Gesetzesänderung 1993

- Die Dauer der Ausbildung von 2 Jahren genügte nicht mehr, um neue Untersuchung- und Analysetechniken zu lehren.
- Der Berufszweig der Medizinisch-technischen Assistenten (MTA) für Funktionsdiagnostik (in der ehemaligen DDR seit 1976) musste in das Gesetz aufgenommen werden.
- Vorbehaltstätigkeiten der MTA mussten, zum besonderen Schutz der Patienten, definiert werden.
- Das Verbot der selbstständigen Berufsausübung sollte wegfallen.
- Die gemeinsame Grundausbildung sollte wegfallen, um den spezifischen Besonderheiten der Berufe gerecht zu werden.

Das **MTA-Gesetz** ist, wie alle Gesetz für die Gesundheitsfachberufe, ein **Bundesgesetz**. Das bedeutet, dass für ein solches Gesetz sowohl Bundesrat als auch Bundestag zustimmen müssen. Um überhaupt ein Gesetz zu verabschieden oder zu ändern,

muss eine Initiative eingebracht werden, i. d. R. von Vertretern der Länder in Bundestag oder Bundesrat. Nach vielen Abstimmungen, Abwägungen und Diskussionen entsteht dann ein neues Gesetz.

1.2.1 Die Abschnitte des MTA-Gesetz (MTA-G)

Was sagt nun das Gesetz aus, und welche Folgen hat es für den Berufsalltag? Das **MTA-Gesetz (MTA-G)** regelt alle vier MTA-Berufe. Um eine bessere Lesbarkeit zu ermöglichen, wird hier allerdings nur auf den Beruf der MTRA eingegangen.

Das MTA-G ist in **6 Abschnitte** geteilt, die verschiedene Belange rund um die Berufsausübung regeln.

Abschnitt I: Erlaubnis

Im § 1 des MTA-G steht, dass jeder, der die Berufsbezeichnung „Medizinisch-technische Radiologieassistentin“ oder „Medizinisch-technischer Radiologieassistent“ tragen möchte, eine **Erlaubnis** dazu benötigt. Diese wird von der zuständigen Länderbehörde erteilt und ist formal ein reiner Verwaltungsakt. Warum so viel Bürokratie?

Zum einen verhindert diese Regelung, dass sich jeder MTRA nennen darf. Wer ohne Berufserlaubnis den Berufstitel führt, muss mit einer Geldstrafe von bis zu 2500 € rechnen. Wichtiger ist aber, dass mit der Berufserlaubnis das Recht und die damit verbundene Verantwortung bestehen, die beruflichen Tätigkeiten selbstständig und ohne Aufsicht durch einen Arzt durchzuführen. Des Weiteren verpflichtet die Berufsbezeichnung zur sach- und fachkundigen Ausübung des Berufes und damit nicht nur zur Ausführung von „Hilfsdiensten“ für den Arzt, sondern sie befähigt auch dazu, fachliche Vorbehalte einzubringen (z. B. in Bezug auf die Methode zur Anfertigung von Röntgenaufnahmen).

§ 1 schreibt allerdings auch die Berufsbezeichnung gesetzlich fest, also dass der MTRA-Beruf ein Assistenzberuf ist. Das scheint nicht mehr zeitgemäß zu sein, da MTRA selbstständig ihre Tätigkeiten ausführen und nicht nur „assistieren“.

Was man erfüllen muss, um an solch eine **Berufserlaubnis** zu gelangen, ist in § 2 geregelt. Die

Erlaubnis ist, natürlich nur nach einem entsprechenden Antrag, dann zu erteilen, wenn:

- die **gesetzlich vorgeschriebene Ausbildung abgeleistet** und die **staatliche Prüfung bestanden** ist. Damit wird die fachliche Qualifikation bestätigt und der Gesetzgeber geht davon aus, dass ein/e MTRA weiß, was sie tut.
- man sich **keines Vergehens schuldig gemacht** hat, aus dem eine Unzuverlässigkeit zur Ausübung des Berufes abzuleiten ist. Durch diese Regelung sollen Straftäter an der Berufsausübung gehindert werden. Zum Nachweis benötigt der Antragsteller ein polizeiliches Führungszeugnis.
- der Antragsteller **körperlich und geistig gesund** ist und auch **keine Suchterkrankung** vorliegt. Der Nachweis der körperlichen Gesundheit und psychischen Stabilität unterstreicht die besondere Verantwortung gegenüber den Patienten. Den Nachweis darüber, ob eine bestehende Erkrankung eine Berufsausübung beeinflusst oder nicht (Kurzsichtigkeit hindert z. B. nicht am Röntgen, Hörgeräte aber am Betreten eines MRT-Raumes), erteilt meist ein arbeitsärztlicher Dienst. Ob auch andere und ggf. welche Ärzte diese Bescheinigung ausstellen, entscheidet die zuständige Behörde des jeweiligen Bundeslandes.

Diese Vorschriften dienen in erster Linie des Schutzes der Patienten, da der MTA-Beruf einem besonderen Stellenwert im Behandlungsprozess zukommt. MTRA haben darüber hinaus noch die Aufgabe mit ionisierender Strahlung zu arbeiten, was bei Falschanwendung zu einer Gefährdung der Patienten führen kann. Der Staat kommt damit seiner Verantwortung der Beachtung des Grundgesetzes Artikel 2 (Recht auf Unversehrtheit) nach.

Die Betonung der Bedeutung einer Berufserlaubnis bei gleichzeitiger Nicht-Erwähnung des Abschlusszeugnisses der staatlichen Prüfung bedeutet, dass für eine Berufsausübung ausschließlich die Berufserlaubnis eine Rolle spielt. Kann man diese nicht vorweisen, darf man den Beruf nicht ausüben. Die „Qualität“ des Abschlusszeugnisses bestimmt dagegen nur die „Qualität der Arbeitsstelle“.

Abschnitt II: Ausbildung

In diesem Abschnitt des Gesetzes wird auf grundlegende Aspekte der Ausbildung eingegangen, ohne ins fachliche Detail zu gehen. Dafür ist die Ausbildungs- und Prüfungsverordnung als Bestandteil des Gesetzes vorhanden.

§ 3 beschreibt das **Ziel der Ausbildung**. Demnach soll ein/e MTRA durch die Ausbildung dazu befähigt werden:

- » ... unter Anwendung geeigneter Verfahren in der Radiologischen Diagnostik und anderen bildgebenden Verfahren die erforderlichen Untersuchungsgänge durchzuführen sowie bei der Erkennung und Behandlung von Krankheiten in der Strahlentherapie und Nuklearmedizin mitzuwirken.

Das klingt abstrakt und nicht besonders vielsagend. An dieser Stelle wird lediglich ein kurzer Überblick über den Verantwortungsbereich des Berufes gegeben. Da der Gesetzgeber nicht weiß, wie sich die Medizin in den nächsten Jahren entwickeln wird, umgekehrt ein Gesetz aber möglichst lange seine Gültigkeit behalten soll, muss ein Interpretationsspielraum vorhanden sein, der gleichzeitig dazu zwingt, auf dem neuesten Stand der Wissenschaft und Technik zu arbeiten („Anwendung geeigneter Verfahren“). Festzuhalten ist, dass von „Befundung“ keine Rede ist, und die Formulierung „Untersuchungsgänge durchzuführen“ zum Ausdruck bringen soll, dass der/die MTRA nicht für die Gesamtuntersuchung allein verantwortlich ist.

Die **Ausbildungsdauer** ist in § 4 auf drei Jahre festgeschrieben. Darüber hinaus muss die Ausbildung an Krankenhäusern oder geeigneten medizinischen Einrichtungen stattfinden. Und damit ein/e MTRA nach der Ausbildung auch wirklich arbeiten **kann** und nicht nur berichtet, wie man laut Lehrbuch arbeiten **würde**, besteht der Gesetzgeber auf **theoretischen und praktischen Unterricht** sowie einer **praktischen Ausbildung**.

Damit man überhaupt an einer MTRA-Schule aufgenommen werden kann, muss man, nach § 5 MTA-G, die **gesundheitliche Eignung durch einen Arzt** und **mindestens einen Realschulabschluss** oder vergleichbaren Abschluss einer allge-

meinen Schulbildung nachweisen. Da die Bildung in Deutschland durch die einzelnen Bundesländer geregelt ist, existieren inzwischen viele Alternativen an möglichen Schulabschlüssen. Wer unsicher ist, sollte bei der Schulbehörde nachfragen.

Drei Jahre Ausbildung sind eine lange Zeit, in der man auch einmal krank sein kann. Um sicherzustellen, dass der überwiegende Teil der Ausbildungsveranstaltungen trotzdem wahrgenommen wird, hat der Gesetzgeber in § 6 den **Umgang mit Fehlzeiten** geregelt. Während der Ausbildung werden folgende Zeiten auf die Ausbildung angerechnet, müssen also nicht nachgeholt werden:

- Ferien, nach den Regelungen der jeweiligen Schule
- Ausbildungsunterbrechungen durch Schwangerschaft, Krankheit oder andere wichtige Gründe bis zu einer Gesamtzeit von 12 Wochen

Das heißt, in drei Jahren darf man insgesamt **60 Tage** fehlen. Das sind immerhin **vier Wochen pro Ausbildungsjahr**.

- **Wird die Fehlzeit überschritten, kann die zuständige Behörde die Zulassung zur Prüfung verweigern mit der Konsequenz, dass die MTA-Schule länger besucht werden muss.**

Diese Regelung gilt nicht für das vorgeschriebene Krankenhauspraktikum (Dauer ca. 230 Stunden).

- **Fehlt man während des Krankenhauspraktikums nur einen Tag, muss dieser nachgeholt werden.**

§ 7 regelt den „**Quereinstieg**“ in die MTRA-Ausbildung. Man kann bei der zuständigen Behörde einen Antrag stellen, um eine andere, bereits abgeschlossene Ausbildung in einem Gesundheitsfachberuf auf die Ausbildung anrechnen zu lassen. Zumindest in dem Maß, in dem es sich um gleiche Ausbildungsinhalte handelt, kann so Ausbildungszeit eingespart werden. In der Praxis ist das jedoch sehr schwer umzusetzen. Nur innerhalb der MTA-Berufe kann man sich noch anders entscheiden und eine begonnene, nicht abgeschlossene Ausbildung durch die Behörde anerkennen lassen, da die Grundlagenfächer nach der Ausbildungs- und Prüfungsverordnung (z. B.

Berufskunde, Anatomie) z. T. identisch sind. Selbst ein begonnenes, aber nicht abgeschlossenes Medizinstudium darf nicht angerechnet werden.

Der letzte Paragraph (§ 8) des Abschnittes Ausbildung beschreibt den **Erlass einer Ausbildungs- und Prüfungsverordnung** für die vier MTA-Berufe.

Abschnitt III: Vorbehaltene Tätigkeiten

In diesem Abschnitt, der die § 9 und 10 umfasst, werden die **Vorbehaltstätigkeiten und damit die Legitimationen für den Beruf** beschrieben.

Laut Gesetz dürfen MTRA folgende Tätigkeiten ausführen:

1. **Durchführung der technischen Arbeiten und Beurteilung ihrer Qualität in der Radiologischen Diagnostik und anderen bildgebenden Verfahren einschließlich Qualitätssicherung.**

D.h., die Frage ob eine Untersuchung durchgeführt werden muss, entscheidet der Arzt, der auch die Bilder befundet. Die MTRA sind für die Erstellung der Bilder zuständig und entscheiden, ob der Befunder auf dem Bild alles sehen kann, was er sehen muss. Dafür muss die Befähigung gegeben sein, als MTRA selbst auf dem Bild einiges erkennen zu können. Darüber hinaus liegt es in der Verantwortung der MTRA, dass die Bilder jederzeit in der notwendigen technischen Qualität erstellt werden können und die Patienten nicht zu viel Strahlung ausgesetzt sind. Das gilt für alle Bereiche der Vorbehaltstätigkeiten.

2. **Die technische Mitwirkung in der Strahlentherapie bei der Erstellung des Bestrahlungsplanes und dessen Reproduktion am Patienten einschließlich Qualitätssicherung.**

Laut Gesetz können MTRA alle Geräte in der Strahlentherapie bedienen und die technische Umsetzung der Bestrahlung realisieren. D. h. nicht, dass MTRA bestimmen wo und mit welcher Dosis ein Patient bestrahlt wird. Aber sie haben sicherzustellen, dass die Strahlung genau an der richtigen Stelle ankommt. Gerade im Bereich der Strahlentherapie spielt die Sorgfalt bei der technischen Einstellung eine sehr große Rolle, da unsachgemäß angewendete Strahlung zu schweren gesundheitlichen Schäden der Patienten führen kann.

3. Die technische Mitwirkung in der nuklearmedizinischen Diagnostik und Therapie einschließlich Qualitätssicherung.

Auch hier steht wieder die Bedienung der Technik und nicht die Legitimation oder Befundung einer Untersuchung bzw. Therapie im Mittelpunkt der beruflichen Tätigkeit der MTRA. Die MTRA sind in erster Linie für die Bereitstellung und Portionierung der notwendigen radioaktiven Materialien zuständig sowie für die notwendigen Messungen am Patienten.

4. Durchführung messtechnischer Aufgaben in der Dosimetrie und im Strahlenschutz in der Radiologischen Diagnostik, der Strahlentherapie und der Nuklearmedizin.

MTRA müssen Geräte nicht aufbauen oder reparieren, sie müssen aber in der Lage sein, die in ihrem Berufsbereich angewendete Strahlung zu messen und daraus Rückschlüsse für den Patienten zu ziehen. Darf ein Gerät noch verwendet werden oder wird durch den Einsatz dieses Gerätes das Personal oder der Patient gefährdet? Wann muss man einen Physiker oder Techniker hinzuziehen? Wer sich an die Diskussionen und Aufregung rund um den Atomreaktorunfall in Fukushima im Frühjahr 2012 erinnert, weiß, dass Strahlung ein sehr ernstes Thema ist! Und im medizinischen Bereich haben hier MTRA aufgrund ihrer Ausbildung eine besonders hohe Verantwortung.

MTRA sind die einzige Berufsgruppe, die mit der Ausbildung die gesetzlich vorgeschriebene **Fachkunde im Strahlenschutz** erwirbt, auf die an einer anderen Stelle noch einmal näher eingegangen wird (► Kap. 2).

Wenn all diese Tätigkeiten nur MTRA durchführen dürfen, welchen Sinn kommt dem „Röntgenschein“ für Medizinische Fachangestellte oder anderes Personal zu?

Das erklärt sich durch den § 10 des MTAG, der **Ausnahmen für die Vorbehaltstätigkeiten** definiert. Demnach dürfen approbierte Ärzte und Heilpraktiker die Vorbehaltstätigkeiten selbst ausführen. Das gleiche gilt für bestimmte Aufgaben, wenn sie Bestandteil der Ausbildung und Prüfung waren (z. B. das Bedienen der Röntgenanlagen in einem OP durch Operationstechnische Assistenten)

Tab. 1.1 Bundeslandspezifische zuständige Behörden

Bundesland	Zuständige Behörde
Baden-Württemberg	Regierungspräsident
Bayern	Regierung
Berlin	Landesprüfungsamt für Gesundheitsberufe
Brandenburg	Landesamt für Soziales und Versorgung, Abt. Landesgesundheitsamt, Dezernat Berufsrecht
Bremen	Senator, der für das Gesundheitswesen zuständig ist
Hamburg	Gesundheitsbehörde
Hessen	Regierungspräsident
Mecklenburg-Vorpommern	Landesprüfungsamt für Heilberufe
Niedersachsen	Bezirksregierung
Nordrhein-Westfalen	In Sachen Berufserlaubnis die Kreise und kreisfreien Städte
Rheinland-Pfalz	Bezirksregierung
Saarland	Minister, der für das Gesundheitswesen zuständig ist
Sachsen	Regierungspräsident
Sachsen-Anhalt	Landesamt für Versorgung und Soziales
Schleswig-Holstein	Landesprüfungsamt für Heilberufe
Thüringen	Landesverwaltungsamt Weimar

und für „sonstiges“ medizinisches Personal, wenn es unter ständiger Aufsicht eines Arztes steht, der eine entsprechende Fachkunde hat.

Für die Praxis bedeutet das, dass eine Medizinische Fachangestellte mit Röntgenschein eine Aufnahme anfertigen darf, wenn ein Arzt ihr dabei zuschaut. Die Anwesenheit einer MTRA genügt nicht, da eine MTRA keine Aufsichtsbefugnis besitzt. Ganz abgesehen davon, dass in der gängigen Arztausbildung die Einstelltechnik im Röntgen eine eher untergeordnete Rolle spielt, ergibt sich hier im Arbeitsablauf mitunter auch ein organisatorisches

■ **Tab. 1.2** Zusammenfassende Übersicht über die wichtigsten Paragraphen des MTA-Gesetzes

Paragraph	Kernpunkte
Abschnitt I	
1	Jeder, der die Berufsbezeichnung „Medizinisch-technische Radiologieassistentin“ oder „Medizinisch-technischer Radiologieassistent“ tragen möchte, benötigt dazu eine Erlaubnis. Diese wird von der zuständigen Länderbehörde erteilt und ist formal ein reiner Verwaltungsakt.
2	Hier werden die Bedingungen (Ausbildung und Abschluss, Straffreiheit, Gesundheit) zur Erlangung der Berufserlaubnis aufgeführt.
Abschnitt II	
3	Dieser § definiert das Ziel der Ausbildung (Durchführung der Untersuchungsgänge etc.).
4	Hier ist die Ausbildungsdauer von drei Jahren festgeschrieben.
5	Die gesundheitliche Eignung muss ärztlich bestätigt werden.
6	Hierdurch sind die Fehlzeiten (60 Tage) geregelt.
7	Dieser Paragraph regelt den Quereinstieg aus anderen Berufen in den MTA-Bereich.
8	Hier ist der Erlass einer Ausbildungs- und Prüfungsordnung beschrieben.
Abschnitt III	
9	Beide Paragraphen beschreiben Vorbehaltstätigkeiten (sowie deren Ausnahmen) und Legitimationen innerhalb des MTA-Arbeitsbereiches.
10	
Abschnitt IV	
11	Hier sind die Zuständigkeiten der Behörden geregelt.
Abschnitt V	
12	Dieser Paragraph hält die Rechtswidrigkeit der Berufsausübung ohne entsprechende Befähigung (§ 1 und 2) fest.
Abschnitt VI	
13	Diese Paragraphen widmen sich den Übergangsvorschriften (Anerkennung nach altem Gesetz, Anerkennung der Schulen etc.).
14	

Problem, z. B. bei der Besetzung von Nachtdiensten, da nicht in allen Abteilungen immer ein Arzt anwesend ist.

Abschnitt IV: Zuständigkeiten

In § 11 kann jeder nachlesen, dass für **Anträge und Entscheidungen rund um die Berufsausübung die Behörden der Länder** zuständig sind.

Die jeweils zuständigen Landesbehörden sind in

■ **Tab. 1.1** benannt.

Abschnitt V: Bußgeldvorschriften

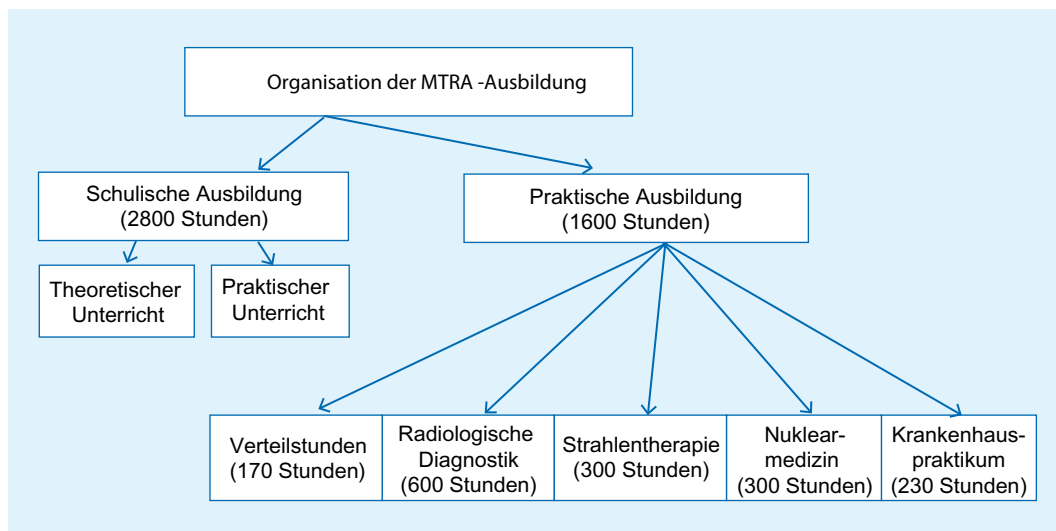
Wer eine **Berufsbezeichnung ohne Berufserlaubnis** führt, verübt nach § 12 MTA-G eine Ordnungs-

widrigkeit, die mit einem Bußgeld von bis zu 2500 € bestraft wird. Man muss also nicht ins Gefängnis und ist auch nicht vorbestraft. Welche sozialen und arbeitsrechtlichen Folgen das hat, wird hier allerdings nicht beschrieben.

Abschnitt VI: Übergangs- und Schlussvorschriften

§ 13 beschreibt die **berufliche Anerkennung der MTA**, die nach altem Gesetz, egal ob in der BRD der der DDR, ausgebildet wurden.

In § 14 wird festgelegt, wie mit den **Schulen** verfahren werden soll, die schon nach dem alten Gesetz eine staatliche Anerkennung hatten. § 15 regelt die



■ Abb. 1.1 Organisation der MTRA-Ausbildung

kalendarischen Daten, nach denen das alte Gesetz nicht mehr gilt, und das neue in Kraft tritt. Da das schon ein paar Jahre zurück liegt, wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

In ■ Tab. 1.2 sind noch einmal alle Paragraphen zusammengefasst.

In den 1980er Jahren haben sich Fachgesellschaften und Berufsverbände für eine Änderung des damaligen Gesetzes stark gemacht. Heute kämpfen die gleichen Vereinigungen wieder für eine Novellierung, da einige Inhalte des Gesetzes nicht mehr den aktuellen Berufoanforderungen entsprechen.

1.3 Ausbildungs- und Prüfungsverordnung für technische Assistenten in der Medizin (MTA-APrV)

Die aktuell gültige Version der Ausbildungs- und Prüfungsverordnung für Medizinisch-technische Assistenten wurde am **25. April 1994** ausgefertigt und trat einen Tag später in Kraft. Die letzten Änderungen wurden im August 2013 eingefügt.

Die APrV dient in erster Linie der Qualitätssicherung der Ausbildung und damit dem Schutz der Patienten. Sie ist, ähnlich dem MTA-Gesetz, in Abschnitte unterteilt und regelt die Ausbildung

in allen vier MTA-Berufen. Hier wird lediglich der Bereich der MTRA näher beleuchtet sowie eine thematische Einteilung der Abschnitte gewählt, die nicht der Reihenfolge innerhalb der Verordnung entsprechen muss.

1.3.1 Allgemeine Ausbildungsorganisation

Die MTRA-Ausbildung umfasst mindestens 2800 Stunden Theorie und 1600 Praxis (§ 1), ■ Abb. 1.1. Wie sich diese Stunden aufteilen, wird in Anlage 2 der Verordnung festgehalten.

Darüber hinaus ist festgelegt, dass den Schülern im Rahmen des Unterrichts die Möglichkeit gegeben werden muss, die für den Beruf notwendigen praktischen Fähigkeiten und Fertigkeiten zu entwickeln und einzüben. In welchem Umfang das zu geschehen hat, ist nicht beschrieben.

Dieser Zusatz verpflichtet die Schulen, Übungsräume bzw. Übungsmöglichkeiten anzubieten. In einigen anderen Berufen, z.B. Gesundheits- und Krankenpflege ist das nicht gefordert. Dadurch haben MTRA-Schüler den Vorteil, dass sie bei ihrem ersten Praxiseinsatz bereits Fähigkeiten erworben haben und diese anwenden und erweitern können.

Im Rahmen des sechswöchigen Krankenhauspraktikums sollen MTRA-Schüler für den MTA-Beruf

ruf relevante Arbeitsabläufe kennenlernen und in für den Beruf bedeutsamen Verrichtungen aus dem Bereich der Gesundheits- und Krankenpflege unterwiesen werden. Allgemein wird das als „Pflegepraktikum“ verstanden. Der Gesetzestext fordert allerdings nicht den Einsatz ausschließlich im Bereich der Pflege. Auch der Einsatz in einem Funktionsdienst ist möglich, sofern die notwendigen Tätigkeiten dort erlernt werden können. Ausgeschlossen ist das Praktikum im Bereich der ambulanten Pflege.

Wie bereits im MTA-G beschrieben, muss die regelmäßige Teilnahme an den Ausbildungsveranstaltungen durch den Schüler nachgewiesen bzw. durch die Schule bescheinigt werden. Der Nachweis der Leistungen ist in der Verordnung nicht beschrieben. Die Regelungen zu Zensuren und Zeugnissen legen die Schulen fest.

1.3.2 Staatliche Abschlussprüfung

■ Wie läuft die Prüfung im Allgemeinen ab?

Um die Ausbildung abzuschließen und damit eine Berufserlaubnis zu erhalten, muss jeder Schüler am Ende einen schriftlichen, mündlichen und praktischen Prüfungsteil bestehen (§ 2). Dabei unterteilt sich die **schriftliche Prüfung in zwei Teile, die mündliche und praktische jeweils in vier Einzelprüfungen**.

Die Prüfung ist an der Schule abzulegen, an der auch die Ausbildung erfolgte. Ausnahmen von dieser Regel kann nur die zuständige Prüfungsbehörde (► Abschn. 1.2) aussprechen.

- **Ein Schulwechsel innerhalb der Ausbildung ist möglich. Allerdings ist der Wechsel durch die verschiedenen Länderregelungen und die unterschiedlichen Organisationsformen der MTRA-Schulen erschwert.**
Die Schulen entscheiden im Einvernehmen mit dem Prüfungsamt, ob und welche Auflagen erfüllt werden müssen, um an einer anderen Schule die Ausbildung fortzuführen.

Darüber hinaus ist festgelegt, wie sich der Prüfungsausschuss zusammensetzen muss bzw. welche Mindestqualifikationen Prüfer haben müssen (§ 3). So muss z. B. die praktische Prüfung immer min-

destens von einer/m MTRA abgenommen werden, und ein Arzt muss Mitglied des Prüfungsausschusses sein, egal aus welchem Fachgebiet.

Ebenso wenig werden Aussagen über die notwendige Qualifikation der Lehrkräfte an einer MTA-Schule gemacht. Das unterliegt den einzelnen Länderbehörden. So darf man in einigen Bundesländern nur mit einem abgeschlossenen Hochschulstudium hauptamtlich an einer MTA-Schule unterrichten, in anderen Ländern genügt eine pädagogische Weiterbildung oder der Nachweis der Berufserlaubnis als MTRA.

■ Wann wird man zur Prüfung zugelassen?

Jeder Prüfling muss einen schriftlichen Antrag auf die Zulassung zur Prüfung bei der zuständigen Behörde stellen, über welchen der Prüfungsvorsitzende zu entscheiden hat (§ 4).

Diesem Antrag sind beizufügen:

- Beglaubigung von Personalausweis oder Reisepass
- Bescheinigung über die Teilnahme an den Ausbildungsveranstaltungen

(Bei einer Überschreitung der Fehlzeiten wird die zuständige Behörde nur in Ausnahmefällen eine Zulassung zur Prüfung genehmigen.)

Wenn diese Unterlagen in Ordnung sind, werden die Prüfungstermine festgelegt und dem Prüfling spätestens zwei Wochen vor der Prüfung schriftlich mitgeteilt.

■ Wann findet die Prüfung statt?

Die staatliche Abschlussprüfung soll nicht früher als zwei Monate vor dem Ende der Ausbildung liegen (§ 4). Damit ist eine Ausbildungsverkürzung nicht möglich, und auch das Ablegen einzelner Prüfungsbestandteile im Verlauf der Ausbildung wird dadurch unterbunden. Darüber hinaus sollen die praktischen Prüfungsteile innerhalb von 4 Wochen abgeschlossen sein. Welche der Prüfungen am Anfang oder am Ende durchgeführt wird, ist nicht gesetzlich geregelt.

■ Wie sieht die Notengebung aus?

Wie man es i. d. R. aus den allgemeinbildenden Schulen gewöhnt ist, werden die Leistungen folgendermaßen benotet (§ 6):

Notengebung

- „Sehr gut“ (1), wenn die Leistung den Anforderungen in besonderem Maße entspricht,
- „Gut“ (2), wenn die Leistung den Anforderungen voll entspricht,
- „Befriedigend“ (3), wenn die Leistung im Allgemeinen den Anforderungen entspricht,
- „Ausreichend“ (4), wenn die Leistung zwar Mängel aufweist, aber im Ganzen den Anforderungen noch entspricht,
- „Mangelhaft“ (5), wenn die Leistung den Anforderungen nicht entspricht, jedoch erkennen lässt, dass die notwendigen Grundkenntnisse vorhanden sind, und die Mängel in absehbarer Zeit behoben werden können,
- „Ungenügend“ (6), wenn die Leistung den Anforderungen nicht entspricht und selbst die Grundkenntnisse so lückenhaft sind, dass die Mängel in absehbarer Zeit nicht behoben werden können.

Bestanden hat man dann, wenn man alle Prüfungsbestandteile erfolgreich absolviert hat (mindestens „ausreichend“). Im Abschlusszeugnis werden diese Noten dann ausgewiesen und für den schriftlichen, mündlichen und praktischen Teil je zu einer Gesamtnote zusammengefasst. Diese ergibt sich i. d. R. aus dem arithmetischen Mittel der Einzelnoten (§ 7).

Eine Aussage darüber, ob man bestanden hat oder nicht, macht nur der **Prüfungsvorsitzende am Ende aller Prüfungen**. Bis dahin muss sich der Prüfling gedulden und die Nerven bewahren.

Sollte man einzelne Prüfungsteile nicht bestanden haben („ungenügend“ oder „mangelhaft“), können diese **innerhalb eines Jahres wiederholt** werden.

■ Wie sieht der schriftliche Prüfungsteil aus?

Der schriftliche Teil der Prüfung (§ 15) gliedert sich in zwei Teile, **Fächergruppe 1 und Fächergruppe 2**. An einem Tag darf jeweils nur eine Fächergruppe geprüft werden.

Der **erste Teil dauert 180 Minuten** und beinhaltet die **Grundlagenfächer Mathematik, Statistik,**

EDV und Dokumentation, Physik, Anatomie und Physiologie.

Für **Fächergruppe 2** stehen **240 Minuten** zur Verfügung. Sie umfasst die sog. Hauptfächer **Radiologische Diagnostik** und andere bildgebende Verfahren, **Strahlentherapie, Nuklearmedizin und Strahlenphysik, Dosimetrie, Strahlenschutz.**

Auch für Schulen, an denen nicht mehr im Fächerkanon ausgebildet wird, gilt, dass innerhalb der Fächergruppen Fragen aus den jeweiligen Themengebieten gestellt werden müssen. Was genau thematisch dort zu finden ist, kann in der APrV, Anlage 2 nachgelesen werden.

Im Gesetz ist eine Aufteilung der Fächer hinsichtlich der Punktegewichtung nicht vorgegeben. Die zuständigen Behörden haben jedoch entsprechende Vorgaben an die Schulen gemacht. Damit entspricht die Punktegewichtung eines Faches innerhalb der Prüfung der Gewichtung der Gesamtstunden innerhalb der Ausbildung.

Auch über die Frageform (offene Fragen oder Multiple-Choice-Fragen) lässt sich das Gesetz nicht aus. In den letzten Jahren werden die Schulen von Seiten der Prüfungsämter zunehmend aufgefordert, keine oder weniger MC-Fragen in den Prüfungen zu stellen, da diese aus rechtlicher und pädagogischer Sicht zunehmend zu Problemen oder gar Klagen geführt haben.

Für den schriftlichen Bereich sind die Notenbezeichnungen in zu erreichende Punktzahlen und Prozente „übersetzt“ worden. Diese sind jedoch nicht einheitlich in allen Bundesländern und werden von der jeweils zuständigen Behörde festgesetzt.

Zur Bildung der Gesamtnote der schriftlichen Prüfung wird die **Zensur der Fächergruppe 1 einfach und die der Fächergruppe 2 doppelt gewertet.**

Die schriftliche Prüfung ist bestanden, wenn jeder Teil mindestens mit „ausreichend“ bewertet wurde.

Bei einem Nichtbestehen **eines schriftlichen Prüfungsteiles** muss **nur dieser Teil wiederholt** werden (gültig seit 01.01.2014).

■ Wie sieht der mündliche Prüfungsteil aus?

Die mündliche Prüfung (§ 16) erstreckt sich ebenfalls über die vier Hauptfächer, wie in Fächergruppe 2. Dabei steht es der Schule frei, ob sie eine

Gruppenprüfung mit maximal 5 Prüflingen oder Einzelprüfungen durchführen möchte.

Zu jedem Fach darf maximal **10 Minuten** geprüft werden. Dabei ist keine zusätzliche Vorbereitungszeit vorgesehen. Es ist möglich, dass jeden Tag eine Einzelprüfung stattfindet oder eine große Prüfung von 40 Minuten, wobei eben auf jedes Einzelfach nur 10 Minuten fallen dürfen. Hauptsache, jeder Prüfling einer Klasse hat die gleichen Voraussetzungen.

Die Prüfung ist bestanden, wenn die gesamte mündliche Prüfung mit „ausreichend“ gewertet wurde und nur ein Fach mit „mangelhaft“. Heißt also, man kann einen „Fünfer“ ausgleichen.

■ Wie sieht der praktische Prüfungsteil aus?

Der gesetzliche Wortlaut der praktischen Prüfungen, die sich ebenfalls über die Hauptfächer erstrecken, lässt einen großen Handlungsspielraum zu. Im Grunde genommen muss der Prüfling stichprobenartig nachweisen, dass er im Beruf bestehen kann und auch weiß, was er tut. Dazu gehören neben den eigentlichen Einstellungen und Untersuchungen natürlich auch die Dokumentation und hygienische Maßnahmen sowie die Anwendung der möglichen Strahlenschutzmaßnahmen.

Des Weiteren muss ein Prüfling sein Handeln jederzeit begründen können und am Ende jeder Prüfung eine **kurze Aufzeichnung** über seine Arbeitsgänge (Prinzip, Arbeitsgang und Fehlermöglichkeiten) anfertigen.

In **Radiologischer Diagnostik** ist festgelegt, dass jeder Prüfling **zwei Standardaufnahmen in zwei Ebenen und eine Spezialaufnahme** am Phantom/ einer Puppe oder Patienten anfertigen muss. Allerdings ist nirgends nachzulesen, was man unter einer Spezialaufnahme zu verstehen hat. Und ist es ein Unterschied, ob man einen echten Patienten oder eine Puppe röntgt?

Darüber hinaus muss eine Aufgabe bei einem **Spezialuntersuchungsverfahren** durchgeführt werden. Auch hier fehlt eine Definition, was darunter zu verstehen ist. Sind CT und MRT nicht schon Standardverfahren?

In der **Strahlentherapie** muss der Prüfling eine **Aufgabe aus der Anwendung des Bestrahlungsplanes und zwei Einstellungen am Linearbeschleuniger** am Phantom/Puppe oder einem Pati-

enten durchführen. Welche Bestrahlungstechniken Anwendung finden, ist schwer zu definieren, da im Gesetz Techniken stehen, die heute nicht mehr oder kaum noch angewendet werden.

In der **Nuklearmedizin** muss der Prüfling eine **Funktions- oder Lokalisationsuntersuchung mit dynamischer Studie** durchführen und auswerten sowie das Radiopharmakon verarbeiten. Außerdem muss er die erforderlichen Messungen für eine Funktions- oder in-vitro-Untersuchung durchführen und auswerten.

Im Rahmen der Prüfung in **Dosimetrie und Strahlenschutz** hat der Prüfling insgesamt drei Aufgaben auszuführen. **Zwei Aufgaben sind Messungen aus den Bereichen Dosimetrie und Strahlenschutz.** Eine Aufgabe bezieht sich auf eine **qualitätssichernde Maßnahme** entweder aus der **Radiologischen Diagnostik oder der Strahlentherapie oder der Nuklearmedizin.**

Von Konstanzprüfungen an einer Röntgenröhre über die Bestimmung einer Ortsdosis in einem Wartezimmer bis hin zu einem Tagetest/Morning-Check in der Strahlentherapie kann also alles dabei sein. Und zu jeder Aufgabe müssen die Ergebnisse ausgewertet und interpretiert werden.

Die praktische Prüfung ist bestanden, wenn jeder Teil mit mindestens „ausreichend“ bewertet wurde.

Als oberster Grundsatz (Recht auf Unversehrtheit, Art. 2 GG) gilt, dass keine **Patientengefährdung** vorliegen darf. Dazu gehört für MTRA in erster Linie die Vermeidung einer unnötigen und durch die/den MTRA verschuldete Strahlenexposition am Menschen.

Beim Nichtbestehen einer Einzelprüfung im praktischen Prüfungsteil muss **nur diese Prüfung wiederholt** werden. In diesem Fall wird die Zulassung zur Wiederholungsprüfung erteilt, wenn der Prüfling noch einmal an der **praktischen Ausbildung teilnimmt**. Wie lang – das bestimmt der Prüfungsvorsitzende. (§ 7).

➤ **Die Probleme, die in den einzelnen Prüfungsbestandteilen beschrieben sind, ergeben sich aus den technischen Entwicklungen. Aus diesem Grund wird insbesondere von den Berufsverbänden eine Novellierung der APv gefordert.**

■ Was passiert, wenn man nicht zur Prüfung erscheint?

Ein Prüfling kann auch beschließen, von der Prüfung zurückzutreten. Das geht allerdings nur **schriftlich unter Angabe der Gründe** (§ 8). Wenn der Prüfungsvorsitzende die Gründe anerkennt, gilt die Prüfung als **nicht unternommen**, und der Prüfling kann zu einem späteren Zeitpunkt wiederkommen. Zur Einschätzung eines wichtigen Rücktrittsgrundes kann die Vorlage einer ärztlichen Bescheinigung verlangt werden. Mit anderen Worten: es muss ein ärztliches Attest vorliegen, aus dem hervorgeht, dass man zu der jeweiligen Prüfung nicht antreten kann. Eine einfache Arbeitsunfähigkeitsbescheinigung genügt nicht.

Wird keine Genehmigung für den Rücktritt erteilt oder werden keine Gründe angegeben, dann gilt die Prüfung als nicht bestanden.

Sollte Marco am Morgen einer Prüfung z. B. verschlafen, wird § 9 zur Abwägung der Folgen bemüht. Dort steht, dass bei einem **Versäumnis oder Abbruch der Prüfung** diese als **nicht bestanden** gewertet wird. Eine **Ausnahme sind wichtige Gründe**, die dann wieder unvermittelt dem Prüfungsamt mitgeteilt werden müssen, z. B. ein Unfall auf dem Weg zur Prüfung (mit polizeilicher Bestätigung) oder offensichtliche gesundheitliche Gründe innerhalb der Prüfung.

■ Was darf man auf keinen Fall machen?

Wer den **Ablauf einer Prüfung maßgeblich stört** oder einen „Spickzettel“ benutzt, begeht lt. § 10 einen Ordnungsverstoß oder Täuschungsversuch. In solch einem Fall gilt die Prüfung als **nicht bestanden**. Allerdings hat der Prüfungsvorsitzende nur bis zum Abschluss aller Prüfungen, also dem letzten Prüfungstag, Zeit, eine solche Entscheidung auszusprechen.

■ Wie wird das Ganze dokumentiert?

Über den Prüfungsverlauf selbst muss eine **Niederschrift** angefertigt werden, aus der hervorgeht was geprüft wurde, wie der Prüfungsverlauf war und welches Ergebnis erreicht wurde (§ 5). Darüber hinaus sind hier sog. Unregelmäßigkeiten zu benennen. Das kann z. B. der Defekt eines relevanten Gerätes sein. An Hand der Niederschrift muss der Prüfungsvorsitzende nachvollziehen können, ob

der Prüfling die notwendigen Prüfungsbedingungen hatte. Das kann im Streitfall über die Berufszulassung und das Ergebnis der Prüfung entscheiden und wird daher besonders sorgfältig durch die Schulen angefertigt.

Nach der Prüfung hat Marco natürlich die Möglichkeit, **auf Antrag Einsicht** in seine Prüfungsunterlagen zu nehmen. Die schriftlichen Arbeiten sind drei Jahre, die Prüfungsniederschriften sogar zehn Jahre lang aufzubewahren (§ 11). In den Prüfungsniederschriften werden allerdings nur in Kurzform die Themen, Punkte und Zensuren sowie ggf. Abweichungen und Auflagen beschrieben.

In der Regel hat jede Schule, im Einvernehmen mit dem zuständigen Prüfungsamt und innerhalb der gesetzlichen Möglichkeiten, seine Prüfungsregeln selbst festgelegt. Ein bundesweiter Vergleich der Ausbildung ist damit sehr schwer.

In den letzten beiden Abschnitten der APrV (§§ 24–26) ist beschrieben, dass bei bestandener Prüfung die Berufserlaubnis zu erteilen ist, wie mit Sonderregelungen der Anerkennung für andere EU-Bürger umzugehen ist und dass die Verordnung am 25. April 1993 in Kraft getreten ist.

Vergleicht man die Ausbildungs- und Prüfungsverordnung mit den Entwicklungen in der Radiologie und den anderen technischen Bereichen der Medizin, ist zu verstehen, warum verschiedene Interessensvertreter auf eine Novellierung warten.

1.4 Ausbildungsrelevante Gesetze und Verordnungen

Neben den bereits benannten Rechtsvorschriften und dem gesondert regeltem Strahlenschutz spielen noch viele andere Rechtsgrundlagen eine Rolle für die MTRA-Ausbildung. Zum einen arbeiten und lernen MTRA-Schüler im Gesundheitswesen, zum anderen werden Auszubildende und Schüler durch den Gesetzgeber gesondert geschützt, besonders wenn sie noch minderjährig sind.

Aus diesem Grund wird hier nur ein exemplarischer Überblick über relevante Gesetze und Verordnungen gegeben.

1.4.1 Strahlenschutz

Für MTRA-Schüler gelten besondere Regelungen des Strahlenschutzes, die in der **Röntgenverordnung (RöV)** und **Strahlenschutzverordnung (StrSchV)** festgehalten sind.

Diese beiden Verordnungen bilden eine Rechtsgrundlage für den Beruf und werden damit noch detailliert behandelt (► [Abschn. 2.4](#)). Aus diesem Grund sind hier nur ein paar Punkte aufgezählt, die besonders für MTRA-Schüler relevant sind:

- MTRA-Schüler müssen personendosimetrisch (i. d. R. Filmplaketten) während ihres Einsatzes in einer Abteilung (Radiologie, Strahlentherapie oder Nuklearmedizin) überwacht werden.
- Normalerweise haben Minderjährige keinen Zugang zu Kontrollbereichen. Eine Ausnahme bilden MTRA-Schüler zum Zweck der Ausbildung.
- MTRA-Schüler dürfen Strahlung (an Röntengeräten der Ausbildungsstätte) nur auslösen, wenn sie entsprechend in das Gerät eingewiesen und belehrt wurden und eine Lehrkraft anwesend ist.
- MTRA – Schüler dürfen Strahlung am Menschen nur nach Anweisung und unter Aufsicht eines Arztes mit Fachkunde auslösen. Hier gilt „unter Aufsicht“ als Anwesenheit in Rufweite.
- MTRA-Schüler in externen Einrichtungen, in denen sie ihre praktische Ausbildung absolvieren, unterliegen den Anweisungen der dortigen Strahlenschutzbeauftragten.
- Strahlenschutzbelehrungen und damit verbundene medizinische Untersuchungen sind zu dulden.

Darüber hinaus haben die zuständigen Behörden in den einzelnen Bundesländern die Möglichkeit, weiterführende Maßnahmen zu bestimmen.

1.4.2 Infektionsschutz und Hygiene

In diesem Bereich existieren viele Einzelbestimmungen, da es keine einheitliche Regelung von Hygienevorschriften in der Bundesrepublik gibt. Die bestehenden Regelungen dienen in erster Linie dem Gesundheitsschutz und der Arbeitssicherheit.

Gesetzlich geregelt ist der Schutz der Bevölkerung vor Infektionskrankheiten durch das **Infektionsschutzgesetz (IfSG)**. Es geht aus dem ehemaligen Seuchenrecht hervor und regelt insbesondere die Verhütungsmaßnahmen und das Meldewesen von Infektionskrankheiten bis hin zu Entschädigungsregelungen. Zu den meldepflichtigen Erkrankungen gehören u. a. Diphtherie, Tollwut und Masern.

In diesem Zusammenhang muss jeder Arbeitnehmer an arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen (mind. zu Beginn eines Arbeits-, Ausbildungsverhältnisses) teilnehmen. Diese dienen dem Schutz der Patienten, indem sichergestellt wird, dass kein medizinisches Personal mit ansteckenden Krankheiten am Patienten arbeitet (vgl. Gefahrstoffverordnung § 28 und Biostoffverordnung § 5).

Aus hygienischer Sicht besonders relevant ist die „**Richtlinie für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention**“, des Robert-Koch-Institutes (RKI, ► [Abschn. 11.5](#)) In Krankenhäusern, in denen es i. d. R. jede Menge Dienstanweisungen und Betriebsvereinbarungen gibt, wird die Einhaltung von solchen Vorschriften über das Arbeitsrecht kontrolliert. So kann eine Missachtung der Dienstvorschriften disziplinarische Folgen bis hin zur Kündigung haben. Auch MTRA-Schüler sind also gut beraten, sich mit den geltenden Vorschriften und den Folgen der Nichteinhaltung auseinander zu setzen. Je nach Schulform und Träger der Schule kann es dazu unterschiedliche Regelungen geben.

Darüber hinaus gelten **Unfallverhütungsvorschriften** verbindlich für Arbeitgeber, Arbeitnehmer und damit auch für MTRA-Schüler. Diese betreffen insbesondere die Bereitstellung und Benutzung von Hygieneartikeln und Materialien, z. B. Desinfektionsmittel und Handschuhe.

Neben den wichtigsten Hinweisen im Kasten wird das Thema Hygiene und Infektionsschutz im ► [Abschn. 11.5](#) vertiefend behandelt.

➤ Wichtige Vorschriften zur Hygiene und Infektionsschutz im Umgang mit Patienten

- **Händehygiene je nach Einsatz (hygienische oder chirurgische Händedesinfektion)**
- **saubere, kurze, unlackierte Fingernägel**
- **Haare über Schulterlänge sind zusammengebunden**

- **kein Schmuck o. ä. an Händen und Unterarmen (auch kein Ehering/Uhr)**
- **keine langen Ketten oder Ohrringe**
- **geschlossene, desinfizierbare, rutschfeste Schuhe, die keine Straßenschuhe sind**
- **saubere, geschlossene Kittel/Schutzkleidung, die kochbar ist**
- **kein Kontakt mit Patienten o. ä. bei vorliegender Durchfallerkrankung**

Neben den möglichen arbeitsrechtlichen Folgen bei Nichtbeachtung von Hygienemaßnahmen, kann im Einzelfall sogar ein strafrechtliches Verfahren daraus resultieren. So können Gerichte auf einen groben Behandlungsfehler durch mangelnde Hygiene entscheiden, womit eine sog. Beweislastumkehr eintritt. Das bedeutet, dass dann nicht mehr der Patient/Kläger nachweisen muss, dass er durch einen Hygienefehler zu Schaden gekommen ist, sondern der Beklagte muss nachweisen, dass sein Handeln keine Ursache für eine Gesundheitsschädigung war.

Grobe Behandlungsfehler im Bereich Hygiene (exemplarisch)

- unterlassene Händedesinfektion
- Unterlassung der Zwischendesinfektion bei Patientenwechsel (bes. im OP-Bereich)
- kein Handschuhwechsel trotz Perforation (im sterilen Bereich, z. B. Angiographie)
- Nichteinhaltung des Desinfektionsplanes

1.5 Arbeitsschutz

Hierzu gehören mehrere Gesetze und Verordnungen. Man unterscheidet zwischen dem **gesetzlichen** und dem **autonomen Arbeitsschutz**.

Der gesetzliche Arbeitsschutz ist unmittelbar durch den Staat geregelt. Der autonome Arbeitsschutz beruht auf den Selbstverwaltungsorganen der Arbeitswelt, bes. den Berufsgenossenschaften. Berufsgenossenschaften sind Träger der gesetzlichen Unfallversicherungen. Ihre Aufgaben sind:

- die Überwachung der Maßnahmen zur Verhütung von Arbeitsunfällen, Berufskrankheiten,

- arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren und die Umsetzung von Erste-Hilfe-Maßnahmen,
- Beratung der Unternehmen und Beschäftigten zum betrieblichen Unfallschutz,
- Erbringung der Leistungen der gesetzlichen Unfallversicherung, z. B. nach Wegeunfällen,
- Erlass von Unfallverhütungsvorschriften.

Jeder Betrieb muss seine Mitarbeiter, zu denen auch Auszubildende und Schüler gehören, gesetzlich unfallversichert haben. In aller Regel bekommt man davon gar nichts mit. Es sei denn, man hat z. B. einen Wegeunfall auf dem Weg zur Arbeit. Dann muss man bei dem behandelnden Arzt seine zuständige Berufsgenossenschaft angeben (erfährt man vom Arbeitgeber, dem Träger der MTRA-Schule).

Ein weiterer Teil des Arbeitsschutzes ist der **Arbeitnehmerschutz**. Er dient dem Schutz eines Arbeitnehmers, indem Gefahren, die von der Arbeit selbst ausgehen, beseitigt oder gemindert werden. Damit wird die Fürsorgepflicht eines Arbeitgebers gegenüber seinen Arbeitnehmern konkretisiert. Die Einhaltung der Vorschriften wird von Gewerbeaufsichtsamtern, Ämtern für Arbeitsschutz und den Berufsgenossenschaften überwacht.

Darüber hinaus gibt es noch das **Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)**, welches die Arbeit im betrieblichen Geschehen betrifft. Es gilt für alle beruflichen Tätigkeitsbereiche (Fabriken, öffentlicher Dienst, Selbstständige etc.) und dort für alle Arbeitnehmer und die zur Berufsausbildung Beschäftigten.

Folgende **Grundsätze** haben die Arbeitgeber umzusetzen:

- Gefährdungen vermeiden bzw. gering halten
- Gefahren an der Quelle bekämpfen
- Stand von Medizin und Technik berücksichtigen
- Objektive Maßnahmen haben Vorrang
- Geeignete Arbeitsanweisungen erteilen
- Keine isolierten Maßnahmen ergreifen
- Besonders Schutzwürdige berücksichtigen
- Gleichbehandlungsgrundsätze beachten

Das bedeutet nicht, dass ein Arbeitgeber allein für die Sicherheit im Betrieb verantwortlich ist. Die Beschäftigten sind für ihre Arbeitssicherheit mitverantwortlich, in dem sie:

- die eigene Sicherheit und Gesundheit gemäß den Weisungen des Arbeitgebers beachten,
- die Sicherheit und Gesundheit anderer beachten, die von ihren Handlungen betroffen sind (Patienten!),
- die persönliche, gestellte Schutzausrüstung bestimmungsgemäß verwenden (Dosimeter, Schilddrüsenschutz),
- Geräte, Arbeitsstoffe etc. ordnungsgemäß verwenden (Hygiene),
- den Arbeitgeber bei den Schutzmaßnahmen unterstützen und
- festgestellte Gefahren melden.

Im Gegenzug muss der Arbeitgeber auf Vorschläge seiner Mitarbeiter eingehen (Vorschlagsrecht) und es sich gefallen lassen, wenn der Mitarbeiter unzureichende Schutzmaßnahmen an die zuständige Behörde melden (Informationsrecht).

Aus der Vielzahl der Verordnungen, die dem Arbeitsschutz dienen, wird hier exemplarisch nur das **Medizinproduktegesetz (MPG)** und Betreiberverordnung behandelt, da diese große Auswirkungen auf das Tätigkeitsfeld der MTRA haben.

Das Gesetz dient der Umsetzung europäischer Vorschriften in nationales Recht. Ein Ziel ist die „Verkehrsfähigkeit“ unterschiedlicher Produkte im Warenverkehr der EU-Mitgliedsstaaten, auch erkennbar an der CE-Kennzeichnung. Es ist einleuchtend, dass solche Regelungen notwendig sind, schließlich werden viele medizinische Materialien in anderen Ländern hergestellt.

Als **Medizinprodukte** gelten **alle Instrumente, Apparate, Vorrichtungen, Stoffe und Zubereitungen**, die eine einwandfreie Anwendung o. g. Materialien am Menschen dienen.

Obwohl es vor diesem Hintergrund einfacher ist, aufzuzählen, was NICHT unter das MPG fällt (Arzneien, Kosmetika, Blut, Transplantate, persönliche Schutzausrüstung), sind hier einige Beispiele:

- Pflgemittel, Knochenzement
- Aktive und nichtaktive Implantate (Herzschrittmacher, Gelenkprothesen ...)
- Ärztliche und chirurgische Instrumente (Klemmen, Spritzen, Katheter ...)
- Beatmungsgeräte, Narkose- und Sauerstoffgeräte
- Sehhilfen und Hörgeräte

- Verbandsmaterial
- **Strahlen abgebende Medizinprodukte (Röntgengeräte)**
- Medizinische Textilien (OP-Kittel)
- Notfallausrüstung
- **Desinfektionsmittel, Reinigungsmittel**

Medizinprodukte dürfen nur betrieben werden, wenn weder Anwender noch Patienten oder Dritte durch sie gefährdet werden könnten. Verantwortlich dafür ist der Betreiber eines Medizinproduktes, in unserem Fall also in aller Regel das Krankenhaus oder der Eigentümer einer Arztpraxis.

Der Betreiber ist dafür verantwortlich, alle organisatorischen Maßnahmen zum einwandfreien Betrieb von Medizinprodukten sicher zu stellen. Dazu gehört auch die Bereitstellung von Lagerräumen oder die Sicherstellung der Einarbeitung der Mitarbeiter.

MTRA sind Anwender von Medizinprodukten und müssen in den Gebrauch eingewiesen bzw. dafür ausgebildet werden. Darüber hinaus ist der Anwender verpflichtet, sich von dem Zustand der Medizinprodukte zu überzeugen, mit denen er arbeitet. Dazu gehört z. B. die Überprüfung des Verfallsdatums von Verbandsmaterial.

Aus arbeitsrechtlicher Sicht darf ein Arbeitnehmer sogar die Arbeit verweigern, wenn er den Arbeitgeber darauf aufmerksam gemacht hat, dass etwas nicht in Ordnung ist und der Arbeitgeber nicht darauf reagiert.

Laut MPG müssen die Hersteller von Medizinprodukten sicher stellen, dass diese, je nach Anwendungsbereich, keimarm bzw. steril zur Anwendung kommen können. Der Betreiber hat dafür zu sorgen, dass entsprechende Aufbereitungsmaßnahmen bei ihm durchgeführt werden können. Da es unterschiedliche Desinfektionsarten und auch unterschiedliche Materialien der Medizinprodukte gibt, sollte sich auch ein Anwender (in unserem Fall die MTRA) darüber informieren, welche Maßnahme bei welchem Produkt Anwendung findet. So mag nicht jede zu desinfizierende Oberfläche ein aggressives Desinfektionsmittel, und nicht jeder Katheter sollte „ausgekocht“ werden.

Weitere Rechtsvorschriften, die den Umgang mit Medikamenten und Kontrastmitteln betreffen werden im ► **Abschn. 8.8** behandelt. Die Thematik des Arbeitsrechtes wird in ► **Abschn. 25.4.** vertieft.

1.6 Patientenrechtegesetz

Das **Patientenrechtegesetz (PRG)** ist Teil des Bürgerlichen Gesetzbuches (BGB) und am 26. Februar 2013 in Kraft getreten. Mit diesem Gesetz soll die Rolle des Patienten gegenüber den Leistungserbringern (Ärzte, Hebammen, Heilpraktiker etc. und Krankenhäuser) gestärkt werden, in dem die bislang in mehreren Gesetzen „verstreuten“ Rechte in einem Werk zusammengefasst werden.

Im Mittelpunkt steht die rechtliche Absicherung einer Behandlung durch den Behandlungsvertrag.

Die wichtigsten Punkte sind:

- Aufklärungs- und Informationspflicht
- Dokumentationspflicht
- Änderung in der Arzthaftung: bislang musste der Patient nachweisen, dass der Arzt einen Fehler gemacht hat. Bei groben Fehlern kommt es nun zu einer Beweislastumkehr, d. h. der behandelnde Arzt muss nachweisen, dass er **keinen** Fehler gemacht hat.
- Bei Behandlungsfehlern sind die Krankenkassen verpflichtet, den Patienten zu unterstützen, z. B. durch ein medizinisches Gutachten.
- Änderungen bei Verfahrensvorschriften: wenn z. B. Krankenkassen nicht schnell genug über die Kostenübernahme einer Leistung entscheiden, kann sich der Patient selbst um die Leistung bemühen und der Kasse in Rechnung stellen.
- Vorbeugung von Fehlern hat Vorrang, d. h. Leistungserbringer müssen ein **Qualitätsmanagementsystem** und Beschwerdesystem für Patienten nachweisen, um potentielle Behandlungsfehler früh zu erkennen und zu verhindern.
- Patientenorganisationen (z. B. Blinden- und Sehbehindertenverband) haben mehr Mitspracherecht.
- Ein Patientenbeauftragter der Bundesregierung muss Informationen für die Bevölkerung bündeln und veröffentlichen.

1.7 Das berufliche Handlungsfeld der MTRA

Das Berufsfeld der MTRA ist abwechslungsreich und „bunt“, was die Anforderungen und Herausforderungen der MTRA angeht.

Typischerweise arbeiten MTRA in Kliniken oder Arztpraxis in einem der drei großen Bereiche: Radiologische Diagnostik, Strahlentherapie oder Nuklearmedizin.

Um einen Einblick darüber zu bekommen, wie der „typische“ Berufsalltag aussehen kann, berichten hier MTRA aus ihrem Arbeitsalltag.

Ein typischer Arbeitstag in der Radiologischen Diagnostik

(Ch. Nowarra)

Der erste Tag nach dem Urlaub, Arbeitsbeginn 07:30 Uhr.

Da ich in den vergangenen drei Wochen nicht in der Klinik war, kenne ich auch die aktuelle Einteilung der Arbeitsplätze nicht und lasse mich „überraschen“, was heute auf mich zukommt. Ich bin als Springer eingesetzt und damit für alle Arbeitsplätze nach Bedarf verfügbar.

Ich beginne, gemeinsam mit einer Kollegin, auf der chirurgischen Intensivstation mit dem Thoraxröntgen intensivpflichtiger Patienten. Beatmete Patienten müssen häufiger geröntgt werden, da sie ein hohes Risiko haben, eine Pneumonie (Lungenentzündung) zu bekommen.

Mit dem mobilen Röntgengerät fahren wir in die Zimmer, lagern gemeinsam mit dem Pflegepersonal die Patienten auf der Kassette und machen die Aufnahme. Am Ende sind noch zwei Patienten in Isolierzimmern zu röntgen, die eine MRSA-Infektion haben.

Das Auslesen der Bilder und die Dokumentation können wir gleich auf der Station erledigen. Eine Stunde und zwölf Patienten später sind wir wieder in der Abteilung.

Ich gehe an den konventionellen Röntgenarbeitsplatz. Genauer gesagt sind es drei solcher Arbeitsplätze – alle mit Buckytisch, Rasterwandstativ und Detektoren.

Ich setze mich an den Computer und überprüfe die Anmeldungen für meinen Arbeitsplatz im RIS. Das heißt, dass ich vor dem Anruf auf der Station erst noch einmal die Indikation sichte und schaue, ob der Patient Voraufnahmen hat. Besonders nach Operationen kann das die Vorbereitung auf die Untersuchung eines Patienten erleichtern.

Ein paar Minuten später sehe ich im PC, dass der erste Patient da ist – eine Wirbelsäulenaufnahme nach einer Operation. Der Patient liegt im Bett und ich hole mir Hilfe von einer Kollegin, um ihn mittels Rollboard auf dem Buckytisch zu lagern. Dabei achte ich darauf, dass der Patient sich richtig bewegt und nicht zu viel „helfen“ möchte, denn nach der OP darf er sich nicht viel bewegen.

Danach kommen andere Patienten, die Aufnahmen vom Thorax, dem Abdomen oder der Hüfte bekommen sollen. Zwischendurch ein kleines Kind von der orthopädischen Ambulanz mit einer Beckenaufnahme. Dafür nehme ich mir mehr Zeit, denn nicht nur das Kind, sondern auch die Eltern möchten betreut werden. Gerade die „kleinen Patienten“ reagieren auf eine hektische Atmosphäre. Sie werden unruhig oder fangen an zu schreien.

Schnell vergeht die Zeit und schon ist Mittagspause. Einige der Kolleginnen mit einer Teilzeitstelle beenden jetzt ihren Dienst und der Spätdienst kommt. Für mich heißt das „Arbeitsplatzwechsel“. Bis zum Feierabend bin ich am CT eingeteilt.

Dort stehen für heute Nachmittag noch verschiedene Untersuchungen an. Die meisten sind Kombinationsuntersuchungen mit Kontrastmittel von Thorax und Abdomen zum Ausschluss von Metastasen bei einer Tumorerkrankung. Am MRT ist eine knappe Besetzung, sodass ich in der Mittagszeit hinzugerufen werde, um einen Patienten umzulagern. Schnell in alle Taschen geschaut, damit auch kein loses Metall in meiner Kleidung bleibt, das könnte für den Patienten und für mich gefährlich sein. Dann geht es in den Raum und ich fahre den Patienten aus dem Gerät, schiebe die Patienten-

liege in den „sicheren Bereich“ und helfe bei der Umlagerung in das Bett. Ich gebe dem nächsten Patienten noch einen Aufklärungsbogen und gehe dann wieder zurück zum CT.

Kurz vor 16.00 Uhr wird noch ein Notfall angemeldet – Verdacht auf Schlaganfall. Jetzt muss es schnell gehen, denn: „Time is Brain“.

Das Gerät wird freigehalten und die Türen geöffnet. Die Rettungsstelle befindet sich genau gegenüber und die Patientin wird zügig gebracht. Natürlich schaut man in so einer Situation nicht darauf, dass man auf die Minute pünktlich Feierabend macht. Aber die Untersuchung geht schnell und komplikationslos. Der Schlaganfall hat sich leider bestätigt und die Patientin wird in der Rettungsstelle weiter versorgt. Ich werde vom Bereitschaftsdienst abgelöst, der bis morgen früh alle Untersuchungen durchführen wird. Nur wenn eine Angiographie ansteht, muss der Rufdienst geholt werden. Diese Untersuchungen können länger dauern und es muss sichergestellt werden, dass alle anderen Patienten in der Zwischenzeit untersucht werden können und immer jemand vor Ort ist. Ich habe heute Nacht Rufdienst und hoffe, dass es ruhig bleibt. Morgen bin ich dann am MRT eingeteilt.

Arbeit in der Nuklearmedizin

(A. Niehaus)

07:15 Uhr: Dienstbeginn im Klinikum.

Nach dem Anschalten und Hochfahren der Messgeräte und der Gammakameras sowie der zahlreichen Computer ist meine erste Aufgabe des Tages die arbeitstägliche Funktionsprüfung der Gammakameras und Messgeräte. Sämtliche Ergebnisse werden dokumentiert und im Anschluss kann der Patientenbetrieb beginnen. Zunächst bespreche ich mit meinen Kollegen den Tagesplan. In diesem Gespräch werden noch mal kurz die Zuständigkeiten und die Reihenfolge der einzelnen Untersuchungen festgelegt, ggf. müssen noch kurzfristig angemeldete Patienten einzelner Stationen in den Tagesplan eingepflegt werden. Einige Patienten müssen,

je nach Untersuchungsablauf, mehrmals zu bestimmten Uhrzeiten einbestellt werden. Gegen 08:00 Uhr rufe ich die Stationen an und bestelle die Patienten zur Knochenszintigraphie. Im Anschluss gehe ich ins Heißlabor: ich eluiere den Molybdän-Technetium-Generator, berechne die benötigten Aktivitätsmengen für die Patienten zu den Knochenszintigrammen und setze das entsprechende Radiopharmakon an. Mittlerweile sind die Patienten eingetroffen. Einer von ihnen soll eine „Frühphase“ der Hüfte erhalten, hat starke Schmerzen und kann nicht aufstehen. Ich benötige die Hilfe meiner Kolleginnen zum Umlagern. Mithilfe eines Rollbrettes und dem Einsatz von Lagerungshilfen ermöglichen wir dem Patienten während der Lagerung die Schmerzen so gering wie möglich zu halten. In der Zwischenzeit sind auch die anderen Patienten zum Knochenszintigramm vom Arzt injiziert worden und werden erst nach ca. 3 Stunden zu den Aufnahmen an der Gammakamera wieder einbestellt. Eine andere Kollegin bereitet die Fahrradergometrie für die Patienten zur Herzuntersuchung, einschließlich der Bereitstellung des Radiopharmakons im Heißlabor vor. In Anwesenheit des Arztes werden die nüchternen Patienten mit steigender Wattzahl auf dem Fahrrad belastet und bekommen bei Erreichen der erzielten Herzfrequenz auf hoher Belastungsstufe das Radiopharmakon injiziert. Nach der Ergometrie haben die Patienten eine halbe Stunde Zeit zum Essen und gegen 09:30 Uhr starte ich mit den Belastungsaufnahmen der Patienten an der Gammakamera. Nach Auswertung der Stressaufnahmen erhalten die Patienten erneut das Radiopharmakon zur vergleichenden Ruheaufnahmen. Zusätzlich kommen von 8:30 bis 11:00 Uhr ambulante Patienten in die Schilddrüsensprechstunde. Meine Kollegin bereitet die Patientenakten vor und leitet sie an den Arzt weiter. Nach dem Arztgespräch führt die zuständige MTRA die Blutabnahmen durch, bereitet die Sonographien vor, assistiert bei notwendigen Punktionen und führt die Schilddrüsenszintigramme an der Gammakamera durch. Sie hat heute einen

MTRA-Schüler an ihrer Seite, der erst seit einer Woche in unserer Abteilung seinen Einsatz hat. Ihm erklärt sie ihre Arbeitsschritte und bezieht ihn in die Untersuchungen ein. Eine andere Kollegin bereitet die Patientenakten für die Patienten vor, die zur stationären Aufnahme zur Schilddrüsentherapie auf die Nuklidstation kommen. Diese benötigt der Medizinphysikexperte für die Berechnung der Therapiedosis, damit im Anschluss (nach Rücksprache mit dem Arzt) die Therapiekapseln bestellt werden können. Gegen 11:00 Uhr kommt eine Patientin aus der Gynäkologie zur Wächter-Lymphknoten-Markierung (Sentinel) bei Brustkrebs, die am nächsten Tag operiert werden soll. Das Radiopharmakon habe ich schon am Morgen mit vorbereitet und die Überprüfung der Qualitätsmaßnahmen dokumentiert, sodass ich gleich nach dem Aufklärungsgespräch des Arztes mit den Aufnahmen an der Gammakamera beginnen kann. Plötzlich klingelt das Telefon: eine dringende Anfrage aus der Notaufnahme zur Durchführung einer Lungenszintigraphie bei Verdacht auf Lungenembolie. Ich überlege kurz, zu welchem Zeitpunkt des Tages noch Kapazität an der Kamera zur Verfügung steht, und plane die Lungenszintigraphie auf 14:00 Uhr. Es ist jetzt kurz vor Mittag und die erste Patientin kommt bereits zu den Spätaufnahmen des Knochenszintigramms. Ich bespreche mich kurz mit meinen Kolleginnen zwecks Ablösung zur Mittagspause, erledige noch einige telefonische Anfragen und bestelle ein notwendiges Radiopharmakon für eine Spezialuntersuchung. 12:30 Uhr, meine Mittagspause ist beendet. Ich führe noch die Spätaufnahmen der am Vormittag injizierten Patienten zum Knochenszintigramm und die ergänzenden Ruheaufnahmen der Herzpatienten durch. Dazu bekomme ich Unterstützung von einer Kollegin, die die fertigen Aufnahmen am Computer auswertet und dem Arzt zur Befundung vorlegt. Und auch die Patientin zur Wächterlymphknoten-Darstellung ist um 14:00 Uhr bereits mit allen Aufnahmen und Sondenmessungen fertig und für die mor-

gige OP vorbereitet, sodass ich pünktlich mit der Lungenszintigraphie des Notfallpatienten beginnen kann.

Mittlerweile ist es 15:00 Uhr. Wir besprechen mit den Ärzten und den Kolleginnen den vorläufigen Tagesplan für Morgen und ich gebe die notwendigen Informationen zur Patientenvorbereitung und Terminplanungen an die Stationsschwester der Nuklidstation weiter. Als letzte „Aktion des Tages“ werden die Untersuchungsräume auf Kontaminationen geprüft und „frei gemessen“. Jetzt muss ich nur noch bei Verlassen der Abteilung mich selbst auf Kontaminationen überprüfen und dann – Feierabend.

Arbeit in der Strahlentherapie

(C. Marks)

Frühdienst im Klinikum, 7 Uhr. Nach dem Anschalten und Hochfahren des Linac und der zahlreichen Computer ist meine erste Aufgabe des Tages die arbeitstägliche Funktions- und Sicherheitsprüfung des Beschleunigers. Sämtliche Sicherheitsvorkehrungen und die einwandfreie Funktion des Linac werden geprüft und das Gerät warmgestrahlt. Ich dokumentiere die Ergebnisse und bin kurz darauf startklar für den Patientenbetrieb.

Zusammen mit einer Kollegin fange ich gegen halb acht mit der Bestrahlung der vormittags einbestellten Patienten an. Die erste Patientin wird zweimal am Tag bestrahlt und kommt heute Nachmittag nochmals zur Bestrahlung. Um kurz vor acht stellt sich uns eine neue Schülerin der MTAR-Schule vor – sie hat heute ihren ersten Tag bei uns am Gerät. Sie war in den letzten 2 Wochen schon in der Strahlentherapie an anderen Linearbeschleunigern und kennt bereits die Abläufe. Ich zeige ihr, wo sie bei uns am Gerät die Patientenakten findet und wo wir unsere Lagerungsmittel und Bestrahlungsmasken aufbewahren, damit sie sich zurechtfindet. Bei den nächsten Patienten müssen wir Verifikationsaufnahmen zur Kontrolle der Lagerung anfertigen. Das muss mindestens einmal pro Wo-

che gemacht werden, auf Anweisung der Ärzte auch häufiger. Um 9 Uhr kommt die erste neue Patientin, bei der wir heute mit der Bestrahlung der Brust beginnen. Meine Kollegin zeigt ihr zuerst die Umkleidekabine. Wir erklären ihr vorab den Ablauf der heutigen Bestrahlung und lagern sie nach Vorgaben aus dem Planungs-CT auf dem Bestrahlungstisch. Zusammen mit dem zuständigen Strahlentherapeuten kontrollieren wir die Lagerung der Patientin mithilfe von Verifikationsaufnahmen. Wir müssen die Patientin zwar noch um ein paar Millimeter mit dem Tisch verschieben und erneuern schließlich die Markierungen auf der Haut, können aber danach die erste Bestrahlung durchführen.

Nun kommen zwei weitere neue Patienten: ein Patient mit Prostatakrebs und ein Patient mit Hirnmetastasen, der unter Platzangst leidet. Er benötigt ein bisschen gutes Zureden und mehr Zeit, als ursprünglich für seine Behandlung eingeplant wurde, aber wir schaffen die Bestrahlung schließlich auch ohne Beruhigungsmittel. Danach kommen bis zum Mittag wieder ambulante Patienten. Einige wollen heute mit dem Arzt sprechen, und ich gebe die Akte an den Assistenzarzt weiter. Gegen 11 Uhr ruft ein Kollege aus dem Planungs-CT an und meldet für heute Nachmittag einen Notfall – eine Patientin soll heute noch an der Wirbelsäule bestrahlt werden, sie hat kein Gefühl mehr in den Beinen. Wir liegen gut in der Zeit und schaffen es sogar noch, zwei Patienten von Station abzurufen, die wir zwischen den ambulanten Patienten bestrahlen können. Endlich, gegen halb eins, können wir uns eine halbe Stunde Mittagspause gönnen.

Ab eins kommen mehrere Patientinnen, die an der Brust bestrahlt werden. Ich lasse unsere Schülerin jetzt selbständig die Patientinnen lagern und einstellen, damit sie mehr Routine bekommt; stehe ihr aber zur Seite, falls sie Fragen hat und kontrolliere die Einstellung nochmals, bevor wir anfangen zu bestrahlen.

Meine beiden Kolleginnen von der Spätschicht sind mittlerweile eingetroffen, und ich informiere sie in einer kurzen Übergabe, was sie heute Nachmittag und am Abend noch erwar-

tet. Ich organisiere in der Bestrahlungsplanung die Akten und Bestrahlungspläne für die neuen Patienten am kommenden Tag und bereite die Unterlagen vor. Die Patientin, die heute notfallmäßig kommen soll, muss noch im Terminplan eingeplant werden, zwei Patienten für übermorgen sind heute storniert worden. Also ändere ich noch schnell die Terminpläne für diese Woche und berücksichtige gleich die Terminwünsche, die mir einige Patienten heute mitgeteilt haben. Einer unserer Medizinphysikexperten bringt mir die Unterlagen für die Notfall-Bestrahlung, die aus der Bestrahlungsplanung kommen. Jetzt können meine Kolleginnen die Patientin jederzeit von der Station abrufen. Mittlerweile ist es halb vier. Morgen habe ich Spätdienst und überlasse jetzt meinen Kollegen die Bestrahlungen der restlichen Patienten für den heutigen Tag.

Wem das Alles für seine vielen Jahre im Beruf als Betätigungsfeld nicht genügt, der kann sich weiterqualifizieren und auch in anderen Bereichen arbeiten. Wie das funktioniert, wird in ► Abschn. 25.2 beschrieben.

In Kürze

- Der MTRA-Beruf entstand in Deutschland unmittelbar nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen und wurde zunächst als reiner Frauenberuf für „höhere Töchter“ konzipiert.
- Im Laufe der Zeit hat sich das Berufsfeld gewandelt. Heute arbeiten mehr Männer in diesem Beruf und der Berufsalltag ist sehr abwechslungsreich. Zu den „klassischen“ Betätigungsfeldern gehören die Radiologische Diagnostik, die Nuklearmedizin und die Strahlentherapie.
- Der Beruf ist geprägt von den technischen Entwicklungen in der Medizin und hat sich inzwischen zu einem selbstständigen Handlungsfeld entwickelt, wodurch der „Assistenzbegriff“ in der Berufsbezeichnung als nicht mehr zeitgemäß angesehen wird.
- Als Gesundheitsfachberuf haben MTA ein eigenes Berufsgesetz (MTA-G) mit einer

zugehörigen Ausbildungs- und Prüfungsverordnung (MTA-APrV) und unterliegen damit nicht dem Berufsbildungsgesetz (BBiG).

- Neben dem Berufsgesetz unterliegen MTRA vielen anderen Gesetzen, welche der Sicherheit von Patienten und Personal dienen (z. B. Patientenrechtegesetz, Infektionsschutzgesetz). Einen besonderen Schwerpunkt bilden dabei die gesetzlichen Regelungen zum Strahlenschutz (RöV, StrSchV). MTRA sind die einzige Berufsgruppe, die im Rahmen ihrer Ausbildung die Fachkunde im Strahlenschutz erwirbt.

Literatur

- Blum K (2009) Weiterentwicklung der nicht-ärztlichen Heilberufe am Beispiel der technischen Assistenzberufe im Gesundheitswesen, Forschungsgutachten Deutsches Krankenhausinstitut e. V. im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit, Düsseldorf
- Bundeszentrale für politische Bildung: www.bpb.de (Stand 08.09.2013)
- Dachverband für Technologen/-innen und Analytiker/-innen in der Medizin, www.dvta.de
- Deutscher Bundestag: Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland, www.bundestag.de (Stand 09.01.2014)
- Drews H (1987) 90 Jahre Entwicklung in der Ausbildung zur MTA. SOLDI-Verlag, Hamburg
- Kirchberger S (1986) Medizinisch-technische Assistenz in der Gesundheitsversorgung. Campus-Verlag, Frankfurt/M., NY
- Kurtenbach H, Neumann C, Schramm H (1995) Gesetz über technische Assistenten in der Medizin; Kommentar; mit Ausbildungs- und Prüfungsverordnung, 1. Aufl. Kohlhammer-Verlag, Stuttgart, Berlin, Köln
- Ohmstedt A, Roth U (2005) MTA in der Radiologie in „100 Jahre Deutsche Röntgengesellschaft 1905–2005“. Thieme-Verlag, Stuttgart
- Raps W, Melzer W (2010) Gesetz über technische Assistenten in der Medizin mit Ausbildungs- und Prüfungsverordnung, Kommentar. Reha-Verlag, Remagen (überarbeitete Auflage)
- Bundeszentrale für politische Bildung: www.bpb.de (Stand 08.09.2013)
- Robert-Koch-Institut, www.rki.de (Stand 09.01.2014)
- Schneider A (2003) Staatsbürger-, Gesetzes- und Berufskunde für Fachberufe im Gesundheitswesen, 6. Aufl. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York
- www.arbeitssicherheit.de (Stand 10.01.14)
- www.gesetze-im-internet.de (Stand 13.01.14)

Technik

Kapitel 2 Strahlenarten und Strahlenbiologie – 29

T. Hartmann, I. Offenhäusser, C. Vockelmann

Kapitel 3 Konventionelle Röntgendiagnostik – 63

T. Doering, Ch. Nowarra

**Kapitel 4 Durchleuchtung und
Subtraktionsangiographie – 105**

T. Doering, Ch. Nowarra

Kapitel 5 Computertomographie (CT) – 119

K. Kara, Ch. Nowarra

Kapitel 6 Kernspintomographie – 145

Ch. Nowarra, K. Reiter

Kapitel 7 Sonographie – 175

C. Vockelmann

Kapitel 8 Kontrastmittel und Pharmakologie – 185

M. Kahl-Scholz, K. Kara

Kapitel 9 Strahlentherapie – 221

D. Dohr, C. Marks, J. Thiele

Kapitel 10 Nuklearmedizin – 281

U. Blum, T. Hartmann, I. Offenhäusser

Strahlenarten und Strahlenbiologie

T. Hartmann, I. Offenhäusser, C. Vockelmann

- 2.1 Radioaktivität und deren Wechselwirkungen – 31**
 - 2.1.1 Historischer Hintergrund – 31
 - 2.1.2 Physikalische Grundlagen – 32
 - 2.1.3 Physikalische Wechselwirkungsprozesse elektromagnetischer Strahlung mit Materie – 35
- 2.2 Röntgenstrahlung – 39**
- 2.3 Dosisbegriffe – 41**
 - 2.3.1 Kerma = Kinetic energy released in matter – 41
 - 2.3.2 Ionendosis – 41
 - 2.3.3 Energiedosis – 41
 - 2.3.4 Äquivalentdosis – 42
 - 2.3.5 Einfalldosis – 42
 - 2.3.6 Oberflächendosis – 42
 - 2.3.7 Tiefendosis – 43
 - 2.3.8 Dosisflächenprodukt – 43
 - 2.3.9 Dosislängenprodukt – 43
 - 2.3.10 Organdosis – 44
 - 2.3.11 Effektive Dosis (auch effektive Äquivalentdosis) – 44
 - 2.3.12 Personendosis und Körperdosis – 44
 - 2.3.13 Dosimetrische Verfahren in der klinischen Praxis – 45
- 2.4 Wirkung ionisierender Strahlung auf den Organismus – 48**
 - 2.4.1 Zellaufbau – 49
 - 2.4.2 Strahlenwirkungen – 49
 - 2.4.3 Phasen der Strahlenwirkung – 52
- 2.5 Gesetze, Verordnungen und Richtlinien – 55**
 - 2.5.1 Gesetze – 55
 - 2.5.2 Röntgenverordnung – 56

- 2.5.3 Strahlenschutzverordnung – 56
- 2.5.4 Strahlenschutzbereiche – 56
- 2.5.5 Beruflich strahlenexponierte Personen – 58

Literatur – 61

Die 19-jährige Lisa schaut sich zusammen mit ihrer fünf Jahre jüngeren Schwester Johanna die Nachrichten an. Eigentlich nur, weil sie auf die Anschluss-sendung warten. Die aktuellen Nachrichten werden beherrscht vom Gedenktag an die Atomkatastrophe in Fukushima am 11. März 2011. Damals kam es zu einem Reaktorunfall in dem japanischen Atomkraftwerk, bei dem radioaktive Stoffe freigesetzt wurden. In diesem Zusammenhang wurden zwischen 100.000 und 150.000 Menschen evakuiert.

„Sag’ mal,“ meint plötzlich Johanna, „du lernst doch MTRA. Da habt ihr doch auch mit Strahlen zu tun. Hast du da keine Angst? Guck mal, die berichten immer von Krebserkrankungen und Strahlenkrankheit. Was ist das überhaupt?“

„Wir müssen da keine Angst haben“, beschwichtigt Lisa, „zum einen arbeiten wir mit anderen Strahlenarten und zum anderen sind wir in der medizinischen Anwendung als Personal richtig gut geschützt. Das ist Teil der Ausbildung – was man tun muss, um nicht zu viel Strahlung abzubekommen. Aber natürlich lernen wir auch, was Strahlung im Körper macht. Das wird schließlich in der Strahlentherapie angewendet.“

2.1 Radioaktivität und deren Wechselwirkungen

I. Offenhäuser

2.1.1 Historischer Hintergrund

Wir schreiben das Jahr 1895. Im physikalischen Institut der Universität Würzburg arbeitet **Wilhelm Conrad Röntgen** in seinem Labor. Mit einem Funkenindikator erzeugt er eine Hochspannung, die er auf zwei Metallelektroden in einer luftleeren Röhre leitet. Die Röhre leuchtet, neben ihr auch ein mit Bariumplatincyanür beschichteter Schirm. Röntgen umwickelt die Röhre mit schwarzem Papier, der Schirm leuchtet weiter. Der Physiker nennt die ihm unbekannten Strahlen, die dichtes Material durchdringen und fluoreszierende Eigenschaften haben, „X-Strahlen“.

Als Neujahrsgruß schickt er Sonderdrucke an Kollegen seines Fachbereiches. Unter ihnen ist auch der Mathematiker und Astronom **Henri Poincaré**, der das Phänomen in der Akademie

der Wissenschaften in Paris vorträgt. Akademienmitglied Antoine-Henri Becquerel untersucht den Zusammenhang zwischen den X-Strahlen und der Fluoreszenz: Eine in schwarzes Papier gehüllte Photoplatte wird ohne Sonneneinstrahlung von Kaliumuranylsulfat geschwärzt. Anders als ursprünglich vermutet, kann Becquerel ausschließen, dass die X-Strahlung durch Sonneneinstrahlung ausgelöst wird, denn das Kaliumuranylsulfat strahlt ohne äußere Einwirkung. Er nennt die gefundene Strahlung „Uran“.

Niemand, außer der aus Polen stammenden Wissenschaftlerin **Marie Skłodowska** (ab 1895 verheiratet mit Pierre Curie), schenkt dieser Entdeckung Beachtung. Sie stellt fest, dass die Aktivität von Uran von der Anzahl der enthaltenen Uranatome abhängt, nicht aber zur Anzahl der enthaltenen Verbindungen in Beziehung steht.

Marie Curie isoliert die in Pechblende enthaltenen Stoffe, gewinnt ein schwarzes strahlendes Pulver – Polonium, nach ihrer Heimat benannt – und bezeichnet das Verhalten des Poloniums als radioaktiv. Sie entdeckt außerdem das in Pechblende enthaltene Radium. Ihre Tochter Irene liegt im Kinderwagen neben der Versuchsanordnung, die schädigende Wirkung der radioaktiven Strahlung ist noch völlig unbekannt.

1903 erhalten **Antoine-Henri Becquerel**, **Marie Curie** und **ihr Mann** (■ Abb. 2.1), der französische Physiker Pierre Curie, den Nobelpreis für Physik. 1911, Marie Curie für die Entdeckung des chemischen Verhaltens des Radiums ebenfalls den Nobelpreis für Chemie. Sie stirbt 1934 nahezu erblindet an Leukämie, als Folge des täglichen ungeschützten Umgangs mit radioaktiven Substanzen.

Ein Jahr nach Maries Tod nimmt ihre Tochter Irène Joliot-Curie, gemeinsam mit ihrem Ehemann Frédéric Joliot den Nobelpreis für Chemie als Auszeichnung für die Entdeckung der künstlichen Radioaktivität in Empfang.

Auch Irène verstirbt 1956 an Leukämie.

Anekdote für den Rand

Marie Curie ließ im 1. Weltkrieg Autos zu fahrbaren Röntgenstationen umbauen und bildete junge Frauen in der Durchführung radiologischer Untersuchungen aus. So konnten verwundete Soldaten in unmittelbarer Nähe der Front medizinisch versorgt werden.



■ Abb. 2.1 Marie und Pierre Curie bei der Arbeit im Labor

2.1.2 Physikalische Grundlagen

Das Atom

Materie setzt sich aus extrem kleinen Teilchen, den Atomen, zusammen (■ Abb. 2.2).

Atome bestehen aus Atomkern und Atomhülle. Der Atomkern ist etwa um den Faktor 10^5 kleiner als die Atomhülle. Dies entspricht dem Verhältnis eines Sandkornes zu einem Fußballfeld. Er enthält Kernteilchen, die sog. Nukleonen. Sie bestimmen die Masse des Atoms, ihre Anzahl entspricht der Massenzahl A .

Nukleonen setzen sich aus den positiv geladenen Protonen P und den elektrisch neutralen Neutronen N zusammen. Die Protonenzahl bestimmt die Kernladung. Sie entspricht der Ordnungszahl Z , die eine Einordnung des entsprechenden Elementes in das Periodensystem ermöglicht.

Um den Atomkern kreisen negativ geladene Elektronen e^- . Alle Elektronen, deren Bahn den gleichen Radius haben, bilden eine Schale. Ein Atom kann eine oder mehrere dieser Schalen besitzen. Sie werden von innen nach

außen mit K,L,M,N,O ... bezeichnet und mit $n=1,2,3,4,5$... durchnummeriert. Eine Schale kann mit maximal $2n^2$ Elektronen besetzt werden. Die Elektronen und Protonen ziehen einander an. Diese Anziehungskraft nimmt mit steigender Protonenzahl zu, mit größer werdendem Abstand der Elektronen vom Kern jedoch ab. Im elektrisch neutralen Zustand eines Elementes entspricht die Elektronen- der Protonenzahl.

Zwischen den im Kern vorhandenen Protonen befinden sich die Neutronen. Bei leichten Atomen entspricht die Neutronen- der Protonenzahl, schwere Atomkerne haben einen Neutronenüberschuss von bis zu 1:1,5. Ist das Protonen-Neutronen-Verhältnis gestört, so ist ein Kern instabil. Instabile Kerne wandeln sich ohne äußere Einwirkung unter Aussendung von Strahlung um. Dabei verändert sich die Protonen- bzw. Neutronenzahl.

Definition

Die Eigenschaft der spontanen Kernumwandlung unter Aussendung von Strahlung wird als **Radioaktivität** bezeichnet. Die Einheit der Radioaktivität ist das Becquerel (Bq). Ein Becquerel ist definiert als 1 Zerfall pro Sekunde.

Radioaktive Zerfallsarten

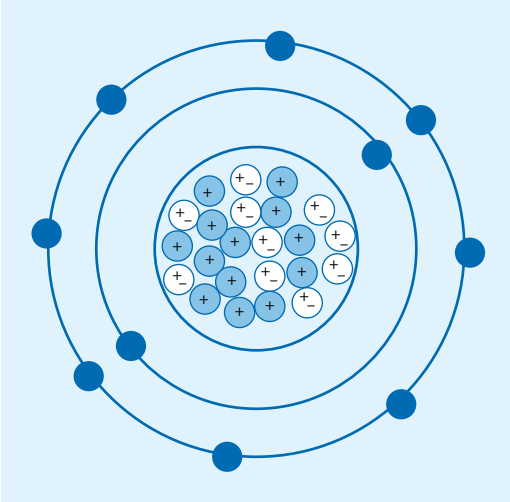
Radionuklide gehen unter Abgabe von Energie von einem instabilen in einen stabilen Zustand über. Dieser Übergang ereignet sich spontan, also ohne Einwirkung von außen. Die beim Zerfall freiwerdende Energie wird je nach Zerfallsart in Form von Teilchen- oder elektromagnetischer Strahlung abgegeben.

➤ Die Art und Energie der ausgesandten Strahlung ist charakteristisch für jedes Radionuklid.

Alpha-Zerfall (α -Zerfall)

Der α -Zerfall findet nur bei schweren Nukliden statt. Ein α -Teilchen, bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen, wird ausgesandt (■ Abb. 2.3). Die Ordnungszahl Z sinkt um 2, die Massenzahl A um 4. Zwei Elektronen verlassen den Atomverband.

Die frei werdende Energie bekommt das α -Teilchen als Bewegungsenergie (kinetische Energie)



■ Abb. 2.2 Aufbau eines Atoms

mit, deren Betrag bei jedem α -Teilchen gleich ist. α -Strahlung ist also monoenergetisch.

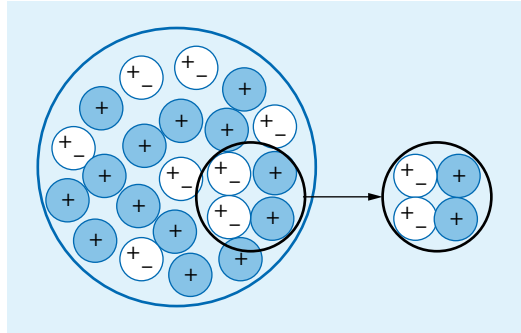
Da α -Teilchen eine große Masse besitzen, werden sie von Materie schnell abgebremst. Sie geben ihre Energie an das Gewebe ab und haben eine hohe biologische Wirksamkeit, wirken also stark zerstörend auf die Zelle.

α -Strahlung ist schon durch ein einfaches Blatt Papier von der Umgebung abschirmbar. Wegen der stark zerstörenden Wirkung findet sie in der Medizin kaum noch Anwendung.

Beta-Minus-Zerfall (β^- -Zerfall)

Bei Atomkernen mit hohem Neutronenüberschuss wandelt sich ein Neutron in ein Proton, ein Elektron (β^- -Teilchen) und ein Antineutrino um (■ Abb. 2.4). Die Ordnungszahl Z steigt um 1, da nun der Kern ein Proton mehr besitzt. Die Massenzahl A bleibt gleich. β^- -Teilchen und Antineutrino verlassen den Kern. Die frei werdende kinetische Energie wird auf das β^- -Teilchen und das Antineutrino verteilt. Das β^- -Teilchen kann also Energiewerte zwischen 0 und Maximalenergie haben. Es entsteht eine kontinuierliche Energieverteilung, ein sog. Energiespektrum. Das Antineutrino hat eine äußerst geringe Wechselwirkung mit Materie, muss aber bei der Energiebilanz des β^- -Zerfalls berücksichtigt werden.

β^- -Strahler werden in der nuklearmedizinischen Therapie eingesetzt, am häufigsten in der Therapie



■ Abb. 2.3 Alpha-Zerfall

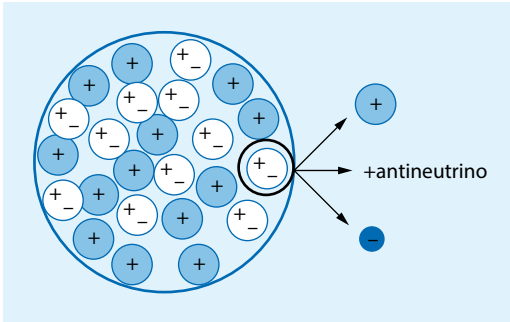
benigner und maligner Schilddrüsenerkrankungen (^{131}I). In der Diagnostik spielen β^- -Strahler wegen ihrer geringen Reichweite keine Rolle.

Beta-Plus-Zerfall (β^+ -Zerfall)

Bei Atomkernen mit Protonenüberschuss wandelt sich ein Proton in ein Neutron, ein Positron (β^+ -Teilchen) und ein Neutrino um (■ Abb. 2.5). Die Ordnungszahl Z sinkt um 1, da nun der Kern ein Proton weniger besitzt, die Massenzahl A bleibt gleich. β^+ -Teilchen und Neutrino verlassen den Kern. Auch hier wird die frei werdende kinetische Energie auf das β^+ -Teilchen und das Neutrino ungleich verteilt, es entsteht ebenfalls ein kontinuierliches Spektrum. Das Neutrino tritt in vernachlässigbare Wechselwirkung mit Materie, muss aber bei der Energiebilanz des β^+ -Zerfalls berücksichtigt werden.

Das Positron hat als Antiteilchen nur eine kurze Lebensdauer und vereinigt sich innerhalb von Mikrosekunden mit einem freien Elektron der Umgebung. In Kernnähe wird die Masse beider Teilchen in zwei Photonen umgewandelt, die in einem Winkel von 180° und mit einer Energie von 511 keV je Quant auseinanderfliegen (Vernichtungsstrahlung).

Der β^+ -Zerfall kann sich also nur ereignen, wenn die Energiedifferenz zwischen Mutter und Tochter 1022 keV beträgt. Positronenstrahler werden in der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) zur Darstellung unterschiedlicher Stoffwechseleigenschaften oder molekularer Prozesse im Körper verwendet. Das regionale Verteilungsmuster wird bildlich sichtbar gemacht. Ein häufig verwendeter Positronenstrahler ist das ^{18}F Fluor.



■ Abb. 2.4 Beta-Minus-Zerfall

Elektroneneinfang (Electron Capture)

Der zum β^- -Zerfall konkurrierende Zerfallsprozess ist der sog. Elektronen-Einfang (■ Abb. 2.6). Ist die Zerfallsenergie bei Protonenüberschuss kleiner als 1022 keV, so tritt ausschließlich dieser auf. Ein Elektron aus der kernnahen Hülle wandert in den Kern und verbindet sich mit einem Proton. Es entsteht ein Neutron und ein Neutrino, das den Kern verlässt. Die Ordnungszahl Z sinkt um 1, da nun der Kern ein Proton weniger besitzt.

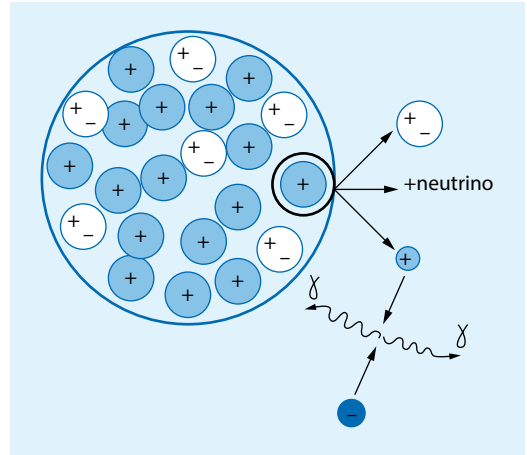
Die Massenzahl A bleibt gleich. Die Elektronenlücke wird durch ein Elektron einer äußeren, energiereicheren Schale aufgefüllt und die Energiedifferenz beider Schalen in charakteristischer Röntgenstrahlung abgegeben. Einige in der nuklearmedizinischen Diagnostik verwendeten Nuklide entstehen durch EC z. B. $^{201}\text{Thallium}$ oder auch alternativ zum β^+ -Zerfall $^{18}\text{Fluor}$.

Neben der Entstehung von Röntgenstrahlung wird die Energie auch direkt auf Elektronen übertragen. Diese sogenannten Auger-Elektronen verlassen den Atomverband. Die Aussendung charakteristischer Röntgenstrahlung erfolgt bei Nukliden mit einer Ordnungszahl über 30, unter 30 dominiert die Emission von Auger-Elektronen.

Innere Konversion/ γ -Strahlung

Nach Kernumwandlung verbleibt nicht selten eine Restenergie für kurze Zeit im Tochterkern. Man bezeichnet diesen Nuklidzustand als angeregt oder metastabil. Diese Restenergie kann über zwei miteinander konkurrierende Prozesse abgegeben werden.

Der Kern kann die Anregungsenergie direkt auf ein Elektron der Hülle übertragen. Dieses verlässt seinen Platz dann, wenn die Anregungsenergie



■ Abb. 2.5 Beta-plus-Zerfall

größer als die Bindungsenergie des Elektrons ist. Die entstehende Lücke wird auch hier mit einem Elektron einer höheren, energiereicheren Schale aufgefüllt, es kommt zur Emission charakteristischer Röntgenstrahlung bzw. zur Aussendung von Auger-Elektronen in Abhängigkeit der Ordnungszahl des Elementes.

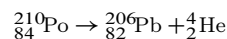
Die bei Anregung des Kerns frei werdende Energie kann aber auch als elektromagnetische Strahlung in Form von Gammaquanten gleicher bzw. unterschiedlicher Energie ausgesandt werden (■ Abb. 2.7).

Ein häufig in der nuklearmedizinischen Diagnostik angewandter Gammastrahler ist das $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

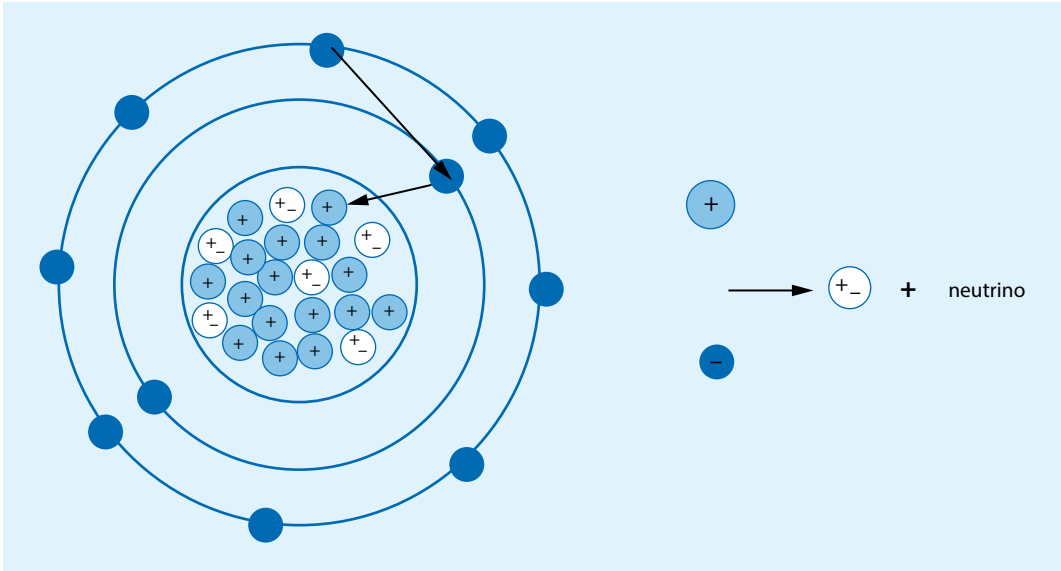
Die physikalische Halbwertszeit

Eine weitere charakteristische Größe einer radioaktiven Substanz ist die sog. physikalische Halbwertszeit. Sie bezeichnet die Zeitspanne, in der die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Atome zerfallen ist. Die physikalische Halbwertszeit kann Bruchteile von Sekunden bis Milliarden von Jahren betragen.

- ✓ Das von Marie Curie entdeckte $^{210}\text{Polonium}$ zerfällt über einen α -Zerfall, also unter Aussendung eines Heliumkerns zu Blei.



Die physikalische HWZ des $^{210}\text{Poloniums}$ beträgt 138,4 Jahre.



■ Abb. 2.6 Elektroneneinfang

In Kürze

α : $\frac{A}{Z}$ Mutternuklid $\rightarrow$
 $\frac{A-4}{Z-2}$ Tochternuklid

β^- : $\frac{A}{Z}$ Mutternuklid $\rightarrow$
 $\frac{A}{Z+1}$ Tochternuklid + e^- + Antineutrino

β^+ : $\frac{A}{Z}$ Mutternuklid $\rightarrow$
 $\frac{A}{Z-1}$ Tochternuklid + e^+ + Neutrino

EC : $\frac{A}{Z}$ Mutternuklid $\rightarrow$
 $\frac{A}{Z-1}$ Tochternuklid + e^+ + Neutrino

Er wird vorsorglich in ein nahegelegenes Krankenhaus gebracht. Ein Arzt mit entsprechender Fachkunde im Strahlenschutz ordnet umgehend eine Computertomographie der Kopf-Hals-Region an. Die MTRA legt Bernd vor Verlassen des Raumes eine Bleischürze um, die er als unbequem empfindet.

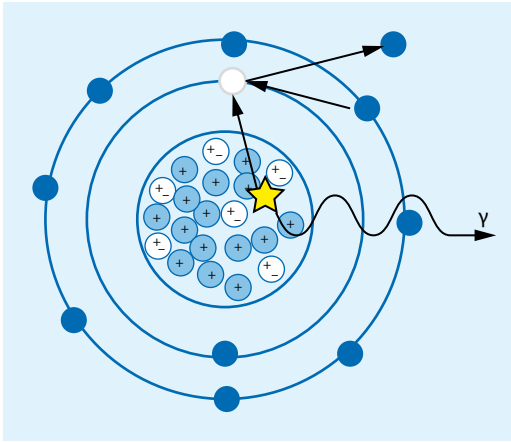
? Bernd, der noch geschockt vom Unfallereignis ist und die Schürze unbedingt loswerden will, möchte wissen, warum er dieses „Monstrum“ nun tragen muss, obwohl ihm sowieso alles wehtut?

Wechselwirkung von Photonenstrahlung mit Materie

Bei der Wechselwirkung von Photonen mit Materie wird die Strahlungsintensität proportional zur **Materialdicke d** und dem **Schwächungskoeffizienten μ** abgeschwächt. Dies wird durch das **Lambert-Beersche Gesetz** gemäß $I(d) = I(0) \exp(-\mu d)$ beschrieben. Der Schwächungskoeffizient μ hängt dabei vom Material (genauer gesagt von dessen Kernladungszahl Z) und auch von der Energie E der Photonen ab. Die Schwächung von Strahlung beim Durchgang durch Materie erfolgt durch Absorption (Photoeffekt, Paarbildung) und durch Streuung (Comptoneffekt).

2.1.3 Physikalische Wechselwirkungsprozesse elektromagnetischer Strahlung mit Materie

Bernd, 20 Jahre, sieht auf seiner Spur auf der Autobahn A1 vor sich einen liegengebliebenen PKW. Er tritt auf die Bremse und kommt wenige Zentimeter vor dem Hindernis zum Stand. Sein Hintermann ist nicht so reaktionsstark und fährt auf. Bernd wird in den Sicherheitsgurt gedrückt, berührt mit dem Kopf die Frontscheibe und prallt dann hart zurück in den Autositz.



■ Abb. 2.7 Innere Konversion

➤ **Schwächung = Absorption + Streuung**

Die Wechselwirkung, die Photonenstrahlung mit Materie eingeht, lässt sich im Wesentlichen in **drei Effekten** beschreiben:

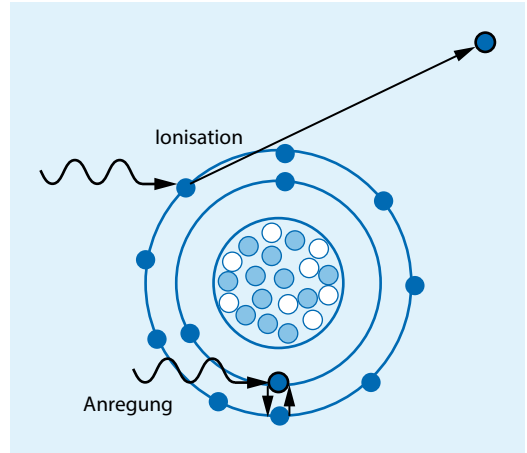
Photoeffekt

Trifft Photonenstrahlung auf Materie, so kann die gesamte Energie auf ein Elektron der Atomhülle übertragen werden (Photoabsorption, ■ Abb. 2.8). Das Hüllenelektron wird entweder auf eine Schale höherer Energie angehoben (Anregung) oder aus der Atomhülle herausgeschlagen (Ionisation). Letzteres ereignet sich dann, wenn die Energie des Photons die Bindungsenergie des Elektrons an den Kern übersteigt. Die vorhandene Restenergie gibt es dem durch Photoeffekt herausgelösten Elektron (Photoelektron) als kinetische Energie mit auf den Weg.

➤ **Je höher die Restenergie ist, desto mehr werden die Photoelektronen in Richtung des primären Strahls emittiert.**

Der freie Platz der Atomhülle wird durch ein Elektron aus einer energetisch höheren Schale aufgefüllt, die frei werdende Energie in Form von charakteristischer Röntgenstrahlung abgegeben.

Warum interessiert mich der Photoeffekt? Der Photoeffekt ist Grundlage der Bildgebung in der diagnostischen Radiologie, die vorwiegend im Energiebe-



■ Abb. 2.8 Photoeffekt

reich bis 100 keV arbeitet. Die von der Röntgenröhre ausgesandte Strahlung wird durch verschieden dichte Gewebe, wie z.B. Knochen, Weichteil-, Fett- oder Bindegewebe unterschiedlich geschwächt, sodass das entstehende Strahlenbild entsprechend der Schwächung unterschiedliche Graustufen aufweist.

➤ **Der Kontrast wird umso schwächer je energiereicher die Photonenstrahlung ist, weil die Schwächung mit zunehmender Strahlenenergie abnimmt.**

Da Hohlorgane und Gefäße sich im nativen Röntgenbild nicht darstellen lassen, appliziert man dem Patienten sog. Kontrastmittel hoher Ordnungszahl ($J: Z=53$; $Ba: Z=56 \dots$), die Röntgenstrahlung stärker absorbieren, als das umliegende Gewebe, und damit Hohlräume sichtbar machen (► Kap. 8).

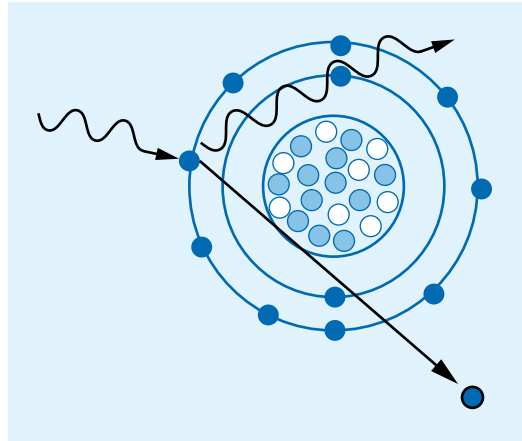
Mit den ungestreut aus dem Körper austretenden Photonen können in der nuklearmedizinischen Diagnostik aussagekräftige szintigrafische Abbildungen gewonnen werden.

Durch Photoeffekt angeregte Elektronen können die Energie wieder abgeben, indem sie auf ihre ursprüngliche Umlaufbahn zurückspringen (Klassische Streuung). Die dabei ausgesandte Photonenstrahlung hat die gleiche Energie und damit auch die gleiche Frequenz, wie die Ausgangsstrahlung. Wenn die Frequenz im Bereich des sichtbaren Lichtes liegt, so bezeichnet man die Abgabe dieser Lichtquanten als **Lumineszenz**. Die Lumineszenz ist

Grundlage der sog. **Speicherfolientechnik**. Diese Technik basiert darauf, dass z. B. Bariumhalogenide über einen Photoeffekt angeregt werden. Unter Einwirkung eines Lasers in der Ausleseeinheit fallen die vorher gehaltenen Elektronen in den Ursprungszustand zurück und die Speicherfolie leuchtet.

Comptonstreuung

Beim sog. Comptoneffekt (■ Abb. 2.9) gibt das Photon nur einen Teil seiner Energie an das Hüllenelektron einer äußeren Schale ab und wird mit seiner Restenergie in veränderter Richtung gestreut. Sekundärelektronen niederer Energie werden in Seitrichtung emittiert, solche höherer stärker in Vorwärtsrichtung.



■ Abb. 2.9 Comptoneffekt

Muss ich das wissen? Ja! Gestreute Photonen führen in der radiologisch, diagnostischen und in der nuklearmedizinischen Aufnahmetechnik zur Bildverschlechterung. Technische Hilfsmittel, wie ein aus Bleilamellen bestehendes Streustrahlenraster in der radiologischen Diagnostik oder der Ausschluss niederenergetischer Streuphotonen durch Legen eines entsprechenden Energiefensters in der Nuklearmedizin, können die Auswirkung der Streueffekte minimieren.

Paarbildung

Bei hohen Photonenenergien ab 1022 keV kommt es zum sog. Paarbildungseffekt (■ Abb. 2.10). Hier findet die Wechselwirkung nicht in der Hülle, sondern im starken elektrischen Feld des Atomkerns statt. In Kernnähe kann aus dem Photon ein Elektronen-Positronen-Paar, bestehend aus einem negativ geladenen Elektron und einem positiv geladenen Positron, entstehen. Der Atomkern bleibt dabei unverändert. Hier wird also im Gegensatz zur Paarvernichtung (► Abschn. 2.1) ein Paar gebildet, das allerdings mit einem Elektron des Absorbers zu zwei Vernichtungsquanten zu je 511 keV zerstrahlt.

Paarbildung in der täglichen Routine Die Energieabgabe über den Paarbildungseffekt spielt in der Strahlentherapie bei Anwendung ultraharter Photonen eine wesentliche Rolle.

Sonstige Wechselwirkungsprozesse

Kernphotoeffekt Wenn die Energie des einfallenden Quants größer ist, als die Bindungsenergie der Nukleonen im Kern (6–20 MeV), kann das Photon absorbiert und ein Neutron oder ein Proton aus dem Kern geschlagen werden (■ Abb. 2.11). Da das Neutronen-Protonen-Gleichgewicht gestört ist, wird der Atomkern in der Regel radioaktiv.

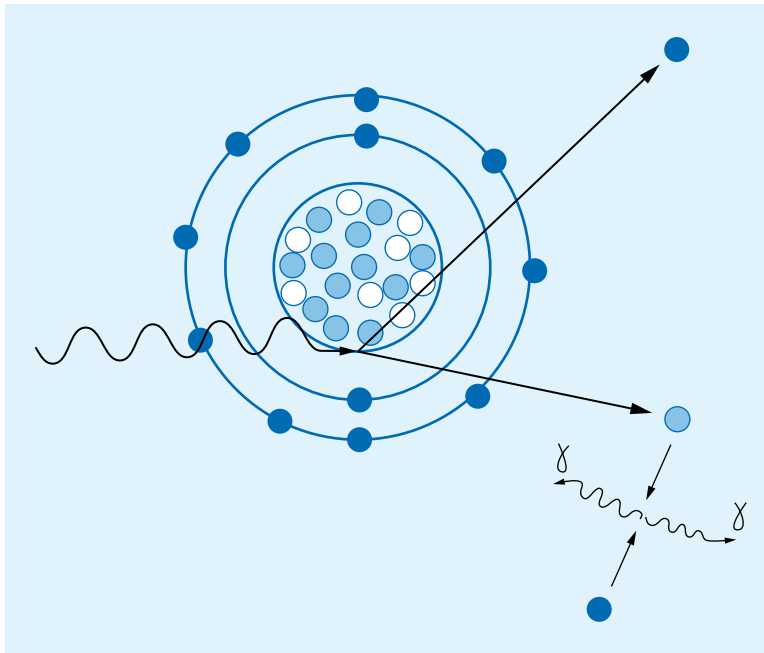
Kern-Fluoreszenz Wenn die Energie des einfallenden Quants kleiner ist, als die Bindungsenergie der Nukleonen, kann der Kern angeregt werden und durch Emission von Gamma-Strahlung in seinen Grundzustand übergehen.

Wechselwirkung von Teilchenstrahlung mit Materie

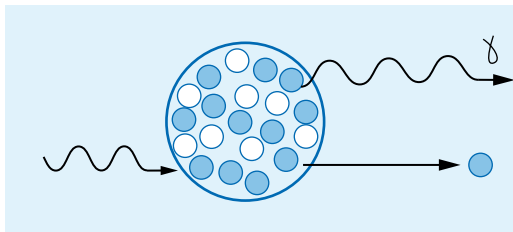
Die Wechselwirkung von Teilchenstrahlen und Materie ist abhängig von Masse und Ladung der Teilchen. Die Masse eines Teilchens wird bestimmt von seiner Ruhemasse und von seiner Geschwindigkeit.

Elektrisch negativ geladene Teilchen können ihre Energie an Materie durch Anregung, Ionisation und Erzeugung von Bremsstrahlung abgeben. Elektronen geben proportional zur Dichte der Materie kontinuierlich ihre Energie ab und haben im Gegensatz zu Photonenstrahlung eine endliche Reichweite.

➤ **Als Faustregel gilt, die Hälfte der Energie in MeV entspricht der Reichweite der Elektronen in Zentimetern in gewebeäquivalenter Materie (Wasser).**



■ Abb. 2.10 Paarbildung



■ Abb. 2.11 Kernphotoeffekt

Elektronen werden in der Strahlentherapie oberflächlich gelegener Tumoren eingesetzt. Die Elektronenenergie ist wählbar, sodass Tumorgewebe homogen bestrahlt, und das dahinterliegende gesunde Gewebe optimal geschont werden kann.

Neutronen und Protonen sind für tiefer gelegene Tumoren besonders geeignet. Sie geben ihre Energie bei einer bestimmten Resonanzenergie des Gewebes ab. Liegt ihre Ausgangsenergie über der Resonanzenergie, so dringen sie zunächst unter geringer Energieabgabe ein. Bei Näherung an die Resonanzstelle erhöht sich diese, sodass sich bei entsprechender Ausgangsenergie die tumorzerstörende Konzentration an das krankhafte Gewebe anpassen lässt.

Allerdings ist diese Technik so aufwendig, dass die Protonen- und Neutronentherapie nur an wenigen Zentren angeboten werden.

➤ Die **Schwächung** ist abhängig von der Dichte der durchstrahlten Materie, je höher die Anzahl der vorhandenen Atome ist desto höher ist auch die Anzahl der Wechselwirkungsprozesse. Die Wahrscheinlichkeit einer eintretenden Photoabsorption hängt von der **Ordnungszahl** der durchstrahlten Materie und damit auch von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Elektronen ab.

Eine weitere Rolle spielt die **Dicke** der zu durchdringenden Schicht.

Hochenergetische Strahlung durchdringt Materie ohne wesentliche Photoabsorption.

✓ Die Gonaden sind strahlensensibel und bedürfen bei jungen Menschen eines Strahlenschutzes. Die außerhalb des Nutzstrahlenbündels durch Comptoneffekt entstandene Streustrahlung muss weitestgehend vom Patienten ferngehalten werden.

Eine entsprechende Abschirmung erfolgt durch Materialien hoher Ordnungszahl, wie z. B. metallisches Blei ($Z=82$) oder durch in gummiähnlichen Materialien integrierte Bleiverbindungen. Die Bleischürze wird Bernd also von der MTRA aus Strahlenschutzgründen umgelegt und kann

■ Tab. 2.1 Wechselwirkungen

	Vorgang	Folge/Effekt
Photoeffekt	Übertragung der Gesamtenergie des Photons auf eine Elektron	Anregung oder Ionisation des Atoms
Comptoneffekt	Übertragung einer Teilenergie des Photons auf eine Elektron	Ionisation → anschließende Streuung des Photons
Paarbildung	Im elektrischen Feld des Kerns wird das Photon (Mindestenergie 1022 keV) in ein Elektronen-Positronen-Paar umgewandelt	Positron und Elektron des Absorbers werden vernichtet unter Aussendung zweier Gammaquanten

trotz des in dieser Situation unangenehmen Gewichtes nicht entfernt werden.

Wichtige Wechselwirkungsprozesse sind in ■ Tab. 2.1 zu finden.

2.2 Röntgenstrahlung

T. Hartmann

Röntgenstrahlung zählt wie die Gammastrahlung ebenfalls zu den elektromagnetischen Strahlungsarten wie auch Licht, Radiowellen, Mikrowellen usw. Im Gegensatz zu Schallwellen können sie sich auch im Vakuum ausbreiten und zwar unabhängig von ihrer Frequenz immer mit Lichtgeschwindigkeit.

Im Gegensatz zu z. B. Radiowellen sind Röntgenstrahlen sehr kurzwellig und haben damit eine hohe Frequenz.

Röntgenstrahlen werden in einer Röntgenröhre erzeugt. Diese besteht aus einem evakuierten Glaskolben, in dem sich eine Kathode und eine Anode befinden.

An der Röhre liegen zwei unterschiedliche Spannungsarten an: eine **Heizspannung** für die Kathode und eine **Hochspannung** zwischen Kathode und Anode.

Durch die Heizspannung wird durch den **thermoelektrischen Effekt** zunächst an der Kathode eine Elektronenwolke „ausgedampft“, die dann mithilfe der Hochspannung (20.000 bis 200.000 Volt) auf die Anode beschleunigt wird. Beim Auftreffen der Elektronen auf die Anode werden die Elektronen abrupt abgebremst, und ihre kinetische Energie wird in Röntgenstrahlung, elektromagnetische

Wellen und Wärme umgewandelt. Des Weiteren können die Elektronen mit dem Anodenmaterial direkte Wechselwirkungen eingehen.

Je höher die Ordnungszahl des Anodenmaterials und je höher die Hochspannung ist, mit der die Elektronen zur Anode hin beschleunigt werden, umso höher ist die Ausbeute an Röntgenstrahlung.

Die Energie der beschleunigten Elektronen vor dem Aufprall auf die Anode ergibt sich aus:

1. der Anzahl der Elektronen, die zur Anode beschleunigt werden, also aus der Kathode ausgedampft wurden und
2. aus der Röhrenspannung, welche die Elektronen zur Anode hin beschleunigt.

$$E = e \times U$$

Die Einheit dieser Energie ist das Elektronenvolt (eV).

Definition

Ein eV ist definiert als die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es beim freien Durchlauf einer Spannung von 1 V (ohne Widerstand im Vakuum) beschleunigt wird.

Dabei entstehen zwei Formen der Röntgenstrahlung: **Röntgenbremsstrahlung** und **charakteristische Röntgenstrahlung**

Röntgenbremsstrahlung entsteht durch das Abbremsen der Elektronen am Kern, in den sie nicht eindringen können. Dabei lösen manche Elektronen gleich beim Auftreffen der Elektronen auf die Anode Strahlung aus. Andere dringen tiefer in das Elektronenmaterial ein, geben dabei schon

2 einen Teil ihrer Energie ab und erzeugen erst im Anschluss Röntgenstrahlen. Dadurch erzeugen die Elektronen Röntgenstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen. Wie viel Röntgenstrahlung frei wird, hängt davon ab, wie stark das Elektron abgebremst wird. Die sofort entstehende Röntgenbremsstrahlung hat eine kleinere Wellenlänge, als die Strahlung, die durch die zunächst abgebremsten Elektronen entstanden ist.

Das Ergebnis ist ein Konglomerat an Röntgenstrahlen mit unterschiedlicher Wellenlänge. Fasst man diese alle in einer Grafik zusammen entsteht ein lückenloses, **kontinuierliches Röntgenbremsspektrum**. Dieses ist unabhängig vom Anodenmaterial.

Für die Praxis ist das entstandene Bremsspektrum dahingehend relevant, dass kurzwellige Strahlung eine größere Durchdringungsfähigkeit besitzt als langwellige.

Je höher die Aufnahmespannung (Hochspannung) am Generator eingestellt ist, umso kurzwelliger, also durchdringungsfähiger ist die Röntgenstrahlung.

Charakteristische Röntgenstrahlung entsteht zusätzlich zur Röntgenbremsstrahlung und ist ein sog. **Linienpektrum**, welches sich ausschließlich nach dem Anodenmaterial richtet. Es ist also für dieses charakteristisch.

Dieses Linienpektrum entsteht dadurch, dass die auftreffenden Elektronen die Fähigkeit besitzen, aus den Atomen des Anodenmaterials **Elektronen der beiden inneren Schalen** herauszuschlagen (**Ionisation**) bzw. auf eine höhere Schale mit höherem Energieniveau anzuheben (**Anregung**). Da jedes Atom bestrebt ist, seine Elektronenschalen von innen nach außen zu besetzen, wird die dadurch entstandene Lücke durch ein Elektron einer höheren Schale aufgefüllt. Bei diesem „Sprung“ wird Energie in Form von Röntgenstrahlung frei. Diese ist eindeutig in ihrer Wellenlänge definiert und wird als Linienpektrum dargestellt.

Der gleiche Vorgang kann übrigens auch auf weiter vom Kern entfernte Schalen passieren. In diesem Fall wird allerdings keine Röntgen- sondern Licht- oder Wärmeenergie frei.

Legt man nun das Röntgenbremsspektrum und das Linienpektrum der charakteristischen Strahlung übereinander entsteht das typische Röntgen-

spektrum mit den beiden „Ohren“. I. d. R. entsteht mehr Brems- als charakteristische Röntgenstrahlung. Der Anteil der charakteristischen Strahlung kann, je nach Anodenmaterial, auf bis zu 30 % erhöht werden. Da die charakteristische Röntgenstrahlung allerdings auch sehr stark zu unerwünschten Wechselwirkungsprozessen führt, wird sie i. d. R. herausgefiltert. Eine gezielte Anwendung dieser Strahlenart findet nur in der Mammographie statt.

➤ **In einer Röntgenröhre entstehen nur zu 1–2 % Röntgenstrahlung, der Rest der Energie der beschleunigten Elektronen wird in Wärme umgewandelt.**

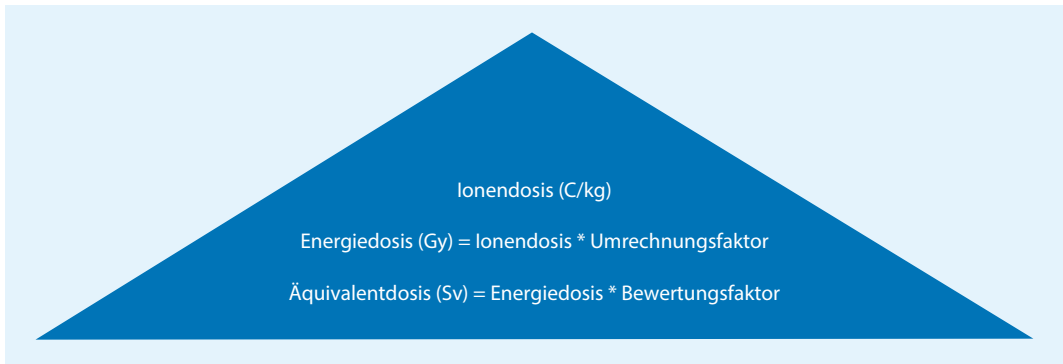
Gammastrahlen besitzen die gleichen Eigenschaften wie Röntgenstrahlen. Die beiden Arten unterscheiden sich lediglich im Ort ihrer Entstehung und ihrer Energie. Während Röntgenstrahlen in der Atomschale entstehen, entstehen Gammastrahlen durch radioaktive Zerfälle im Atomkern.

Röntgenquanten haben eine Energie von 100 eV bis 200 keV. Bei Gamma-Quanten reicht dieser Bereich von ca. 1 keV bis hin zu mehreren MeV.

➤ **Die Röntgenstrahlen gehören, gemeinsam mit α -, β - und γ -strahlen zu den ionisierenden Strahlen. Das bedeutet, dass alle diese Strahlenarten Wechselwirkungen mit Materie eingehen.**

Eigenschaften

- unsichtbar, geruchlos und geschmacklos
- Sie schwärzen photographische Schichten.
- Sie breiten sich divergierend wie Licht aus.
- Ionisationsfähigkeit, d. h. sie können durch Ausschlagen von Elektronen aus elektrisch neutralen Atomen reaktive Ionen machen mit der Folge biologischer Reaktionen, z. B. Behandlung von Erkrankungen oder Entstehung von Krankheiten
- Fluoreszenz, d. h. Sie können bestimmte Stoffe zum Leuchten bringen und ermöglichen die digitale Bildgebung
- Sie sind durch magnetische Felder nicht ablenkbar bzw. steuerbar.



■ Abb. 2.12 Dosisbegriffe

2.3 Dosisbegriffe

C. Vockelmann

Herr Müller hat ein Plasmozytom, eine Erkrankung, die zu Osteolysen, also Löchern in den Knochen, führt. Im Rahmen der Diagnostik ist eine CT-Untersuchung des gesamten Skeletts erforderlich. Jetzt fragt Herr Müller Sie, ob eine Skelettszintigraphie oder projektions-radiographische Aufnahmen des Skeletts nicht eine geringere Strahlenexposition für ihn bedeuten würde.

? Was antworten Sie dem Patienten? Kann man die Dosiswerte vergleichen?

Wenn man sich mit ionisierender Strahlung beschäftigt, begegnen einem eine Unzahl an Dosisbegriffen, bei denen man schnell den Überblick verlieren kann. Versuchen wir, etwas Ordnung in die vielen Begriffe zu bringen und zu verstehen, wann wir welche Begriffe benötigen.

2.3.1 Kerma = Kinetic energy released in matter

Photonen- und Neutronenstrahlen, also indirekt ionisierenden Strahlen, lösen geladene Teilchen, sog. Sekundärteilchen, aus. Kerma ist also vom bestrahlten Medium abhängig. Die Summe der beim ersten Stoß übertragenen Energie entspricht der Kerma. Kerma wird in Gray (Gy) angegeben. Bei der Dosimetrie in der Medizin entspricht die Kerma in etwa der Energiedosis.

2.3.2 Ionendosis

Die Ionendosis beschreibt die elektrische Ladung der Ionen gleichen Vorzeichens, die durch ionisierende Strahlung in einer bestimmten Masse entstehen. Die Einheit der Ionendosis ist Coulomb pro Kilogramm. Früher wurde die Ionendosis in Röntgen angegeben.

Charles Augustin de Coulomb war ein französischer Physiker des späten 18. Jahrhunderts. Er begründete die Elektrostatik sowie die Magnetostatik.

➤ **Stabdosisimeter oder Ionisationskammern messen die Ionendosis.**
Ionendosisleistung beschreibt die aufgenommene Ionendosis pro Zeiteinheit.

2.3.3 Energiedosis

Die Energiedosis ist die Basisgröße in der Dosimetrie (■ Abb. 2.12). Hiermit wird die absorbierte Strahlenenergie in Bezug auf die bestrahlte Masse beschrieben.

Dosis = absorbierte Energie/Masse

Einheit der Energiedosis ist ebenfalls Gray (Gy).

In älteren Büchern wird Ihnen möglicherweise der Begriff Rad (rd) begegnen, der bis 1985 verwendet wurde.

$$1 \text{ rd} = 0,001 \text{ Gy} = 0,001 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Die Energiedosis kann nicht im Körper gemessen werden. Daher wird in einer luftgefüllten Ionisati-

onskammer die Ionendosis gemessen, aus der die Energiedosis für bestimmte Materialien oder den menschlichen Körper berechnet werden kann.

2.3.4 Äquivalentdosis

Die Äquivalentdosis beschreibt die vom Körper aufgenommene Energiedosis multipliziert mit einem Bewertungsfaktor. Dieser trägt der **relativen biologischen Wirksamkeit** (RBW) der absorbierten Strahlungsart Rechnung. Da der Bewertungsfaktor ohne Dimension ist, ist die Einheit der Äquivalentdosis genauso wie die der Energiedosis Joule pro Kilogramm. Damit es jedoch nicht zu Verwechslungen mit der Energiedosis kommt, wird die Äquivalentdosis in Sievert (Sv) angegeben.

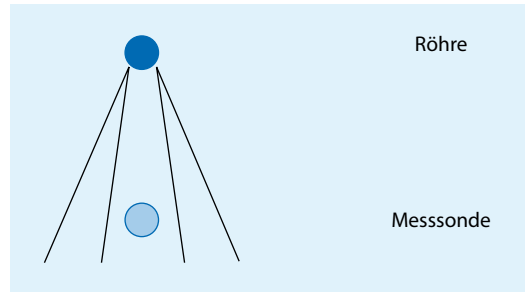
Rolf Maximilian Sievert war ein schwedischer Mediziner und Physiker. Er begründete die Strahlenschutzforschung. Auch eine Apparatur zur Bestrahlung bösartiger Tumore wurde von ihm entwickelt.

➤ Äquivalentdosisleistung beschreibt die pro Zeiteinheit aufgenommene Äquivalentdosis.

Kommen wir nochmal zur relativen biologischen Wirksamkeit. Die verschiedenen Strahlenarten zeigen differente biologische Effekte. Definiert ist die RBW als Verhältnis der Energiedosis einer Referenzstrahlung, die einen bestimmten biologischen Effekt hervorruft, zur Dosis einer anderen Strahlung, die zu dem gleichen biologischen Effekt am gleichen Objekt führt.

$$\text{RBW} = \frac{\text{Energiedosis der Referenzstrahlung}}{\text{Energiedosis der zu best. Strahlung}}$$

Der RBW korreliert also zur Energieübertragung der Strahlung an das durchstrahlte Objekt. Maß hierfür ist der **Lineare Energietransfer (LET)**. Dieser stellt ein indirektes Maß für die Zahl der Ionisationen pro Wegstrecke dar. Strahlung schwerer, geladener Teilchen weist einen höheren Linearen Energietransfer auf, erzeugt also sehr viele Ionisationen und löst mehr biologische Effekte auf das durchstrahlte Objekt aus. Neben der Strahlenart hängt der lineare



■ Abb. 2.13 Einfallsdosis

Energietransfer natürlich auch vom durchstrahlten Objekt ab.

➤ Die RBW steigt nur bis zu einem Maximum bei etwa 100–200 keV/μm an, um dann stark abzufallen. Grund hierfür ist der sogenannte Overkill. Es wird mehr Energie an die Zelle übertragen, als zur Inaktivierung notwendig ist.

Nach diesen theoretischen Grundlagen kommen wir zu Werten, die in der täglichen Praxis wichtig sind. Diese werden Ihnen z. T. an den Geräten direkt angezeigt und sind nach Röntgenverordnung auch dokumentationspflichtig.

2.3.5 Einfallsdosis

Hiermit wird die Dosis in Gy beschrieben, die man „frei Luft“ ohne Streukörper misst (■ Abb. 2.13). Mit Streukörpern sind Phantome oder auch Patienten gemeint, die zu einer Streuung der Strahlung führen würden. Abhängig ist die Einfallsdosis vom Fokusabstand, Energie (im Röntgen kV und Filter) und der Dosisleistung. Nur geringen Einfluss hat die Feldgröße.

2.3.6 Oberflächendosis

Jetzt kommt der Patient oder auch ein Phantom ins Spiel (■ Abb. 2.14). Neben der Einfallsdosis kommt die Rückstreuung aus dem bestrahlten Objekt, also z. B. dem Patienten, zur Oberflächendosis dazu.

2.3 • Dosisbegriffe

Auf der Eintrittsseite kann die Rückstreuung bis zu 50 % betragen. Stark abhängig ist die Rückstreuung von der Feldgröße.

In der Strahlentherapie ist auch die Oberflächendosis an der Austrittsseite wichtig, da diese bei Gegenfeldern berücksichtigt werden muss. Dazu später mehr.

2.3.7 Tiefendosis

Die Tiefendosis beschreibt die Dosis in einer bestimmten Körpertiefe, von der Einstrahloberfläche aus gemessen. Die relative Tiefendosis gibt das Verhältnis einer Tiefendosis zum Dosismaximum in Prozent an. Wichtig ist die Tiefendosis vor allem in der Strahlentherapie, da hier eine bestimmte Dosis an einem bestimmten Ort im Körper, z. B. einem Lungentumor, für den therapeutischen Erfolg angestrebt wird. Gleichzeitig soll umgebendes gesundes Gewebe natürlich nicht geschädigt werden.

Die Dosisverteilung in der Tiefe wird bewirkt durch drei Effekte:

1. Die Schwächung im Gewebe
2. Die Dosisabnahme durch den mit der Tiefe zunehmenden Abstand
3. Hinzukommende Streustrahlung

Auch bei der Tiefendosis spielt die Streustrahlung eine Rolle. Daher besteht auch hier eine Abhängigkeit von der Feldgröße.

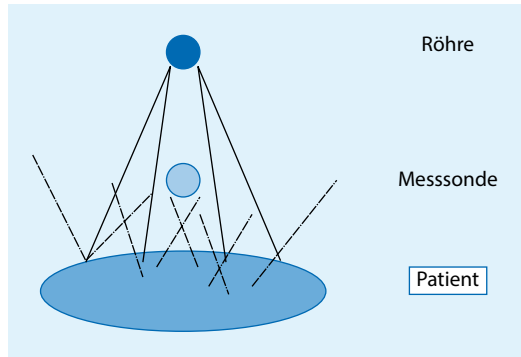
2.3.8 Dosisflächenprodukt

Wie der Name schon sagt ist das Dosisflächenprodukt (DFP) das Produkt aus Dosis und Fläche. Das ist der Dosiswert, der z. B. bei einer ganz normalen Röntgenuntersuchung der Lunge berechnet wird und nach Röntgenverordnung dokumentiert werden muss.

Ein bisschen komplizierter wird es, weil die Dosis mal in cGy, mal in μGy angegeben ist und auch die Einheit für die Fläche z. B. in m^2 oder cm^2 angegeben wird.

Umrechnung:

$$1 \text{ cGy cm}^2 = 10 \text{ mGy cm}^2 = 0.1 \text{ dGy cm}^2 \\ = 1 \text{ Gy m}^2 = 10^{-6} \text{ Gy m}^2$$



■ Abb. 2.14 Oberflächendosis

Gelegentlich findet man als Synonym auch den Ausdruck Flächendosisprodukt mit der Abkürzung FDP.

Da auch Mathematiker bei der Umrechnung leicht mal durcheinander kommen können, hat das Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz, eine Excel-Tabelle erstellt, mit der die Umrechnung leicht und sicher gelingt:

► <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/10463/10958/index.html?lang=de&download=NHZLpZig7t,Inp6l0NTU042lZ2-6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2YuqZ26gpJCHfYN2g2ym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2ldvoaCVZ>

2.3.9 Dosislängenprodukt

Das Dosislängenprodukt (DLP) ist das Äquivalent des Dosisflächenproduktes für die Computertomographie. Das Produkt wird gebildet aus der Dosis in einer Schicht, dem gewichteten CTDI (Computed Tomography Dose Index), und der Anzahl der Schichten. Der CTDI ist notwendig, da der Patient im Gegensatz zur Projektionsradiographie von allen Seiten der Röntgenstrahlung ausgesetzt wird. Bestimmt wird der CTDI mithilfe von Wasserphantomen, die die Verhältnisse des menschlichen Körpers möglichst exakt simulieren.

$$\text{DLP} = \text{CTDI} \times \text{Untersuchungslänge}$$

Die bisher verwendeten Dosisbegriffe DFP und DLP sagen letztlich noch nichts darüber aus, wie gefährlich oder ungefährlich die eingesetzte Strahlung für den Patienten ist. Um hierüber eine Aussage machen zu können, muss man wissen, welche Organregionen der Strahlung ausgesetzt worden sind.

2.3.10 Organdosis

Die Organdosis steht für die von einem Organ oder Körperteil aufgenommene Energiedosis in Gy, multipliziert mit einem Strahlungswichtungsfaktor. Dieser hängt von der verwendeten Strahlungsart ab. Eigentlich kennen Sie das schon von der relativen biologischen Wirksamkeit. Im Unterschied zur experimentell wissenschaftlich ermittelten relativen biologischen Wirksamkeit wird der Strahlungswichtungsfaktor per Rechtsnorm festgesetzt. Noch nicht bewertet wird, wie strahlensensibel das entsprechende Organ ist.

2.3.11 Effektive Dosis (auch effektive Äquivalentdosis)

Die effektive Dosis berücksichtigt die Empfindlichkeit der einzelnen Organe. Ermittelt wird die effektive Dosis über die Summe der mit den Gewebewichtungsfaktoren multiplizierten Organdosis. Berechnet und festgelegt werden die Gewebewichtungsfaktoren von der Internationalen Strahlenschutzkommission (IRCP).

Die folgende Tabelle zeigt einige Beispiele für Gewebewichtungsfaktoren (■ Tab. 2.2).

Die Summe aller Gewebewichtungsfaktoren ergibt 1.

Über die Berechnung der effektiven Dosis können Strahlenexpositionen miteinander verglichen werden.

Zur Abschätzung der effektiven Dosis sind mittlerweile zahlreiche Computerprogramme im Handel.

2.3.12 Personendosis und Körperdosis

Nach Strahlenschutzverordnung und Röntgenverordnung wird grundsätzlich verlangt, dass bei Personen, die sich in Kontrollbereichen aufhalten, Körperdosen ermittelt werden. Bei der Ganzkörperdosis geht man von einer homogenen Strahlenexposition des gesamten Körpers aus. Hierüber wird dann der Mittelwert der Äquivalentdosis für Kopf, Rumpf, Oberarm und Oberschenkel gebildet. Bei Teilkörperdosen wird der Mittelwert der

■ Tab. 2.2 Beispiele für Gewebewichtungsfaktoren

Organe und Gewebe	Gewebewichtungsfaktor
Keimdrüsen	0,08
Rotes Knochenmark	0,12
Brust	0,12
Haut	0,01
Gehirn	0,01

Äquivalentdosis in einem Organ oder Körperteil ermittelt. Wichtig sind diese Werte im beruflichen Strahlenschutz. Hier sind Grenzwerte sowohl für die Ganzkörperdosis als auch für Teilkörperdosen angegeben.

Problem der Teilkörperdosen und auch Ganzkörperdosis ist jedoch, dass diese Werte nicht direkt gemessen werden können. Daher werden stellvertretend einfachere Messgrößen (Ortsdosis und Personendosis) definiert, die bei Bedarf eine Abschätzung der effektiven Dosis erlauben.

■ Ortsdosis

Hierbei wird an einem bestimmten Ort die Äquivalentdosis für Weichteilgewebe gemessen.

■ Personendosis

Gemessen an einer repräsentativen Stelle der Körperoberfläche stellt die Personendosis die Äquivalentdosis für Weichteilgewebe dar.

➤ Die Personendosis wird anhand der Röntgenplakette ermittelt. Diese sollten Sie am Rumpf ventral tragen. Wenn Sie in Kontrollbereichen arbeiten, gehört die Plakette an die Kleidung unter die Bleischürze.

✓ Zurück zu unserer Frage vom Anfang.

Über die Berechnung der effektiven Dosis können Sie die Strahlenexposition von Szintigraphie, Röntgenaufnahmen und CT vergleichen. Bei einem Plasmozytom oder Multiplen Myelom ist eine Szintigraphie nicht sinnvoll. Die Computertomographie führt, abhängig von der eingesetzten Technik, zu einer höheren Strahlenexposition (4–5 mSv bei der CT, 2–4 mSv bei der konventionellen Radiographie). Die Genauigkeit

der Ergebnisse überwiegt jedoch um ein Vielfaches die konventionellen Röntgenaufnahmen des Skeletts, sodass bei dieser Fragestellung eine Computertomographie Methode der ersten Wahl ist.

Zum Vergleich: Die natürliche Strahlenexposition in Deutschland beträgt etwa 2 mSv, in Österreich sogar 3 mSv. Strahlenquellen hierfür sind kosmische Strahlung und terrestrische Strahlung insbesondere durch das Einatmen von Radon, einem radioaktiven Edelgas. Abhängig von den geologischen Verhältnissen kommt es so zu einer natürlichen Strahlenexposition von bis zu 5 mSv in Deutschland. Die höchste natürliche Strahlenbelastung weltweit lässt sich in Ramsar im Iran messen, hier liegt die jährliche effektive Dosis bei 200 mSv.

2.3.13 Dosimetrische Verfahren in der klinischen Praxis

T. Hartmann

Neben dem klassischen Atommodell (Bohr'sches Atommodell) wurden im Laufe der Zeit weitere Modelle entwickelt, da man nicht alle Atomeigenschaften daran erklären konnte. Diese werden auch herangezogen, um die Funktion von Messgeräten für ionisierende Strahlung zu erläutern.

Orbitalmodell

In diesem Atommodell besteht die für uns wichtigste Erweiterung des Bohr'schen Atommodells in der Darstellung der Elektronenbahnen als Orbitale, also ein diffuser Raum, in dem sich ein Elektron bewegen kann und sich damit unterschiedlich weit vom Atomkern entfernt befindet. Das hat zum einen Einfluss auf die Erklärung unterschiedlicher Bindungskräfte innerhalb eines Atoms. Das Modell erklärt aber auch, warum sich ein Elektron einerseits physikalisch wie ein Teilchen verhalten kann, andererseits wie eine elektromagnetische Welle. Und es liefert die physikalische Erklärung für den Kernspin (Drehbewegung eines Atoms um die eigene Achse), als Grundlage für die Magnetresonanztomographie.

Elektronenbändermodell

Mithilfe des Orbitalmodells kann erklärt werden, dass sich Elektronen relativ frei auf ihren Bahnen bewegen. Ein Atom ist verhältnismäßig klein und verbindet sich mit anderen Atomen zu Molekülen, um einen besseren energetischen Zustand zu erreichen. So „nutzen“ Atome z. B. gemeinsam Elektronenbindungen, um dem Idealzustand des Oktetts näher zu kommen (wie eine Firma mit zwei Standorten, die sich eine Verwaltung teilt). Durch

die räumliche Nähe kommt es vor, dass Elektronenbahnen bzw. Orbitale miteinander kombiniert werden. Dabei unterscheiden sich aber die Energieniveaus der Orbitale, schließlich kann auf einem Stuhl auch immer nur eine Person sitzen. Der Abstand zwischen den besetzten Energieniveaus wird immer kleiner, sodass ein Kontinuum entsteht. Dieses wird auch als „Band“ bezeichnet. Es werden zwei Arten von „Bändern“ unterschieden:

1. **Valenzband** = Energieband der Außenelektronen (am weitesten vom Kern entfernt), mit einem geringeren Energieniveau, da die Elektronen vom Kern weniger stark angezogen werden.
2. **Leitungsband** = unbesetztes Energieband, welches ein Energieniveau weiter vom Kern entfernt ist als das Valenzband. Je nach Material überlappen sich die Orbitale der beiden Energieniveaus sodass sich ein Teil der Elektronen frei bewegen kann (bei **Leitern, Metallen**), oder es gibt dazwischen eine Bandlücke, die nicht überwunden werden kann (**Isolatoren**). Bei manchen Stoffen sind die Lücken zwischen den Bändern so groß bzw. klein, dass unter bestimmten Bedingungen ein Teil der Elektronen vom Valenz- in das Leitungsband übergehen kann (**Halbleiter**).

Ionisierende Strahlung hat also unterschiedliche „Fähigkeiten“ und Wirkungen in Geweben und dem Organismus. Aber wenn die Strahlung unsichtbar und geruchlos ist, wie kann man dann feststellen, wie viel Strahlung an welcher Stelle auftritt? Ionisierende Strahlung kann nicht direkt gemessen werden, man muss immer den Umweg über ein Messgerät machen, in dem diese Energieform in eine andere, messbare umgewandelt wird (Energieerhaltungssatz).

Aus diesem Grund gibt es Verfahren zur Dosismessung. Hier werden die wichtigsten vorgestellt, mit denen man im MTRA-Beruf täglich in Berührung kommt. Alle dosimetrischen Verfahren nutzen die Eigenschaften ionisierender Strahlungen aus. Im Vordergrund steht dabei die Fähigkeit der Ionisation, also Elektronen aus einem Atomverband herauszulösen und die Fähigkeit photographische Schichten zu schwärzen.

■ Ionisationskammer

Die Ionisationskammer nutzt, wie der Name schon sagt, das Prinzip der Ionisation aus.

Eine Ionisationskammer ist ein gasgefüllter Behälter. Offene Messkammern (z. B. Geiger-Müller-Zählrohr) sind mit normaler Raumluft gefüllt. Spezielle, empfindliche Messkammern (z. B. Kontaminationsmonitore) sind mit einem Edelgas gefüllt. Das Gas ist von einer dünnen Membran (z. B. Metallfolien) umgeben, die das Austreten des Gases

verhindert, gleichzeitig aber dünn genug sind, um die Strahlung ungehindert durchzulassen.

Offene Messkammern können für alle Strahlenarten verwendet werden. Da es keine Membran o. ä. gibt, können Strahlenquanten und Teilchen (auch Alpha-Teilchen, wenn man sich innerhalb der Reichweite der Messkammer befindet) auftreten.

Der russische Ex-Agent und Buchautor Alexander Walterowitsch Litwinenko wurde 2006 mit Polonium vergiftet und verstarb daran. Man vermutet, dass das Polonium aus dem Ausland unbemerkt nach London gebracht werden konnte, da dieser Alphastrahler durch seine kurze Reichweite in der Westentasche transportiert werden kann ohne, dass der Transporteur direkt gefährdet wird und kein Strahlungsscanner am Flughafen es aufspüren kann (es sei denn, man geht mit einem Geiger-Müller-Zählrohr in die Westentasche).

In geschlossenen Messkammern werden nur Strahlenarten gemessen, die in der Lage sind, die Membran der Kammer zu durchdringen. In der Medizin werden i. d. R. nur geschlossene Messkammern verwendet.

Was passiert jetzt in der Kammer? Gasförmige Stoffe bestehen aus Atomen, die durch auftreffende Strahlung direkt oder indirekt ionisiert werden können. Das bedeutet, dass ein Strahlenquant auf ein Atom des Gases trifft und ein Elektron aus der Atomverband herauslöst. Dieses Elektron kann sich jetzt „frei“ im Gas bewegen und hat das Bestreben, eine freie Stelle zu finden. Außerhalb einer Ionisationskammer würde es wieder auf den freien Platz zurück fallen.

Jetzt kommt der Trick der Ionisationskammer: an ihr sind zwei Elektroden angebracht (Anode und Kathode), zwischen denen eine Spannung unterschiedlicher Höhe anliegt (bis zu 400 V). Diese Spannung wirkt auf das freie Elektron wie ein Fluss. Das Elektron wird von der positiv geladenen Anode angezogen. Aus dem freien Elektron (bzw. den vielen Elektronen) wird ein Stromfluss. Dieser ist messbar.

Je mehr Strom gemessen wird, umso mehr Ionisationen müssen stattgefunden haben.

Über die Größe der Messkammer wird die Messempfindlichkeit gesteuert. Je größer eine Messkammer, umso geringere Strahlenmengen kann sie messen (viel Gas in der Kammer erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass ein einzelnes Strahlungsquant ein Atom trifft).

Bei der Verwendung eines Messgerätes mit Ionisationskammer muss darauf geachtet werden, in welchem Messbereich die Messkammer einsetzbar ist. Legt man an einer Messkammer eine zu niedrige Spannung an, und es trifft viel Strahlung auf, kann nichts gemessen werden. Legt man an einer Messkammer eine Spannung an, die zu hoch ist, kann die Membran der Kammer zerstört werden.

Man kann es sich vorstellen wie einen Fluss (angelegte Spannung), auf dem Schiffe (Elektronen durch Ionisation) fahren können. Die Menge und Größe der Schiffe (Anzahl und Energie der Elektronen) ist unbekannt. Man steht am Ende des Flusses und wartet auf die unbekannte Lieferung. Auf einem kleinen Fluss (geringe Spannung liegt an der Messkammer an) können auch nur wenige, kleine Schiffe transportiert werden. Auf einem großen Fluss (eine hohe Spannung liegt an der Messkammer an), wie z. B. dem Rhein, fahren große Transportschiffe mit viel Ladung.

Erwartet man also eine große Lieferung, wird man sich nicht an einen Dorfbach (niedrige Spannung) stellen, da dort keine großen Schiffe fahren können.

Wenn ein kleiner Fluss plötzlich eine zu große Wassermenge aufnehmen soll (hohe Spannung), kommt es zu einer Überschwemmung.

In der beruflichen Praxis findet man Ionisationskammern an „fast jeder Ecke“ und in allen Bereichen. Nachfolgend sind ein paar typische Beispiele aufgeführt:

- Kontaminationsmonitore finden in der Nuklearmedizin Verwendung. So muss sich z. B. das Personal bei Verlassen der Abteilung ausmessen, um zu verhindern, dass radioaktive Stoffe verschleppt werden.
- Belichtungsmesskammern im konventionellen Röntgen und in der Computertomographie sichern die Qualität der Bilder.
- In der Durchleuchtungstechnik wird über angeschlossene Messkammern die Leistung der Röntgenröhre gesteuert.
- Überwachung der Patientendosis am Linearbeschleuniger in der Strahlentherapie erfolgt über Messkammern im Strahlerkopf (Monitoring).

■ Elektronische Personendosimeter (EPD)

Digitale Dosimeter werden in der Radiologie angewendet, z. B. bei der Überwachung von schwangerem Personal, um jederzeit die Dosis zu überprüfen und ggf. einen Einsatz an einem anderen Arbeitsplatz zu veranlassen. EPD funktionieren auf Halb-

leiterbasis. Halbleiter haben die Eigenschaft, unter bestimmten Bedingungen vom Nichtleiter zum Leiter zu werden. In manchen Fällen genügt schon die Erhöhung der Raumtemperatur (am absoluten Nullpunkt sind Halbleiter Isolatoren). Bei den EPD kommen Silicium-Halbleiter zur Anwendung. Dabei handelt es sich um sog. Elementhalbleiter mit einer Gitterstruktur.

In diese Gitterstruktur werden Fremdatome eingebracht (Störstellen), welche die elektrische Leitfähigkeit verändern. Dieser Vorgang wird als „Dotierung“ bezeichnet. Ein Halbleiter kann entweder n-dotiert (das Störstellenatom bringt ein Elektron in die Verbindung ein, das eigentlich nicht benötigt wird) oder p-dotiert sein (das Störatom hat im Valenzband ein Elektron weniger als das Ursprungsmaterial). Bei n-dotierten Halbleitern kann das „überschüssige“ Elektron schnell aus der Verbindung gelöst werden und so zu einem Stromfluss führen. Ein p-dotierter Halbleiter hat ein „Elektronenloch“ (Defektelektron) welches leicht durch Elektronen aus dem Valenzband aufgefüllt werden kann.

In einem EPD befinden sich p-dotierte Halbleiter. Dadurch können, beim Auftreffen ionisierender Strahlung, Elektronen leicht aus dem Valenz- in das Leitungsband gelangen und so zu einem messbaren Stromfluss führen. Der Stromfluss ist ein Maß für die Dosis.

Viele Mess- und Aufnahmegeräte für ionisierende Strahlung basieren inzwischen auf dieser Halbleitertechnik.

■ Thermo-Lumineszenz-Detektoren (TLD)

TLD bestehen aus kleinen Kristallen (LiB_4O_7 und CaSO_4), die in Stäbchen eingebaut sind und aussehen wie ein größeres Reiskorn.

Aufgrund der Gitterstruktur der Kristalle kann die auftreffende Strahlung durch Anregungsprozesse ihre Energie auf die Elektronen im Valenzband übertragen. Die Elektronen gelangen dadurch in das Leitungsband. Ein Teil der Elektronen füllt die so entstandenen „Löcher“ sofort wieder auf, und es wird Fluoreszenzenergie frei. Die anderen verbleiben an sog. Haftstellen (Traps) im Leitungsband. Die Kristalle können also in dieser Form die Energie der Strahlung speichern.

Erst wenn die TLD über 200°C erhitzt werden, geben die Traps die eingefangenen Elektronen und

deren Energie in Form von Lichtblitzen wieder „frei“. Diese Lichtblitze werden von Photodetektoren registriert. Je „heller“ der Lichtblitz, umso mehr Energie hat das Elektron abgegeben und, im Umkehrschluss, vorher von der Strahlung aufgenommen. Die Intensität des Lichtes ist also ein Maß für die Dosis.

Anwendung finden die TLD in Fingerringdosimetern. Diese erhält das Personal an Arbeitsplätzen wie der Nuklearmedizin und der Durchleuchtung. Damit soll gemessen werden, wie viel Strahlung die Körperteile abbekommen, die direkt der Strahlung ausgesetzt sind. Eine besonders große Rolle spielt das Tragen der Fingerringdosimeter in der Nuklearmedizin, da die radioaktiven Stoffe mit den Händen zubereitet werden müssen (► Kap. 9).

■ Gleitschatten-Filmdosimeter

Bei dieser, in Deutschland gängigen Dosimeterform wird die Eigenschaft der Strahlung, photographische Schichten zu schwärzen, ausgenutzt.

Das Haupteinsatzgebiet ist die Ermittlung von Messwerten zur Ganzkörperdosimetrie beruflich strahlenexponierter Personen. Gemessen werden in erster Linie Photonendosen (Röntgen-, Gammastrahlung), aber auch Betastrahlung kann nachgewiesen werden.

Die Gleitschattenkassetten, in denen sich ein Röntgenfilm in einer lichtdichten Verpackung befindet, sind aus Kunststoff. An verschiedenen Stellen sind Filter angebracht (Aluminium, Kupfer, Blei etc.), welche die Strahlung unterschiedlich leicht oder schwer durchlassen.

Welche Dosis welchen Filter durchdringt, ist bekannt. Dadurch kann man anhand der Schwärzung des Filmes Rückschlüsse auf die Dosis der aufgetroffenen Strahlung ziehen. Zusätzlich ist, durch die räumliche Anordnung der Filter, eine Bestimmung der Einstrahlrichtung möglich.

Das spielt z. B. dann eine Rolle, wenn sich bei einem MTRA die Gleitschattenkassette unbemerkt von der Dienstkleidung löst und in den Strahlengang fällt. Dann wird eine Strahlenbelastung nachgewiesen, die der MTRA gar nicht abbekommen hat. Durch die Bestimmung der Einstrahlrichtung kann festgestellt werden, dass zum Zeitpunkt der Bestrahlung die Kassette nicht ordnungsgemäß an der Kleidung befestigt war. Die zuständige Behörde

■ Tab. 2.3 Unterschiede der Überwachungssysteme

Gleitschatten-Filmdosimeter	EPD
Monatliche Auswertung, Verzögerung der Mitteilung über Dosiswerte um ca. 8 Wochen	Jederzeit ablesbare Dosiswerte
Amtliche Überwachung der Grenzwerte bundesweit, auch bei Stellenwechsel	Personal ist selbstständig für Dokumentation und Überwachung zuständig (innerhalb der EU)
Anschaffungskosten Gleitschattenkassette ca. 10,00 €, Kosten für monatliche Lieferung und Auswertung ca. 3,73 €, jährliche Bearbeitungsgebühr ca. 5,40 €	Anschaffungskosten ca. 540,00 €, zzgl. Gebühren für Eichung und Wartung ca. 140 € alle zwei Jahre
Unterscheidungsmöglichkeiten aller Strahlenarten, -energien und Strahlungsrichtungen	Unterscheidung von elektromagnetischer Wellenstrahlung und Betastrahlung, keine Unterscheidung von Röntgen- und Gammastrahlung, Strahlungsrichtung und -energien

kann daraufhin bestimmen, dass die gemessene Dosis nicht zur Lebenszeitdosis addiert werden darf.

Beruflich strahlenexponiertes Personal ist nach der Röntgenverordnung verpflichtet, das Dosimeter während der Arbeit an einer „repräsentativen Stelle“ der Körperoberfläche unter einer ggf. angelegten Bleischürze zu tragen. Schließlich will man ja wissen, wie viel Strahlung der Körper abbekommen hat, nicht die Schürze.

Ausgewertet werden die Filmdosimeter nach strengen Standards der Filmentwicklung und Messung der Filmschwärzung. Die Schwärzung hinter den Filtern ist ein Maß für die Dosis der aufgetroffenen Strahlung.

Die meisten europäischen Länder haben inzwischen auf elektronische Personendosimeter umgestellt.

Vergleicht man die Unterschiede der beiden Überwachungssysteme kommt man zu folgendem Ergebnis (■ Tab. 2.3).

Ein kleines Gedankenspiel: Angenommen eine MTRA bekommt einmalig ein Dosimeter und arbeitet danach 40 Jahre lang damit im Beruf (ohne Defekte, Austausch, Inflationsrate etc.). Dann kostet die berufliche Überwachung mittels Gleitschatten-Filmdosimeter ca. 2000 €, die Überwachung mittels EPD ca. 3340 €.

Diese Kosten muss übrigens der Arbeitgeber übernehmen, der gesetzlich zu Überwachung und Schutz seiner Mitarbeiter verpflichtet ist (► Kap. 1).

Nicht direkt ablesbare Dosimeter, wie TLD und Filmdosimeter, dürfen in Deutschland ausschließlich in amtlichen Messstellen ausgewertet werden.

Die Messwerte werden behördlich gespeichert, um eine gesundheitsgefährdende Überschreitung der Lebenszeitdosis bei beruflich strahlenexponierten Personen, auch bei Umzug und Wechsel der Arbeitsstelle innerhalb Deutschlands, zu verhindern.

In Deutschland gibt es vier amtliche Messstellen, welche alle Dosimeter Deutschlands, aufgeteilt nach Bundesländern, auswerten (■ Tab. 2.4).

2.4 Wirkung ionisierender Strahlung auf den Organismus

T. Hartmann

Wie die tragischen und bekannten Ereignisse u. a. aus Japan und der Ukraine gezeigt haben, ist ionisierende Strahlung für den Menschen sehr gefährlich. Bei beiden Unfällen wurde radioaktives Iod und Cäsium frei – beides sind Betastrahler, die in den Körper aufgenommen werden können (**Inkorporation**), und damit Wechselwirkungen im Organismus auslösen.

Auf der anderen Seite kann ionisierende Strahlung sehr viel Gutes bewirken und hat die Möglichkeiten der modernen Medizin im Bereich der Diagnostik und Therapie maßgeblich geprägt. Ohne die Entdeckung der Röntgenstrahlen wüssten Operateure häufig nicht, wohin und vor allem warum sie operieren sollen.

Wo genau sich Fluch und Segen der Wissenschaft treffen und welche Auswirkungen das hat, wird in diesem Kapitel näher beleuchtet.

2.4.1 Zellaufbau

Die Wirkungen ionisierender Strahlungen treten in erster Linie auf zellulärer Ebene auf. Dabei können unterschiedliche Zellbestandteile betroffen sein und zu Störungen im Zellstoffwechsel führen (zum Aufbau der Zelle ► Kap. 12).

Ob Schäden an den Zellen, insbesondere der DNA im Zellkern, überhaupt auftreten, ist darüber hinaus von der Zellteilung abhängig.

Zellschädigungen durch Strahlung sind u. a. davon abhängig, in welcher Zellteilungsphase der Mitose oder Meiose die Strahlung auf den Körper auftrifft (► Abb. 2.15).

Sie S- und die G0-Phase gelten als strahlenresistent. Wenn sich also eine Zelle in genau dieser Phase befindet, hat die Strahlung wenige Chancen, einen Schaden anzurichten. In den anderen Phasen kann die Strahlung „angreifen“ und zu einer Störung des Zellzyklus führen. Die Folgen sind entweder der gesteuerte Zelltod (Apoptose) oder Fehler bei der Zellteilung, die später zu einem Tumor führen können.

Die Zellen mancher Gewebe teilen sich häufig (z. B. Blut-, Hautzellen), andere Zellen befinden sich dauerhaft in der G0-Phase (z. B. Nervenzellen). S-, G2- und Mitosephase dauern, wenn sie eintreten, bei allen Zellen von Säugetieren, in etwa gleich lang zwischen 8 und 20 Stunden.

In der Mitose- und der G2-Phase ist die Strahlensensibilität am höchsten. Innerhalb der G1-Phase sind die Zellen zunächst relativ unempfindlich, werden aber strahlensensibel am Übergang in die S-Phase.

Aus diesen Zusammenhängen lassen sich zwei wichtige Erkenntnisse für die medizinische Anwendung von ionisierenden Strahlen ableiten:

1. **Zellen die sich häufiger teilen**, sind stärker von Strahlenwirkungen betroffen. Auf solche Organe muss besonders geachtet werden.
2. Der **zeitliche Aspekt** spielt eine große Rolle, da Teilungszyklen bestimmten Zeiten unterliegen.

Bleibt die Frage, warum dann nicht noch mehr Menschen an Tumoren erkranken, schließlich sind wir aus der Erde und dem Weltraum ständig ionisierender Strahlung ausgesetzt. Im menschlichen Körper (75 kg) finden 1 Milliarde Ionisationspro-

Tab. 2.4 Amtliche Messstellen in Deutschland

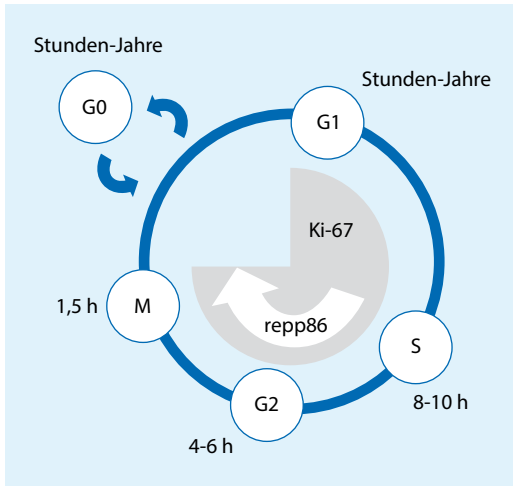
Messstelle	Bundesländer
Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen Personendosismessstelle	Bremen Niedersachsen Nordrhein-Westfalen Rheinland-Pfalz Saarland
Helmholtz Zentrum München Auswertestelle für Strahldosimeter	Baden-Württemberg Bayern Hessen Schleswig-Holstein Hamburg
Landesanstalt für Personendosimetrie und Strahlenschutz Ausbildung (LPS) Personendosismessstelle	Brandenburg Mecklenburg-Vorpommern Sachsen Sachsen-Anhalt Thüringen
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Strahlungsmessstelle	Berlin

zesse pro Sekunde aufgrund interner und externer Bestrahlung durch **natürliche** Quellen statt.

Die Antwort ist in „Sicherheitssystemen“ im Zellzyklus zu finden, sog. Checkpoints. Davon gibt es gleich mehrere an den Übergängen von der G1- in die S-Phase, der G2-Phase in die Mitose und innerhalb der Mitose. Diese Kontrollmechanismen werden über Proteine, sog. zyklinabhängige Kinasen gesteuert. Wird an den Checkpoints die Schädigung einer Zelle festgestellt, wird entweder der Zellzyklus angehalten, um die Schäden zu reparieren, oder die Zelle wird inaktiviert, und es kommt zum programmierten Zelltod (Apoptose). Man kann sich das wie in einer Fabrik vorstellen, in der am Ende der Produktion die Bauteile kontrolliert werden. Ein nicht funktionierendes Bauteil wird entweder repariert oder wandert in die Abfalltonne, wenn eine Reparatur nicht mehr möglich ist.

2.4.2 Strahlenwirkungen

Die Wirkung der beschriebenen Strahlenarten, im Guten wie im Schlechten, hängt von der Frequenz der Strahlung und den damit verbundenen Wech-



■ Abb. 2.15 Zellzyklus

selwirkungsprozessen ab, welche die Strahlungsarten mit Materie eingehen. Diese beruhen auf den Elementarprozessen der Anregung und Ionisation.

Bei der **Anregung** wird durch zugeführte Energie ein Atom in einen höheren Energiezustand versetzt. Dabei wird ein Hüllenelektron einer inneren Schale auf eine höhere Schale gehoben. Der Zustand der Anregung ist i. d. R. nur sehr kurz (10^{-8} sek). Danach wird die überschüssige Energie wieder abgegeben. Meist geschieht dies in Form elektromagnetischer Wellenstrahlung.

Die angeregten Atome sind sehr reaktionsfreudig und können chemische Reaktionen eingehen, welche für die Wirkung der Strahlung auf den Gesamtorganismus bedeutsam sind.

Als **Ionisation** bezeichnet man die Aufnahme oder Abgabe eines Elektrons und die damit verbundene Störung des Gleichgewichts der Ladungen in einem Atom. Das kann entweder durch Stoßionisation/**direkte Ionisation** entstehen (ein geladenes Teilchen trifft auf ein Hüllenelektron und gibt dabei Energie ab) oder durch Absorption/**indirekte Ionisation** (elektromagnetische Wellen oder Neutronen treffen auf ein Atom und ihre Energie wird absorbiert, wobei sich ein Elektron aus dem Atomverband löst).

➤ Ein bildlicher Vergleich, der ein wenig hinkt: direkte Ionisation kann man sich vorstellen wie bei einem Boccia-Spiel. Eine Kugel wird

durch eine andere Kugel getroffen und verlässt ihren Platz.

Bei der indirekten Ionisation ist es eher so, als ob man eine Kugel „wegpustet“, diese also nicht durch ein anderes Teilchen, sondern von Energie getroffen wird.

I. d. R. erfährt die elektromagnetische Strahlung beim Durchtritt durch Materie (sei es der menschliche Körper, Luft oder ein Röntgenschirm) eine **Schwächung**. Die Strahlung verliert in dem Maß Energie, wie sie von der Umgebung absorbiert wird.

Diese Schwächung ist grundsätzlich abhängig von Dicke, Dichte und Ordnungszahl des durchstrahlten Objektes. Je dichter ein Gewebe ist (z. B. Knochen), desto weniger wird die Strahlung geschwächt und umso mehr Strahlung „bleibt im Körper hängen“, wird also absorbiert. Demnach versteht man unter **Absorption** den Strahlungsanteil, dessen Energie auf die durchstrahlte Materie übertragen wurde. Nur dieser Anteil ist für die Wirkung der Strahlung auf den Organismus von Belang.

Auch die Eigenschaften der unterschiedlichen Strahlungsarten spielen bei der Betrachtung der Strahlenwirkung für den menschlichen Organismus eine große Rolle. Ein Maß für die schädigende Wirkung ist u. a. der **Lineare Energietransfer (LET)**. Er gibt an, wie viele Ionisationen ein Strahlenquant auf seinem Weg durch Gewebe auslösen kann. In einen physikalischen Zusammenhang gepackt heißt das:

LET = Energieverlust (in keV) : Flugstrecke (in μm)

Als dicht ionisierende Strahlenarten gelten Teilchenstrahlungen. Diese lösen auf ihrem Flugweg viele Ionisationen aus, werden aber kaum gestreut. Röntgenstrahlen (Photonen) hingegen lösen vergleichsweise weniger Ionisationen aus, werden aber stärker gestreut und beeinflussen damit auch Zellen außerhalb der Flugbahn der Röntgenquanten (■ Tab. 2.5).

Da der Lineare Energietransfer eher der physikalischen Betrachtung der Strahlenwirkung dient, gibt es noch den Begriff der **Relativen biologischen Wirksamkeit (RBW)**. Sie dient u. a. der Unterteilung der Gesundheitsgefahr, die von den verschiedenen Strahlungsarten ausgeht. Dabei setzte man die Wirkungen,

■ Tab. 2.5 Locker und dicht ionisierende Strahlen

Dicht ionisierend	Locker ionisierend
Ionisationsereignisse in kleinen kompakten Volumina um die Bahnspur des Teilchens	Wechselwirkungsereignisse und Ionisation sind einigermaßen gleichmäßig über das gesamte bestrahlte Volumen verteilt

die bei unterschiedlichen Strahlenarten beobachtet werden können, wenn man die gleiche Dosis in Gray verabreicht, und setzt sie zueinander ins Verhältnis. Daraus ergeben sich folgende RBW-Faktoren:

- Röntgenstrahlung: 1
- Gammastrahlung: 1
- Betastrahlung: 1
- Neutronenstrahlung (je nach Energie): 5–20
- Protonenstrahlung: 5
- Alphastrahlung: 20

Eine Bestrahlung mit Alphateilchen ist also 20mal wirksamer als die gleiche Dosis Röntgenstrahlung. Bleibt das „Problem“ der Eindringtiefe von Alphateilchen. Sie können zwar sehr viele Ionisationen auf ihrer Flugstrecke auslösen, sind aber bereits durch ein Blatt Papier abschirmbar.

Wie wirksam eine Strahlung im biologischen Organismus sein kann ist von mehreren Faktoren abhängig:

- Welches Gewebe wird bestrahlt?
- Wie viel Dosis wurde verabreicht?
- Welche LET/Ionisationsdichte besitzt die Strahlung?

Aus diesem Grund sind auch die Wirkungen von Strahlungsunfällen wie in Fukushima oder Tschernobyl nicht vergleichbar mit der Anwendung in der Medizin. Unabhängig davon dienen solche Ereignisse und deren Auswirkung der Erforschung der Strahlenfolgen. Man sollte schließlich davon ausgehen, dass die Strahlenwirkung am Menschen nicht willentlich getestet wird bzw. wurde. Wer dieses Thema allerdings recherchierend vertieft wird auf erschreckende Fakten stoßen.

Alle diese Ergebnisse dienen Fachgesellschaften zur Einschätzung von notwendigen Grenzwerten bei z. B. Lebensmitteln und der Entwicklung von medizinischen Standards.

Neben der direkten Wirkung ionisierender Strahlung treten, als Folge der Anregung und Ioni-

sation, Wechselwirkungsprozesse auf, die nachfolgend kurz erläutert werden.

Grundsätzlich gilt: eine Strahlenwirkung erzeugt ausschließlich der absorbierte Teil der aufgetroffenen Strahlung.

Aus Sicht des Strahlenschutzes und aus Sicht der Strahlentherapie werden Strahlenwirkungen unterschiedlich im Sinne ihres sinnvollen Einsatzes definiert.

Während man im Strahlenschutz möglichst überhaupt keine Strahlenschäden möchte bzw. diese so weit wie möglich verhindern muss, will man in der Strahlentherapie das Gegenteil. Hier ist es wichtig, **kontrolliert Schäden** an einem Tumor zu setzen, um diesen überhaupt behandeln zu können. Natürlich sollte das möglichst ohne Nebenwirkungen an den gesunden Geweben geschehen. In genau diesem Spannungsfeld bewegen sich auch die MTRA. Daher spielen beide Betrachtungsweisen und natürlich die Steuerung möglicher Schutz- bzw. Therapiemaßnahmen vor dem Hintergrund der Strahlenwirkung auf den Organismus eine große Rolle.

Unterschieden werden zwei Arten der Strahlenwirkung:

Stochastische Strahlenwirkung

Das Themengebiet der Stochastik umfasst Wahrscheinlichkeitsrechnungen. Leitet man dem Begriff aus seiner Entstehung im altgriechischen ab, müsste man es mit „Ratekunst“ übersetzen.

Bezogen auf die Wirkung von ionisierender Strahlung bedeutet das, theoretisch kann jedes einzelne Röntgenquant ein unerwünschtes, schädigendes Ereignis im Organismus hervorrufen. Wie hoch die Wahrscheinlichkeit dieses Ereignisses ist, hängt davon ab, wie viele Strahlenquanten auf den Organismus auftreffen.

Man kann sich das auch so vorstellen: Wenn auf einem Hochhaus jemand steht, der Wasserbomben nach unten wirft, ist die Wahrscheinlichkeit, dass er einen einzelnen Menschen auf dem Fußweg trifft,

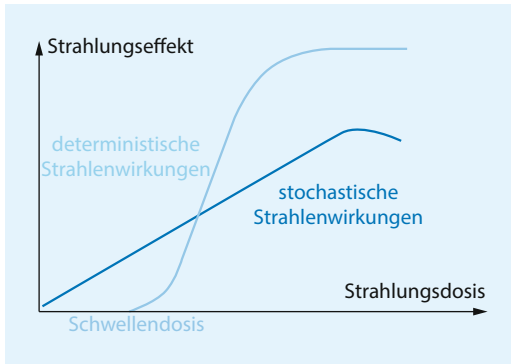


Abb. 2.16 Deterministische Strahlenwirkung

relativ klein. Will der Werfer dann noch genau die Handtasche treffen, sinkt das Risiko weiter.

Werden aber 100 Wasserbomben geworfen, steigt diese Wahrscheinlichkeit. Die Wahrscheinlichkeit also, dass ein einzelner Quant eine gesundheitliche Schädigung hervorruft, ist gering. Je mehr Strahlung man aber abbekommt, umso höher ist das gesundheitliche Risiko.

Somit leitet sich aus der stochastischen Strahlenwirkung das oberste Gebot des Strahlenschutzes ab:

„As Low As Reasonably Achievable“ (ALARA-Prinzip) – man darf nur so wenig Strahlung wie unbedingt nötig verabreichen, da keine Schwellendosis für einen bestimmten Strahlenschaden existiert. Denn ein einzelnes Quant könnte ja ...

Für MTRA bedeutet das, alle möglichen Maßnahmen des Strahlenschutzes sind sowohl beim Patienten als auch beim Personal anzuwenden, da stochastische Strahlenschäden vermieden werden müssen.

Deterministische Strahlenwirkung

Dieser Begriff bedeutet so viel wie „Abgrenzung“ oder „Bestimmung“. Im Zusammenhang mit einer Strahlenexposition ist es also möglich, den daraus folgenden Schaden an einem Gewebe zu bestimmen. Man weiß, nach welcher Dosis die gesunde Haut mit einer Hautreaktion (Verbrennung) reagiert.

Demnach existiert eine Schwellendosis (Abb. 2.16). Diese ist für jedes Gewebe definiert. Aus Sicht des Strahlenschutzes dürfen deterministische Schäden nicht auftreten. Aus Sicht der The-

rapie sind jedoch genau diese Schäden „erwünscht“, da man durch Forschungsergebnisse belegen kann, wann auch die Schwellendosis eines Tumors erreicht ist.

In der Strahlentherapie werden gezielt deterministische Schäden an bösartigen Tumoren gesetzt.

Daraus ergibt sich ein neues Problem. Ein Tumor wird immer von gesundem Gewebe umgeben. Auch für dieses existiert eine Schwellendosis.

Um einen Tumor erfolgreich zu bekämpfen, muss ein Kompromiss zwischen der sicheren Zerstörung des Tumors und der noch erträglichen Nebenwirkung des umliegenden Gewebes gefunden werden.

Bereits in den 1930er Jahren hat das Hermann Holthusen, ein Hamburger Röntgenologe, in dem nach ihm benannten Diagramm dargestellt. Er beschrieb, dass man nie eine 100 % Tumorkontrolle anstreben kann, da dann auch die Nebenwirkungsrate mit 50 % zu hoch ist. Die Therapie soll so ausgerichtet werden, dass man eine 85–90 % Tumorkontrolle erreicht, bei der 5–10 % Nebenwirkungen zu erwarten sind.

2.4.3 Phasen der Strahlenwirkung

Im Zusammenhang mit gesundheitlichen Schäden durch ionisierende Strahlung fallen Stichworte wie „strahleninduzierter Tumor“ oder „Mutationen bei den Nachkommen“. Das lässt vermuten, dass nach der Einwirkung von Strahlung nicht sofort eine Wirkung zu beobachten ist, sondern diese z. T. viele Jahre oder gar Generationen später auftreten kann.

Um diesen Effekt zu erklären, muss man sich zunächst mit dem zeitlichen Ablauf der Strahlenwirkung auseinandersetzen.

Die Strahlenwirkung lässt sich in vier Phasen einteilen.

Physikalische Phase

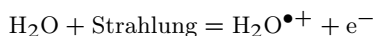
In dieser Phase findet die Absorption der Strahlung im Gewebe in Sekundenbruchteilen (10^{-16} s) statt. Es ist die Ausgangslage für alle weiteren Prozesse, da nur die absorbierte Energie eine Wirkung im Organismus auslöst. Die Absorption führt zu Ionisationen, Molekulanregungen und Wärme.

Physikalisch-chemische Phase

In dieser Phase werden die chemischen Reaktionen und damit verbundenen Schädigungen (direkt und indirekt) an den Molekülen beschrieben. Direkte Schäden entstehen durch Verluste von Bindungselektronen in den Molekülen, wodurch diese auseinander brechen. Indirekte Schäden werden durch Radikale, also chemisch sehr reaktive Stoffe hervorgerufen. Auch diese Reaktionen laufen in Zeiten weit unter einer Sekunde (10^{-6} s) im Körper ab.

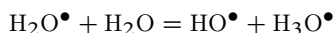
Diese Phase wird auch als radiochemische Phase bezeichnet. Die freien Radikale entstehen durch die **Radiolyse des Wassers**. Da die menschliche Zelle zu ca. 80 % aus Wasser besteht, hat Strahlungsenergie hier jede Menge Angriffspunkte.

Wenn ionisierende Strahlung auf Wasser trifft, führt das zu einem Zerfall des Wassermoleküls:



Der Punkt kennzeichnet das freie Radikal.

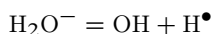
Die beiden „Bösewichter“ sind chemisch hochreaktiv und suchen in ihrer Umgebung nach weiteren Molekülen, mit denen sie reagieren können. Da ist ja noch jede Menge Wasser:



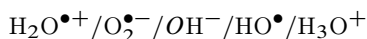
Das negativ geladene Wasserteilchen ist sehr instabil und zerfällt unmittelbar:



Das Elektron umgibt sich mit einer Wasserhülle und ist ebenfalls hochreaktiv. Es reagiert sehr schnell mit Sauerstoff und wird zu einem Superoxidradikal ($\text{O}_2^{\bullet-}$).



So bleiben, nach Abschluss der Radiolyse des Wassers folgende Bestandteile in der Zelle, die alle hochreaktiv und auf der Suche nach Molekülen sind, mit denen sie reagieren können:



Die so entstandenen Radikale können an der DNA angreifen und damit die Zelle schädigen. Die Radikale können besonders gut wirken, wenn sich Sauerstoff in der Umgebung befindet. Dieser wirkt als Strahlensensibilisator. Die Radikale entziehen der DNA z. B. H-Atome oder drängen an Stellen H-Atome auf, wo keine hingehören. Dadurch können Bestandteile der DNA selbst zu Radikalen werden. Wenn jetzt Sauerstoff in der Zelle vorhanden ist (was bei lebenden Zellen den Normalfall darstellt), reagiert das DNA-Radikal lieber mit dem Sauerstoff, statt die DNA-Stelle zu reparieren.

Biochemische Phase

In der biochemischen Phase, die im Sekunden- bis Minutenbereich liegt, kommt es zu schädigenden Veränderungen an organischen Molekülen, von denen insbesondere die Zell-DNA betroffen ist.

Als Folgeprodukt der Radiolyse entsteht im weiteren Verlauf u. a. noch H_2O_2 (Wasserstoffperoxid), welches ein starkes Zellgift darstellt. Wasserstoffperoxid findet man in Haarfarbe zum Blondieren.

Wer sich schon einmal seine Haare blondiert hat, kennt sicher das „prickelnde“ und nicht gerade angenehme Gefühl auf der Kopfhaut. Wie mag sich das erst im Inneren des Körpers „anfühlen“?

Welche Radikale überwiegend entstehen und wie stark ihre Wirkung ausfällt, ist auch vom Linearen Energietransfer (LET) abhängig. Je höher der LET, umso:

- mehr H_2O_2 wird gebildet,
- weniger spielt das Vorliegen des Sauerstoffs eine Rolle,
- geringer ist die Radikalausbeute,
- höher ist die direkte Trefferzahl an der Zelle und damit einhergehend eine höhere Anzahl nichtreparabler Zellschäden.

Die Radikale greifen in erster Linie die DNA der Zellen an und führen dort zu verschiedenen Schäden. In der experimentellen Grundlagenforschung lassen sich bislang folgende Schäden feststellen:

- Basenmodifikationen und Basenverluste
- Veränderungen an Zuckermolekülen
- Einzel- und Doppelstrangbrüche
- DNA-Vernetzungen, sogenannte Crosslinks

- Mehrfachveränderungen an der DNA (Bulky Lesions)

Bestrahlungsschäden

Nach Bestrahlung mit 1 Gy Röntgenstrahlung können in **einer** Zelle folgende Schäden gefunden werden:

- 1000–2000 Basenveränderungen
- 500–1000 Einzelstrangbrüche
- 800–1600 Veränderungen an Zuckermolekülen
- 150 Crosslinks
- 50 Doppelstrangbrüche und Bulky Lesions

In den Zellen existieren, wie bereits erwähnt, ausgeklügelte Sicherheitssysteme, um Schäden zu reparieren und so Mutationen zu verhindern.

Die meisten dieser Reparaturvorgänge sind nach 6–8 Stunden abgeschlossen. Einige, schnelle Reparaturen finden in 10–20 Minuten statt, andere brauchen die volle Reparaturzeit von einigen Tagen. Etwa 95 % aller Schäden können repariert werden.

- **Als Faustregel gilt: nach 2 Stunden sind die meisten, nach 6–8 Stunden die möglichen Reparaturprozesse an Normalgeweben abgeschlossen. Dieser zeitliche Zusammenhang ist für die Planung einer Strahlentherapie bedeutsam, wenn man Tumorgewebe zerstören und Normalgewebe schonen möchte.**

Alle nicht reparierten Schäden können zum Zelltod oder zu Mutationen und damit zu einer Tumorerkrankung führen.

Biologische Phase

Die letzte Phase der Strahlenwirkung ist die zeitlich nicht begrenzbar biologische Phase, in der es auf der Zellebene zu Mutationen, Veränderungen im Stoffwechsel oder Zelltod kommen kann. Sichtbar werden solche Veränderungen oft erst nach Jahrzehnten durch die Entstehung maligner Tumore oder sogar erst bei Nachfolgenerationen, wenn Schäden vererbt wurden.

Das erklärt die Unberechenbarkeit ionisierender Strahlung und auch den teilweise sorglosen

Umgang damit. Bei Unachtsamkeiten im Straßenverkehr bemerkt man die Folgen sehr schnell: im harmloseren Fall in Form eines Strafzettels, anderenfalls sogar durch die Folgen eines Unfalls. Im Umgang mit Strahlung folgen die „Strafen“ erst viel, viel später.

Zu den schwerwiegenden Strahlenfolgen der Zelle gehört die Zellinaktivierung. Unter diesem Begriff werden verschiedene Formen des Zelltodes zusammengefasst:

1. **Funktionsverlust bei Zellen**, die sich in der G0-Phase befinden und nicht mehr teilungsfähig sind, z. B. Nerven-, Muskelzellen
2. **Reproduktiver Zelltod** bedeutet, dass die Zellen ihre Teilungsfähigkeit verlieren. Die Zellen sind noch vorhanden, können aber nur noch eine oder zwei Mitosen durchlaufen und verlieren danach ihre Teilungsfähigkeit und damit ihre Funktion, z. B. blutbildende (hämatopoetische) Stammzellen.
3. **Interphasentod** betrifft Zellen, die sich gerade zwischen zwei Mitosen befinden. Die Zelle stirbt in wenigen Stunden ab und erreicht die nächste Mitose nicht mehr.

Wie bereits beschrieben, helfen sich die Zellen mit unterschiedlichen Reparaturprozessen. In der Strahlentherapie werden die Zusammenhänge zwischen Dosis, Zellschäden, Reparaturprozessen, zeitliche Abhängigkeiten und Zellüberlebenskurven in verschiedenen Modellen dargestellt (z. B. Multitarget-Modell, Linear-quadratisches Modell), um die ideale Therapie für den einzelnen Patienten festzulegen.

Aus den benannten Zusammenhängen ergibt sich, dass die Wirkung ionisierender Strahlung auf den Organismus von vielen Faktoren abhängt, welche alle betrachtet werden müssen, um die Folgen abschätzen zu können. Neben den physikalischen Eigenschaften einer Strahlung spielt die Zeit eine große Rolle, die Teilungsfähigkeit und Strahlenempfindlichkeit der Zellen, aber auch individuelle Faktoren der Menschen, z. B. Alter, Begleiterkrankungen, Medikamente.

Tumorzellen verhalten sich nicht alle gleich. Es gibt besonders strahlensensible Tumore (z. B. Leukämie) und solche, die höhere Behandlungsdosen benötigen (z. B. Knochensarkome). Da bei

vergleichsweise strahlenresistenten Tumoren auch das umliegende Gewebe durch die Strahlung mit belastet wird, greift man in der medizinischen Anwendung zu Verfahren, welche die Strahsensibilität eines Tumors erhöhen, z. B. eine Chemotherapie.

2.5 Gesetze, Verordnungen und Richtlinien

C. Vockelmann

Aufgrund der vielfältigen Gefahren der ionisierenden Strahlen spielen gleich mehrere Gesetze und Verordnungen eine wichtige Rolle. Neben den nationalen Vorgaben müssen auch europäische und internationale Vorgaben beachtet werden. Zunächst aber gilt es, etwas Klarheit in die verschiedenen Begriffe zu bekommen.

➤ **Gesetze sind für jedermann verbindlich und werden vom parlamentarischen Gesetzgeber aufgestellt. Als Beispiel kann das Grundgesetz dienen.**

Rechtsverordnungen sind ebenfalls für jedermann verbindlich, das für uns naheliegende Beispiel ist die Röntgenverordnung. Sie werden von der Exekutive, also der Regierung, auf der Grundlage von Gesetzen erlassen.

Eine Änderung, z. B. Anpassung an geänderte Bedingungen, ist schneller möglich, als bei Gesetzen.

Richtlinien stellen keine verbindlichen Vorgaben dar, werden aber für die konkrete Umsetzung angewendet.

Normen oder Regeln der Technik sind nicht verbindlich. Sie dienen dem Nachweis der Sicherheit.

Die Gesetze, die für die Anwendung von ionisierenden Strahlen am Menschen wichtig sind, sind hierarchisch angeordnet (Abb. 2.17). In der Bundesrepublik Deutschland stellt das Grundgesetz (GG) das oberste Gesetz dar. Das Atomgesetz (AtG) ist dem Grundgesetz untergeordnet. Strahlenschutzverordnung (StrSchV) und Röntgenverordnung (RöV) stehen unter dem Atomgesetz.

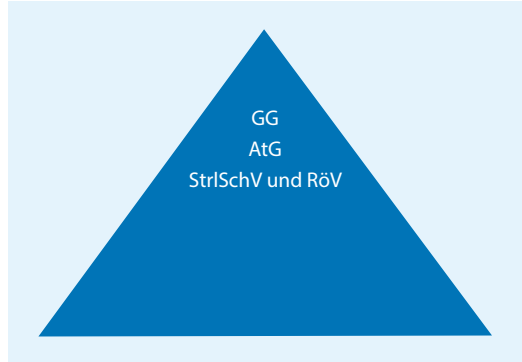


Abb. 2.17 Gesetzespyramide

2.5.1 Gesetze

Im Grundgesetz werden in den Artikeln 1 bis 19 die Grundrechte festgelegt, die jeder Mensch und insbesondere jeder Staatsbürger hat.

» Artikel 2 Grundgesetz

(1) Jeder hat das Recht auf die freie Entfaltung seiner Persönlichkeit, soweit er nicht die Rechte anderer verletzt und nicht gegen die verfassungsmäßige Ordnung oder das Sittengesetz verstößt.

(2) Jeder hat das Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit. Die Freiheit der Person ist unverletzlich. In diese Rechte darf nur auf Grund eines Gesetzes eingegriffen werden.

Das bedeutet, dass eine medizinische Behandlung oder eine diagnostische Maßnahme nur nach Einwilligung des Patienten zulässig ist. Der Patient darf die Zustimmung jederzeit widerrufen. Eine Behandlung ohne Zustimmung ist ein Eingriff in die körperliche Unversehrtheit des Patienten. Hier kommt das Strafgesetzbuch (StGB) zum Tragen:

» § 223 Strafgesetzbuch Körperverletzung

(1) Wer eine andere Person körperlich mißhandelt oder an der Gesundheit schädigt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu fünf Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

(2) Der Versuch ist strafbar.

Wenn der Patient mit der Behandlung oder Untersuchung einverstanden ist, wovon wir in den

allermeisten Fällen mal ausgehen wollen, kommen Röntgenverordnung und Strahlenschutzverordnung zum Tragen.

Inhaltlich beruhen Röntgen- und Strahlenschutzverordnungen auf den Regelungen der EURATOM-Richtlinien und dem Atomgesetz, in dem der friedliche Umgang der Kernenergie und der Schutz vor Gefahren durch Kernenergie geregelt sind. Wie man an der Namensgebung schon erahnen kann, steht EURATOM für eine Organisation in Europa. Die Europäische Atomgemeinschaft (Euratom) wurde 1957 durch die Römischen Verträge gleichzeitig mit der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft, inzwischen umbenannt in Europäische Gemeinschaft (EU) von Frankreich, Italien, den Beneluxstaaten und der Bundesrepublik Deutschland gegründet.

2.5.2 Röntgenverordnung

Die Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen, so der volle Titel der Röntgenverordnung, ist in der ursprünglichen Fassung 1973 in Kraft getreten. Die letzte Änderung ist gültig seit dem 01. November 2012. Eine Kernaussage der Röntgenverordnung ist die Vorschrift, jede unnötige Strahlenexposition für Mensch und Umwelt zu vermeiden. Geregelt werden auch Qualitätsanforderungen und notwendige Kontrollen der Qualität durch Anwender und die Ärztliche Stellen. Die Ärztlichen Stellen sind bei den jeweiligen Landesärztekammern beheimatete Einrichtungen, die die Qualitätssicherung bei medizinischen Strahlenanwendungen überwachen. Vergleichbare Einrichtungen existieren als Zahnärztliche Stellen für den zahnmedizinischen Bereich. Die Röntgenverordnung regelt Bereiche, in denen Röntgenstrahlung mit einer Grenzenergie von mehr als 5 keV und weniger als 1 MeV angewendet wird. Der Umgang mit radioaktiven Stoffen und ionisierender Strahlung, die nicht unter die RöV fällt, regelt die Strahlenschutzverordnung.

2.5.3 Strahlenschutzverordnung

Die Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen, kurz Strahlenschutzverord-

nung (StrlSchV) ist eine Verordnung innerhalb des Atomrechts. Die Rechtsgrundlage hierfür ist § 54 des Atomgesetzes. 2011 wurde die StrlSchV zuletzt novelliert, die ursprüngliche Fassung stammt aus dem Jahr 1976. In § 1 der Verordnung ist der Zweck beschrieben:

- » Zweck dieser Verordnung ist es, zum Schutz des Menschen und der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung Grundsätze und Anforderungen für Vorsorge- und Schutzmaßnahmen zu regeln, die bei der Nutzung und Einwirkung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung zivilisatorischen und natürlichen Ursprungs Anwendung finden.

Anwendung findet die StrlSchV in Bereichen, in denen mit radioaktiven Stoffen und ionisierender Strahlung mit einer Energie größer 1 MeV gearbeitet wird. Neben der Nuklearmedizin und der Strahlentherapie im Bereich der Medizin ist hiervon also auch z. B. Personal kerntechnischer Anlagen betroffen.

Medizinisches Personal unterliegt z. T. sowohl der Röntgenverordnung als auch der Strahlenschutzverordnung.

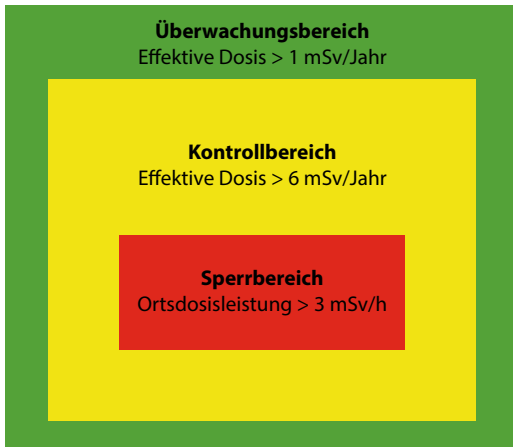
Auch die Strahlenschutzverordnung sollte man ruhig einmal durchgelesen haben (s. Link im Anhang).

Einige Punkte sowohl der Röntgen- als auch der Strahlenschutzverordnung sollten Sie explizit kennen. Dazu gehören die Begriffe Strahlenschutzbereiche und beruflich strahlenexponierte Personen. Auch sollten Sie wissen, welche Maßnahmen bei einer schwangeren Mitarbeiterin oder Patientinnen zu ergreifen sind.

2.5.4 Strahlenschutzbereiche

Die Strahlenschutzbereiche (■ Abb. 2.18, ■ Tab. 2.6) sind in § 19 RöV geregelt. Diese Bereiche beschreiben die Arbeitsbereiche, in denen ionisierende Strahlung auftreten kann. Als Grundlage der Festlegung der Bereiche dient eine Aufenthaltszeit von 40 Stunden in einer Woche und 50 Wochen in einem Kalenderjahr.

Für Patienten ist diese Einteilung nicht relevant.



■ **Abb. 2.18** Strahlenschutzbereiche

Sperrbereiche gibt es in der Strahlentherapie und in kerntechnischen Anlagen. In der Strahlentherapie ist der Bestrahlungsbunker oder der After-Loading-Raum ein Sperrbereich, wenn der Linearbeschleuniger strahlt bzw. im After-Loading die Strahler ausgefahren sind. Zu dieser Zeit darf sich nur der Patient im Raum befinden. Halte- oder Hilfspersonen sowie medizinischen Personal dürfen sich nicht dort aufhalten und der Bereich muss mit einem Lichtsignal (Sperrbereich – Kein Zutritt) gekennzeichnet sein. Außerhalb der eigentlichen Bestrahlung wird der Sperrbereich zum Kontrollbereich.

Ein Zutritt, in einer kerntechnischen Anlage, ist nur mit Sondergenehmigung möglich.

Kontrollbereiche und **Überwachungsbereiche** sind in jeder Röntgen-, Strahlentherapie- oder Nuklearmedizinischen Abteilung vorhanden.

Wenn Sie einen **Kontrollbereich** aus beruflichen Gründen betreten, gehören Sie zur Gruppe der beruflich strahlenexponierten Personen. Personen unter 18 Jahren ist der Zutritt nur zu Ausbildungszwecken genehmigt. Bei schwangeren Mitarbeitern muss gewährleistet sein, dass die Uterusdosis bis zum Ende der Schwangerschaft weniger als 1 mSv beträgt.

Kontrollbereiche müssen gekennzeichnet sein. Diese Kennzeichnung muss mindestens die Worte „Kein Zutritt – Röntgen“ bzw. in der Nuklearmedizin „Kontrollbereich“ enthalten. Zusätzlich wird Ihnen häufig das Strahlenwarnzeichen begegnen. Das derzeit in Deutschland geltende Zeichen, der schwarze Propeller auf einem gelben Dreieck (■ **Abb. 2.19a**), wird international in Zukunft durch ein rotes Drei-

■ **Tab. 2.6** Strahlenschutzbereiche

Strahlenschutzbereich	Dosisleistung
Sperrbereich	> 3 mSv/h
Kontrollbereich	> 6 mSv/a
Überwachungsbereich	> 1 mSv/a

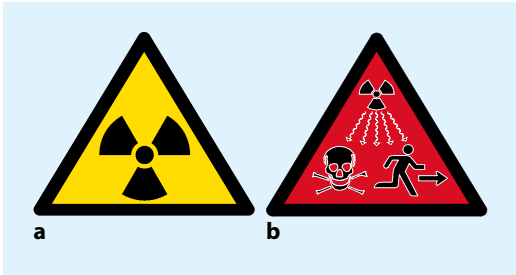
eck mit abschreckender Symbolik ersetzt. Hier findet sich unter dem Propeller ein Totenkopf und ein sich entfernender Mensch (■ **Abb. 2.19b**).

Bevor Sie im Kontrollbereich eingesetzt werden dürfen, müssen Sie vom Strahlenschutzbeauftragten unterwiesen werden. Diese Unterweisung ist jährlich zu wiederholen. Für diese Unterweisung gilt Duldungspflicht. Nur wenn Sie verhindert sein sollten, kann die Unterweisung im Ausnahmefall schriftlich erfolgen.

Während einer Aufnahme oder Durchleuchtung gehören **Röntgenräume** zu den Kontrollbereichen, sonst zum Überwachungsbereich. Wie Sie vielleicht während Ihrer Ausbildung schon festgestellt haben, gibt es jedoch nicht nur fest installierte Röntengeräte, sondern auch mobile **C-Bögen** oder mobile Röntengeräte für Aufnahmen auf Intensivstationen. Auch bei diesen gibt es einen Kontrollbereich, für den – sofern ausgeschlossen werden kann, dass unbeteiligte Personen den Kontrollbereich unbeabsichtigt betreten – keine Abgrenzung und Kennzeichnung erforderlich ist. Bei mobilen Röntgenaufnahmegegeräten beträgt der Kontrollbereich per Definitionen 1,5 m, für C-Bögen abhängig von der Bildwandlergröße (► **Kap. 4**) 3 m bzw. 4 m.

Wenn Sie im Kontrollbereich arbeiten, sind Sie verpflichtet, Ihre Körperdosis zu ermitteln. Dazu müssen Sie eine entsprechende **Röntgenplakette** tragen. Ebenso sind Sie im Kontrollbereich verpflichtet, entsprechende Schutzkleidung (Bleischürze, Schilddrüsenschutz) zu tragen. Diese Pflicht gilt nicht in der Nuklearmedizin, da hier durch eine Bleischürze die Strahlung langwelliger und damit absorbierbar würde.

Die Pflicht für Schutzkleidung und Personendosimetrie mit Ermittlung der Körperdosis betrifft allerdings nicht nur Mitarbeiter. Auch bei Personen, die sich „aus anderen Gründen als zu ihrer (...) Untersuchung oder Behandlung im Kontrollbereich aufhalten“, muss die Körperdosis unverzüglich er-



■ Abb. 2.19a,b Strahlenwarnzeichen. a Derzeit gängiges und b zukünftig international eingesetztes Strahlenwarnzeichen

mittelt werden. Hierzu dienen z.B. Stabdosisimeter, die nach der Untersuchung abgelesen werden können. Auch diese Dosis ist zu dokumentieren.

Der **Überwachungsbereich** ist gekennzeichnet durch eine Dosisleistung von mehr als 1 mSv/Jahr. Personen, die sich dauerhaft in diesen Bereichen aufhalten, zählen ebenfalls zur Gruppe der beruflich strahlenexponierten Personen.

2.5.5 Beruflich strahlenexponierte Personen

Neben medizinischem Personal gehören zu den beruflich strahlenexponierten Personen auch Personal kerntechnischer Anlagen und inzwischen auch das Personal von Fluggesellschaften, das sich regelmäßig mit im Flugzeug befindet. Dabei werden zwei Kategorien unterschieden, abhängig von der potentiellen Strahlenexposition (■ Tab. 2.7).

Die Ergebnisse des Bundesamtes für Strahlenschutz zeigen, dass die Strahlenexposition bei der überwiegenden Mehrheit des medizinischen Personals weniger als 1 mSv/Jahr beträgt. Beim fliegenden Personal hingegen liegt die mittlere Strahlenbelastung bei 2–3 mSv/Jahr.

Wenn tatsächlich eine Strahlenbelastung von mehr als 20 mSv/Jahr vorliegen sollte, kann im Einzelfall eine behördliche Genehmigung erteilt werden, die eine Strahlenbelastung von bis zu 50 mSv/Jahr zulässt.

➤ Nach der Richtlinie 96/29/EURATOM darf die Strahlenbelastung jedoch nicht mehr als 100 mSv in fünf aufeinanderfolgenden Jahren betragen.

■ Tab. 2.7. Strahlenexponiertes Personal – Kategorie A und B

	Kategorie A	Kategorie B
Ärztliche Untersuchung	Jährlich	Auf Anordnung der Behörde
Effektive Dosis	20 mSv/Jahr	6 mSv/Jahr
Teilkörperdosis, z. B. Augenlinse	150 mSv/Jahr	50 mSv/Jahr
Berufslebensdosis	400 mSv	

In Deutschland werden zurzeit ca. 360.000 Personen überwacht. Im Jahr 2007 lag in 11 Fällen eine Strahlenexposition von mehr als 20 mSv effektive Dosis vor.

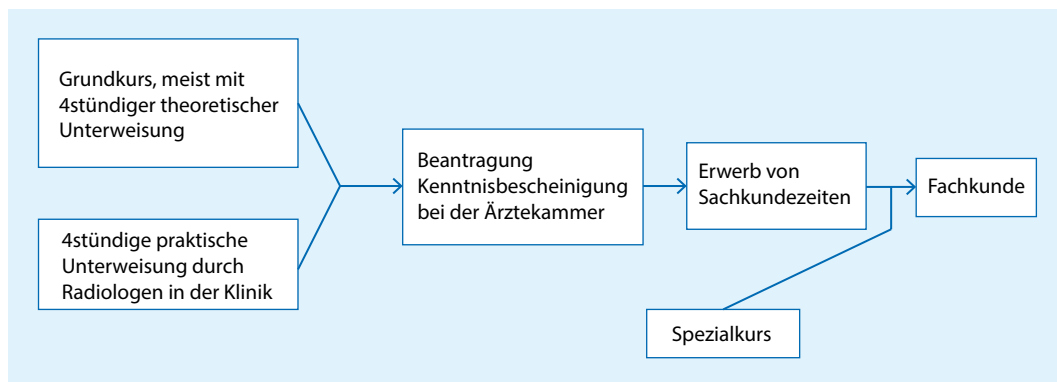
■ Fachkunde

Als MTRA werden Sie zur einzigen Berufsgruppe gehören, die die Fachkunde zur technischen Durchführung von Untersuchungen nach StrlSchV oder RöV mit ihrer Ausbildung erwirbt.

Ärzte müssen zum Erwerb der Fachkunde Strahlenschutzkurse besuchen und eine bestimmte Anzahl von Untersuchungen unter Aufsicht durchführen. Zusätzlich gibt es im ärztlichen Bereich z. B. neben der Gesamtfachkunde Röntgendiagnostik noch Fachkunden-CT, Skelettdiagnostik, Notfalldiagnostik, Interventionen und einiges mehr (■ Abb. 2.20). Sie sehen, als MTRA haben Sie es eigentlich recht einfach. Auf der einen Seite – auf der anderen Seite befinden Sie sich in der besonderen rechtlichen Situation, dass Sie ausschließlich über die Ausbildung die Fachkunde erwerben können. Das ist deswegen ein Problem, da für MTRA dort eine Rechtslücke entstanden ist: wenn eine MTRA ihre Fachkunde verliert (weil sie diese z. B. nicht aufgefrischt hat), dann gibt es keinen Weg mehr, diese auf einem anderen Weg zu machen. „Theoretisch“ müsste sie die Ausbildung wiederholen.

Allerdings sind auch Sie nicht von Strahlenschutzkursen befreit.

➤ Um die Fachkunde zu behalten, müssen Sie spätestens alle 5 Jahre einen Aktualisierungskurs nach RöV und StrlSchV besuchen, um Ihre entsprechenden Fachkunden zu behalten.



■ Abb. 2.20 Der ärztliche Weg zur Fachkunde

■ Rechtfertigende Indikation

Untersuchungen dürfen nur durchgeführt werden, wenn ein fachkundiger Arzt die „rechtfertigende Indikation“ nach § 23 RöV bzw. § 80 StrlSchV gestellt hat. Dabei muss der Arzt bewerten, ob der Nutzen der geplanten Untersuchung das Risiko der Strahlenexposition überwiegt und die Fragestellung nicht mit einer anderen Untersuchung mit geringerer Strahlenexposition beantwortet werden kann. Um die rechtfertigende Indikation stellen zu können, muss der Arzt im Besitz der entsprechenden Fachkunde sein. So darf ein Arzt mit Notfallfachkunde eine Röntgenaufnahme des Sprunggelenkes eines Patienten nach einem Supinationstrauma, dem klassischen Umknicken des Sprunggelenkes, veranlassen. Er darf aber keine Röntgenaufnahme der Lunge mit der Frage nach Metastasen bei einer Tumorerkrankung anordnen. Dazu ist eine Fachkunde des Thorax oder eine Gesamtfachkunde erforderlich.

❗ **Fragestellungen wie „Verlaufskontrolle“ reichen nicht zur Stellung einer rechtfertigenden Indikation!**

■ Untersuchungen bei Schwangeren

Hier muss der Arzt zur Stellung der rechtfertigenden Indikation die Fragestellung besonders prüfen. Sollte jedoch die Untersuchung erforderlich sein, müssen alle Maßnahmen zur Dosisreduktion ergriffen werden. Bei einer Untersuchung sollten Sie also ganz besonders auf eine Eingrenzung des Strahlenfeldes achten und bei CT- und Röntgenuntersuchungen Bleischürzen soweit möglich einsetzen.

■ Aufzeichnungspflichten, Röntgenpass

Die **Aufzeichnungspflichten** sind in § 28 RöV geregelt. Hierzu gehören Aufzeichnungen zu:

- Ergebnissen zur Strahlenanamnese und bisher durchgeführten Röntgenuntersuchungen,
- Zeitpunkt und Art der Röntgenanwendung,
- untersuchte Körperregion,
- Angaben zur rechtfertigenden Indikation,
- bei einer Untersuchung zusätzlich der erhobene Befund,
- Strahlenexposition des Patienten, z. B. über DFP oder DLP,
- bei einer Behandlung zusätzlich der Bestrahlungsplan und das Bestrahlungsprotokoll.

Diese Aufzeichnungen sind 10 Jahre bzw. bei einer Behandlung 30 Jahre nach der letzten Behandlung aufzubewahren. Bei Kindern gilt eine Aufbewahrungsfrist für Röntgenuntersuchungen von 10 Jahren nach Vollendung des 18. Lebensjahres.

Der **Röntgenpass**, in dem Datum, Ort und Art der Untersuchung dokumentiert werden, muss den Patienten aktiv angeboten werden.

Neben den bisher aufgeführten Gesetzen und Verordnungen werden Ihnen in Ihrem Berufsleben noch zahlreiche weitere Gesetze und Verordnungen begegnen. Wir wollen Ihnen hier nur die wichtigsten aufführen:

■ Medizinproduktegesetz (MPG)

Das MPG wird Ihnen bei Ihrer Arbeit tagtäglich begegnen. Hierin ist geregelt, dass nur entsprechend geprüfte Medizinprodukte eingesetzt werden. Auch

Röntengeräte fallen unter diese Regelung, genauso wie Perfusoren oder Druckspritzen. Um diese zu bedienen, müssen Sie in das jeweilige Gerät eingewiesen sein.

■ ■ Arzneimittelgesetz (AMG)

Im Arzneimittelgesetz wird der Verkehr mit Arzneimitteln im Interesse einer ordnungsgemäßen und sicheren Arzneimittelversorgung von Mensch und Tier geregelt. Neben der Herstellung wird auch der Vertrieb, Verschreibung und Aufklärung sowie Abgabe von Arzneimitteln geregelt.

■ ■ Betäubungsmittelgesetz (BtMG)

Hierunter fallen starke Schmerz- und Beruhigungsmittel wie Morphin. Diese müssen in einem abgeschlossenen Schrank aufbewahrt werden; über jede Entnahme und jeden Zugang ist Buch zu führen mit Unterschrift des verordnenden Arztes.

■ ■ Mutterschutzgesetz (MuSchG)

Das Mutterschutzgesetz soll die Gesundheit von Mutter und Kind schützen. Dazu gehört unter anderem, dass Schwangere keine Nachtarbeit verrichten dürfen. Das Arbeiten im Kontrollbereich ist, wie oben erwähnt, unter bestimmten Bedingungen möglich. Ein Kontakt mit potentiell infektiösem Material ist zu vermeiden. Daher dürfen Sie in der Schwangerschaft kein Blut abnehmen oder Venenzugänge legen.

■ ■ Arbeitszeitgesetz

Hier wird der öffentlich-rechtliche Arbeitsschutz geregelt. Unter anderem gibt es Grenzen für die zulässige tägliche Höchstarbeitszeit, Mindestruhepausen sowie Schutzvorschriften zur Nachtarbeit. Das Gesetz ist für Arbeitgeber und Arbeitnehmer verbindlich. Es finden sich Regelungen zur werktäglichen Arbeitszeit, Wochenarbeitszeit und Rufbereitschaft.

Die wichtigsten Gesetze auf einen Blick

- Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und Röntgenverordnung (RöV)

Andere Gesetze mit Relevanz im Strahlenschutz

- Strahlenschutzvorsorgegesetz
- Mutterschutzgesetz

- Arzneimittelgesetz
- Arbeitsschutzgesetz
- Medizinproduktegesetz
- Gefahrgutbeförderungsgesetz

Zusätzliche Vorschriften mit Auswirkungen auf die Strahlenschutzregeln

- Normen
- Sachverständigenprüfrichtlinie
- BG-Vorschriften
- Fachkunderichtlinien (nach StrlSchV und RöV)

In Kürze

- Es gibt unterschiedliche Arten ionisierender Strahlung, die nicht alle in der Medizin Anwendung finden. Durch die Eigenschaft der Ionisation gehen alle Strahlenarten Wechselwirkungen mit Materie, auch dem menschlichen Organismus ein. Die Möglichkeiten der Strahlungsdetektion und der medizinischen Anwendung hängen von den Wechselwerkeigenschaften der jeweiligen Strahlenart ab. Gemein ist allen, dass sie eine schädigende Wirkung auf den Organismus haben. Um einen verantwortungsvollen Umgang mit Strahlung in der Medizin zu gewährleisten ist das Wissen um „Fluch und Segen“ existentiell.
- Zum Schutz vor der Folgen ionisierender Strahlung hat der Gesetzgeber Gesetze, Richtlinien und Verordnungen erlassen. Bei der Einhaltung der Schutzmaßnahmen können MTRA und anderes medizinisches Personal gefahrlos in ihrem Beruf arbeiten. Eine besondere Verantwortung stellt die Ausnutzung von Strahlenschutzmaßnahmen entsprechend des ALARA-Prinzips dar.
- MTRA sind die einzige Berufsgruppe, die im Rahmen ihrer Ausbildung die Fachkunde im Strahlenschutz „automatisch“ erwerben.

Literatur

- Bundesamt für Strahlenschutz, www.bfs.de, Februar 2014
- Curie E. (1938) Madame Curie. Fischer Taschenbuchverlag, Frankfurt a. M.
- Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007, http://www.icrp.org/docs/P103_German.pdf
- Elser H (2003) Leitfaden Nuklearmedizin. Steintopf Verlag, Stuttgart
- Harms V (2010) Physik für Mediziner und Pharmazeuten, 18. Auflage, Harms Verlag, Lindhöft
- Hermann HJ (2004) Nuklearmedizin. Verlag Urban und Fischer, Stuttgart
- Kröpil P. (2007) Vergleich von Ganzkörper-MSCT und konventioneller Radiographie in der Diagnostik des Multiplen Myeloms. Dissertation Uni Düsseldorf (<http://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DocumentServlet?id=5676>)
- Laubenberger TH & J (2007) Technik der medizinischen Radiologie, 7. Auflage, Ärzte-Verlag, Köln
- Loewenhardt B, Müller E (2006) Bildegebende Diagnostik. „Lehrbuch der röntgendiagnostischen Einstelltechnik“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Materialprüfungsamt NRW: www.mpanrw.eu, Februar 2
- Nagel HD (2011) Dosisgrößen für die Röntgendiagnostik (http://www.laekb.de/10arzt/50Qualitaetssicherung/60aes-qr/05aesr/64fb_zaes_dl/02vt.pdf)
- Nicoletta R, Oberladstätter M, König F (2005) Messtechnik und Instrumentierung in der Nuklearmedizin. Verlag facultas, Wien
- Richter, Feyerabend (2002) Grundlagen der Strahlentherapie, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Sauer R (2010) Strahlentherapie und Onkologie, 5. Auflage, Urban & Fischer, Stuttgart

Konventionelle Röntgendiagnostik

T. Doering, Ch. Nowarra

- 3.1 Geschichtlicher Rückblick – 65**
- 3.2 Aufbau und Funktionsweise einer Röntgenanlage – 66**
 - 3.2.1 Physikalische Grundlagen – 66
 - 3.2.2 Der Röntgenstrahler – 68
 - 3.2.3 Der Röntgengenerator – 71
 - 3.2.4 Strahlenqualität und -quantität, Belichtungsautomatik – 72
 - 3.2.5 Abbildungsgesetze – 76
 - 3.2.6 Qualität des Röntgenbildes und
 qualitätsverbessernde Maßnahmen – 77
 - 3.2.7 Aufbau eines Bucky-Arbeitsplatzes – 81
 - 3.2.8 Patientenbetreuung und -lagerung – 82
 - 3.2.9 Mobile Röntgengeräte – 83
 - 3.2.10 Besondere Strahlenschutzmaßnahmen – 83
- 3.3 Digitale Bildaufnahmeverfahren – 87**
 - 3.3.1 Rückblick – Röntgenfilme – 87
 - 3.3.2 Verstärkerfolien – 88
 - 3.3.3 Speicherfolien – 88
 - 3.3.4 Festkörperdetektoren – 89
 - 3.3.5 Kennzahlen einer Röntgenanlage/eines Detektorsystems – 90
- 3.4 Digitale Bildverarbeitung – 91**
 - 3.4.1 Aufbau eines digitalen Bildes – 91
 - 3.4.2 Fehlerkorrektur – 93
 - 3.4.3 Auswahl des Bildausschnittes/Blenden – 93
 - 3.4.4 Die Look-up-Tabelle (LUT) – 93
 - 3.4.5 Fensterung – 96
 - 3.4.6 Rauschreduktion – 96
 - 3.4.7 Kantenanhebung – 96
 - 3.4.8 Messungen im Bild – 96

3.5 Spezialaufnahmegeräte – 98

3.5.1 Panoramaschichtgeräte – 98

3.5.2 DVT, CBCT – 98

3.5.3 DXA (Knochendichtemessung, Osteodensitometrie) – 99

3.5.4 Ganzbeinaufnahme, Achsenbestimmungen – 100

3.5.5 Ganzkörperscanner (EOS, Wirbelsäulenbalance) – 101

Literatur – 103

3.1 • Geschichtlicher Rückblick

In der Notaufnahme stellt sich ein 23-jähriger Inline-Skater vor, der nach einem Sturz über Schmerzen im Unterarm klagt. Nach der primären Wundversorgung und der körperlichen Untersuchung durch den Chirurgen besteht der Verdacht eines Bruches des Unterarmes. Es wird eine Röntgenaufnahme des Unterarmes angefordert (■ Abb. 3.1a, b).

3.1 Geschichtlicher Rückblick

T. Doering

Als Geburtsstunde der Röntgendiagnostik gilt mit Anfertigung der ersten Röntgenaufnahme der November 1895. In dieser Zeit beschäftigen sich viele Physiker mit Kathodenstrahlung. Und sie stellten fest, dass bestimmte photographische Emulsionen, die in der Nähe der Strahlung aufbewahrt waren, unbrauchbar wurden. Und halb aus Zufall, halb durch Genie entdeckten die Physiker, dass mit den sog. X-Strahlen, wie Röntgenstrahlen früher und auch heute noch in vielen anderen Ländern heißen, ein Fluoreszenzschirm zum Leuchten gebracht werden konnte. Zu der ersten Röntgenaufnahme gibt es folgende Legende: Frau Bertha Röntgen hatte liebevoll ein leckeres Abendbrot aufgetischt, ihr Mann schenkte den Speisen jedoch kaum Aufmerksamkeit. Auf ihre Vorwürfe hin nahm Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) seine Frau mit in sein Laboratorium und sagte: „Ich habe etwas entdeckt, das die Leute zu sagen veranlassen wird: Röntgen ist verrückt geworden!“ Dann machte er die erste Röntgenaufnahme und zwar von der Hand seiner Ehefrau (■ Abb. 3.2).

Die erste offizielle Mitteilung über die neuen Strahlen erfolgte am 28. Dezember 1895. Im Rahmen der Berichte der Physikalisch-medizinischen Gesellschaft in Würzburg erschien eine Veröffentlichung mit dem Titel: *Eine neue Art von Strahlen*. In dieser 17 Kapitel umfassenden Arbeit beschreibt Röntgen bereits die unterschiedliche Strahrendurchlässigkeit verschiedener Materialien. Auch die Absorption und Schwächung der Röntgenstrahlen durch z. B. Aluminium und insbesondere Blei hatte Röntgen bereits richtig erkannt und beschrieben. Was allerdings in den ersten Jahren vollkommen unbekannt war, war die Gefahr durch Röntgen-



■ Abb. 3.1a,b Röntgenaufnahme eines 23-jährigen Patienten nach Sturz auf den Unterarm

strahlen. Die Pioniere der Radiologie bezahlten ihren Forschungsgeist oftmals mit einer Radiodermatitis, Krebsentstehung und Leukämien.

Die Entdeckung Röntgens revolutionierte die Medizin. Bereits ein Jahr nach Entdeckung der Röntgenstrahlen standen überall in der Welt kleine Röntgenanlagen. Pionier dieser Entwicklung war der Franzose Antoine Bécclère (1856–1939). 1902 beschrieb er Verfahren zu Erfassung von Pleuraergüssen, also Flüssigkeitsansammlungen zwischen Lungen- und Brust-/Rippenfell, mit Röntgenstrahlen. 1912 erstellte er einen Bericht über die radiologische Untersuchung von Magen und Darm nach chirurgischen Eingriffen. Neben der diagnostischen Nutzung war Bécclère auch als Radiotherapeut tätig. Seine eigentlich allgemeinmedizinische Abteilung im Hôpital Saint-Antoine gilt als erste „röntgenologische und röntgenotherapeutische Klinik“ in Europa. Er war auch der erste, der sich um die Ausbildung in der Radiologie bemühte. Bereits 1897 schuf er ein Lehrsystem für die Radiodiagnostik und bildete in 30 Jahren tausende von französischen und ausländischen Studenten in der Radiologie aus.

Bei den Untersuchungstechniken wurde gerade nach der Entdeckung der Strahlen viel experimentiert. Ungeachtet der Gefahren der Röntgenstrahlen wurden alle Arten der Darstellung der verschiedenen Körperregionen und -funktionen ausprobiert und perfektioniert. So entstanden schon 1896 erste Aufnahmen der Zähne und des lebenden Herzens. 1897 wurde die erste Aufnahme der Speiseröhre mit Kontrastmittel gemacht, 1923 erfolgte die erste Darstellung von Blutgefäßen am lebenden Menschen.



■ Abb. 3.2 Erstes Röntgenbild: Die Hand von Fr. Röntgen

Die Leistungsfähigkeit der Röntgenröhren wurde auch zunehmend verbessert. Die heute eingesetzte Art der Röntgenröhre wurde im Grunde schon 1929 (Drehanode) bzw. 1960 (Verbundanode) entwickelt.

Bei der Röntgentechnik wurde schon früh versucht, die Bildqualität zu verbessern. Die Tiefenblende, die unerwünschte Strahlung der Röntgenröhre abhält, wurde 1903 entwickelt, das Streustrahlenraster schon 1913. Auch die Verstärkerfolien wurden schon recht früh eingeführt.

Die Digitalisierung der Radiologie hat ihre Ursprünge schon 1948 als der erste Bildverstärker für die Durchleuchtungsuntersuchungen entwickelt wurde. Die Bilder dieses Systems wurden entweder auf einem 10 mm-Film dokumentiert und/oder auf einem Monitor dargestellt. Später wurden diese Bilder auch digital gespeichert und verarbeitet. Die digitale Subtraktionsangiographie wurde Mitte der 1970er Jahre eingeführt.

Die ersten Schritte der Digitalisierung der Röntgenaufnahmen begannen 1981 mit der Einführung

der Speicherfoliensysteme. Diese waren jedoch noch zu teuer und kamen nicht an die Bildqualität der normalen Röntgenfilme heran. Zudem waren die Computersysteme zur damaligen Zeit nicht so leistungsfähig und günstig wie heute. 1994 brachte die Firma Philips einen digitalen Arbeitsplatz mit einem Selendetektor für Lungenaufnahmen auf den Markt, der jedoch 1998 von der jetzigen Festkörperdetektortechnik verdrängt wurde. Diese setzte sich ab dem Jahr 2000 auch für die Durchleuchtungsanlagen durch.

Mittlerweile ist eine Röntgenabteilung ohne eine Computernutzung und -vernetzung nur noch schwer vorstellbar.

3.2 Aufbau und Funktionsweise einer Röntgenanlage

T. Doering, Ch. Nowarra

Eine Röntgenanlage besteht immer aus folgenden Komponenten:

- einem Röntgenstrahler, der die Strahlen erzeugt,
- einem Röntgengenerator, der den Röntgenstrahler mit Hochspannung versorgt,
- einem Röntgenanwendungsgerät, das zur Lagerung des Patienten dient und
- einem Röntgenbildwandler (Röntgenfilm, Detektor, ...).

3.2.1 Physikalische Grundlagen

Wie genau entsteht nun die Röntgenstrahlung?

Das Bohr'sche Atommodell

Nach dem Atommodell von Nils Bohr (s. auch ► Kap. 1) besteht ein Atom aus dem **Atomkern** mit positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen und einer **Atomhülle**, in der die negativ geladenen Elektronen in bestimmten Bahnen diesen Atomkern umkreisen. Diese Bahnen werden, je nach Entfernung zum Kern, als K-, L-, M-Schale bezeichnet. In der K-Schale umkreisen höchstens 2 Elektronen, in der L-Schale 8 und in der M-Schale 18 Elektronen den Kern.

K-Strahlung/Charakteristische Röntgenstrahlung

Trifft ein Elektron auf ein Wolframatom, kann dort ein Elektron aus der K-Schale herausgeschlagen werden. Man bezeichnet diesen Vorgang als Ionisation. Diese freie Stelle in der K-Schale wird dann durch ein freies Elektron oder ein Elektron aus einer äußeren Schale (L- oder M-Schale) wieder aufgefüllt. Da das Elektron auf der K-Schale weniger Bindungsenergie benötigt als auf der äußeren, wird diese Energie in Form von Energiequanten freigesetzt. Diese so entstehende Strahlung nennt man K-Strahlung bzw. charakteristische Röntgenstrahlung. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass sie immer eine bestimmte Wellenlänge/Energie besitzt, die der Energiedifferenz zwischen K- und L-Schale (K_α) bzw. die Differenz zwischen K- und M-Schale (K_β) entspricht.

Die Frequenz dieser Strahlung ($\nu_{K\alpha}$) unterscheidet sich nur vom Material der Anode. Sie liegt bei Material mit hoher Ordnungszahl höher als bei Material mit niedriger Ordnungszahl.

$$\nu_{K\alpha} = \frac{3R_\infty}{4} (Z - 1)^2$$

Bremsstrahlung

Einen größeren Anteil an der Entstehung von Röntgenstrahlung macht jedoch die sog. Bremsstrahlung aus. Hierbei gerät das beschleunigte Elektron zwischen den Atomkern und die K-Schale. Hier wird es nun vom Kern angezogen, umgelenkt und abgebremst. Der Teil der nicht mehr benötigten Bewegungsenergie wird in Form von Strahlungsenergie abgegeben. Die Energie dieser Strahlung kann anders als die K-Strahlung das gesamte Energiespektrum einnehmen, aber nie höher sein, als die angelegte Beschleunigungsspannung.

Die größtmögliche Strahlungsenergie kann nur so groß sein, wie die angelegte Röhrenspannung (U_a) und würde entstehen, wenn das Elektron vom Kern vollständig abgebremst würde.

$$E_{\max} = e \times U_a$$

Betrachtet man nun dieses Spektrum, so fällt auf, dass mit höherer Spannung auch die Menge der niederenergetischen Strahlung ansteigt. Diese Verteilung der Bremsstrahlung ist stark abhängig vom

Anodenmaterial. Aus diesem Grund besitzt auch jede Röntgenröhre eine eigene Kennlinie.

Schwächung der Strahlung im Körper Photoabsorption

Trifft Strahlung auf einen Körper, werden diese Strahlen teilweise absorbiert. Man bezeichnet diese Absorption als Photoabsorption. Dabei trifft die Strahlung direkt auf ein Elektron in der Atomhülle des durchstrahlten Objektes und überträgt seine gesamte Energie. Dadurch wird das Elektron aus der Hülle geschleudert. Dieser Effekt tritt häufig bei niedrigen Strahlungsenergien auf und ist von vier Faktoren abhängig:

1. Wellenlänge

Je energiereicher die Strahlung ist, desto kürzer ist ihre Wellenlänge. Mit einer kürzeren Wellenlänge ist es einfacher, Material zu durchdringen.

2. Ordnungszahl

Je höher die Ordnungszahl des durchstrahlten Materials ist, desto höher ist die Absorption. Bei einer hohen Ordnungszahl existieren auch viele Elektronen in den Atomhüllen, also steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass eines dieser Elektronen getroffen wird.

3. Dichte

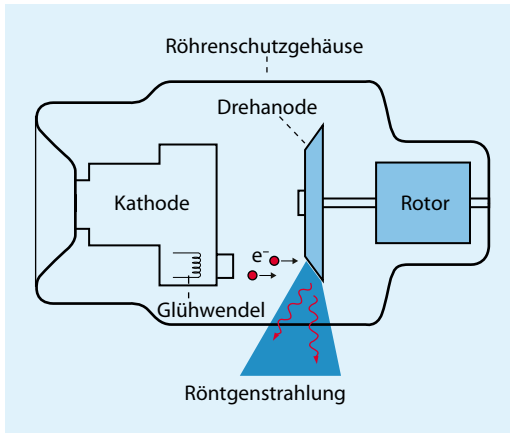
Je höher das spezifische Gewicht (Dichte) des Materials ist, desto höher ist die Absorption. So wird Wasserdampf leichter durchdrungen als Wasser oder Eis. Sie hängt also auch von der Verteilung der Atome ab.

4. Dicke

Je dicker das Material, desto mehr Strahlung wird absorbiert. Da mehr Material durchdrungen werden muss, existieren mehr Atome, die den Weg behindern.

Der Comptoneffekt

Auch beim Comptoneffekt trifft der Röntgenstrahl direkt auf ein Elektron und schleudert dieses aus der Hülle. Da es sich hier aber meistens um Elektronen aus der äußeren Atomhülle handelt, wird nicht so viel Energie wie beim Photoeffekt benötigt. Der Röntgenstrahl verliert somit nur genau den Anteil an Energie, die das Elektron vorher an den Atomkern gebunden hat (Bindungsenergie) und wechselt seine Richtung. Der Comptoneffekt ist hierbei un-



▣ Abb. 3.3 Schematischer Aufbau eines Drehanoden-Röntgenstrahlers

abhängig von der Ordnungszahl des durchstrahlten Materials, aber steigt ebenso bei zunehmender Dicke. Im Bereich der in der Röntgendiagnostik angewandten Spannungen ist er relativ unabhängig von der Wellenlänge.

➤ Die für das Röntgenbild störende Streustrahlung wird hauptsächlich durch den Compton-effekt verursacht.

Klassische Streuung

Bei der klassischen Streuung handelt es sich um einen Sonderfall. Hierbei kommt es nur zu einer Richtungsänderung des Röntgenstrahls, ohne dass der Röntgenquant Energie verliert.

3.2.2 Der Röntgenstrahler

Aufbau der Röntgenröhre

Wie schon im vorherigen Kapitel erwähnt, forschte Röntgen damals mit Kathodenstrahlen. Wie entsteht nun die von ihm entdeckte Strahlung?

Ein Kathodenstrahler besteht aus einer **negativ geladenen Kathode** und einer **positiv geladenen Anode**. Erhitzt man nun die Kathode, können Elektronen, kleine negative geladene Teilchen, aus der Kathode freigesetzt werden. Diese werden dann, aufgrund der unterschiedlichen Ladungen zwischen Kathode und Anode, in Richtung der Anode beschleunigt und treffen am Ende auf die Anode,

wo unter anderem die Röntgenstrahlung entsteht (▣ Abb. 3.3).

Da die Elektronen in der normalen Luft abgebremst und abgelenkt würden, befinden sich Kathode und Anode in einem evakuierten (luftleeren) Glaskloben. Dieser wiederum sitzt in einem ölfüllten Strahlenschutzgehäuse. Das Öl dient zum Schutz vor der Hochspannung und der Wärmeableitung nach außen. Das Schutzgehäuse schirmt zudem die Anteile der Röntgenstrahlung ab, die nicht durch das Strahlenaustrittsfenster austreten. Unterhalb des Strahlenaustrittsfensters muss aufgrund von gesetzlichen Vorschriften schon ein Filter aus 1,5 mm dicken Aluminium angebracht sein. Dieser hat die Aufgabe, die Strahlung herauszufiltern, die aufgrund ihrer Energie nicht in der Lage ist, den Körper zu durchdringen (► Abschn. 3.2.2).

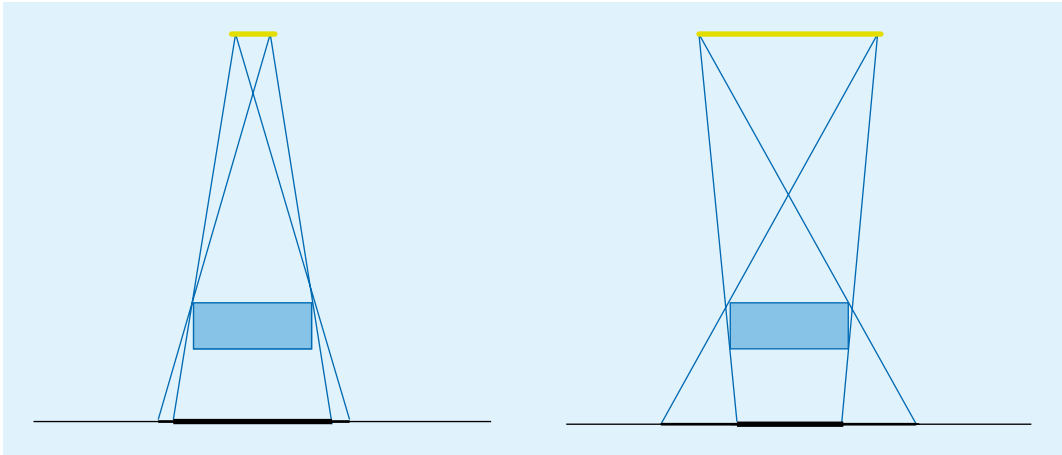
Die Kathode

Die Kathode besteht aus einer oder zwei Glühwendeln, die durch den sog. Heizstrom erhitzt werden. Durch die Hitze werden die Elektronen in Schwingung gebracht (thermische Elektronenemission) und können durch die zwischen Kathode und Anode ausgelöste Spannung herausgelöst werden. Die Wendel bestehen hauptsächlich aus Wolfram, da Wolfram den höchsten Schmelzpunkt aller Metalle besitzt ($3680\text{ K} = 3406,85^\circ\text{C}$) und sich zudem die Elektronen relativ leicht herauslösen lassen. Die freigesetzten Elektronen oder auch die Elektronenwolke wird nun Richtung Anode beschleunigt.

Da die Elektronen ungerichtet in Richtung der Anode wandern würden, werden diese durch einen Wehneltzylinder fokussiert (Arthur Wehnelt, * 4. April 1871 in Rio de Janeiro; † 15. Februar 1944 in Berlin). Dieser Zylinder befindet sich in unmittelbarer Nähe der Kathode. Durch Anlegen einer negativen Ladung kann der Austritt der Elektronen geregelt und die Flugrichtung fokussiert werden.

Die Anode

Beim Auftreffen der Elektronen an der Anode treten verschiedene Prozesse oder auch Wechselwirkungen ein. Ein Teil davon resultiert in der gewünschten Röntgenstrahlung. Diese macht aber nur 1 % der Leistung aus. Die restlichen 99 % resultieren in Wärme. Aus diesem Grund nennt man diesen Ort an der Anode auch Brennfleck oder Fokus.



■ **Abb. 3.4** Halbschatten in Abhängigkeit der Fokusgröße

Wegen der großen Wärmeentwicklung muss die Anode aus einem besonders hitzebeständigen und wärmeleitfähigen Material bestehen. Auch hier hat sich Wolfram oder eine Wolfram-Rhenium-Mischung als Ideal erwiesen. Um die entstehende Wärme auf ein großes Volumen zu verteilen, setzt man in der Röntgendiagnostik Drehanoden ein. Die Anode ist dabei wie ein Teller geformt und wird von einem Elektromotor in Drehung versetzt (typische Drehzahl: ca. 3000 U/min). Dadurch wird nicht nur ein einzelner Punkt, sondern eine ganze Kreisbahn erwärmt. Da die Elektronen immer winzige Teile der Anode „zerstören“, wird mit dieser Verteilung die Lebensdauer der Anode verlängert.

Heutzutage wird nicht mehr der ganze Teller aus Wolfram hergestellt, sondern besteht aus Molybdän und Graphit, um die Wärmeverteilung zu optimieren (**Verbundanode**). Nur die Brennfleckbahn besteht noch aus Wolfram.

Brennfleck/Fokus

Da Röntgenstrahlen in der Röntgenröhre nicht nur an einem Punkt entstehen, sondern an einer Fläche, kommt es zu dem Phänomen des Halbschattens (■ [Abb. 3.4](#)). Auf dem Röntgenbild wird die Abbildung von Details durch dieses Phänomen unschärfer.

Um die Fläche möglichst zu verkleinern bedient man sich zweier Tricks:

1. Durch eine Abschrägung des Tellerrandes erreicht man nicht nur die günstigere Richtungsänderung der Strahlung, sondern auch eine op-

tische Verkleinerung des Brennflecks, abhängig vom Winkel der Abschrägung (■ [Abb. 3.5](#)).

2. Die Röhren besitzen i. d. R. zwei verschieden große Kathodenwendel, den großen und den kleinen Fokus. Da der kleine Fokus nicht so leistungsfähig ist, kommt dieser meistens nur im Extremitätenbereich zum Einsatz.

Der Heel-Effekt

Betrachtet man nun die Verteilung der entstehenden Röntgenstrahlung an der Anode, so stellt man fest, dass eine bestimmte Verteilung (Herztscher Dipol) besteht.

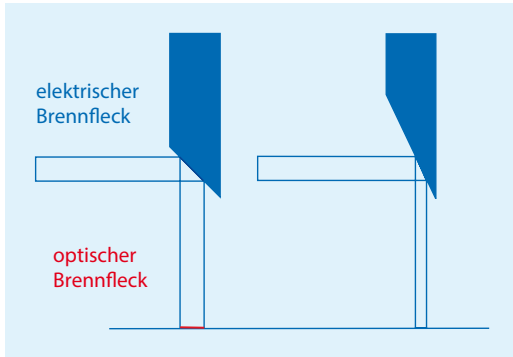
Durch diese spezielle Verteilung und durch die, durch die Abschrägung der Anode bedingte Selbstabsorption kommt es dazu, dass es innerhalb des Feldes zu einer bestimmten Intensitätsverteilung kommt (■ [Abb. 3.6](#)). Hierbei nimmt die Strahlung in Richtung Kathode ab. Dieses Phänomen nennt man den Heel-Effekt. Dieser wird z. B. bewusst bei der Mammographie ausgenutzt, um eine homogene Belichtung zu erreichen.

Definition

Unter dem Heel-Effekt versteht man den anodenseitigen Dosisabfall.

Die Tiefenblende mit Lichtvisier

Unterhalb des Röntgenstrahlenschutzgehäuses ist die Tiefenblende angebracht.



■ Abb. 3.5 Elektrischer und optischer Brennfleck

Zusatzfilter

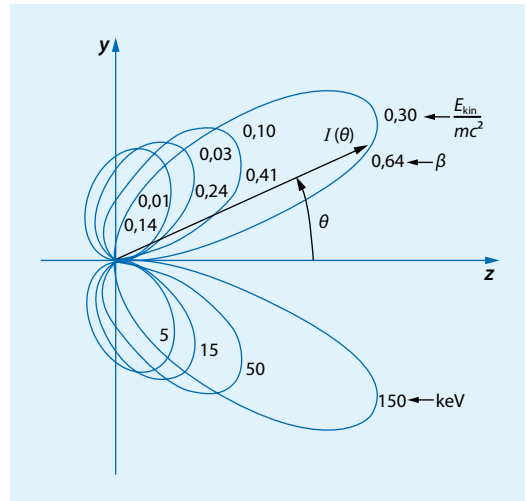
Im oberen Bereich der Tiefenblende sind Zusatzfilter angebracht, die entweder manuell oder elektronisch in den Strahlengang bewegt werden können. Diese Filter haben die gleiche Aufgabe, wie der Filter, der sich direkt am Strahlenaustrittsfenster befindet. Die niederenergetischen Strahlenanteile, die nicht zur Bildgebung beitragen, werden herausgefiltert. Man spricht auch von einer „Aufhärtung“ der Strahlung (■ Abb. 3.7). Die Zusatzfilterung von 0,1 mm Kupfer und 1 mm Aluminium ist bei Röntgenaufnahmen von Kindern gesetzlich vorgeschrieben.

Blenden

In der Tiefenblende (■ Abb. 3.8) befinden sich verstellbare Bleilamellen, die die Röntgenstrahlen blockieren. Man unterscheidet die fokushnahen und die objektnahen Blenden. Während die röhrennahen Blenden die Strahlung abschirmen, die nicht direkt am Fokus entstanden ist (Extrafokalstrahlung), dienen die objektnahen Blenden der Einstellung der Feldgröße, also dem Bereich, der dargestellt werden soll.

Damit dieses Feld sichtbar wird, ist im Strahlengang der Röntgenstrahlung ein durchlässiger Spiegel angebracht, der durch eine Glühbirne angestrahlt wird. Das abgelenkte Lichtfeld ist unterhalb der Tiefenblende sichtbar und entspricht genau dem Strahlungsfeld der Röntgenröhre. Die Tiefenblende ist zudem drehbar an dem Schutzgehäuse befestigt, um das Feld optimal an die Aufnahme anzupassen.

Da es durch eine minimale Verstellung des Spiegels oder der anderen Position der Glühbirne



■ Abb. 3.6 Strahlungsverteilung durch den Heel-Effekt am Brennfleck

zu Abweichungen zwischen Licht- und Strahlungsfeld kommen kann, muss regelmäßig geprüft werden, ob diese Felder noch übereinstimmen.

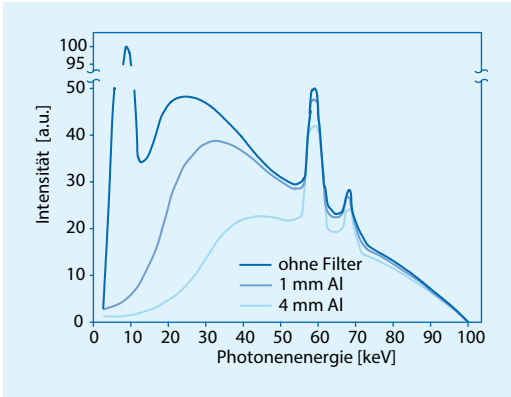
Bei manchen Röntgenanlagen erfolgt die Einstellung der Blenden nicht mechanisch sondern elektrisch. Damit ist es z. B. möglich die Feldgröße in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Röhre und Detektor automatisch auf maximale Größe zu beschränken.

Flächendosismessgerät

Am Austrittsfenster der Tiefenblende ist ein Flächendosismessgerät angebracht. Wie der Name schon vermuten lässt, misst dieses die Dosis in Abhängigkeit der zu bestrahlenden Fläche. Es besteht aus einer Ionisationskammer, welche die Menge der Strahlung messen kann (► Abschn. 3.2.4). Der Messwert, das Dosisflächenprodukt, ist eine Größe der Dosimetrie. Der Vorteil dieses Produktes aus Dosis und Fläche ist, dass der Messwert für jeden Ort des Strahlungsfeldes, also unabhängig von dem Fokus-Objekt-Abstand, gleich ist. Die Einheit lautet $\text{Gy} \cdot \text{m}^2$.

Ausgleichsfilter/Schablonen

Am untersten Ende der Tiefenblende sind von vielen Herstellern noch die Möglichkeit vorgesehen, Ausgleichsfilter (► Abschn. 3.2.7) oder Schablonen anzubringen.



■ Abb. 3.7 Röntgenspektren mit verschiedenen Filtern

3.2.3 Der Röntgenerators

Im vorherigen Kapitel haben Sie immer wieder gelesen, dass Elektronen mit mehreren Kilovolt (kV) zur Anode beschleunigt werden. Diese hohen Spannungen werden im Röntgenerators erzeugt.

Hauptbestandteil eines Generators ist der Transformator (■ Abb. 3.9), auch Trafo genannt.

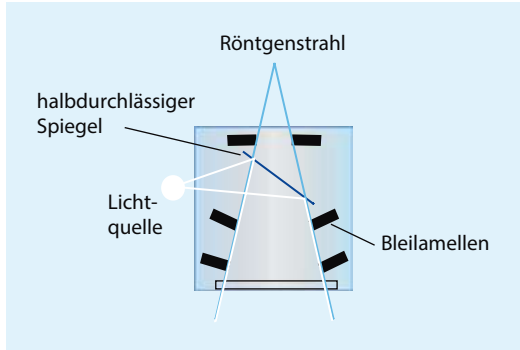
In einem Transformator wird mit Wechselstrom an der Primärspule ein elektromagnetisches Feld im Traforing erzeugt (Induktionsgesetz). An der Sekundärspule wird durch dieses elektromagnetische Feld wieder ein Wechselstrom erzeugt. Die Stärke dieses Sekundärstroms ist abhängig von dem Verhältnis der Windungszahlen. Es gilt

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1 \times U_1}$$

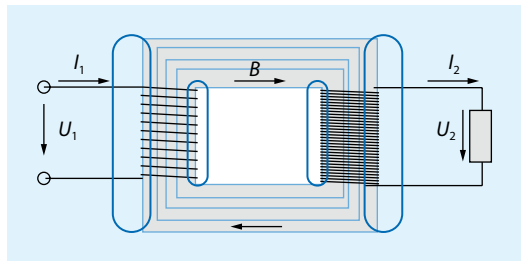
Beispiel: Primärspannung: 220 V, 10000 Windungen = 100 Windungen → 22000 V = 22 kV

Da der Sekundärstrom ebenfalls ein Wechselstrom ist, muss dieser noch gleichgerichtet werden, da die Röntgenröhre nur mit Gleichstrom funktioniert, die Kathode immer negativ und die Anode immer positiv geladen sein müssen (■ Abb. 3.10).

Bei einem **Einphasen-Generator** entstehen durch die Sperrung der negativen Spannung immer wieder „Lücken“ in der angelegten Röhrenspannung. Nun kann man diesen negativen Anteil mittels eines Gleichrichters umwandeln. Aber auch dann ist die effektive Spannung noch voller Lücken (**Zweiphasen-Generator**). Wählt man eine Drehstromversorgung (diese besteht aus 3 Wechselspan-



■ Abb. 3.8 Schematischer Aufbau der Tiefenblende



■ Abb. 3.9 Schematischer Aufbau eines Transformators

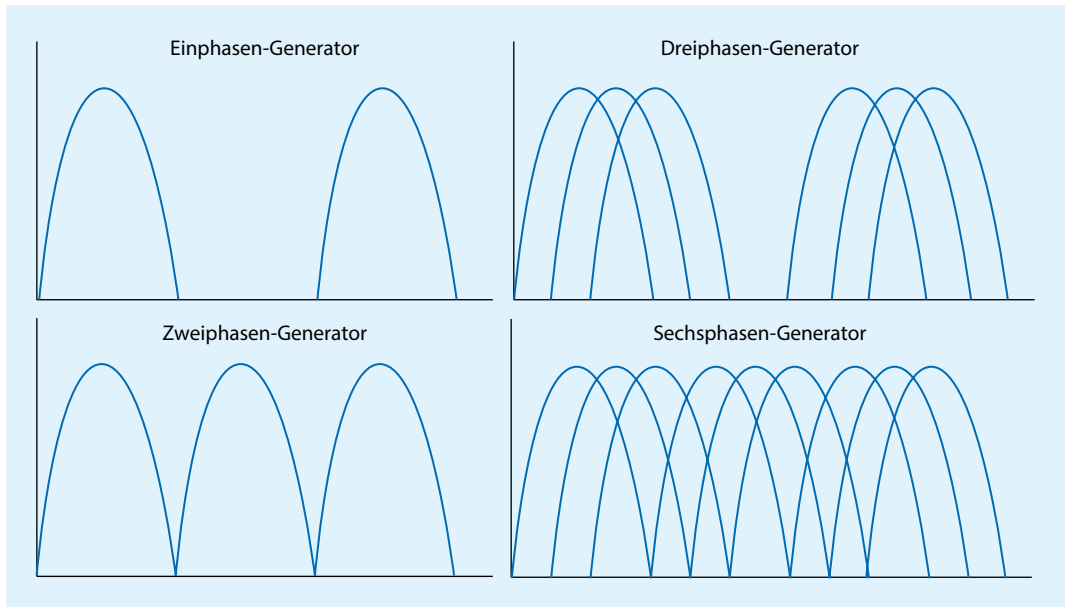
nungen, die zeitlich verschoben an der Spule anliegen), werden diese Lücken zwar kleiner, man hat aber keine konstante Spannung in der Röntgenröhre (**3-Phasen- bzw. 6-Phasengenerator**).

Da diese Schwankungen in der Röhrenspannung die Qualität der entstehenden Röntgenstrahlung zum Patientennachteil verschlechtert, sind diese Generatoren in der Humanmedizin nicht mehr zugelassen.

Heutzutage benutzt man nur noch sog. **Konverter- oder Hochfrequenzgeneratoren**. Die Erzeugung der Röhrenspannung erfolgt prinzipiell nach dem gleichen Prinzip. Mittels elektronischer Schaltungen erreicht man jedoch eine wesentlich gleichmäßigere Röhrenspannung und kann diese zudem an die Kennlinien der Röhre anpassen, um eine optimale Ausbeute an Strahlung zu gewährleisten.

■ Wie arbeiten nun diese Konvertergeneratoren?

Im ersten Schritt wird die angelegte Netzspannung (Wechselstrom- oder Drehstrom) mittels elektronischer Schaltungen gleichgerichtet und harmonisiert.



■ **Abb. 3.10** Spannungsgleichrichtung alter Generatortypen

Man erhält eine konstante positive Spannung. Da man Gleichstrom jedoch nicht hochtransformieren kann, muss dieser Gleichstrom wieder in Wechselstrom umgewandelt werden. Hier liegt der große Vorteil der Konvertergeneratoren. Die Wechselrichter im Generator sind in der Lage, einen Wechselstrom von 15– 400 kHz zu erzeugen (Zweiphasengenerator: 50 Hz).

Dieser Wechselstrom wird dann mittels eines Trafos auf die gewünschte Hochspannung transformiert, und die entstandene Hochspannung wieder gleichgerichtet. Aufgrund der hohen Frequenz erreicht man eine sehr gleichmäßige Röhrenspannung. Zudem wird die anliegende Röntgenspannung laufend gemessen und kann somit bei Abweichungen innerhalb kürzester Zeit (20 μ s) vom Wechselrichter nachgesteuert werden.

In dem Generator wird nicht nur die Anodenspannung, sondern auch der Heizstrom für die Kathode bereitgestellt. Wurde früher noch der normale Wechselstrom auf die gewünschte Stromstärke transformiert, nutzt man auch hier mittlerweile das gleiche Prinzip wie bei der Anodenspannung. Die gleichgerichtete, harmonisierte Netzspannung wird mittels eines Wechselrichters transformiert und an die Kathode angelegt. Dieses Verfahren erlaubt eine

höhere Ausbeute an der Kathode und eine schnellere Regelung des Röhrenstroms.

Zum Generator gehört auch das Generatorbedienpult. Mehr dazu im Kapitel Belichtungsautomatik (► [Abschn. 3.2.4](#)).

3.2.4 Strahlenqualität und -quantität, Belichtungsautomatik

Die Regelung des Generators und somit die Regelung der Strahlung der Röhre erfolgt am Bedienpult des Generators. An diesem Bedienpult regelt man die Spannung, den Kathodenstrom und die Zeit für die Röntgenaufnahme. Wurden diese Parameter früher noch mittels Drehreglern eingestellt, finden wir heute meistens nur noch einzelne Tasten oder einen berührungsempfindlichen Bildschirm (Touchscreen) (■ [Abb. 3.11a, b](#)).

Man unterscheidet zwei Arten, die Aufnahmeparameter einzustellen: die **freie Belichtung** und die **Belichtungs- oder Organautomatik**.

Bei der freien Belichtung wählt man am Generator die gewünschte Spannung (kV), den gewünschten Fokus und das gewünschte Strom-Zeit-Produkt



Abb. 3.11a,b Generatorbedienoberfläche. a Organprogramme b freie Belichtung

(mAs). Bei der Belichtungsautomatik werden die Spannung, der gewünschte Fokus und die gewünschte Messkammer mittels voreingestellter Parameter automatisch angewählt.

Im Folgenden werden die einzelnen Parameter und ihre Auswirkung auf das Bild vorgestellt.

Röhrenspannung

Mit der zwischen Kathode und Anode angelegten Spannung dosiert man die Geschwindigkeit der Elektronen und somit die Energie, mit der diese Elektronen auf die Anode treffen. Durch die o.g. Effekte wird die Strahlung energiereicher (Strahlenqualität).

- **Energiereichere Strahlung hat eine kürzere Wellenlänge als energiearme. Energiereiche (oder wie es in der Radiologie heißt „härtere“) Strahlung kann dichte Strukturen leichter durchdringen als energieärmere („weiche“ Strahlung).**

Man nutzt diese Unterschiede, um z. B. auf einer Röntgenaufnahme des Brustkorbes die Rippen fast durchsichtig erscheinen zu lassen. Damit kann man dann die Lunge besser beurteilen.

Da die in der Röhre entstehende Strahlung vornehmlich aus der Bremsstrahlung besteht (► Abschn. 3.2.1), führt eine Erhöhung der Spannung aber nicht nur zu einer Erhöhung der Energie. Durch die energiereicheren Elektronen werden auch am unteren Energiespektrum mehr Strahlen erzeugt. Die Spannung hat also einen überproportionalen Einfluss auf die Menge der Strahlung (► Abb. 3.12).

Röhrenstrom

Mit dem an der Kathode angelegten Heizstrom, kann die Menge der Strahlung dosiert werden.

- **Ein hoher Strom setzt mehr Elektronen frei, die zur Anode wandern können: man erhöht damit also die Menge der Strahlung (Strahlenquantität).**

Die Menge der Strahlung ist weitgehend proportional zur Stromstärke (► Abb. 3.13).

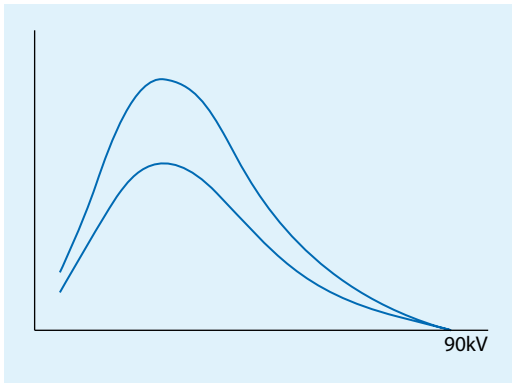
Die Regelung des Röhrenstroms am Generator erfolgt meist über die Einstellung des Strom-Zeit-Produktes, also der Ladungsmenge. Nur bei Spezialaufnahmen oder Schichtaufnahmen werden der Röhrenstrom und die Zeit getrennt geregelt.

Dosis

Die Dosis ist immer eine Mischung aus Röhrenstrom und -spannung. Erhöht man z. B. bei einer Unterarmaufnahme die Spannung, können die entstandenen Strahlen leichter durch die Knochen wandern. Man braucht also für das Röntgenbild weniger Strahlung, als wenn man eine Strahlung wählt, von der ein Großteil „im Knochen stecken bleibt“.

- **Je höher die Spannung, also je härter die Strahlung, desto weniger Details erkennt man von den Knochenstrukturen.**

Es ist also notwendig, für jede Körperregion die optimale Mischung zwischen Strahlenqualität und -quantität zu wählen.



■ **Abb. 3.12** Strahlungsenergie in Abhängigkeit der Spannung

Die (Eintritts-) Dosis berechnet sich folgendermaßen:

$$D_0 = g \cdot \frac{U^2 \cdot I}{r^2} \cdot \Delta t$$

Wie man an dieser Formel erkennt, steigt die Dosis linear zum Strom-Zeit-Produkt (mAs) aber quadratisch zur Röhrenspannung. Den Faktor g bezeichnet man als Dosiskonversionsfaktor, mit dem die Filterung der Röhre einberechnet wird (f entspricht mm Aluminiumfilterung).

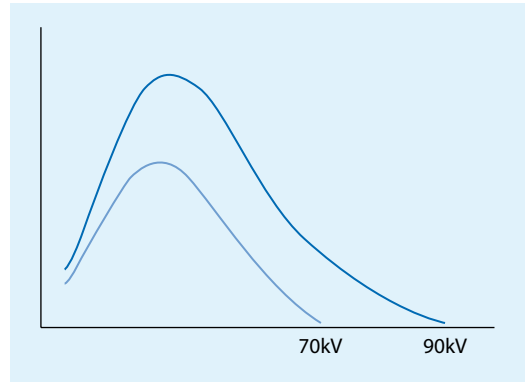
$$g \approx 0,25/f$$

Das Belichtungspunktesystem

Wenn man am Röntgengenerator die Spannung (kV) oder die Ladungsmenge (mAs) für eine Röntgenaufnahme einstellen will, fällt als Erstes auf, dass diese Einstellung nur in bestimmten Stufen erfolgen kann. Diese einzelnen Stufen werden **Belichtungspunkte** (BP) genannt. Die Werte dieser Stufen sind von der Röntgenröhre abhängig und können sich von Röntgenanlage zu Röntgenanlage unterscheiden.

Diese Stufung ist so gewählt, dass eine Erhöhung um 3 Stufen bzw. Belichtungspunkte (BP) zu einer Verdoppelung der Dosis führt bzw. eine Verringerung um 3 BP zu einer Halbierung. Dabei ist es i. d. R. egal, ob diese Veränderung am kV- oder am mAs-Regler erfolgt.

Auch bei anderen Anwendungen ist das Belichtungspunktesystem von großem Vorteil. Ist z. B. bei einer Aufnahme die Strahlung zu hart (Kontrast zu gering), die Dosis für die Aufnahme jedoch kor-



■ **Abb. 3.13** Strahlungsenergie in Abhängigkeit der Stromstärke

rekt, kann man durch gegenläufiges Ändern der kV und der mAs den Kontrast der Röntgenaufnahme verbessern (–1BP kV, +1BP mAs).

Meist sind die Standardwerte für die freien Belichtungen für Standardpatienten programmiert. Sollten Sie eine freie Belichtung bei einem dickeren oder dünneren Patienten machen müssen, hilft Ihnen auch hier das Belichtungspunktesystem. Pro Zentimeter Patientendicke müssen sie nur einen BP nach oben oder unten anpassen (beim Thorax pro 1,5 cm). In der folgenden Tabelle finden Sie weitere Beispiele für das Belichtungspunktesystem (■ Tab. 3.1).

Belichtungsautomatik

Eine genauere Einstellung der Dosis erreicht man mit der Belichtungsautomatik. Im Buckytisch und im Rasterwandstativ (► Abschn. 3.2.8) sind vor dem Bildempfänger Dosismessgeräte angebracht, die die Strahlung vor dem Detektor messen. Erreicht die Strahlung einen bestimmten, für das System und die Aufnahme programmierten Wert, wird ein Abschaltsignal an den Röntgengenerator gesendet. Mit dieser Belichtungsautomatik erreicht man, dass der Detektor immer die optimale Dosis erhält.

Aufbau

Zum Messen der Strahlung werden, wie auch in anderen Bereichen, Ionisationskammern verwendet. Diese bestehen aus einer luft- oder gasgefüllten Kammer und zwei Kondensatorplatten. Wird eine Spannung an diese Kondensatorplatten angelegt, bekommt man somit eine negativ geladenen Anode und eine positiv geladene Kathode. Trifft nun ein

■ **Tab. 3.1** Beispiele für Belichtungspunktesysteme (nach Zimmer-Brossy)

Patientendicke	+1 cm	+1 BP
	– 1 cm	– 1 BP
Foliensysteme	Änderung SC200 auf SC400	– 3 BP
	Änderung von SC200 auf SC100	+3 BP
Rasteraufnahme	ohne Raster	– 6 BP
Aufn. mit Gipsverband	Trocken	+3 bis 5 BP
	naß (konventioneller Gips)	+3 bis 7 BP (kV)
Abstandabweichungen	110 cm → 100 cm	– 1 BP (mAs)
	110 cm → 90 cm	– 2 BP (mAs)
	110 cm → 120 cm	+1 BP (mAs)
	110 cm → 140 cm	+2 BP (mAs)

Röntgenstrahl ein Gasatom, wird dieses ionisiert (► [Abschn. 3.2.1](#)). Daraufhin wandern die freigeordneten Elektronen in Richtung Anode und die ionisierten Atome Richtung Kathode: es fließt ein elektrischer Strom.

► **Je mehr Röntgenstrahlen auf die Kammer treffen, desto mehr Atome können ionisiert werden. An der Höhe des Stroms kann man somit die Menge der Strahlung ablesen.**

Position

Im Buckytisch und im Rasterwandstativ sind i.d.R. drei Messkammern angebracht. Am Rasterwandstativ sind diese auf der Platte markiert. Auf dem Buckytisch ist diese Kennzeichnung nicht möglich, da der Tisch verschoben werden kann. Bei manchen Anlagen kann man jedoch eine Plexiglasscheibe in die Tiefenblende schieben, auf der die Messkammern aufgezeichnet sind. So ist es möglich, die Messkammern auf den Patienten zu projizieren.

Die mittlere Messkammer befindet sich direkt im Zentralstrahl der Röhre, die Äußeren sind etwas nach oben verschoben. Meistens wird die mittlere Messkammer verwendet, da sich das darzustellende Objekt auch in der Bildmitte befindet (z. B. bei Schädel- oder Wirbelsäulenaufnahmen). Bei manchen Aufnahmen liegt jedoch das darzustellende Objekt nicht in der Filmmitte (z. B. bei bestimmten Hüftaufnahmen). Bei der Thoraxaufnahme wählt man

die äußeren Messkammern, da die mittlere bei dieser Aufnahme im Bereich der Wirbelsäule liegt.

Alle Messkammern lassen sich am Bedienfeld des Generators einzeln oder kombiniert auswählen. Bei der Kombination von mehreren Kammern wird der Generator abgeschaltet, sobald eine der Kammern den programmierten Messwert erreicht hat.

Generatoreinstellungen

Bei der Auswahl der Belichtungsautomatik wählt man am Generator, wie oben schon erwähnt, die Spannung, die Fokusgröße und die gewünschte Messkammer an (► [Abb. 3.14](#)). Wie legt man aber nun die Abschaltdosis fest?

Zum einen gibt es an den Generatoren die Möglichkeit, die Dosis an die Empfindlichkeit des Aufnahmesystems anzupassen. Diese Anpassung geschieht über die Auswahl der Empfindlichkeitsklassen der Röntgenkassetten. Diese wird entweder in diskreten Werten der Empfindlichkeitsklassen (200, 400, 800) oder in den alten Kassettenbezeichnungen (Detail, Universal, High) angegeben (► [Abschn. 3.3.1](#)). Jeder dieser Tasten ist eine spezielle Abschaltdosis zugeordnet (► [Tab. 3.2](#)).

Für bestimmte Aufnahmesituationen ist es nötig, die eingespeicherte Dosis zu erhöhen. Für diese Fälle sind am Generatorpult Ausgleichstasten vorhanden, die entweder als Belichtungspunkte (–3 bis +3) oder als Piktogramme unterschiedlicher Patientendicken angegeben sind („dünnes Männchen“, „dickes Männchen“).



Abb. 3.14 Generatoroberfläche der Belichtungsautomatik

Fehlermöglichkeiten der Belichtungsautomatik

Auch wenn bei der Belichtungsautomatik die Dosis automatisch gemessen wird, sind doch ein paar Punkte bei ihrer Nutzung zu beachten.

- 1. Obwohl es offensichtlich klingt: Achten Sie darauf, dass das Objekt im Bereich der Messkammer liegt. Meistens passiert ein Fehler nur dann, wenn beim Buckytisch die Röhre nicht korrekt auf die Rasterlade ausgerichtet ist.
- 2. Bei der Nutzung der äußeren Messkammern am Buckytisch muss man wissen, welches Ende des Tisches das „Kopfende“ ist. Die äußeren Messkammern befinden sich – wie oben erwähnt – oberhalb der mittleren, d. h. sie sind beim Tisch in Richtung des Kopfes verschoben. Danach richtet sich dann auch die Lagerung des Patienten.
- 3. Die Belichtungsautomatik kann auch versagen, wenn sich im Messfeld Fremdkörper oder Luftansammlungen befinden. So wird bei einer Wirbelsäulenprothese oder Kontrastmittel in der Blase bei den entsprechenden Aufnahmen mehr bzw. weniger Dosis ausgelöst als zur Darstellung nötig wäre. Bei konventionellen Röntgenaufnahmen wären diese Aufnahmen unter- bzw. überbelichtet.

3.2.5 Abbildungsgesetze

Wie man es vom natürlichen Licht kennt, gelten auch bei Röntgenstrahlen die bekannten Gesetze:

Tab. 3.2 Programmierte Detektordosis der einzelnen Empfindlichkeitsklassen

Speed-Class	Detektordosis (µGy)
100	10
200 (D)	5
400 (U)	2,5
800 (H)	1,25
1600	0,65

Strahlensatz

Bei der Röntgenaufnahme handelt es sich immer um eine **Zentralprojektion** (Abb. 3.15), mit dem Fokus als Zentrum. Die Röntgenstrahlen stellen ein Objekt (G) auf einer Projektionsfläche (B) (Film, Detektor) dar. Dabei wird der Strahl, der direkt vom Fokus kommt und sich in der Mitte des bestrahlten Feldes befindet, **Zentralstrahl** genannt. Der Strahl, der senkrecht auf die bestrahlte Fläche trifft wird als **Senkrechtstrahl** bezeichnet.

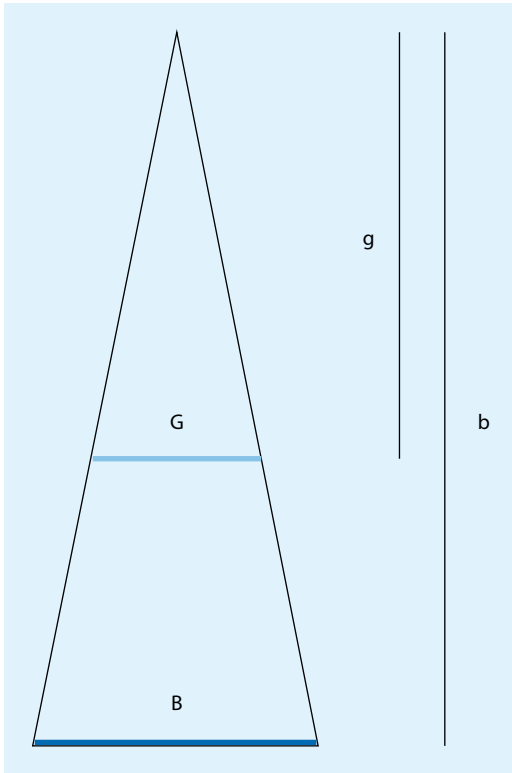
Bei einer solchen Projektionsart gilt das Abbildungsgesetz:

V = B/G = b/g

In der Röntgenbildgebung spricht man beim Abstand g vom **Fokus-Objekt-Abstand** und beim Abstand b vom **Fokus-Detektor-Abstand** (FDA). Die Strecke B–G wird **Objekt-Detektor-Abstand** (ODA) genannt. Die Variable V kennzeichnet die Vergrößerung der Abbildung.

Je größer der Objekt-Film-Abstand ist, desto größer wird der Gegenstand abgebildet, wobei alle Objekte in einer Bildebene gleich vergrößert werden.

Grundsätzlich möchte man immer eine möglichst größengenaue Darstellung im Röntgenbild. Leider lässt sich das nicht erreichen, da der Patient eine gewisse Dicke hat. Bei der Einstelltechnik achtet man daher darauf, dass die zu beurteilende Region nah am Film liegt, um eine scharfe und größengenaue Darstellung zu erreichen. (Sternum in Bauchlage, Wirbelsäule in Rückenlage, ...).



■ Abb. 3.15 Strahlensatz/Zentralprojektion

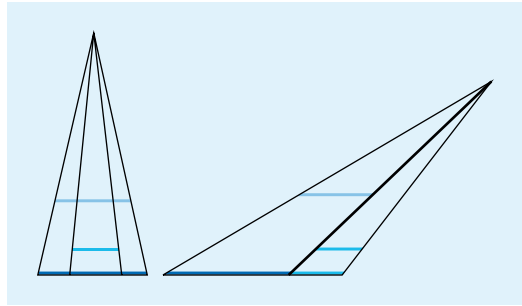
Bei manchen Röntgenaufnahmen macht man sich diese Abbildungsgesetze zunutze. Bei der Mammographie vergrößert man z. B. eine bestimmte Region, indem man den ODA (Objekt-Detektor-Abstand) vergrößert.

Bei der Thoraxaufnahme möchte man das Herz möglichst größengenau abbilden. Da das Herz aber immer einen gewissen Abstand zum Film hat, vergrößert man den FDA, um den Vergrößerungsfaktor zu verkleinern ($1,10\text{ m} / 1,10\text{ m} - 0,20 = 1,22 \rightarrow 2,0\text{ m} / 2,0\text{ m} - 0,20 = 1,11$).

Projektion/Parallaxe

Bei einer Zentralprojektion kommt es auch dazu, dass zwei übereinanderliegende Objekte nicht unterschieden werden können. Das ist dann besonders problematisch, wenn diese Objekte durch ihre Größe und ihre Lage in der gleichen Bildgröße erscheinen.

Verschiebt man den Fokus aber jetzt in einer Ebene, so verschiebt sich auch der Gegenstand in der Bildebene (Parallaxenverschiebung,



■ Abb. 3.16 Projektion bei Parallaxenverschiebung

■ Abb. 3.16). Auf diese Art kann man Objekte in einem Röntgenbild „freiprojizieren“, d. h. die Objekte, die vorher übereinander dargestellt wurden, werden dann nebeneinander dargestellt (■ Abb. 3.17).

Verzeichnung

Da es sich bei einer Röntgenaufnahme um eine Projektion handelt, ist es so, dass Objekte nur in ihrer vollen Ausdehnung dargestellt werden, wenn sie sich senkrecht im Zentralstrahl befinden. Steht das Objekt nicht senkrecht, wird es verkürzt dargestellt. Befindet es sich nicht im Zentralstrahl, ändert sich ebenso die Größendarstellung (■ Abb. 3.18).

Abstands-Quadrat-Gesetz

Eine der wichtigsten physikalischen Gesetze in der Radiologie ist das Abstands-Quadrat-Gesetz (■ Abb. 3.19). Es besagt, dass mit einer Vergrößerung des Abstands (r) die Dosis/Intensität (I) im Quadrat abnimmt.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

oder

$$I \propto \frac{1}{r^2}$$

Besonders im Bereich des Strahlenschutzes ist dieses Gesetz von besonderer Bedeutung.

3.2.6 Qualität des Röntgenbildes und qualitätsverbessernde Maßnahmen

Das gute Röntgenbild

Was macht ein Röntgenbild zu einem guten Röntgenbild? Unabhängig von der zu untersuchenden



■ Abb. 3.17a,b Beispiel: Radiusköpfchenaufnahme

Körperregion und den darzustellenden Strukturen sollte das Bild eine homogene, ausreichende Belichtung und einen guten Kontrast besitzen.

Ein Bild ist dann homogen belichtet, wenn die durchschnittliche Schwärzung einem mittleren Grauton entspricht, man also gleichmäßig helle und dunkle Bereiche im Bild erkennt. Nur so kann das komplette Grauspektrum zur Darstellung genutzt werden. Es kommt also darauf an, den **Röhrenstrom**, die **Belichtungszeit** und die **Qualität der Strahlung** (Röhrenspannung, kV) optimal zu wählen.

Für die Darstellung von Strukturen benötigt man einen genügend hohen Kontrast zwischen den Details. Je härter die Strahlung, desto leichter werden dichte Strukturen durchdrungen, was dazu führen kann, dass diese Dichteunterschiede ähnlich hell dargestellt werden. Der **Merkspruch „kV macht grau“** beschreibt genau diese Tatsache: dass das Bild bei hohen kV-Werten aus relativ gleichen Grautönen besteht.

Ein weiteres Qualitätsmerkmal eines guten Röntgenbildes ist die scharfe Darstellung der Strukturen.

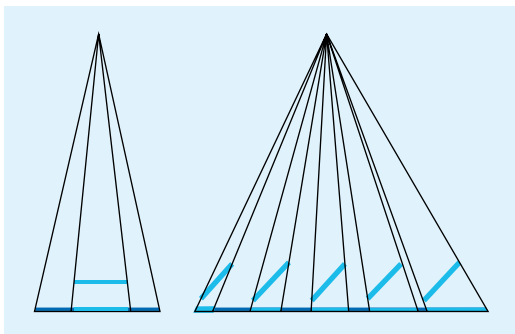
Ein Teil der Unschärfe ist systembedingt (siehe ► Abschn. 3.3), der andere Teil entsteht aus der Bewegungsunschärfe und der Streustrahlenunschärfe.

Bewegungsunschärfe

Obwohl in der Röntgendiagnostik mit relativ kurzen Belichtungszeiten gearbeitet wird, kann es durchaus zu Bewegungsunschärfen im Bild kommen. Durch eine gute Patientenbetreuung kann die Qualität der Aufnahme verbessert werden, indem der Patient aktiv auf die ruhige und konstante Haltung/Lagerung während der Aufnahme achtet. Mitunter ist es vorteilhaft, eine Röntgenaufnahme nicht im Sitzen, sondern im Liegen durchzuführen, da der Patient stabiler zu positionieren ist und unbewusste Bewegungen vermieden werden können.

Das bekannte Atemkommando der Radiologie: „Einatmen, nicht mehr atmen!“ dient der Minimierung von Bewegung. Somit wird nicht nur die optimale Stellung der Lunge bei der Lungenaufnahme sichergestellt, sondern natürlich auch die Bewegung der Lunge.

Bei manchen Aufnahmen macht man sich die Bewegungsunschärfe hingegen zunutze. Bei der Aufnahme der Halswirbelsäule von vorne würde der Unterkiefer die Wirbelkörper überdecken. Durch schnelles Bewegen des Unterkiefers schafft man es, diese Überdeckung teilweise zu verhindern, indem der Unterkiefer auf dem Bild „verwischt“ wird.



■ Abb. 3.18 Projektion bei Verzeichnung

Streustrahlenreduktion

Bei einer Röntgenaufnahme trägt nicht nur die direkte Strahlung, die durch den Körper dringt, zur Bildgebung bei, sondern auch die im Körper gestreute Strahlung (► Abschn. 3.2.1). Diese Streustrahlung bewirkt, dass die Strukturen im Bild nicht mehr klar dargestellt werden. Um die Bildqualität zu verbessern, sollte diese Streustrahlung also nicht auf den Detektor treffen.

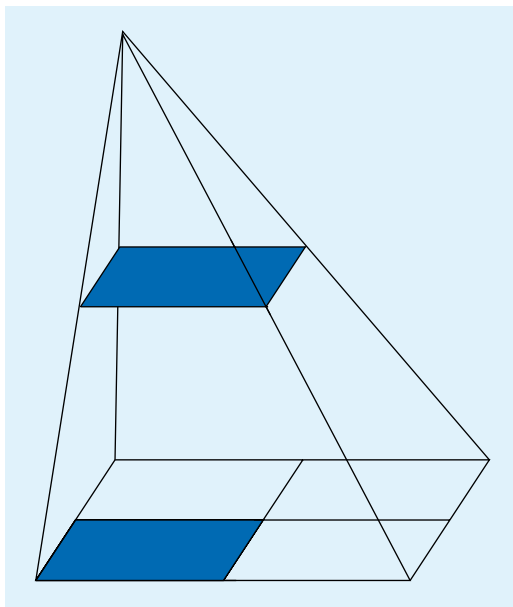
Der Anteil der Streustrahlung ist direkt abhängig von der Röhrenspannung, der Patientendicke und der Feldgröße.

Raster

Zur Filterung der Streustrahlung benutzt man ein Streustrahlenraster. Ein Streustrahlenraster ist abwechselnd aufgebaut aus Bleilamellen und strahlendurchlässigem Material, deren räumliche Anordnung der Divergenz der Strahlung entspricht. Durch diese Anordnung gelangen nur die Strahlen auf den Detektor, deren Winkel dem Divergenzwinkel der Strahlung entsprechen.

Da mit einem Raster nur noch ein Teil der Strahlung auf den Detektor trifft, wird eine bis zu fünfmal höhere Dosis benötigt. Aus diesem Grund werden Raster nur in Körperbereichen eingesetzt, bei denen ein hoher Anteil von Streustrahlung entsteht (z. B. Schädel oder Rumpf). Bei Extremitäten ist ein Raster aufgrund der geringen Streustrahlenanteils nicht notwendig, bei Kindern aufgrund der höheren Dosis sogar untersagt.

Man unterscheidet verschiedene Arten von Rastern. Beim **Parallelraster** sind, wie auf der Abbildung oben (■ Abb. 3.20), die Bleilamellen parallel zur Fläche angeordnet. Diese Anordnung hat je-



■ Abb. 3.19 Abstands-Quadrat-Gesetz

doch den Nachteil, dass besonders bei geringeren Abständen auch Röntgenstrahlung, die direkt von der Röhre stammt, aufgrund der Strahlendivergenz herausgefiltert wird.

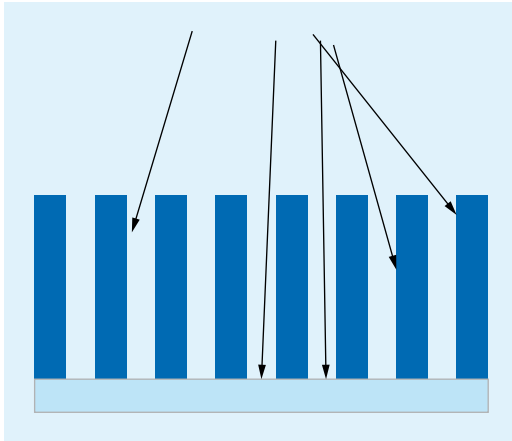
Um diesen Nachteil aufzufangen wurde das **Fokusraster** entwickelt (■ Abb. 3.21). Hier sind die Bleilamellen so angeordnet, dass alle Strahlen, die aus einer bestimmten Entfernung stammen, durchgelassen werden.

Beim Einsatz dieses Rasters ist besonders darauf zu achten, dass sich die Röntgenröhre in dem Fokusbereich des Rasters befindet (z. B. 1,10 m–1,80 m) und auf die Mitte des Rasters ausgerichtet ist. Eine Nichteinhaltung der Abstände führt zur Abschwächung der Nutzstrahlen im Randbereich. Trifft der Zentralstrahl nicht senkrecht auf das Raster, führt das insgesamt zu einer ungleichmäßigen Belichtung des Bildes.

Die Kenngrößen eines Rasters sind das **Schachtverhältnis**

$$r = \frac{h}{D}$$

und die **Linienzahl**, d. h. die Anzahl der Lamellen je Zentimeter.



■ Abb. 3.20 Schema eines Parallelrasters

$$N = \frac{1}{d+D}$$

Die gängige Lamellenbreite beträgt 0,7 mm. Ist ein Raster mit $r = 12/40$ bezeichnet, bedeutet das, dass das Raster ein Schachtverhältnis von 12 bei 40 Linien pro Zentimeter hat.

Die beiden Rasterarten können stehend oder bewegt eingesetzt werden (**Steh- bzw. Bewegetraster**). Die Raster werden entweder durch einen Pendelmechanismus, oder durch einen Elektromotor linear während der Aufnahmezeit bewegt.

Bei einem Bewegetraster (auch Bucky-Raster genannt) kann die Linienzahl reduziert werden, da die Sichtbarkeit der Rasterlinien durch die Bewegung eliminiert wird.

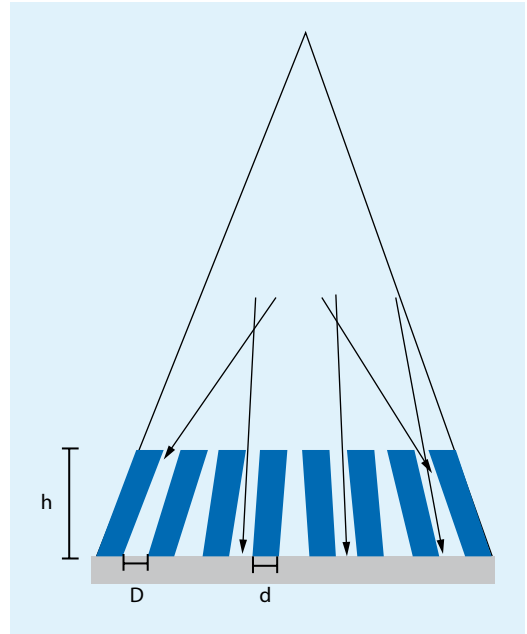
Die Bundesärztekammer fordert bei bewegten Rastern eine Linienanzahl von mindesten 36/cm und bei stehenden Rastern mindestens 60/cm.

Einblendung

Da der Streustrahlenanteil direkt von der Feldgröße abhängt, trägt die Einblendung nicht nur zur Dosisreduktion, sondern auch zur Verbesserung des Bildes bei.

Homogenität/Filter

Gerade in Randbereichen einer Röntgenaufnahme kommt es durch Überstrahlungen und Streustrahlung des Tisches zur Verschlechterung des Bildes. Hier können angelegte Strahlenkränze („Indianer“)



■ Abb. 3.21 Schema eines fokussierten Rasters

oder Sandsäcke die Homogenität des Bildes erheblich verbessern.

Für bestimmte Röntgenaufnahmen existieren zudem Zusatzfilter, die direkt an die Tiefenblende angebracht werden können (■ Abb. 3.22). Diese Filter reduzieren die Strahlung in den gewünschten Bereichen und tragen so zu einem homogenen Bildeindruck bei. Zudem reduzieren sie die Strahlenbelastung des Patienten, z. B. Schulterfilter, Fußkeil.

Bildrauschen beim digitalen Röntgenbild

Der Vorteil einer digitalen Röntgenaufnahme ist, dass durch die große Empfindlichkeit der digitalen Sensortechnik (► Abschn. 3.2.10) fast jede Röntgenaufnahme zu einem verwertbarem Bild führt. Diese Technik reagiert wesentlich unempfindlicher auf Abweichungen der Strahlenmenge als der „alte“ Röntgenfilm. Während Überbelichtungen, also zu viel Strahlung, der Qualität des Bildes nicht schadet, führt eine unterbelichtete Aufnahme zu einem Bild, das wesentlich weniger Details darstellt. Dieses Phänomen wird auch **Bildrauschen** genannt.

Leider ist dieses Rauschen auf den Vorschaumonitor der Röntgenanlagen nicht immer sofort zu se-

hen. Aber wie erkennt man, ob zu viel oder zu wenig Dosis für die Röntgenaufnahme verwendet wurde?

Für diesen Zweck existiert in der digitalen Aufnahmetechnik der **Dosisindikator** (■ Tab. 3.3). Leider haben die Hersteller jeweils eigene Indikatoren entwickelt, die einen von der Detektordosis abhängigen Wert anzeigen. Dieser entspricht nur bedingt der erzielten Detektordosis, da auch noch andere Parameter diesen Faktor beeinflussen (Feldgröße, Zentrierung, Spannung, ...). Je nach verwendetem System und Organ gibt es Zielwerte, in denen die verschiedenen Indikatoren liegen sollen. Somit kann zurzeit nur bedingt eine Unterbelichtung bemerkt werden.

Erst 2008 wurde in einer DIN-Bestimmung festgelegt, dass alle Firmen einen Dosisindikator anzeigen müssen, aus dem direkt auf die Dosis geschlossen werden kann. Somit wäre dann sofort erkennbar, ob und um welchen Faktor eine Aufnahme über- oder unterbelichtet ist.

3.2.7 Aufbau eines Bucky-Arbeitsplatzes

Der konventionelle Röntgenarbeitsplatz wird häufig Bucky-Arbeitsplatz genannt (■ Abb. 3.23). Dr. Gustav Peter Bucky (* 3. September 1880 in Leipzig; † 19. Februar 1963 in New York) war unter anderem Radiologe und entwickelte das Prinzip der „schwimmenden“ Tischplatte und das Streustrahlenraster.

Schauen wir uns diesen Arbeitsplatz im Folgenden einmal genauer an.

Der Buckytisch

Der Tisch, auf dem der Patient während der Untersuchung liegt, wird Buckytisch genannt. Die Besonderheit dieses Tisches ist, dass die Tischplatte in alle Richtungen verschoben werden kann. Dies erreicht man, indem die Tischplatte in Längs- und in Querrichtung auf Kugellagern liegt und primär durch Elektromagnete in Position gehalten wird. Möchte man die Tischplatte nun verschieben, löst die MTRA diese Elektromagnete und kann den Patienten mit dem Tisch in die optimale Position bewegen. Meistens ist dieser Tisch auch in der Höhe verstellbar. Dies erleichtert die Umlagerung des Patienten vom Bett auf dem Tisch, die Patientenla-



■ Abb. 3.22 Beispiele verschiedener Ausgleichsfilter

gerung bei bestimmten Untersuchungen (z. B. bei Aufnahmen der Schulter) und kann genutzt werden, um die optimale Arbeitshöhe für die MTRA einzustellen (► Abschn. 11.8).

Unter der Tischplatte befindet sich die sog. Rasterlade. In dieser Lade befindet sich die Röntgenkassette oder der Festkörperdetektor, mit denen das Röntgenbild aufgenommen wird, sowie das Streustrahlenraster und die Messkammern. Auch diese Lade ist in Längsrichtung verschiebbar, damit man den Aufnahmeort einfach wechseln kann, ohne den Patienten bewegen zu müssen (z. B. von der Aufnahme des Kopfes zur Aufnahme des Beckens).

Das Rasterwandstativ

Das Rasterwandstativ dient primär zur Aufnahme im Stand oder im Sitzen. Hier befindet sich die Rasterlade höhenverstellbar hinter einer Platte. Bei der Positionierung des Patienten sollte darauf geachtet werden, dass der Patient möglichst nah an der Platte positioniert wird (kleiner Objekt-Detektor-Abstand). Außerdem wird so sichergestellt, dass der Patient auch ruhiger steht oder sitzt, da er einen direkten Bezug zu der feststehenden Platte hat und so unbewusste Bewegungen leichter registriert. Da bei Aufnahmen im Sitzen meistens ein Rollhocker verwendet wird, muss die MTRA besonders darauf achten, dass der Patient stabil darauf sitzt und nicht von diesem Stuhl kippt.

Das Stativ

Die Röntgenröhre, oder genauer das Strahlenschutzgehäuse mit Tiefenblende, befindet sich häufig an einem sog. Deckenstativ. Das Deckenstativ besteht

Tab. 3.3 Beispiele verschiedener Dosisindikatoren für verschiedene Detektordosen

Detektordosis (mGy)	EI (Phillips)	S-Wert (FUJI)	EXI (Siemens)	EI (Kodak)	IgM-200 (Agfa)	IgM-400 (Agfa)
1,25	800	1600	190	1100	1,3	1,6
2,5	400	800	380	1400	1,6	1,9
5	200	400	760	1700	1,9	2,2
10	100	200	1520	2000	2,2	2,5

aus zwei senkrecht verlaufenden, an der Decke angebrachten Schienensystemen, an denen ein Teleskoparm angebracht ist. An dessen Ende befindet sich die Röntgenröhre. Mit dieser Konstruktion ist die Röhre frei im Raum und in der Höhe beweglich. An bestimmten Punkten des Deckenstativs befinden sich Einrastpunkte, die es den MTRA erleichtern, die vorgeschriebenen Positionen, z. B. die Tischmitte oder bestimmte Abstände zum Rasterwandstativ, einzustellen.

Manche Systeme verfügen über eine automatische Höhenverstellung des Deckenstativs, sodass sich bei Ausrichtung auf das Rasterwandstativ der Zentralstrahl immer auf Kassettenmitte befindet.

3.2.8 Patientenbetreuung und -lagerung

Stellen Sie sich vor, Sie kämen als verletzte Person in ein Krankenhaus und dort in die Röntgenabteilung, in der viele unbekannte Geräte stehen. Sie wissen nicht, was mit Ihnen geschieht, Sie fühlen sich vielleicht unsicher, vielleicht verängstigt oder auch nur ein wenig eingeschüchtert.

In dieser Rolle befinden sich viele unserer Patienten. Nur wenn es gelingt, auf die Patienten angemessen einzugehen und ihnen die Berührungsängste zu nehmen, werden sie nicht nur Sie und die Abteilung in positiver Erinnerung behalten, sondern auch bei der Untersuchung wesentlich kooperativer sein. Dies ist besonders bei Untersuchungen mit unbequemen Lagerungen wichtig.

Treten Sie immer freundlich und höflich gegenüber den Patienten auf.

Wenn Sie den Patienten in die Kabine rufen, achten Sie darauf, dass Sie den richtigen Patienten aufgerufen haben (Identifikationskontrolle) und ob der Patient Hilfe beim Entkleiden benötigt. Seien Sie hilfsbereit und erklären Sie dem Patienten kurz, was während der Untersuchung geschieht. Manchmal ist es so, dass der Patient gar nicht weiß, warum er in die Röntgenabteilung geschickt wurde.

Auch wenn der Patient Ihnen gegenüber unfreundlich ist/wird, bleiben sie gelassen, höflich und bestimmt. Diese Unfreundlichkeit ist häufig nur ein Ausdruck seiner Unsicherheit.

Bei der Lagerung des Patienten versuchen Sie, ihm eine angenehme und bequeme Lage zu ermöglichen. Häufig reicht bei Aufnahmen im Liegen eine einfache Knierolle oder ein Kopfkissen, solange die Einstelltechnik nicht dagegen spricht. Bei unbequemen Stellungen der Extremitäten (z. B. bei bestimmten Hüft- oder Schulteraufnahmen) können Sie den Patienten mit entsprechenden Polstern unterstützen.

Versuchen Sie den Patienten nur so kurz wie möglich im Untersuchungsraum allein zu lassen. Besonders bei verwirrten, unruhigen oder schwerverletzten Patienten sollten Sie immer einen Blick auf den Patienten haben.

Ist die Röntgenaufnahme fertiggestellt, fragen die Patienten häufig nach dem Resultat. Diese Frage dürfen Sie nicht beantworten. Die Befundung des Bildes ist Aufgabe des Arztes, und das sollten Sie bei Nachfrage auch angeben.

Zu guter Letzt sollten Sie den Patienten nicht einfach nur in die Kabine schicken. Der letzte Eindruck bleibt, also achten Sie auf die freundliche Verabschiedung.



■ **Abb. 3.23** Beispiel eines Bucky-Arbeitsplatzes (Tisch und Rasterwandstativ). (© Vockelmann)

3.2.9 Mobile Röntengeräte

Da nicht alle Patienten in die Röntgenabteilung kommen können, werden auch Röntgenaufnahmen auf der Station, besonders auf den Intensivstationen, durchgeführt (■ **Abb. 3.24**). Da dort kein Rasterwandstativ oder Buckytisch zur Verfügung steht, werden die Aufnahmen in freier Belichtung gemacht.

Bei den dort eingesetzten mobilen Röntengeräten sind der Generator und die Röhre auf einer fahrbaren Einheit angebracht. Durch den Einsatz von Konvertergeneratoren sind diese Einheiten immer kleiner geworden und können mit einer normalen Netzspannung betrieben werden. Manche Hersteller bieten Geräte an, die ihren Strom über einen integrierten Akku beziehen.

Die Röntgenröhre ist mit zwei oder drei Gelenken mit dem Generator verbunden und kann so direkt über dem Patienten positioniert werden. Die Tiefenblende ist, wie bei den fest installierten Geräten, drehbar, sodass das Feld optimal eingestellt werden kann.

Als Bildempfänger stehen entweder ein Speicherfoliensystem oder – bei modernen Geräten – ein Festkörperdetektor zu Verfügung. Bei diesen Systemen befindet sich auf der Röntgeneinheit auch der entsprechende Bildrechner. So steht die Röntgenaufnahme direkt nach der Aufnahme zur Verfügung, und die Qualität der Einstellung kann frühzeitig überprüft werden.



■ **Abb. 3.24** Beispiel einer mobilen Röntgenröhre

Für die Aufnahme wird der Patient auf die Kassette bzw. den Detektor gelegt. Hierbei ist es wichtig darauf zu achten, dass der Zentralstrahl senkrecht auf das Raster fällt, da auch auf der Station mit einem fokussierten Raster gearbeitet wird. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass sich möglichst keine Objekte zwischen dem Strahler und dem Bild-detektor befinden. Bei Intensivpatienten sollten Kabel- und Schlauchsysteme in Zusammenarbeit mit dem Pflegepersonal so positioniert werden, dass sie das Bild möglichst wenig beeinträchtigen.

Auch auf der Intensivstation ist auf den Strahlenschutz für Patient und Personal zu achten. Da sich der Röntgenstrahler nicht in einem speziellen Raum befindet, wird im Moment der Aufnahme das Patientenzimmer zum Kontrollbereich. Daher müssen alle Personen zu diesem Zeitpunkt den Raum verlassen haben oder mit entsprechender Schutzkleidung (Bleischütze) ausgestattet sein. Die meisten Hersteller weisen einen Kontrollbereich während der Aufnahme von 1,50–2 m Radius um das Gerät aus.

3.2.10 Besondere Strahlenschutzmaßnahmen

Wie Sie schon im ► **Kapitel 2** gelernt haben, gehören die Röntgenstrahlen zu den ionisierenden Strahlen



■ Abb. 3.25a,b Bleiabdeckungen. a Ovarienschutz und b Hodenkapsel

und können im menschlichen Gewebe, unabhängig von der Menge, Schäden verursachen, die vielleicht erst nach mehreren Jahren Auswirkungen zeigen. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, bei der täglichen Arbeit darauf zu achten, dass der Patient und auch Sie oder Ihre Kollegen möglichst wenig mit den Strahlen in Berührung kommen. Um das zu erreichen, gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Direkter Strahlenschutz Abschirmung

Bei einer Röntgenaufnahme muss natürlich der Patient den Röntgenstrahlen ausgesetzt werden. Es sollten aber mögliches alle Körperteile, die nicht untersucht werden, von der Strahlung abgeschirmt werden. Die meisten Hilfsmittel hierfür bestehen aus Blei oder Bleiverbundstoffen („Bleigummi“). Je

nach untersuchtem Organ kann man den Patienten auf verschiedene Arten schützen. Hierbei sind besonders die strahlenempfindlichen Organe zu schützen. Zu aller erst sind das die Gonaden, also die Eierstöcke (Ovarien) bei der Frau und die Hoden (Testes) beim Mann. Aber auch der Dünndarm und das blutbildende Gewebe sind besonders strahlenempfindlich.

➤ Da sich bei Kindern viele Zellen noch im Wachstum befinden, sind Kinder insgesamt strahlenempfindlicher als Erwachsene und deshalb besonders zu schützen.

Bei Aufnahmen der Extremitäten sollte der Patient idealerweise immer eine Bleischürze oder einen Bleimantel tragen. Kleinkinder können auch komplett in sog. Strahlenschutzwickel eingehüllt werden.

Bei Aufnahme im Brustbereich muss immer eine Halbschürze (Gonadenschutzschürze) oder ein Strahlenschutzrock angelegt werden, die die untere Körperhälfte vor der Strahlung schützt.

Bei Aufnahmen des Beckens oder der Hüfte kann man keine Halbschürze mehr anlegen, da diese den Knochen abdecken würde. Für diese Aufnahmen gibt es spezielle Bleiabdeckungen, je nach Geschlecht (■ Abb. 3.25).

Bei männlichen Patienten ist (bei gonadennahen Aufnahme) in den Leitlinien der Bundesärztekammer vorgeschrieben, dass die Hoden von einer Hodenkapsel geschützt werden (■ Abb. 3.25b), die die Hoden komplett umschließt.

Bei Frauen ist ein sog. Ovarienschutz zu benutzen, der entweder indirekt oder direkt angewendet werden kann (■ Abb. 3.25a). Der indirekte Schutz wird mit einer Schiene oder einem Magnethaltesystem unterhalb der Tiefenblende angebracht und mittels des Lichtvisiers so platziert, dass im unteren Beckenbereich die Ovarien abgedeckt werden. Der direkte Ovarienschutz wird auf dem Unterbauch der Patientin platziert. Für Aufnahmen im Stand kann dieser mittels eines Gürtels fixiert werden.

Was macht man aber nun, wenn die Lendenwirbelsäule oder der Bauch geröntgt werden soll? Leider ist bei Frauen dort kein Strahlenschutz möglich, da sonst Informationen auf dem Bild verloren gehen würden.

■ **Tab. 3.4** Übersicht der Strahlenschutzmittel

Untersuchte Region	Anzuwendendes Schutzmittel
Schädel	Strahlenschutzschütze/-mantel
Thorax	Strahlenschutzschütze/-mantel
Extremitäten	Gonadenschutzschürze
Schulter	Gonadenschutzschürze
Hals- oder Brustwirbelsäule	Gonadenschutzschürze
Lendenwirbelsäule	Hodenschutz
Abdomen, Becken, Hüfte	Hodenschutz/Ovarienschutz ¹
Harntrakt	Hodenschutz
Mamma	Gonadenschutzschürze
1) abhängig von der Fragestellung	

Eine Übersicht über die möglichen direkten Strahlenschutzmittel gibt ■ **Tab. 3.4**.

Während der Röntgenaufnahme sollten alle Personen, außer dem Patienten, den Raum verlassen. Außerdem sollten auch die Türen des Untersuchungsraumes geschlossen sein, um evtl. Streustrahlung abzuschirmen. Sollte eine Halteperson für die Röntgenaufnahme nötig sein, so ist diese immer mit einer Strahlenschutzschürze zu schützen. In der Kinderradiologie existieren für die Halteperson bei Aufnahmen im Stand zusätzlich spezielle Strahlenschutzwände aus Blei oder Bleiglas.

Einblendung

Einer der wirksamsten Methoden zur Minimierung der ist die Einblendung des Strahlenfeldes.

➤ **Je kleiner das bestrahlte Feld, desto weniger Dosis erreicht den Patienten und desto weniger Streustrahlung entstehen im Patienten selbst.**

Man schützt mit der Einblendung also nicht nur den Patienten, sondern erhält auch eine qualitativ bessere Röntgenaufnahme.

Zusatzfilter/Ausgleichsfilter

Am Anfang dieses Kapitels wurden die verschiedenen Filter erwähnt. Auch diese tragen zum Strahlenschutz des Patienten bei. Die Filter in der

Tiefenblende härten die Strahlen auf, so dass die Strahlung, die nicht zur Bildentstehung beiträgt, erst gar nicht den Patienten erreicht.

Es wird häufig diskutiert, ob Ausgleichsfilter für z. B. Fuß- oder Schulteraufnahmen dank der digitalen Bildverarbeitungsmöglichkeiten noch sinnvoll sind. Aber auch diese Filter sorgen dafür, dass Röntgenstrahlen, die nicht benötigt werden, entfernt werden. Diese Methode ist also aus Sicht des Strahlenschutzes besser, als später das Bild aufwendig zu berechnen. Bei Einsatz dieser Filter ist jedoch zu beachten, dass das angezeigte Flächendosisprodukt nicht der Patienteneinfalldosis entspricht, da sich die Filter zwischen Messkammer und Patient befinden. Der Einsatz der Filter sollte also auf den Bildern immer dokumentiert werden.

Strahlenqualität

Auch durch eine veränderte Strahlenqualität kann die Dosis für den Patienten minimiert werden. Wurden vor einigen Jahren z. B. die Finger noch mit einer Spannung von 44 kV geröntgt, schreibt die Ärztekammer mittlerweile eine Spannung von mindestens 50 kV vor. Somit können die Strahlen leichter durch die Knochen hindurch und die Stromstärke kann reduziert werden. Mit der Einführung der digitalen Bildaufnahmeverfahren kann der niedrigere Kontrast, der durch die höhere Spannung entsteht, durch eine geeignete Bildbearbeitung wieder erhöht werden.

Indirekter Strahlenschutz

Bevor man ein Röntgenbild anfertigt, also Strahlung auslöst, ist es wichtig, die Voraussetzungen dafür zu kontrollieren.

- **Es sollte immer geprüft werden, ob schon vorher eine Röntgenaufnahme der gleichen Region angefertigt wurde. So können eventuelle unnötige Doppeluntersuchen vermieden werden.**

Die Betrachtung der Voraufnahmen ist auch deshalb von großer Bedeutung, weil nur so die richtige Aufnahmetechnik gewählt werden kann. Bei Patienten mit Hüftprothesen ist es ggf. notwendig, ein anderes Kassettenformat für die Hüftaufnahmen zu wählen, um die komplette Prothese abbilden zu können.

Strahlenschutz beinhaltet auch, Fehlaufnahmen zu vermeiden. Die angewandte Strahlung sollte immer zu einem aussagefähigen, befundbaren Bild führen. Deshalb ist ein sorgfältiges und konzentriertes Arbeiten in der Radiologie wichtig. Dank der digitalen Bildgebung ist die Anzahl der Fehlbelichtung zwar zurückgegangen, diese sind aber auch hier z. B. durch falsche Einstelltechnik oder eine zu geringe Dosis möglich.

Laut Röntgenverordnung ist vor jeder Untersuchung die **rechtfertigende Indikation**, also der Grund für diese Untersuchung, genau zu prüfen. Besonders bei Kindern muss überlegt werden, ob ein Röntgenbild gemacht werden muss oder andere Untersuchungsmethoden wie z. B. ein Ultraschall zur Beantwortung der Fragestellung ausreichen würden.

Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien der Bundesärztekammer

Ch. Nowarra

Für alle röntgendiagnostischen Untersuchungen muss, entsprechend des ALARA-Prinzips, ein Kompromiss zwischen der zur Diagnostik notwendigen Bildqualität und der für den Patienten zumutbaren Strahlenbelastung gefunden werden.

Darüber hinaus sollten Röntgenbilder qualitativ miteinander vergleichbar sein. Um das zu gewährleisten hat die Bundesärztekammer (BÄK) Leitlinien herausgegeben.

Innerhalb der Leitlinie unterscheidet man zwischen ärztlichen Qualitätsanforderungen (befundungsrelevant) und aufnahmetechnischen Qualitätsanforderungen (strahlenschutzrelevant).

- **Für MTRA spielen die Leitlinien eine zentrale Rolle, da sie für die Beurteilung der Bildqualität verantwortlich sind (Vorbehaltstätigkeit).**

Ärztliche Qualitätsanforderungen

Die **ärztlichen Qualitätsanforderungen** orientieren sich an den Darstellungsmöglichkeiten, die mit einem Röntgengerät möglich sind. An erster Stelle steht dabei die **Minimierung der Strahlenexposition**.

Es sind Mindestanforderungen festgelegt, die zu der Beantwortung spezifischer Fragestellungen notwendig sind:

- **Charakteristische Bildmerkmale** beschreiben organotypische Strukturen, die in typischen Projektionen (meist zwei Ebenen) dargestellt sein müssen. Sie sind abhängig vom untersuchten Organ bzw. Körperabschnitt, z. B. muss bei Skelettaufnahmen immer ein angrenzendes Gelenk dargestellt sein.
- Es sollen **wichtige Bilddetails** dargestellt werden. Darunter versteht man diagnostisch relevante Strukturen, die erkenn- und abmessbar sein müssen, z. B. Bilddetails mit einer Größe von 0,3–2 mm bei Aufnahmen der Extremitäten.
- Außerdem geht es um **kritische Strukturen**, die für die Darstellung möglicher pathologischer Veränderungen von Bedeutung sind, also zu der Beantwortung der Fragestellung beitragen, z. B. Spongiosastruktur oder gelenknahe Knochengrenzen.

Aufnahmetechnische Qualitätsanforderungen

Die **aufnahmetechnischen Qualitätsanforderungen** beschreiben die technischen Mindestanforderungen eines Röntgengerätes inkl. der empfohlenen Generatoreinstellungen. Sollte von den festgelegten Anforderungen abgewichen werden, muss **dies begründet und dokumentiert** werden.

Wie in allen Bereichen muss die **Untersuchungstechnik** dem Stand der Technik entsprechen. In den aufnahmetechnischen Qualitätsan-

forderungen werden Faktoren festgelegt mit denen die geforderte Bildqualität erreicht werden kann. Sie beziehen sich auf die **Aufnahmeeinrichtung** und **Aufnahmeeinstellungen**, z. B.

- Beschreibung der Standardprojektionen oder Projektionen je nach Fragestellung,
- objektangepasste Formate des Bildempfängers (Film, Detektor),
- die sichtbare Einblendung,
- Beachtung des Gonadenschutzes,
- korrekte Seitenbezeichnung, sowie Dokumentation der Körperlage (stehend/liegend/schräg/Funktionsaufnahme),
- Aufnahmespannung und max. Expositionszeit (Angabe als Schaltzeit des Generators in ms),
- Brennfleckgröße,
- Fokus-Detektorabstand,
- Gesamtfilterung und Zusatzfilter bei Kindern,
- bei Belichtungsautomatik Angabe der Messkammer,
- Angaben zum Typ des Streustrahlenrasters,
- Detektorart, ggf. Empfindlichkeitsklasse.

Besondere Qualitätsanforderungen bei Neugeborenen, Säuglingen, Kindern und Jugendlichen

Diese Qualitätsanforderungen werden gesondert benannt, um den Anforderungen und der erhöhten Strahlenempfindlichkeit der genannten Patientengruppe Rechnung zu tragen.

Zentral sind die nachfolgenden Punkte:

- Untersuchungs- und Abbildungsbedingungen sind auf besondere Fragestellungen und altersspezifische Erkrankungen auszurichten.
- In Bezug auf die jeweilige Fragestellung sind allgemeine organspezifische Qualitätskriterien nicht zu berücksichtigen, sondern müssen individuell geprüft werden.
- Zu jeder Organgruppe werden **pädiatrische Besonderheiten** der Aufnahmebedingungen benannt, welche zu berücksichtigen sind, z. B. Darstellung der Wachstumsfugen bei Skelettaufnahmen und Verwendung eines Al-Cu-Filters.

Die Einhaltung der Leitlinien und damit der Untersuchungsqualität (Befundbericht und Bilddokumentation) wird durch die Kassenärztliche Vereinigung (KV) stichprobenartig kontrolliert.

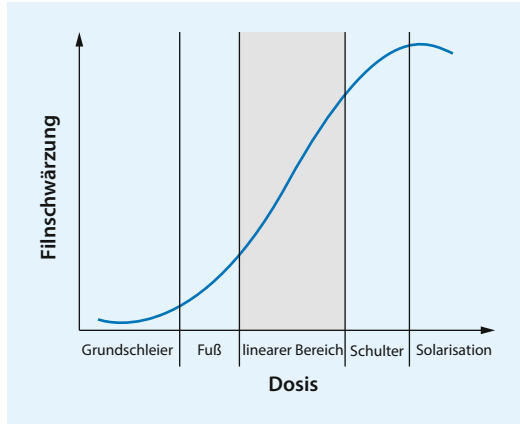


Abb. 3.26 Gradationskurve eines Röntgenfilms

In regelmäßigen Abständen werden von den radiologischen Abteilungen Bilder und Befunde angefordert, deren Qualität durch Gutachter überprüft wird. Dabei liegt der Schwerpunkt der Kontrolle auf dem Untersuchungsverlauf (von der Indikationsstellung bis zum Befund) unter Berücksichtigung einer möglichst geringen Strahlenexposition (ALARA-Prinzip). Die Sicherung der technischen Qualität der Geräte erfolgt über die gesetzlich vorgeschriebenen Konstanzprüfungen (► Kap. 24).

3.3 Digitale Bildaufnahmeverfahren

T. Doering

Um aus den Röntgenstrahlen, die hinter dem Patienten auf die Bildebene gelangen, ein Bild zu machen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Der „normale“ Röntgenfilm ist mittlerweile rar geworden, meistens werden Sie auf digitale Bildsysteme treffen.

3.3.1 Rückblick – Röntgenfilme

Vor ein paar Jahren wurde nur analog geröntgt. Die Röntgenstrahlen trafen hinter dem Patienten auf eine Kassette, in der der Röntgenfilm lag.

Die Lichtempfindlichkeit eines Röntgenfilmes ist auf einen bestimmten Bereich eingeschränkt. Nur in diesem Bereich reagiert der Film auf die

Strahlung. Man sprach von der Gradations- oder S-Kurve (▣ Abb. 3.26).

Die einzelnen Bereiche dieser S-Kurve bestehen aus Grundschleier, dem Fuß, einem linearen Bereich, der Schulter und dem Solarisationsbereich.

Wurde zu wenig Strahlung benutzt, blieb das Bild weiß, nahm man zu viel Strahlung, wurde der Film zu schwarz. Die Kunst einer guten Aufnahme war, den linearen Bereich voll auszunutzen. Man musste also die Austrittsdosis so wählen, dass die Dosis hinter dem aufzunehmenden Objekt möglichst genau in diesem Bereich lag.

Der Kontrast konnte nur durch die Wahl eines anderen Filmes geändert werden, der eine flachere oder steilere S-Kurve hatte.

Die dunklen Bereiche des entstandenen Röntgenfilms nannte man „geschwärzt“. Die Schwärzung oder optische Dichte, wie sie heute heißt, ist ein Maß, das sich aus der Intensität des durch den Film leuchtenden Lichts berechnet.

$$S = -\log_{10} \left(\frac{I_{\text{einfallend}}}{I_{\text{durchscheinend}}} \right)$$

3.3.2 Verstärkerfolien

Hinter dem Patienten, dem Raster und den Messkammern, erreicht nur etwa 4 % der Strahlung, die in der Röntgenröhre erzeugt wurde, den Film. Schon früh machte man sich Gedanken, wie die Dosis für den Patienten verringert werden kann. So wurden die Verstärkerfolien entwickelt.

Röntgenstrahlen besitzen die Fähigkeit, manche Materialien zum Leuchten zu bringen, man nennt dieses Phänomen Radiolumineszenz. Bei der Bestrahlung von Materie werden, wie im ► Abschn. 3.2.1 beschrieben, einzelne Elektronen durch die Röntgenstrahlung aus der Atomhülle „herausgeschlagen“ oder auf eine höhere Schale befördert. Diese Atome bezeichnet man dann als ionisiert oder angeregt. Diese Lücken werden durch freie Elektronen oder Elektronen aus einer der äußeren Schalen wieder aufgefüllt. Bei dem Sprung eines Elektron von einer äußeren Schale auf eine innere, gibt das Elektron Energie in Form von Strahlung ab (vergleiche auch ► Abschn. 3.2.1). Bei der Radiolumineszenz liegt diese Energie genau im Bereich des

sichtbaren Lichtes, das Material leuchtet und kann den Röntgenfilm belichten.

Die Verstärkungsfolien befinden sich direkt in der Röntgenkassette, in die der Film eingelegt wird. Anfangs nur auf einer Seite, später dann auch doppelseitig.

➤ **Je dicker die Leuchtschicht, desto höher ist auch die Leuchtkraft der Folie und desto weniger Strahlung wird benötigt.**

Somit konnte die Dosis für eine Röntgenaufnahme bis zu einem Faktor von 25 reduziert werden. Bei Nutzung einer doppelseitigen Verstärkungsfolie erfolgt die Belichtung des Films zu 95 % aus den Lichtstrahlen der Folie(n). Leider kommt es durch die Dicke der Verstärkungsfolien auch zu einer zusätzlichen Unschärfe der Aufnahme.

➤ **Je feiner die Auflösung sein soll, desto dünner, aber auch unempfindlicher muss die Folie gewählt werden.**

Die unterschiedlichen Folien werden in verschiedene Empfindlichkeitsklassen (EK), aktuell **Speed Classes (SC)** genannt, unterteilt. Im regulären Einsatz finden sich am häufigsten noch die Empfindlichkeitsklassen 800, 400 und 200. Für bestimmte Untersuchungen (z. B. LWS seitlich) existieren auch Folien mit unterschiedlichen Verstärkungen innerhalb der Röntgenkassette. Man bezeichnet diese als Ausgleichsfolien. Die Seite mit der größeren Verstärkung ist auf diesen Kassetten mit (+) gekennzeichnet, die Seite mit der geringeren mit (–). Beim Einlegen dieser Kassetten in die Rasterlade ist also besonders auf die korrekte Ausrichtung zu achten.

3.3.3 Speicherfolien

Der erste Weg zu Digitalisierung in der konventionellen Diagnostik waren die Speicherfolien. Diese werden anstelle des Röntgenfilms eingesetzt. Diese Speicherfolien ähneln den Leuchtfolien der alten Röntgenkassette. Diese Folien leuchten jedoch nicht sofort, sondern „merken sich“, wo ein Röntgenstrahl aufgetroffen ist. Doch wie funktioniert das?

Die Speicherfolien bestehen aus Bariumfluorobromid (BaFBr) oder Rhodidumbromid (RbBr). Diese Materialien sind genau wie das Material der Verstärkerfolien radiolumineszent.

Man dotiert diese Materialien mit Atomen, die weniger Elektronen haben. Man schafft sog. „Traps“, auf Deutsch „Fallen“, die die angeregten Elektronen daran hindern, auf die niedrigere Schale zurückzuspringen und das Licht zu emittieren (► Kap. 2).

Definition

Dotieren bedeutet, dass in einem Atomgitter andere Atome eingelagert werden, die entweder mehr Elektronen (n-dotiert) oder weniger Elektronen (p-dotiert) haben als ihre Umgebung.

Trifft ein Röntgenstrahl das Material der Speicherfolie, so sammeln sich die angeregten Elektronen in diesen Traps. Es entsteht ein **latentes Bild**.

Betrachtet man das Energieniveau des Punktes, an dem die Röntgenstrahlen auftreffen, so werden die Elektronen von dem sog. Leitungsband auf das Valenzband gehoben (► Abb. 3.27).

► **Je mehr Strahlen auftreffen, desto mehr Elektronen werden angehoben.**

Um dieses latente Bild sichtbar zu machen, muss wieder Energie aufgewendet werden. Diese Energie wird in Form von **Laserlicht** auf die Folie übertragen, das Elektron kann sich aus der Falle „befreien“ und springt unter Abgabe von Licht wieder in das Leitungsband.

Für die **Abtastung** verwendet man entweder ein System mit Flying-Spot-Scanner, also mit einem beweglichen Laserpunkt, oder einem Zeilenscanner.

Bei beiden Methoden wird die Speicherfolie unter einer Ausleseeinheit bewegt und dabei von dem Laserstrahl abgetastet. Die Intensität der entstehenden Lichtwellen wird mit einem **Photodetektor** gemessen, in elektrische Signale umgewandelt und gespeichert. So entsteht Zeile für Zeile ein digitales Bild.

Nach der Laserabtastung wird mit normalem Licht die Folie wieder komplett gelöscht, sodass

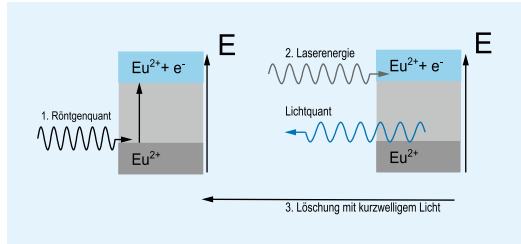


Abb. 3.27 Prinzip der Speicherfolien

wirklich alle Elektronen wieder in das Valenzband wandern.

Die Speicherfolien können bis zu 10.000-mal wiederverwendet werden und haben die gleichen Formate, wie die klassischen Film-Folien-Systeme. Speicher-Folien-Systeme können somit leicht die analoge Technik ersetzen.

Bei der Verwendung von Speicherfolien ist zu beachten, dass das latente Bild sich mit der Zeit auch von selbst abbauen kann. Daher sollten die Folien spätestens 60 min. nach der Aufnahme ausgelesen werden, um noch die volle Bildinformation wiederzugeben.

Wird eine Speicherfolie zu lange gelagert, kann eine Anregung durch die normale Umgebungsstrahlung erfolgen, d. h. es wäre auch ohne die Anregung von Röntgenstrahlung schon ein latentes Bild vorhanden. Aus diesem Grund muss eine solche Folie vor der Röntgenaufnahme erst einmal in der Ausleseeinheit gelöscht werden.

3.3.4 Festkörperdetektoren

Neben dem Flachbilddetektor existierten und existieren auch noch andere direktradiographische Systeme. Hierzu zählen die CCD-Systeme, bei denen ein oder mehrere Bildverstärker (► Kap. 4) das Bild von einer Leuchtschicht aufnehmen, oder die Selen-Detektor-Technik, bei der die Röntgenstrahlen eine geladene Platte entladen, die dann wiederum ausgelesen und digitalisiert wird.

Diese Techniken werden heutzutage aber aus verschiedenen Gründen nicht mehr eingesetzt. Der heutige Industrie-Standard ist der Flachkörperdetektor, daher wird nur dieser hier besonders behandelt.

Mittlerweile lösen die Festkörperdetektoren die Speicherfolien immer mehr ab. Der Vorteil dieser Systeme ist, dass das Bild ohne weitere Zwischenschritte sofort zur Verfügung steht. Sie sind meist

fest im Buckytisch bzw. Rasterwandstativ eingebaut. Es gibt jedoch auch Systeme, bei denen der Detektor ähnlich der Röntgenkassette in die Rasterlade eingeschoben wird. Dieser ist dann mit einem Kabel oder durch eine Funkverbindung mit dem Bildverarbeitungssystem verbunden.

Bei Festkörperdetektoren wird eine spezielle Leuchtschicht (Cäsiumiodid, CsI) auf Photodioden aus amorphem Silizium (aSi) aufgebracht. Diese können das durch die Röntgenstrahlung entstehende Licht Punkt für Punkt direkt messen und digitalisieren.

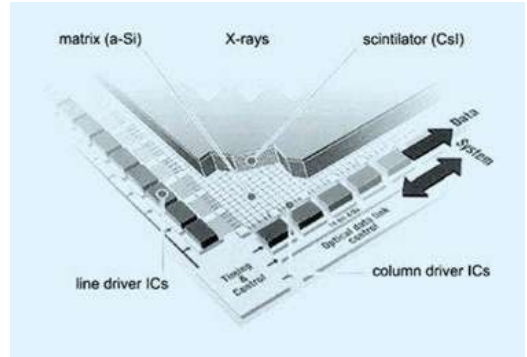
Bei den bisher besprochenen Leuchtfolien (Verstärker- und Speicherfolien) entsteht das Licht in jeder Ebene der Folie. Das bedeutet, der entstehende Lichtpunkt kann nah oder fern des Detektors entstehen. Wie im Kapitel Abbildungsgesetze schon erwähnt, spielt die Entfernung des Lichtstrahls zum Film eine große Rolle für die Schärfe des Bildes. Bei den Festkörperdetektoren nutzt man die Besonderheit des Cäsiumiodids, bei einer bestimmten Herstellungsmethode als feine Nadeln mit einem Durchmesser von 10–20 µm zu wachsen. Diese funktionieren dann wie kleine Lichtkanäle, d. h. egal wo der Röntgenstrahl das Material zum Leuchten anregt, leuchtet am Ende nur die Breite der Nadel. So lassen sich auch dicke Leuchtschichten herstellen, ohne dass es zu Lasten der Auflösung geht (■ Abb. 3.28).

3.3.5 Kennzahlen einer Röntgenanlage/ eines Detektorsystems

Auf dem Markt existieren verschiedene Systeme (analog/digital) zur Erstellung von Röntgenaufnahmen. Aber wie vergleicht man, wie gut die Kombination aus Röntgenstrahler, Raster und Bildaufnahmesystem arbeitet? Im Idealfall möchte man eine sehr genaue Detaildarstellung bei möglichst wenig Strahlung erhalten, aber genau hier liegen die Grenzen der Bildqualität.

Ortsauflösung/MTF

Ein Messwert für die Fähigkeit der Detaildarstellung eines Aufnahmesystems ist die **Ortsauflösung**. Sie bezeichnet den kleinsten Abstand, der zwischen



■ Abb. 3.28 Aufbau eines Flachkörperdetektors

zwei Objekten gemessen werden kann. Die Maßeinheit für die Ortsauflösung ist Linienpaare pro mm (lp/mm) und wird als Nyquist-Grenzfrequenz bezeichnet. Sie ist bei analogen Bildsystemen abhängig vom Film, der verwendeten Speicherfolie (Dicke und Art) und dem Folienandruck. Bei digitalen Systemen ist die Ortsauflösung zudem noch abhängig von der Pixelanzahl und Bildgröße des verwendeten Auslesesystems. Je kleiner bei diesen Systemen die Pixel, also je höher die Pixelanzahl pro Bildgröße, desto höher die Ortsauflösung (■ Abb. 3.29).

Die typischen Ortsauflösungen für analogen Aufnahmesysteme liegen zwischen 2–3,4 lp/mm, für die analoge Mammographie bei mind. 10 lp/mm. Die Ortsauflösung von digitalen Systemen liegt im Bereich zwischen 2 und 5 lp/mm.

Ein Maß für diese Kontrastauflösung eines Systems ist die **Modulations-Transfer-Funktion**.

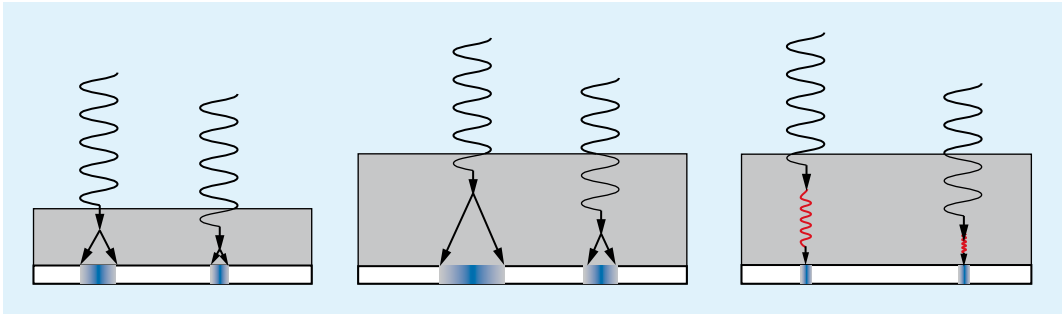
Definition

Modulations-Transfer-Funktion: Sie bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, die Röntgenstrahlen so genau wie möglich wiederzugeben.

Würde also jeder Röntgenstrahl einzeln genau am Punkt seines Auftreffens aufgefangen werden können, hätte der MTF einen Wert von 1, also 100 %.

$$MTF = \frac{\text{Kontrast (f) am Ausgang}}{\text{Kontrast (f) am Eingang}}$$

(Diese vereinfachte Funktion ist abhängig von Signalfrequenz f)



■ Abb. 3.29 Beispiele für Unschärfen bei verschiedenen Foliendicken/Detektorsystemen

Jede Komponente der Röntgenanlage (Art des Rasters und der Folie, Auslesesystem) und der Patient selbst (Dicke, Dichte der Aufnahme-region) beeinflusst einzeln den MTF-Wert und somit die Ortsauflösung des Gesamtsystems.

DQE – Dosis-Quanten-Effektivität

Bei digitalen Systemen existiert immer ein systembedingtes Rauschen, welches sich aus dem Rauschen der Messelektronik und dem Rauschen des Detektormaterials zusammensetzt. Im unteren Dosisbereich wird dieses Grundrauschen sichtbar und kann die eigentlichen Bildinformationen wesentlich verschlechtern (► Abschn. 3.2.6).

Ein Wert für die Dosisempfindlichkeit einer Röntgenanlage ist die Dosis-Quanten-Effektivität.

► Je größer der DQE-Wert, desto weniger Strahlung wird benötigt, um auch feine Strukturen darzustellen.

Er ist sozusagen ein Maß für die „sinnvoll“ genutzten Röntgenstrahlen, aus denen das Bild entsteht.

$$DQE = \frac{\left(\frac{\text{Signal}}{\text{Rausch}}\right)^2 \text{ am Ausgang}}{\left(\frac{\text{Signal}}{\text{Rausch}}\right)^2 \text{ am Eingang}}$$

Genau wie die MTF muss bei der Betrachtung der DQE die komplette Anlage betrachtet werden (DQE der Leuchtschicht, DQE der Sensorschicht, ...).

3.4 Digitale Bildverarbeitung

T. Doering

Einer der größten Vorteile der digitalen Radiographie ist die **lineare Empfindlichkeit** von Speicherfolie und Festkörpertdetektor. Es gibt also so gut wie keine Fehlbelichtungen mehr, da auch mit zu wenig oder zu viel Strahlung mit den digitalen Systemen eine gute Bilddarstellung erreicht werden kann. Eine kleine Einschränkung besteht jedoch im unteren Dosisbereich. Stehen zu wenige Bildinformationen (in Form von Lichtimpulsen) zur Verfügung, entsteht ein verrauschtes Bild.

Die digitalen Bilder bieten außerdem die Möglichkeit, diese nach der Aufnahme zu bearbeiten. Im folgenden Kapitel lernen Sie einige dieser Möglichkeiten kennen.

3.4.1 Aufbau eines digitalen Bildes

Erst einmal müssen Sie verstehen, wie digitale Bilder aufgebaut sind. In den vorherigen Kapiteln haben Sie schon die Ausdrücke Pixel, Zeilen und Matrix gehört. Aber was ist das?

Matrix

Ein digitales Bild besteht aus vielen einzelnen **Bildpunkten (Pixeln)**. Diese sind in Zeilen und Spalten angeordnet, diese Anordnung nennt man dann eine **Pixelmatrix** oder kurz **Matrix** (■ Abb. 3.30a–d). Ein Röntgenbild besteht, je nach System, zwischen 1024×1024 und 4096×4096 Pixel. Man spricht von einer 1024-er Matrix bzw. einer 4096-er Matrix.



■ Abb. 3.30a–d Beispiele unterschiedlicher Bildmatrizen

➤ Je größer diese Matrix bei gleicher Bildgröße ist, desto genauer ist die Bilddarstellung.

Farbtiefe

Für jeden Bildpunkt ist eine bestimmte Farbe gespeichert. Diese Farbinformation hängt ab von der sog. Farbtiefe des Bildes. Wird für ein Bild für jeden Bildpunkt nur die Information 1 (weiß) oder 0 (schwarz) gespeichert, spricht man von einer Farbtiefe von einem **Bit** (Abb. 3.31). Da das Röntgenbild jedoch nicht nur aus schwarz oder weiß besteht, sondern aus verschiedenen Grautönen, wird jeder Bildpunkt mit einem bestimmten Wert beschrieben, der den Grauwert zwischen schwarz und weiß beschreibt.

Bei einer Farbtiefe von 1 Bit können nur zwei Farbwerte, schwarz und weiß, dargestellt werden ($2^1 = 2$ Farben), bei einer Farbtiefe von 2 Bit können 4 Farben gespeichert werden ($2^2 = 4$) usw. Das Bild, das am Detektor entsteht, hat eine Farbtiefe von 14 Bit, enthält also 16.384 Grauwerte.

3.4.2 Fehlerkorrektur

Sobald Sie ein digitales Röntgenbild anfertigen, wird es im ersten Schritt schon von dem Aufnahmesystem selbst bearbeitet. Das sog. **Rohdatenbild** („raw-image“) wird von dem Aufnahmesystem direkt analysiert. Hierbei werden zuerst Bildfehler korrigiert, d. h. Pixel, die aufgrund von Detektorfehlern oder Messfehlern nicht zur Umgebung „passen“, werden durch den Mittelwert der umliegenden Pixel ersetzt. Unpassende Pixel können solche sein, die dauerhaft schwarz oder weiß interpretiert werden, aber auch Pixel, die nicht so effizient auf die Strahlung reagieren, wie die sie umgebenden. Diese Fehler können im Rahmen der Kalibrierung des Systems festgestellt werden. Das Ergebnis dieser Berechnung wird als „pre-processed-image“, also als **vorberechnetes Bild** bezeichnet.

Als nächster Bearbeitungsschritt erfolgt eine sog. **Histogrammanalyse**. Hierbei wird die Helligkeitsverteilung des kompletten Bildes analysiert. Die eingesetzte Software ist genau auf den eingesetzten Detektortyp angepasst und kann auch nicht einfach ausgetauscht werden. Die Histogrammana-



Abb. 3.31 Beispiele der verschiedenen Farbtiefen

lyse ermöglicht es, Direktstrahlung und Streustrahlung zu erkennen und mit diesen Informationen den Kontrast des Bildes entsprechend zu verbessern.

3.4.3 Auswahl des Bildausschnittes/Blenden

Bei der Bildanalyse wird immer die komplette Detektorfläche bzw. die komplette Fläche der Speicherfolie analysiert. Wie bei den Röntgenfilmen damals entsteht immer ein unbelichteter Rand, der jedoch bei der Betrachtung des Bildes den Seheindruck stören würde. Durch einen hohen Weißanteil im Bild wird die Kontrastwahrnehmung des Auges behindert. Aus diesem Grund werden diese Bereiche entweder automatisch oder manuell durch schwarze Pixelwerte ersetzt. Diese Funktion nennt man **Blende** oder **Shutter**. Während bei den Speicherfolien die Bildgröße gleich bleibt, wird bei den Festkörperdetektoren die Bildgröße auf den eingblendeten Bereich beschnitten.

Wird das Bild manuell geschuttert, so ist darauf zu achten, dass die Grenzen der Strahlfeldeinblendung weiter sichtbar und somit dokumentiert bleiben. Die durch das elektronische Einblenden ausgeblendeten Bildbereiche sind nur noch am bildgebenden System korrigierbar.

3.4.4 Die Look-up-Tabelle (LUT)

Das primäre Bild, das der Detektor hinter dem Patienten aufnimmt, hat i. d. R. eine Farbtiefe von 2^{12} . D. h. für jeden Bildpunkt ist einer von über 4096 Grauwerten gespeichert. Mit den Daten der Histogrammanalyse errechnet das Bildsystem die optimale Darstellung des Bildes. Hierbei bestimmt die LUT, mit welchem Grauton ein bestimmtes Pi-



Abb. 3.32 Kontrastveränderung

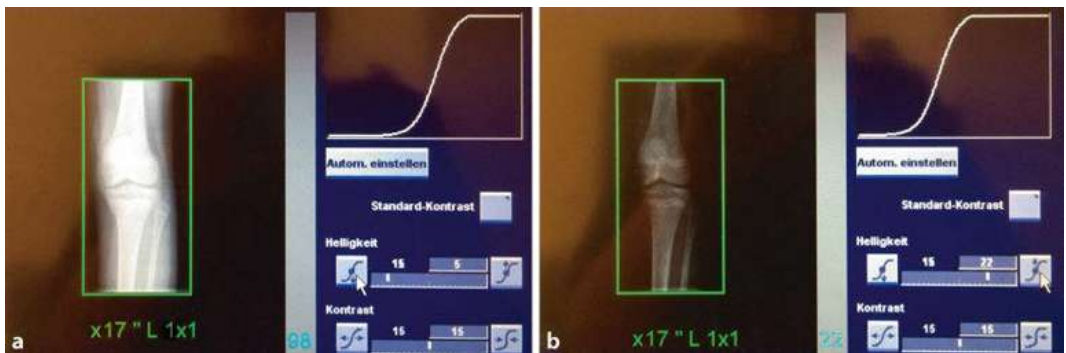


Abb. 3.33a,b Helligkeitsveränderung

xelsignal auf dem Monitor wiedergegeben wird. Je nach untersuchtem Organ, können verschiedene LUTs angewendet werden.

Dabei wird z. B. auch unterschieden, ob für das Aufnahmeprogramm eine flachere oder steilere Gradationskurve vorteilhaft ist.

➤ **Je steiler die Kurve, desto kontrastreicher ist das Bild in einem bestimmten Bildbereich.**

Meistens wird eine LUT gewählt, die der S-förmigen Gradationskurve des Röntgenfilms entspricht. Die Anpassung der LUT an die einzelnen Organe erfolgt meistens durch die Einweiser der Herstellerfirma. Es ist aber von Vorteil, wenn auch die MTRA diese selbst verändern kann.

Müsste jedes Bild nach der Aufnahme noch verarbeitet werden, würde dies zusätzlich Arbeitsaufwand bedeuten. Da das den Ablauf am Arbeitsplatz hemmt, sollten die Aufnahmeprogramme schon optimal für jede Untersuchung voreingestellt sein,

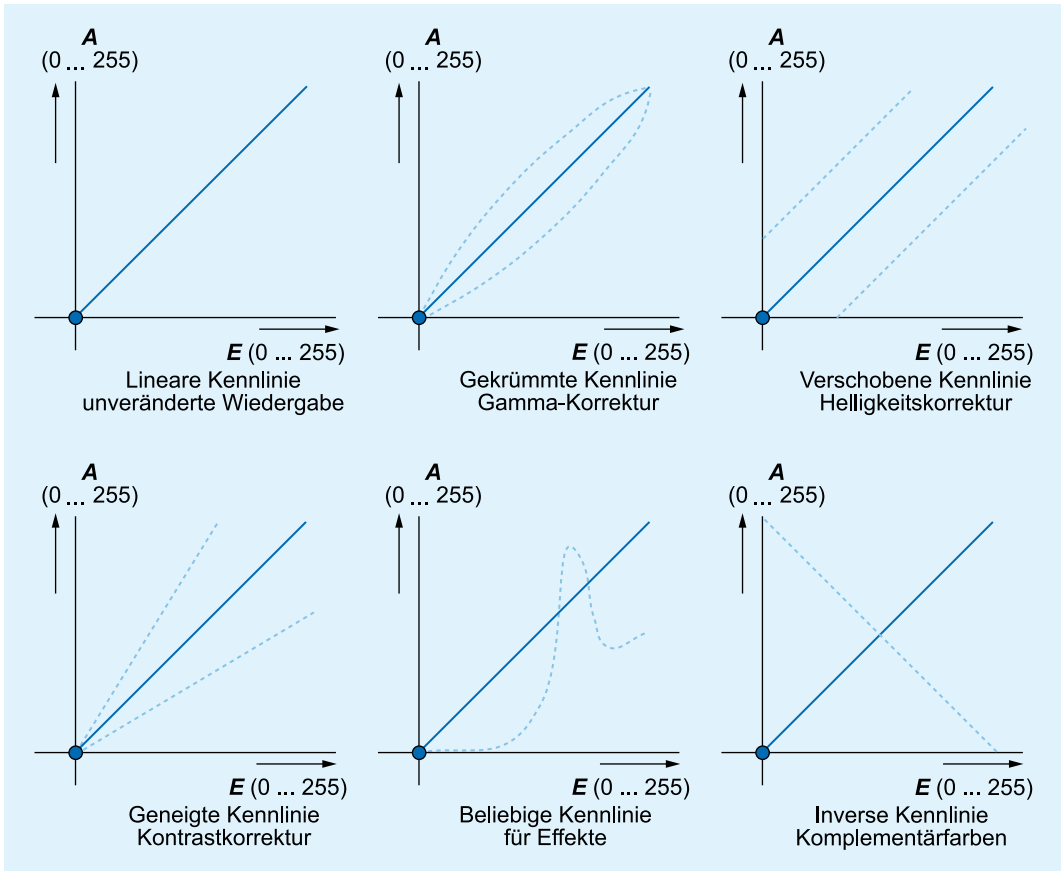
sodass die manuellen Nachverarbeitungen auf ein Minimum gesenkt werden.

Die Bildanalyse

Hier gibt es je nach Hersteller unterschiedliche Analysemethoden. Manche Hersteller betrachten den Bereich der Mitte des Bildes, manche betrachten verschiedene Zonen des Bildes, wieder andere analysieren die komplette Bildfläche um den relevanten Bildbereich automatisch zu erkennen. Bei allen Herstellern kann es aber – abhängig von der Lagerung des Patienten, der Einblendung und anderen Faktoren – zu Fehlinterpretationen des relevanten Bildbereiches kommen. Das führt dazu, dass das Bild nicht wie gewünscht dargestellt wird. Hier muss die MTRA dem Programm manuell den zu analysierenden Bereich mitteilen.

Veränderung an der LUT

Die LUT kann in verschiedener Weise verändert werden (Abb. 3.34).



■ Abb. 3.34 Beispiele der LUT-Veränderung an einer linearen Kurve

■ Kontrast

Verändert man die Steilheit der Kurve, so erreicht man eine Veränderung des Bildkontrastes (■ Abb. 3.32). Hierbei ist darauf zu achten, dass bestimmte Bildbereiche dabei nicht mehr voneinander unterschieden werden können.

■ Helligkeit

Verschiebt man die Kurve auf der x-Achse, so ändert man die Helligkeit des Bildes (■ Abb. 3.33a, b).

■ Dynamik-Umfang (dynamic range)

Eine Besonderheit der LUT-Anpassung stellt die Anpassung der Dynamik dar. Beim analogen Röntgen wurden für manche Körperregionen die sog. Gradationsfolien verwendet, um die Dickenunterschiede des aufgenommenen Objekts auszugleichen. Durch die Dynamik-Anpassung können speziell zu helle oder

zu dunkle Bereiche so verändert werden, dass die Details wieder gut erkennbar sind. Um dies zu erreichen, wird die LUT für zu dunkle Bereiche im vorderen Bereich angehoben, um diese aufzuhellen. Umgekehrt kann man den hinteren Bereich absenken, um die Details in zu hellen Bereichen sichtbar zu machen.

❗ **Bitte beachten Sie, dass durch bestimmte Bildverarbeitungen auch Informationen verlorengehen können! So können z. B. durch eine zu hohe Kontrasteinstellung die Epikondylen des Kniegelenks „verlorengehen“. Diese Informationen sind dann auch nicht mehr im PACS wiederherstellbar, da dort das verarbeitete Bild mit geringerer Bit-Tiefe gespeichert wird. Um die Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung ausnutzen zu können, ohne dadurch eine Fehlaufnahme zu erzeugen, müssen**

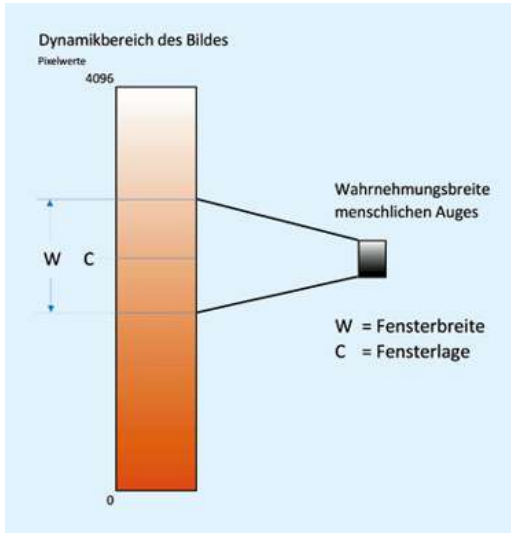


Abb. 3.35 Prinzip der Bildfensterung

MTRA die „Kriterien der guten Aufnahme“ für jeden Körperbereich kennen.

3.4.5 Fensterung

Die digitalen Systeme liefern primär wie schon erwähnt ein Bild mit 2^{12} (4096) Graustufen. Da das menschliche Auge aber nur 60–80 Graustufen unterscheiden kann, müssen diese Graustufen „komprimiert“ werden (Abb. 3.35). Diese Technik ist als erstes in der Computertomographie eingeführt worden, spielt jetzt aber auch in der digitalen Projektionsradiographie eine wichtige Rolle.

Man betrachtet eigentlich immer nur einen Teil der gesamten Bildinformationen. Wenn man die Fensterlage verschiebt, ändert sich die Helligkeit. Vergrößert man die Fensterbreite, so müssen mehr Pixelwerte auf die wachzunehmenden Helligkeiten „verteilt“ werden, das Bild verliert also an Kontrast. Anders herum wirkt das Bild bei kleinerer Fensterbreite kontrastreicher.

3.4.6 Rauschreduktion

Eine spezielle Berechnung ist die Verringerung des Bildrauschens. Dieses Rauschen tritt bei jeder digitalen Röntgenaufnahme auf und ist abhängig von

der Detektordosis. Ist diese zu gering, kann man mit der Funktion der Rauschreduktion das entstandene Rauschen bis zu einem gewissen Punkt verbessern (Abb. 3.36a, b). Durch eine massive Rauschreduktion können Bilder verwaschen aussehen und es gehen Bildinformationen verloren.

3.4.7 Kantenanhebung

Um das Bild „schärfer“ wirken zu lassen, kann man die sog. Kantenanhebung einsetzen. Bei dieser Bildberechnung werden die Linienstrukturen und die Helligkeiten im Bild analysiert und die Abweichungen betont (Abb. 3.37a–d).

Die Kantenanhebung kommt häufig bei Knochen- oder Thoraxaufnahmen zum Einsatz, um dort feine Strukturen besser sichtbar zu machen.

3.4.8 Messungen im Bild

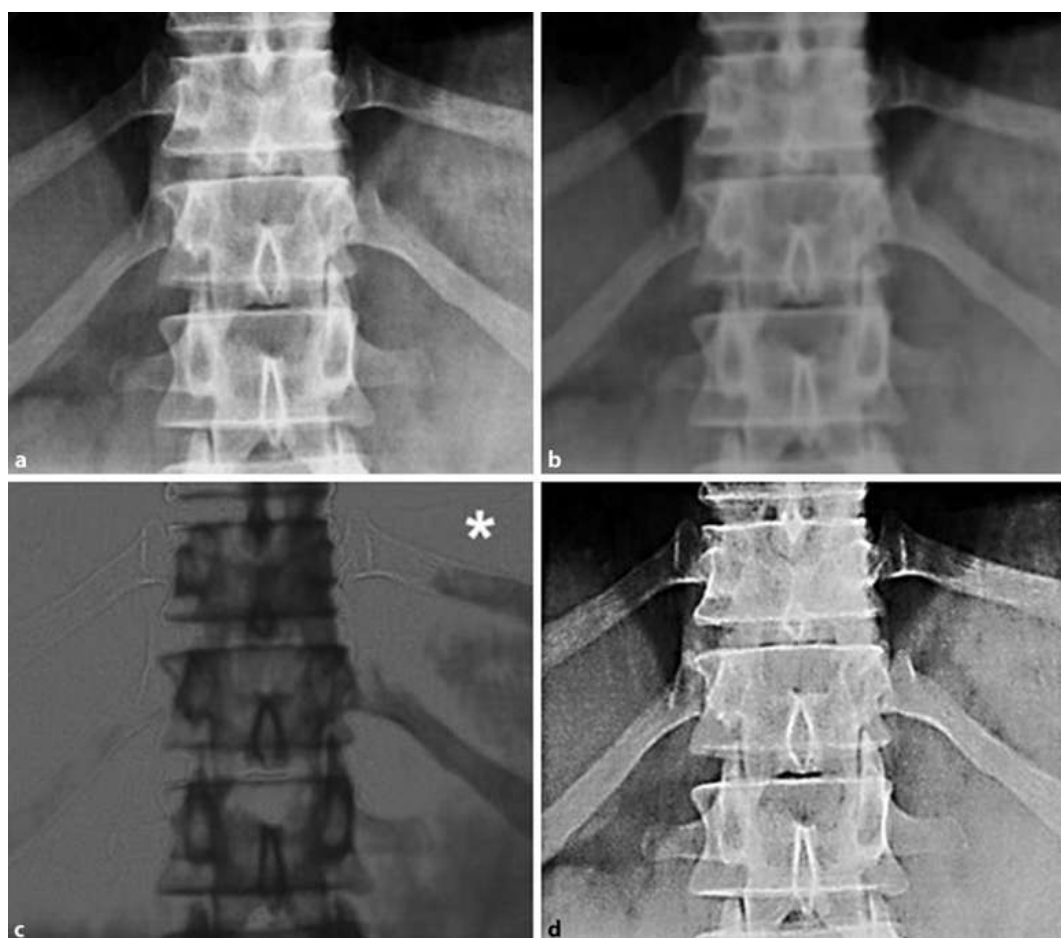
Zu der Grundausstattung eines Röntgenbild-Betrachtungsprogramms gehören verschiedene Funktionen, um Messungen im Bild vorzunehmen. So können u. a. verschiedene Längen und Winkel im Bild gemessen werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Messungen in einem Röntgenbild durch die Strahlengeometrie (Abschn. 3.2.5) nie maßstabsgetreu sind.

Um reale Messungen im Bild anfertigen zu können, muss auf dem Röntgenbild ein Referenzkörper mit abgebildet werden. Diese Referenz ist häufig eine Kugel von 1 cm Durchmesser, die sich auf der gleichen Höhe wie das zu messende Objekt befinden muss (gleicher Objekt-Detektor-Abstand). Durch die definierte Größe des Referenzkörpers ist es dann im Betrachtungsprogramm möglich, die Längenmessung zu kalibrieren.

Abb. 3.37a–d Beispiel Kantenanhebung. a Originalbild, b Original mit Unschärfefilter, c Unterschiedsbild (a-b), d mit dem Bild c berechnetes Bild mit Kantenanhebung



■ Abb. 3.36a,b Beispiel Rauschreduktion





■ Abb. 3.38 Beispiel einer OPG-Aufnahme



■ Abb. 3.39 Beispiel einer berechneten Panorama-Aufnahme des Kiefers

3.5 Spezialaufnahmegeräte

T. Doering

3.5.1 Panoramaschichtgeräte

Ein spezielles Aufnahmegerät für Kieferaufnahmen ist das Gerät für die Orthopantomographie. Meistens wird dieses als OPG-, OPT- oder PSA-Gerät bezeichnet. Bei dieser Aufnahme macht man sich eine Technik zunutze, die bis vor ein paar Jahren auch bei sonstigen Körperregionen zum Einsatz kam: der Tomographie.

Bei der Tomographie werden während der Aufnahme die Röntgenröhre und der Bildempfänger gegenläufig zueinander bewegt. Das aufzunehmende Objekt befindet sich dabei im Mittelpunkt dieser Bewegung. Man nutzte damals verschiedene Bewegungsformen der Röhre: linear, kreisförmig, hyperzykloidal. Durch diese Bewegung wurde nur die Ebene scharf dargestellt, die sich im Mittelpunkt der Bewegung befand, die anderen wurden verwischt. Somit konnte man vor der Erfindung der Computertomographie einzelne Körperbereiche schichtweise abbilden. Einsatzbereiche der Tomographie waren z. B. Aufnahmen der Schädelbasis, der Wirbelkörper und des Sternums (Brustbeins). Später wurden die Tomographien noch für die Darstellung der Nieren und der Galle eingesetzt. Hier wählte man häufig kleine Verwischungswinkel, was die Dicke des darzustellenden Bereiches vergrößerte. Diese Technik wurde auch als Zonographie bezeichnet.

Bei der OPG-Aufnahme (■ Abb. 3.38) handelt es sich auch um eine solche Tomographie. Hierfür wird der Patient so in das Gerät gestellt, dass sich möglichst der Kiefer im Mittelpunkt der Drehbe-

wegung befindet. Idealerweise sollten die Schultern nach unten genommen werden und die Halswirbelsäule senkrecht stehen.

Bei der Aufnahme bewegen sich dann die Röhre und die Kassette in einem Halbkreis um den Patienten herum. Zusätzlich bewegt sich die Kassette während der Aufnahme in einer speziellen Lade. Der Röntgenstrahler ist so aufgebaut, dass nur ein schmaler senkrechter Strahl der Röhre verlässt. Dieser trifft dann auf den Patienten und anschließend auf eine ebenfalls strichförmige Abschirmung vor der Kassettenlade. Durch die Bewegung der Kassette wird durch die strichweise Belichtung jeder Teil der Kassette auch nur einmal belichtet. Es entsteht eine Projektion einer halbkreisförmigen Fläche auf den Film. Mittlerweile sind auch hier digitale Bildempfänger, sog. Zeilenscanner im Einsatz, die für jeden Winkel eine Bildzeile aufnehmen, die anschließend im Bildrechner zu einem Bild zusammengesetzt werden.

Die Schichtdicke der darzustellenden Schicht kann durch die Geschwindigkeit zwischen Röhre und Kassette variiert werden. Übliche Schichtdicken sind hier 3 und 6 cm. Während bei älteren Geräten eine feste Röhrenspannung und ein fester Röhrenstrom eingestellt wurden, existieren mittlerweile auch Geräte mit automatischer Belichtungsregelung während der Aufnahme.

3.5.2 DVT, CBCT

Gerade in Bereichen wie der Kiefer- und Gesichtschirurgie werden die OPG-Geräte mittlerweile durch DVT-Geräte ersetzt (■ Abb. 3.39). Der Begriff DVT ist die Abkürzung für Digitale Volumentomographie.

Obwohl diese Geräte den OPG-Geräten sehr ähneln, handelt es sich hierbei nicht mehr um Röntengeräte im eigentlichen Sinne. Die verwendete Technik ist eher mit einem kleinen CT vergleichbar.

Bei der DVT umkreist ebenfalls eine Röntgenröhre und ein digitaler Bildempfänger den Kopf des Patienten. Mit dem kegelförmig austretenden Röntgenstrahl werden eine Vielzahl von Röntgenbildern gemacht. Aus diesen Einzelbildern wird dann ein 3-dimensionaler Datensatz berechnet aus dem dann wieder 2-dimensionale Bilder in beliebigen Schnittführungen erstellt werden können, z. B. auch ähnliche Aufnahmen wie beim OPG. Wegen des kegelförmigen Strahlenfeldes wird das DVT auch Cone-Beam-CT genannt.

Der größte Vorteil der DVT ist jedoch der Einsatz in der Implantologie (Abb. 3.40) und der Wiederherstellungschirurgie, bei denen mit den so gewonnenen Daten OPs geplant und Prothesen passgenau hergestellt werden können. Zur Kariesdiagnostik ist die DVT, besonders bei schon vorhandenen Füllungen aufgrund der Metallartefakte, nicht geeignet.

Die Strahlenbelastung ist im Vergleich zu einer CT-Untersuchung aufgrund der möglichen Einblendung auf das Wunschvolumen geringer, im Vergleich zu einer normalen OPG-Aufnahme jedoch 3–40 Mal höher. Leider schwanken die Dosiswerte der Anlagen abhängig vom Hersteller sehr stark ($13 \mu\text{Sv}$ – $1073 \mu\text{Sv}$).

3.5.3 DXA (Knochendichtemessung, Osteodensitometrie)

Bei älteren Menschen, bei Frauen jenseits der Menopause und auch durch die Langzeiteinnahme von bestimmten Medikamenten (Cortison, Heparin, ...) oder bei bestimmten Krankheiten kann es zu Veränderungen der Knochendichte kommen, der **Osteoporose**. Bleibt diese unbehandelt, kann es zu Brüchen des Oberschenkels oder zu einer sog. Sinterungsfraktur der Wirbelsäule kommen.

Die Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA, oder auch DEXA) ist ein spezielles Verfahren zur Bestimmung der Knochendichte. Hierbei wird der Körper mit zwei unterschiedlichen Röntgenenergien, einer Weichteilstrahlung (35–40 kV) und einer

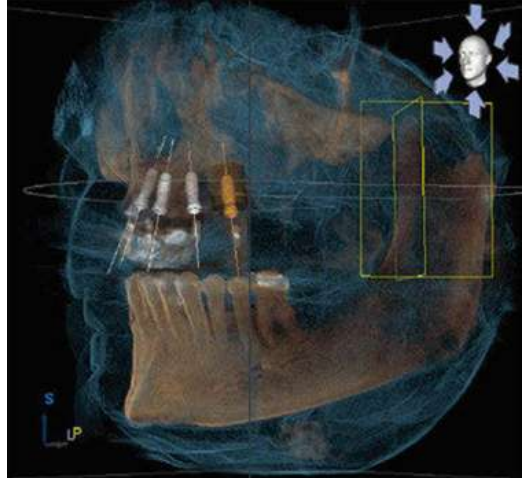


Abb. 3.40 Implantationsplanung mittels DVT

mittelharten Strahlung (70 kV), gescannt. Durch die unterschiedlichen Absorptionen der beiden Energien wird der Anteil von Muskel-, Fett- und Knochengewebe berechnet.

Das DXA-Aufnahmesystem besteht aus einer speziellen Röntgenröhre, einem Patiententisch, einem Sensorarm und dem Auswertesystem (Abb. 3.41).

Die unterschiedlichen Energien der Röntgenstrahlen können auf zwei verschiedene Arten erzeugt werden:

1. Entweder durch eine gepulste Strahlung, bei der die Energien ständig wechseln oder
2. durch einen speziellen Filter vor der Röhre.

Diese Filter bestehen aus Ceribium und/oder Samarium, beides Elemente aus der Gruppe der seltenen Erden. Diese Elemente haben die Eigenschaft Photonen im Bereich von unter 40 kV effektiv zu filtern. Photonen mit einer Energie von 40 kV werden fast ungefiltert durchgelassen, oberhalb von 40 kV erfolgt die Filterung fast linear. So erreicht man eine Strahlung mit zwei unterschiedlichen Energiespitzen.

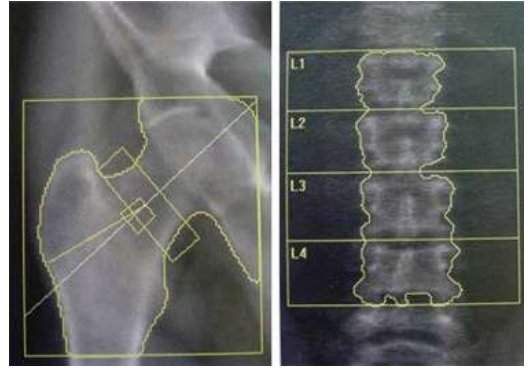
Der Röntgenstrahl unterscheidet sich bei den verschiedenen Herstellern. Manche Systeme benutzen einen sog. **pencil-beam**, also einen einzelnen dünnen Röntgenstrahl mit einem einzelnen Detektor. Dieser Einzelstrahl hat den Vorteil, so gut wie keine Verzeichnung bei der Detektion zu erzeugen. Um den ganzen Körper zu vermessen, muss der



■ Abb. 3.41 Der DXA-Arbeitsplatz

Röntgenstrahl ihn Zeile für Zeile (**meanderförmig**) abtasten. Die Ganzkörpermessung dauert daher bei diesem System 20–30 min. Andere Hersteller tasten den Patienten mit einem sog. **Fächerstrahl** (fan-beam) ab. Hierfür bewegt sich die Röhre innerhalb von 4 min. nur einmal in Längsrichtung über den Patienten hinweg. Der Sensor erfasst mit einer ganzen Reihe von Einzeldetektoren die komplette Breite des Patienten. Bei diesen Systemen muss jedoch die Strahlengeometrie berücksichtigt und in der Berechnung korrigiert werden. Ein Zwischenweg zwischen Genauigkeit des pencil-beams und der Schnelligkeit des fan-beams stellen die Systeme mit dem sog narrow fan-beams (**schmaler Fächerstrahl**) dar. Hierbei bewegt sich die Röntgenröhre ebenfalls zeilenweise über den Patienten, erfasst jedoch gleichzeitig mehrere Zeilen in der Längsachse. Somit werden Untersuchungszeiten von nur 15 min. erreicht.

Bei der Auswertung der Knochendichte errechnet ein DXA-System auf Grundlage der errechneten Flächendichte jeweils einen T- und einen Z-Wert (■ Abb. 3.42). Diese Werte sind keine Dichtewerte, sondern dimensionslose Werte. Der T-Wert kennzeichnet die Abweichung von der normalen Flächendichte eines 30–35-jährigen Menschen. Ein T-Wert eines 30-jährigen Mannes von 0 bedeutet nur, dass seine Knochendichte im Durchschnitt liegt. Würde der T-Wert unter $-2,5$ liegen würde eine Osteoporose vorliegen. Der Z-Wert ist ein zusätzlicher auf das Alter und Geschlecht des Patienten korrigierter Wert.



■ Abb. 3.42 Auswertung der Knochendichte

Die DXA ist derzeit der Goldstandard zur Diagnose der Osteoporose. Die Strahlenexposition (ca. 10–30 μSv) ist geringer als bei der vergleichbaren CT-Untersuchung zur Knochendichtemessung, der qCT. Sie lässt im direkten Vergleich mit dem CT jedoch keine Aussage über den Knochenaufbau oder die Knochenstabilität zu. Da es sich bei der DXA um eine Flächenmessung handelt, kann es durch Überlagerung mit Verkalkungen der Aorta außerdem zu Messfehlern kommen.

3.5.4 Ganzbeinaufnahme, Achsenbestimmungen

Bei der Röntgendiagnostik werden verschiedenen große Kassetten oder Festkörperdetektoren genutzt. Die maximale Bildgröße ist jedoch begrenzt (Kassette max. 43 cm, Festkörperdetektor: max. 45–50 cm). Für manche Fragestellungen braucht man eine Aufnahme des gesamten Beins oder der gesamten Wirbelsäule. Wie macht man jetzt aber diese großen Röntgenaufnahmen?

Bei der Speicherfolientechnik wird für die Ganzbein- oder die Wirbelsäulenganzaufnahme eine Aufnahme auf einer spezielle Kassette gemacht. In dieser Spezialkassette befinden sich zwei Speicherfolien, die getrennt voneinander ausgelesen werden (35×83). Wird eine noch längere Aufnahme benötigt, kann die Kassette noch um eine zusätzliche Kassette „erweitert“ werden (35×124). Die Zusatzkassette wird dazu auf die Doppelkassette aufgesteckt. Aber wie werden aus den zwei oder drei einzelnen Bilder ein großes und vor allem ein korrektes Bild?

Die einzelnen Speicherfolien in der Langkassette überlagern sich um ca. 1–2 cm. Außerdem sind am rechten und linken Rand des Überlappungsbereiches röntgendichte Markierungen vorhanden. Mit diesen Markierungen werden die Einzelbilder zueinander ausgerichtet. Dies geschieht in der Auswertesoftware meistens vollautomatisch. Voraussetzung hierfür ist, dass diese Markierungen auch auf dem Film zu erkennen sind. Wird bei der Aufnahme das Feld zu stark eingeblendet, ist diese vollautomatische Zusammenführung der Bilder nur bedingt möglich, hier muss dann manuell nachgearbeitet werden. Anhand der Bildinformationen am oberen bzw. unteren Bereich der Bilder erfolgt dann die Verschmelzung zu einem Gesamtbild. Eine besondere Herausforderung stellt die unterschiedliche Belichtung der einzelnen Speicherfolien dar. Da mit der Aufnahme alle zwei bzw. drei Speicherfolien belichtet werden, kann es vorkommen, dass der obere Teil des Bildes (Beckenetage) unterbelichtet bzw. der untere Teil des Bildes (Sprunggelenksbereich) überbelichtet erscheinen. Hier kann jedoch dank der Digitaltechnik im Vergleich zur analogen Technik gut nachgearbeitet werden, um ein homogenes Bild zu erhalten (■ Abb. 3.43). Einzig die Überlappungsbereiche sind stets erkennbar, da es bei diesen durch die Folienüberlappung immer zu einer Unterbelichtung kommt.

Beinachsen- und Wirbelsäulenganzaufnahmen können auch an einem Rasterwandstativ mit Festkörperdetektor angefertigt werden. Hierbei müssen jedoch drei Aufnahmen angefertigt werden, die dann auf der Workstation mit einer speziellen Software zu einem Bild zusammengefügt werden. Die Strahlenexposition ist hierbei natürlich höher als bei einer Einzelaufnahme.

3.5.5 Ganzkörperscanner (EOS, Wirbelsäulenbalance)

Eine neue Technik der Wirbelsäulen- oder Ganzbeinaufnahme ist der Ganzkörperscanner der Firma EOS (■ Abb. 3.44). Bei diesem System wird eine spezielle Ionisationskammer als Detektor eingesetzt: die **Vieldraht-Proportionalkammer**, für die Georges Charpak (* 1. August 1924 in Dąbrowica, Polen, heute Ukraine; † 29. September 2010 in Paris) 1992 den Nobelpreis für Physik bekam.

■ Abb. 3.43 Beispiel Ganzbeinaufnahme



Die Vieldraht-Proportionalkammer (engl. multi-wire proportional chamber, MWPC) wurde eigentlich zur Detektion von Elementarteilchen im Kernforschungszentrum CERN entwickelt. Sie besteht aus einer mit Xenon gefüllten Kammer, in der sich senkrecht zur Strahlenrichtung Drähte befinden, an denen eine positive Hochspannung angelegt ist. Die obere und untere Seite der Kammer dienen als negative Kathoden, wobei die untere Kathode die eigentliche Messkathode ist.

Die im EOS-Gerät befindliche Kammer besteht aus mehr als 1700 einzelnen Streifen, die den Pixeln pro Zeile entsprechen. Die Kammer selbst ist nur 1,5 mm hoch und bewegt sich während der Aufnahme mit der Röntgenröhre in Längsachse zum Patienten. Der Röntgenstrahl ist ein stark kollimierter, auf die Höhe des Detektors angepasster Fächerstrahl. Das eigentliche Bild wird also Zeile für Zeile während der Aufnahme aufgenommen. Wichtig ist hierbei, dass der Patient während der bis zu 30 sec.



■ **Abb. 3.44** Das EOS-Aufnahmegerät

Aufnahmezeit völlig ruhig im Gerät steht, da es sonst zu Bildfehlern kommt.

Tritt nun ein Röntgenquant in die Kammer ein, ionisiert er das darin befindliche Gas. Die freien Elektronen werden durch das bestehende Hochspannungsfeld zwischen Anodendraht und Kathodenwand beschleunigt und ionisieren weitere Atome. Es kommt so zu einer Ladungslawine, die die Ionisation um den Faktor 10^3 bis 10^6 erhöht. Während die Elektronen von den Drähten absorbiert werden, wandern die positiv geladenen Ionen zu den Kathoden. Durch die gleichzeitige Messung des Stroms der Drähte und der einzelnen Kathodenstreifen kann man den Ort der Ionisation und somit auch die Energie der Strahlung berechnen. Man erhält so für jede Zeile ein der Schwächung der Röntgenstrahlung entsprechendes Histogramm.

Der Vorteil dieser Detektion ist, dass auch niedrige Energien sehr gut erkannt werden. Da jedes Röntgenquant direkt erfasst wird, ohne vorherige Umwandlung in Licht und wieder zurück in messbaren Strom, erreicht man auch bei niedrigen Dosen eine sehr gute Kontrastauflösung. Da die einzelnen Kammern zum Brennfleck der Röhre ausgerichtet sind, werden auch nur Röntgenstrahlen gemessen, die direkt von der Röhre stammen (selbstkollimierend). Streustrahlen müssen also nicht gesondert herausgefiltert werden.

Das Resultat dieser speziellen Technik ist, dass Beinachsen-, Wirbelsäulenganzaufnahmen oder auch Ganzkörperaufnahmen mit bis um 85 % reduzierter Strahlung erstellt werden können.

Ein weiterer Vorteil des EOS-Gerätes ist, dass das System aus 2 Röhren-Detektor-Systemen besteht und somit mit einer Aufnahme sowohl die a.p.- als auch die seitlichen Aufnahme erstellt werden können.

Da die Patientenposition (Objekt-Film-Abstand) durch die Aufnahmeparameter feststeht, wird sie in die Bildberechnung einbezogen. Damit erreicht man, im Gegensatz zur konventionellen Röntgenaufnahme, eine 1-zu-1-Darstellung des Bildes. Das bedeutet, dass auch ohne Maßstabsfestlegung Messungen direkt im Bild möglich sind (■ [Abb. 3.45](#)).

Durch die spezielle Auswertungssoftware können mit wenigen Arbeitsschritten verschiedene Winkel der Wirbelsäule oder der Beinachse berechnet werden, die für orthopädische OPs nötig sind. Selbst eine 3D-Darstellung der Wirbelsäule oder des Beins, ähnlich einer CT-Rekonstruktion, sind möglich.

In Kürze

1. Die Röntgenröhre besteht aus einer Kathode und einer Anode, zwischen denen Elektronen beschleunigt werden und an der Anode Röntgenstrahlen und Wärme erzeugen. Die Röntgenstrahlen bestehen aus Bremsstrahlen und der charakteristischen Strahlung der Anode.
2. Die Art und Menge der Röntgenstrahlung lässt sich am Röntgengenerator durch Regelung der Spannung und der Stromstärke verändern. Die Menge der Dosis kann durch die Verwendung Belichtungsautomatik auch automatisch reguliert werden.
3. Die Röntgenstrahlen werden durch den Körper durch Photoabsorption und Streuung geschwächt und lassen auf dem Bildempfänger ein Bild entstehen. Hierbei gelten die Gesetze der Zentralprojektion und das Abstands-Quadrat-Gesetz.
4. Das Röntgenbild lässt sich durch Verwendung eines Streustrahlenrasters sowie durch den Einsatz von Ausgleichsfiltern verbessern. Beim digitalen Röntgen ist zudem auf die ausreichende Menge der Strahlung zu achten.



■ Abb. 3.45a,b Beispiel einer EOS-Aufnahme

5. Röntgenanlagen können sowohl fest in einem Untersuchungsraum eingebaut sein (Bucky-Arbeitsplatz) als auch mobil eingesetzt werden.
6. Bei der Anwendung von Röntgenstrahlung ist der Patient vor Röntgenstrahlen zu schützen. Hier muss besonders auf den Schutz der Gonaden geachtet werden.

7. Die Röntgenaufnahmen arbeiten heute größtenteils digital. Die Bilder entstehen auf Speicherfolien oder Flachbilddetektoren. Bei diesen Aufnahmeverfahren werden die Röntgenstrahlen in Licht umgewandelt und stehen dann indirekt oder direkt als digitales Bild zur Verfügung.
8. Mit einem digitalen Röntgenbild entstehen durch die lineare Empfindlichkeit der Systeme fast keine Fehlaufnahmen mehr. Diese Bilder können zudem noch auf viele Arten bearbeitet werden (Anpassung der LUT, der Helligkeit, des Kontrasts, ...).

Literatur

- Bosnjakovic-Büscher S, Zimmer-Brossy M (1998) Lehrbuch der röntgendiagnostischen Einstelltechnik, 5. Aufl. Springer
- Canon Inc.: „Setup Guide for Canon CXDI Control Software.“
- DGZMK (2013) Empfehlungen zur DVT. http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/S1_Empfehlung_Dentale_Volumentomographie.pdf. Zugriffen: 25.03.2014
- Gevantmakher M, Meinel C (2004) Medizinische Bilderverarbeitung - eine Übersicht. http://www.math.uni-trier.de/verschiedenes/forschung/04_03.pdf. Zugriffen: 20.02.2014
- Hering E, Martin R, Stohrer M (1988) Physik für Ingenieure. VDI-Verlag GmbH
- Hölzemann H (2012) Strahlenschutz und Bildqualität (5) – Dosisindikatoren in der digitalen Radiographie. mta-dialog 13(5):448–449
- Lehnertz K (2008) Medizinische Physik: Physikalische Grundlagen der medizinischen Bildgebung 1: Bildgebung mit Röntgenstrahlen. http://epileptologie-bonn.de/cms/front_content.php?idcat=203. Zugriffen: 15.02.2014
- Lehnertz K (2008) Medizinische Physik: Physikalische Grundlagen der medizinischen Bildgebung 2: Erzeugung von Röntgenstrahlung. http://epileptologie-bonn.de/cms/front_content.php?idcat=203. Zugriffen: 15.02.2014
- Lehnertz K (2008) Medizinische Physik: Physikalische Grundlagen der medizinischen Bildgebung 3: Wechselwirkung mit Materie. http://epileptologie-bonn.de/cms/front_content.php?idcat=203. Zugriffen: 15.02.2014
- Lehnertz K (2008) „Medizinische Physik: Physikalische Grundlagen der medizinischen Bildgebung 4: Detektoren“. http://epileptologie-bonn.de/cms/front_content.php?idcat=203. Zugriffen: 15.02.2014
- Lehnertz K (2008) Medizinische Physik: Physikalische Grundlagen der medizinischen Bildgebung 6: Durchleuchtung, Projektionsradiographie. <http://epileptologie-bonn.de>

[de/cms/front_content.php?idcat=203](http://epileptologie-bonn.de/cms/front_content.php?idcat=203). Zugriffen: 15.02.2014

Lehnertz K (2008) Medizinische Physik: Physikalische Grundlagen der medizinischen Bildgebung 5: Bildqualität (2420088–248). http://epileptologie-bonn.de/cms/front_content.php?idcat=203. Zugriffen: 15.02.2014

Leitlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik (2007), online 22.4.14

Philips, Handbuch Radiographie,“ S. 1–80. <http://download.sstmed.com/Tools/Aufnahmehelfer.pdf>. Zugriffen: 16.03.2013

Schmitt W, Lehmann TM (2003) Digitales Röntgen. Die Quintessenz 513:503–513

Suter D (2007) Einführung in die Medizinphysik: 6 Röntgendiagnostik (S. 112–139). http://e3.physik.uni-dortmund.de/~suter/Vorlesung/Medizinphysik_12/Medizinphysik_12.html. Zugriffen: 14.02.2014

Szeifert KH (2012) Hodenkapsel richtig anlegen! mta-dialog 13:223–224

Toellner R, Illustrierte Geschichte der Medizin Bd. 4. Andreas & Andreas Verlagsbuchhandel, Salzburg (genehmigte Lizenzausgabe für Weltbild Verlag GmbH, Augsburg 2000) „Bone Densitometry Equipment“ http://www.rah.sa.gov.au/nucmed/BMD/bmd_equipment.htm [abgerufen am 25.03.2014]

Zöllner F (2010) 1. Physikalische Grundlagen - Einleitung. <http://www.umm.uni-heidelberg.de/inst/cbtm/ckm/lehre/index.html>. Zugriffen: 10.02.2014

Zöllner F (2010) 3. Eigenschaften der Röntgenstrahlen. <http://www.umm.uni-heidelberg.de/inst/cbtm/ckm/lehre/index.html>. Zugriffen: 10.02.2014

Zöllner F (2010) 4. Aufbau der Röntgenapparatur. <http://www.umm.uni-heidelberg.de/inst/cbtm/ckm/lehre/index.html>. Zugriffen: 10.02.2014

Zöllner F (2010) 5. Bildaufnahme Röntgen. <http://www.umm.uni-heidelberg.de/inst/cbtm/ckm/lehre/index.html>. Zugriffen: 10.02.2014

Zöllner F (2010) 6. Streustrahlung. <http://www.umm.uni-heidelberg.de/inst/cbtm/ckm/lehre/index.html>. Zugriffen: 10.02.2014

Durchleuchtung und Subtraktionsangiographie

T. Doering, Ch. Nowarra

- 4.1 Bildverstärker inklusive aktueller technischer Entwicklungen – 106**
 - 4.1.1 Aufbau des Bildverstärkers (BV) – 106
 - 4.1.2 Der Röntgenstrahler einer Durchleuchtungsanlage – 108
 - 4.1.3 Aufbau eines Durchleuchtungsgerätes – 108
 - 4.1.4 Aufbau einer Angiographieanlage – 109
 - 4.1.5 Patientenlagerung – 110
- 4.2 DSA-Technik – 110**
 - 4.2.1 Subtraktion – 111
- 4.3 Rotationsangiographie/Angio-CT – 113**
- 4.4 Besondere Strahlenschutzmaßnahmen – 113**
 - 4.4.1 Strahlenschutz für das Personal – 113
 - 4.4.2 Strahlenschutz durch die Röntgentechnik – 115
- 4.5 Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien der Bundesärztekammer – 116**
 - 4.5.1 Ärztliche Qualitätsanforderungen – 116
- Literatur – 117**

Ein 56-jähriger, adipöser Mann kommt mit Kopfschmerzen in die Notaufnahme. Bei der körperlichen Untersuchung wird bei ihm zudem noch ein erhöhter Blutdruck festgestellt. Auf den erstellten CT-Aufnahmen ist keine Blutung zu erkennen. Zur weiteren Diagnostik wird eine Angiographie angeordnet, da der Verdacht eines Aneurysma der Hirnarterien besteht, das einer sofortigen Behandlung bedarf.

Im vorherigen Kapitel haben Sie die Technik des sog. konventionellen Röntgens kennengelernt.

Diese Technik liefert nur Momentaufnahmen des menschlichen Körpers, zeigt aber kein „Livebild“ von den Vorgängen, die im Körper ablaufen. Zu diesem Zweck benutzten die Radiologen in der Anfangszeit sog. Leuchtschirme. Dabei stand der Arzt während der Aufnahme im Strahlengang und betrachtete das Bild. Diese Leuchtschirme bestanden aus einer beschichteten Platte, die unter Einwirkung von Röntgenstrahlung zu leuchten begann. Dabei musste der Raum abgedunkelt werden, da die Leuchtkraft dieser Schirme sehr schwach war. Außerdem war die Kontrastauflösung, sprich die Erkennbarkeit kleiner Details sehr gering. Das änderte sich mit der Erfindung des sog. elektronenoptischen Bildverstärkers.

Die Durchleuchtungstechnik wird eingesetzt für:

- Einrichten von Knochenbrüchen,
- Untersuchungen des Magen-Darm-Trakts und anderen Körperhöhlen (z. B. der Gallengänge) mittels Kontrastmittel,
- Untersuchungen von Gefäßen ebenfalls mit Kontrastmitteln,
- Platzieren von Sonden oder Drainagen im Körper.

Eine besondere Bedeutung hat die Betrachtung der Echtzeitvorgänge bei der Untersuchung des Schluckaktes und der Herzklappentätigkeit.

Die eingesetzten Röntgen-Kontrastmittel sind jeweils auf ihr Einsatzgebiet angepasst (► Kap. 8). Somit können Strukturen im Röntgenbild dargestellt werden, die sonst aufgrund der geringen Dichteunterschiede zum umgebenden Gewebe nicht sichtbar wären.

4.1 Bildverstärker inklusive aktueller technischer Entwicklungen

T. Doering

4.1.1 Aufbau des Bildverstärkers (BV)

Der Bildverstärker (► Abb. 4.1) besteht wie die Röntgenröhre aus einem evakuierten, also luftleeren Glas- oder Metallkolben. Die leicht gewölbte Eintrittsfläche für die Röntgenstrahlen ist mit einem Leuchtstoff (Cäsiumiodid) beschichtet. Diese Schicht erzeugt beim Auftreffen der Strahlung ein **Lumineszenzbild**. Direkt auf dieser Leuchtschicht ist eine Photokathode aufgebracht, die entsprechend des Lumineszenzbildes Elektronen aussendet, das sog. „**Elektronenbild**“. Diese Elektronen werden durch die anliegende Spannung von ca. 25 kV–35 kV Richtung Anode beschleunigt.

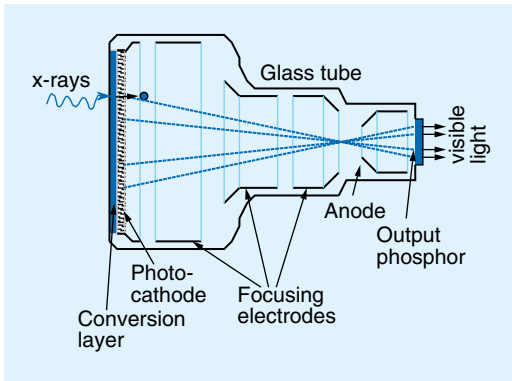
An der Außenwand innerhalb des Glaskolbens sind weitere Elektroden angebracht, die durch ihre negative Ladung dafür sorgen, dass diese freien Elektronen ähnlich einem optischen Linsensystem auf einen bestimmten Punkt fokussiert werden. Man bezeichnet das System dieser im Bildverstärker befindlichen Kathoden auch als **Elektronenoptik**.

Jenseits des Brennpunkts treffen die Elektronen auf den Ausgangsbildschirm, der aus einer feinkörnigen Schicht aus silberaktiviertem Zinkkadmium besteht. Das dort entstehende Leuchtdichtebild ist sehr viel heller, umgekehrt und verkleinert.

Diese Helligkeitsänderung wird durch die Beschleunigung der Elektronen innerhalb des Bildverstärkers und durch die auf die Fläche bezogene, höhere Elektronendichte im Vergleich zum Eingangsbildschirm verursacht.

Durch die geringe Größe des Ausgangsbildschirms spielt hier die Auflösung eine große Rolle. Ist die Schicht zu grobkörnig, können leicht kleine Details verloren gehen.

Je nach Schaltung der Elektronenoptik kann, durch Verlagerung des Brennpunktes, der Maßstab der **elektronenoptischen Verkleinerung** verändert werden. So kann auch nur ein kleiner Bereich



■ Abb. 4.1 Aufbau eines Bildverstärkers

des Eingangsschirms auf dem Ausgangsbildschirm dargestellt werden. Dies ermöglicht eine genauere Darstellung von Details. Dadurch nimmt jedoch die Leuchtstärke des Ausgangsbildes ab.

Das Bild des Ausgangsbildschirms wird von einer Kamera aufgenommen und auf einem Monitor dargestellt. Dies geschieht mittels einer sog. **Tandemoptik**, also zweier Linsensysteme, die das Bild des Ausgangsbildschirms an das Kamerasystem weiterleiten. Zwischen diesen Linsen wurden früher für die Dokumentation halbdurchsichtige Spiegel eingebracht, um das Bild auf eine 10 mm-Kamera zu übertragen. Andere Spiegel sorgten für die Einblendung von weiteren Daten in das Bild (z. B. das EKG bei Herzkatheteruntersuchungen). Diese Spiegel werden seit der Volldigitalisierung der Videokette nicht mehr benötigt. Heute wird das Bild durch einen sog. CCD-Sensor (elektronisches Bauteil mit Photodioden) digitalisiert und verarbeitet.

Das Bild der Durchleuchtung wird meist auf einem Monitor im Untersuchungsraum wiedergegeben. Während früher mit dem Abschalten der Röntgenstrahlen auch das Bild am Monitor verschwand, müssen mittlerweile alle Anlagen mit einer **Last-Image-Hold (LIH)**-Funktion ausgestattet sein. Bei dieser Funktion bleibt das letzte Bild auf dem Monitor erhalten und der Radiologie kann, ohne weitere Strahlung auszulösen, das Bild betrachten. Dieses LIH-Bild kann digital gespeichert werden und somit eine zusätzliche Röntgenaufnahme ersetzen. Diese Funktion wird häufig in der Kinderradiologie verwendet, wo eine Dosisersparnis von besonderer Bedeutung ist.

Kennzahlen eines BV-Systems

Wie auch in der Röntgendiagnostik existieren bei Durchleuchtungsanlagen bestimmte Kennzahlen, die die Eigenschaften der Anlage beschreiben. Zu den bekannten Größen wie der Ortsauflösung (Modulationsübertragungsfrequenz) und der Dosis-Quanten-Effektivität, kommen bei den BV-Anlagen noch weitere hinzu:

- Der **Konversionsfaktor** beschreibt die Verstärkung des Bildes zwischen Eingangs- und Ausgangsbildschirm.
- Je nach verwendeter Leuchtschicht und Elektronik kann es zu einem „Nachziehen“ der Bilder kommen, man spricht in diesen Fällen von der **Trägheit** des Systems.
- Technisch bedingt sind die Bilder eines BV zum Bildrand hin dunkler als in der Mitte des Bildes. Diese Abschwächung wird als **Vignettierung** bezeichnet und kann von System zu System unterschiedlich stark sein.

Aktuelle Entwicklungen oder der Abschied vom BV

Bei aktuellen Durchleuchtungs- oder Angiographieanlagen wird der Bildverstärker immer mehr durch Flachdetektoren mit Messkammertechnik abgelöst. Die Technik des Flachdetektors wurde schon im ► Kap. 3 beschrieben. Auch bei der kontinuierlichen Bilddarstellung kann der Flachdetektor seine Stärken ausspielen.

Er besitzt eine höhere Ortsauflösung als der klassische BV und liefert homogenere Bilder ohne die oben beschriebene Vignettierung oder Verzeichnung. Außerdem liefert der Flachdetektor eine größere Bildtiefe, also mehr Graustufen und somit eine bessere Differenzierung von kleinen Helligkeits- und damit Dichteunterschieden der untersuchten Körperregion.

Zu diesen Vorteilen kommt noch, dass die Flachdetektoren wesentlich kleiner sind und die Geräte somit weniger Platz benötigen als diejenigen mit einem klassischen Bildverstärker. Außerdem entfällt bei den Durchleuchtungsanlagen mit Festkörperdetektor die Kassettenlade, da die Bilder direkt digital gespeichert werden können.

4.1.2 Der Röntgenstrahler einer Durchleuchtungsanlage

Aufbau des Röntgenstrahlers

Bei der BV-Anlage kommt eine Hochleistungsröntgenröhre zum Einsatz, deren Aufbau weitgehend der normalen Röhre entspricht, wie sie schon im ► Kap. 3 beschrieben wurde.

Bei der Tiefenblende werden zwei Bauarten unterschieden: zum einen die bekannte aus der konventionellen Röntgentechnik, die eine Einblendung in x- und y-Achse erlaubt und zum anderen die sog. **Iris-Blende**. Diese Blende besteht aus mehreren Bleilamellen, die am Außenrand der kreisförmigen Tiefenblende angebracht sind. Über eine Mechanik können diese Lamellen nun gemeinsam in Richtung der Bildmitte in das Strahlungsfeld gedreht werden. Je mehr Lamellen eingesetzt werden, desto mehr entspricht das eingblendete Feld einem Kreis.

Die Bedienung erfolgt bei beiden Systemen elektronisch. Hierbei wird automatisch die Größe des ausgewählten BV-Bereichs eingestellt, sodass es nicht zu unnötigen Strahlenexpositionen kommt. Natürlich kann der Untersucher die Einblendung noch weiter verkleinern.

Unterhalb der Tiefenblende befinden sich zusätzliche Ausgleichsfilter, die ebenfalls vom Untersucher elektronisch im Strahlungsfeld positioniert werden können. Diese dienen zur Verbesserung der Bildqualität (ähnlich den Ausgleichsfiltern im konventionellen Röntgen). Sie reduzieren aber auch die Strahlenexposition des Patienten, spielen also für den Strahlenschutz eine große Rolle.

Bei Obertischgeräten ähnelt die Anordnung von Röhre und Detektor der eines Buckyarbeitsplatzes. Daher findet man dort zum Teil auch noch eine Tiefenblende mit Lichtvisier. Bei den Untertischgeräten und bei den C-Bögen (► Abschn. 4.1.3) sind die o. g. Elemente zu einem Bauteil verschmolzen und besitzen auch kein Lichtvisier mehr. Aber wie kann dann noch eingendet werden? Während bei den älteren Geräten die Einblendung nur unter Durchleuchtung möglich war, werden bei modernen Geräten die Blenden auf dem Bild des letzten Durchleuchtungsbildes dargestellt. Man bezeichnet diese Funktion als „**virtuelle Kollimation**“. Ähnlich verhält es sich bei der Platzierung der Ausgleichsfilter.

Dosisregelung

Da das Bild während der Durchleuchtung möglichst konstant sein soll, unabhängig vom durchleuchteten Bereich, steuert die Elektronik am Ausgangsbildschirm u. a. auch die Generatorleistung der Röntgenröhre. Hierfür befindet sich ein kleiner Spiegel innerhalb der Tandemoptik, der einen kleinen Teil der Bildinformation an eine Photodiode weiterleitet. Mit diesem Signal wird der Generator gesteuert. Diese automatische Regelung bedeutet, dass das System bei einer größeren Dichte, also schwächer werdendem Bildsignal die Generatorleistung und somit die Dosis automatisch erhöht wird.

! Wegen der automatischen Dosisregelung sollte man nie einen Bleihandschuh oder andere strahlenundurchlässige Gegenstände (z. B. Schere o. ä.) in den Strahlengang halten oder legen. Dieses Vorgehen erhöht die Röntgendosis für Patient und Untersucher, da der Generator die Dosis so lange nach oben regelt, bis der Gegenstand durchleuchtet wird.

Die Steuerung des Generators erfolgt über eine Kennlinie, also einer definierten und eingespeicherten Dosislinie. Durch sie wird entweder die Spannung oder der Strom, entsprechend der benötigten Dosis, geregelt. Es stehen mehrere solcher Kennlinien im BV-Generator zur Verfügung, die je nach durchleuchtetem Objekt angewählt werden können (das muss nicht separat geregelt werden sondern ist im entsprechenden Programm, z. B. „Magen“ hinterlegt). Bei Interventionen oder Durchleuchtungen bei Kindern muss zudem eine Low-Dose-Kennlinie anwählbar sein, bei der die Dosisleistung minimiert wird, um Dosis zu sparen.

4.1.3 Aufbau eines Durchleuchtungsgerätes

Wie bei den Röntgenanlagen besteht auch eine Durchleuchtungsanlage aus einer Röntgenröhre, einem Patientenlagerungstisch, einem Bildempfänger und (bei digitalen Anlagen) einer Auswerteeinheit.

Die ersten Durchleuchtungsgeräte waren Obertischgeräte, die sowohl für normale Röntgenaufnahmen



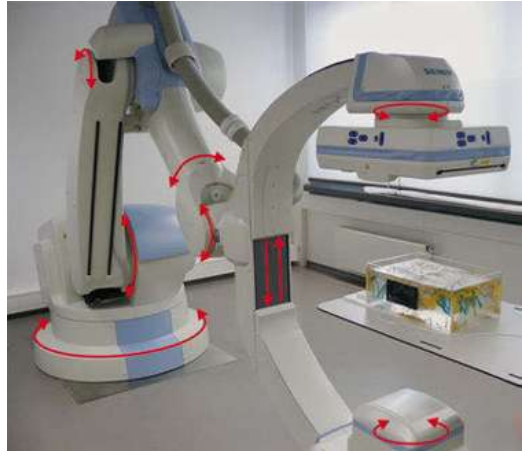
■ Abb. 4.2 Beispiel eines Untertisch-Durchleuchtungsgerätes

men, für Schichtaufnahmen und auch für Durchleuchtungen genutzt wurden. Bei diesen Geräten befand sich die Röntgenröhre oberhalb des Patienten und das Zielgerät unterhalb des Lagerungstisches, und sie glichen einem normalen Buckytisch. Als Zielgerät wurde der Teil der Durchleuchtungsanlage bezeichnet, in dem sich der Bildverstärker, das Raster und der Kassettenhalter befanden. Während das Live-Bild von dem Bildverstärker erzeugt wurde, erfolgte die Dokumentation der Untersuchung mittels Röntgenaufnahmen. Der mit der Kassette beladene Kassettenhalter (mit Messkammersystem) fuhr während der Aufnahme in das Strahlenfeld und ermöglichte so eine „normale“ Röntgenaufnahme.

Mittlerweile sind die Obertischgeräte aufgrund der ungünstigeren Strahlengeometrie nicht mehr so weit verbreitet. Sie wurden durch die Untertischgeräte ersetzt (■ Abb. 4.2), bei denen sich die Röhre unterhalb des Tisches befindet. Bei beiden Gerätetypen sind das Zielsystem und die Röhre fest miteinander verbunden. Damit ist der Zentralstrahl immer mittig auf den Bildempfänger zentriert.

Für die optimale Einstellung kann nun entweder der Tisch verschoben oder die Röntgeneinheit über den Patienten hinweg bewegt werden. Dies geschieht entweder elektronisch oder manuell. Hierbei kann das Zielgerät nicht nur in Längs- und Querachse des Patienten bewegt, sondern auch in der Längsachse gekippt und in der Höhe verändert werden (■ Abb. 4.3).

Zudem ist das gesamte System aus Zielgerät, Röhre und Tisch kippbar, so dass Untersuchungen im Stand (z. B. Schluckstudien) oder in Kopf- oder



■ Abb. 4.3 Beispiel eines C-Bogens mit Flachdetektor und seinen Bewegungsmöglichkeiten

Fußtieflage (z. B. Phlebographie – Untersuchung der tiefen Beinvenen) des Patienten erstellt werden können.

Bei einer reinen Durchleuchtungsanlage kann die Röhren-Bildempfängereinheit nicht um den Patienten rotieren. Um eine seitliche Aufnahme anzufertigen, muss sich der Patient auf dem Tisch drehen.

4.1.4 Aufbau einer Angiographieranlage

Eine Weiterentwicklung des klassischen Durchleuchtungsgerätes ist die Angiographieranlage mit dem sog. C-Bogen. Hierbei sind der Bildempfänger und die Röntgenröhre durch eine halbkreisförmige Schiene miteinander verbunden. Diese Schiene ist mittels eines Haltemoduls mit dem Rest der Anlage verankert. Dieses Haltemodul kann sich nicht nur drehen, und somit die Röhre über die Längsachse des Patienten kippen, sondern ermöglicht es auch, durch „Verschiebung“ des Haltesystems auf der halbkreisförmigen Schiene, die Röhre seitlich um den Patienten zu drehen. Somit ist die Strahlrichtung in allen Raumrichtungen (Freiheitsgraden) möglich.

Der Tisch der Angiographieranlage (■ Abb. 4.4) ist im Gegensatz zu den reinen Durchleuchtungsgeräten meist unabhängig von der Röhren-Bil-



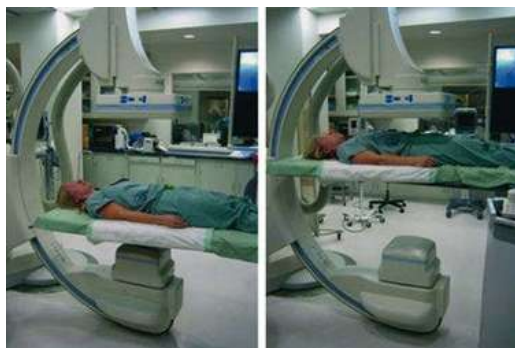
■ Abb. 4.4 Beispiel einer Angiographieanlage

dempfängereinheit aufgestellt. Er ist höhenverstellbar und besitzt eine elektrisch oder schwimmend verstellbare Tischplatte. Am C-Bogen selbst und/oder am Untersuchungstisch sind Kontakte vorhanden, die bei einer (drohenden) Kollision die Bewegung der Anlage stoppen, um so eine Patientengefährdung oder die Beschädigung der Anlage zu verhindern.

Für die Betrachtung der Durchleuchtungsbilder sind an einem Deckenstativ, der sog. Ampel, mindestens 2 Monitore angebracht. Auf einem Bildschirm ist das Durchleuchtungsbild zu sehen, auf dem anderen können vorherige Bilder angezeigt werden, an denen sich der Radiologie während der Angiographie orientieren kann.

Die Bedienung des Systems erfolgt über ein am Tisch befindliches Steuerpult. Mit diesem kann der Untersucher nicht nur den C-Bogen und den Tisch bewegen, sondern auch z. B. das passende Aufnahmeprogramm auswählen oder Abstände im Durchleuchtungsbild messen.

Der C-Bogen kann entweder am Boden montiert sein oder an einem Deckenstativ hängen. Manche Anlagen besitzen zwei C-Bögen, die sog. **biplanaren Angiographieanlagen**. Diese C-Bögen können unabhängig voneinander positioniert werden. Der Vorteil dieser Anlagen besteht darin, dass dem Radiologen während einer angiographischen Intervention, also einer Behandlung an den Blutgefäßen, zwei Bilder aus zwei Raumrichtungen zur Orientierung dienen. So kann er den Verlauf der Gefäße besser beurteilen.



■ Abb. 4.5 Beispiel einer falschen (li.) und einer korrekten (re.) Patientenlagerung

4.1.5 Patientenlagerung

Bei der Patientenlagerung (■ Abb. 4.5) ist darauf zu achten, dass der Bildempfänger nah am Patienten positioniert wird, also der Objekt-Detektor-Abstand möglichst klein gehalten wird. Nur so ist eine originalgetreue, nicht vergrößerte Darstellung des durchleuchteten Objektes gewährleistet. Außerdem wird mit dieser Einstellung nicht nur der Streustrahlenanteil, sondern auch durch den vergrößerten Fokus-Haut-Abstand die Patientendosis verringert.

4.2 DSA-Technik

T. Doering

Bei der **DSA**, der **digitalen Subtraktionsangiographie**, handelt es sich um eine Anwendung der digitalen Bildverarbeitung. Vor der Einführung der Digitaltechnik konnten die Gefäße nur als normales Röntgenbild dargestellt werden. Voraussetzung für die Darstellung von Gefäßen ist, dass diese mit einem Kontrastmittel gefüllt werden. Dies kann entweder über eine Injektion des Kontrastmittels direkt in das punktierte Gefäß erfolgen (z. B. bei der Phlebographie) oder durch die Einführung von Kathetern in das Gefäßsystem und der Injektion des Kontrastmittels „vor Ort“.



■ Abb. 4.6a,b Maskenbild ohne Kontrastmittel mit sich selbst subtrahiert: es entsteht ein graues Bild



■ Abb. 4.7a,b Nativbild und Subtraktionsbild eines Angiographieablaufs

4.2.1 Subtraktion

Für die Subtraktion benötigt man mindestens 2 Röntgenbilder, ein Bild ohne Kontrastmittel und ein oder mehrere Bilder mit dem Kontrastmittelge-

füllten Gefäß. Das erste Bild wird als Maske bezeichnet, welches man von den Folgebildern subtrahiert. Durch diese Subtraktion werden die Bildanteile der Maske aus dem Folgebild eliminiert, die sich in der Zeit zwischen den Aufnahmen NICHT bewegt ha-



■ Abb. 4.8a,b Subtrahiertes Bild mit und ohne Bewegungskorrektur (Pixelshift)

ben. Es sind nur noch die veränderten Bildanteile sichtbar (■ Abb. 4.6, ■ Abb. 4.7).

Ist auf dem Maskenbild bereits Kontrastmittel vorhanden, wird dieser Anteil des Bildes im Subtraktionsbild weiß dargestellt.

Für eine gute Subtraktion ist es wichtig, dass das Maskenbild möglichst exakt auf die Folgebilder „passt“, d. h., dass sich der Bildbereich nicht verändert und der Patient sich nicht bewegt.

Sollte sich der Patient doch bewegt haben, kann die Maske noch entsprechend verschoben werden. Man bezeichnet diese Verschiebung auch als **Pixel-shift** oder **Pixelverschiebung** (■ Abb. 4.8).

In Körperregionen, in denen die Bewegungen lebensnotwendig oder unwillkürlich sind, ist diese Subtraktion nicht immer hundertprozentig erfolgreich, wie z. B. in der Nähe des Herzens, der Lunge und aufgrund der Darmbewegung im Bauchbereich.

Roadmapping

Da das Kontrastmittel mit der Injektion normal im Gefäß weiterfließt und durch das Blut verdünnt wird, wird während der Serienaufnahme immer nur ein begrenzter Bereich der Gefäße (abhg. von der

Detektorgröße) sichtbar. Dies kann für kleine Untersuchungsgebiete zur Orientierung ausreichen, größere Gefäße können aber so nicht in ihrer gesamten Länge beurteilt oder für die Untersuchungsdurchführung genutzt werden.

Hier bieten die Hersteller die Möglichkeit des sog. Roadmappings an (■ Abb. 4.9). Beim Roadmapping werden mehrere Subtraktionsbilder aufsummiert bzw. „aneinander gehangen“. Das Verfahren ähnelt der Maximum-Intensitäts-Projektion der CT- oder MR-Untersuchungen (► Abschn. 5.2.1) und liefert eine komplette Darstellung des Gefäßes. So sind nicht nur der Hauptstamm des Gefäßes sondern auch alle Nebenarme im Bild sichtbar.

Ein solches Summationsbild kann für eine bessere Orientierung halbtransparent auf das Durchleuchtungsbild gelegt werden, so dass der Untersucher auch ohne weitere Kontrastmittellage, den Verlauf der Gefäße auf dem Monitor vor Augen hat. Dies erleichtert ihm den Katheter für die weitere Untersuchung in die korrekte Position zu bringen.



■ **Abb. 4.9** Beispiel eines Roadmapping-Bildes

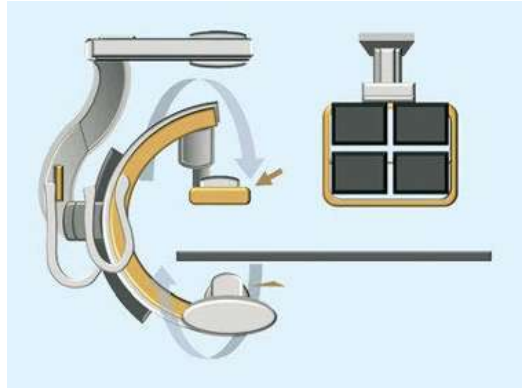
4.3 Rotationsangiographie/ Angio-CT

T. Doering

Um die Lage der Gefäße gerade im Kopfbereich besser darstellen zu können, sind moderne Angiographieanlagen (■ **Abb. 4.10**) in der Lage, eine sog. Rotationsangiographie zu erstellen (■ **Abb. 4.11a, c**). Hierbei bewegt sich der C-Bogen während der Serienablaufes um ca. 200° (herstellerabhängig) um den Patienten herum. Dabei muss sich der Patient im sog. Iso-Zentrum des rotierenden C-Bogens befinden, d. h. genau in der Mitte des rotierenden Bogens.

Wurde nur die angefertigte Serie zur Orientierung genutzt, sind moderne Anlagen heute in der Lage, diese Einzelbilder an einer speziellen Workstation weiter auszuwerten.

Wie Sie vielleicht bemerkt haben, ähnelt die Aufnahmetechnik die der Digitalen Volumentomographie (DVT) aus ► **Kap. 3**. Auch hier wird ein Rohdatensatz von 180 bis 560 Einzelbildern erzeugt. Aus diesem Datensatz können jetzt CT-ähnliche Schichten berechnet werden. Diese erlauben wäh-



■ **Abb. 4.10** Aufbau einer Angio-CT-Anlage

rend der Angiographie schon Aussagen, die sonst erst nach einer zusätzlichen CT-Untersuchung möglich wären.

Außerdem kann aus diesen Bildern ein 3-dimensionales Gefäßbild berechnet werden (■ **Abb. 4.11b, d**), welches sich auf der Workstation betrachten lässt. Dieses kann frei auf dem Bildschirm gedreht werden, um so einen optimalen Blickwinkel auf z. B. eine Gefäßaussackung (sog. Aneurysma) zu liefern. Hat der Radiologie den besten Blickwinkel festgelegt, kann durch die Software auch die optimale Position der C-Bögen angezeigt werden.

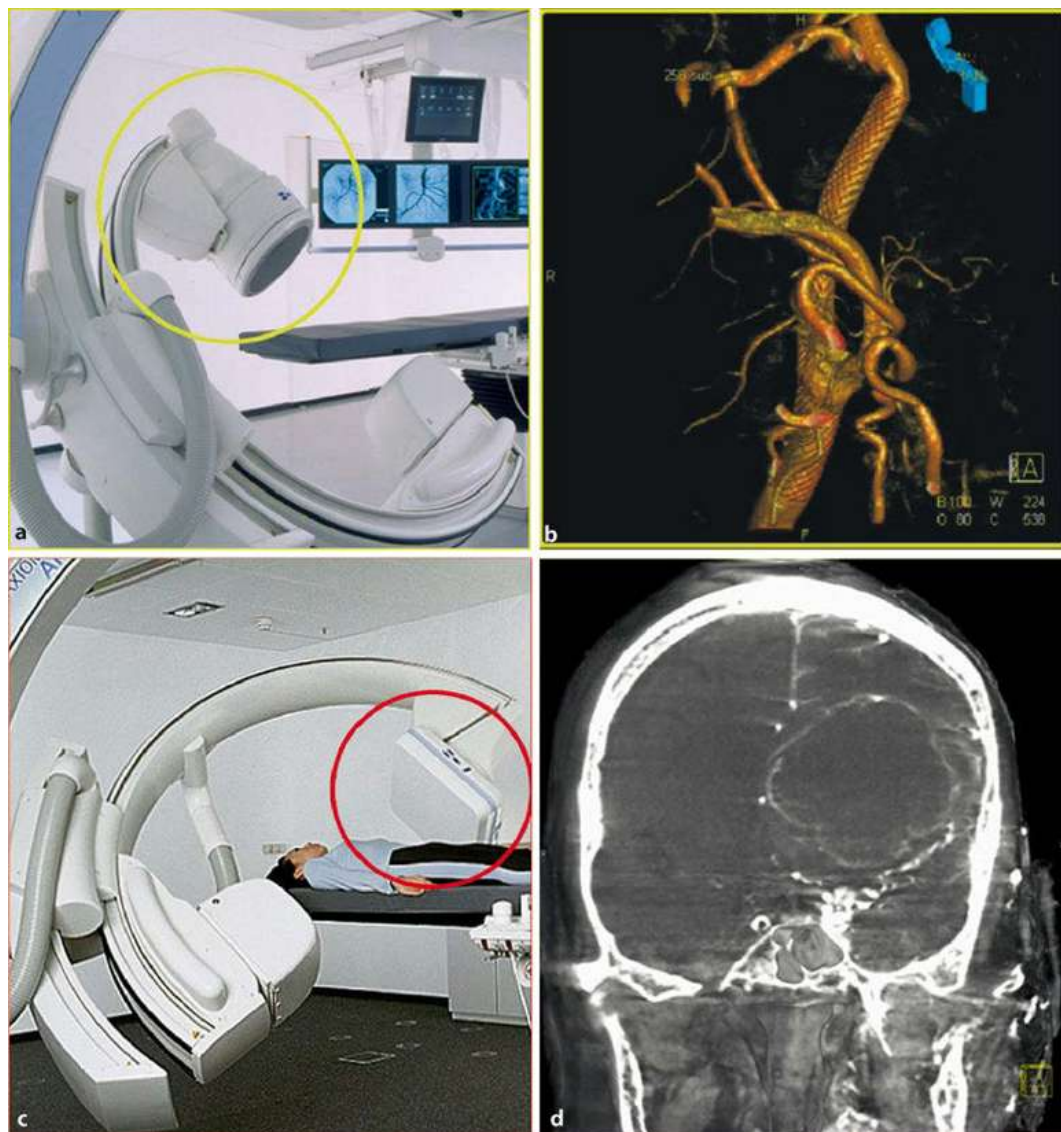
4.4 Besondere Strahlenschutzmaßnahmen

T. Doering

4.4.1 Strahlenschutz für das Personal

Bei der Durchleuchtung ist, wie schon im vorherigen Kapitel erwähnt, die Positionierung der Patienten besonders wichtig (■ **Abb. 4.12**), um die optimale Bildqualität und eine möglichst geringe Patientendosis zu erreichen. Hierzu sollte der Abstand zwischen Röhre und Patient möglichst groß und der Abstand zwischen Patient und Bildempfänger möglichst klein gehalten werden.

➤ **Der größte Teil der besonders für das Personal gefährlichen Streustrahlung entsteht dort, wo der Nutzstrahl den Patienten trifft.**



■ Abb. 4.11a–d Rotationsangiographieanlagen (a, c), berechnete 3D-Rekonstruktion und CT-Schicht (b, d)

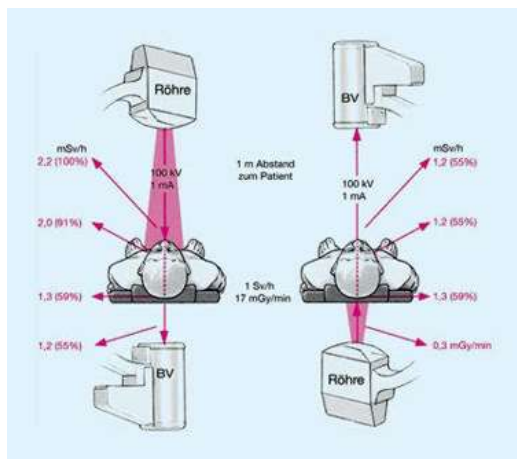
Aus diesem Grunde sollte der C-Bogen nach Möglichkeit immer so positioniert sein, dass er sich unter dem Tisch oder auf der gegenüberliegenden Seite des Tisches befindet.

Für das Personal gilt grundsätzlich die **3-A-Regel des Strahlenschutzes**: Abstand, Aufenthaltsdauer und Abschirmung. Das bedeutet, dass sich die Mitarbeiter, die nicht zwingend anwesend sein müssen, den Raum verlassen sollten. Für alle ande-

ren existieren mehrere technische Möglichkeiten, sich durch verschiedene Abschirmungen vor Strahlung zu schützen.

■ Bleilamellen

Bleilamellen bieten eine flexible Möglichkeit Strahlen abzuschirmen. Sie sind bei den reinen Durchleuchtungsanlagen z. B. direkt am Zielgerät angebracht, um die aus dem Patienten austretende



■ Abb. 4.12 Positionierungen des Patienten im C-Bogen

Strahlung seitlich abzufangen. Sie können auch als Untertischschutz in der Angiographie seitlich am Patiententisch angebracht werden.

■ Bleiglasscheibe

Häufig werden Bleiglasscheiben (Plexiglas mit Bleigehalt) zur Abschirmung eingesetzt. Diese bieten den Vorteil, dass man den Patienten und den C-Bogen weiterhin im Blick hat. Die Bleiglasscheiben sind meistens an einem Deckenstativ angebracht und somit frei im Raum beweglich. Ihre Position sollte immer auch der jeweilige Einstellung des C-Bogens angepasst werden.

■ Mobile Wandabschirmungen

Für bestimmte Situationen ist der Einsatz von mobilen Wandabschirmungen sehr sinnvoll. Dabei handelt es sich um Bleiplatten oder Bleiglasscheiben, die frei im Raum platziert werden können. Sie können sowohl als zusätzlicher Untertisch-Schutz, als auch direkt zur zusätzlichen Abschirmung von im Raum befindlichem Personal (z. B. Anästhesiepersonal) eingesetzt werden.

■ Bleischürze

Zwingend vorgeschrieben ist in der Angiographie das Tragen von Bleischürzen. Da man sich im Raum frei bewegt und auch schon einmal mit dem Rücken zur Röntgenröhre stehen kann, sollten hier Bleimäntel eingesetzt werden, die den ganzen Kör-

per schützen, und nicht die anderorts eingesetzten Halbschürzen.

■ Schilddrüsenschutz/Bleiglasbrille

Für die Schilddrüse und die Linse des Auges, zwei strahlenempfindliche Organe, existieren spezielle Schutzvorrichtungen: der Schilddrüsenschutz, der wie ein Kragen am Hals befestigt werden kann und eine spezielle Brille, die anstelle von normalen Glas aus Bleiglas besteht. In dieses Glas kann auch eine individuelle Sehstärke eingearbeitet werden.

4.4.2 Strahlenschutz durch die Röntgentechnik

Während man bei den Durchleuchtungsuntersuchungen die aus dem Röntgen bekannten Maßnahmen wie Halbschürze oder Testesschutz, wenn z. T. auch nur eingeschränkt, nutzen kann, ist dies in der Angiographie kaum möglich. Da der Patient für die Intervention steril abgedeckt werden muss, kann man Bleischürzen nicht flexibel im Strahlengang verschieben. Und eine Schürze im Untersuchungsbereich führt zu einer erhöhten Strahlenbelastung, da der Generator die Röhrenleistung so lange hoch regelt bis entweder ein Alarm anspringt oder die Schürze durchstrahlt wird.

Hier konnte und kann nur die Technik helfen, die Dosis für den Patienten zu reduzieren.

■ Einblendung

Die einfachste Methode, Dosis einzusparen, ist nur so viel Strahlung wie nötig auf den Patienten einzustrahlen. Wird effektiv einblendend, erhöht man nicht nur die Bildqualität, sondern es wird auch die Strahlung minimiert. Wie bereits erwähnt, erlauben moderne Anlagen kein Überstrahlen des Bilddetektors durch eine vollständig fehlende Einblendung mehr. Selten muss aber der komplette Detektor für die Aufnahme genutzt werden.

■ Kennlinienwahl

Bei den modernen Durchleuchtungs- oder Angiographieranlagen stehen verschiedene Kennlinien zur Verfügung. Durch eine veränderte Strahlenqualität kann auch hier dosisreduzierend gearbeitet wer-

den. Sog. Hochkontrast-Kennlinien nutzen besonders niedrige Spannungen, was zu einem erhöhten Durchleuchtungsstrom und somit zu einem Dosisanstieg führt. Hier sollte nach Möglichkeit eine Kennlinie gewählt werden, die mit höheren Spannungen arbeitet und entsprechend mit einem niedrigeren Strom-Zeit-Produkt auskommt.

■ Digitaltechnik

Schon allein durch die Einführung der Digitaltechnik konnte die Dosis für den Patienten erheblich reduziert werden. So hat sich der Dosisbedarf durch die Einführung des Last-Images-Hold und der Möglichkeit, diese Bilder an Stelle von Zielaufnahmen abzuspeichern um ca. 55 % verringert. Mit der Einführung des Flachbilddetektors konnte diese Dosis weiter verringert werden, da dieser eine größere Quantenausbeute als der klassische Bildverstärker aufweist.

In den letzten Jahren wurden durch Verbesserungen der Rechnerleistungen komplexere Bildberechnungen möglich, die gerade die Bilder im niedrigeren Dosisbereich soweit verbesserten (Rauschglättung), dass dadurch auch wieder Patientendosis eingespart werden konnte.

■ Gepulste Durchleuchtung

Das Ziel der gepulsten Durchleuchtung ist eine Reduzierung der Durchleuchtungszeit. Hierbei strahlt die Röntgenröhre nicht permanent, sondern immer mit kleinen Pausen, ähnlich einem Stroboskopblitzes in der Diskothek. Je nach Hersteller stehen verschiedene Frequenzen von 1–30 Bilder in der Sekunde (B/s) zur Auswahl. Im Vergleich mit der kontinuierlichen Durchleuchtung können schnelle Bewegungen, wie z. B. beim Schluckakt nicht mehr so gut beurteilt werden. Man spricht von einer reduzierten „**Zeitauflösung**“. Eine hohe Zeitauflösung ist aber nur in speziellen Fällen wirklich notwendig. Hier sollte der Untersucher immer eine möglichst geringe Pulsfrequenz wählen. Technisch wird das Bild bei manchen Herstellern so verändert, dass der Seheindruck möglichst natürlich erscheint. Dies kann z. B. durch weiche Übergänge zwischen den einzelnen Bildern erreicht werden.

■ Raster bei Kindern

In der Pädiatrie ist es mittlerweile vorgeschrieben, dass das Raster auch bei Durchleuchtungsanlagen

entfernbar sein muss. Wie schon im ► Kapitel 3 beschrieben, trägt ein Raster zwar zur Bildverbesserung bei, erhöht aber die Dosis um den Faktor 2–3. Mit der Entfernung des Rasters und der Wahl einer speziellen Pädiatrie-Kennlinie kann so die Dosis nochmals reduziert werden.

4.5 Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien der Bundesärztekammer

Ch. Nowarra

Die Qualitätskriterien für Durchleuchtungsanlagen sind, gemeinsam mit denen für konventionelle Röntgenanlagen, in einer Leitlinie (► Abschn. 3.2.9) zusammengefasst. Daher wird in diesem Kapitel nur auf Besonderheiten der Durchleuchtung eingegangen.

4.5.1 Ärztliche Qualitätsanforderungen

Die Mindestanforderungen zur Beantwortung spezifischer Fragestellungen sind mit denen der konventionellen Röntgendiagnostik und für die jeweiligen Untersuchungsregionen benannt:

- **Charakteristische Bildmerkmale**, z. B. Entfaltung aller Dickdarmabschnitte bei einer Kolonuntersuchung
- **Wichtige Bilddetails**, z. B. Strukturen mit einer Größe von 1–3 mm bei der Kolondarstellung
- **Kritische Strukturen**, z. B. Darstellung der Schleimhautoberfläche mit Erhebungen oder Einsenkungen durch Polypen, Fisteln o. ä.

Je nach Fragestellung haben Durchleuchtungsuntersuchungen unterschiedliche Ziele:

- Die **kontinuierliche Durchleuchtung** wird für die funktionelle Bildgebung eingesetzt (z. B. Darstellung des Schluckaktes) oder bei einer Intervention in der Angiographie für das Einführen eines Katheters unter Sichtkontrolle.
- Bei **intermittierender** (zeitlich unterbrochener) **Durchleuchtung** werden nur Ausschnitte einer Organfunktion dargestellt, z. B.

KM-Verlauf bei einer Colon-Kontrastuntersuchung.

Die Wahl der Technik (Bildverstärker oder Flachbilddetektor) hängt von der Fragestellung und der danach gewählten Untersuchungsmethode ab. So kann man an einer Durchleuchtungsanlage mit Bildverstärker (und Zeitverzögerung etc.) keine neuroradiologische Intervention mit einer hohen Fließgeschwindigkeit des Blutes durchführen.

Die Durchleuchtungszeit sollte im Sinne der Strahlenexposition so niedrig wie möglich gehalten werden, und besonders in der **Pädiatrie** und bei **interventionellen Eingriffen** ist auf Maßnahmen zur Dosisreduktion zu achten. Hier sind folgende Kriterien der Leitlinien zu beachten:

- Die Anzahl der Aufnahmen und die Bildfrequenz sind so niedrig wie möglich zu halten.
- Die Einblendung des Bildausschnittes erfolgt auf den relevanten Bereich am gespeicherten Bild ohne Durchleuchtung.
- Bei einer gepulsten Durchleuchtung ist eine niedrige Durchleuchtungsfrequenz zu wählen.
- Die digitale Bildspeicherung ist der möglichen konventionellen Aufnahme vorzuziehen.
- Das Streustrahlenraster muss entfernbar sein.
- Bei Kindern ist ein Zusatzfilter zu verwenden.

Wie eingangs beschrieben ist gerade bei Durchleuchtungsuntersuchung auf eine niedrige Patienten-Einfalldosisleistung (Strahlenexposition) zu achten. Eine zusätzliche Dosisreduktion kann durch die Verwendung von Filtern, angepasste Spannungs-Strom-Regelungen, gepulste Durchleuchtung sowie der Technik „Last-image-hold“ erreicht werden.

In Kürze

- Die Technik der Durchleuchtungs- und Angiographieanlagen stellt eine Weiterentwicklung der konventionellen Röntgendiagnostik dar.
- Durch die Entwicklung digitaler Bildbearbeitungssysteme hat sich das Einsatzspektrum zunehmend erweitert. Während die klassischen Untersuchungen der Magen-Darm-Passage zahlenmäßig abnehmen und durch Schnittbildverfahren (CT, MRT) zunehmend ersetzt werden, ermöglicht der

technische Fortschritt eine Erweiterung der Interventionsverfahren in der Angiographie, besonders im Bereich der Hirngefäße.

- Da Durchleuchtungsanlagen zu einer hohen Strahlenbelastung für Patient und Personal führen können, sind besondere Strahlenschutzmaßnahmen zu beachten.
- Zur Sicherung der Untersuchungsqualität und des Strahlenschutzes der Patienten hat die Bundesleitlinie eine Leitlinie herausgegeben, deren Einhaltung stichprobenartig durch eine ärztliche Stelle kontrolliert wird.

Literatur

- Hilgers A (2006) „Angiografie Bildgebende Verfahren auf MTA online: Flachdetektor--Rotationsangiographie.“ <http://www.mta-dialog.de/bildgebende-verfahren/Bildgebende-Verfahren---Angiografie---Flachdetektor--Rotationsangiographie.htm?sessionId=D603BDB-0CE54F416DD791EE9F6AB03A5>. Zugriffen: 06.03.2014
- Lehnertz K (2008) „Medizinische Physik:Physikalische Grundlagen der medizinischen Bildgebung 4: Detektoren“. http://epileptologie-bonn.de/cms/front_content.php?idcat=203. Zugriffen: 15.02.2014
- Lehnertz K (2008) Medizinische Physik:Physikalische Grundlagen der medizinischen Bildgebung 6: Durchleuchtung, Projektionsradiographie. http://epileptologie-bonn.de/cms/front_content.php?idcat=203. Zugriffen: 15.02.2014
- Lehnertz K (2008) Medizinische Physik:Physikalische Grundlagen der medizinischen Bildgebung 5: Bildqualität“02/04 (01.10.2008), S. 248–248. http://epileptologie-bonn.de/cms/front_content.php?idcat=203. Zugriffen: 15.02.2014
- Ostermeier M, Siemens Medical Solutions (2005) DynaCT - CT-ähnliche Bildgebung am C-Bogensystem. <http://www.apr.drg.de/media/document/1267/APT-2005-Ostermeier-Siemens-DynaCT.pdf>. Zugriffen: 06.03.2014
- Sakas G (2012) , Bildgebende Verfahren in der Medizin und medizinische Bildverarbeitung ‘ Konventionelles Röntgen. <http://www.gris.informatik.tu-darmstadt.de/lehre/courses/MedizinischeBildverarbeitung/ws0708/slides/Sakas-Bildverbesserung.pdf>. Zugriffen: 11.03.2014
- Salié S (2010) Angiographieanlagen (1) - Gerätetechnik in der Angiographie. mta-dialog 11(1):202–203
- Salié S (2010) Angiographieanlagen (2) - Gerätetechnik in der Angiographie. mta-dialog 11(2):409–411
- Salié S (2010) Angiographieanlagen (3) - Bildnachverarbeitung. mta-dialog 11(3):569–572

Salié S (2010) Angiographieanlagen (4) - 3D-Röntgenbildgebung. mta-dialog 11(4):778–780

abgerufen am (2014) Strahlenbelastung des Arztes bei Angiographie und interventioneller Radiologie. http://www.landesmuseum.at/pdf_frei_remote/BERI_85_0369-0373.pdf. Zugegriffen: 22.04.2014

Zöllner F (2010) 8. Röntgenaufnahme Anwendung. <http://www.umm.uni-heidelberg.de/inst/cbtm/ckm/lehre/index.html>. Zugegriffen: 10.02.2014

Computertomographie (CT)

K. Kara, Ch. Nowarra

- 5.1 Aufbau und Funktionsweise eines Computertomographen – 120**
 - 5.1.1 Allgemeines und Möglichkeiten – 120
 - 5.1.2 Geschichte – 120
 - 5.1.3 Aufbau – 121
 - 5.1.4 Gerätegeneration – 123
 - 5.1.5 Untersuchungstechniken – 124
- 5.2 Bildentstehung – 132**
 - 5.2.1 Post-Processing – 134
 - 5.2.2 Artefakte – 138
- 5.3 Besondere Strahlenschutzmaßnahmen und Dosisreduktion – 140**
 - 5.3.1 Dosisgrößen CTDIvol vs. DLP – 141
- 5.4 Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien der Bundesärztekammer – 142**
 - 5.4.1 Ärztliche Qualitätsanforderungen – 142
 - 5.4.2 Aufnahmetechnische Qualitätsanforderungen – 143
- Literatur – 144**

Sabine ist im 2. Semester der MTRA-Ausbildung und steht kurz vor ihrem ersten Einsatz am CT.

„Das wird sicher total spannend“, berichtet sie am Abend aufgeregt ihrem Freund Thomas. „Und noch in einer Unfallklinik. Da seh` ich sicher jede Menge. In der Schule lernen wir zwar noch sehr viele konventionelle Röntgenaufnahmen, aber in der Praxis wird doch mehr und mehr am CT gemacht. Heutzutage geht z.B. die Diagnostik eines Polytraumas im CT viel schneller und besser. Überhaupt möchte ich lieber im Bereich der Großgeräte und in der Schnittbilddiagnostik arbeiten. Das klingt doch schon spannender, findest du nicht?“ redet sich Sabine richtig in Rage. Thomas versucht aufmerksam zuzuhören, obwohl er nur Bahnhof versteht. „Nur das mit der Strahlenbelastung finde ich nicht so gut“, erzählt Sabine unbeirrt weiter. „Aber da habe ich vor kurzem einen Artikel über ‚Low-Dose-CT‘ gelesen. Ist schon toll, wenn man das alles richtig gut kann. Aber ich habe noch immer nicht den Unterschied zwischen Single- und Multi-Slice verstanden.“ „Du weißt schon, dass ich aus einer anderen Branche komme und kein Wort verstanden habe, oder?“ fragt Thomas und nimmt sie in die Arme.

1. Was ist der Unterschied zwischen sequentiellen CT-Untersuchungen und Spiral-CT-Untersuchungen?
2. Mit welchem Wert wird die Strahlenabsorption im CT-Bild gemessen?
3. Was ist der Pitch?

5.1 Aufbau und Funktionsweise eines Computertomographen

K. Kara

5.1.1 Allgemeines und Möglichkeiten

Die Computertomographie (CT) ist ein Verfahren zur Erzeugung von Schnittbildern mittels Röntgenstrahlen. Aufgrund der rasanten Untersuchungszeit der modernen Geräte ist sie bei der Notfalldiagnostik die Methode der Wahl. Dabei wird das aufzunehmende Objekt der Strahlung ausgesetzt und die Schwächung bestimmt. In diesem Strahlengang befindet sich unterschiedliches Gewebe mit un-

terschiedlicher Dichte. Diese Dichtenunterschiede werden gemessen und in transversalen Körperschichten dargestellt.

Anders als bei den konventionellen Röntgenbildern (CR) entsteht hier eine überlagerungsfreie Darstellung unterschiedlicher Strukturen sowie eine räumliche Abgrenzung dieser in jeglicher Ebene. Demnach sind CT-Bilder Substitutionsbilder und konventionelle Bilder Summationsbilder. Somit können die genaue Zuordnung und das Ausmaß einzelner Organe und Pathologien bestimmt werden.

Jede aufgenommene Schicht besteht aus Voxeln und ist eine 2D-Darstellung. Ein **Voxel** setzt sich zusammen aus:

$$\text{Pixel} \times \text{Schichtdicke}$$

Dadurch bestehen einige Möglichkeiten der Nachbearbeitung der aufgenommenen Datensätze, wie die 3D-Darstellung, worauf später noch eingegangen wird (s. Postprocessing).

5.1.2 Geschichte

Der erste Computertomograph wurde in den 1970er Jahren von Sir Godfrey Hounsfield entwickelt, der für diese Entwicklung 1979 den Nobelpreis erhielt.

Finanziell unterstützt wurde Hounsfields von der Plattenfirma EMI, die die Beatles unter Vertrag hatte. Der erste Scanner wurde aus diesem Grund auch EMI-Scanner genannt, womit Schädel-CT's durchgeführt wurden.

Da die Computer damals noch nicht so gut entwickelt waren, war die Auflösung gering (80×80) und die Untersuchungszeit sehr lang (ca. 10 min/Bild). Jedoch war dies die erste Möglichkeit, große Hirnprozesse zu diagnostizieren, ohne den Patienten „zu öffnen“. Daher wurden die ersten Schädeluntersuchungen zum Ausschluss eines Tumors oder einer Blutung durchgeführt sowie zur Beurteilung der Ventrikelweite.

Heute werden zu Ehren von Hounsfield die Einheiten der Schwächungswerte in **Hounsfield Units** (HU) bzw. **Hounsfieldeinheiten** (HE) angegeben.

5.1.3 Aufbau

Der Computertomograph besteht aus vielen einzelnen Elementen, die jedoch alle zusammen fehlerfrei funktionieren müssen, um eine patientengerechte und hochqualitative Untersuchung durchführen zu können. Im Folgenden wird auf die wichtigsten Einzelteile eingegangen.

Gantry

Die Gantry ist das, was man außer dem Tisch sieht, wenn der Untersuchungsraum betreten wird (Abb. 5.1). Sie wird als das „Herz“ des Tomographen bezeichnet, denn unter der Abdeckung befinden sich Röntgenröhre, Blendensystem, Detektorsystem, Kühlsystem sowie mechanische Elemente. Die gesamte Gantry kann (je nach Gerätetyp) horizontal bis zu $\pm 30^\circ$ gekippt werden.

Bei einer CT rotieren die Röhren-Detektorsysteme mit einem Gewicht von 2–3 t (Dual-Sorce-Systeme sogar 4–5 t) um den Patienten. Durch die schnelle Röhrenrotation (bis zu $<0,3$ s/Rotation) entstehen hier immense Fliehkräfte.

Röntgenstrahler

Das Prinzip des Röntgenstrahlers wurde bereits im Kapitel 3 erläutert. Auch hier ist es ein Vakuumgefäß mit einer Anode und Kathode zur Erzeugung von Röntgenstrahlen. Für den CT wurde jedoch ein neuer Strahler konzipiert und gebaut. Es handelt sich hier um einen sog. Drehgehäusestrahler. Hier rotiert nicht nur die Anode, sondern das gesamte Gehäuse, und somit auch die Kathode. Dadurch, dass die Anode die Außenwand des Gehäuses bildet, findet eine direkte Kühlung statt. Demnach verlängert und verbessert sich die Fähigkeit der Röhrenleistung. Die Kühlflüssigkeit ist Öl (Abb. 5.2). Eine weitere Besonderheit bei diesen Strahlern ist die elektromagnetische Fokussierung des Elektronenstrahls, d. h. der Elektronenstrahl wird auf dem Weg von der Kathode zur Anode ständig so abgelenkt, dass auf der Anode ein gewünschter Brennfleck bzw. eine gewünschte Brennfleckgröße entstehen. Diese Methode der Ablenkung wird auch genutzt, um zwei Brennflecke zu erzeugen (siehe hierzu z-sharping/Springfokus).



Abb. 5.1 Gantry. Zu diesem Bild ist ein Video online verfügbar auf www.springermedizin.de/vzb-Hartmann. (Mit freundlicher Genehmigung von Mario Voss, Siemens)

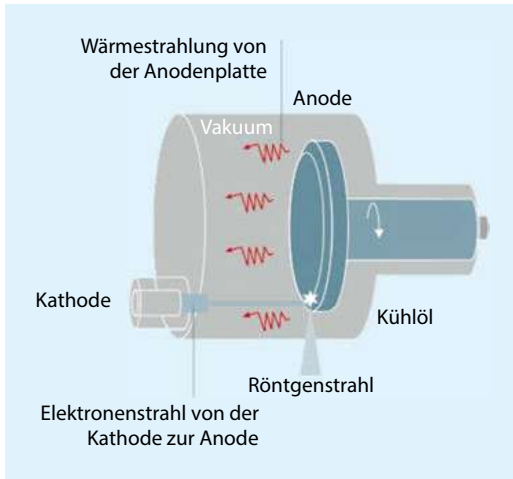
Generator

Die wichtigste Aufgabe des Generators ist es, kontinuierlich die gewünschte Leistung zu gewähren. Es müssen Spannungen von 80–140 kV erzeugt werden. Auch die Röhrenstromerzeugung (mA) muss stabil und schnell erfolgen. Die zeitliche Komponente spielt bei beiden Parametern eine wichtige Rolle, denn die Untersuchungen laufen heute sehr schnell ab. So muss während einer schnellen Untersuchung umso schneller die Dosismodulation erfolgen. Dosismodulation bedeutet die Anpassung von kV und mA an das durchstrahlte Objekt. Beispielsweise benötigt man bei einem CT-Abdomen für den Oberbauch weniger Dosis als für die Beckenpartie, sodass hier eine Hochregulierung der Parameter erforderlich ist. Somit wird erstens die geringere Dosis für den Oberbauch eingehalten, und zweitens wird die Bildqualität im Gesamten gewährleistet. Dazu später mehr.

Blendensysteme

Die Blendensysteme bestehen aus Blei und unterscheiden sich in ihrer Form und Funktion.

Am Fokus befinden sich Blenden zur Einstellung des Fächerstrahls. Dies erlaubt die Kontrolle der auf den Patienten fallenden Dosis. Feste Blenden sorgen für das Nichtüberschreiten der maximal erlaubten Fächerbreite. Hinter dem Patienten, vor dem Detektorsystem, sind flexible Blenden vorhanden. Diese dienen der Schichtdickeregulierung. Die Streustrahlenabsorption erfolgt durch kleine Bleilamellen zwischen den Detektorelementen. Ähnliches haben Sie



■ **Abb. 5.2** Aufbau eines CT-Röntgenstrahlers. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)

bereits im Kapitel „Konventionelle Röntgendiagnostik (► Kap. 3)“ als Streustrahlenrastrer kennengelernt.

Patiententisch

Der Patienten- oder Untersuchungstisch dient der optimalen Positionierung des Patienten. Er kann sowohl in der Höhe als auch in der Längenausrichtung verändert werden. Wichtig sind die exakte Positionierungsmöglichkeit und der stabile Tischvorschub während einer Untersuchung. Die modernen Scanner können mit einem geeigneten Tisch eine Strecke von bis zu 2 m untersuchen. Auch können diese je nach Modell bis zu ca. 240 kg belastet werden.

Bildrechner

Die technische Steuerung erfolgt durch den Bildrechner. Nachdem die Akquirierung auf gewünschte Weise erfolgt, verändert diese Rechereinheit die Rohdaten mittels Algorithmen – ebenfalls in gewünschter Form. Die Rohdaten werden bearbeitet und umgerechnet, sprich rekonstruiert. Auf die Rekonstruktionsalgorithmen wird in ► Abschn. 5.1 explizit eingegangen. Auch dient der Bildrechner als kurzer Zwischenspeicher zur späteren Rekonstruktionsmöglichkeit.

Konsole/Workstation

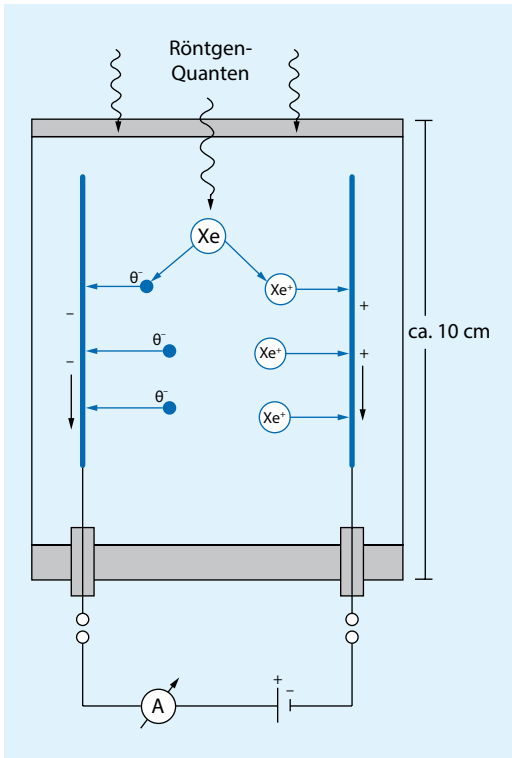
Diese Einheit dient der Durchführung der Untersuchung. Nach der Patientenlagerung und -einstellung

kann die gewünschte Region bzw. das gewünschte Organ mit den entsprechenden Parametern akquiriert werden. Es gibt nur eine Haupt-Workstation. Manche Abteilungen haben zur weiteren Bearbeitungen bzw. Rekonstruktionen ein angeschlossenes zweites Monitorsystem.

Detektorsystem/-typen

Die primäre Aufgabe eines Detektors besteht darin, die durch ein Objekt geschwächte Röntgenstrahlung zu registrieren bzw. zu messen (also die Strahlung, die durch den Patienten durchgedrungen ist), und muss sich demnach hinter dem durchstrahlten Objekt befinden. Diese Strahlen werden in elektrische Signale umgewandelt. Hinter dem Detektorsystem befinden sich das DAS (= Daten-Akquisitionssysteme) zur Erfassung dieser Signale und Weiterleitung an den Rechner, wo die Erzeugung bzw. Rekonstruktion der digitalen Bilder stattfindet.

Im Folgenden werden der Aufbau und die Funktion bestimmter Detektorsysteme vorgestellt. Auch hier kam es im Laufe der Zeit zu Veränderungen. Zu Beginn bestanden die Detektoren aus Hochdruck-Ionisationskammern, die mit Xenon gefüllt waren. Xenon ist ein Edelgas, weshalb diese Detektoren **Gasdetektoren** genannt wurden. Xenongas wurde durch die Röntgenstrahlen ionisiert (► Abb. 5.3). Die Elektronen-Ionenpaare wanderten zu den Hochspannungs- und Messelektroden. Elektronen wanderten zu den Hochspannungselektroden und Ionen zu den Messelektroden. Diese Elektroden waren auf dem Detektor abwechselnd gereiht und besaßen eigene Messkanäle, wodurch die Datenaufnahme parallel erfolgte. Die Zwischenräume bildeten die eigentlichen Detektorelemente. Der gemessene Signalstrom wurde zur Bildentstehung dem Rechner zugeführt. Jedoch brachte dieses Detektormodell auch mehrere Probleme mit sich. Das größte Problem lag in der geringen Quanteneffizienz. Nur 50 % der einfallenden Röntgenstrahlung konnte im Detektor erfasst werden. Somit dienten wenige Signale der Bildentstehung. Dies hatte zur Folge, dass der Patient einer höheren Strahlenexposition unterlag. Ein weiteres Problem entstand, als die Mehrzeilen-CT entwickelt wurde, denn das Bauen mehrzeiliger Gasdetektoren war technisch nicht möglich.

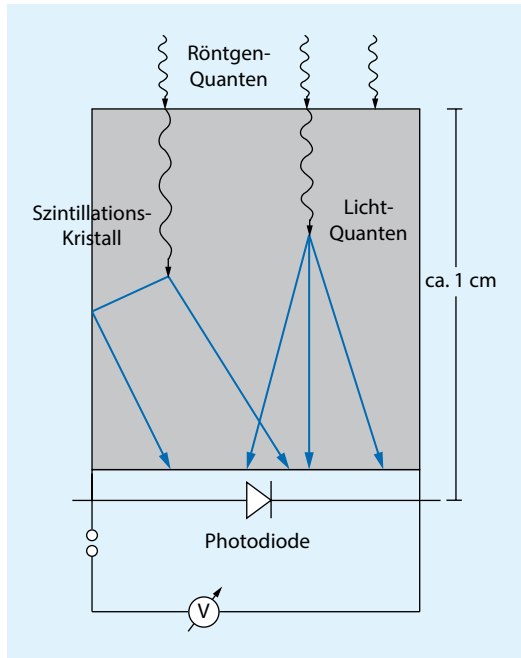


■ Abb. 5.3 Grundaufbau von Detektorsystemen

Die Detektoren der Computertomographen der Mehrzeilengeneration sind **Festkörperdetektoren mit Szintillationskristallen** (■ Abb. 5.4). Der Festkörperdetektor bzw. die -elemente bestehen aus keramischem oder kristallinem Material (z. B. Cadmium-Wolframat oder Cäsium-Iodid), das auf einer Photodiode sitzt. Zwischen den einzelnen Detektorelementen befinden sich zur Abtrennung Wolfram- oder Molybdänbleche.

Sobald Röntgenstrahlung auf den Kristall fällt, kommt es zu einer Ionisation. Es entstehen Lichtblitze. Die Photodiode nimmt diese auf und wandelt sie in elektrische Signale um. Nach der Signalverstärkung kommt es durch die DAS zur Signalweiterleitung an das Rechnersystem, wo die Bilderzeugung stattfindet.

Wahl und Vorteil der Keramikdetektoren sind die hohe Quanteneffizienz, also die hohe Absorption der einfallenden Röntgenstrahlen. Somit entstehen viele Lichtblitze, die der Bildentstehung dienen. Weitere wichtige Aspekte sind die schnelle Abklingzeit des Signals und das geringe Nachleuchten des Kristalls nach



■ Abb. 5.4 CT-Festkörperdetektor mit Szintillationskristallen

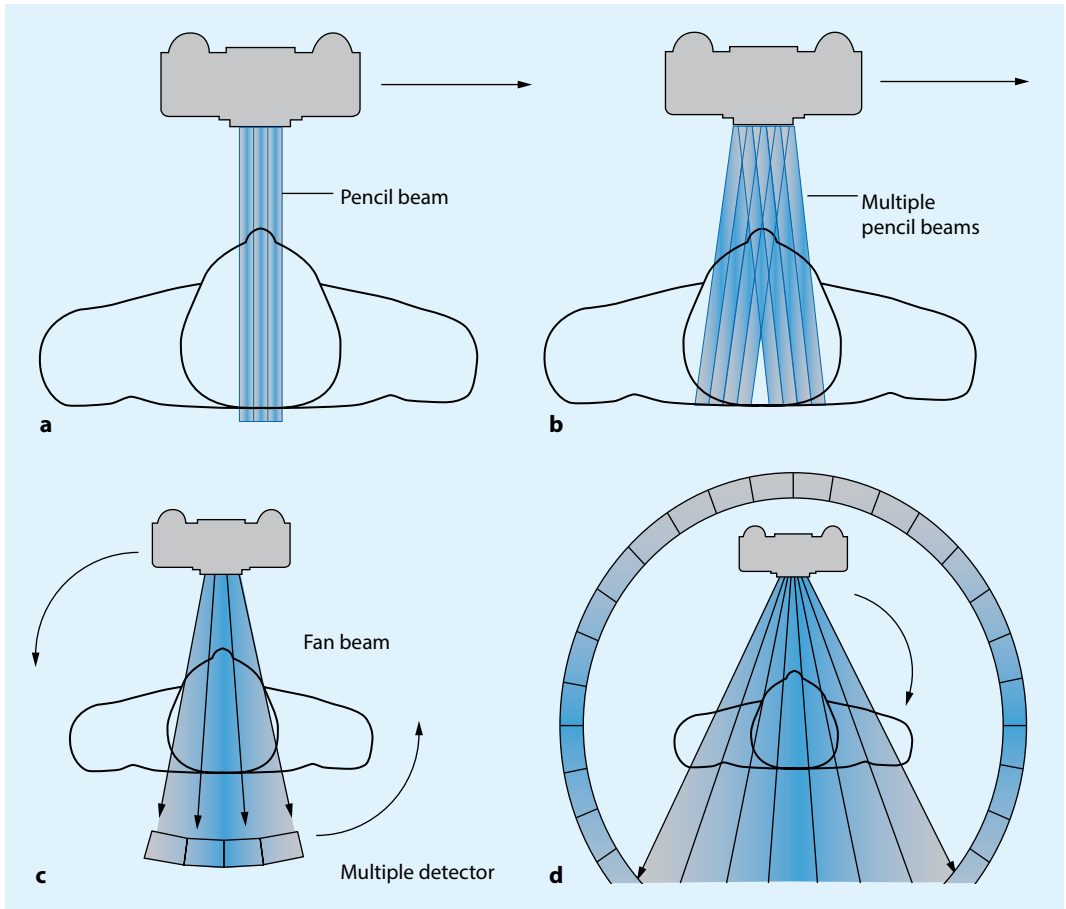
der Ionisation. Diese Punkte sind für die moderne Gerätetechnologie und für die hohe Ortsauflösung essenziell, denn die Rotationszeiten sind sehr gering (ca. 0,3 s pro Umlauf) und die Anzahl der Projektionen, durch mehrzeilige Detektoren, sehr hoch.

Auf die zwei verschiedenen Detektortypen „Fixed Array Detektor“ und „Adaptive Array Detektor“ wird im ► Abschn. 5.1.5 „Multislice-CT“ eingegangen.

5.1.4 Gerätegeneration

Die bereits erwähnt, kam der erste CT in den 1970er Jahren auf den Markt. Die Aufnahme erfolgte im Translation-Rotations-Prinzip. Die Röntgenstrahlung wurde in einem Nadelstrahl ausgesandt, durchstrahlte das Objekt und traf auf den Detektor. Die Röntgenröhre und der Detektor wurden danach seitlich verschoben (→ Translation) und das Objekt wieder durchstrahlt. Danach erfolgte eine Rotation um einen bestimmten Winkel und die erneute Akquisition.

Das Prinzip der 1. Generation wurde in der nächsten, der 2. Generation, beibehalten (■ Abb. 5.5a, b). Der wesentliche Unterschied bestand darin, dass



■ Abb. 5.5a–d Gerätegenerationen. a Erste Generation; b zweite Generation; c dritte Generation; d vierte Generation

die Röntgenstrahlung in einem Teilfächerstrahl emittiert wurde und statt einem Detektor mehrere Detektoren eingesetzt wurden. Dies führte zu erster enormer Zeitreduktion von ca. 5 min/Schicht auf ca. 20 s/Schicht!

Die ersten beiden Generationen konnten lediglich für Schädeluntersuchungen eingesetzt werden.

Die Technik der 3. Generation ist die etablierte Technik, die heute angewandt wird (■ Abb. 5.5c). Diese Computertomographen werden auch Rotate-Rotate-Geräte genannt. Hier bewegen sich Röntgenröhre und Detektor simultan, also gleichzeitig um den Patienten. Die Röntgenstrahlung wird als Fächerstrahl emittiert. Jedoch verbirgt sich auch hier eine Besonderheit: der Fächerstrahl erfasst den gesamten Körperquerschnitt. Von nun an konnten weitere Organe untersucht werden.

Die Rotate-Stationary-Geräte wurden in der 4. Generation entwickelt (■ Abb. 5.5d). Neu war hier der 360°-Detektor in Form eines Ringes. Die Detektorelemente deckten die gesamte Gantry ab. Somit brauchte nur noch der Röntgenstrahler um den Patienten zu rotieren. Diese Technik konnte sich jedoch nicht etablieren. Die Kosten waren zu hoch, die Bildqualität nicht optimal. Sie wurde aufgegeben.

5.1.5 Untersuchungstechniken

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine computertomographische Untersuchung durchzuführen. Dies hängt vom Gerätemodell und der Untersuchung bzw. der klinischen Fragestellung ab. Wichtig

ist jedoch bei jeder Untersuchung die Lagerung! Das aufzunehmende Objekt muss isozentrisch gelagert werden, d. h. in der Mitte des Strahlengangs liegen oder besser: Durch die isozentrische Lagerung befindet sich das aufzunehmende Objekt während der Aufnahme und der Rotation immer im Zentrum des Strahlengangs. Das ist ein sehr wichtiger Punkt für die Dosisregelung, die Ortsauflösung und somit die Bildqualität.

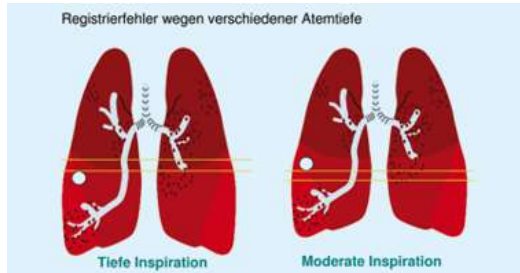
Der eigentliche Beginn einer jeden Untersuchung ist die Aufnahme eines Übersichtsbildes, dem Topogramm, auch Scout oder Surview genannt. Auf dieser Übersicht erfolgt die Eingrenzung des zu untersuchenden Bereichs mittels eines „Rechtecks“, der Range oder Field-of-View (FOV). Dieser Bereich wird mit den bereits voreingestellten Parametern aufgenommen. Auf die Parameter wird separat eingegangen. Sehr wichtig ist sich vor Augen zu halten, dass die Range in der cranio-caudalen Ausrichtung die Enddosis mitbeeinflusst, denn:

➤ **Je länger/größer die Range und somit die Scanstrecke, desto länger die Bestrahlungsdauer und höher die Strahlenbelastung!**

Sequenz-CT

Die Technik der sequenziellen Aufnahme ist die erstentwickelte Technik. Die wird auch „Step and Shoot“ genannt. Es werden Schicht für Schicht transversale/axiale Aufnahmen durchgeführt. Zwischen zwei Aufnahmen ist eine Tischbewegung nötig – axiale Schicht → Tischbewegung → axiale Schicht → „Step and Shoot“. Vorteil ist hier die Möglichkeit der direkten Bildanschauung des Untersuchers und Befunders, da die zu rekonstruierende Datenmenge gering ist und sofort erfolgen kann. Ein großer Nachteil ist jedoch die lange Untersuchungszeit. Auch besteht das Risiko der Nichterfassung kleinster Details zwischen zwei Schichten durch eine nichtkontinuierliche Datenerfassung (Abb. 5.6). Dadurch besteht keine Möglichkeit der dreidimensionalen Darstellung.

Haupteinsatzgebiet ist mittlerweile die Intervention und prospektiv getriggerte Kardio-CTs. Teilweise werden Schädel-CTs heute noch sequentiell akquiriert, um mit gekippter Gantry die Augenlinsen als sehr strahlensensible Strukturen nicht dem Direktstrahl auszusetzen. Durch moderne Geräte-



■ **Abb. 5.6** Nichtkontinuierliche Datenerfassung aufgrund unterschiedlicher Atemtiefe. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)

techniken wird diese Technik jedoch zunehmend durch die der Spiralaufnahmen ersetzt.

Dynamische CT

Dynamische CT-Aufnahmen erfolgen hauptsächlich auch in sequenzieller Technik. Der Unterschied besteht darin, dass nur eine ausgewählte Schichtposition kontinuierlich aufgenommen wird. Dadurch ist es möglich, beispielsweise Flussmessungen durchzuführen und somit physiologische Vorgänge zu repräsentieren und zu beurteilen. Diese Messungen können nur mithilfe von Kontrastmitteln erfolgen. Durch das Kontrastmittel wird der Blutfluss dargestellt, sodass die Kinetik erfasst und gemessen wird. Es können unter anderem Aussagen über Organperfusionen oder auch über die Herzauswurfrate („Cardiac output“) getroffen werden. Eine sehr große und essentielle Rolle spielt die dynamische CT-Untersuchung bei der „Stroke Unit“, also für akute Schlaganfallpatienten im Zeitfenster von 4,5 h nach Erstsymptomatik. Hier ist die sehr schnelle interdisziplinäre Zusammenarbeit lebenswichtig, denn „TIME IS BRAIN“! Mittels der Computertomographie und der Perfusionsmessung des Gehirns kann das nicht-durchblutete Hirnareal detektiert und das dazugehörige Stromgebiet bzw. die Arterie, die dieses Areal versorgen sollte, mittels spezieller Medikamente im Anschluss therapiert werden (Lysetherapie).

Die Bolustriggerung ist ebenfalls eine dynamische Aufnahmetechnik. Auf der gewählten Schichtposition wird kontinuierlich die Kontrastmittelanreicherung im fokussierten Gefäßlumen gemessen. Bei Erreichen der voreingestellten und vorbestimmten Dichte (HU) startet das Gerät automatisch und akquiriert die gewünschte Region.

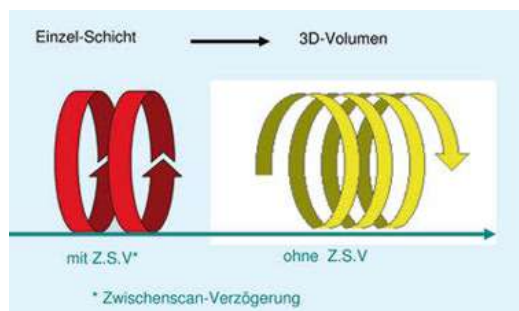


Abb. 5.7 Singleslice-CT. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)

Spiral-CT/Singleslice-CT (SS-CT)

Mit der Einführung der Spiral-CTs in den frühen 1990er Jahren kamen neue Möglichkeiten in den Klinikalltag. Die Datenerfassung erfolgte nicht mehr „nur“ sequenziell, sondern auch spiralförmig, helixartig oder helikal genannt. Mit kontinuierlichem Tischvorschub und kontinuierlicher Röhrenrotation wird das aufzunehmende Objekt im gesamten Volumen erfasst, und es entstehen keine Datenlücken. Zur Erfassung der Daten ist eine Detektorreihe vorhanden → Singleslice (Abb. 5.7). Dank der Spiralakquisition erfolgt die Abdeckung der Untersuchungsregion sehr schnell. Dadurch verkürzen sich die Untersuchungszeiten so stark, dass innerhalb einer Atemphase die Untersuchung durchgeführt werden kann. Automatisch kann die Kontrastmitteldosis ebenfalls reduziert werden. Aufgrund der lückenlosen Volumenabdeckung bestehen nun die Möglichkeiten der überlappenden Rekonstruktion – die multiplanaren Reformation (2D) und die 3D-Darstellung.

Multislice-CT (MS-CT)

1998 kam der erste MS-CT auf den Markt, ein „4-Zeiler“. Hier sind vier Detektorreihen vorhanden. Dies bedeutet, dass bei einer Röhrenrotation um den Patienten direkt vier Schichten erfasst werden, also eine größere Volumenabdeckung stattfindet (Abb. 5.8). Somit bekommt man eine schnellere Volumenerfassung und dadurch kürzerer Untersuchungszeiten, folgend auch wieder eine KM-Reduktion. Einen weiteren Vorteil bringen die Multislices in der Nachverarbeitung. Durch die Aneinanderreihung mehrerer Detektoren gelingt eine isotrope Voxelgeometrie, was wichtig für die

3D-Darstellung ist. Isotrop bedeutet, dass alle Kantenlängen gleich groß sind. Dadurch ist eine gute Ortsauflösung gegeben.

Die Detektoren der MS-CT unterscheiden sich in ihrer Form und ihrem Typ. Es gibt zwei Detektorarten, „Fixed Array Detektor“ und „Adaptive Array Detektor“.

- **Fixed Array Detektor** (Abb. 5.9): Feste Größen der Detektorelemente pro Detektorzeile. Durch die Anwahl bestimmter Detektorzeilen kann die Schichtdicke bestimmt werden.
- **Adaptive Array Detektor** (Abb. 5.9): Die Größen der einzelnen Detektorelemente nehmen von innen nach außen zu. Dies führt zu der Möglichkeit, einzelnen Elemente und Zeilen miteinander zusammenzuschalten. Somit besteht die Option unterschiedlicher Schichtdicken. Durch den matrixartigen Aufbau der Detektorelemente wird dieser Detektor auch „Matrix-Detektor“ genannt.

Wichtige Parameter und Zusammenhänge im Spiral-CT

Wie bereits beschrieben bewegen sich bei Spiral-CTs der Patiententisch und der Scanner kontinuierlich. Durch den gleichmäßigen Tischvorschub erfolgt eine spiralförmige Datenaufnahme mit den o.g. Vorteilen. Jedoch spielen hier viele Parameter und Elemente eine wichtige Rolle:

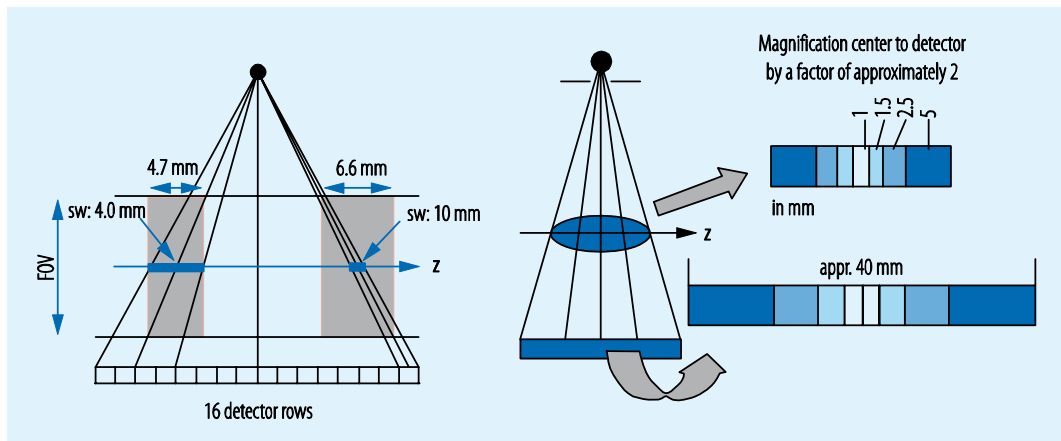
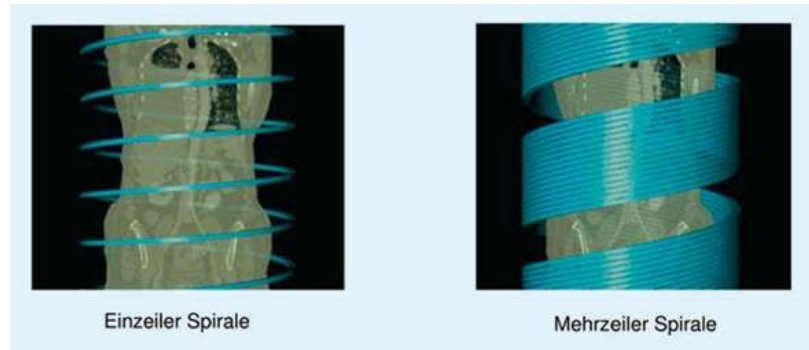
- **Parameter zur Datenakquisition**
- **Pitchfaktor (p)**

$$p = \frac{\text{Tischvorschub}}{\text{Rotation}} / \text{Gesamtkollimation}$$

(meist 1,5)

Der Pitchfaktor bestimmt, ob eine Datenakquisition überlappend ($p < 1$), lückenlos ($p = 1$) oder mit Datenausparung, sog. Gap, ($p > 1$) erfolgt und reguliert die Schnelligkeit des Tischvorschubs und somit auch die Untersuchungszeit. Die Dosis wird zwar sekundär, aber ebenfalls beeinflusst. Bei einer überlappenden Volumenerfassung werden mehr Daten erfasst als bei einer Volumenerfassung mit kleinen Lücken. Somit wird für überlappende Aufnahmen mehr Strahlung angewendet als für die mit „Gaps“.

■ **Abb. 5.8** Multislice-CT.
(Mit freundlicher Genehmigung Siemens AG,
Healthcare Sector)



■ **Abb. 5.9** Fixed und Adaptive Array Detektor. (Aus Lecoq 2011)

■ ■ Röhrenspannung (kV)

Sie wird zwischen Kathode und Anode angelegt und bestimmt die Durchdringungsfähigkeit der Strahlung durch die Materie. Zur Wahl stehen stufenweise Werte zwischen 80 kV und 140 kV. Bei Untersuchungen des Parenchyms werden i. d. R. 120 kV angewählt, bei CT-Angiographien (CT-A), also den Gefäßdarstellungen, oder knöchernen Untersuchungen und Untersuchungen von Kindern meist 80 kV.

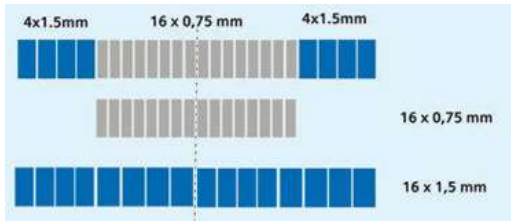
Als Beispiel soll auf die CT-A eingegangen werden. Wir wissen bereits, dass mittels der Computertomographie die Schwächung der einzelnen Organe in einem Strahlengang dargestellt wird. Die Abgrenzung erfolgt durch die unterschiedliche Dichte einzelner Strukturen in einem Querschnitt. Die Dichteunterschiede werden in „Hounsfield Units“ (HU) gemessen, auf die separat eingegangen wird (► Abschn. 5.2). Bei der CT-A wird der Fokus auf die Gefäße gelegt. Die Gefäße werden durch

das intravenös injizierte Kontrastmittel dargestellt. (Das hier anzuwendende Kontrastmittel sowie diverse andere Kontrastmittel werden ebenfalls in einem Extrakapitel näher erläutert, ► Kap. 8) Das Kontrastmittel ist iodhaltig und hat eine hohe Dichte.

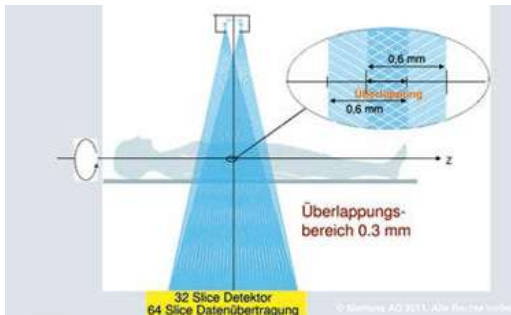
➤ **Je geringer die Spannung angewählt wird, umso geringer ist die Durchdringungsfähigkeit des Kontrastmittels und umso schneller ist die hyperdense, (knall)helle Darstellung der Gefäße erreicht.**

Das hat zur Folge, dass sich die Dosis verringert und die Kontrastmittelmenge reduziert.

Warum 120 kV bei Organuntersuchungen? – Diese „hohe“ Spannung ist für die meisten Patienten und Untersuchungen notwendig. Im Abdomen befinden sich viele verschiedene Organe und Strukturen mit unterschiedlicher Dichte. Um eine genaue



■ **Abb. 5.10** Kollimationsvarianten. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)



■ **Abb. 5.11** Schemazeichnung zur z-sharp-Technologie. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)

Unterscheidung und Abgrenzung treffen zu können bzw. um viele Information zu erlangen, hat sich eine Röhrenspannung von 120 kV bewährt.

■ Röhrenstrom-Zeit-Produkt (mAs)

Menge der Strahlung $\times$ Rotationszeit

Dieses ist wichtig für den Kontrast und für die Ortsauflösung.

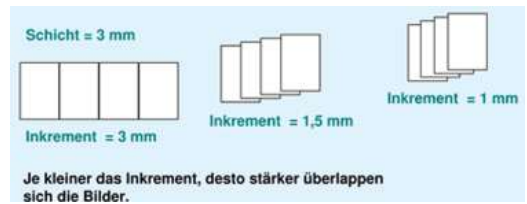
➤ **Je dicker das durchstrahlte Objekt, desto mehr mAs wird benötigt.**

■ Rotationszeit (ms)

Dies ist die Zeit, die die Röhre samt Detektorsystem braucht, um sich einmal um 360° zu drehen. Sie entscheidet über die Untersuchungsdauer und die zeitliche Auflösung eines Bildes.

■ Scanzeit (s)

Sie gibt die eigentliche Untersuchungszeit an. Die Scanzeit ist abhängig von der Scanstrecke, vom Pitch und der Rotationszeit. Je länger die Scanzeit,



■ **Abb. 5.12** Wahl der Inkrementgröße. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)

desto langsamer die Untersuchung und somit höher die Dosis.

➤ **Merksatz: Je langsamer man durch den Regen läuft, desto nasser wird man. → Je langsamer die Untersuchung, desto mehr Strahlen treffen den Patienten.**

■ Kollimation

Eine Kollimation wird erreicht durch ein System aus Blenden und Detektorelementen. Die Blenden dienen der Bündelung der Strahlung und der Streustrahlenreduktion vor dem Detektor. Das Wesentliche, das durch die Kollimationswahl erreicht wird, ist die Aktivierung der Detektorreihen und der Detektorelemente. Die Detektorelemente haben unterschiedliche Größen. Durch die Wahl der Detektoren wird die Schichtdicke beeinflusst. Die Schichtdicke kann nachträglich max. auf die Größe des kleinsten Detektorelements reduziert werden.

Ein Beispiel: 16-Zeiler-CT:

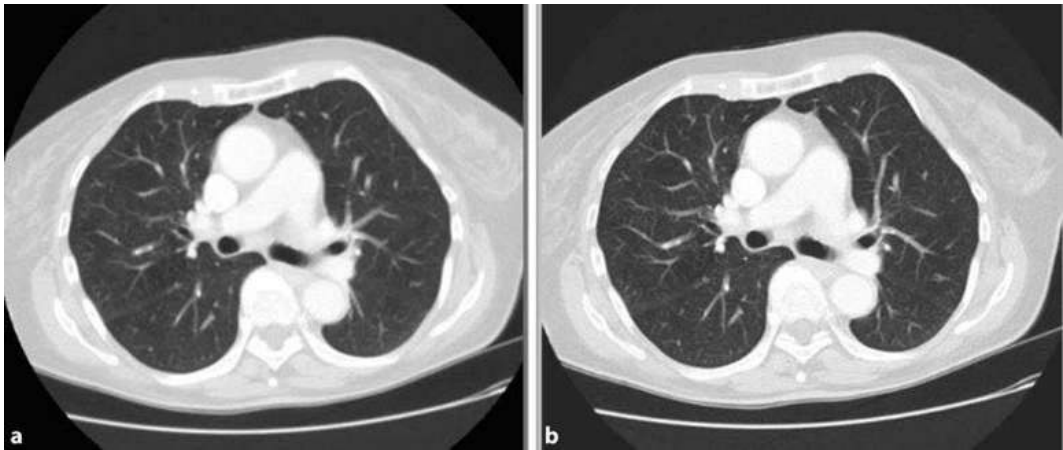
Es gibt zwei Kollimationen zur Auswahl (Abb. 5.10):

- $16 \times 0,75$ mm
- $16 \times 1,5$ mm

Bei der Wahl der $16 \times 1,5$ mm Kollimation beträgt die kleinste Schichtdicke 1,5 mm. Wird eine Untersuchung in 3 mm akquiriert, können die Bilder nicht kleiner als 1,5 mm nachgerechnet werden.

■ z-sharp-Technologie

Spring-Fokus, auch Fyling Focal Spot oder double-z-sampling genannt, ist eine neuartige Technologie, die durch ein elektromagnetisches Feld die Elektronenbahn ablenkt. Dadurch entstehen zwei Brennflecke auf der Anode. Der Abstand beider



■ **Abb. 5.13** Weicher (links) und scharfer (rechts) Kernel im Vergleich

Brennflecke beträgt die Hälfte der dünnsten angewählten Kollimation, sodass eine Versetzung, aber auch eine um die Hälfte überlappende Akquisition erfolgt (■ **Abb. 5.11**). Somit kann mit einem 64-Zeiler-CT die doppelte Volumenabdeckung erfolgen, sprich 128 Schichten akquiriert werden. Die überlappende Aufnahmetechnik bringt eine hohe Ortsauflösung mit sich, denn es kommt zu einer Addition der Bildinformationen auf derselben Schicht.

■ **Parameter zur Bildrekonstruktion**

■ **SureView™ (Fa. Siemens)**

Dies ist eine Software zur Spiralbildrekonstruktion. Dank ihr erfolgt die Anpassung des mA automatisch an den Tischvorschub der jeweiligen Untersuchung. Diese ist wichtig, da die Untersuchungsstrecken heute ziemlich lang sind (bis zu 2 m) und die Scangeschwindigkeit und die Bildqualität in Relation zueinander stehen. Somit hat der Pitchfaktor keine Relevanz mehr für die Bildqualität. Die gewünschte mAs wird eingestellt, und je nach Untersuchung und Patient wird die effektive mAs genutzt.

■ **Schichtdicke**

Der Untersucher wählt eine Schichtdicke, in der die Bilder rekonstruiert werden sollen. Die Schichtdicke kann minimal der Dicke des kleinsten Detektorelementes entsprechen und wird durch die Wahl der Kollimation bestimmt.

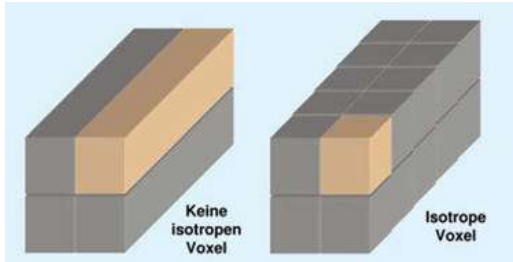
■ **Inkrement**

Über das Inkrement legt der Untersucher fest, wie stark die Überlappung bei der Rekonstruktion, der einzelnen Schichten sein soll (■ **Abb. 5.12**). Für weitere 3D-Nachbearbeitungen sollte ein Inkrement von 20–30 % gewählt werden. Bsp.: Die Schichten sollen in 1,5 mm rekonstruiert werden. Hier sollte das Inkrement ca. 1 mm betragen.

■ **Faltungskern/Kernel, Rekonstruktionsfilter oder Algorithmus**

Der unter Kernel bekannte Parameter ist ein Rechenalgorithmus und dient bei der Rekonstruktion zur Hervorhebung bestimmter Strukturen. Mit einem scharfen Faltungskern werden die Kanten der knöchernen Strukturen und Lungenstrukturen im Lungenfenster betont, sodass diese genau abzugrenzen sind und beurteilt werden können. Kleinste Details sind trennscharf dargestellt. Bei der Weichteildarstellung, sprich bei parenchymalen Organen, wird ein weicher Kernel angewählt. Dieser glättet optisch das Bild und dient der Detailerkennbarkeit der Strukturen mit geringen Dichteunterschieden.

Das Beispiel zeigt einen Vergleich zweier Faltungskerne (■ **Abb. 5.13**). Es handelt sich um eine Abbildung der Fa. Siemens. Die Buchstaben geben die Körperregion an und die Zahlen die Stärke der Kantenbetonung. Das kleine „s“ ist nicht separat anwählbar. Es steht für eine langsame (slow) Röhrenrotation. Im Gegenzug gibt es Kernel mit der Endung „f“ für „fast“.



■ **Abb. 5.14** Unterschied zwischen isotropen und nicht-isotropen Voxel. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)

■ Fensterung

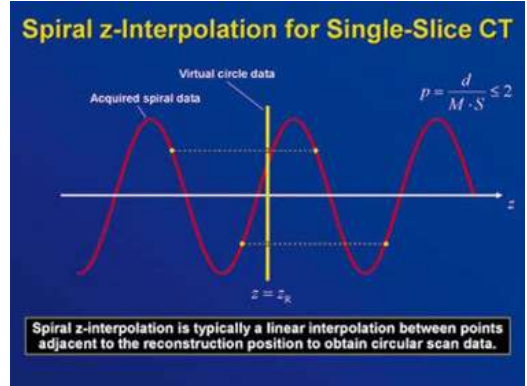
Aufgrund der begrenzten Wahrnehmung des menschlichen Auges wird mithilfe der Fensterung eine Eingrenzung der Grauwerte durchgeführt. Die Bandbreite der Grauwerte ist abhängig von der zu untersuchenden Region bzw. dem zu untersuchenden Organ. Je nachdem liegt der Fokus nämlich woanders. Der Fokus wird hier als „Center C“ bezeichnet. Das Spektrum der genutzten Grauwerte wird „Window Width WW“ genannt. Der Center ist der „Nullpunkt“ des Windows. Dank dieser Einstellung kann man sich auf die Dichte der interessierten Organe beziehen und diese abgrenzen und beurteilen. Im Kapitel „Rekonstruktion“ erfolgen weitere Erklärungen.

■ Isotrope Auflösung

Auf die isotrope Voxelgeometrie wurde bereits eingegangen. Ein isotroper Voxel kann verglichen werden mit einem Würfel; alle Kanten sind gleich lang (■ Abb. 5.14). Diese Würfel sind wichtig für die 3D-Rekonstruktionen.

■ z-Interpolation

Dieses Messprinzip erfolgt durch eine Software im Hintergrund nach bzw. während einer Spiralakquisition und ermöglicht erst die lückenlose Datenerfassung. In ■ Abb. 5.15 ist zu erkennen, dass durch eine Spirale keine 360°-Erfassung stattfindet. Dank der z-Interpolation werden Daten innerhalb einer 360°-Rotation, die außerhalb einer Bildebene liegen, auf eine Bildebene, die z-Achse, „kopiert“ (■ Abb. 5.15). Dies erfolgt, indem durch einen Rechenalgorithmus eine zweite Spirale berechnet wird. Diese zweite Spirale liegt 180° zur



■ **Abb. 5.15** Prinzip der z-Interpolation

gemessenen Spirale. Die gescannte und die berechnete Spirale zusammen ermöglichen eine 360°-Abdeckung auf einer Ebene, sodass die Bildpunkte geringe Abstände zueinander haben und dadurch eine gute Ortsauflösung gegeben ist. Auch werden die aufgrund der permanenten Tischbewegung entstehenden Bewegungsartefakte hiermit eliminiert. Nach der z-Interpolation kommt es zu der nächsten Berechnung. Die Mittelwerte der Bildpunkte werden zur Bildrekonstruktion/Bildberechnung bestimmt.

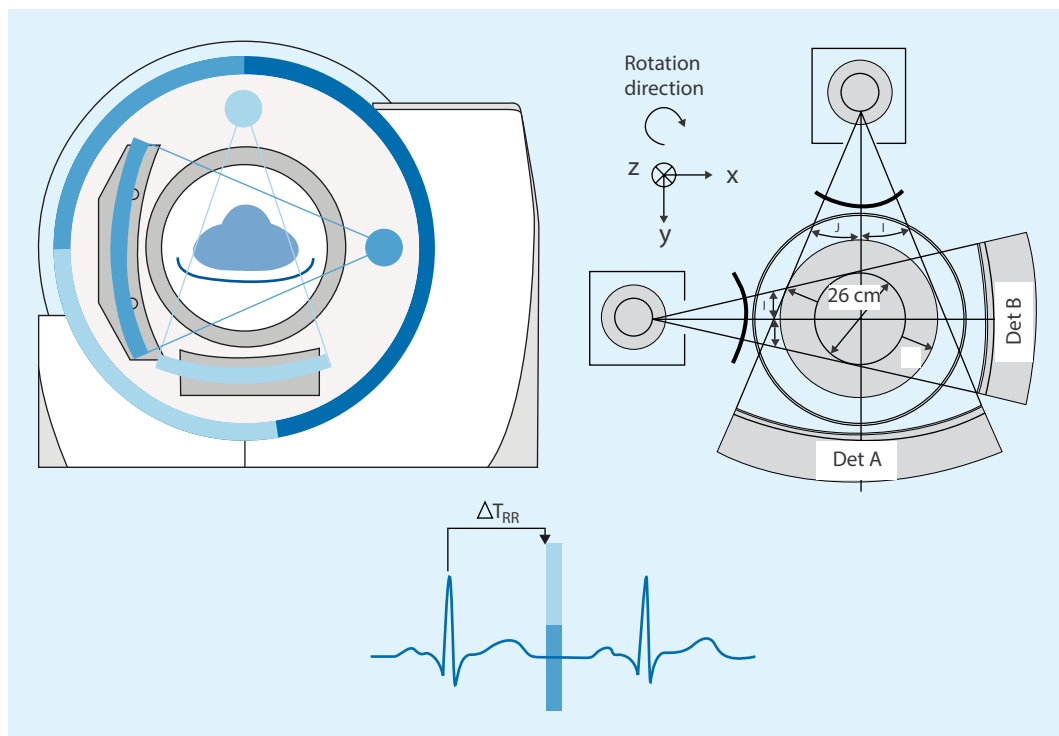
Dual-Source-CT (DS-CT)

Beim DS-CT sind in der Gantry zwei Röhren im 90°-Winkel mit zwei dazugehörigen, gegenüberliegenden Detektoren vorhanden (■ Abb. 5.16).

Beide Röhren arbeiten parallel, jedoch mit unterschiedlichen Energien; Röhre 1 mit 80 kV und Röhre 2 mit 140 kV. Es entstehen zwei Bilder. Der unterschiedliche Röhrenstrom führt zu unterschiedlichen Schwächungswerten. Eine erhöhte Strahlenexposition ist nicht vorhanden, denn es erfolgt je eine automatische mAs-Anpassung. Durch zwei separate Aufnahmeeinheiten ist die Aufnahmezeit sehr kurz, was ein enormer Vorteil für die Ortsauflösung ist, besonders für sich unwillkürlich bewegende Organe wie das Herz. Diese Technik bietet jedoch noch weitere Möglichkeiten und Vorteile:

■ Blending Image

Addition beider Bilder unterschiedlicher Energien. Ein „Mischbild“ oder „Mischenergiebild“ entsteht, welches einem 120 kV-Bild äquivalent ist.



■ **Abb. 5.16** Prinzip des Dual Source-CT (DS-CT). (Aus Flohr et al. 2008)

■ Virtual Non Contrast

Genaue Detektion von Iod. Diese kann von beiden Bildern subtrahiert werden. Es entsteht ein „natives“ Bild, also so, als ob die Untersuchung ohne KM gelaufen wäre. Dem entsprechend sind keine separaten nativen Aufnahmen mehr vorher nötig. Einsatz beispielsweise in Leber- und Nierendiagnostik.

■ Iodbild

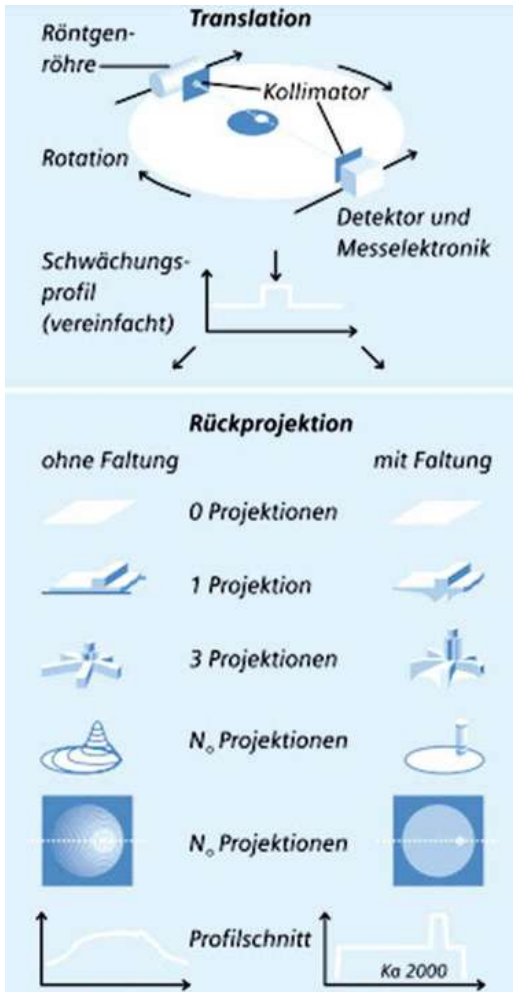
Alternativ zur virtuellen Entfernung der Iodinformationen aus dem Bild kann diese Information auch farblich kodiert werden. Bsp.: Evaluation von myokardialer Ischämie, also einer Minderdurchblutung des Herzmuskels, oder Pulmonalperfusion, also Durchblutung der Lunge.

■ Material-Charakterisierung

Neben Iod können auch andere Materialien durch diese sog. Materialzerlegung differenziert und charakterisiert werden. Ein Beispiel aus der Urologie: Ein Stein in den Harnwegen kann ein Harnleiter-

stein, ein Harnsäurestein oder ein Mischprodukt von beidem sein.

Verschiedene Firmen haben unterschiedliche Möglichkeiten entwickelt, um die Dual-Energy-Technik anzuwenden. Diese Aufnahmetechnik und der Dual-Source-CT wie oben beschrieben, mit Zwei Röhren-Detektor-Einheiten, sind durch die Firma Siemens entwickelt worden. GE Healthcare und Toshiba folgen mit der „Rapid kVp-Switching“. Hier erfolgen ein ultraschneller Wechsel des Röhrenstroms und die zeitgleiche Anpassung der mAs. Die Firma Philips dagegen führte den „Sandwichdetektor“, auch „Split-Filter-Detektor“ genannt, ein. Diese Art von Detektor besitzt die Fähigkeit, die einfallende Energie in seinen Ursprung zu zerlegen. Somit werden hoch- und niederenergetische Anteile voneinander getrennt. Mit zwei Detektorschichten erfolgen Messungen und Analysen.



■ Abb. 5.17 Prinzip der Rückprojektion. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)

5.2 Bildentstehung

K. Kara

Fangen wir einfachheitshalber von vorne an. Externe Kliniker wünschen sich eine CT-Untersuchung bei einem Patienten. Der Radiologe überprüft die rechtfertigende Indikation und gibt sein Einverständnis. Bei Bedarf erfolgen Anamnese und Aufklärung bzw. Abklärung der Kontraindikationen sowie die Kontrolle bestimmter Blutwerte, wie die GFR (Glomeruläre Filtrationsrate) und TSH. Bei nativen Untersuchungen, also Untersuchungen

ohne Kontrastmittel, sind diese Werte irrelevant. Wieder einfachheitshalber gehen wir von einer nativen CT-Untersuchung in Form einer Spiralakquisition mit einem MS-CT aus. Der Radiologe gibt sein „Go!“ und legt das Untersuchungsprotokoll fest. Der Patient wird auf den Untersuchungstisch gelegt. Nach der isozentrischen Lagerung wird zuerst eine Übersichtsaufnahme, ein Topogramm, gefahren. Hier wird der zu untersuchende Bereich festgelegt und eingegrenzt. Mit den voreingestellten Parametern erfolgt die Datenakquisition, die an den Rechner weitergeleitet werden. Nach der z-Interpolation erfolgt die Bestimmung der Mittelwerte, der Bildpunkte. Diese an den Rechner weitergeleiteten Rohdaten, die Schwächungswerte aus allen Winkeln, nennt man auch Sinogramm. Was passiert jetzt? Schwächungswerte im gleichen Winkel werden aufaddiert. Stellen Sie sich das Spiel „Vier gewinnt“ vor! Nehmen wir an, dass die Farben ROT und GELB vertreten sind und diese im Spiel gewichtet werden; ROT = 1 Punkt, GELB = 2 Punkte. Alle roten und gelben Taler sind im Gitter verteilt. Suchen wir uns nun eine Reihe oder Spalte aus. Spalte 2! In dieser Spalte sind von oben nach unten gesehen sechs Taler, zwei rote und vier gelbe. Wenn wir nun die Wichtungen dazu nehmen, haben wir zwei Punkte durch den roten Taler und acht durch die Gelben. Insgesamt macht es 10 Punkte aus dieser Spalte. Wenn Sie nun wieder das Gitter vor Augen haben und alle Reihen und Spalten horizontal, vertikal und quer die Punkte aufaddieren, wird immer etwas anderes rauskommen. Die berechneten Punkte sind in dieser Thematik die gemessenen Dichtewerte in einem Winkel aus unterschiedlichen Strukturen in einem Strahlengang. Es ist ein verschwommenes Bild entstanden. Um die Details genau erkennen zu können, ist die gefilterte Rückprojektion erforderlich.

■ Gefilterte Rückprojektion

Bei der gefilterten Rückprojektion spielt der gewählte Faltungskern die Hauptrolle. Je nach Wahl wird mittels mathematischer Algorithmen die Kantenbetonung verstärkt (■ Abb. 5.17). Dazu wird jedem Voxel im Randbereich ein negativer Filter zugeordnet. Wenn nun die Subtraktion von Filter und Messdaten erfolgt, ist der Randbereich signalfrei. Dadurch ist die Kantenbetonung und schärfere Abbildung und

Abgrenzung erreicht. Durch die Wahl einer stärkeren Kantenbetonung wird das Bildrauschen höher.

Moderne Geräte bieten einen weiteren Algorithmus an, die iterative Rekonstruktion.

■ Iterative Rekonstruktion

Dieser Rechenprozess spielt eine wichtige Rolle in der modernen Computertomographie. Sie dient der Rauschunterdrückung. Durch diese Möglichkeit können alle Untersuchungen mit geringerer Dosis durchgeführt werden. Bislang waren die Bilder mit weniger Dosis mit viel zu viel Rauschen verbunden. Mit der iterativen Rekonstruktion wird das Rauschen „weggerechnet“, und der Bildeindruck bleibt gleich. Im besten Fall wird je nach Untersuchungsregion und -objekt eine Dosisreduktion von 50–60 % erzielt.

Das Bild (■ Abb. 5.18) zeigt ein Herzkranzgefäß ohne Rauschunterdrückung und in der dreidimensionalen Rekonstruktion.

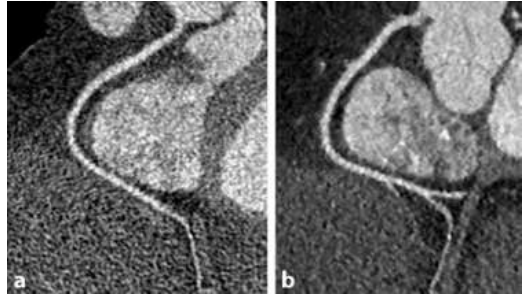
Da wir nun das Rauschen ansprechen, gehen wir auch darauf ein!

Das Rauschen oder besser **Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)** ist das Qualitätskriterium der CT-Bilder. Es ist messbar und sollte zwischen 12–15 HU liegen. Die Messung erfolgt im Randbereich des CT-Bildes, außerhalb des Objekts, praktisch in der Luft. Der Grund des Rauschens ist die Menge der Röntgenquanten, die auf Detektorelemente treffen. Stellen Sie sich vor, Sie beobachten den Regen- oder Schneefall. Wenn es nur sehr leicht regnet (Nieselregen) sind die einzelnen Tropfen gut zu erkennen. Bei starkem Regen jedoch ist der Boden komplett bedeckt. Auf die Bilder bezogen bedeutet das:

➤ **Je weniger Strahlung auftrifft, desto höher ist das Rauschen und umso schlechter ist die Bildqualität.**

Also brauchen wir mehr Strahlung, sprich die mAs muss erhöht werden. Wichtig hierbei ist es zu wissen, dass zwischen der mAs und dem Rauschen ein exponentielles Verhältnis besteht. Das bedeutet:

➤ **Um das Rauschen zu halbieren muss die mAs vervierfacht werden!**



■ Abb. 5.18a,b Herzkranzgefäße ohne Rauschunterdrückung im CT mit (a) und in der 3D-Rekonstruktion (b).

■ Hounsfieldskala

Wie wir nun alle wissen, werden bei computertomographischen Untersuchungen die Dichtewerte einzelner Strukturen und Objekte gemessen und daraus ein Bild berechnet. Die unterschiedlichen Dichtewerte werden in unterschiedlichen Graustufen dargestellt. Diese skalierten Werte werden nach dem „Vater“ des CT benannt, Hounsfieldunits (HU). Folgende Bezugswerte wurden bei Zimmertemperatur festgelegt:

- Wasser: 0 HU
- Luft: -1000 HU

Der Knochen ist zwar kein Bezugswert, aber dennoch wichtig und liegt bei +1000 bis +3000 HU. Das Spektrum der Hounsfieldskala reicht von -1024 bis 3071 HU. Weitere wichtige Gewebewerte zeigt ■ Abb. 5.19. Das menschliche Auge kann diese Menge an Graustufen nicht differenzieren. Deshalb wurde die Fenstertechnik eingeführt.

■ Fenstertechnik

Durch die Fenstertechnik wird die Anzahl der Grauwerte eingegrenzt. Die Einstellung und Eingrenzung beziehen sich auf die HU des interessierenden Objekts und erfolgen durch zwei Parameter in Kombination, Center C und Window Width WW.

- Das Center, auch Fensterlage genannt, legt das Zentrum der Fensterweite (WW) fest. Es liegt in etwa bei dem Dichtewert des zu interessierten Objekts.
- Die Window Width, auch Fensterbreite oder nur Window genannt, legt das Spektrum der Grauwerte fest, die zur Differenzierung der Strukturen dienen sollen. Sie bestimmt die Verteilung der Grauwerte von weiß bis schwarz.

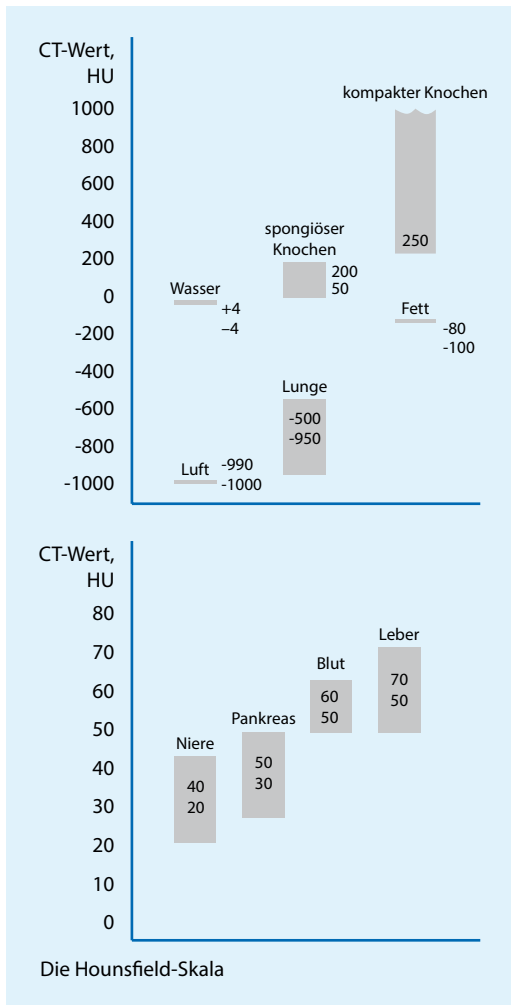


Abb. 5.19 Hounsfieldskala mit exemplarischen Gewebewerten. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)

Beispiele:

- Lungenfenster: C -500/
WW 1500 (Abb. 5.20a)
- Weichteilfenster: C 50/WW 500 (Abb. 5.20b)
- Knochenfenster: C 500/WW 1500
(Abb. 5.20c)

Zur Verdeutlichung nun eine Vertiefung des Themas „Lungenfenster“. Der Mittelpunkt liegt bei -500 HU. Nach der Verteilung von 1500 HU (WW), je 750 HU oberhalb und unterhalb vom Center, erhält man eine Grauwerteabdeckung von 250 HU bis

-1250 HU. In diesem Fall erscheinen alle Dichtewerte über 250 HU weiß und Werte unter -1250 HU erscheinen schwarz.

5.2.1 Post-Processing

Unter Post-Processing versteht man die Nachbearbeitung der erfassten Daten in 2D- und/oder 3D-Darstellungen. Diese dienen nicht zur primären Befundung, helfen aber dabei enorm. Auch ist eine schöne Form der Visualisierung und Orientierung, besonders für externe Zuweiser, dadurch gegeben. Es besteht die Möglichkeit der Objektbetrachtung in jeder Ebene und jedem Winkel. Die Nachbearbeitung ist auch unter „Rekonstruktion“ bekannt. Jedoch ist diese Benennung nicht korrekt. Die richtige Bezeichnung lautet „Reformation“. Im Gegensatz zu den unterschiedlichen Nachbearbeitungsverfahren, ist mit Rekonstruktion die Berechnung der Rohdaten mittels diverser Algorithmen und gewünschter Parameter gemeint. Bei der Reformation ist darauf zu achten, dass die Berechnung mittels sehr dünner, axialer Schichten erfolgt und eine Überlappung vorhanden ist, sprich das Inkrement sollte min. 20 % kleiner gewählt werden als die Schichtdicke. Somit werden stufenartige Darstellungen (Stufenartefakte) vermieden.

2D-Darstellungen

Multiplanare Reformation (MPR,

Abb. 5.21): Diese Nachbearbeitung gehört zu den Standardverfahren jeder Untersuchung. Die axial aufgenommenen Daten werden coronar und sagittal dargestellt. Somit kann die Befundung in allen Ebenen erfolgen.

— **Gekrümmte MPR (curved):** Die Curved ist eine spezielle Form der MPR. Nicht gerade verlaufende Objekte können dank dieser Methode gerade dargestellt werden. Dies ist eine große Hilfe beispielsweise bei Gefäßuntersuchungen. Der Verlauf kann hiermit besser visualisiert werden.

Maximum Intensity Projection (MIP,

Abb. 5.22): Bei der MIP werden in jeder Schicht die Strukturen mit der höchsten Dichte ermittelt und verstärkt dargestellt. Wichtig zu wissen ist, dass diese Methode



a *Lungenfenster*



b *Weichteilfenster*

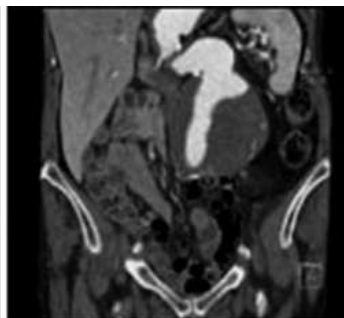


c *Knochenfenster*

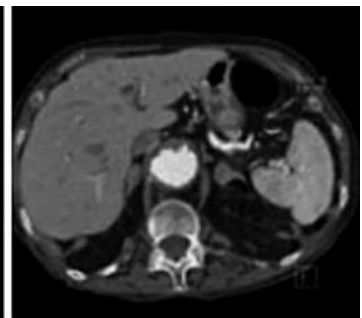
■ **Abb. 5.20a–c** Beispiele für Fenstereinstellungen.
a Lungenfenster; **b** Weichteilfenster; **c** Knochenfenster. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)



sagittal

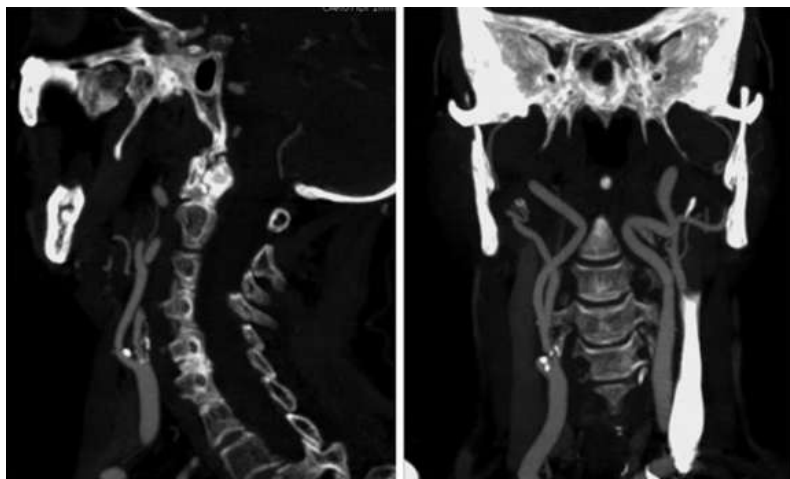


coronar

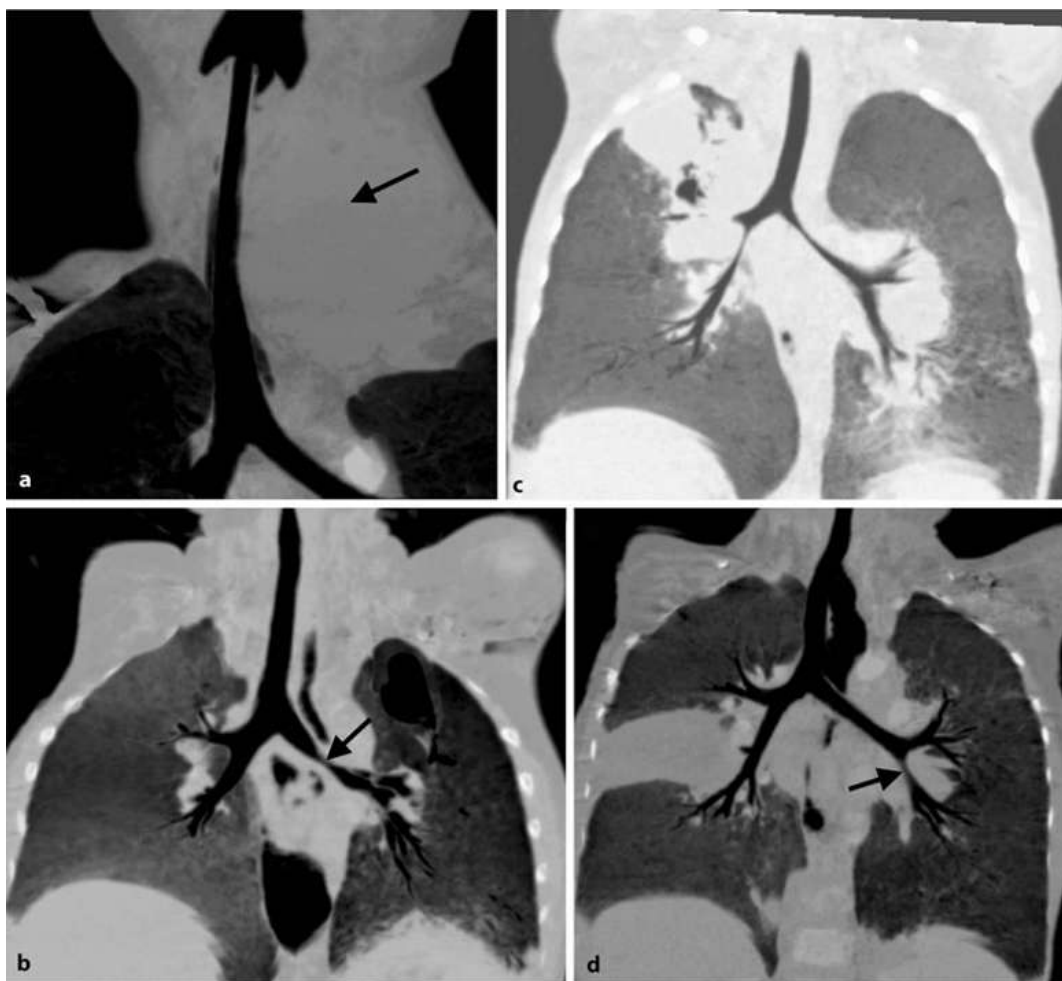


transversal

■ **Abb. 5.21** Multiplanare Reformation (MPR). (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)



■ **Abb. 5.22** Maximum Intensity Projection (MIP). (Aus Saba 2011)



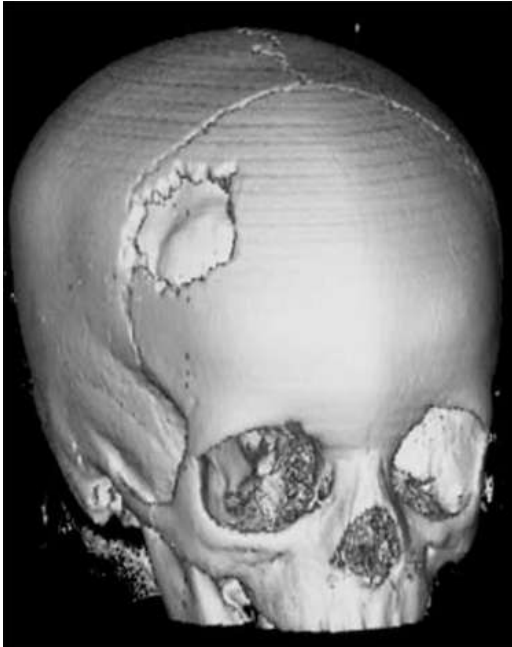
■ **Abb. 5.23a–d** Minimum Intensity Projektion (MinIP). (Aus Andronikou 2013)



■ Abb. 5.24a–d Beispiel für Volume Rendering. (Aus Arepalli et al. 2010)

zumeist nicht in den axialen Bildern eingesetzt wird, sondern für coronare und sagittale Darstellung vorgesehen ist. Die axialen Datensätze sind die für die Befundung relevanten Datensätze. Durch die MIP könnte es zu falsch-positiven Befunden kommen. Die Schichtdicke wird meist dicker gewählt, als bei den MPR's, denn die Aufaddierung der dichteren Strukturen führt noch einmal zur höheren Intensität und Darstellung dieser. Einsatzgebiete sind z. B. das Thorax-CT im Lungenfenster oder alle Gefäßuntersuchungen.

- **Minimum Intensity Projektion (minIP, ■ Abb. 5.23):** In diesem Fall wird nicht die höchste Dichte ermittelt und verstärkt dargestellt (MIP), sondern die geringste. Das restliche Prinzip ist wie bei der MIP. Eine Chochlea-Darstellung kann z. B. mit dieser Projektion erfolgen.
- **3-D-Darstellung**
 - **Volume Rendering (VR, ■ Abb. 5.24):** Farbliche Zuordnung und Transparenz der einzelnen CT-Werte



■ Abb. 5.25 Shared Surface Display (SSD)

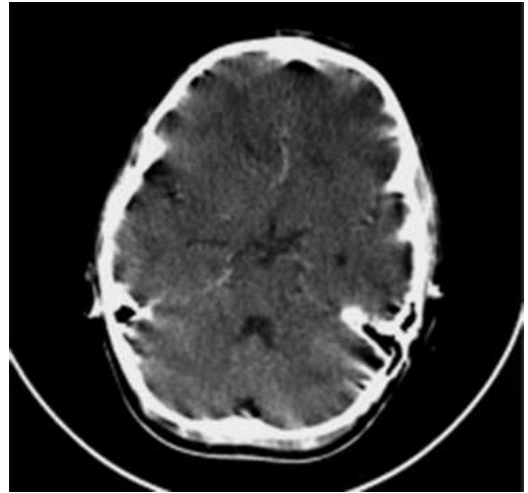
- **Shaded Surface Display (SSD)** (■ Abb. 5.25): Oberflächendarstellung durch virtuelle Lichtreflexion, die zur Knochendarstellung genutzt wird.

Neben den 2- und 3-D-Darstellungen gehören zum post processing auch quantitative Messungen. Abstände, Durchmesser sowie Winkel können gemessen werden. Auch besteht die Möglichkeit der Kalkbestimmung in Gefäßen oder einer Knochendichtemessung.

5.2.2 Artefakte

Artefakte sind Bildstörungen, die die Befundung negativ beeinflussen und unmöglich machen können. Ein Artefakt kann bis zur Detailauslöschung führen. Man unterscheidet verschiedene Arten von Artefakten, die entweder patientenbasiert auftreten oder physikalisch - technische Gründe haben können:

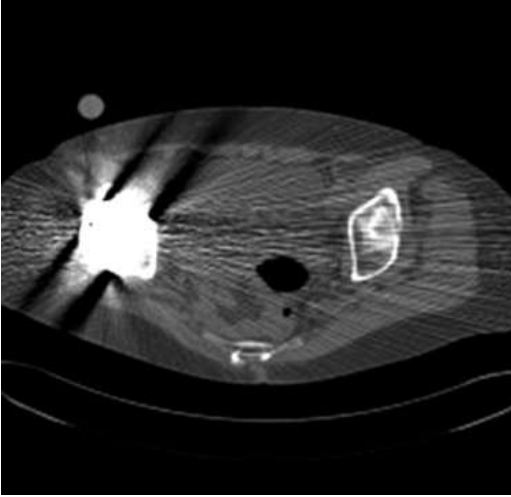
- **Bewegungsartefakt:** Wie der Name schon sagt, erfolgt diese Bildstörung durch Bewegung des Patienten bzw. des Objekts, wie Agilität und



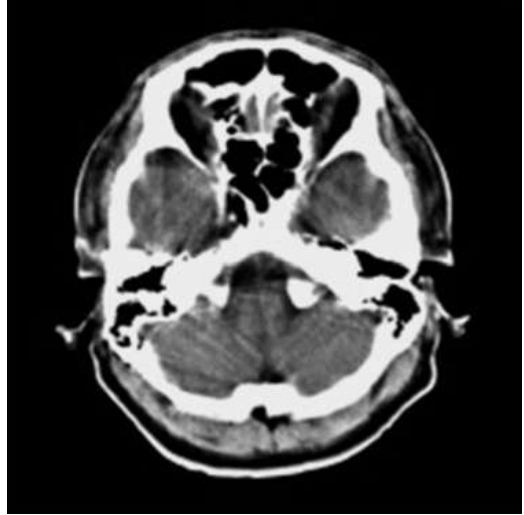
■ Abb. 5.26 Pulsationsartefakt

Atmung. Dies kann sowohl willkürlich als auch unwillkürlich geschehen. Der Patient kann sich in einem unruhigen Zustand befinden, der evtl. medikamentös behandelt werden muss. Oder es kommt zu Pulsationsartefakten.

- Ein **Pulsationsartefakt** (■ Abb. 5.26) erfolgt ganz unwillkürlich. Dazu gehören der Herzschlag, die Gefäßpulsation sowie die Darmkontraktion.
- **Metallartefakt** (■ Abb. 5.27): Dieser entsteht durch Metall im Strahlenfeld und ist mit Detailauslöschungen verbunden. Deswegen müssen alle passageren Metallteile aus der Untersuchungsregion entfernt werden. Bei bekannten Implantaten kann z. B. direkt eine höhere Röhrenspannung, z. B. 140 kV ausgewählt werden, um die Artefakte zu reduzieren. Zur direkten Rekonstruktion empfiehlt sich die Wahl der erweiterten CT-Skala. Dadurch stehen mehr Grauwerte zur Berechnung zur Verfügung.
- **Patialvolumeneffekt/Teilvolumeneffekt** (■ Abb. 5.28): Dieser Effekt tritt auf, wenn in einer Schicht zwei angrenzende Objekte massive Dichteunterschiede aufzeigen. In diesem Fall wird der Mittelwert der gemessenen Schwächungswerte für die Bilddarstellung in einen Grauwert umgerechnet. Dem kann man entgegenwirken, indem dünnere Schichten ausgewählt werden.



■ Abb. 5.27 Metallartefakt



■ Abb. 5.28 Partialvolumeneffekt

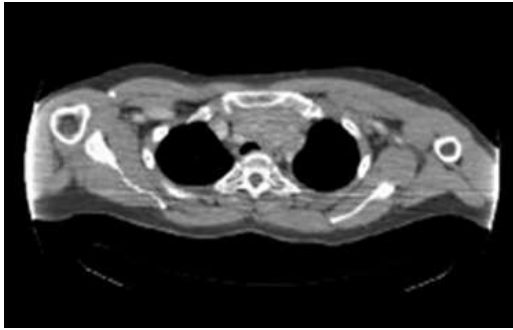
- **Aufhärtungsartefakt** (■ Abb. 5.29): Der Aufhärtungsartefakt tritt u. a. bei der Untersuchung der Felsenbeine auf. Durch eine Strahlauhärtung kommt es zu Artefakten im Hirngewebe. Mit einer dünneren Kollimation kann dieser Artefakt stark reduziert werden. Aufhärtungsartefakte entstehen auch auf Höhe der V. subclavia, falls Kontrastmittel injiziert wird. Auf der injizierten Seite kommt es an diesem Gefäß zu einer Überstrahlung durch das KM. Durch Nachspülen mit Kochsalzlösung wird dieser Effekt aufgehoben.
- **Messfeldüberschreitung** (■ Abb. 5.30): Objekte, die über das Messfeld hinausragen, beispielsweise bei adipösen Patienten, führen zu Artefakten im Randbereich und können darüber hinaus nicht beurteilt werden.
- **Photon Starvation Artefakt:** Eine zu geringe Strahlenmenge kann zu Streifenartefakten führen. Meist ist dies bei Patienten zu beobachten, die die Arme nicht über den Kopf strecken können. Werden die Arme nun neben dem Körper gelagert, entstehen an der Leber diese Artefakte. Diese Form der Lagerung ist trotz der Immobilität der Patienten ein großer Nachteil, da sie zu einer Verbreiterung führt, und somit für die laterale Bestrahlung mehr Dosis nötig ist. Werden die Arme auf den Bauch eng zusammengelegt, wird die Leber



■ Abb. 5.29 Aufhärtungsartefakt

fast artefaktfrei dargestellt. Die Dosis wird lateral nicht angehoben.

- **Ringartefakt** (■ Abb. 5.31): Jeder kennt die ringförmigen Wellen, wenn in ein Gewässer ein Stein geworfen wird. So sehen Ringartefakte im CT aus. Vom Zentrum des Bildes ausgehend, sind diese Artefakte abgebildet. Der Grund liegt hierbei in der Technik begründet, genau genommen an den Detektorkränzen. Bei Abweichung einzelner dieser Kränze kommt



■ Abb. 5.30 Messfeldüberschreitung

es zu dieser Abbildung. Falls eine Kalibrierung dieses Problem nicht aufhebt, muss die Untersuchung mit diesem Gerät eingestellt und der Servicetechniker kontaktiert werden.

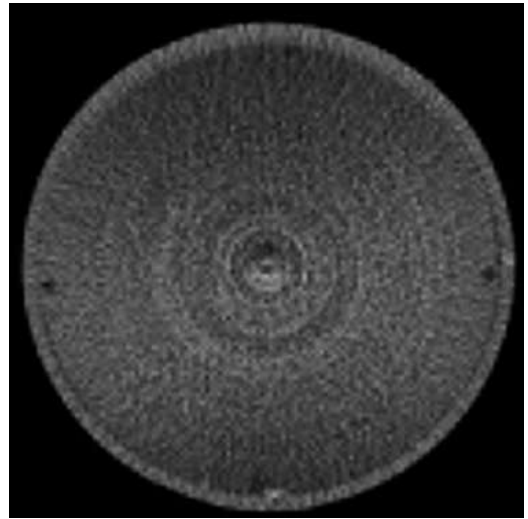
- **Linienartefakt** (■ Abb. 5.32a, b): Schwarze Linien quer durch das akquirierte Bild sind Linienartefakte. Auch diese Form basiert auf einem technischen Problem. Diese Linien entstehen durch Ausfälle einzelner Detektorelemente und/oder -kanäle. Die Akquisition muss umgehend eingestellt und der Hersteller benachrichtigt werden.

5.3 Besondere Strahlenschutzmaßnahmen und Dosisreduktion

K. Kara

Die computertomographischen Untersuchungen haben in den letzten Jahren, gar Jahrzehnten massiv zugenommen. Der technische Fortschritt brachte viele Möglichkeiten mit sich. Jedoch war und ist es sehr wichtig, dass der Strahlenschutz nicht aus den Augen gerät. Auch hier ist die Entwicklung enorm. Es gibt viele verschiedene Faktoren, die eine Strahlenreduktion ermöglichen. Die untere Tabelle von der Fa. Siemens zeigt die chronologische Auflistung der einzelnen Methoden, sowie die Entwicklung in dieser Richtung (■ Abb. 5.33).

- **CareDose4D/Automatic Current Selection ACS:** Dosisanpassung an die Anatomie, Form und Größe des Patienten. Die Ermittlung der benötigten Dosis erfolgt während der Auf-



■ Abb. 5.31 Ringartefakt

nahme des Topogramms (Wichtig ist hierbei die isozentrische Lagerung!) und während der Akquisition. Dabei werden die gemessenen Werte mit den Sollwerten des Durchschnittspatienten von 70/75 kg verglichen und die mAs gleichzeitig geregelt. Somit wird die Strahlung individuell angepasst.

- Beispiele:
 - a. p. weniger Strahlung nötig als lateral
 - Im Becken wird mehr Strahlung exponiert als im Thorax.

➤ **Die Auflage von Bleiabdeckungen z. B. auf Schilddrüse und Augenlinsen kann je nach Art der Dosismodulation zu einer erhöhten Dosisexposition führen. Daher sollten Sie sich auf jeden Fall vorher informieren, wie Ihr Gerät die Dosismodulation steuert.**

- **Adaptives EKG-Pulsing:** Der Patient wird an einem EKG angeschlossen. Die Untersuchung erfolgt immer in derselben Herzphase. In dieser Phase erfolgt die Akquisition mit 100 % Dosis, außerhalb dessen erfolgt eine Reduktion bis auf ca. 4 %. Die Bildqualität und die Ortsauflösung werden dadurch gehalten. Unnötige Wiederholungen werden gespart.
- **Adaptive Dose Shield:** Normalerweise ist es bei Spiralakquisitionen für die Berechnungen

5.3 • Besondere Strahlenschutzmaßnahmen und Dosisreduktion

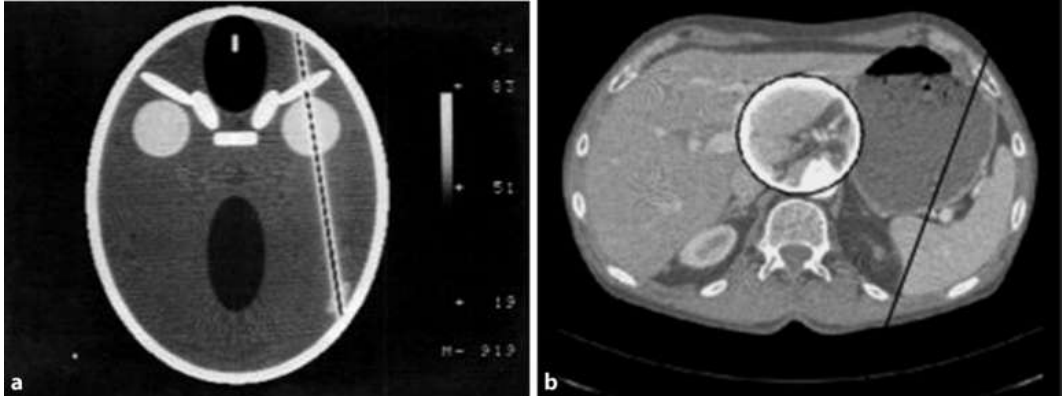


Abb. 5.32a,b Linienartefakte



Abb. 5.33 Methoden zur Strahlenreduktion. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)

nötig, dass eine halbe Umdrehung vor und nach dem Untersuchungsfeld mit aufgenommen wird (Overscanning). Mit asymmetrischen Kollimatoren, die sich vor und nach dem eigentlichen Scan schließen, werden diese überschüssigen Strahlen eliminiert. Dies führt zu einer Dosisreduktion von bis zu 25 %.

- IRIS (Iterative Reconstruction of Image Space): s. Bildentstehung Iterative Rekonstruktion

5.3.1 Dosisgrößen CTDIvol vs. DLP

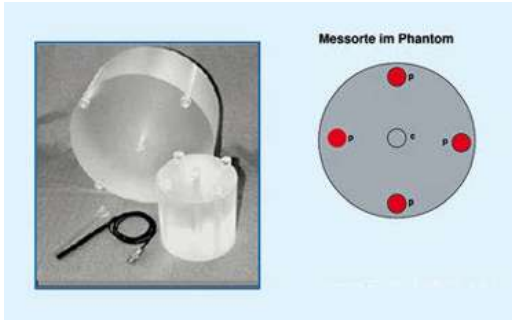
In der Computertomographie gibt es zwei wichtige Dosisbegriffe, die man kennen muss: CTDI und DLP.

- CTDI = **Computed Tomography Dose Index**: Der CTDI gibt die durchschnittliche Dosis

einer Serie an und wird nur in einer Schicht ermittelt. Er gibt an, wie viel Strahlung am Patienten ankommt. Der CTDI-Wert ist bei jedem Patienten gleich, denn die Messung erfolgt mit folgenden festen Belichtungsparametern:

- 120 kV
- 100 mA
- 1 s Rotationszeit
- Sequentielle Aufnahmetechnik
- Das Messelement ist ein Plexiglasphantom. Es gibt zwei Phantomgrößen:
 - Ø 16 cm für die Kopfmessung
 - Ø 32 cm für die Körpermessung

Das Phantom hat fünf Messpunkte, je in Form einer Bohrung (Abb. 5.34). Für die Messung wird eine 10 cm lange Messsonde eingesetzt. Diese Sonde



■ **Abb. 5.34** Phantommesspunkte. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens AG, Healthcare Sector)

wird nacheinander in die Bohrungen eingeführt und gemessen. Die Messpunkte werden im Einzelnen gewichtet. Der im Zentrum gelegene Punkt (c) wird zu $\frac{1}{3}$ gewichtet und die vier peripheren (p) gemeinsam zu $\frac{2}{3}$ gewichtet. Dies ist der Grund, warum CTDI auch gewichteter CTDI (CTDI_w) genannt wird.

$$\text{CTDI}_W = \frac{1}{3}\text{CTDI}_c + \frac{2}{3}\text{CTDI}_p$$

- **CTDI_{vol}**: Heute ist mit der modernen CT-Technik diese Dosisgröße relevant. Die gemessene Dosis wird durch den Pitchfaktor dividiert. Durch den Pitchfaktor wird die Dosisreduktion oder -erhöhung beeinflusst. Somit ist die Berücksichtigung und Einbindung dieses Wertes von großer Bedeutung und gibt die eigentliche durchschnittliche Strahlenexposition eines Volumens an.

$$\text{CTDI}_{\text{vol}} = \frac{\text{CTDI}_W}{p}$$

- **DLP = Dosislängenprodukt**: Das Dosislängenprodukt gibt die eigentliche Strahlenexposition an, entspricht also der insgesamt absorbierte Dosis, und hat die Einheit mGy x cm.

$$\text{DLP} =$$

$$\text{CTDI}_{\text{vol}} \times \text{Scanlänge (mGy} \times \text{cm)}$$

5.4 Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien der Bundesärztekammer

Ch. Nowarra

Wie bei den Röntgen- und Durchleuchtungsuntersuchungen hat die Bundesärztekammer auch für die Computertomographie Leitlinien herausgegeben, welche der Sicherung der Untersuchungsqualität bei bestmöglichem Strahlenschutz für den Patienten dienen.

Wie bei allen diagnostischen Verfahren mittels Röntgenstrahlen steht die rechtfertigende Indikation und klinische Fragestellung an erster Stelle. Vor der Durchführung einer CT-Untersuchung sollte abgewogen werden, ob ein Alternativverfahren mit vergleichbarer Aussagekraft ohne Strahlenbelastung angebracht und wie eine Minimierung der Strahlenexposition möglich ist. Gerade bei der höheren Strahlensensibilität von Säuglingen, Kleinkindern und Jugendlichen muss der Nutzen einer CT-Untersuchung streng geprüft und alle Möglichkeiten der Strahlenreduktion ausgenutzt werden.

- **In verschiedenen medizinischen Studien wurde der Zusammenhang zwischen CT-Untersuchungen bei Kindern und Krebserkrankungen untersucht.**

Man geht davon aus, dass bei Kindern unter 5 Jahren pro 1000 Schädel-CT eine Krebserkrankung entsteht. Bei abdominalen CT-Untersuchungen soll im Schnitt bei jedem 500. Kind eine Krebserkrankung (unabhängig vom Alter) entstehen.

Die Leitlinien für die Computertomographie ähneln im inhaltlichen Aufbau der für Röntgenuntersuchungen (► Abschn. 3.2). So sind auch hierfür verschiedene Organbereiche Qualitätskriterien festgelegt.

5.4.1 Ärztliche Qualitätsanforderungen

Die Mindestanforderungen zur Beantwortung spezifischer Fragestellungen sind in der Leitlinie für

die wichtigsten/häufigsten Untersuchungsregionen benannt und beziehen sich auf:

- **Charakteristische Bildmerkmale**, die organotypische Strukturen beschreiben. Erkennbar sein müssen, z. B. bei einem CT des Pankreas die Darstellung des gesamten Organs, Abgrenzung zu den Nachbarorganen, Erkennbarkeit des Ductus choledochus (Gallengang), Abgrenzung der Gefäße sowie eine ausreichende Kontrastierung nach i. v.-KM-Gabe.
- **Wichtige Bilddetails**, die für die Beurteilung relevant sind, z. B. Strukturen und Dichtemuster mit einer Größe von 3–8 mm bei der Pankreasdarstellung.
- **Kritische Strukturen/Bildelemente**, die für die Darstellung möglicher pathologischer Veränderungen von Bedeutung sind, z. B. geringe umschriebene Dichteänderungen, Erkennbarkeit des Ductus pancreaticus (Pankreasgang) und Ductus choledochus ggf. mit Verkalkungen oder Konturveränderungen.

Die Leitlinien beschreiben mit den festgelegten Qualitätsanforderungen eine optimierte Strahlenbelastung in Bezug auf die diagnostische Aussagekraft der Bildgebung. Sollte von denen für die verschiedenen Organbereichen festgelegten Anforderungen abgewichen werden, muss dies begründet und dokumentiert werden.

5.4.2 Aufnahmetechnische Qualitätsanforderungen

Um die diagnostischen Möglichkeiten der CT zu nutzen und gleichzeitig die **aufnahmetechnischen Qualitätsanforderungen** zu berücksichtigen bedarf es einer klaren Fragestellung und der daraus folgenden festgelegten technischen Durchführung der Untersuchung.

Dazu gehören u. a. folgende Mindestanforderungen:

■ Lagerung und Einstellung

Die **Lagerung und Einstellung** der darzustellenden Körperregion muss reproduzierbar sein und die Dokumentation mittels eines Übersichtsbildes (z. B. Scout, Topogramm) mit eingezeichneter Untersu-

chungsregion erfolgen. Das Messfeld muss dem zu untersuchenden Körperquerschnitt angepasst sein.

■ Aufnahmeparameter

Die **Aufnahmeparameter** einer CT-Untersuchung beschreiben insbesondere den Umgang mit einer Erhöhung der Aufnahmespannung. Die Aufnahmespannung liegt um 120 kV (80–140 kV) und soll nur erhöht werden, wenn die Aufnahmeleistung nicht ausreicht. Bei z. B. der Kontrastmittelgabe zur Darstellung von Gefäßregionen kann und soll die Aufnahmespannung durch den gewonnenen Iodkontrast reduziert werden. Das Strom-Zeit-Produkt ist möglichst niedrig zu wählen.

Für die CT hat das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) sog. **diagnostische Referenzwerte** für Erwachsene erstellt, die regelmäßig überarbeitet werden. Hier wird die **Strahlenexposition** für die sieben häufigsten Untersuchungen am CT festgelegt. Die Dosisgrößen werden mit dem **CT-Dosisindex (CTDI)** und dem **Dosislängenprodukt (DLP)** beschrieben.

■ Schichtgeometrie

Im Rahmen der **Schichtgeometrie** ist festgelegt, dass eine möglichst feine Schichtkollimation (Schichtdicke bei der Datenerfassung an einem MSCT) anzustreben ist, um bei multiplanaren Untersuchungen eine hohe Ortsauflösung und eine Minimierung des Partialvolumeneffekts zu erreichen.

Die Neigung der Schichtebenen ist der Anatomie des Patientenkörpers anzupassen.

Da für die Strahlenexposition nicht die Anzahl der berechneten Schichten, sondern die Länge des untersuchten Körperabschnittes maßgeblich ist, sollte dieser so kurz wie möglich gehalten werden.

■ Bildakquisition und -rekonstruktion

Da im Spiralmodus eine kontinuierliche Datenerfassung erfolgt, soll der Pitchfaktor so gewählt werden, dass eine größtmögliche Strahlenreduktion bei möglichst geringen Artefakten (abhängig vom Gerätetyp) erreicht werden kann.

Eine Dosisautomatik ist, so weit vorhanden, zu verwenden und die Rotationszeiten eines Scans sind so kurz wie möglich zu halten.

Bei Rekonstruktionen sind bedarfsgerecht Faltungskerne einzusetzen. Darüber hinaus ist die überlappende Schichtrekonstruktion (bei multip-

lanaren Untersuchungen) empfohlen. Die Möglichkeiten der Rekonstruktionen sind auszunutzen, um morphologische Details anschaulich darzustellen.

Für den Bereich der Angio-CT (CT-A) werden in der Leitlinie dahingehend Angaben gemacht, welche Gerätevoraussetzungen erfüllt sein müssen und bei welchen Fragestellungen die CT-A inzwischen routinemäßig eingesetzt wird, z. B. Lungenembolie, zerebrale Aneurysmen oder Aortenstenosen.

Durch Veränderung verschiedener Parameter wird die Untersuchungsdurchführung den individuellen Gegebenheiten, unter Berücksichtigung der Strahlenbelastung des Patienten, angepasst. Grundsätzlich sollten für jede CT alle Untersuchungsparameter dokumentiert werden, damit im Falle einer Kontrolluntersuchung die (Ursprungs-)Untersuchung nachvollziehbar ist und somit vergleichbar angefertigt werden kann.

Die zuständige ärztliche Stelle (angesiedelt an den Landesärztekammer bzw. seltener den Kassenärztlichen Vereinigungen) hat auch hier das Recht, stichprobenartige Überprüfungen durchzuführen und CT-Untersuchungen in radiologischen Abteilungen anzufordern (► Abschn. 3.2).

✓ Die Lösungen der Eingangsfragen zum Kapitel 5

1. Bei sequentiellen CT-Untersuchungen wird pro Rotation jeweils eine Schicht (bzw. eine Detektorbreite mit z. B. 64 Schichten) akquiriert und danach erfolgt der Tischvorschub vor Aufnahme des nächsten Untersuchungsabschnitts. Klassisches Beispiel ist das Schädel-CT. Beim Spiral-CT wird der Tisch kontinuierlich bewegt, die Rohdaten werden als Helix gewonnen und hieraus ein axiales Bild berechnet.
2. Ein Maß für die Strahlenabsorption ist die Dichte, die in Hounsfield-Einheiten gemessen wird.
3. Der pitch beschreibt das Verhältnis zwischen Tischvorschub und Detektorbreite. Er berechnet sich mit $p \text{ pitch} = \text{Tischvorschub} / (\text{Zahl der gleichzeitig erfassten Detektorzeilen} \cdot \text{Schichtdicke})$. Bei einem pitch = 1 wird das Volumen lückenlos erfasst, bei einem pitch > 1 wird die Datenhelix auseinandergezogen. Rechnerisch erhält man immer noch einen kompletten Datensatz mit einer

geringeren Bildqualität bei jedoch auch geringerer Strahlenbelastung. Bei einem pitch < 1 wird das Volumen überlappend erfasst. Das ist vor allem bei Herz-CT-Untersuchungen mit retrospektiver Triggerung wichtig.

In Kürze

- Die Computertomographie ist das „Arbeitsstier“ in der Radiologie. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Technik können sehr viele Fragestellungen mittels CT-Untersuchung beantwortet werden. Allerdings nur, wenn dessen technischen Möglichkeiten ausgenutzt werden.
- Neben der Zunahme der möglichen Untersuchungsverfahren (CT-Angio, dynamische Untersuchungen etc.) haben besonders die Rekonstruktionsmöglichkeiten der CT-Bilder zu einer Erweiterung der diagnostischen Möglichkeiten beigetragen (z. B. MIP, MPR).
- Die Computertomographie hat einen entscheidenden Nachteil – die vergleichsweise hohe Strahlenbelastung. Aus diesem Grund gewinnen Maßnahmen der Strahlenreduktion immer mehr an Bedeutung und stehen aktuell im Mittelpunkt der geräteentwicklerischen Bemühungen.
- Um eine bestmögliche Untersuchungsqualität bei einer möglichst geringen Strahlenexposition für alle Patienten zu gewährleisten, hat die Bundesärztekammer eine Leitlinie zur Qualitätssicherung in der CT veröffentlicht.

Literatur

- Alkadhi H, Leschka S, Stolzmann P, Scheffel H (2011) Wie funktioniert CT? Springer, Heidelberg
- Deutsches Ärzteblatt vom 02. Juni 2012: „CT im Kindesalter kann Leukämie und Hirntumore auslösen“, online 30.03.14
- Leitlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung in der Computertomographie (2007), online 12.3.14
- Liebing A (2013) Computertomographie – Teil 1: Aufbau, Technik, Bildentstehung. Radiopraxis 6:9–21
- Loewenhardt B (2006) Bildgebende Diagnostik – Technik, Anatomie, Pathologie. Wissenschaftlicher Selbstverlag, Fulda
- Siemens AG 2011 (http://elearning.fim.uni-passau.de/elearning/pages/smarties/CT_Geschichte_Siemens.pdf)

Kernspintomographie

Ch. Nowarra, K. Reiter

6.1 Physikalische Grundlagen der Kernspintomographie – 147

- 6.1.1 Magnetresonanztomographie = Kernspintomographie – 147
- 6.1.2 Atommodell – 148
- 6.1.3 Wasserstoffprotonen im MRT – 148
- 6.1.4 Sequenz – 149
- 6.1.5 Longitudinalrelaxation (T1-Relaxation) – 150
- 6.1.6 Transversalrelaxation (T2-Relaxation) – 151
- 6.1.7 Transversalrelaxation (T2*-Relaxation) – 151
- 6.1.8 Schichtselektion – 151
- 6.1.9 Schichtdicke – 151
- 6.1.10 Ortskodierung – 152
- 6.1.11 K-Raum – 152
- 6.1.12 Sequenz – 153
- 6.1.13 Repetitionszeit TR und Echozeit TE – 154

6.2 Aufbau eines Kernspintomographen – 155

- 6.2.1 Hauptmagnet – 155
- 6.2.2 Gradientenspule – 156
- 6.2.3 Hochfrequenzsystem – 156
- 6.2.4 Bedienungskonsole und Bildrechner – 157

6.3 Sicherheit am MRT – 158

- 6.3.1 Hauptmagnetfeld B_0 – 158
- 6.3.2 Gradientenfelder – 158
- 6.3.3 Hochfrequenzfeld B_1 – 159
- 6.3.4 Kryogene Flüssigkeiten und Gase – 159

6.4 Sequenzen – 159

- 6.4.1 Die Familie der Spin-Echo-Sequenzen – 160
- 6.4.2 Die Familie der Gradienten-Echo-Sequenzen – 162

6.5 Bildqualität und Sequenzoptimierung – 164

- 6.5.1 Signal-Rausch-Verhältnis – 164
- 6.5.2 Parallele Akquisitionstechnik (PAT) – 165

6.6 Artefakte – 165

6.6.1 Patienten-verursachte Artefakte – 166

6.6.2 Messmethoden-bedingte Artefakt – 167

6.6.3 Durch das System verursachte Artefakte – 168

6.7 MR-Angiographie – 168

6.8 Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien der Bundesärztekammer – 170

6.8.1 Allgemeine Qualitätsanforderungen – 170

6.8.2 Spezielle Anforderungen an Indikationsstellung,
dargestellte Strukturen und Kontraste – 171

6.8.3 Allgemeine Anforderung an die Untersuchungstechnik – 171

6.8.4 Technisch-physikalische Qualitätsanforderungen – 172

Literatur – 173

Nicole ist 36 Jahre alt und seit 17 Jahren als MTRA tätig. Vor ein paar Monaten konnte sie endlich ihren Wunsch durchsetzen am MRT eingearbeitet zu werden. Dieses Gerät war bislang nur den „Cracks“ vorbehalten und es hat ewig gedauert, bis einige andere Kollegen, die vor ihr „dran“ waren, endlich eingewiesen waren. Aber inzwischen werden selbst die MTRA-Schüler während der praktischen Ausbildung dort eingearbeitet! Da kann man, Nicles Meinung nach, als erfahrene MTRA ganz schön dumm aussehen, wenn die Schüler so viel mehr wissen als man selbst.

Als Nicole die Ausbildung gemacht hat galt ein MRT noch als Exot und wurde im Unterricht kaum behandelt. „Ein Gerät, welches nicht strahlt und sehr kompliziert mit Radiowellen funktioniert“ war die zentrale Aussage ihres Unterrichtes. Und in der Klinik, in der sie die praktische Ausbildung absolvierte, gab es damals gar kein MRT. Wie sich die Zeiten geändert haben... Inzwischen ist Nicole seit sechs Wochen im Frühdienst am MRT eingeteilt und hat schon viel gelernt. Die Standarduntersuchungen wie Schädel, Wirbelsäule oder Knie kann sie allein durchführen. Ihr Ziel ist es aber, mehr zu erfahren und an den Parametern „rumzuschrauben“ wie ihr Kollege. Der weiß genau was er wann machen darf, um z. B. eine Untersuchungszeit zu halbieren, ohne dass die diagnostische Aussagekraft der Untersuchung leidet. Sogar der Oberarzt hört manchmal auf ihn, wenn es um die Auswahl der richtigen Messsequenz für eine bestimmte Fragestellung geht. Das möchte Nicole auch irgendwann beherrschen. Jetzt muss aber erst mal Herr Schilling untersucht werden, der mit der Frage nach einem Meniskusschaden zur Knie-MRT gekommen ist.

Herr Schilling, ein 46-jähriger Patient kommt in die Radiologie für eine Kernspununtersuchung des linken Kniegelenks. Der Patient gibt an, beim Joggen ein „Knacken“ im Knie verspürt zu haben und hat seitdem Schmerzen im Kniegelenk beim Beugen. Beim Steinmann-Test des Orthopäden hat sich der Verdacht eines Meniskusschadens ergeben. Das Röntgen des Kniegelenkes zuvor in zwei Ebenen war unauffällig (Abb. 6.1).

❓ Stellen Sie sich vor, dass Sie in Ihrer Ausbildung zur MTRA gerade beim Bereich „Kernspintomographie“ angekommen sind:



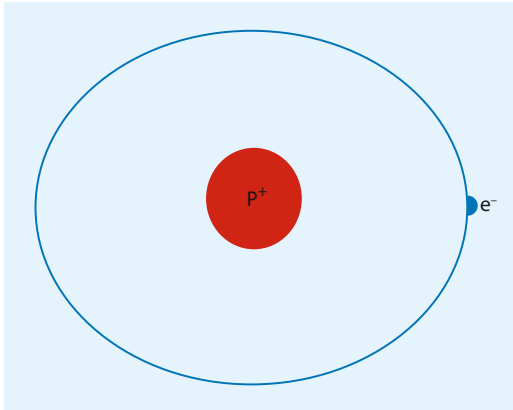
Abb. 6.1 Sagittales protonendichtes Bild vom Knie mit Fettsättigung. In der Schicht zeigt sich eine komplexe Innenmeniskushinterhornruptur (roter Pfeil) mit begleitendem Kniegelenkserguss

1. Welche Spule benötigt man für die Kernspintomographie des Kniegelenks?
2. Der MTRA hat Ihnen kurz telefonisch mitgeteilt, dass er etwas später zur Untersuchung kommt und bittet Sie, den Patienten schon mal vorzubereiten. Was müssen Sie beachten?
3. Wann darf ein Patient nicht im Kernspintomographen untersucht werden?

6.1 Physikalische Grundlagen der Kernspintomographie

6.1.1 Magnetresonanztomographie = Kernspintomographie

Die Kernspintomographie wird auch als Magnetresonanztomographie (MRT) bezeichnet. Dabei werden mittels eines sehr starken statischen Magnetfeldes (B_0), niederfrequenter Gradientenfelder (B_1) und hochfrequenter elektromagnetischer Felder Protonen angeregt und mit Hilfe von Empfangsspulen die Signale aus dem Körper aufgefangen. Aus den Signalen wird mit einem Hochleistungscomputer ein anatomisches Bild berechnet.



■ **Abb. 6.2** Wasserstoffatom mit rotem Proton und blauen Elektron auf der Schale

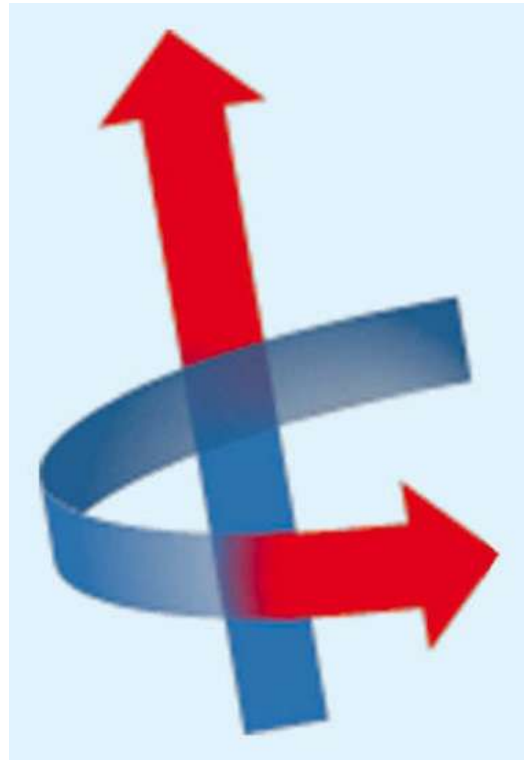
Die MRT kommt ohne ionisierende Strahlung aus. Außerdem kann man hier die Schichtung nach dem Verlauf der zu untersuchenden Struktur anpassen. Ein weiterer Vorteil ist der hohe Weichteilkontrast, der mithilfe verschiedener Untersuchungsparameter exakt für die jeweilige Untersuchungsregion eingestellt werden kann.

6.1.2 Atommodell

Der menschliche Körper besteht zu zwei Drittel aus Wasser. Für die Kernspintomographie sind die Wasserstoffatome im menschlichen Körper von größter Bedeutung. Ein Wasserstoffatom besteht aus einem Kern und einer Hülle (■ [Abb. 6.2](#)). Auf der Atomhülle des Wasserstoffatoms ist ein Elektron mit einer negativen Ladung, und im Wasserstoffatomkern ist ein Proton mit einer positiven Ladung. Das Wasserstoffatom ist somit elektrisch neutral.

Für die Kernspintomographie ist das Proton im Wasserstoffatom von größter Wichtigkeit, und wir werden uns im folgendem nur noch hiermit beschäftigen.

Das Proton rotiert um eine eigene Achse, wie ein Kreisel (■ [Abb. 6.3](#)). Dabei ist es bestrebt, seine Lage und Drehrichtung beizubehalten. Zum anderen fließt durch die Rotation der elektrischen Ladung ein Strom, der ein magnetisches Moment induziert. Somit kann das sich rotierende Proton auch als kleiner Stabmagnet betrachtet werden.



■ **Abb. 6.3** Proton mit Spin um die eigene Achse

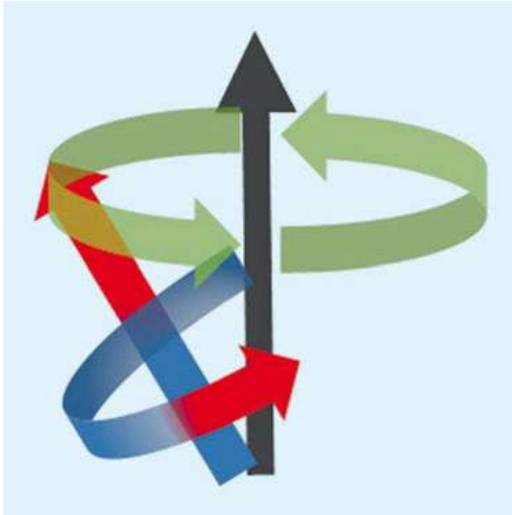
Unter normalen Bedingungen rotieren die Protonen im Körper rein zufällig in einer Richtung. Die Eigenschaft des Rotierens nennt man **Spin**, womit wir schon zwei Begriffe der Kernspintomographie erklärt hätten:

1. das Proton im Wasserstoffkern,
2. das Rotieren bzw. der Spin des Protons.

6.1.3 Wasserstoffprotonen im MRT

Setzt man die Spins einem starken Magnetfeld aus, so fangen diese an, entlang des äußeren Magnetfeldes zu **präzedieren** (taumeln, ■ [Abb. 6.4](#)). Die Präzessionsbewegung ist abhängig von der äußeren Magnetfeldstärke, will heißen: Wie schnell die Protonen taumeln, hängt von der Stärke des Magneten ab und kann mit der Larmorbeziehung berechnet werden:

$$f = \gamma_0 \times B_0$$



■ **Abb. 6.4** Präzessionsbewegung des rein zufällig gewählten Spins im Magnetfeld

f bezeichnet die Larmorfrequenz in Megahertz (MHz).

γ_0 bezeichnet das gyromagnetische Verhältnis und ist für ein Proton etwa 42,58 MHz/T.

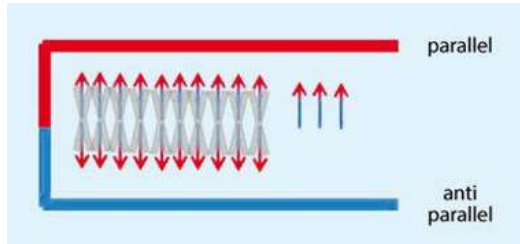
B_0 bezeichnet die Feldstärke in Tesla.

Somit liegt die Larmorfrequenz bei einer Feldstärke von 1 Tesla bei 42,58 MHz. Das bedeutet, dass bei 1 Tesla ein Proton 42.000.000 pro Sekunde taumelt.

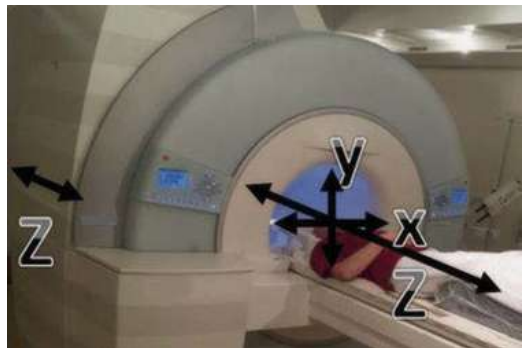
Beim Auflegen des Patienten passiert aber noch was anderes mit den Protonen.

Es baut sich entlang des Magnetfeldes die sog. Längsmagnetisierung M_z auf. Hierbei handelt es sich um einen sehr komplexen Prozess. Dieser wird hier anhand eines Beispiels erklärt: Während sich etwa 1.000.000 Protonen antiparallel ausrichten, richten sich etwa 1.000.007 Protonen parallel aus (■ **Abb. 6.5**, ■ **Abb. 6.6**). Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die antiparallele Ausrichtung mehr Energie benötigt. Der Überschuss von 7 Protonen, die sich parallel zum Magnetfeld ausgerichtet haben, trägt zur Bildgebung bei und entspricht der **Längsmagnetisierung M_z** . Dabei ist die Stärke des Magnetfelds entscheidend. Bedeutet also:

➤ **Je stärker das Magnetfeld, desto mehr Protonen richten sich parallel statt antiparallel aus und umso stärker ist die Längsmagnetisierung M_z .**



■ **Abb. 6.5** Spin Ausrichtung im MRT mit einem geringen Überschuss parallel



■ **Abb. 6.6** Ausrichten der Spins entlang des statischen Magnetfelds in Z-Richtung. Nach der Anregung werden die Spins in die x-y-Ebene ausgelenkt

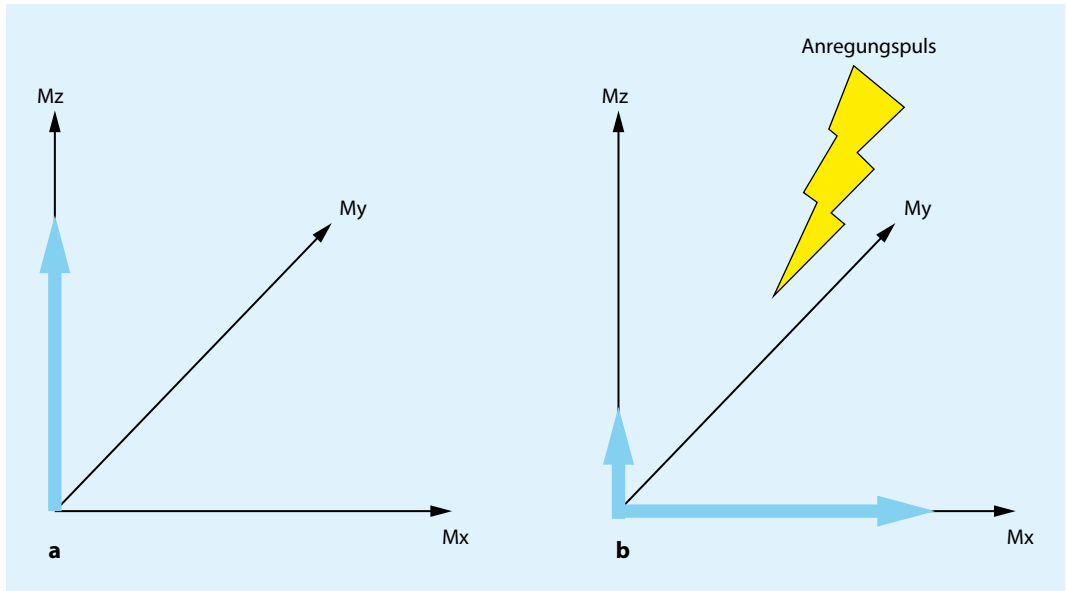
6.1.4 Sequenz

Jetzt kann immer noch kein Signal im Körper unseres Patienten gemessen werden. Hierfür muss ein Hochfrequenzimpuls in Resonanz gleich der Larmorfrequenz geschaltet werden, sonst reagieren die Protonen nicht. Außerdem muss der HF-Impuls lang genug sein, um die Protonen aus der Längsmagnetisierung M_z in die **transversalen Magnetisierung M_{xy}** umklappen zu lassen (■ **Abb. 6.7**). Wenn jetzt an der angeregten Stelle eine Empfangsspule aufliegt, kann hier ein „MR-Signal“ empfangen werden.

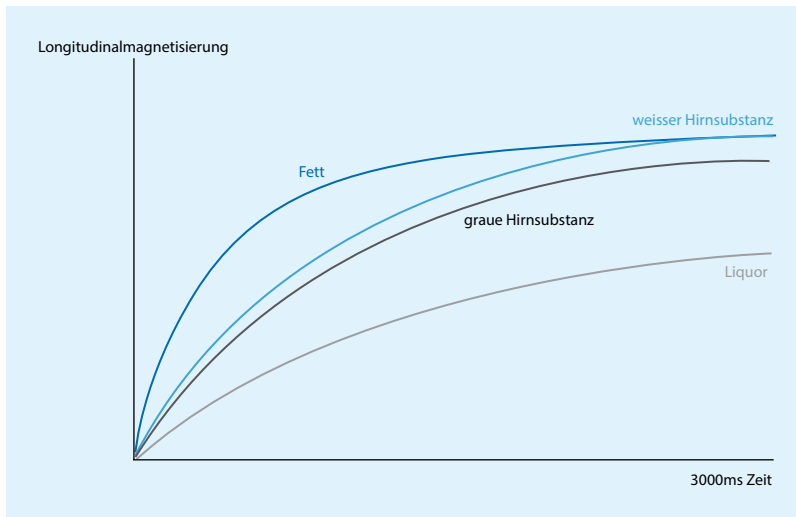
Wir haben jetzt im Schnelldurchlauf zwei für die Kernspintomographie wichtige Prozesse kennengelernt.

- Longitudinalmagnetisierung
- Transversalmagnetisierung

Diese beiden Prozesse laufen völlig unabhängige voneinander ab. Nach dem Einstrahlen eines HF-Impulses ist die Longitudinalmagnetisierung



■ Abb. 6.7a,b HF-Puls mit umgeklappter Magnetisierung



■ Abb. 6.8 T1-Relaxationskurve

verschwunden, und die Protonen sind in der Transversalmagnetisierung.

6.1.5 Longitudinalrelaxation (T1-Relaxation)

Die Longitudinalmagnetisierung M_z baut sich nach dem Einstrahlen des HF-Pulses langsam wieder auf, während die Transversalmagnetisierung M_{xy}

abnimmt. Dabei geben die Protonen Energie an die Umgebung (dem sog. Gitter) ab, was sowohl als **Spin-Gitter-Relaxation** oder auch als T1-Relaxation bezeichnet wird. Wie schnell die T1-Relaxation abläuft, hängt vom jeweiligen Gewebe ab und wird durch die Magnetfeldstärke B_0 beeinflusst (■ Abb. 6.8). Dabei verlängert sich die Zeit der T1-Relaxation mit zunehmender Feldstärke. Allerdings wird die T1-Relaxation nicht von Magnetfeldinhomogenitäten beeinflusst.

6.1.6 Transversalrelaxation (T2-Relaxation)

Nach dem Einstrahlen des HF-Pulses sind die Protonen alle synchronisiert bzw. in sog. Phase (Abb. 6.9). Das Signal ist jetzt ganz stark. Jedoch dephasieren die Protonen ganz schnell wieder, weil die Protonen sich gegenseitig beeinflussen. Es werden kleine Magnetfelder erzeugt, die die Protonen unterschiedlich schnell präzedieren lassen. Dieser Vorgang wird auch als **Spin-Spin-Relaxation** bezeichnet und ist nicht vom äußeren Magnetfeld B_0 abhängig.

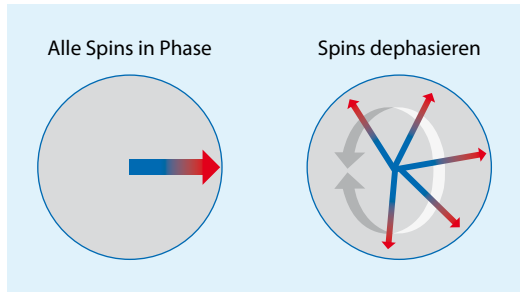


Abb. 6.9 Direkt nach dem HF-Puls sind die Spins alle in Phase. Jedoch dephasieren alle Spins sofort und sind zum Zeitpunkt „n“ an unterschiedlicher Stelle

6.1.7 Transversalrelaxation (T2*-Relaxation)

Ein weiterer Faktor, der sog. T2*-Zerfall, beeinflusst unsere Transversalrelaxation. Er ist abhängig von der Inhomogenität des äußeren Magnetfeldes B_0 und von dem jeweils untersuchten Objekt. Dies hat zur Folge, dass die Signalintensität schneller abnimmt, als die eigentliche Transversalrelaxation erwarten lassen würde (Abb. 6.10). Es handelt sich um eine konstante Frequenz und lässt sich mit einem Refokussierungspuls teilweise rückgängig machen.

Wichtige Charakteristika

- Die Relaxationszeiten dienen als Mittel zur Kontrastierung, da T1- und T2-Relaxation gewebeabhängig sind.
- Die T1-Relaxation dauert länger als T2-Relaxation.
- Die T1-Relaxation ist abhängig von der jeweiligen Magnetfeldstärke.

Man bedient sich eines Tricks. Es wird während des HF-Impulses ein zusätzlicher Schichtselektionsgradient geschaltet, der dafür sorgt, dass das statische Magnetfeld sich minimal verändert und somit jede Schicht eine eigene Larmor- bzw. Präzessionsfrequenz besitzt.

Hierfür sind im Kernspintomographen drei zusätzliche Gradientenspulen eingebaut. Diese Gradientenspulen sind senkrecht zueinander in allen drei Raumebenen x-, y- und z-Richtung angelegt. Die einzelnen Gradientenspulen bestehen jeweils aus zwei Zylinder-Spulen, die beim Fließen eines Stromes auf der einen Seite das statische Magnetfeld B_0 geringfügig verstärken und auf der anderen Seite minimal schwächen, dadurch gehört zur jeder Schicht eine eigene Larmorfrequenz. Diese muss entsprechend durch den HF-Anregungs-Puls geschaltet werden, da sonst die Resonanzbedingung nicht erfüllt ist.

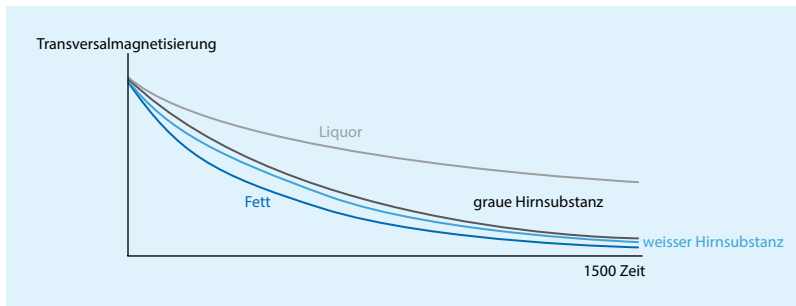
Der Grund für den „Krach“ bei der Kernspintomographie liegt genau hier begründet: in einem stromdurchflossenen Leiter wirkt eine mechanische Kraft (die sog. Lorentzkraft), dabei verformen sich die Gradientenspulen und knallen auf die umliegenden Bauteile. Die Gradientenspulen sind zwischen dem Hauptmagneten und dem HF-System eingebettet.

6.1.8 Schichtselektion

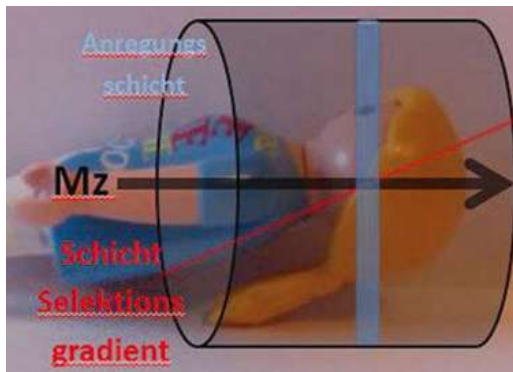
In den letzten Abschnitten haben wir jetzt etwas von Präzession, Anregung und Relaxation erfahren. Bis jetzt empfangen wir nur ein Signal, welches bis jetzt aber keinerlei räumliche Zuordnung aufweist. Geht man davon aus, dass man ein homogenes Magnetfeld B_0 hat, würde es im gesamten Körper ja dieselbe Präzessionsfrequenz zum Anregen bringen.

6.1.9 Schichtdicke

Die Schichtdicke ist als Ergebnis der Bandbreite des gesendeten HF-Pulses und der Gradienten-Amplitude definiert (Abb. 6.11). Wenn man die Schichtdicke verändern will, muss man entsprechend die



■ Abb. 6.10 T2-Relaxationskurve



■ Abb. 6.11 Schichtselektionsgradient und Schichtdicke

Amplitude erhöhen, dabei bleibt die Bandbreite des HF-Pulses gleich.

6.1.10 Ortskodierung

Wir haben jetzt eine Schicht angeregt, aber wie entsteht ein Bild in der Kernspintomographie? In der Kernspintomographie besteht eine Schicht aus einzelnen Volumenelementen, auch als Voxel bezeichnet. Am Computer wird das Bild, bestehend aus den verschiedenen Volumenelementen, als Pixelbild dargestellt. Die einzelnen Pixel werden als Rasterbild, wiederum bestehend aus n-Spalten und n-Zeilen, abgebildet. Bei einer Bildmatrix von 4×4 reden wir also von 4 Spalten und 4 Zeilen (■ Abb. 6.12).

Um jetzt die aus der angeregten Schicht resultierenden Informationen räumlich zuordnen zu können, müssen zwei weitere Gradienten-Schaltungen erzeugt werden:

- **Phasenkodiergradient**, der genau zwischen Anregung und Messung des Signals geschaltet wird,

- **Frequenzkodiergradient**, welcher während der Messung des Signals geschaltet wird.

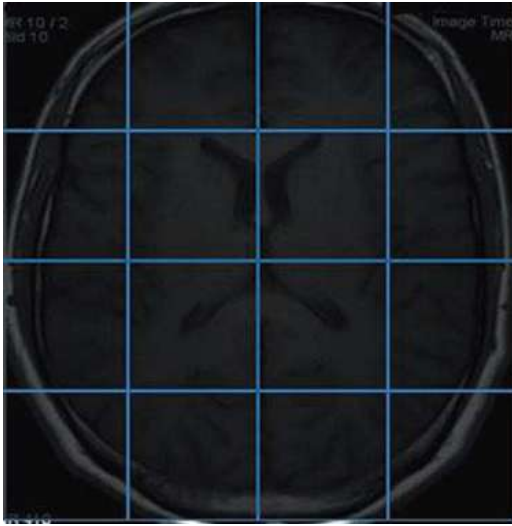
Das Schalten der unterschiedlichen Gradienten wird am besten anhand eines Beispiels erklärt. Gehen wir davon aus, eine transversale Schicht scannen zu wollen, somit wird ein Schichtselektionsgradient entsprechend der Schichtdicke in z-Richtung zeitgleich mit dem HF-Anregungspuls geschaltet (■ Abb. 6.13). Wir haben jetzt eine Schicht angeregt, in der alle Spins die gleiche Phasenlage und Frequenz haben.

Um in Phasenkodierichtung eine räumliche Zuordnung bekommen zu können, müssen wir in Phasenkodierichtung einen Gradienten schalten. Der bewirkt, dass die Spins in Phasenkodierichtung unterschiedlich schnell präzedieren, während man den Gradienten schaltet. Sobald der Gradient ausgeschaltet wird, präzedieren alle Spins wieder mit gleicher Frequenz – allerdings mit unterschiedlicher Phasenlage (■ Abb. 6.14). Dieser Vorgang muss entsprechend der Bildmatrix n-mal wiederholt werden. Bei einer Bildmatrix von 512 muss der Vorgang also 512 x wiederholt werden.

Nun schaltet man während des Signalauslesevorgangs den Frequenzkodiergradienten senkrecht zum Phasenkodiergradienten – in unseren Beispiel in y-Richtung (■ Abb. 6.15). Dadurch präzedieren alle Spins mit unterschiedlicher Frequenz in Frequenzkodierichtung.

6.1.11 K-Raum

Die so empfangenen Daten werden im sog. „K-Raum“ gespeichert. Jede einzelne Zeile im K-Raum entspricht einer Messung des Phasenko-



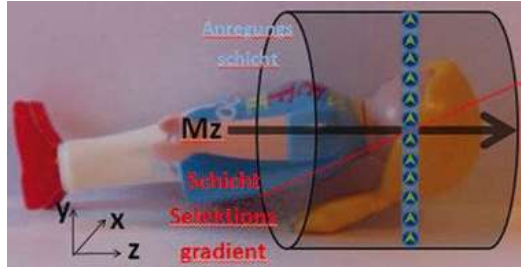
■ **Abb. 6.12** Rasterbild von 4 Spalten (Frequenz) und 4 Zeilen (Phasen)

dergradienten. Der K-Raum wird Schritt für Schritt gefüllt, dabei enthält jeder Rohdatenpixel Informationen über das gesamte Bild. In der K-Raummitte werden die Kontrastinformationen gespeichert und die außen gelegenen K-Raumzeilen beinhalten die Informationen über die räumliche Auflösung. Mittels der Fourier-Transformation, einem mathematischen Verfahren, wird ein Bild berechnet. Die Fourier-Transformation kennen Sie eventuell noch aus Ihrem Physikunterricht aus dem Bereich der Optik, wo in einem Prisma einfallendes Licht in seine spektralen Anteile bzw. Frequenzen zerlegt wird.

6.1.12 Sequenz

Sie haben in den ersten Seiten jetzt viele neue Informationen bekommen. Lassen Sie uns anhand eines praktischen Beispiels diese einmal zusammenfassen und sortieren:

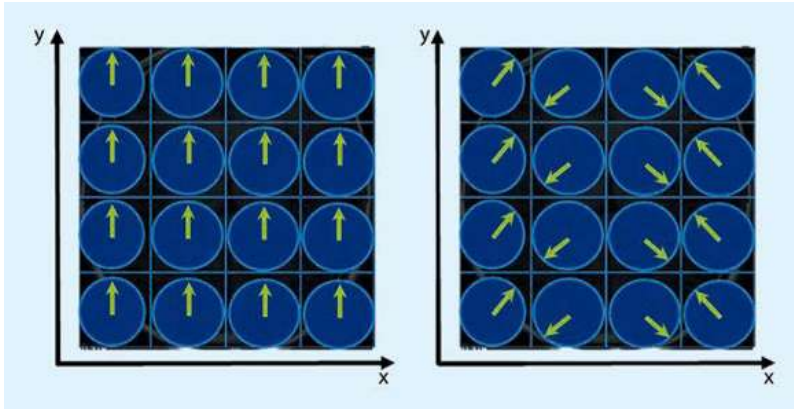
1. Ein Patient kommt in den Scannerraum und legt sich auf die Untersuchungsfläche.
2. Dabei richten sich die Wasserstoffprotonen (Spins) zum einen antiparallel und zum anderen parallel entlang des äußeren Magnetfeld B_0 aus.
3. Es richten sich geringfügig mehr Spins parallel aus, daraus entsteht die Longitudinalmagnetisierung M_z .



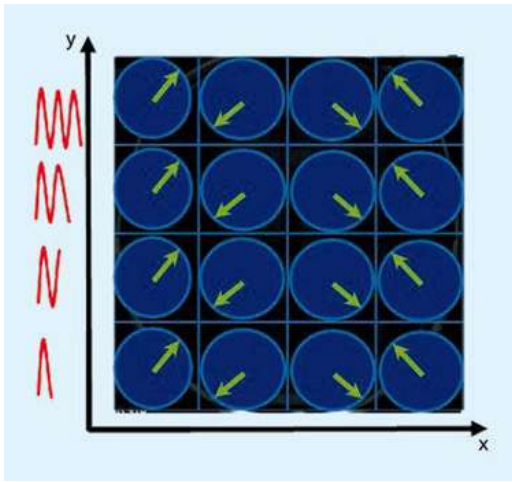
■ **Abb. 6.13** Schichtselektionsgradient und Schichtdicke in z-Richtung

4. Außerdem fangen die Spins an zu präzedieren, dies steht in direkter Abhängigkeit zur Magnetfeldstärke.
5. Als MTRA gehen Sie jetzt an Ihre Bedienkonsole und starten eine Sequenz – in unserem Beispiel eine transversale Sequenz.
6. Zeitgleich mit dem 90° Anregungspuls wird ein Schichtselektionsgradient geschaltet.
7. Die Spins werden somit von der Longitudinalmagnetisierung M_z in die Transversalmagnetisierung M_{xy} ausgelenkt.
8. Die Empfangsspule erhält das erste Signal, bekannt als „Freier Induktionsabfall Signal“ (FID).
9. Dieses Signal wird nicht für die Bildgebung verwendet.
10. Danach werden die Phasenkodiergradienten für die Ortskodierung M_y geschaltet.
11. Zum Refokussieren der Spins wird genau zwischen dem 90° Anregungspuls und dem Auslesen des Signals, ein 180° -HF-Puls geschaltet.
12. Dies geschieht zeitgleich mit einem weiteren Schichtselektionsgradienten, um nur die Spins in der angeregten Schicht kippen zu lassen.
13. Zum Schluss wird jetzt, während das Signal ausgelesen wird, ein Frequenzkodiergradient geschaltet, um dem Signal eine räumliche Zuordnung in M_x geben zu können.

Herzlichen Glückwunsch: Sie haben soeben Ihre erste Sequenz kennengelernt – eine Spin-Echo-Sequenz (■ **Abb. 6.16**).



■ **Abb. 6.14** Nach dem Schichtselektionsgradient haben alle Spins die gleiche Phasenlage (links). Der Phasenkodiergradient bewirkt, dass die Spins in Phasenkodierrichtung unterschiedliche Phasenlagen haben (rechts)



■ **Abb. 6.15** Frequenzkodiergradient in y-Richtung

6.1.13 Repetitionszeit TR und Echozeit TE

Die **Repetitionszeit (TR, „T“ für time)** ist die Zeit zwischen zwei 90° Anregungsimpulsen. Die TR ist für den Kontrast besonders wichtig, denn je mehr Zeit zwischen den einzelnen Anregungspulsen verstreicht, desto stärker baut sich die Longitudinalmagnetisierung M_z wieder auf. Je mehr Spins wieder in der Longitudinalmagnetisierung M_z bei dem Anregungsimpuls zur Verfügung stehen, umso mehr Signal bekommt man. Jedes Gewebe braucht unterschiedlich lang, um wieder in die Longitudinalmagnetisierung zurückzukehren.

Wenn jetzt der nächste Anregungspuls so geschaltet wird, dass ein Gewebe noch nicht zurück in die Longitudinalmagnetisierung M_z zurückgegan-

gen ist, wird es nach dem nächsten Anregungspuls kaum Signal geben. Man erhält ein eher T1-gewichtetes Bild.

Lässt man stattdessen so viel Zeit (TR) zwischen den Anregungspulsen, dass alle Spins wieder in der Longitudinalmagnetisierung M_z sind, erhält man ein weniger stark T1-gewichtetes Bild.

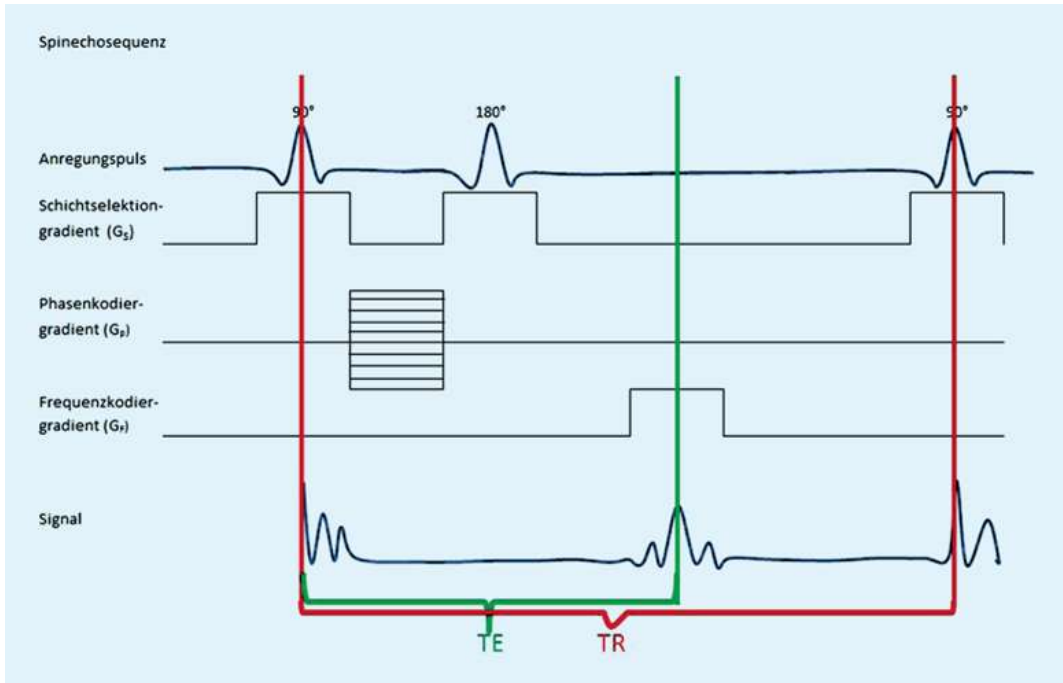
Die **Echozeit (TE)** ist definiert als die Zeit zwischen Anregung und maximalem Signalempfangs. Mit der TE können wir den T2-Kontrast eines Bildes beeinflussen. Wählt man eine kurze TE, so bekommen wir ein wenig T2-gewichtetes Bild, weil die Signalintensitäten der verschiedenen Gewebearten noch gering ausfallen.

Wählt man eine längere TE, verstärkt sich die T2-Gewichtung, da Gewebe mit kurzen TE-Zeiten ihr Signal bereits abgegeben haben und nur noch Gewebe mit langer TE zur Kontrastierung beiträgt.

Kontrast

Es gibt in der MRT drei verschiedene Kontraste. Eigentlich spricht man von Wichtung, da ein reines T1- bzw. T2-Kontrastbild kaum möglich ist. Dabei ist die Protonen-gewichtete Sequenz eine Mischung aus vielen Signalen, da lange zwischen den Anregungspulsen (TR lang) und geringer Signalintensität gewartet und die TE kurz gewählt wird (■ **Abb. 6.17**).

- T1-Wichtung mit kurzem TR und kurzem TE (z. B. TR-500 und TE-12)
- PD-Wichtung (Protonen-Dichte-Wichtung) mit langem TR und kurzem TE (z. B. TR-2000 und TE-12)
- T2-Wichtung mit langem TR und langem TE (z. B. TR-4000 und TE-80)



■ Abb. 6.16 Pulsdiagramm einer Spin-Echo-Sequenz

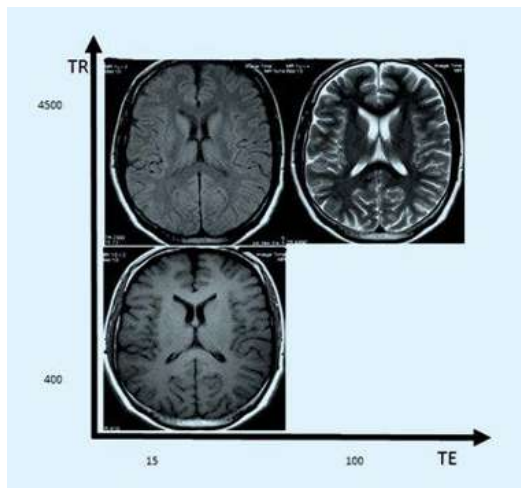
6.2 Aufbau eines Kernspintomographen

Ein Kernspintomograph hat folgende Hardware Komponenten (■ Abb. 6.18):

- Hauptmagnet
- Gradientenspulen
- Hochfrequenzsystem
- Bedienungskonsole und Bildrechner

6.2.1 Hauptmagnet

Der Hauptmagnet erzeugt das statische Magnetfeld B_0 . Er hat die Aufgabe, ein homogenes Feld zu erzeugen und darf keine bzw. nur geringe Magnetfeldinhomogenitäten unter 5 ppm im Untersuchungsbereich zulassen. Mithilfe von sog. Shimspulen werden etwaige Magnetfeldinhomogenitäten korrigiert. Um die Umgebung vor dem Magneten zu schützen, muss dieser abgeschirmt werden. Heutzutage geschieht dies durch Magnete mit integrierter Abschirmung; dabei handelt es sich um eine doppelte Magnetspule, bei der die innere



■ Abb. 6.17 Schema TR-TE-Beziehung mit unterschiedlichen Kontrastbildern



■ **Abb. 6.18** Bild eines Kernspintomographen ohne Verkleidung

das Feld erzeugt und die äußere die Magnetfeldlinien zurückführt.

Die heutzutage verwendeten Magnetfeldstärken liegen zwischen 0,1–3,0 Tesla.

Es gibt 3 **verschiedene Magnetfeldtypen**:

1. Permanentmagnet
2. Elektromagnet
3. supraleitender Magnet

Permanentmagnet

Permanentmagnete können eine Feldstärke bis 0,5 Tesla erzeugen. Das Magnetfeld verläuft senkrecht zum Patienten. Ein Permanentmagnet kann nicht ausgeschaltet werden. Ein großer Nachteil ist das hohe Gewicht eines solchen Magneten (um die 14 Tonnen) und dass die Homogenität stark temperaturabhängig ist. Allerdings hat ein Kernspintomograph mit Permanentmagnet ein geringes Streufeld und nur geringe Unterhaltskosten.

Elektromagnet

Elektromagnete können eine Feldstärke bis 0,3 Tesla erzeugen. Das Magnetfeld kann sowohl senkrecht, als auch parallel zum Patienten verlaufen. Die Elektromagnete können abgeschaltet werden. Der Nachteil von Elektromagneten sind der hohe Strom- und Wasserverbrauch. Allerdings hat ein entsprechend ausgestatteter Kernspintomograph ein geringes Streufeld.

Supraleitender Magnet

Der supraleitende Magnet kann eine Feldstärke bis zu 3 Tesla und höher erreichen. Das Magnetfeld verläuft parallel zum Patienten. Die supraleitende Magnetfeldspule besteht aus einer Niob-Titan-Le-

gierung, die in einem Kupfermantel eingebettet ist, welcher durch Kühlung mit flüssigem Helium ($4^{\circ}\text{K} = -269^{\circ}\text{C}$) seinen elektrischen Widerstand verliert („supraleitend“, also ohne ein Hindernis für die elektrische Ladung). Sobald einmal Strom in der Spule fließt und das Magnetfeld aufgebaut ist, ist dieser von der Stromzufuhr unabhängig. Nur durch einen Quench kann der Magnet ausgeschaltet werden – dabei verdampft das flüssige Helium und der Magnet verliert seine Supraleitfähigkeit. Dieser Vorgang verursacht enorme Kosten.

6.2.2 Gradientenspule

Die Gradientenspule besteht aus drei paarweise angelegten Spulenteilen, die in alle drei Raumrichtungen (x-, y- und z-Achse) geschaltet werden können. Dabei fließt ein starker Strom (bis zu 500 A) in sehr kurzer Zeit durch die Spule. Hierdurch gerät die Spule in Vibration, was die lauten Klopfgeräusche im Kernspintomographen verursacht. Durch das Überlagern eines weiteren Magnetfeldes, verursacht durch die Gradientenspule zum Hauptmagnetfeld, kann hierdurch eine leichte räumliche Veränderung der Larmorfrequenz erreicht werden – was für die Ortskodierung benötigt wird. Die Gradientenspule ist verantwortlich für:

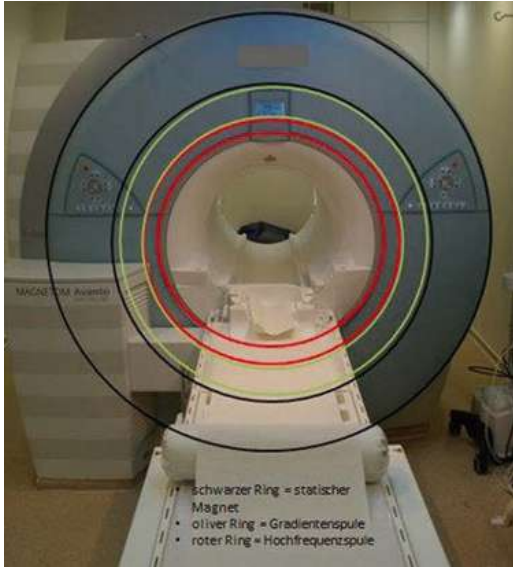
- Schichtselektionsgradienten
- Frequenzkodiergradienten
- Phasenkodiergradienten

Die Stärke des Gradientenfeldes ist dabei deutlich schwächer als die des Hauptmagnetfeldes. Sie ist definiert durch die maximale Amplitude und die minimale Anstiegszeit, in der sie geschaltet werden kann; diese bezeichnet man als „**Slew Rate**“, und sie wird in Tesla/Meter/Sekunde (T/m/s) angegeben.

Je nach Untersuchungsregion, z. B. Kardio-Bildgebung, ist eine hohe Slew Rate (ab 200 T/m/s) erforderlich.

6.2.3 Hochfrequenzsystem

Die Aufgabe des Hochfrequenzsystems ist die Anregung der Protonen aus der Longitudinalmagnetisierung M_z in die Transversalmagnetisierung M_{xy} .



■ **Abb. 6.19** Spulenposition im verkleideten Kernspintomographen

durch Einsenden eines HF-Impulses, z. B. um die 90° . Außerdem kann sie als Empfangsspule fungieren, die durch das zeitlich veränderte Magnetfeld M_{xy} die induzierte Spannung der Protonen anfängt.

Der Hochfrequenzsender (Ganzkörperspule) ist zwischen der Verkleidung des MR-Scanners und der Gradientenspule verbaut (■ **Abb. 6.19**). Allerdings gibt es auch spezielle Körpersende- und Empfangsspulen (■ **Abb. 6.20**), wie z. B. für die Knieuntersuchung. Diese haben den Vorteil, nur das zu untersuchende Knie anzuregen – somit kommt es zu keinem Einfaltungsartefakt (► **Abschn. 6.6.2**).

Theoretisch kann das Hochfrequenzsystem unter der Verkleidung die Signale auch empfangen. Das Problem ist, dass das Signal durch das Rauschen (Signal-Rausch-Verhältnis bzw. signal to noise ratio, SNR) verschlechtert wird, da das Signal nur sehr schwach ist und eine lange Strecke bis zur Empfangsspule zurücklegen muss. Hier haben sich Oberflächen-Empfangsspulen etabliert. Diese haben den Vorteil, die aus dem Körper kommenden Signale direkt vor Ort einzufangen. Bei den Phased-Array-Spulen empfangen mehrere kleine Spulenelemente das Signal mit dem Vorteil der Messzeitverkürzung.

Die Empfangsspulen können aber auch andere Signale auffangen, z. B. Störsignale aus der Umwelt



■ **Abb. 6.20** Bild einer Sende-Empfangs-Spule

verursacht u. a. durch Handy- oder UKW-Frequenzen. Um dieses zu vermeiden, muss der Scannerraum HF-dicht sein. Dazu wird ein sog. **Faraday'scher Käfig** um den Scannerraum zur Abschirmung von Störsignalen gebaut. Später (► **Abschn. 6.6**) werden wir noch einmal genauer darauf eingehen, was passiert, wenn der Raum nicht gut abgeschirmt ist.

6.2.4 Bedienungskonsole und Bildrechner

Über die Bedienungskonsole kann die MTRA die Untersuchung planen und koordinieren. Für die Bildberechnung gibt es einen eigenen Hochleistungscomputer, der aus den Rohdaten ein Bild berechnet (Bildrechner). Die aus dem Bildrechner kommenden Bildinformationen werden an der Bedienungskonsole oder Auswertekonsole weiterverarbeitet bzw. nachverarbeitet und ins Bildarchi-



■ Abb. 6.21 Warntafel MRT

vierungssystem („PACS“ oder „Bild ausdrucken“) versendet.

6.3 Sicherheit am MRT

Man kann davon ausgehen, dass das Erzeugen von Bildern im Kernspintomographen erst einmal ungefährlich ist. Bei der Kernspintomographie werden keine ionisierenden Strahlen angewendet. In der klinischen Anwendung sind bis heute keine gesundheitlichen Schäden durch die Anwendung der elektromagnetischen und magnetischen Feldstärken beobachtet worden.

Jedoch gibt es **4 potenzielle Gefahrenquellen**

1. Hauptmagnetfeld B_0
2. Gradientenfelder
3. Hochfrequenzfeld B_1
4. kryogene Flüssigkeiten und Gase

6.3.1 Hauptmagnetfeld B_0

Das statische Magnetfeld B_0 ist für das Ausrichten der Protonen verantwortlich. Durch das starke Magnetfeld (1,5 Tesla, entspricht ungefähr der

30.000-fachen Erdanziehungskraft) wirken Kräfte auf ferromagnetische Objekte. Ferromagnetische Objekte bestehen aus Eisen, Kobalt und Nickel. Auf Gegenstände aus diesem Material wirkt das statische Magnetfeld mit Anziehen, Verdrehen und Verschieben. Elektronische Gerätschaften können gelöscht werden. Daher muss der Patient unbedingt vor Untersuchungsbeginn angeben, ob ggf. metallische Gegenstände im oder am Körper sind.

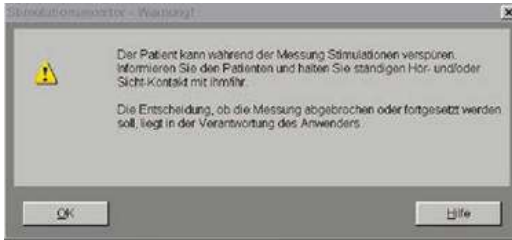
Herzschrittmacher, Nervenstimulatoren, Insulinpumpen usw. können verstellt oder auch defekt werden. Bei Implantaten aus ferromagnetischem Material kann eine Zugkraft am Tunneleingang bzw. eine Drehkraft in der Tunnelmitte entstehen, was lebensgefährliche Folgen haben kann. Daher sollte unbedingt vor Untersuchungsbeginn geklärt sein, aus welchem Material die Implantate sind.

Das Personal hat unbedingt alle metallischen Gegenstände vom Körper zu nehmen (■ Abb. 6.21). Scheren, Kugelschreiber usw. werden zu gefährlichen Geschossen und können Patienten und auch Personal gefährden.

6.3.2 Gradientenfelder

Die Gradientenfelder sind für die Ortskodierung zuständig. Die Gefahr liegt nicht in ihrer Stärke, sondern in der zeitlichen Veränderung des Magnetfeldes. Dabei kann es zu Nervenstimulationen und Wechselwirkung mit Implantaten kommen. Die Stimulation ist abhängig von der Amplitude, Anstiegszeit, Frequenz der Gradienten und dem Patienten. Ein peripherer Nervenstimulationsmonitor (■ Abb. 6.22) überwacht den Patienten.

Wie bereits erwähnt, ist das schnelle Schalten der Gradientenspulnen auch für die Entwicklung des Lärms im Kernspintomographen verantwortlich. Das Personal hat unbedingt darauf zu achten, dass der Patient einen Gehörschutz anlegt. Die Hersteller arbeiten an Techniken, um die Geräuschbildung auf ein Minimum zu reduzieren. Die Fa. General Electric (GE) hat einen Kernspintomographen entwickelt, der als „Silent MRT“ beworben wird. Diese technische Entwicklung lässt hoffen, dass in Zukunft die Kernspintomographen aller Hersteller keine lauten Klopfgeräusche mehr machen.



■ Abb. 6.22 SAR-Monitor

6.3.3 Hochfrequenzfeld B_1

Das Hochfrequenzfeld B_1 ist für die Anregung der Protonen zuständig. Durch das Schalten des HF-Impulses kann es zu Erwärmung und Verbrennung des Gewebes kommen. Um dies zu vermeiden, wird der Energieeintrag auf den Patienten als **spezifische Absorptionrate (SAR)** in Watt pro Kilogramm ermittelt. Hierfür muss das Körpergewicht des Patienten bei der Patientenregistrierung eingegeben werden. Der Computer berechnet unter Berücksichtigung des Körpergewichts und der jeweiligen Sequenz den SAR-Wert (■ Abb. 6.22). Bei Überschreiten der Grenzwerte muss die Sequenz angepasst werden. Dies kann durch die Verringerung der Schichten oder Erhöhung der TR bzw. Verringern des Flipwinkels geschehen. Die Grenzwerte liegen im Normalbetrieb bei 2 W/kg für Ganzkörper und bei 3,2 W/kg im Kopfbereich, bei der ersten Stufe bei 4 W/kg für Ganzkörper und bei 3,2 W/kg im Kopfbereich. Bei der ersten Stufe kann es zur Temperaturerhöhung im Körper von 1 °C kommen, daher ist bei Kindern und komatösen Patienten davon abzusehen.

Außerdem kann es zur Bildung von Wirbelströmen kommen, der Patient wird quasi zu einer „Antenne“. Daher ist unbedingt darauf zu achten, dass der Patient keinen Haut-Haut-Kontakt hat. Hier würde es zu Verbrennungen kommen, z. B. wenn der Patient die Hände zusammenfaltet oder die Waden miteinander Kontakt haben.

➤ **Auf Objekte mit hoher elektrischer Leitfähigkeit (alle Metalle) z. B. Implantate und Herzschrittmacherdrähte kann auch Energie übertragen werden und so zur Erwärmung bzw. Verbrennung am Übergang zum Körpergewebe führen.**



■ Abb. 6.23 Quenchknopf

6.3.4 Kryogene Flüssigkeiten und Gase

Als letzte Gefahrenquelle ist das flüssige Helium zu nennen, welches für die Supraleitfähigkeit sorgt. Helium hat eine Temperatur von -269 °C, was bei Körperkontakt zu stärksten Kälteverbrennungen führen kann. Außerdem verdrängt Helium Sauerstoff und kann somit zur Erstickung führen. Im Falle eines Notfalls kann der Kernspintomograph gequenchet werden (■ Abb. 6.23), d. h. der Kernspintomograph verliert seine Supraleitfähigkeit und ist nur noch normal leitend, dabei gibt der fließende Strom seine Energie an das Helium ab, und das Helium geht von der flüssigen Phase in die gasförmige über. Das gasförmige Helium wird über das Quenchrohr ausgeblasen. Hier muss sichergestellt werden, dass das Quenchrohr frei und keiner im Bereich des Auslassrohres ist. Das Helium dampft nach oben hin ab.

6.4 Sequenzen

Sie haben jetzt schon eine Menge über die Kernspintomographie gelernt. In dem folgenden Kapitel soll es um die Sequenzen gehen, dem eigentlichem „Werkzeug“ einer MTRA am Gerät. Sie haben eventuell schon während Ihres Praktikums erlebt, dass Patienten noch auf der Untersuchungsliege verweilen mussten, da der Radiologe eventuell zusätzliche Sequenzen benötigte. Hier verhält es sich leider so

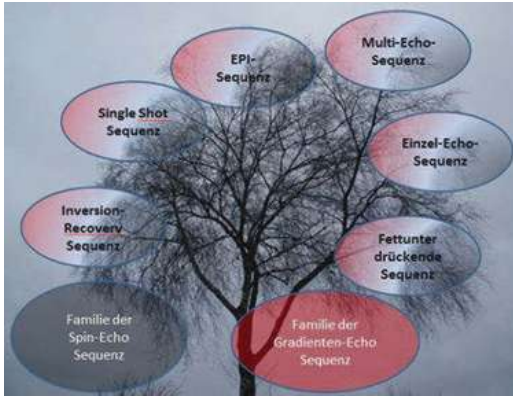


Abb. 6.24 Baum der Sequenzvarianten. Es gibt zwei Grundformen, die Spin-Echo-Sequenz und die Gradienten-Echo-Sequenz. Aus diesen beiden Grundformen kann man verschiedene Sequenzvarianten erstellen

wie im Bonbonladen. Während der eine Radiologe die Sequenz bevorzugt, hat ein anderer Radiologe lieber eine andere Sequenz. Im Großen und Ganzen sind die Untersuchungen jedoch standardisiert und in SOP's niedergeschrieben. Aber manchmal macht es ein Befund auch nötig, eine neue Untersuchungsstrategie und entsprechende Sequenzen zu ergänzen.

Im ersten Kapitel haben Sie bereits eine Basissequenz in der Kernspintomographie kennengelernt: die Spin-Echo-Sequenz. Es gibt eine weitere Basissequenz und zwar die Gradienten-Echo-Sequenz (**Abb. 6.24**). Bei diesen beiden Grundformen der Sequenzen gibt es noch verschiedene Abwandlungen, die Sie nun im Folgenden einmal kennenlernen sollen.

Der Vorteil einer Spin-Echo-Sequenz ist, dass sie relativ unempfindlich gegen Magnetfeldinhomogenitäten ist. Der Nachteil ist, dass sie eine lange Datenakquisition benötigt.

Bei einer Gradienten-Echo-Sequenz verhält es sich genau umgekehrt.

6.4.1 Die Familie der Spin-Echo-Sequenzen

Spin-Echo-Sequenz

Wiederholen wir einmal im Schnelldurchgang die Spin-Echo-Sequenz: Nach dem 90°-HF-Puls zeitgleich mit dem Schichtselektionsgradienten wird

zur Ortskodierung ein Phasengradient geschaltet. Genau zwischen 90°-HF-Puls und Auslesen des Signals wird ein 180°-Refokussierungspuls mit einem weiteren Schichtselektionsgradienten geschaltet, der dazu da ist, die durch die Feldinhomogenitäten entstandene Dephasierung zu kompensieren, sodass sich im Moment des Signalempfanges alle Spins in Phase befinden. Es wird im Moment des Signalempfanges ein Gradient in Frequenzrichtung geschaltet, um eine Ortskodierung in Frequenzrichtung zu bekommen. Zwischen 90° Anregungspuls und 180° Refokussierungspuls wird der Phasenkodiergradient geschaltet. Der Phasenkodiergradient wird jeweils für eine separate K-Raumzeile geschaltet. Dieser Vorgang muss jetzt entsprechend häufig der Matrixgröße wiederholt werden, bis alle K-Raum-Zeilen in Phasenkodierrichtung gefüllt wurden.

Durch den 180° Refokussierungspuls ist die SE-Sequenz relativ unempfindlich für Magnetfeldinhomogenitäten, allerdings dauert eine solche Sequenz auch länger und ist daher anfälliger für Bewegungsartefakte.

Um die Untersuchungszeit zu verkürzen, wird nach dem Anregen einer Schicht die nächste Schicht angeregt. Es werden so viele Schichten angeregt, wie das TR zulässt. Je länger die TR, desto mehr Schichten können nach und nach angeregt werden. Leider hat diese Technik einen Nachteil: da der jeweilige Anregungspuls auch benachbarte Schichten diskret anregt kann, kann dadurch das Signal geschwächt werden.

Die Untersuchungszeit wird berechnet:

$$\text{Messzeit TA} = \text{TR} \times \text{NEX} \times \text{N}_{\text{Phase}}$$

TR – Zeit zwischen zwei HF-Pulsen

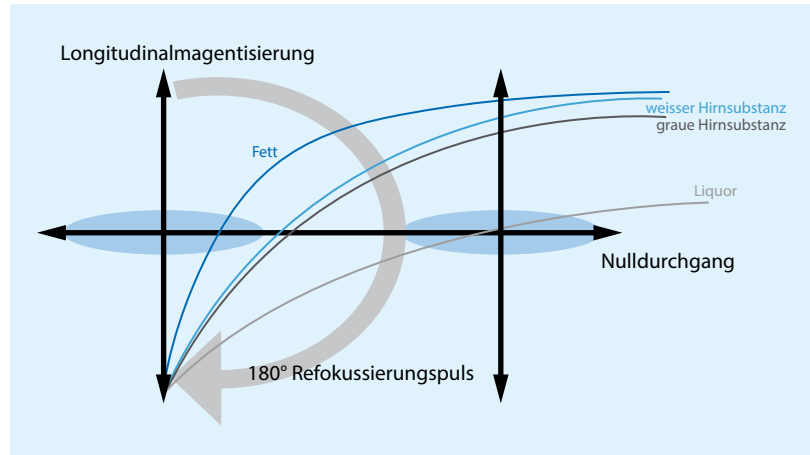
NEX – Zahl der Messungen

N_{Phase} – Akquisitionen

Fast-Spin-Echo-Sequenz

Die Fast-Spin-Echo-Sequenz (bzw. Turbo-Spin-Echo-Sequenz) ist eine Sequenz, die nach dem 90° Anregungspuls mehrere 180° Refokussierungspulse einstrahlt und unterschiedlichen Phasenkodiergradienten schaltet, die danach jeweils ein Echo empfangen. Bedeutet also: nach einer Anregung werden, statt wie bei der reinen Spin-Echo-Sequenz, nicht

■ **Abb. 6.25** 180° Inversionspuls vor der Anregung



nur eine K-Raum-Zeile gefüllt, sondern gleich mehrere Zeilen. Dies verkürzt die Messzeit entsprechend.

Die Untersuchungszeit wird berechnet:

$$\text{Messzeit TA} = \frac{\text{TR} \times \text{NEX} \times \text{N}_{\text{Phase}}}{\text{ETL}}$$

TR – Zeit zwischen zwei HF-Pulsen

NEX – Zahl der Messungen

N_{Phase} – Akquisitionen

ETL – Echozuglänge

Wie viele Echos nach einer Anregung ausgelesen werden können, hängt vom TR ab. Die Anzahl der Echos die ausgelesen werden können, wird bezeichnet als Echozuglänge (ETL = Echo Train Length) bzw. auch als Turbofaktor (TF).

Der Vorteil liegt in der Messzeitverkürzung; somit sind T2-gewichtete Sequenzen in einer für den Patienten akzeptablen Zeit zu generieren. Allerdings geht die Bildschärfe und die Signalstärke mit jedem zusätzlichen Echozug verloren.

Das $\text{TE}_{\text{effektiv}}$ bei einer FSE-Sequenz gibt ihr Kontrastverhalten an. Bei einer Messung mit mehreren Echos werden auch frühe bzw. ganz späte Echos zur Bildgebung genutzt. Jedoch sind die Echos, die in die K-Raummitte einsortiert werden, für den Bildkontrast verantwortlich. Daher ist bei einer T1-gewichteten Sequenz davon abzusehen, eine ETL höher als 4 zu wählen, da der T1-Kontrast verloren geht. Bei einer PD-gewichteten Sequenz sollte die ETL nicht höher als 9 sein, da die Bildschärfe verloren geht.

Inversion-Recovery-Sequenzen (IR-Sequenzen)

Um verschiedene Gewebearten bildlich ausblenden zu können, bedient man sich einer weiteren Technik.

Bei einer Inversion-Recovery-(IR-)Sequenz (■ Abb. 6.26) wird vor dem 90° Anregungspuls ein 180° Inversionspuls eingestrahlt (■ Abb. 6.25). Je nach Gewebeart, die man jetzt unterdrücken möchte, wird der 90° Anregungspuls erst eingeschaltet, sobald das Gewebe, welches kein Signal abgeben soll, im Nulldurchgang ist und somit kein oder nur wenig Signal abgibt.

So kann durch Wahl der richtigen Inversions-Zeit (TI) z. B. Fett unterdrückt werden. Diese Sequenzen sind als STIR (Short TI Inversion Recovery) bzw. TIRM (Turbo Inversion Recovery Measurement) bekannt.

Die FLAIR-Sequenz (Fluid Attenuated Inversion Recovery) unterdrückt bei einer T2-gewichteten Sequenz freie Flüssigkeiten wie z. B. Liquor, sodass nur Ödeme oder andere gewebsgebundene Flüssigkeiten hell dargestellt werden.

Single-Shot-Sequenzen

Bei den Single-Shot-Sequenzen wird nach einem Anregungspuls der gesamte K-Raum ausgelesen. Diese Sequenzen haben entsprechend kurze Akquisitionszeiten. In der Regel handelt es sich hierbei um T2-gewichtete Sequenzen, da die TR entsprechend lang gewählt sein muss, um alle K-Raumzeilen innerhalb einer Anregung zu füllen. Die **Single Shot Fast Spin Echo Sequenz (SSFSE oder auch HASTE)** basiert

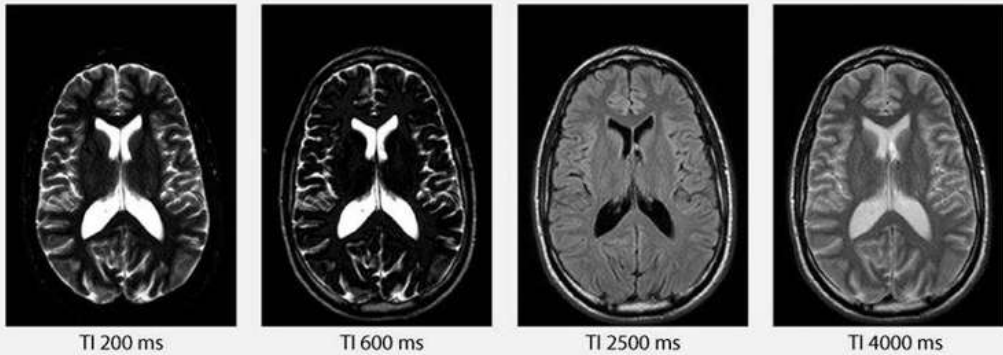


Abb. 6.26 Inversion-Recovery-Sequenzen mit unterschiedlichen TI-Zeiten

auf der Symmetrie des K-Raums. Hier wird nach einem Anregungspuls nur etwas mehr als die Hälfte des Raums durch entsprechend viele Phasenkodierschaltungen gefüllt. Der Rest wird durch die bereits erhaltenen K-Rauminformationen gefüllt. Zur Erinnerung: Wenn man sich vorstellt, dass der K-Raum ein Quadrat ist und sich in der Mitte des K-Raums die Informationen für den Kontrast befinden, sind in der Peripherie des K-Raums die Informationen für die räumliche Auflösung. Bei einer SSFSE-Sequenz wird ein Teil der räumlichen Information und der Teil der Kontrastinformation ausgelesen. Der restliche Teil der räumlichen Information wird von den bereits ausgelesenen K-Raumzeilen aufgefüllt. Der große Vorteil einer solchen Sequenz liegt in der extrem kurzen Akquisitionszeit, teilweise unter 1 sec. Der Nachteil liegt in der verlorengegangenen Detailerkennbarkeit. SSFSE finden Anwendung in der Abdomen- und Myelographiebildgebung.

Bei der **Echoplanaren-Sequenz (Epi)** wird nach einem Anregungspuls der Frequenzkodiergradient entsprechend der Matrixgröße positiv und negativ geschaltet, während der Phasenkodiergradient niedrig positiv mitgeschaltet ist. Man kann mit der echoplanaren Sequenz Diffusionsstörungen sichtbar machen. Die Epi-Sequenz hat nur eine geringe Auflösung und wird in der Diffusions- und Perfusionbildgebung genutzt.

6.4.2 Die Familie der Gradienten-Echo-Sequenzen

Die Gradienten-Echo-Sequenz unterscheidet sich von der Spin-Echo-Sequenz, weil zum einen der Anregungspuls kleiner 90° ist und statt eines 180° Refokussierungspuls ein gegenpoliger Frequenzgradient (erst mit negativer, dann mit positiver Polarität) geschaltet wird. Die Gradienten-Echo-Sequenzen zeichnen sich durch ihre kurze Akquisitionszeit aus.

Durch den geringeren Anregungspuls und den Wegfall des 180° Refokussierungspulses sind kürzere TR-Zeiten möglich. Die Untersuchungszeit wird kürzer und damit weniger anfällig für Bewegungsartefakte. Allerdings sind diese Sequenzen anfälliger für Suszeptibilitätsartefakte.

Das Signal ist r durch den kleineren Flipwinkel schwächer (Anregungspuls kleiner 90°). Die T1-Kontrastunterschiede werden mit immer kleinerem Flipwinkel geringer, und es kommt somit zu Signaleinbußen.

Der Kontrast bei Gradienten-Echo-Sequenzen wird zusätzlich durch den Flipwinkel α beeinflusst.

So gilt für:

- T1-Wichtung mit kurzem TR und kurzem TE, aber großen Flipwinkel
 - (z. B. TR-10-200, TE-5-15 und Flipwinkel 30° - 90°)
- PD-Wichtung mit langem TR und kurzem TE und kleinem Flipwinkel
 - (z. B. TR-200-400 und TE-5-15 und Flipwinkel 5° - 20°)

- T2*-Wichtung mit langem TR und langem TE und kleinem Flipwinkel
- (z. B. TR-100-400 und TE-25-60 und Flipwinkel 10°–20°)

Bei Gradienten-Echo-Sequenzen mit sehr kurzen TR-Zeiten kann es zu einem Mischkontrast kommen, da die Transversalmagnetisierung von der vorherigen Anregung noch vorhanden ist. Um einen reinen T1-Kontrast bei sehr kurzen TR-Zeiten zu gewährleisten, wird ein zusätzlicher Gradient nach dem Auslesen des Signals eingestrahlt, um die Transversalmagnetisierung zu zerstören (Spoiling).

Wie bei den Spin-Echo-Sequenzen kann man auch die Gradienten-Echo-Sequenzen unterteilen in

- Gradienten-Echo-Sequenzen, die mit jeder Anregung jeweils eine K-Raumzeile füllen.
- Gradienten-Echo-Sequenzen, die mit einer Anregung mehrere K-Raumzeilen füllen.
- Gradienten-Echo-Sequenzen, die vor der Anregung einen Inversionspuls einschalten, um ein Gewebe zu unterdrücken.
- Gradienten-Echo-Sequenzen, die in Single-Shot-Technik akquiriert werden.

Durch ihre kurze Akquisitionszeit eignen sich Gradienten-Echo-Sequenzen hervorragend zur isotropen 3D-Bildgebung in einer für den Patienten tolerablen Untersuchungszeit.

Gradienten-Echo-Sequenzen finden ihre Anwendung in der kardiovaskulären sowie in der abdominalen Bildgebung. Die 3D-Varianten werden in der Gelenkbildgebung und neurologischen Bildgebung angewendet.

Fettunterdrückende Sequenzen

Die fettunterdrückenden bzw. fettsupprimierten Sequenzen sind keine eigene Sequenzform, sondern eine Ergänzung. Es ist praktisch möglich, jede Sequenz mit Fettsättigung zu generieren. So wird häufig nach der Injektion von Kontrastmittel oder zur Detektion von Entzündungen eine solche Sequenz mit Fettsättigung ergänzt.

Es gibt vier verschiedene Möglichkeiten der Fettunterdrückung:

- STIR-Sequenz
- chemische Verschiebung

- frequenzselektive Anregung
- SPIR-Sequenz

STIR-Sequenzen (Short Tau Inversion Recovery)

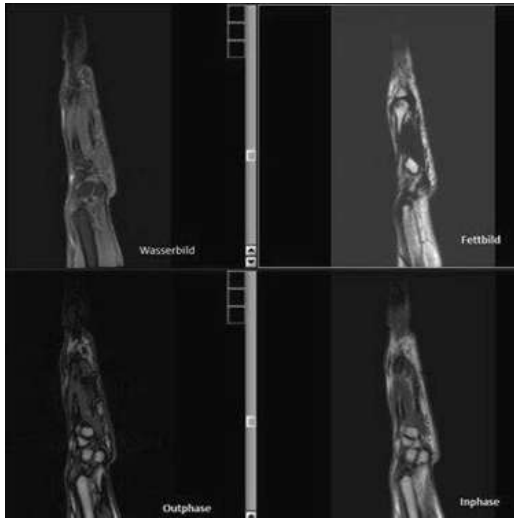
Fett hat eine kurze T1-Relaxationszeit. Wie bei den Inversion-Recovery-Sequenzen bereits erklärt, wird vor dem Anregungspuls ein 180° Inversionspuls vorgeschaltet. Beim Nulldurchgang von Fett, wird dann der Anregungspuls geschaltet, sodass im Fett keine transversale Magnetisierung entsteht. Die Technik ist robust, allerdings geht Sie mit einem Signalverlust einher, da die gesamte Schicht einen Inversionspuls erfährt. Außerdem sollte nach Kontrastmittelgabe von einer STIR-Sequenz abgesehen werden, da das Kontrastmittel auch eine Verkürzung der T1-Relaxation bewirken kann.

Chemische Verschiebung

Bei der chemischen Verschiebung nutzt man, dass wassergebundene Spins eine andere Frequenz haben als fettgebundene Spins – diese liegen bei 3.5 ppm (parts per million). Der Frequenzunterschied von Wasser zu Fett beträgt bei einer Feldstärke von 1,5 Tesla etwa 220 Hz. Dies kann eine Verschiebung in Frequenzkodierrichtung der fettgebundenen Spins bedeuten. Man kann das Phänomen häufig in der Skelettdiagnostik beobachten, wo um den Knochen in Frequenzkodierrichtung noch ein dicker schwarzer Saum zu sehen ist, weil die Bandbreite so niedrig ist, dass sich die Pixelverschiebung bemerkbar macht.

Bei der Nebennierendiagnostik macht man sich diese Eigenschaft auch zunutze. So kann unterschieden werden, ob der Patient eine Metastase oder ein Adenom hat. Die T1-gewichtete In- und Out-Phasen-Sequenz nutzt das Phänomen der schneller rotierenden wassergebundenen Spins. Nach 2.3 msec haben die Spins einen Phasenunterschied von 180°, und die Signale subtrahieren sich (Out-of-Phase). Nach 4.6 msec haben die wassergebundenen Spins die fettgebundenen Spins überrundet und addieren sich entsprechend (In-Phase).

Um mit der chemischen Verschiebung jetzt eine Sequenz zur Fettsuppression zu generieren, wird erst ein Bild mit In-Phase und danach ein Bild mit Out-of-Phase gemacht. Diese beiden Bilder kann man subtrahieren, und man erhält ein fettgesättig-



■ **Abb. 6.27** Dixon-Technik: Es wird ein In-Phase- und Out-Phase-Bild gemessen, und durch Subtraktion kann ein Fettbild erzeugt werden. Durch Addition kann ein reines Wasserbild berechnet werden

tes Bild. Diese Technik wird als Dixon-Sequenz bezeichnet (■ **Abb. 6.27**).

Frequenzselektive Anregung

Bei der frequenzselektiven Anregung wird ein HF-Puls vor der eigentlichen Anregung geschaltet, der dem der Frequenz der fettgebunden Spins entspricht und dafür sorgt, dass diese in die transversale Ebene umklappen. Statt die Signale jetzt aufzufangen, wird mittels Spoilergradienten die Transversalmagnetisierung der Fettspins zerstört. Die sich noch in der Longitudinalmagnetisierung befindenden wasser- gebundenen Spins, werden jetzt zügig angeregt, bevor die fettgebunden Spins sich erholen und auch zur Bildgebung betragen können.

SPIR-Sequenzen (Spektral selektive Inversion Recovery)

Im Gegensatz zur STIR-Sequenz wird bei einer SPIR-Sequenz nur ein frequenzselektiver Inversionspuls für Fett vor dem Anregungspuls geschaltet. Dadurch wird das Signal im Gegensatz zur STIR-Sequenz verbessert. Diese Art der Fettunterdrückung ist empfindlich für Magnetfeldinhomogenitäten.

6.5 Bildqualität und Sequenzoptimierung

Einer der ersten Sätze die man bei der Kernspintomographie lernt ist:

Man bekommt nichts geschenkt!

Was ist hiermit gemeint? Sobald man einen Faktor in der Kernspintomographie verändert, kann die Bildqualität darunter leiden. Entweder, weil der Patient nicht so lange liegen bleiben kann und die Sequenz verwackelt ist, oder weil die Auflösung bzw. die Bildqualität verschlechtert wird. Welche Faktoren sind dabei gemeint?

Es gibt eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die die Bildqualität verändern, wie z. B. Schichtdicke, Field of view, Auflösung, TR, TE, Magnetfeldstärke B_0 , Empfangsspule u. v. m.

Die Bildqualität bei der Kernspintomographie ist abhängig von einer hohen Auflösung, einem hohen Signal-zu-Rausch-Verhältnis und davon, dass keine störenden Artefakte im Bild zu sehen sind. Da wir in erster Linie Patienten im Kernspintomographen untersuchen, müssen wir einen Weg finden, um eine hohe Bildqualität zu erreichen.

In der Regel will man unterschiedliche Sequenzen generieren, die jeweils ihre Zeit brauchen. Der Patient kann häufig nicht sehr lange ruhig liegen bleiben. Daher werden die Sequenzen mit verschiedenen Parametern und Spulen so optimiert, dass ein Bild generiert werden kann, welches die bestmögliche Bildqualität in der kürzesten Zeit erzielt. Dabei ist folgender Einflussfaktor von besonderer Bedeutung:

6.5.1 Signal-Rausch-Verhältnis

Das Signal-Rausch-Verhältnis ist ein Parameter, welcher bestimmt wird durch die Signalintensität des zu untersuchenden Objektes und geteilt wird durch die Signalintensität des Hintergrundes. Dabei hängt das Signal-Rausch-Verhältnis ab von:

1. der **Wahl der optimalen Spule** für das zu untersuchende Objekt. Dies bedeutet z. B. bei der Untersuchung der Schulter möglichst die kleine Schulter-Array-Spule zu nehmen, da bei der Wahl der großen Schulter-Array-Spule das SNR um $\frac{1}{4}$ schlechter ist und entsprechend kompen-

siert werden muss – die Aufnahme würde rauschig werden.

2. der **Ortsauflösung**, welche definiert ist durch:

- Schichtdicke,
- Field of view,
- Matrixgröße.

Dabei lässt sich das Hintergrundrauschen minimieren, indem man eine dickere Schicht bei einer kleineren Matrix anregt. Allerdings geht dadurch die Detailerkennbarkeit verloren, und besonders kleinere Strukturen werden bei einem solchen Bild nicht mehr zu erkennen sein. Fazit: Das SNR ist gut, die Bildqualität schlecht.

3. der **Akquisitionszeit**, welche wie folgt errechnet wird:

$$TA = TR \times NEX \times N_{Phase}$$

TR – Zeit zwischen zwei HF-Pulsen

NEX – Zahl der Messungen

N_{Phase} – Akquisitionen

Auf TR und N_{Phase} wurde bereits im Kapitel über die Sequenzen ausreichend eingegangen. Die „NEX“ oder auch als „Mittelungen“ bezeichneter Parameter kann das SNR signifikant verändern, aber auch die Messzeit. Aber was ist die NEX genau? Die NEX beschreibt, wie häufig man den K-Raum ausliest. Je häufiger der K-Raum ausgelesen wird, umso geringer das Hintergrundrauschen und umso höher das Signal des zu untersuchenden Objektes. Außerdem werden unter anderem Pulsationsartefakte herausgerechnet. Allerdings verlängert sich auch die Messzeit. Bei der Erhöhung von einer auf zwei Mittelungen verdoppelt sich die Messzeit und das SNR wird nur um ca. 29 % verbessert. Dies kann man eventuell mit dem Lesen eines Artikels in der Zeitung vergleichen. Beim ersten Mal lesen kann man sich daran erinnern, dass irgendetwas irgendwo passiert ist. Beim zweiten Mal lesen weiß man, wo und was genau passiert ist. Beim dritten Mal lesen kann man sich gut daran erinnern, wo und was genau passiert ist und mit wem. Beim vierten Mal ändert sich kaum noch etwas, eventuell kann man den Artikel im Detail wiedergeben. Macht so etwas für jeden Artikel in der Zeitung Sinn? Jedes Mal

lesen hat seine Zeit in Anspruch genommen und den neuen Informationsgehalt nur minimal verbessert. So ist es auch mit den Mittelungen.

4. der **Homogenität** und der **Feldstärke** des Kernspintomographen. Mit steigender Magnetfeldstärke steigt auch die Signalintensität des zu untersuchenden Objektes. Leider geht dieses steigende Signal auch mit einer Erhöhung der spezifischen Absorptionsrate im Gewebe einher.

6.5.2 Parallele Akquisitionstechnik (PAT)

Die parallele Akquisitionstechnik ist eine Technik zur Messzeitverkürzung. Hierbei wird mittels Mehrkanalspulen (Matrixspulen) nicht jede K-Raumzeile ausgelesen. Jeder Spulenkanal empfängt die in seiner Nähe befindlichen Signale. Durch das Verkleinern des FOV'S würde es eigentlich zu einem Überfaltungsartefakt kommen; dies wird durch einen Referenzscan kompensiert. Der Referenzscan ist für die räumliche Zuordnung der von den unterschiedlichen Spulenelementen kommenden Signale zuständig. So wird jedes Signal seiner Position zugeordnet. Diese Technik wird auch als **SENSE-Technik** bezeichnet.

Eine weitere parallele Aquisitionstechnik ist die **GRAPPA-Technik**. Auch hier wird mit den Matrixspulen nur jede zweite K-Raumzeile ausgelesen; nur in der K-Raummitte werden noch einige zusätzliche K-Raumzeilen ausgelesen. Die fehlenden K-Raumzeilen werden mit einem Algorithmus berechnet.

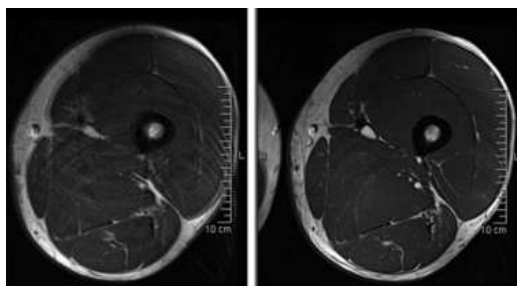
Die parallele Bildgebung verschlechtert das Signal-zu-Rausch-Verhältnis.

6.6 Artefakte

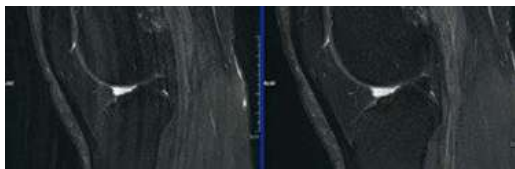
In der Kernspintomographie gibt es eine Vielzahl von bildstörenden Einflüssen, allerdings ist auch manch ein vermeintlicher Artefakt gewollt.

Artefakte können in drei Kategorien eingeteilt werden:

- durch Patienten verursachte Artefakte,
- durch die Messmethode verursachte Artefakte,
- durch das System verursachte Artefakte.



■ **Abb. 6.28** Sequenz mit Bewegungsunschärfe links. Messung wiederholt ohne Bewegungsunschärfe rechts



■ **Abb. 6.29** Pulsationsartefakt in Phasenkodierrichtung (links). Reduktion des Pulsationsartefaktes durch Phasenkodierrichtung HF (rechts)

6.6.1 Patienten-verursachte Artefakte

Vom Patienten verursachte Artefakte können durch Bewegungen des Patienten oder durch Bewegungen im Patienten, aber auch durch den Verlauf von Strukturen im Patienten entstehen. Außerdem können Magnetfeldinhomogenitäten durch den Patienten entstehen, wenn dieser z. B. eine Blutung bzw. eine neue Hüfte, also eine Endoprothese, aus Titan hat.

Bewegungsartefakte

Die Bewegungsartefakte können unterschiedliche Ursachen haben; zum einen kann die Untersuchungszeit zu lang sein, sodass der Patient sich während der Untersuchung bewegt, weil er z. B. Schmerzen hat. Andere Ursachen können Bewegungsartefakte sein, die durch Atmung, Herzbewegung oder auch Darmperistaltik entstehen.

Durch die Bewegung während der Untersuchung kann es zur einer Bildunschärfe (**Blurring**) bzw. auch zu Geisterbildern in Phasenkodierrichtung kommen (■ **Abb. 6.28**).

Um solche Artefakte zu minimieren, kann man z. B. EKG-, Puls- und Atemgating-Sequenzen benutzen.

Eine bequeme Lagerung während der gesamten Untersuchung sollte als selbstverständlich angesehen werden. Der Patient sollte informiert sein über Untersuchungsdauer bzw. über die Wichtigkeit der Einhaltung der Kommandos, wie z. B. Atemanhalte-Kommandos. Diese sollten auch vor der Untersuchung einmal mit dem Patienten geübt werden. Somit sieht der Untersucher auch, wie lange der Pa-

tient die Luft anhalten kann, und entsprechend kann die Sequenz angepasst werden. Für Untersuchungen im Gastrointestinaltrakt muss ggf. die Peristaltik mit Medikamenten (z. B. Buscopan®) beruhigt werden.

Auch ein Vertauschen der Phasenkodierrichtung kann helfen.

Flussartefakte

Die Flussartefakte entstehen durch pulsierende Gefäße oder Flüssigkeiten (■ **Abb. 6.29**) wie z. B. Liquor in Phasenkodierrichtung, dabei entstehen multiple Geisterbilder. Wie stark diese Artefakte auftreten, hängt von verschiedenen Parametern wie TR, TE, TI, Flipwinkel usw. ab.

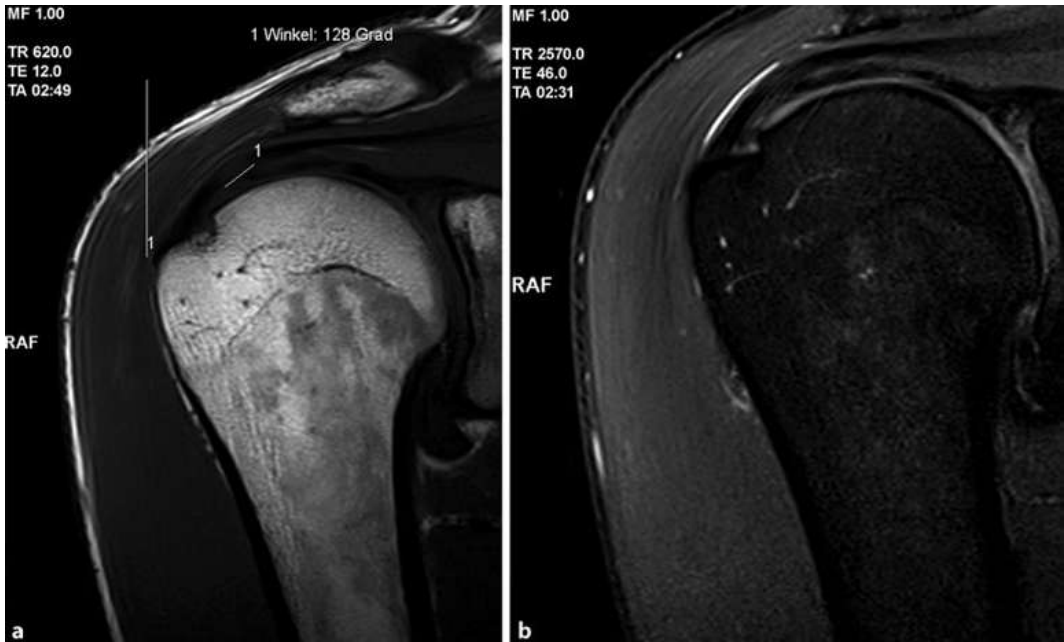
Um Flussartefakte zu minimieren, sollte die Phasenkodierrichtung in Flussrichtung ausgelesen werden. Auch Vorsättigerpulse und Flusskompensation können zum Minimieren des Flussartefaktes beitragen.

Magic-Angel-Artefakt

Das Magic-Angel-Artefakt tritt bei Sehnen auf, die in einem Winkel von 55° zum Hauptmagnetfeld verlaufen (■ **Abb. 6.30**). Man kann in der signalarmen Sehne in diesem Bereich einen Signalanstieg beobachten, was zu einer Fehlbefundung führen kann. Dieses Artefakt wird bei Sequenzen mit kleiner TE beobachtet, also T1- und PD-gewichteten Sequenzen. Für PD-gewichtete Sequenzen wird daher ein Erhöhen auf über TE 40 vorgeschlagen.

Magnetfeldinhomogenitäten durch den Patienten (Suszeptibilitätsartefakte)

Manche vermeintliche Artefakte können aber auch hilfreich sein. So ist es beispielsweise bei einer Blutung im Gehirn eines Patienten. Nach der akuten Phase lässt sich eine Blutung in der Kernspintomo-

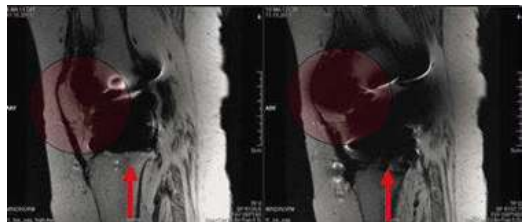


■ Abb. 6.30a,b Magic-Angel-Artefakt

graphie als Signalauslöschung in der T2*-Bildgebung nachweisen. Dies geschieht, weil das Abbauprodukt des Hämoglobins eine paramagnetische Eigenschaft besitzt.

Im Übergangsbereich zweier unterschiedlicher Gewebearten entstehen auch lokale Feldinhomogenitäten. Hier kommt es zu Verzerrungen oder Signalauslöschungen. Man kann diesen Effekt besonders im Kopfbereich beobachten, im Bereich der Nasennebenhöhlen zum Gehirn. Durch den Patienten verursachte Artefakte sind leider alles andere als hilfreich. So kommt es zu Verzerrungen im Bild, wenn ein Patient irgendwelche Metallimplantate eingesetzt bekommen hat. Je nachdem, was implantiert worden ist, kann die Region kaum noch adäquat untersucht werden (■ Abb. 6.31).

Eventuell können diese Artefakte minimiert werden, indem man die Bandbreite erhöht und das TE kleiner wählt. Auch eine Erhöhung der Matrix kann hilfreich sein. Die Spin-Echo-Sequenzen sind der Gradienten-Echo-Sequenzen in dem Bereich der Artefakte vorzuziehen. Die Spin-Echo-Sequenzen können mit dem 180°-Refokussierungspuls die Artefakte minimieren.



■ Abb. 6.31 Im rechten Bild ist ein starker Metallartefakt zu sehen. Im linken Bild mit erhöhter Bandbreite konnte der Metallartefakt reduziert werden

6.6.2 Messmethoden-bedingte Artefakt

Die durch Messmethoden verursachten Artefakte können durch Gradientenverzerrungen, durch Einfaltung, durch chemische Verschiebung und durch den Oszillationsartefakt entstehen.

Einfaltungsartefakte

Einfaltungsartefakte können dort entstehen, wo das zu untersuchende Objekt grösser ist als das Feld (field of view), welches untersucht wird. Es kommt zu einer Fehlkodierung in Phasenkodierrichtung oder in Frequenzkodierrichtung. Bei der Phasenko-



■ **Abb. 6.32** Einfaltungsartefakt in Phasenkodierrichtung (Untersuchung einer Hand mit Einfaltung des Daumens am unteren Bildrand)

dierrichtung treten die Einfaltungsartefakte häufiger auf. Dies liegt an der Fehlinterpretation der Phasenlage der Spins. Bei der Phasenkodierung wird jedem Spin ein Phasenwinkel zwischen -180° und $+180^\circ$ im field of view (FOV) zugeordnet. Ist jetzt das Objekt grösser als das FOV werden auch Spins außerhalb mit dem Phasenkodiergradient angeregt und als Spin mit falschem Phasenwinkel erkannt und auf die Gegenseite eingefaltet (■ [Abb. 6.32](#)).

Um Einfaltungsartefakte zu vermeiden, kann die Phasenkodierrichtung gewechselt werden. Aber auch das Vergrößern des FOV ist möglich, dies verschlechtert allerdings die Matrix. Das Phasenoversampling führt zu einem rechnerisch vergrößerten Field of view's bei gleicher Matrixgröße, allerdings wird die Untersuchungszeit verlängert.

Chemische Verschiebung

Die chemische Verschiebung wurde bereits in ► [Abschn. 6.4.2](#) besprochen. Bei der chemischen Verschiebung haben die fettgebundenen Spins eine andere Frequenz als die wassergebundenen Spins. Da der Frequenzkodiergradient bei der Ortskodierung die Frequenzunterschiede nutzt, kann es hier zu ei-

ner Fehlinterpretation in Frequenzkodierrichtung kommen, in Bereichen, in denen Gewebegrenzen mit unterschiedliche starken Fett- und Wasseranteilen sind, wie z. B. Nieren.

Die chemische Verschiebung nimmt mit der Feldstärke zu. Um diesen Artefakt zu minimieren, kann die Frequenzkodierrichtung geändert werden, um sicher zu stellen, dass es sich um einen Artefakt handelt. Außerdem kann die Bandbreite erhöht werden, da diese den Frequenzunterschied zweier benachbarter Pixel festlegt.

Oszillationsartefakt

Der Oszillationsartefakt ist abhängig von der Matrix und der Schichtdicke. Bei stark kontrastreichen Übergängen können diese nur angenähert dargestellt werden. Es kommt zu Signalschwingungen parallel zu den Gewebegrenzen. Um die Oszillationsartefakte zu verringern, muss die Matrix vergrößert werden.

6.6.3 Durch das System verursachte Artefakte

Die Artefakte, die durch das System verursacht werden, können unterschiedliche Ursachen haben. Die Spule kann defekt sein und verursacht entsprechend Geisterbilder, die aussehen wie Bewegungsartefakte (■ [Abb. 6.33](#)). Es können Streifen oder Punkte im Bild auftreten infolge von Störsignalen. Störsignale, die im Raum entstanden sind, können auftreten, weil z. B. die Glühlampen defekt sind. Oder Störsignale von außen treten auf, weil die HF-Käfigtür nicht richtig verschlossen wurde. Es kann aber auch zu Entladevorgängen durch Lagerungshilfen kommen, die von der Empfangsspule als Signal aufgenommen werden. Daher soll die Luftfeuchtigkeit über 50 % sein, um das Risiko solcher Entladungsvorgänge zu minimieren.

6.7 MR-Angiographie

Bei der Kernspintomographie ist es möglich, mit unterschiedlichen Techniken die Gefäße darzustellen. Das Blut ist jeweils nur kurz in der Anrengungsschicht und hat eine relativ lange T1-Relaxa-

tionszeit. In der Routinesequenz wird ein Gefäß als dunkle Struktur sichtbar, während das umliegende stationäre Gewebe mit kurzer T1-Relaxationszeit unterschiedlich kontrastiert dargestellt wird. Jedoch gibt es unterschiedliche Techniken, um das umliegende Gewebe signalarm und nur die Gefäße signalreich darzustellen.

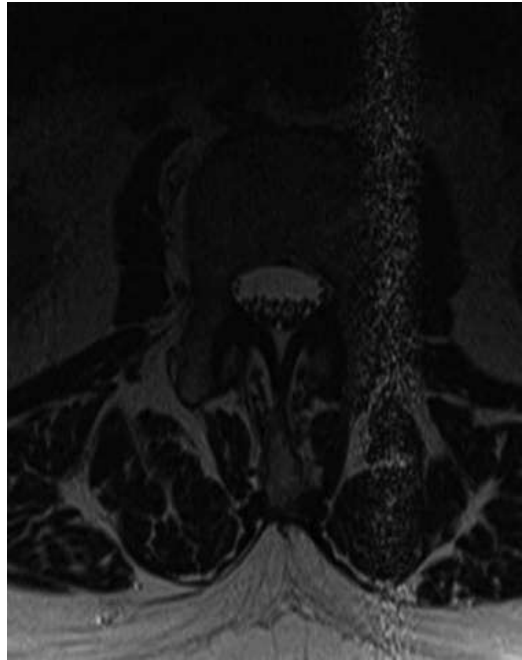
Für die Angiographie werden flussemfindliche Sequenzen genutzt. Diese können die Gefäße hell oder dunkel darstellen. Die in der Kernspintomographie genutzten Sequenzen für die Angiographie werden häufig nachverarbeitet. So wird beispielsweise bei einer kontrastmittelverstärkten Angiographie zuerst ein nativer Datensatz aufgenommen, welcher später von der kontrastmittelverstärkten Sequenz subtrahiert wird, ähnlich wie in der herkömmlichen Angiographie. Der subtrahierte Datensatz kann dann noch in der Maximum Intensity Projection (MIP) weiter verarbeitet werden, sodass eine Rotation des Datensatzes angefertigt werden kann. Oder der Datensatz wird als multiplanare Rekonstruktion (MPR) nachverarbeitet.

Man unterscheidet

- native Techniken:
 - Time of Flight
 - Phasenkontrastangiographie
- kontrastmittelverstärkte Techniken:
 - CE-Angiographie

Time of Flight (TOF)

Die Time-of-Flight-Sequenz ist eine robuste Technik, die ihre Anwendung besonders in der Darstellung der intrakraniellen Gefäße findet. Die TOF-Sequenz nutzt den Inflow-Effekt. Dabei wird das stationäre Gewebe unterdrückt, indem die Anregungspulse schnell hintereinander geschaltet werden. Somit wird eine Längsmagnetisierung des stationären Gewebes verhindert. Das einfließende Blut ist nur kurz in der Anregungsschicht und wird daher nicht gesättigt. Dadurch kann das einfließende Blut ein starkes Signal erzeugen. Je größer die Anregungsschicht ist bzw. je langsamer das Blut fließt, umso schwächer wird das Signal. Um nur Arterien oder nur Venen darzustellen, müssen die anderen Gefäße entsprechend unterdrückt werden. Dabei nutzt man die Tatsache, dass arterielles Blut und venöses Blut eine entgegengesetzte Flussrichtung



■ Abb. 6.33 Störsignal in Phasenkodierrichtung

haben. Dies geschieht durch einen entsprechenden Vorsättigungsimpuls, der beim Einströmen in die Anregungsschicht verhindert, ein Signal abzugeben. Für die Darstellung von Arterien kann eine etwas größere Anregungsschicht gewählt werden als bei der Darstellung der Venen. Die Größe der Anregungsschicht hängt von der jeweiligen Flussgeschwindigkeit ab. Dabei haben Arterien eine schnellere Flussgeschwindigkeit als Venen.

Um einen Partialvolumeneffekt zu vermeiden, muss die Sequenz möglichst so anguliert werden, dass sie senkrecht zum Verlauf des zu untersuchenden Gefäßes geplant wird.

Phasenkontrastangiographie (P-CA)

Die Phasenkontrastangiographie ist eine Technik, wie sie bei der Darstellung von langsam fließenden Blut, wie z. B. bei den Sinusvenen, zur Anwendung kommt. Außerdem wird diese Technik zur Darstellung von Flussgeschwindigkeiten genutzt, wie beispielsweise in der Bildgebung des Herzens.

Bei der Phasenkontrastangiographie müssen vier Datensätze gemessen werden, um die Gefäße hell darzustellen zu können. Die erste Messung ist

eine bipolare Referenzmessung mit Flusskompensation. Die drei anderen sind bipolare Gradientenpulse ohne Flusskompensation, welche in allen drei Raumrichtungen geschaltet werden. Bei der ersten Messung haben sowohl stationäres Gewebe als auch Gefäße die Phasenlage „NULL“. Allerdings ist bei den anderen drei Messungen die Phasenlage von Blut unterschiedlich, und nur das stationäre Gewebe hat die Phasenlage „NULL“. Durch Subtraktion wird jetzt nur das fließende Blutung als Signal sichtbar.

Wie stark der Phasenunterschied ausgeprägt ist, hängt von der Geschwindigkeit der Spins und von der Amplitude des bipolaren Gradientenpulses dem sog. Velocity Encoding Gradient (Venc) ab. Manchmal kann der Phasenunterschied auch größer als 180° sein. Es kommt zum **Aliasing**, das bedeutet einen Phasenumschlag, welcher sich darstellt wie eine Phasenlage mit umgekehrten Vorzeichen. Um ein Aliasing zu vermeiden, muss die Flussempfindlichkeit über den Venc korrekt eingestellt werden. Allerdings darf der Venc auch nicht zu hoch eingestellt werden, da es zur Signalschwächung kommen würde.

Kontrastmittelverstärkte Angiographie (Contrast Enhanced Angiography, CE-A)

Bei der kontrastmittelverstärkten Angiographie werden durch Injektion eines T1-verkürzenden Kontrastmittels Gefäße dargestellt, während das Kontrastmittel sich in dem zu untersuchenden Gefäß befindet. Vor der Kontrastmittelgabe wird genau dieselbe Sequenz akquiriert, wie zum Zeitpunkt der Kontrastmittelanflutungsphase. Die kontrastmittelverstärkte Sequenz und die native Sequenz werden voneinander subtrahiert. Die subtrahierte Sequenz kann anschließend mittels der Maximum Intensity Projection (MIP) weiter verarbeitet werden. Für die Detektion des Zeitpunkts, wann sich das Kontrastmittel im zu untersuchenden Gefäß befindet gibt, es zwei verschiedene Techniken:

Testbolus

Bei der Testbolus-Technik wird eine kleine Menge Kontrastmittel zeitgleich mit einer Testbolus-Sequenz gestartet. Diese Sequenz akquiriert jede Sekunde ein Bild. Sinnvoll ist, diese Sequenz etwa 90 Sekunden durchlaufen zulassen. Nachdem die Sequenz durchgelaufen ist, kann sie ausgewertet werden, um zu

sehen, nach welcher Zeit sich das Kontrastmittel im zu untersuchenden Gefäß befindet. Danach wird die ermittelte Zeit nach Kontrastmittelgabe abgewartet und die Sequenz entsprechend gestartet.

Carebolus

Bei der Carebolus-Technik wird erst die native Angiographiesequenz gemessen. Danach wird die Carebolus-Sequenz zeitgleich mit dem Kontrastmittel gestartet; auch hier wird jede Sekunde ein Bild gemessen und auf dem Bildschirm angezeigt. Im Moment der Kontrastmittelanflutung im zu untersuchenden Gefäß wird die Carebolus-Sequenz gestoppt und die kontrastmittelverstärkte Angiographie gestartet.

6.8 Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien der Bundesärztekammer

Ch. Nowarra

6.8.1 Allgemeine Qualitätsanforderungen

Die Bundesärztekammer hat zur Durchführung radiologischer Untersuchungen im Jahr 1999 eine **Leitlinie zur Qualitätssicherung der Magnet-Resonanz-Tomographie** herausgegeben. Im Rahmen neuerer Leitlinien (2012) einzelner medizinischer Gesellschaften von z. B. der DGN (Deutsche Gesellschaft für Neurologie) oder im Leitlinienprogramm Onkologie findet die Untersuchungstechnik des MRT in der Diagnostik immer mehr an Bedeutung. In Hinblick auf das Entstehungsdatum und Berücksichtigung der technischen Entwicklung auf dem Gebiet der MRT ist eine **Überarbeitung der Leitlinien zur Qualitätssicherung in naher Zukunft erforderlich**.

Die Magnetresonanztomographie ist eines der modernsten und technisch aufwändigsten bildgebenden Verfahren in der Radiologie und für die bildgebende Diagnostik nicht mehr wegzudenken. Zur Beantwortung medizinischer Fragestellungen ist eine strenge Indikationsstellung u. a. auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten, von einem fachkundigen Arzt in der MRT zu treffen.

Für die Auswahl einer kernspintomographischen Untersuchung sind u. a. zu berücksichtigen:

- die **individuelle Fragestellung**, die sich aus den Beschwerden des Patienten und den vorangegangenen Befund ergibt,
- sowie Aussagen, die zur weiteren **Diagnose und/oder Therapieentscheidung** beitragen, wenn Alternativuntersuchungen kostenaufwendiger oder für den Patienten risikoreicher sind.

Gerade weil die verschiedenen Parameter einzeln veränderbar sind und sich gegenseitig beeinflussen bedarf es einer zielorientierten, fachkundigen Untersuchungstechnik und einer genauen Indikationsstellung. Daher gewinnt die Qualitätssicherung mit Bezug auf die Leitlinien in der MRT zunehmend an Bedeutung, um auf diesem Gebiet alle für eine Diagnose wichtigen Bildinformationen zu erhalten. Durch die rasante technische Entwicklung auf dem Gebiet der MRT ist es umso wichtiger und unerlässlich für Arzt und MTRA, sich auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft zu halten und kontinuierlich fortzubilden. Auch auf dem Gebiet der Forschung gewinnt die Kernspintomographie zunehmend an Bedeutung.

Messbedingungen und Messparameter müssen der Fragestellung **angepasst** werden. Hierzu gehören u. a.:

- Schichtlokalisation,
- Schichtebenen,
- Schichtfolgen,
- Ortsauflösung,
- Schichtabstände,
- Auswahl verschiedener Messsequenzen,
- Kontrastmittel.

Die Mindestanforderungen an eine MR-Untersuchung werden durch die zu beurteilenden anatomischen Strukturen und die kritischen Gewebekontaste bestimmt.

Voraussetzungen für eine gute Bildqualität sind **Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)** und **Kontrast-Rausch-Verhältnis (CNR)**. Diese Werte sollen, unabhängig von der verwendeten Technik, vergleichbar sein, was nur möglich ist, wenn die **standardisierten Verfahren** ohne Nachrekonstruktionen o. ä. angewendet werden. Als Orientierung werden in der Leitlinie Standardwerte für die Körperregionen Schädel, Abdomen und Bewegungsapparat benannt.

6.8.2 Spezielle Anforderungen an Indikationsstellung, dargestellte Strukturen und Kontraste

In diesem Teil der Leitlinie werden **typische Indikationen** für MR-Untersuchungen sowie **Mindestanforderungen für die Bilddarstellung** benannt. Diese sind relativ detailliert für viele verschiedene Untersuchungen aller Körperregionen aufgeführt. Allerdings berücksichtigen sie nicht die modernen Möglichkeiten, die sich aus der technischen Entwicklung der MRT ergeben. So wird z. B. als Standardindikation der Hirngefäße die Sinusvenenthrombose angegeben und eine MR-Angio der Hirnarterien ist „speziellen Anforderungen“ vorbehalten, die nicht näher benannt werden.

Heute hat im klinischen Alltag eine Darstellung der Hirnarterien oder deren Versorgungsgebiete (z. B. Time-of-Flight oder Diffusionsdarstellung) bei Schlaganfallpatienten längst Routinecharakter.

6.8.3 Allgemeine Anforderung an die Untersuchungstechnik

Wie auch bei der Computertomographie soll die **Lagerung des Patienten reproduzierbar** und anhand von Übersichtsbildern (Topogramme) nachvollziehbar **dokumentiert** sein. Die Untersuchungsregion ist vollständig darzustellen.

Die Untersuchung soll in **mind. zwei Raumebenen** erfolgen, wobei eine der Raumebenen in **mind. zwei verschiedenen Kontrasten** dargestellt sein muss. Es sind also bei jedem Patienten wenigstens drei Messungen erforderlich.

Zusätzlich ist zu beachten, dass bei **Messungen in einer Raumebene** (mit unterschiedlichen Kontrasten) die **Messgeometrie identisch** sein sollte (Schichtdicke, Schichtposition, FOV etc.).

Die Auswahl der Messsequenzen und ggf. die Verwendung eines Kontrastmittels wird durch die Fragestellung bestimmt.

Alle relevanten Parameter müssen so dokumentiert werden, dass jederzeit eine einwandfreie Beurteilung der Bilder möglich ist. Dazu gehören neben den üblichen Patientendaten u. a. Angaben zum Gerät, Bezeichnung der Messsequenz, Art

und Menge eines verwendeten Kontrastmittels, Schichtdicke, Seitenbezeichnung und Bildreihenfolge etc.

Nicht alle Daten werden auf dem Bild selbst dokumentiert, es genügt z. T. die Hinterlegung der Parameter (Kontrastmittelmenge usw.) im RIS.

6.8.4 Technisch-physikalische Qualitätsanforderungen

In diesem Abschnitt der Leitlinie werden die wichtigsten Funktionen einzelner Gerätebauteile, z. B. des Gradientensystems beschrieben. Ebenso Anforderungen an die Bildgüte inkl. der erlaubten Toleranzwerte bei Abweichungen – z. B. dürfen bei Phantommessungen Abweichungen in der Signalintensität max. 10 % bei Kopfspulen und 20 % bei Körperspulen betragen, um eine diagnostische Bildhomogenität zu gewährleisten.

Diese Daten spielen aber im täglichen Arbeitsablauf der MTRA eine untergeordnete Rolle, da sie keine Konstanzprüfungen wie in der Röntgendiagnostik durchführen. Darüber hinaus werden in der Leitlinie keine Angaben zu Zeiträumen gemacht, innerhalb derer eine Überprüfung der technisch-physikalischen Anforderungen erfolgen sollte.

Spezielle geräte- und **untersuchungstechnische Mindestanforderungen** werden in einer Tabellenübersicht dargestellt. Hier werden für Organregionen Parameter wie FOV, Messmatrix, Schichtdicke und -ebenen Spulenauswahl, Wichtung, mögliche Sequenzen, Messzeiten, Kontrastmittelgabe und besondere Anforderungen empfohlen.

Aussagen zu Sicherheitsaspekten, die für Patient und Personal in der Magnet-Resonanz-Tomographie elementare Bedeutung besitzen, werden in der Leitlinie nicht gemacht.

- ✓ 1. Es wird mit der Kniespule untersucht.
2. Der Patient muss nach etwaigen Kontraindikationen zu einer MRT-Untersuchung befragt werden (s. u.); sämtliches Metall muss abgelegt werden. Auch eine Scheckkarte, Geld oder Schmuck etc. gehören zu den Dingen, die nicht mit in den Untersuchungsraum dürfen. Der Patient muss auf die Enge in der Röhre hingewiesen werden.

Bei starker Platzangst muss ggf. ein Beruhigungsmittel erwogen werden.

3. Der Patient darf nicht untersucht werden, wenn er z. B. einen nicht MR-kompatiblen Schrittmacher hat. Ferner sind Ausschlusskriterien: ferromagnetische Implantate, verschiedene zerebrale Aneurysma-Clips, „alte Herzklappen“, insbesondere die Starr-Edwards-Kugel-Klappe, Granatsplitter, insbesondere in der Nähe der Augen oder von größeren Gefäßen, Insulin-Pumpen und Schmerzpumpen.

In Kürze

- Die Magnetresonanztomographie ist ein strahlungsfreies bildgebendes Verfahren, welches auf dem physikalischen Phänomen des Kernspins (Drehung eines Protons um die eigene Achse) beruht. Aus diesem Grund wird sie auch als Kernspintomographie bezeichnet.
- Die MR-Bildgebung ist sehr komplex, da sich alle Parameter ständig gegenseitig beeinflussen und magnetische Phänomene gleichzeitig auftreten können. Diese dienen nicht immer der Bildgebung, sondern können zu Artefakten führen.
- Je höher ein MR-Tomograph technisch entwickelt ist, umso mehr Einflussmöglichkeiten entstehen – sowohl für die Verbesserung der Bildqualität als auch für die Entstehung von Artefakten.
- Ein wesentlicher Aspekt der MR-Diagnostik ist die Untersuchungszeit. Verglichen mit anderen bildgebenden Verfahren gilt das MRT als langsam. Die technischen Bemühungen haben zum Ziel, die Messzeiten zu verkürzen und den Patientenkomfort (Dauer der Untersuchung, räumliche Enge, Lautstärke) zu erhöhen.
- Durch die starken Magnetkräfte stellt das MRT auch eine Herausforderung für das Sicherheitsmanagement dar. Im Gegensatz zu einer Röntgenanlage ist ein MR-Magnet immer an und es kann, bei Nichteinhaltung der Sicherheitsvorschriften, zu lebensbedrohlichen Situationen kommen.

- Die von der Bundesärztekammer vorliegenden Leitlinien zur Qualitätssicherung liefern zwar einen Überblick über grundlegende Anforderungen, müssen aber, aufgrund der technischen Entwicklungen, zwingend überarbeitet werden.

Literatur

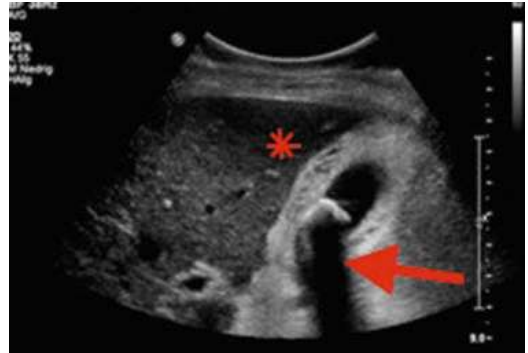
- EDUMED Kursunterlagen, MR-Fortgeschrittenenkurs Mannheim 08.05.-10.05.2009
http://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/032-045OL_k_S3__Brustkrebs_Mammakarzinom_Diagnostik_Therapie_Nachsorge_2012-07.pdf
http://www.dmsg.de/dokumentearchiv/dgnkknms_msl_20120412_final.pdf
 „Leitlinien Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung der Magnet-Resonanz-Tomographie“ (Gemäß Beschluß des Vorstandes der Bundesärztekammer vom 29.01.1999)
 Busch H-P (2008) Management-Handbuch für Radiologen. Thieme Verlag, Stuttgart
 Nitz WR (2012) MRT-Guide für MTRA/RT, 1. Aufl. Thieme, Stuttgart
 Richtlinien des gemeinsamen Bundesausschusses über Kriterien zur Qualitätsbeurteilung in der Kernspintomographie gemäß § 136 SGB V i. V. m. § 92 Abs. 1 SGB V (Qualitätsbeurteilungs-Richtlinie für die Kernspintomographie Stand: 16. Oktober 2000) erschienen im Deutschen Ärzteblatt, Jg. 98, Heft 12, 23. März 2001
 Qualitätssicherung Kernspintomographie der KVB vom 27.06.2006: <https://www.kvb.de/fileadmin/kvb/dokumente/Praxis/Qualitaet/QS/KVB-MRT-Booklet-20060727.pdf>
 Schild H (1990) MRI made easy. Schering AG, Berlin
 Siemens Kursunterlagen, MRT für fortgeschrittene Anwender Erlangen 07/2007
 Siemens Medical (2003) Magnete, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie. Siemens Medical, Erlangen
 Siemens Medical (2004) Magnete, Fluss und Artefakte. Grundlagen, Techniken der Magnetresonanztomographie. Siemens Medical, Erlangen
 Weißhaupt D, Koechli VD, Marincek B et al (2009) Wie funktioniert MRI, 6. Aufl. Springer, Berlin

Sonographie

C. Vockelmann

- 7.1 Physikalische Grundlagen der Sonographie – 176**
 - 7.1.1 Ultraschallwellen – 176
 - 7.1.2 Verfahren – 178
- 7.2 Aufbau und Funktionsweise eines
Sonographiegerätes – 180**
 - 7.2.1 Schallköpfe – 180
 - 7.2.2 Wo muss ich drücken ... – 181
- 7.3 Möglichkeiten und Grenzen der Ultraschalldiagnostik – 182**
 - Literatur – 183**

In der Notaufnahme des Krankenhauses stellt sich eine 55jährige, adipöse Patientin mit rechtsseitigen, krampfartigen Oberbauchbeschwerden vor. In der klinischen Untersuchung findet der aufnehmende Arzt ein positives Murphy-Zeichen: Bei der tiefen Palpation im rechten Oberbauch kommt es zu einem plötzlichen, schmerzbedingten Stoppen der tiefen Inspiration. In der Labordiagnostik von Blut und Urin sind die Entzündungsparameter (CRP, Leukozyten) leicht erhöht. Zur weiteren Abklärung wird eine Ultraschalluntersuchung des Abdomens veranlasst, die im rechten Oberbauch das folgende Bild zeigt (■ Abb. 7.1).



■ **Abb. 7.1** Ultraschallbild der Gallenblase. In der Gallenblase zeigt sich eine Struktur mit dorsaler Schallauslöschung (roter Pfeil). Das angrenzende Leberparenchym (Stern) hat eine normale Textur

7 ? Stellen Sie sich vor, dass Sie in Ihrer Ausbildung zur MTRA gerade beim Bereich „Sonographie“ angekommen sind:

1. Welcher Verdacht liegt diagnostisch nahe, wenn Sie sich die Symptome der Patientin und das Ultraschallbild betrachten?
2. Dr. Echo hat Ihnen kurz telefonisch mitgeteilt, dass sie etwas später zur Untersuchung kommt und bittet Sie, die wichtigsten Einstellungen am Sonographiegerät vorzunehmen. Was müssen Sie einstellen?
3. Und welche Einstellungen nehmen Sie vor, wenn eine Duplexsonographie der Beinvenen durchgeführt werden soll?

7.1 Physikalische Grundlagen der Sonographie

7.1.1 Ultraschallwellen

Bei der Sonographie werden Ultraschallwellen eingesetzt, um Schnittbilder vom menschlichen Körper anzufertigen.

Definition

Als Ultraschall werden Schallwellen mit Frequenzen oberhalb des menschlichen Hörvermögens bezeichnet.

Einige Tiere, z. B. Fledermäuse und Delphine, können diese Frequenzen wahrnehmen und nutzen den Ultraschall zur Ortung im Raum. Schall entsteht durch die Erzeugung von Über- und Unterdruck-

zonen. Die beschallten Moleküle wandern nicht, sondern schwingen und geben diese Schwingungsenergie an das Nachbarmolekül weiter, sodass sich der Schall ausbreitet.

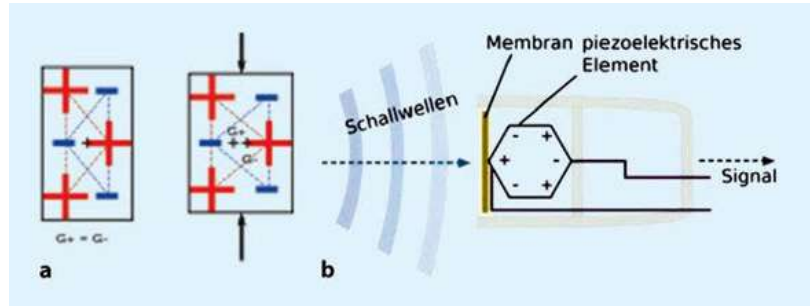
Erzeugt werden die Ultraschallwellen in Sonographiegeräten über den sog. **reziproken piezoelektrischen Effekt** an einem Quarzkristall. Der Festkörper dient als Sender und Empfänger der Schallwellen. Der Piezoeffekt entsteht durch die Kontraktion und Elongation – also Stauchung und Ausdehnung – des Kristalls (■ Abb. 7.2a). Durch eine angelegte äußere elektrische Spannung kommt es zur Aussendung der Schwingungen, sprich der Schallwellen (= **Schallwellenemission**).

Treffen die Schallwellen auf ihrem Weg auf einen Impedanzsprung (Wellenwiderstand), z. B. an der Grenze von Fettgewebe zu Wasser, werden sie reflektiert und als Echo bzw. Resonanz auf dem Quarzkristall empfangen. Durch den dadurch erzeugten Schalldruck verformt sich der Kristall, die elektrische Ladung wird verschoben. Durch diesen Piezoeffekt (■ Abb. 7.2b) entsteht eine messbare elektrische Spannung, die mit der angeschlossenen Elektronik aufgenommen und als Bild angezeigt wird.

In der Medizin wird das Verfahren seit Mitte der 70er Jahre zur Bildgebung eingesetzt.

Für den menschlichen Körper sind Ultraschallwellen ungefährlich. Lediglich eine geringe Erhöhung der Körpertemperatur ist bei einer intensiven Untersuchung denkbar.

■ **Abb. 7.2a,b** Im Ruhezustand liegt der Mittelpunkt der positiven und der negativen Ladungen übereinander, die Ladungen neutralisieren sich. Wenn der Kristall komprimiert wird, verschieben sich die Mittelpunkte der Ladungen gegeneinander, es entsteht eine messbare elektrische Spannung (a). Pieoeffekt (b)



■ **Tab. 7.1** Geschwindigkeit der Schallwellen in Abhängigkeit vom Medium

Luft	340 m/s
Wasser/Fett	1450 m/s
Weichteilgewebe	1540 m/s
Knochen	2700–4100 m/s

■ **Tab. 7.2** Frequenzabhängige Eindringtiefe von Schallwellen ins Gewebe

Frequenz	Auflösung axial/lateral	Abbildungstiefe
3,5	1 mm / 2 mm	160 mm
5	0,6 mm / 1,2 mm	100 mm
7,5	0,4 mm / 0,8 mm	50 mm

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen hängt vom durchschallten Medium und dessen Elastizität und Moleküldichte ab (■ Tab. 7.1).

Das Ultraschallbild entsteht durch Wellen, die an Gewebeübergängen reflektiert, gestreut und gebrochen werden. Dieser Effekt entsteht durch Impedanzsprünge, z. B. an den Organgrenzen oder Gefäßwänden. Impedanz (z) steht für den Übergangswiderstand, der ein Produkt aus der Schallgeschwindigkeit (c) im Medium und der Dichte (ρ) des Mediums ist:

$$z = c \times \rho$$

➤ Ohne Grenzübergänge kein Ultraschallbild!

■ Was passiert mit den Schallwellen im Körper?

1. Absorption

Ein Großteil der Schallwellen wird absorbiert, also in ein Medium vollständig aufgenommen (lat. absorptio = Aufsaugung).

➤ Die Absorption verstärkt sich exponentiell mit zunehmender Bildtiefe und steigt linear mit der eingeschalteten Frequenz.

Die absorbierte Energie wird in Wärme umgewandelt. Es gibt daher verschiedene Schallköpfe, die unterschiedliche Frequenzen aussenden. Typischerweise werden bei der Abdomenbildgebung Frequenzen von 3,5 MHz verwendet, bei oberflächlichen Strukturen können hochfrequente Schallköpfe von bis zu 20 MHz verwendet werden, die ein nur wenige cm in die Tiefe reichendes Bild erzeugen können (■ Tab. 7.2).

2. Reflexion und Streuung

Sind die Grenzflächen wesentlich größer, als die Wellenlänge, kommt es zur Reflexion.

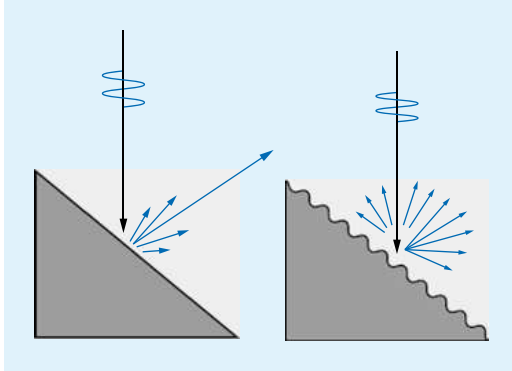
Definition

Reflexion bedeutet, dass Einfallswinkel und Ausfallswinkel gleich sind.

Die Schallwellen werden also, wie die Billardkugeln an der Bande, zurückgeworfen. Bei kleinen Strukturen werden die Schallwellen vermehrt gestreut. Die Streuung erfolgt ungerichtet, vergleichbar mit Zucker, der auf den Küchentisch fällt (■ Abb. 7.3).

3. Refraktion (Brechung)

Durch die Refraktion werden die Schallwellen beim Eintritt in ein anderes Medium **abgelenkt**.



■ Abb. 7.3 Reflexion und Streuung von Schallwellen. An einer glatten und einer „rauen“ Oberfläche

Verstärkt wird der Effekt durch einen spitzeren Winkel und durch einen höheren Widerstand zwischen den beiden Medien. Der gleiche Effekt bricht das Sonnenlicht im Regen und erzeugt den Regenbogen.

4. Diffraction (Beugung)

Definition

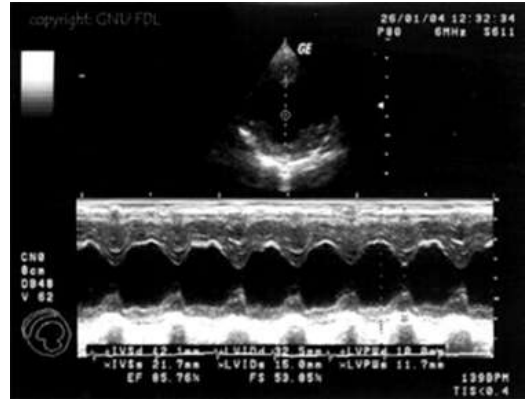
Beugung beschreibt die Ablenkung von Wellen an einem Hindernis, die zur Entstehung neuer Wellen am Hindernis und deren Interferenz (Überlagerung) führt.

Die Beugung von Wellen kann man bei einer Welle im Meer beobachten, die auf eine enge Hafeneinfahrt trifft. Im Hafen setzt sich die Welle kreisförmig in alle Richtung fort.

7.1.2 Verfahren

A-Mode

Beim A-Mode handelt es sich um das älteste Verfahren. „A“ steht dabei für Amplitudenmodulation. Heutzutage wird das Verfahren noch für Distanzbestimmungen in der HNO, Ophthalmologie und Neurologie eingesetzt. In der Anfangszeit, vor Entwicklung der Computertomographie, konnte mit diesem Verfahren z. B. eine Mittellinienverlagerung bei einem Hirntumor nachgewiesen werden.



■ Abb. 7.4 Untersuchung einer Herzklappe

M-Mode

Mit dem M-Mode (von englisch „motion“) kann das zeitliche Verhalten eines Gewebes abgebildet werden. Einsatzgebiet ist insbesondere die Kardiologie (■ Abb. 7.4). Typisches Beispiel ist die Abbildung der Bewegung einer Herzklappe oder des Myokards.

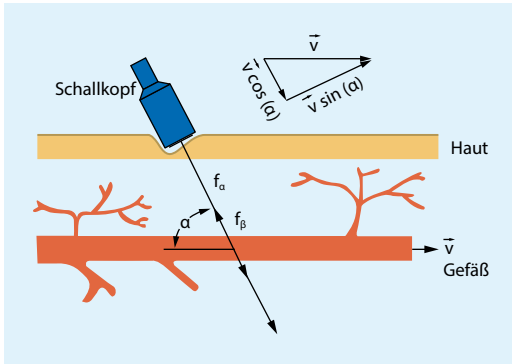
B-Mode

Der B-Mode (englisch „brightness“) ist das am häufigsten genutzte Verfahren. Im 2D-Bild werden die verschiedenen Bildpunkte, je nach Stärke des reflektierten Signals, mit unterschiedlich hellen Graustufen erfasst.

Eine Weiterentwicklung des Verfahrens ist der 3D-Ultraschall, der räumliche Standbilder erzeugt. Hierzu wird zu dem Scan in einer Ebene der Schallwinkel zusätzlich geschwenkt, um Bildinformationen in der dritten Ebene zu gewinnen. Wenn nicht nur ein Standbild erzeugt, sondern die Untersuchung in Echtzeit durchgeführt wird, entsteht ein 4D-Ultraschall mit der Zeit als vierte Dimension.

Dopplersonographie

1842 beschrieb der Physiker Christian Johann Doppler den nach ihm benannten Doppler-Effekt. Wenn sich Schallquelle und Reflektor aufeinander zubewegen, werden die Schallwellen gebündelt und erreichen den Empfänger mit einer höheren Frequenz. Sie kennen das Prinzip bereits: Sie können hören, ob die Sirenen eines Krankenwagens auf Sie zukommen oder sich entfernen! Dieser Effekt wird für die Dopplersonographie genutzt.



■ **Abb. 7.5** Winkelverhältnisse bei der Bestimmung der Doppler-Verschiebung

Der Effekt ist stark winkelabhängig (■ **Abb. 7.5**). Bei einem 90° -Winkel zwischen Schallquelle und Reflektor ist kein Signal zu erhalten. Je geringer der Winkel zwischen Schallquelle und Reflektor, desto geringer der Fehler!

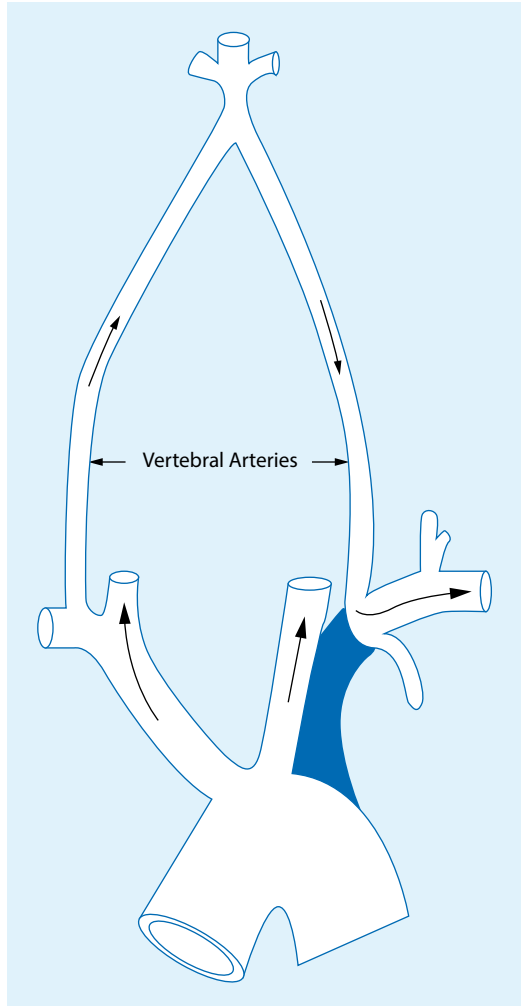
Die Dopplersonographie wird genutzt, um Flussgeschwindigkeiten zu bestimmen. Aus diesen lassen sich Stenosen von Gefäßen quantifizieren. Klassisches Einsatzgebiet ist die Untersuchung der Halsschlagadern.

Farbdoppler und Powerdoppler

Der Farbdoppler (Synonyme: farbkodierte Dopplersonographie; farbkodierte Duplexsonographie; FKDS) ist eine Weiterentwicklung der Dopplersonographie. Das Bild wird dabei mit den gemessenen Flussgeschwindigkeiten und Flussrichtungen farblich kodiert. Dabei gilt definitionsgemäß:

- **Blutfluss in Richtung des Schallkopfes wird rot kodiert, das vom Schallkopf weg fließende Blut wird blau kodiert. Schnellerer Blutfluss wird heller dargestellt als langsamer. Im Bild ist rechts eine entsprechende Kodierung abgebildet mit Angabe der gemessenen Flussgeschwindigkeit.**

Wichtig ist zum Beispiel die Detektion der Flussrichtung bei einem Subclavian-Steel-Syndrom, bei dem es aufgrund einer Stenose der A. subclavia zur Flussumkehr der zugehörigen A. vertebralis kommt (■ **Abb. 7.6**). Klinisch haben die betroffene



■ **Abb. 7.6** Flussumkehr beim Subclavian-Steel-Syndrom

nen Patienten zumeist Schwindel, insbesondere bei körperlicher Belastung und Anstrengung des entsprechenden Armes.

Der Powerdoppler ist ein amplituden-kodiertes Dopplerverfahren. Im Gegensatz zur FKDS werden hiermit keine Flussgeschwindigkeiten detektiert, sondern die Menge der bewegten Teilchen. Der Powerdoppler kann daher auch wesentlich langsamere Flüsse detektieren.

Durch den Einsatz von Ultraschallkontrastmitteln (► **Kap. 8**) kann die Darstellung des Blutflusses gesteigert werden. Das Einsatzgebiet der kontrastmittelverstärkten Sonographie ist vor allem die Dignitäts-

beurteilung von Raumforderungen, insbesondere der Leber oder beim Herzultraschall für die Entdeckung eines offenen Foramen ovale, also einer krankhaften Verbindung zwischen rechtem und linkem Vorhof.

7.2 Aufbau und Funktionsweise eines Sonographiegerätes

Ein modernes Ultraschallgerät (■ Abb. 7.7) besteht aus folgenden Komponenten:

- Rechner zur Steuerung
- Monitor
- Tastatur
- Schallköpfe
- Drucker oder Anbindung an das PACS zur Bilddokumentation

Wichtigste Elemente sind die verschiedenen Schallköpfe, die empfindlich sind und daher nicht herunterfallen oder mit aggressiven Reinigungsmitteln bearbeitet werden sollten. Je nach Gerätekategorie können die Preise für solche Schallköpfe denen eines Kleinwagens entsprechen. Daher lohnt sich im Zweifel auch mal ein Blick in die Bedienungsanleitung.

7.2.1 Schallköpfe

Die Schallköpfe (■ Abb. 7.8) werden unterteilt nach der Ausbreitung der Schallwellen in

- **Linearschallköpfe:** Die Schallwellen breiten sich parallel aus, was den Vorteil der geometrietreuen Abbildung hat.
- **Konvexschallköpfe** (Curved-array): Die Schallwellen breiten sich fächerartig aus. Ein größerer Bereich kann abgebildet werden.
- **Sektorschallköpfe:** Die Schallwellenausbreitung ist fächerförmig und radial. Typisches Einsatzgebiet ist der Herzultraschall mit einem transkostalen Zugangsweg zwischen den Rippen.

Taschendoppler

Eine Sonderform ist der sog. Taschendoppler, bei dem die Ultraschallsonde wie ein dicker Stift



■ Abb. 7.7 Ultraschallgerät

aussieht. Er wird vor allem in der Gefäßdiagnostik zur Verschlussdruckmessung verwendet. Hierbei wird z. B. am Fuß der Blutfluss über der A. dorsalis pedis, also der Arterie auf dem Fußrücken, abgeleitet und gleichzeitig eine Blutdruckmanschette am Unterschenkel aufgeblasen. Sobald der Ton vom pulsierenden Blut verschwindet, wird die Blutdruckmanschette wieder langsam entlastet. Der abgelesene Blutdruck, bei dem das Geräusch wieder erscheint, ist der Verschlussdruck. Erniedrigt ist der Wert bei einer Stenose oder einem Verschluss der Beinarterien.

Wichtig bei Ultraschalluntersuchungen ist eine gute Ankopplung zwischen Schallkopf und Haut. Eine ungenügende Ankopplung führt zu Artefakten, den sog. Reverberationen und einer ungenügenden Bildqualität. Aus diesem Grund wird Ultraschallgel auf den Schallkopf und auch die Haut des Patienten aufgebracht, das die Verbindung zwischen Schallkopf und Haut verbessert.



■ Abb. 7.8 Schallkopfvarianaten

Übrigens: Reverberationen treten auch auf bei Darmluft oder bei pathologischen Luftansammlungen intraabdominell.

Wird der Ultraschall in einem sterilen Umfeld, z. B. während einer Operation, eingesetzt, muss auch in den verwendeten sterilen Überzug für den Schallkopf (beim Taschendoppler auch mal ein steriler Handschuh) Gel eingefüllt werden. Die Kopplung zwischen dem sterilen Schlauch und dem Patienten erfolgt in diesen Fällen z. B. mit Kochsalzlösung oder auch Hautdesinfektionsspray.

Für die Endosonographie gibt es weitere spezielle Schallköpfe, die für die entsprechende Anwendung konzipiert sind. Zu nennen sind die Endosonographie des Pankreas, des Herzens, der Prostata und des inneren weiblichen Genitale.

7.2.2 Wo muss ich drücken ...

Auch wenn in Deutschland die Ultraschalldiagnostik eine ärztliche Tätigkeit ist, sollten MTRA die wichtigsten Bedienelemente eines Sonographiegerätes und ihre Bedeutung kennen. Jedes Sonographiegerät ist herstellerabhängig etwas anders aufgebaut. Dennoch wollen wir Ihnen hier die wichtigsten, eigentlich immer vorhandenen Bedienelemente näher bringen:

- Vor dem Beginn der Untersuchung: Eingabe des **Patientennamen**, meist rechts oben auf der Tastatur, oftmals mit „ID“ gekennzeichnet
- Die Auswahlkosten für die verschiedenen Organprogramme finden sich meist in der oberen



■ Abb. 7.9 Bodymarker

Tastaturreihe und sind mit „Preset“ gekennzeichnet.

- Wenn mehrere Schallköpfe zur Verfügung stehen, können diese über eine Taste, die oftmals mit „Probe“ gekennzeichnet ist, gewechselt werden.
- Eine Taste zeigt den Umriss eines Körpers (■ Abb. 7.9, roter Pfeil). Hiermit wird der sog. Bodymarker im Bild angezeigt, über den die Schnittebene im Bild dokumentiert wird.
- Die oft auch etwas größere Taste „Freeze“ oder „FRZ“ (meistens rechts unten am Gerät) dient dazu, das Bild zum Speichern einzufrieren.
- Im unteren Anteil der Tastatur gibt es meist einen Drehregler, der mit „Gain“ oder „Depth“ bezeichnet ist, über diesen wird die Gesamtverstärkung eingestellt.
- Eine ähnliche Funktion hat der Tiefenausgleich, der allerdings die Verstärkung für die unterschiedlichen Bildtiefen getrennt regelt. Den Tiefenregler finden Sie als Schieberegler, der in mehreren Reihen untereinander meist rechts oben angebracht sind.
- Oftmals kann der Fokus mit einem Kippschalter verschoben werden. Hiermit wird in einer bestimmten Tiefe ein optimales Bild erzielt.
- Der Trackball dient zum Bewegen von Markern oder Messpunkten. Diese finden Sie über Tasten, die meist mit Kreuzen oder Punkten gekennzeichnet sind
- Bei Geräten mit Farbduplexfunktion gibt es einen meist mit bunten Punkten gekennzeichneten

neten (Dreh-)Knopf oder eine Taste „Color“ oder „CDI“, über den der Farbduplex eingestellt bzw. durch Drehung verstärkt werden kann.

- Der Powermode ist häufig mit „PW“ gekennzeichnet und ebenfalls als Drehknopf gestaltet.
- Neue und insbesondere auch größere Geräte verfügen oft auch noch über einen Touchscreen zur Bedienung.

7.3 Möglichkeiten und Grenzen der Ultraschalldiagnostik

Die Ultraschalldiagnostik ist die Primärdiagnostik der Bildgebung bei abdominellen Beschwerden, bei Gefäßerkrankungen und zur Diagnostik der Herzfunktion. Ausnahme sind hierbei hochakute Erkrankungen, z. B. ein Polytraumapatient. Hier gelingt mit einer Computertomographie in kürzester Zeit eine genaue Diagnose. Für eine sonographische Abklärung ist, abhängig von der Erfahrung des Untersuchers, ausreichend Zeit erforderlich. Für eine Ultraschalldiagnostik des gesamten Abdomens ohne wesentliche Besonderheiten benötigt auch der erfahrene Untersucher 10–15 min. Grundsätzlich kann man so gut wie alles mit Ultraschall untersuchen, insbesondere wenn es um Kinder geht. So sind auch Frakturen mit der Sonographie nachweisbar.

➤ **Das Ergebnis ist jedoch mehr als bei allen anderen Verfahren, abhängig von dem, was der Untersucher sieht und als Bild dokumentiert.**

- ✓ Zurück zu Frau Krause, der Patientin aus der Notaufnahme:
 - Der Befund (▣ Abb. 7.1, dorsale Schallauslöschung) entspricht der **Verdachtsdiagnose in Zusammenschau mit der Klinik einer akuten Cholecystitis bei Cholecystolithiasis**. Die Therapie erfolgt zunächst medikamentös schmerzstillend und krampflösend. Eine frühzeitige, elektive Cholecystektomie (operative Entfernung der Gallenblase) wird mit der Patientin vereinbart.

- Zunächst muss der **Patientenname** eingegeben werden. Da die Abteilung über ein RIS verfügt, gelingt das über die Auftragsliste, sodass Bilder und Befund auch in der digitalen Patientenakte wiederzufinden sind. Zur Abdomensonographie bei der adipösen Patientin braucht Dr. Echo einen **Sektorschallkopf mit niedriger Frequenz**, um das Abdomen ausreichend einsehen zu können. Nach der Anwahl des **3,5 MHz-Schallkopfes** ist dann bereits das Abdomen-Programm als häufigstes Untersuchungsprogramm vorbelegt. Damit Dr. Echo gleich loslegen kann, wählt die MTRA auch noch den **passenden Bodymarker** aus.
- Bei der Untersuchung der Beinvenen werden ein **B-Bild** und eine **farbkodierte Duplexsonographie** benötigt. Außerdem liegen die Beinvenen eher oberflächlich, sodass die notwendige Eindringtiefe nicht so groß ist. Daher wird für die Sonographie im Rahmen der Thrombosedagnostik der Beinvenen ein Linearschallkopf mit einer Frequenz von z. B. **7,5 MHz** verwendet. Nach Anwahl des Untersuchungsprogramms Beinvenen sind die Voreinstellungen mit Anwahl der Duplexsonographie getroffen.

In Kürze

- Die Sonographie nutzt Ultraschallwellen zur Bildentstehung und ist, wie Computertomographie und Kernspintomographie, ein Schnittbildverfahren.
- Das Verfahren ist ohne Nebenwirkungen, kostengünstig und schnell verfügbar, allerdings im Ergebnis sehr untersucherabhängig.
- Der B-Mode wird zur Beurteilung von Weichteilen verwendet, Doppler-, Duplex- und Powermode hingegen zur Beurteilung von Gefäßen und Durchblutung.
- Standarduntersuchungen:
 - Abdomen mit allen Organen
 - Pleuraerguss

- Aa. carotides, Beinarterien, Bein- und Armvenen
- Schilddrüse

Literatur

- Herold G (2009) Innere Medizin. Herold, Gerd, Köln
- Hofer A (2005) Sonographie Grundkurs. Andreas Hofer Verlag, Stuttgart
- Hofer A (1999) FKDS-Kursbuch. Andreas Hofer Verlag, Stuttgart
- Schmidt G, Görg C (2008) Kursbuch Ultraschall. Thieme, Stuttgart
- Isken L (2007) Ultraschall-Grundlagen und Technisches Konzept; Technologie-Seminar der DRG, Hamburg 2007

Kontrastmittel und Pharmakologie

M. Kahl-Scholz, K. Kara

- 8.1 Allgemeine Pharmakologie – 187**
 - 8.1.1 Pharmakokinetik – 187
 - 8.1.2 Pharmakodynamik – 187
 - 8.1.3 Begriffe rund um ein Medikament – 188
 - 8.1.4 Wichtige Wirkstoffgruppen im MTRA-Arbeitsalltag – 190
- 8.2 Röntgenkontrastmittel – 192**
 - 8.2.1 Einteilung der Röntgen-KM – 193
- 8.3 MR-Kontrastmittel – 200**
 - 8.3.1 Gadolinium – 200
 - 8.3.2 Leberspezifische Kontrastmittel – 202
- 8.4 Sonographie-Kontrastmittel – 202**
- 8.5 Applikationssysteme und Kontrastmittelapplikation – 202**
 - 8.5.1 Patientenvorbereitung – 204
 - 8.5.2 Einzelkolbensystem – 205
 - 8.5.3 Doppelkolbensystemen – 205
 - 8.5.4 KM-Protokolle für CT-Untersuchungen – 205
 - 8.5.5 Zugänge, Port, ZVK – 206
 - 8.5.6 Paravasat! Was nun? – 207
- 8.6 Kontrastmittelzwischenfall und Notfallmedikation – 208**
 - 8.6.1 Durchführung einer (iodhaltigen) Kontrastmittelapplikation – 208
 - 8.6.2 Kontraindikationen – 208
 - 8.6.3 Nebenwirkungen – 209
 - 8.6.4 Schwangerschaft und Stillzeit – 212
- 8.7 Andere Medikamente in der Radiologie und Nuklearmedizin – 212**
 - 8.7.1 Glucagon – 212
 - 8.7.2 Butylscopolamin (Buscopan®) – 212

8.7.3 Metoclopramid (Paspertin®) – 213

8.7.4 Metamizol (Novalgin®) – 213

8.7.5 Diazepam – 213

8.7.6 Metoprolol – 213

8.7.7 Adenosin – 214

8.7.8 Dobutamin – 214

8.7.9 Piritramid (Dipidolor®) – 214

8.7.10 Heparin – 215

8.7.11 Furosemid – 215

8.7.12 Lidocain – 215

8.8 Rechtslage – 215

8.8.1 Kontrastmittelinjektion – 216

8.8.2 Aufklärung zu medizinischen Untersuchungen und Eingriffen – 216

Literatur – 218

Frau Gerdes, eine 62-jährige Patientin mit diagnostizierten Mamma-Ca, ist zum CT-Staging bei Ihnen. Sie hat vorher noch nie eine Untersuchung mit Kontrastmittel mitmachen müssen und ist sichtlich aufgeregt. Sie reden ruhig und freundlich mit Frau Gerdes über die Untersuchung und erklären ihr, was Sie gerade machen und wie die Untersuchung ablaufen wird. Frau Gerdes wird ruhiger und lacht zwischenzeitlich sogar erleichtert. Die Untersuchung wird durchgeführt. Als sie danach versucht aufzustehen, berichtet Frau Gerdes über Schwindel, Unwohlsein und Kratzen im Hals. Binnen weniger Minuten wird die Patientin zunehmend unruhiger, beklagt nun noch Hautjucken und Atembeschwerden.

- ❓ 1. Was sind Ihre ersten Maßnahmen am Patienten?
2. Wen verständigen Sie?
3. Welche Utensilien sollten griffbereit liegen?

8.1 Allgemeine Pharmakologie

M. Kahl-Scholz

Die Pharmakologie beschreibt die Wechselwirkung zwischen Stoffen und Lebewesen. Dabei ist interessant, welche Umwandlungsprozesse ein Stoff im gesamten durchläuft (Pharmakokinetik) und welche Wirkung ein Stoff an seinem Wirkort entfaltet (Pharmakodynamik),  Abb. 8.1. Im Folgenden wird kurz auf diese Aspekte eingegangen. Auch die wichtigsten, für die MTRA-Praxis relevanten Wirkstoffgruppen werden behandelt.

8.1.1 Pharmakokinetik

Die Kinetik eines Arzneimittels wird durch alle Prozesse ausgemacht, die das Pharmakon im Körper durchläuft ( Abb. 8.1). Dazu zählen

- **Freisetzung (= Liberation).** In vielen Fällen muss der Arzneistoff aus dem Arzneimittel selbst erst freigesetzt werden. Dieser Schritt ist häufig derjenige, der am stärksten ausmacht, wie schnell ein Pharmakon wirkt. Eine Wirkung kann schnell gewünscht sein (Tabletten, Brausetabletten), verzögert (z. B. magensaftre-

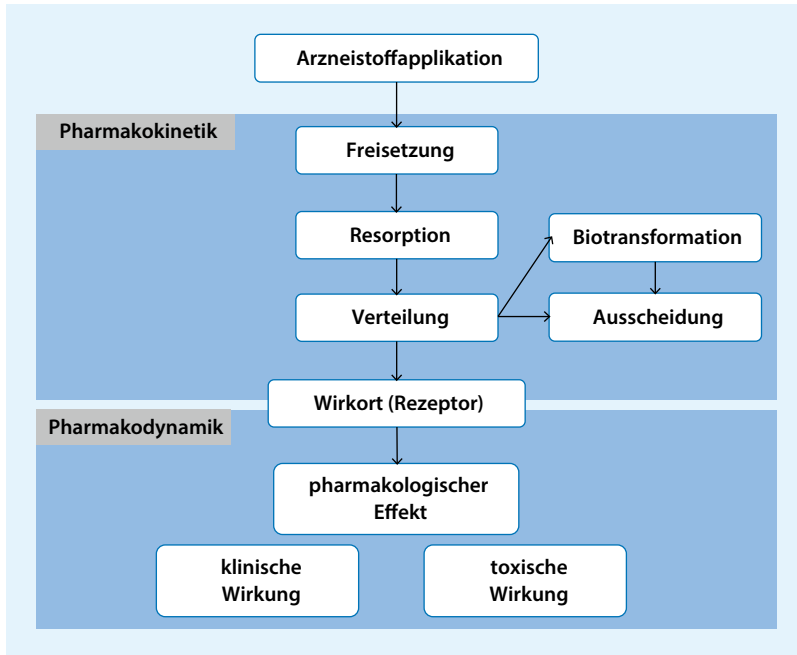
sistente Tabletten) oder verlangsamt (z. B. Retardtabletten). In  Abb. 8.2 ist als Beispiel die Pharmakokinetik unterschiedlicher Insuline dargestellt: Einige wirken schnell, andere gewollt über einen längeren Zeitraum, erreichen dabei aber nicht die Spitzenkonzentration der kurzwirksamen.

- **Aufnahme (= Resorption).** Dieser Vorgang beschreibt die Aufnahme des Arzneimittels vom Applikationsort (Magen-Darm-Trakt, Rektum, Haut, Alveolen, Nasenschleimhaut etc.) in die Blutbahn. Die Aufnahme ist abhängig von der Größe, Durchblutung und Kontaktzeit mit der Resorptionsfläche (aufgrund der geringeren Kontaktzeit und der gestörten Resorption vermindert z. B. eine Durchfallerkrankung die Aufnahme von Tabletten).
- **Verteilung (= Distribution).** Nachdem der Wirkstoff in die Blutbahn gelangt ist, erfolgt seine Verteilung in die Flüssigkeiten und Gewebe des Körpers. Sie ist abhängig von der Löslichkeit des Pharmakons, seiner chemischen Struktur und Eigenschaften, wie z. B. der Proteinbindungsfähigkeit.
- **Biotransformation (= Metabolismus).** Hierzu zählen die biochemischen Um- und Abbauprozesse, denen das Pharmakon im Körper unterliegt. Prinzipiell werden Phase-I-Reaktionen, die der Wirkungsfreisetzung dienen, von Phase-II-Reaktionen, die die Ausscheidung des Pharmakons beschleunigen, unterschieden.
- **Ausscheidung (= Exkretion).** Die Ausscheidung von Arzneimitteln erfolgt meistens über die Niere bzw. mit dem Urin. Teilweise erfolgt auch eine Ausscheidung über die Gallenflüssigkeit und den Stuhl. Wird die Gallenflüssigkeit (und damit der abgebaute Teil des Pharmakons) im Darm wieder resorbiert, redet man vom enterohepatischen Kreislauf.

8.1.2 Pharmakodynamik

Die Pharmakodynamik beschreibt die Wirkung, die ein Arzneimittel am Wirkort erzielt ( Abb. 8.1).

Das **Wirkprofil** eines Medikamentes ergibt sich dabei über die Wirkungsweise und den Wirkort des



■ **Abb. 8.1** Prozesse der Pharmakokinetik und -dynamik. Pharmakokinetik erfasst alle Vorgänge von der Arzneimittellapplikation bis zur Ausscheidung eines Pharmakons. Die Pharmakodynamik untersucht die Wechselwirkung von Arzneistoffen mit ihren Wirkorten, z. B. Rezeptoren und der Umsetzung in biologische Wirkungen. (Aus Hein 2011)

Arzneimittels – also: Welchen Effekt hat das Pharmakon? An welchen Organen wirkt es?

Ein weiterer wichtiger Begriff in der Pharmakodynamik ist die **Dosis-Wirkungs-Beziehung**, durch die beschrieben wird, wie viel von einem Arzneimittel nötig ist, um eine Wirkung zu erzielen. Aber auch: Verstärkt sich die Wirkung durch eine höhere Dosis?

Unter einer **geringen therapeutischen Breite** eines Medikaments versteht man z. B., dass die Dosis, die man benötigt, um eine Wirkung zu erzielen, sehr nah an der Dosis liegt, die bereits toxisch wirken würde.

Der **Wirkmechanismus** beschreibt die chemischen Vorgänge (Rezeptorenbindung, Enzymveränderungen etc.), durch den die Wirkung des Arzneimittels zustande kommt.

8.1.3 Begriffe rund um ein Medikament

Wirkstoffgruppe/Wirkung

Jedes Medikament wird einer bestimmten Wirkstoffgruppe zugeordnet, die den Hauptwirkungsmechanismus des Pharmakons beschreibt (z. B. sorgen Analgetika dafür, Schmerzen im Körper zu

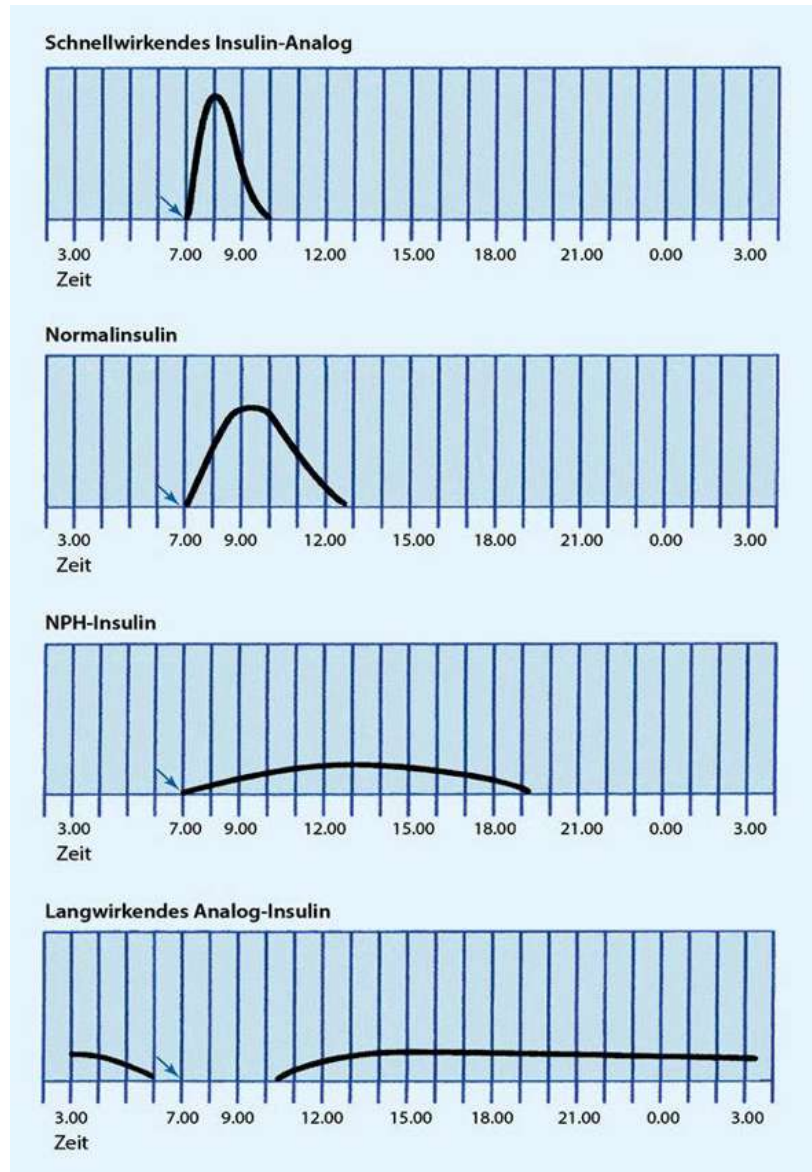
bekämpfen – das ist ihre vornehmliche Wirkung). Allerdings heißt das nicht, dass Pharmaka einer Wirkstoffgruppe auch immer über den gleichen Mechanismus ihre Wirkung entfalten (z. B. gibt es unter den Analgetika viele verschiedene Varianten von Paracetamol über ASS bis hin zu den Nicht-steroidalen Antirheumatika oder Opioiden, die sich wesentlich in der Art unterscheiden, in der sie Wirkung entfalten).

Unter ► **Abschn. 8.1.4** finden sich die wichtigsten Wirkstoffgruppen, auf die Sie im Beruf stoßen können. Unter ► **Abschn. 8.7** sind die dazugehörigen Medikamente aufgeführt.

Unerwünschte Wirkungen/ Nebenwirkungen

Leider gibt es kaum ein Medikament, das ausschließlich nur die Wirkung entfaltet, für die man es hergestellt hat. Alle anderen Wirkungen, die neben der gewünschten auftreten, werden als „unerwünschte Arzneimittelwirkungen (UAW)“, „unerwünschte Wirkungen (UEW)“ oder schlicht „Nebenwirkungen (NW)“ bezeichnet. Hier kann man noch einmal differenzieren zwischen solchen NW, die mit der Dosis zusammenhängen (desto höher die Dosis, umso stärker die NW) und solchen, die

Abb. 8.2 Pharmakokinetische Freisetzung von unterschiedlichen Insulinen. (Aus Piper 2013)



dosisunabhängig auftreten. Von der Pharmaindustrie wird noch einmal eine Unterteilung in mehrere Stufen (von „sehr häufig“ bis „sehr selten“) vorgenommen.

Wechselwirkungen

Hierunter versteht man all jene Wirkungen, die auftreten können, wenn das entsprechende Medikament zusammen mit anderen Pharmaka, aber auch z. B. mit Alkohol, Koffein etc. eingenommen wird.

Manchmal schwächen Medikamente gegenseitig ihre Wirkung ab (z. B. verhindert ein Antazida gegen Sodbrennen die vollständige Aufnahme anderer Medikamente) oder verstärken sie sogar.

Indikationen

Unter der Indikation (indicare = anzeigen) sind all jene Krankheiten/Symptome zusammengefasst, für die das entsprechende Medikament zur Anwendung kommt.

Kontraindikationen (KI)

Eine Kontraindikation stellt entsprechend den Ausschluss der Anwendung des therapeutischen Mittels, in diesem Fall des Medikaments, dar. Hier gibt es aber noch einmal folgende Unterscheidung:

Relative Kontraindikationen

Eine relative Kontraindikation spricht zunächst gegen die Maßnahme, in diesem Fall die Einnahme eines Medikamentes, lässt sie aber zu, wenn sie im konkreten Einzelfall voraussichtlich mehr nützt als schadet.

Absolute Kontraindikationen

Eine absolute Kontraindikation (manchmal auch als „Gegenanzeige“ bezeichnet) verbietet die Maßnahme, also die Einnahme des Medikaments vollständig: Ein Patient, der einmal allergisch auf Penicillin reagiert hat, darf dieses Antibiotikum nicht mehr einnehmen, da eine erneute Einnahme lebensbedrohlich (anaphylaktischer Schock) werden könnte.

- **Indikationen und Kontraindikationen gibt es auch für jede radiologische oder nuklearmedizinische Untersuchung, insbesondere im Zusammenhang mit einer Kontrastmittelgabe. Streng genommen existiert in der Radiologie nur eine echte absolute Kontraindikation: Implantate, die nicht für eine MR-Untersuchung zugelassen sind.**
- Alle anderen Kontraindikationen (auch eine KM-Unverträglichkeit) kann als relativ eingestuft werden.**

Off-label-use

Als Off-label-use wird in Deutschland die „zulassungsüberschreitende Anwendung“ bezeichnet. Darunter versteht man, dass ein zugelassenes Fertigarzneimittel auch außerhalb des in der Zulassung beantragten und von den nationalen oder europäischen Zulassungsbehörden genehmigten Gebrauchs hinsichtlich der Anwendungsgebiete (Indikationen) und -arten, Dosierungen oder Patientengruppen eingesetzt werden darf. Ein Beispiel aus dem radiologischen Alltag: Triamcinolon ist ein synthetisches Glukokortikoid, das häufig in der CT-gesteuerten Schmerztherapie bei Wurzelreizsyndromen der

Wirbelsäule verwendet wird. Ein anderes Beispiel ist Misoprostol. Es wird eigentlich eingesetzt, um medikamentenbedingte Magen- und Zwölffingerdarmgeschwüre zu behandeln (es hemmt die Magensäureproduktion). Da es aber auch die Kontraktion der Gebärmutter unterstützt, wird es im off-label-use auch in der Gynäkologie und Geburtshilfe eingesetzt.

8.1.4 Wichtige Wirkstoffgruppen im MTRA-Arbeitsalltag

Medikamente werden sog. Wirkstoffgruppen zugeordnet – also Gruppen, die Arzneimittel ähnlicher Struktur und Wirkungsweise zusammenfassen. Im Folgenden sind dabei exemplarisch Wirkstoffgruppen aufgeführt, denen Pharmaka angehören, die in der klinischen MTRA-Arbeit eine Rolle spielen.

Peptidhormone

Die meisten klassischen Hormone gehören zu der Gruppe der Peptidhormone (auch Proteohormone genannt), auch das Glucagon (► Abschn. 8.7.1). Wichtige Eigenschaften dieser Gruppe sind:

- Sie bestehen aus einer Proteinstruktur.
- Sie sind wasserlöslich (hydrophil) und fettunlöslich (lipophob).
- Aufgrund Ihrer Hydrophilität können sie Zellmembrane nicht ohne weiteres durchdringen und benötigen einen Rezeptor, um ihre Wirkung entfalten zu können. „Second messenger“ im Zellinneren vermitteln dann eine Umstellung des Stoffwechsels.
- Sie werden sowohl vom Körper selbst als auch synthetisch zur therapeutischen Anwendung hergestellt (Beispiele hierfür sind Insuline oder Glucagon).

Parasympatholytika

Parasympatholytika werden auch als Anticholinergika oder Anti-Muscarin-Rezeptor bezeichnet, da sie die Wirkung von Acetylcholin (ACh) über eine Blockade des Muscarinrezeptors hemmen. Sie setzen sozusagen die Aktivität des Parasympathikus herunter und haben damit folgende Effekte:

- Reduktion des Tonus der glatten Muskulatur des Magendarmtraktes, der ableitenden Harnwege und der Bronchialmuskulatur,

- Erhöhung der Herzfrequenz,
- Steigerung des peripheren Gefäßwiderstands,
- Reduktion der Speichel-, Magensaft-, Bronchial- und Schweißsekretion,
- Erweiterung der Pupille und Akkommodation des Auges auf die Ferne

Ein in der MTRA-Praxis gängiges Parasympatholytikum ist das Buscopan® (Wirkstoff: Butylscopolamin, ► Abschn. 8.7.2), das häufig zur Relaxation der Darmmuskulatur verwendet wird, um Bewegungsunschärfen bei den Untersuchungen einzuschränken.

Anticholinerges Syndrom

Werden Anticholinergika überdosiert, kann es im Extremfall zum sog. anticholinergen Syndrom kommen, bei dem der Parasympathikus sozusagen komplett ausgeschaltet wird. Die Symptome, die dadurch auftreten, werden in periphere und zentrale Symptome unterteilt.

Periphere Symptome

- Obstipation
- Harnverhalt
- Tachykardie
- Hypertonie
- Mydriasis
- Gerötete, trockene Haut
- Verminderte Schweiß und Speichelsekretion

Zentrale Symptome

- Verminderte Vigilanz
- Aggressivität
- Agitiertheit
- Halluzinationen
- Schwindel
- Dysarthrie
- Koma

Antiemetika (Dopamin-Antagonisten)

Antiemetika sind an sich keine eigene Wirkstoffgruppe, da zu viele unterschiedliche Substanzen eingesetzt werden, um gegen Übelkeit und Erbrechen zu helfen. U. a. zählen Dopamin-Antagonisten, wie das Paspertin® (Wirkstoff: Metoclopramid, ► Abschn. 8.7.3), zu den Antiemetika. Dopamin-Antagonisten besetzen anstelle des Dopamins die un-

terschiedlichen Dopaminrezeptoren (D_1 – D_4) und blockieren so die Wirkung des Dopamins.

Analgetika

Analgetika, zu denen auch das Nichtopiod-Analgetika Novalgin® (Wirkstoff: Metamizol/syn. Novaminsulfon) ► Abschn. 8.7.4) ebenso wie das Opiodanalgetika Dipidolor (Wirkstoff: Piritramid, ► Abschn. 8.7.9) zählt, werden zur Schmerzlinderung, teilweise aber auch Fiebersenkung und Entzündungshemmung eingesetzt. Diese Wirkung entsteht über die Hemmung der Cyclooxygenase (daher auch COX-Hemmer) und infolge dessen der Blockade der Prostaglandin-Synthese.

Notfallmedikamente

Klassische Notfallmedikamente (► Abschn. 8.6.3) gehören folgenden Wirkstoffgruppen an:

1. **Katecholamine:** Sie wirken sowohl hormonell als auch als Neurotransmitter. Zu den wichtigsten Katecholaminen zählen Adrenalin, Isoprenalin, Noadrenalin, Dopamin und Dobutamin. Adrenalin bewirkt z.B. eine Steigerung der Herzfrequenz, einen Anstieg des Blutdrucks, eine Erweiterung der Bronchiolen, eine schnelle Bereitstellung von Energiereserven durch Fettabbau (Lipolyse) sowie die Freisetzung und Biosynthese von Glukose.
2. **Kortikosteroide:** Hier sind vor allem die Glukokortikoide für den Notfalleinsatz wichtig. Sie sind Steroidhormone, die im Körper in der Nebenniere gebildet werden, aber teilweise auch als chemisches Pharmakon Anwendung finden. Cortisol und Cortison sind die bekanntesten Vertreter dieser Gruppe. Die wichtigste Wirkung dieser Gruppe ist ihre Fähigkeit der Entzündungshemmung.
3. **Antihistaminika:** Sie wirken, wie der Name bereits vermuten lässt, an den Histaminrezeptoren (H_1 – H_4) blockierend. H_1 -Antagonisten werden eingesetzt, um allergische Reaktionen (bei denen Histamin eine zentrale Rolle spielt) zu dämpfen, und kommen so auch beim allergischen Schock zum Einsatz.
4. **Benzodiazepine:** Sie werden als Tranquilizer oder Neuroleptika eingesetzt. Neben ihrem angst- und krampflösenden Effekt wirken sie muskelentspannend und beruhigend, weswe-

gen sie im Notfall (Status epilepticus ► [Abschn. 8.6.3](#)) ebenfalls zum Einsatz kommen.

β-Blocker

β-Blocker blockieren im Körper die β-Adrenorezeptoren und setzen so die Wirkung des Adrenalins und Noradrenalins herunter. Die Herzfrequenz und der Blutdruck werden gesenkt, daher finden β-Blocker wie das Metoprolol (► [Abschn. 8.7.6](#)) Anwendung bei erhöhtem Blutdruck oder der koronaren Herzkrankheit. Im Kardio-CT werden sie eingesetzt, um die Herzfrequenz während der Untersuchung zu verringern.

Katecholamine

Zu den Katecholaminen zählen Adrenalin, Noradrenalin und Dopamin (sog. natürliche Katecholamine, die im Körper vorkommen) und Isoprenalin, Dobutamin und Dopexamin (sog. synthetische Katecholamine). Sie fungieren als Neurotransmitter und Hormone. Dobutamin findet beim Stress-MRT Anwendung (► [Abschn. 8.7.8](#), ► [Kap. 14](#)).

Glykosaminoglykane

Glykosaminoglykane sind aus repetitiven Disaccharid-Einheiten bestehende Polysaccharide (also Mehrfachzucker), die ein wichtiger Bestandteil des Bindegewebes sind. Sie können Wasser binden und dienen als biologisches „Schmiermittel“. Einige Beispiele für Glykosaminoglykanen sind die Hyaluronsäure und das Heparin. Heparin wird auch therapeutisch eingesetzt, da es an verschiedene Antithrombinmoleküle bindet und in der Lage ist, bestimmte Gerinnungsfaktoren zu binden und ihre Wirkung zu verhindern. In der Angiographie wird Heparin zur Thromboseprophylaxe eingesetzt (► [Abschn. 8.7.10](#)).

Heparininduzierte Thrombozytopenie (HIT)

Heparin kann zu einer Thrombozytopenie (einem Mangel an Thrombozyten, die für die Blutgerinnung, also Blutstillung wichtig sind) führen. Beim **HIT I** handelt es sich um eine leicht verlaufende Frühthrombozytopenie innerhalb der ersten 2 Behandlungstage.

Schwerwiegender verläuft die allergisch bedingte **HIT II**, die zu arteriellen und venösen Thrombosen führt. Diese tritt vor allem bei einer Behandlung länger als 5 Tage auf. Mit weniger als 1 % der behandelten Patienten ist diese bedrohliche Nebenwirkung selten. Bei diesen Patienten muss das Heparin durch Alternativen wie Argatroban ersetzt werden.

Schleifendiuretika

Schleifendiuretika sind harntreibende Medikamente (Diuretika), die die Urinproduktion erhöhen. Der größte Teil der Schleifendiuretika sind Sulfonamid-Derivate. Einige Beispiele sind Furosemid (► [Abschn. 8.7.11](#)), Torasemid und Piretanid. Sie wirken über eine Hemmung des Na₂ClK-Transporters an der Henle'schen Schleife der Niere (daher auch „Schleifendiuretika“).

Schleifendiuretika vermehren zudem die Ausscheidung von Calcium und Magnesium.

Natriumkanalblocker

Natriumkanalblocker sind eine Gruppe von Arzneimitteln, die ihre Wirkung über die Blockung spannungsabhängiger oder nicht spannungsabhängiger Natriumkanäle entfalten. Zu den Natriumkanalblockern, die spannungsabhängige Kanäle blocken, zählt auch die Gruppe der lokal betäubenden Pharmaka (Lokalanästhetika), zu denen auch das Lidocain gehört (► [Abschn. 8.7.12](#)), das u. a. auch in der Angiographie Einsatz findet.

8.2 Röntgenkontrastmittel

M. Kahl-Scholz

Kontrastmittel (KM) dienen in der Radiologie dazu, Gewebestrukturen besser hervorzuheben und damit beurteilbar zu machen. Da bestimmte Organe (z. B. die Bauchorgane) eine ähnliche Dichte aufweisen, wären sie ohne KM nur schwer in der Bildgebung unterscheidbar.

Ziel des Einsatzes von Röntgenkontrastmitteln ist es zudem, eine bessere Bildgebung bei gleichzeitig guter Verträglichkeit beim Patienten zu erreichen.



■ **Abb. 8.3** Hämangiom der Leber mit Kontrastmittelenhancement. (© Vockelmann)

Eine **gute Bildgebung** ist abhängig von

- einem hohen Kontrast,
- einer detaillierten Darstellung,
- einer von der Untersuchung abhängigen, lang genug anhaltenden Kontrastdarstellung.

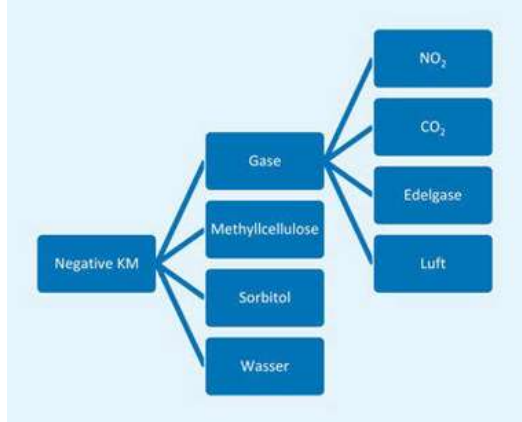
Eine **gute Verträglichkeit** des Kontrastmittels bedeutet, dass das KM

- keine physiologischen Vorgänge/Funktionen negativ beeinflusst,
- die Blut-Hirn-Schranke oder Zellmembrane nicht durchdringt,
- schnell und vollständig wieder ausgeschieden werden kann,
- keine unerwünschten Nebenwirkungen zur Folge hat.

Das **Enhancement**, also die Anreicherung des KM in den Organen oder Geweben, ist vom jeweiligen Organ oder der jeweiligen Gewebsstruktur abhängig und lässt teilweise auf eine bestimmte Struktur im Körper rückschließen (z. B. beim Hämangiom durch das sog. Rosettenphänomen, ■ **Abb. 8.3**).

➤ **Aufgaben von Kontrastmitteln**

- **Kontrastverstärkung in Geweben, die sich sonst wenig oder gar nicht in ihrer Dichte unterscheiden**
- **Verbesserung der Beurteilbarkeit von funktionellen Abläufen (z. B. Blutfluss, Ausscheidung etc.)**



■ **Abb. 8.4** Negative Kontrastmittel

8.2.1 Einteilung der Röntgen-KM

Kontrastmittel können die Absorption der Röntgenstrahlen vermindern (sog. negative Röntgenkontrastmittel), um sich vom umliegenden Gewebe abzugrenzen, oder erhöhen (sog. positive Röntgenkontrastmittel).

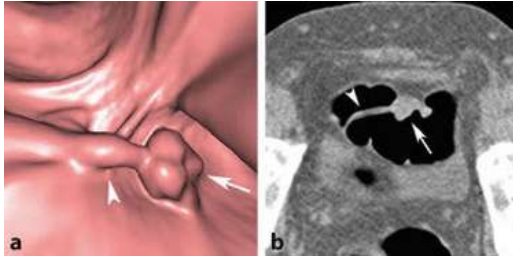
Röntgenkontrastmittel werden demnach in **zwei große Hauptgruppen** eingeteilt:

1. Substanzen mit geringerer Dichte als die darzustellende Umgebung = negative Kontrastmittel (Gase, Wasser, Methylcellulose, Sorbitol)
2. Substanzen mit höherer Dichte als die darzustellende Umgebung = positive Kontrastmittel (Unterscheidung in wasserlöslich, wasserunlöslich und ölhaltig)

Negative Kontrastmittel

Zu den negativen Kontrastmitteln (■ **Abb. 8.4**), die in der Röntgendiagnostik Anwendung finden, zählen Gase, also Kohlenstoffdioxid (CO_2), Stickstoffdioxid (NO_2), Edelgas und schlicht: die Luft (z. B. zur Darstellung von Magen und Darm). Aber auch Wasser (bzw. auch Wasser-Mannitol-Lösungen), Methylcellulose, Paraffinsuspensionen und Sorbitol (Zuckeralkohol, Zuckerersatzstoff) zählen zu den negativen KM.

❗ **Sorbitolunverträglichkeit sollte vor dem Einsatz von Sorbitol abgeklärt sein!**



▣ **Abb. 8.5a,b** Virtuelle Koloskopie in 3D (a) und 2D (b) Rekonstruktion. Es zeigte sich ein gestielter Polyp (Pfeil). (Aus Mang et al. 2008)

➤ **Nebenwirkungen von Mannitol können z. B. sein:**

- **Störungen des Flüssigkeits- u. Elektrolythaushalts**
- **Hypotonie**
- **Allergische Reaktionen**
- **Herzrhythmusstörungen**
- **Schwindel**

Kohlenstoffdioxid findet, ähnlich wie Methylcellulose, z. B. Anwendung in der Magen-Darm-Diagnostik, u. a. zur Doppelkontrastuntersuchung des Magens und zur Darstellung bei der virtuellen Koloskopie (▣ **Abb. 8.5a, b**). Es wird im Darm allgemein besser resorbiert als Raumluft und dadurch, wie Studien gezeigt haben, auch vom Patienten besser vertragen.

CO₂ kann übrigens auch in der intraarteriellen Angiographie von Nieren, der unteren Extremität und in der Diagnostik von Dialyseshunt als sehr nebenwirkungsarmes Kontrastmittel eingesetzt werden. Besonderen Nutzen haben dabei Patienten mit einer Unverträglichkeit auf iodhaltiges Kontrastmittel und Patienten mit einer Niereninsuffizienz. Nicht eingesetzt werden darf CO₂ jedoch bei der Angiographie von Thorax, oberer Extremität oder supraaortal, da hierdurch schwerwiegende neurologische Komplikationen, im schlimmsten Fall begleitet von Schlaganfällen, ausgelöst werden können.

Doppelkontrast – was bedeutet das?

Unter Doppelkontrast versteht man die Durchführung einer Durchleuchtung mit einem

positiven KM (meist Barium, ► **Abschn. 8.2.1**) und einem negativen KM (z. B. Cellulose, Wasser, CO₂). Das negative KM sorgt für eine bessere Distension (Erweiterung, Aufweitung) des Darms und Verteilung des positiven KM, sodass ein besserer Kontrast der Darmfalten entsteht. Diese Technik (bekannteste Methode ist das Enteroklysma, also der Kontrasteinlauf nach Sellink) wird nicht mehr häufig durchgeführt, da andere bildgebende Methoden (vor allem die Kernspintomographie) mittlerweile bevorzugt zur gewünschten Darstellung eingesetzt werden.

Raumluft wird (teilweise ergänzend) zur Darstellung des Magens-Darm-Traktes (z. B. Kolondoppelkontrastuntersuchung) und bei Arthrographien (kontrastmittelunterstützte radiologische Gelenkuntersuchung) eingesetzt.

Positive Kontrastmittel

Wasserlösliche, iodhaltige Kontrastmittel (▣ **Abb. 8.6)**

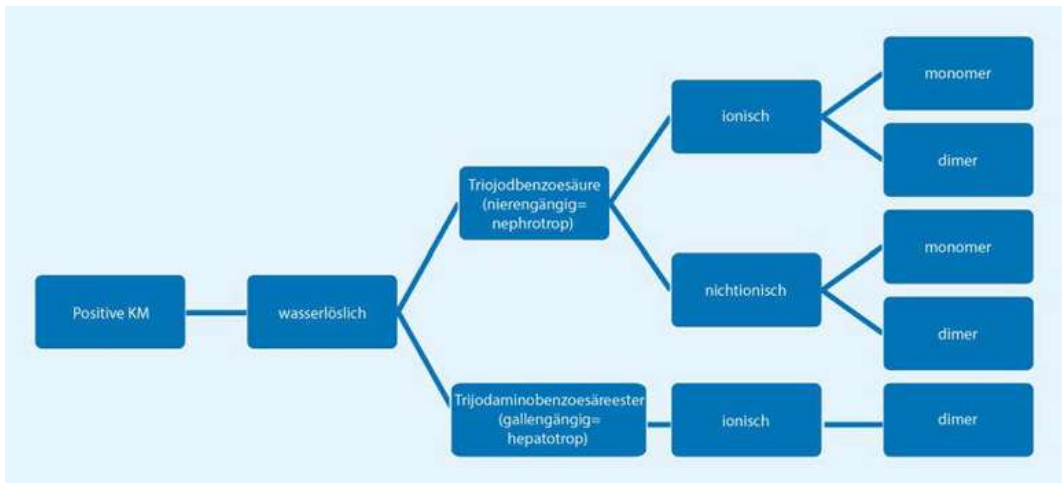
Iodhaltige, wasserlösliche Kontrastmittel finden ihren Einsatz zur Darstellung von

- Gefäßen (Angiographie, Phlebographie),
- Nierenbeckenkelchsystem und ableitende Harnwege (z. B. MCU, Zystographie),
- Gastrointestinaltrakt (oral),
- Gallenwege (z. B. ERCP, PTCD).

Vor allem in der Computertomographie (speziell: CT-Angiographie, CT-Koronarangiographie) werden sie häufig verwendet. Auch bei der Myelographie kommen sie zum Einsatz.

Warum Iod?

Iodhaltige KM werden verwendet, weil Iod als chemisches Element eine hohe Kontrastdichte sowie eine relativ geringe Toxizität hat und eine feste Bindung mit den anderen chemischen Strukturen des Kontrastmittelkomplexes eingeht.



■ **Abb. 8.6** Positive, wasserlösliche Kontrastmittel

■ Triiodbenzoesäure (nierengängig)

Hierbei handelt es sich um Kontrastmittel, die zum größten Teil durch glomeruläre Filtration über die Niere wieder ausgeschieden werden (daher nieren-gängig = nephrotrop). Ein geringer Teil wird auch über das Leber-Galle-System und den Darm ausgeschieden.

Triiodbenzole erzeugen eine gut kontrastierte Darstellung und werden in ionische und nichtionische KM eingeteilt, wobei ionische KM keine praktische Anwendung mehr finden, da sie ein höheres Nebenwirkungspotential aufweisen (■ Tab. 8.1).

■ Triiodaminobenzoessäureester (lebergängig)

Kontrastmittel, die (durch Bindung an Leberzellen und Plasmaalbumin) über die Leber ausgeschieden werden, bezeichnet man auch als „hepatotrop“. Sie liegen ausschließlich in ionischer Form vor. Da die Leber nur eine bestimmte Menge verstoffwechseln und damit ausscheiden kann (0,35 mgJ/min/kg), muss die applizierte KM-Menge entsprechend angepasst werden.

➤ **Wird die Grenze überschritten oder ist die Leberfunktion eingeschränkt, wird das KM über die Niere ausgeschieden (Niereninsuffizienz)!**

Bei einer pathologischen Einschränkung des Leberstoffwechsels sollte auf eine besonders schonende langsame Infusion geachtet werden.

■ Ionisch

Ionische Kontrastmittel tragen eine Salzgruppe in ihrer chemischen Struktur, die ihnen eine ionische Ladung gibt. Sie haben eine hohe Osmolalität (Anzahl an osmotisch wirksamen Teilchen in einer Lösung) und eine höhere Plasmaproteinbindung. Dadurch sind sie, im Gegensatz zu nichtionischen KM, auch weniger gut verträglich (■ Tab. 8.1). Das BfArM (Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte) erklärte 2000 zur i. v. Applikation bestimmter ionischer Kontrastmittel:

» Ionische hochosmolale Kontrastmittel weisen eine höhere Chemotoxizität und eine höhere Osmotoxizität auf als die heute bevorzugt verwendeten niederosmolalen nichtionischen Kontrastmittel. Chemo- und Osmotoxizität bewirken eine Vielzahl unerwünschter Wirkungen an verschiedenen Organen beziehungsweise Organsystemen. Die intravasale Anwendung ionischer Kontrastmittel ist im Vergleich zur Anwendung nichtionischer monomerer Kontrastmittel mit einem signifikant höheren Risiko für die Auslösung einer Kontrastmit-telnebenwirkung bei allen Patientengruppen verbunden.

Ionische KM finden, vor allem als i. v.-KM, kaum noch Anwendung in der Röntgen-Diagnostik (■ Tab. 8.2, ■ Abb. 8.7) – die Verwendung sollte im

■ **Tab. 8.1** Vergleich ionischer und nichtionischer Kontrastmittel*

	Ionisch	Nichtionisch
Osmolalität	Hoch (daher auch „hochosmolare KM“; die Osmolalität bestimmt maßgeblich das Nebenwirkungsspektrum)	Niedrig (daher auch „niederosmolare KM“)
Ladung	Elektrisch geladen	Nicht elektrisch geladen
Löslichkeit	Nur als Salz ausreichend löslich (Megluminsalze > Natriumsalze)	Wasserlöslich durch hydrophile Seitenkettengruppen
Proteinbindung	Ca. 10 %	Ca. 1,5 %
Nebenwirkungen*	Gesamt: 12,66 %	Gesamt: 3,13 %
	Schwer: 0,22 %	Schwer: 0,04 %
	Sehr schwer: 0,04 %	Sehr schwer: 0,004 %

*Modifiziert nach Katayama-Studie, Japan, 1986–1988

■ **Tab. 8.2** Einteilung gängiger Kontrastmittel in ionische und nichtionische KM

Ionisch	Nichtionisch
Telebrix® (Ioxitalamat)	Hexabrix® (Ioxaglinat)
Gastrografin® (i. d. R. oral/rektal)	Isovist® (Iotrolan)
Peritrat® (i. d. R. oral/rektal)	Omnipaque® (Iohexol)
	Solutrast® (Iopamidol)
	Ultravist® (Iopromid)

Hinblick auf mögliche Risiken und vorbestehende Grunderkrankungen (Morbiditäten) der Patienten gut abgewogen werden.

■ ■ Nichtionisch

Nichtionische KM haben, wie die Bezeichnung vermuten lässt, keine ionisierende Gruppe, dafür aber eine hydrophile (also wasserliebende) Gruppe, die die Löslichkeit gewährleistet. Da sie eine geringere Osmolalität besitzen, als ionische KM (aber immer noch eine doppelt so hohe, wie die des Plasmas), werden sie auch als niederosmolare KM bezeichnet (■ Tab. 8.1). Aufgrund dieser Eigenschaft sind sie auch wesentlich seltener mit Nebenwirkungen assoziiert. ■ Abb. 8.8 zeigt eine Darstellung der ableitenden Harnwege (Pyelogramm) mit einem nichtionischen KM.

Intravenöse iodhaltige Kontrastmittel werden renal eliminiert. Nur ein geringer Anteil wird hepatisch über die Galle ausgeschieden. Dieser Anteil

kann dazu führen, dass Sie ein oder zwei Tage nach einer intravenösen Kontrastmittelgabe die Gallenblase kontrastiert sehen.

■ ■ Monomere und Dimere

Sowohl bei den ionischen wie nichtionischen Kontrastmitteln gibt es monomere und dimere Varianten. Der Unterschied besteht in der chemischen Struktur: die Anzahl der Benzolringe bei dimeren nichtionischen KM beträgt zwei, bei monomeren nichtionischen KM nur eins – wegen der komplexeren Struktur sind dimere nichtionische KM auch visköser, also zähflüssiger und müssen deswegen vor Applikation angewärmt werden, da die Viskosität mit zunehmender Temperatur abnimmt.

- ➡ **KM sind vor ihrer Verwendung in einem Wärmeschrank, um die Viskosität zu verringern. Durch die Viskosität können die KM nur mit erhöhtem Kraftaufwand gespritzt werden.**



■ **Abb. 8.7** Stärker kontrastiertes Colon (re.) nach rektaler Füllung mit verdünntem Kontrastmittel, oral gegebenes KM (Dünndarmschlingen) ist stärker verdünnt durch Flüssigkeitsretention im Darm bei Bridenileus im rechten Unterbauch. (© Vockelmann)

Bei KM-Pumpen können deswegen im kalten Zustand Fehler auftreten. Daher ist darauf zu achten, dass eine Wärmemanschette angewendet wird.

Dimere ionische Kontrastmittel besitzen hingegen z. B. zwei Säuregruppen.

Wasserunlösliche Kontrastmittel (■ Abb. 8.9)

■ Bariumsulfat

Bariumsulfat (BaSO_4) wird in der Diagnostik des Magen-Darm-Traktes als oral verabreichtes KM eingesetzt (■ Abb. 8.10). Allerdings findet es heute nur noch in seltenen Fällen Anwendung.

Da Bariumsulfat sich hypoton zum Blutplasma verhält, kann es im Darm zum Wasserentzug führen.

Bei Verdacht auf Ileus (Darmverschluss), Perforation oder Nahtinsuffizienz, Schluckstörungen (Aspirationsgefahr!) oder weiteren schweren Erkrankungen darf es nicht eingesetzt werden.



■ **Abb. 8.8** Intravenöse Pyelogramm (IVP) 12 min nach KM-Gabe. (© Vockelmann)

Ölhaltige Kontrastmittel (■ Abb. 8.11)

■ Öle

Öle, die iodiert wurden, finden Anwendung in der Lymphographie. Allerdings sind sie im Körper nur schwer und unter Entstehung von Nebenprodukten abbaubar und so mit vielen Nachteilen bzw. Nebenwirkungen vergesellschaftet. Da im Lymphsystem wasserlösliche Kontrastmittel zu schnell diffundieren würden, und damit keine gute Darstellung der Lymphgefäße möglich ist, gibt es keine Alternative. Früher wurden iodierte Öle auch in der Myelographie eingesetzt (■ Abb. 8.12), die jedoch heute aufgrund der schweren Nebenwirkungen nur noch mit wasserlöslichen nichtionischen Kontrastmitteln durchgeführt wird.

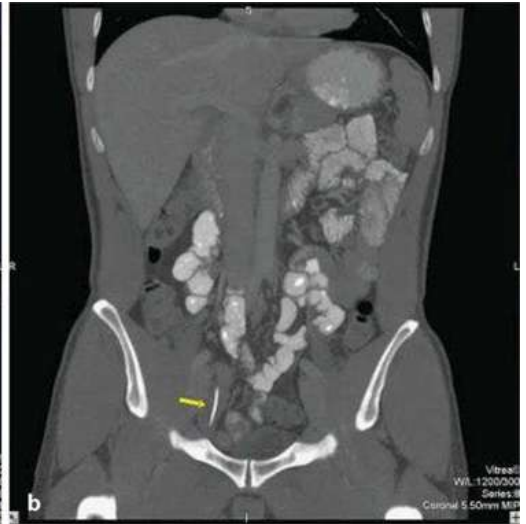
➤ **Die zu verabreichende KM-Menge ist von der Untersuchung, dem Gewicht des Patienten und der Iodkonzentration des KM abhängig. In der CT werden oft Konzentrationen von 400 mg Iod/ml verabreicht. Damit bekommt ein Patient, wenn man ihm 100 ml KM injiziert, eine Iodmenge von 40 g! Der Tagesbedarf eines Erwachsenen liegt bei 180–200 µg pro Tag.**

Positive KM

wasserunlöslich

Bariumsulfat

■ **Abb. 8.9** Positive, wasserunlösliche Kontrastmittel



■ **Abb. 8.10a,b** Koronare Rekonstruktion mit länglichem Fremdkörper im terminalen Ileum (Pfeil); im gewählten Knochenfenster hebt sich der Fremdkörper aufgrund seiner höheren Dichte besser vom **verdünnten Bariumsulfat** in den übrigen Darmschlingen ab. (Aus Fabel 2006)

Positive KM

ölgartig

Öl-Jod-Lipid-Emulsion

■ **Abb. 8.11** Positive, ölgartige Kontrastmittel



■ **Abb. 8.12** Myelographie mit ölgartigem KM

■ **Tab. 8.3** Übersicht über die Kontrastmittelanwendungen. (Mod. Nach Becht et al., 2008)

Darstellung	Untersuchung	KM	Dosis (ml)	Iodkonzentration (mg/ml)	Handelspräparat (Beispiele), Substanz	
Lumenfüllung	Magen-Darm-Kanal	BaSO ₄	150(–400)	–	High-density-Präparate, Topcontrol	
		Niedergängig (wird aber i. d. R. nur oral verabreicht)	50–100	370	Gastrografin, Peritrast oral oder rektal	
	Arthrographie	Nierengängige/ + Luft	2–10/15–35	300	Ultravist (Iopromid), Omnipaque (Iohexol), Solutrast	
	Sialographie	Nierengängig	1–3			
	Fistulographie		Variabel			
	PTC/ERCP		20–40/10–40			
	Retrograde Pyelographie (Zystographie)		5–10 (50–100)	150 (200–300)		
	Myelographie		10	200–300		
Organfunktion	i. v.-Urographie	Nierengängig	50–100	300	Ultravist (Iopromid), Omnipaque (Iohexol), Telebrix (Ioxitalamat), Solutrast M (Iopamidol)	
CT, Parenchym (Enhancement)	Bolusinjektion	Nierengängig	1 ml/kg KG, ggf. Anpassung	300 – 400, bei Multislice ggf. höher	Ultravist (Iopromid), Omnipaque (Iohexol), Solutrast M (Iopamidol)	
	Infusion		50–125	240–370		
	Oral				Telebrix (Ioxitalamat)	
Angiographie	Kardio	Nierengängig	40–60	370	Ultravist (Iopromid), Omnipaque (Iohexol), Solutrast M (Iopamidol), Ultravist (Iopromid), Omnipaque (Iohexol), Solutrast M (Iopamidol)	
	Koronar		5–8	300–370		
	Aorto		50			
	Selektiv abdominelle		10–50	300		
	Extremitäten		10–70			
	Zerebrale		5–10			
	Phlebographie		40–70	200–300		
	I. a.-DSA	20–50 je Bolus	75–300	Ultravist (Iopromid), Omnipaque (Iohexol), Solutrast M (Iopamidol), Telebrix (Ioxitalamat)		
	Lymphographie (nur noch selten angewandt)	Ölig	5–0	480	Lipiodol	

8.3 MR-Kontrastmittel

M. Kahl-Scholz

Wie in ► Kap. 6 dargestellt wurde, hängt die Funktionsweise der MRT mit Relaxationszeiten zusammen. Die Signalstärke des Gewebes wird wesentlich beeinflusst durch die T1 und T2-Relaxationszeit. Durch den Einsatz von Kontrastmitteln wird die Signaldifferenz zwischen den Geweben und damit der Bildkontrast verstärkt.

Um das zu erreichen, werden Stoffe mit einem großen magnetischen Moment (viele ungepaarte Elektronen auf der äußersten Schale) verwendet, wodurch die Umgebungsrelaxation (Zerfall der Magnetisierungen) in der Umgebung beschleunigt wird. Gadoliniumkomplexe sind dabei häufig verwendete MR-Kontrastmittel (■ Tab. 8.4).

► **Die Stärke der Relaxationszeitverkürzung nennt man *Relaxivität*. Sie ist ein Maß für die Wirksamkeit eines MR-Kontrastmittels.**

Da der Effekt bei T1-Messungen stärker ist, werden KM überwiegend in solchen Sequenzen eingesetzt.

MR-KM können als positive („Weißmacher“) und negative („Schwarzmacher“) eingesetzt werden, je nachdem, in welcher Messung sie zum Einsatz kommen. Da sie die Relaxationszeiten sowohl in der T1- als auch in der T2-Zeit verkürzen, können sie zu unterschiedlichen Bildeffekten führen (■ Abb. 8.13a, b).

Durch die Verkürzung der T1-Zeit kommt es zu einem schnelleren Wiederaufbau der Longitudinalmagnetisierung und damit einer Signalverstärkung (weiß).

Durch die Verkürzung der T2-Zeit kommt es zu einem schnelleren Zerfall der Transversalmagnetisierung und damit einem Signalabfall (schwarz).

8.3.1 Gadolinium

Gadolinium ist der „Alleskönner“ unter den MR-Kontrastmitteln und besitzt sieben ungepaarte Elektronen und verkürzt stark die Relaxationszeit (bei T1-gewichteten Sequenzen mit Signalanhe-

■ **Tab. 8.4** Übersicht über MR-Kontrastmittel

Extrazellulär	Magnevist, Omniscan, Multihance, Gadovist
Leberzelle	Teslascan, Multihance
Intravasal	Vasovist
Oral*	Lumiren (nicht mehr erhältlich, alternativ Heidelbeersaft oder Ananassaft, ■ Abb. 8.14)
Hormonell	Sekretin

*negative KM → Kontrastabsenkung

bung). Die freien paramagnetischen Ionen sind jedoch sehr giftig. Daher sind die verwendeten MR-Kontrastmittel Derivate des Gadolinium (■ Abb. 8.15). Hierzu zählen:

■ Unspezifische Gadoliniumkomplexe

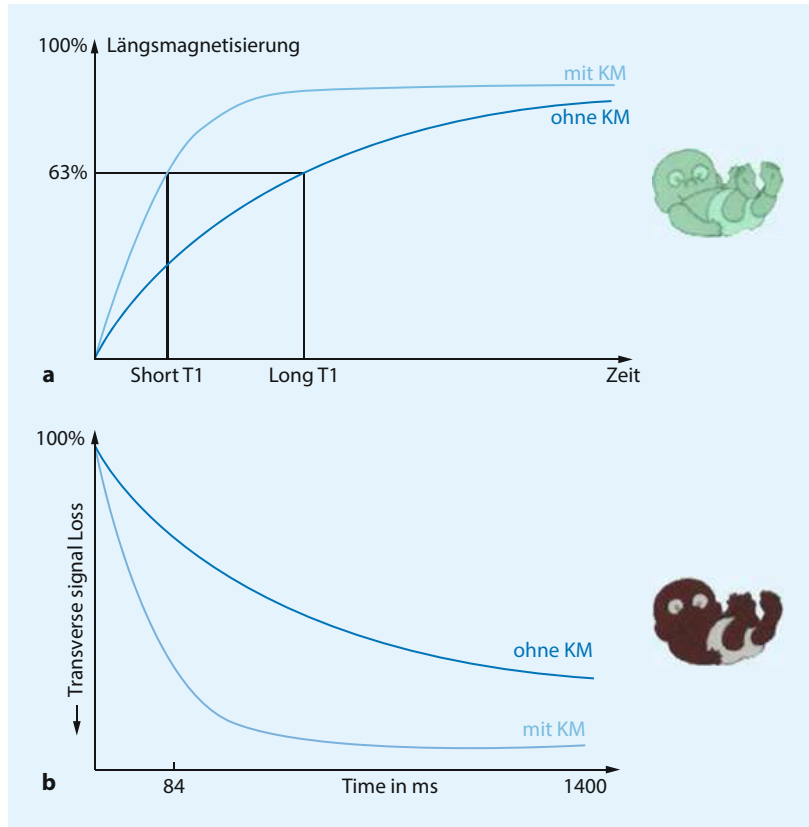
- werden über die Niere ausgeschieden,
- verteilen sich nur im Extrazellulärraum (keine Durchdringung der Blut-Hirn-Schranke),
- haben eine HWZ von 90 min.,
- werden nicht metabolisiert oder an Proteine gebunden,
- haben eine hohe Stabilität.

► **Die Anreicherung von Gadolinium in einem Gewebe ist abhängig vom Allgemeinzustand des Patienten (Fieber), der Wartezeit nach der Injektion und der Dosis („viel hilft viel“). Das Kontrastmittel kann sich bei einem Patienten mit Fieber „anders verhalten“, als bei Patienten ohne Fieber. Das kann bei der Befundung eine Rolle spielen.**

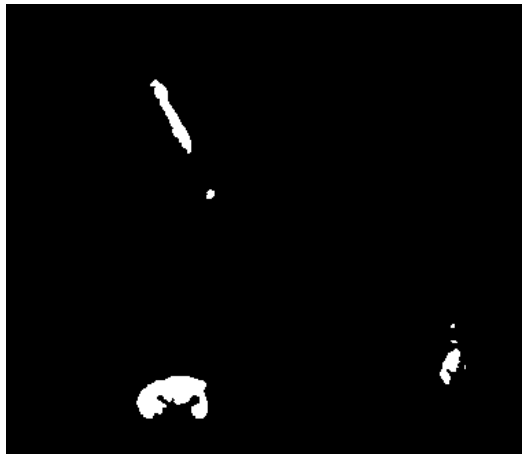
MR-Kontrastmittel sind i. d. R. gut verträglich. Lediglich in 1–2 % der Untersuchungen kommt es zu Nebenwirkungen, die vor allem die Niere betreffen (► Abschn. 8.6.3). In wenigen Fällen wurde auch von allergischen Reaktionen berichtet.

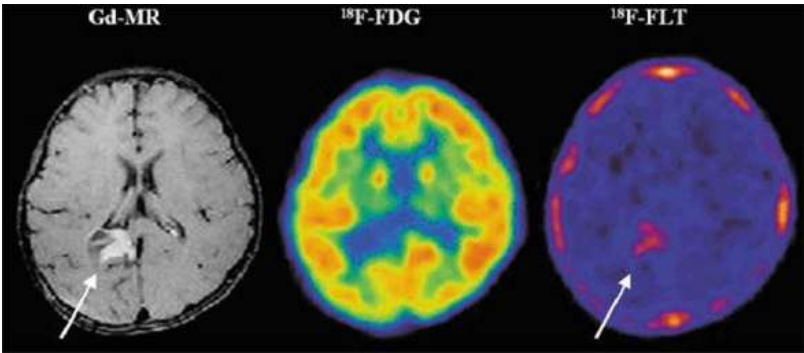
❗ **Ödemsignal in STIR oder TIRM Sequenzen wird durch KM-Gabe überdeckt, diese Sequenzen müssen daher vor Kontrastmittelgabe durchgeführt werden (► Kap. 6).**

■ **Abb. 8.13a,b** Unterschiedliche Bildeffekte mit und ohne KM



■ **Abb. 8.14** Magnetresonananz-Cholangiopankreatikographie (MRCP) mit negativer Kontrastierung des Magens mit 100 ml Ananassaft direkt vor der Untersuchung. Beachte die signalangehobenen distalen Dünndarmschlingen und den durch Ananassaft signalausgelöschten Magen. Die Kontrastierung beruht auf dem hohen Mangan- und Eisengehalt des Ananassaftes. (© Vockelmann)





■ **Abb. 8.15** Darstellung eines neuroektodermalen Tumors bei einem 5-jährigen Mädchen mittels Gadolinium-MR. (Aus Choi 2005)

8.3.2 Leberspezifische Kontrastmittel (■ Tab. 8.5)

■ **Tab. 8.5** Übersicht leberspezifischer MR-Kontrastmittel

KM-Gruppe	KM	Eigenschaften
Retikuloendotheliale	Endorem®	Dextranumhülltes Eisenoxidpartikel; Verdünnung mit 100 ml 5 %iger Glukoselösung vor Infusion; z. B. zur Darstellung einer Lebermetastase
Hepatobiliäre	Telascan®	Manganhaltiger Chelatkomplex; gebrauchsfertige Lösung; auch für die Darstellung der Pankreas
	Multihance®	Gd-BOPTA; gebrauchsfertige Lösung (0,05 mmol/kg KG)
	Primovist®	Gd-EOB-DTPA; Fertigspritzen; T1 gewichtete Bildgebung; gute Verträglichkeit
Orale	Lumiren®	Eisenhaltig; Bereiche erscheinen hypointens; bessere Kontrastierung bei gleichzeitiger i. v.-Gabe von KM, wird am häufigsten eingesetzt
Blood-pool	USPIO	GD-Chelate; lipophil und Protein-bindend

8.4 Sonographie-Kontrastmittel

M. Kahl-Scholz

Kontrastmittel, die in der Sonographie eingesetzt werden (■ Tab. 8.6, ■ Abb. 8.16a, b), entfalten ihre Funktion über die verstärkte Reflexion von Ultraschallwellen – es entsteht also eine stärkere Signalantwort, die am Ultraschallbildschirm als höherer Kontrast abgelesen werden kann.

- **Die Darstellung der Kontrastmittel-Mikrobläschen bei der diagnostischen Sonographie basiert auf einer Anregung der Mikrobläschen im Schallfeld, wobei die Mikrobläschen in Schwingung (Oszillation) geraten.**

- **Je höher die Intensität der eingestrahnten Ultraschallwellen, desto stärker die Reaktion der Mikrobläschen (bis hin zur Bläschenzerstörung).**

8.5 Applikationssysteme und Kontrastmittelapplikation

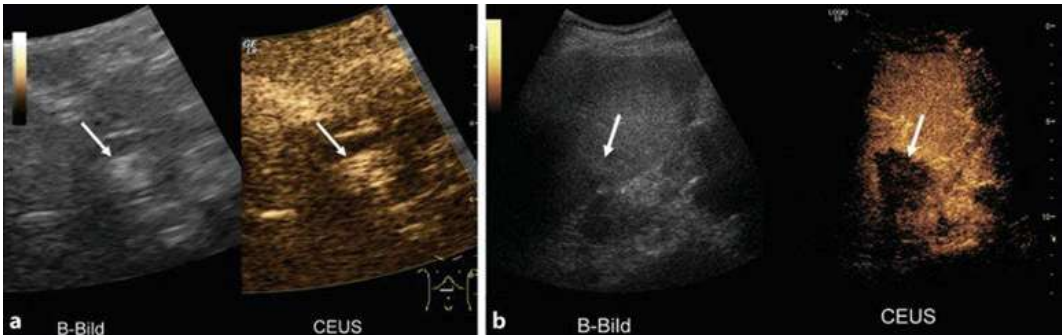
K. Kara

Die Kontrastmittelapplikation setzt sich zusammen aus der **Kontrastmittelmenge** und der **Flussrate**. Diese hängen von der Untersuchung, dem zu untersuchenden Organ, dem Zugang und dem CT-Scanner ab.

Zunächst sollte jeder Zugang **manuell mit NaCl** durchgespült werden. Nach vorsichtigem Anspülen

■ **Tab. 8.6** Kontrastmittel in der Sonographie

Produkt	Eigenschaften	Einsatzgebiet
Echovist®	Galaktose-stabilisierte Mikrobläschen	Rechtsherz-Echokardiographie
Levovist®	Galaktose-stabilisierende Mikrobläschen + Palmitinsäure	Echokardiographie, Gefäßsonographie, Tumorskularisierung
Optison®	Perflutren-gefüllte Albumin-Mikropartikel	Echokardiographie
SonoVue®	Schwefelhexafluorid-Mikrobläschen	Echokardiographie, Gefäßsonographie
Luminitiy®	Perflutren umhüllt von Phospholipiden	Echokardiographie



■ **Abb. 8.16** **a** Kontrolle einer HCC-Läsion während Radiofrequenzablation. Nachweis hyperechogener Veränderungen innerhalb des Tumors (Pfeil). Darstellung im Doppelbildmodus mit B-Bild und CEUS. **b** Kontrolle unmittelbar nach RFA. Nekrotischer Ablationsdefekt im Bereich der ursprünglich hypervaskularisierten HCC-Läsion. Darstellung im Doppelbildmodus mit B-Bild und CEUS 30 s nach KM-Applikation. HCC hepatozelluläres Karzinom, CEUS kontrastmittelverstärkte Sonographie, RFA Radiofrequenzablation, KM Kontrastmittel. (Aus Jung 2011)

wird das restliche NaCl im **Bolus**, also schnell mit Druck, injiziert. Dadurch kann man abschätzen, mit welcher Flussrate weitergearbeitet werden kann und darf. **Großlumige Venenverweilkanülen** sind von Vorteil und insbesondere bei CT-Untersuchungen meist notwendig, damit eine hohe Flussrate gewählt werden kann und während der Injektion kein Überdruck im Gefäß entsteht.

Zur Kontrastmittelapplikation stehen Injektionssysteme vieler Firmen zur Verfügung. Diese Systeme sind **Hochdruckinjektoren** mit einem oder zwei **Kolben** oder **Rollerpumpensysteme**. Heutzutage werden hauptsächlich **Doppelkolbensysteme** oder **Rollerpumpen** in der CT und MRT angewendet und Systeme mit einem Kolben in der Angiographie. Es können Flussrate, KM- und NaCl-Mengen eingegeben sowie Pausen in den Injektionsphasen festgelegt werden. Eine Schwelle des max. Injektionsdrucks, sprich der Druck, der während der Injektion entsteht, kann zumeist ebenfalls

eingestellt werden. Diese Schwelleneinstellung dient der Sichtkontrolle während der Injektion sowie zum automatischen Abbruch bei Schwellenüberschreitung durch einen zu hohen Druck im Gefäß.

Alle Applikationssysteme können sowohl manuell, als auch ferngesteuert bedient werden. Zuvor müssen **Flussrate (ml/s)** und **Kontrastmittelmenge (ml)** eingestellt und das System luftfrei sein. Moderne Systeme haben eine integrierte **Wärmemanschette**, die um das aufgezogene Kontrastmittel, und bei Doppelkolbensystemen auch um die aufgezogene Kochsalzlösung, gelegt wird. Diese hält den Kolbeninhalt warm. Dadurch sinkt die Viskosität des Kontrastmittels, es wird weniger Druck für die Injektion benötigt.

➤ **Die Viskosität steigt mit der Iodkonzentration des KM.**

Eine Erwärmung von 20 °C auf 37 °C verringert die Viskosität um 50 %.

Nach dem Entlüften wird das Kolbensystem „auf den Kopf gedreht“, damit die kleinsten, evtl. noch vorhandenen Luftbläschen nach oben steigen und nicht injiziert werden können. Somit wäre die Druckspritze injektionsbereit. Bei Rollerpumpensystemen werden das Kontrastmittel und das Kochsalz in der Originalflasche auf das Entnahmesystem gesteckt. Die Injektion erfolgt direkt aus der Originalflasche. Das Schlauchsystem der Rollerpumpe wird nur einmal täglich vorbereitet. Danach ist das System startbereit.

Bei der Vorbereitung einer KM-Injektion sind die Hygienevorschriften (► Abschn. 11.6) zu beachten.

8.5.1 Patientenvorbereitung

Bevor Patienten iodhaltige KM injiziert bekommen, sind einige Vorbereitungen notwendig. Ausgenommen davon sind lediglich Notfalluntersuchungen.

■ Nahrungskarenz

Da i. d. R. nichtionische KM verwendet werden, die nur ein geringes Risiko für Übelkeit und Erbrechen aufweisen, ist die strenge Nahrungskarenz nicht mehr notwendig (in einigen Fällen stellen die Abdomen-CT oder größere Interventionen eine Ausnahme dar)..

Patienten haben einen höheren Untersuchungs-komfort und damit eine bessere Compliance (Bereitschaft zur Mitarbeit), wenn sie nicht „hungern“ müssen. Besonders die ausreichende Hydrierung (Versorgung mit Flüssigkeit) vor einer Untersuchung ist wichtig.

■ Notwendige Laborwerte

Die Überwachung der Laborwerte dient dem Ausschluss von Erkrankungen, die das Risiko unerwünschter KM-Wirkungen erhöhen. Das betrifft in erster Linie Nieren- und Schilddrüsenerkrankungen.

Zum Ausschluss von Nierenerkrankungen wird der **Kreatininwert** oder die **Glomeruläre Filtrationsrate (GFR)** genutzt (Kreatinin häufig bei ambulanten Patienten, bei denen keine GFR vorliegt). Um eine Schilddrüsenüberfunktion (Hyperthyreose) auszuschließen, sollte wenigstens bei Risikopatienten der TSH-Wert (Thyreoida stimulierendes Hormon) vorliegen.

Wichtige Werte

Kreatinin = Stoffwechselendprodukt der Muskel- und Nervenzellen, welches nahezu vollständig über die Nieren ausgeschieden wird. Ist der Wert im Blutserum (Serumkreatinin) zu hoch, kann man davon ausgehen, dass die Nieren die Filtrationsleistung nicht schaffen und dementsprechend eine Funktionsstörung vorliegt. Der Normwert liegt bei **Männern zwischen 0,84 und 1,25 ml / dl, bei Frauen zwischen 0,66 und 1,09 mg / dl.**

GFR = filtriertes Volumen aller Glomeruli (Nierenkörperchen) beider Nieren innerhalb einer vorgegeben Zeiteinheit. Schafft die Niere das notwendige Volumen nicht, kann von einer Funktionsstörung ausgegangen werden. Die Clearance kann errechnet oder, z. B. bei einer Nierenzintigraphie, direkt bestimmt werden. Der Normwert eines jungen Erwachsenen liegt bei **125 ml / min / 173 cm²** (der kritische Bereich liegt unter 60 ml / min / 173 m²).

TSH = in der Hypophyse produziertes Hormon, welches die Iodaufnahme und Produktion von Hormonen in der Schilddrüse regelt. Ist der TSH niedrig, so messen Chemorezeptoren im Körper einen zu hohen Anteil an Schilddrüsenhormonen im Blut (negative Rückkopplung), es muss also eine Überfunktion vorliegen. Der Normwert beträgt **0,3–2,5 mU/l.**

■ Metforminhaltige Medikamente

Der Wirkstoff Metformin wird zur Behandlung des Typ-2-Diabetes und bei Frauen mit polyzystischem Ovarialsyndrom (PCOS) eingesetzt. Metformin und iodhaltige KM konkurrieren in der Niere um die Ausscheidung. Werden beide zeitgleich bei einem Patienten eingesetzt, steigt das Risiko der Akkumulation von Metformin (Anreicherung im Organismus durch fehlende Ausscheidung) und damit die Möglichkeit einer Laktatazidose (Übersäuerung des Blutes), die bis hin zum Schock oder einem Nierenversagen führen kann.

➡ **Empfohlen wird das Absetzen des Metformin zum Zeitpunkt der KM-Gabe und Fortführung**

■ **Tab. 8.7** Empfohlene Kontrastmittelmengen für CT-Untersuchungen des Abdomens

	50 kg KG	70 kg KG	90 kg KG	110 kg KG
Optimale Iodmenge	25 g Iod	35 g Iod	45 g Iod	55 g Iod
300 mg Iod/ml	80 ml KM	115 ml KM	150 ml KM	180 ml KM
350 mg Iod/ml	70 ml KM	100 ml KM	130 ml KM	160 ml KM
400 mg Iod/ml	60 ml KM	85 ml KM	110 ml KM	140 ml KM

der Therapie nach 48 Stunden (bei normaler Nierenfunktion).

Bei Patienten mit einer eingeschränkten Nierenfunktion sollte Metformin bereits 48 Stunden vor der KM-Gabe abgesetzt werden.

8.5.2 Einzelkolbensystem

Wie bereits erwähnt werden diese Systeme hauptsächlich in der Angiographie verwendet. Jedoch gibt es noch Abteilungen, die diese Einfachkolbensysteme zur Schnittbilddiagnostik nutzen. Technische Anforderungen und Unterschiede sind hier vorhanden. Das Einzelkolbensystem wird mit reinem Kontrastmittel befüllt und entlüftet. Nach Wunsch und Bedarf wird die Flussrate (ml/s) und Kontrastmittelmenge eingestellt und injiziert. Für die Nutzung in der Angiographie werden diese Einstellungen vom untersuchenden Arzt individuell vorgegeben. Ein Beispiel wäre die Wahl der „Verzögerung“. Hier wird eine Zeit zwischen der Injektion und digitalen Aufnahme eingebaut, um nicht zu früh mit der Bildakquirierung zu beginnen und somit Strahlung zu sparen.

8.5.3 Doppelkolbensystemen

Bei dem Doppelkolbensystem wird ein Kolben mit Kontrastmittel und ein Kolben mit NaCl 0,9 % befüllt. Die Injektion erfolgt immer zuerst mit Kontrastmittel und anschließend mit NaCl. NaCl, also Kochsalzlösung, dient zur Kontrastmittelreduktion und zum weiteren Vorantreiben des Kontrastmittels durch die Gefäße. Wie kann es dazu kommen? Durch die Nachinjektion von NaCl wird

die Kontrastmittelmenge (ml) aus dem Arm weitertransportiert und ebenfalls genutzt. Die Injektionsmenge von NaCl beträgt i. d. R. 30–45 % der Kontrastmittelmenge. Die längere Injektion durch die Injektionsmenge führt zum „Nachrücken“ des Kontrastmittels und somit zu einer Gesamtnutzung und Einsparung dieser. Die Flussrate des NaCl ist mit der des Kontrastmittels identisch.

8.5.4 KM-Protokolle für CT-Untersuchungen

Kontrastmittelprotokolle hängen von verschiedenen Faktoren ab. Neben der zu **untersuchenden Organregion** und dem **Gefäßstatus**, spielt auch die **Schnelligkeit des CT** sowie die Wünsche und **Vorlieben des Befunders** eine Rolle. Weitere Einflussfaktoren sind unter anderem die Wahl des Applikationssystems und die Patientenstatur.

- Ein großer, kräftiger Mann braucht mehr KM, als eine kleine, zierliche Dame.
- Beim Nutzen eines Einfachkolbensystems wird mehr KM injiziert, als bei einem Doppelkolbensystem, bei dem NaCl zur Nachinjektion genutzt wird.
- Je höher die Iodkonzentration, desto weniger KM wird benötigt, um die Iodmenge zu applizieren. Für eine ausreichende Kontrastierung der Leber wird etwa 0,5 mg Iod/kg Körpergewicht benötigt.
- Damit Sie nicht bei jedem Patienten neu rechnen müssen, bietet es sich an, eine entsprechende Tabelle zu erstellen (■ Tab. 8.7), mit der Sie insbesondere bei Untersuchungen des Abdomens eine gewichtsadaptierte Kontrastmittelgabe durchführen können.

- Durch ein großes Kanülenlumen kann mit hohem Druck KM injiziert werden. Die hohe Flussrate bewirkt einen schnellen Dichteanstieg, wodurch für Gefäßdarstellungen weniger KM benötigt wird.
- Bei Gefäßdarstellungen ist die konstante Kontrastierung nur durch die Injektion mit einer hohen Flussrate gegeben. Wichtig ist hierbei die applizierte Menge Iod/Zeit. Das bedeutet, dass bei Verwendung höherkonzentrierten Kontrastmittels die Flussrate reduziert werden kann. Die zu applizierende Menge kann folgendermaßen berechnet werden:

$$(\text{Scanzeit} + 10) \times \text{Flussrate} = \text{KM} - \text{Menge (ml)}$$

Die Scanzeit ist an jedem CT ablesbar und bei jeder Untersuchung, jedem Patienten und jedem Gerät anders.

8.5.5 Zugänge, Port, ZVK

Damit eine Hochdruckinjektion stattfinden kann, muss ein optimaler Zugang vorhanden sein. Großlumige Zugänge werden insbesondere für CT-Untersuchungen präferiert, um einen hohen Druck aufbauen zu können und hierbei die Stabilität (von Zugang und Vene) zu erhalten. Zu besonderen Zugängen zählen der Zentrale Venenkatheter (ZVK) und das Portsystem, die nun gesondert beschrieben werden:

- **Zentraler Venenkatheter (ZVK):** Der Zentrale Venenkatheter liegt in der V. cava superior direkt vor dem rechten Vorhof des Herzens. Es gibt unterschiedliche ZVK-Modelle. Manche haben nur einen Schenkel, also einen Schlauch, und manche drei. Grundsätzlich sind diese Systeme nicht für Hochdruckinjektionen zugelassen. Sie sollten daher immer absprechen, ob der ZVK für die Injektion genutzt werden darf. Bei Systemen mit drei Schenkeln ist darauf zu achten, dass der distale Schenkel (meist farblich braun gekennzeichnet und immer auf dem Schlauch geschrieben) genutzt wird, da dieser der großlumigste von

den dreien ist. Ein weiterer Grund ist das Ende dieses Lumens. Die Beschaffenheit des distalen Schenkels verhindert den tropfenweisen Austritt in das Atrium, wogegen genau das bei dem proximalen und medianen Schenkel aufreten würde. Das wichtigste bei der ZVK-Nutzung ist aber die Wahl der Flussrate.

➤ Die Flussrate darf maximal 3 ml/s betragen!

Falls keine arterielle Phase notwendig ist und somit eine längere Zeit zwischen Injektion und Akquirierung besteht, sollte die Flussrate vermindert werden. Warum besteht die Einschränkung? Das Kontrastmittel sowie das NaCl werden nahezu direkt ins Atrium injiziert. Das Herz wird somit belastet! Um dieser mechanische Belastung entgegenzuwirken und keine Herzscheiden zu verursachen ist diese Anpassung notwendig. Gleichzeitig wird das KM an Ort und Stelle gespritzt. Die Verteilung erfolgt in die Aorta bzw. in die Arterien. Der venöse Kreislauf braucht nicht „bis zum Ende durchlaufen“ werden, sodass eine Hochdruckinjektion zur konstanten Kontrastierung nicht erforderlich ist. Eine Sonderform eines ZVK ist der **Shaldon-Katheter**, der zur Hämodialyse genutzt wird. Dieser weist ein sehr viel größeres Lumen auf, sodass hier zumeist höhere Flussraten möglich sind. Aber auch hier gilt: Die Verwendung sollte immer mit dem verantwortlichen Arzt abgesprochen werden.

- **Portsystem:** Ein Portsystem ist ähnlich einem Venenzugang und wird unter die Haut implantiert. Der Plastikschiach wird in die V. cava superior platziert. Hierüber können ganz normal Infusionen angeschlossen oder Medikamente (z. B. im Rahmen einer Chemotherapie) verabreicht werden. Bei Bedarf kann auch eine Blutentnahme durchgeführt werden. Für alle diese Vorgänge wird der Port mit einer Portnadel angestochen. Bei stationären Patienten kann ggf. das System für eine längere Zeitspanne mit einer Nadel verbunden bleiben. Dabei ist jedoch das erhöhte Infektionsrisiko zu beachten und abzuwägen. Die meisten Portsysteme sind keine Hochdrucksysteme und dienen nicht der Kontrastmittelinjektion – sie könnten

aufgrund des Drucks Risse entwickeln oder sogar platzen! Dies hätte eine erneute Portimplantation und damit Belastungen und Risiken für den Patienten zur Folge. Da das KM eine eher zähe Konsistenz bzw. Beschaffenheit hat, könnte das System sich verkleben, was ebenfalls ein Grund dafür ist, Portsysteme nicht für die KM-Injektion zu nutzen. Jedoch bestätigen Ausnahmen nicht die Regel! Bei Patienten mit sehr schlechten Venenverhältnissen, bei denen keine erfolgreiche Punktion möglich und keine Hochdruckinjektion nötig ist, kann über eine Ausnahme nachgedacht werden. Die Untersuchung darf jedoch nicht von der Injektionsflussrate abhängig sein, denn die maximale Flussrate darf hier nur 1,5 ml/s betragen. Eine Beispieluntersuchung wäre hier das CCT post KM. Die Untersuchung erfolgt 5–10 min post KM-Injektion. Da diese Wartezeit eingehalten werden muss, ist eine schnelle Injektion unnötig. Durch die langsame Injektion erfolgt eine geringere Belastung des Patienten in der Gesamtsituation. Das allerwichtigste bei dem Nutzen des Ports ist die Nachinjektion von Kochsalzlösung! Wie bereits oben beschrieben ist die NaCl-Gabe im Anschluss des Kontrastmittels Standard. Diese Menge wird erhöht, damit der Portschlauch gut durchgespült wird. Zudem kann manuell ca. 20 ml heparinisierte Kochsalzlösung in das Portsystem injiziert werden, damit ein Verkleben verhindert wird.

➤ **Entnehmen Sie aus der vorbereiteten Heparin-NaCl-Infusion 20 ml und injizieren diese nach der Untersuchung.**

❗ **Die meisten Portsysteme dienen nicht der Kontrastmittelinjektion! Sie sind keine Hochdrucksysteme und könnten ggf. platzen!**

— **Hochdruckport:** Inzwischen sind einige Portsysteme auf dem Markt, die für die Hochdruckinjektion und damit auch für die Kontrastmitteldosis im CT zugelassen

sind. Diese sind i. d. R. an ihrer Form oder auch Oberflächenbeschaffenheit erkennbar bzw. ertastbar. Die meisten Patienten werden Ihnen sagen, dass ihr Port für die KM-Injektion zugelassen ist. Ports dürfen nur mit speziellen Portnadeln punktiert werden, da andere Nadeln die Portmembran zerstören und zu Undichtigkeiten führen. Achten Sie also darauf, dass die Patienten mit liegender Portnadel zur Untersuchung kommen.

8.5.6 Paravasat! Was nun?

Bei einer intravenösen Injektion kann es zu einem Paravasat kommen. Das bedeutet, die Injektion erfolgt nicht in das Gefäßsystem, sondern in das umliegende Gewebe. Bei der Kontrastmittelinjektion würde ein Paravasat zu keiner KM-Anreicherung und somit zu einer verminderten bis keiner Aussagekraft des bildgebenden Verfahrens führen. Eine neue Venenverweilkanüle muss gelegt und die Untersuchung erneut durchgeführt werden. Wenn Kontrastmittel ins Gewebe läuft, kann dies zu **Gewebsnekrosen** führen. In diesem Falle muss die Kanüle entfernt und die Flüssigkeit vorsichtig über die Punktionsstelle aus dem Gewebe gedrückt werden. Somit geht das verdrängte Gewebe in den Grundzustand zurück, und der Schmerz lässt nach. Danach ist ein kühlender Verband, z. B. mit Heparinsalbe unabdingbar. Der Patient sollte darauf hingewiesen werden, den Arm möglichst hoch zu lagern. Das zuständige Pflegepersonal ist zu informieren, damit der Verband regelmäßig kontrolliert und ggf. erneuert wird. Ambulante Patienten sollten zumindest für 30 min überwacht werden. Auch hier sollte ein kühlender Verband angelegt werden. Sollten nach 30 min keine zunehmenden Beschwerden aufgetreten sein, kann der Patient in Rücksprache mit dem verantwortlichen Arzt nach Hause entlassen werden mit der Maßgabe der Kühlung und Hochlagerung.

Sollten Beschwerden auftreten und die Schwellung stark spannen, ist unbedingt der Arzt zu informieren. Je nach Ausmaß der Schwellung muss eine chirurgische Dekompression erfolgen.

! Gefahr des Paravasats steigt bei:

- Dünnen Venen,
- Patienten mit Zustand nach mehrfachen Chemotherapien,
- Mehrfachpunktionen (Entstehung von Gefäßspasmen).

Paravasat-Prophylaxe

- Die Injektionsnadel nur so dick wie notwendig wählen
- Kontrolle der Nadellage durch Aspiration (es muss Blut kommen)
- Kontrolle des Zugangs während der Injektion
- Information an Patienten, sich bei Schmerz, Brennen o. ä. während der Injektion sofort zu melden

! Die KM-Gabe selbst erfolgt durch den Arzt oder unter Aufsicht eines Arztes!

- ruhige Atmosphäre für den Patienten schaffen

➤ Umso entspannter und ruhiger der Patient in die Untersuchung geht desto mehr vermindert sich das Risiko, dass nach der Untersuchung Nebenwirkungen auftreten.

Nach der Untersuchung ist zu beachten:

- Den Patienten nach seinem Befinden fragen.
- Auf Zeichen einer Kontrastmittelreaktion beim Patienten achten
- Den Patienten nicht sofort gehen lassen.

➤ Nach der Untersuchung mit KM sollte der Patient mindestens noch ½ Stunde überwacht werden, weil erfahrungsgemäß die Mehrzahl aller schwerwiegenden Zwischenfälle innerhalb dieser Zeit auftritt.

8.6 Kontrastmittelzwischenfall und Notfallmedikation

M. Kahl-Scholz

8.6.1 Durchführung einer (iodhaltigen) Kontrastmittelapplikation

Bei der Vorbereitung ist zu beachten:

- angewärmtes KM verwenden (angenehmer für den Patienten, weniger Gefäßspasmen, verbesserte Viskosität vor allem bei dimeren nichtionischen KM)
- **Bzgl. der Viskosität besondere Vorsicht bei Bolusapplikationen bei Hochdruckinjektionen**
- Entnahme erfolgt mittels Kanüle unmittelbar vor Gebrauch
- Nicht verbrauchtes KM wird entsorgt.
- Iodhaltige KM werden licht- und strahlungsgeschützt aufbewahrt, um eine Abspaltung von Iodid (die als Wechselwirkung mit Licht und Strahlen eintritt) zu vermeiden.
- vom Arzt festgesetzte Applikationsmenge beachten

8.6.2 Kontraindikationen

Die wichtigsten Kontraindikationen sind in der folgenden Übersicht gegeben:

Kontraindikationen für KM-Applikation**Absolute Kontraindikationen (Ausnahme vitale Indikation)**

- schwere, bisher nicht dialysepflichtige Funktionsstörung der Niere
- manifeste Schilddrüsenüberfunktion
- Empfindlichkeit gegenüber iodhaltigen KM
- bestimmte Schilddrüsenkarzinome

Relative Kontraindikationen

- Herzinsuffizienz
- schwere Funktionsstörung der Leber
- hämatologische Erkrankungen (M. Waldenström)

➤ Nach der KM-Injektion ist eine Schilddrüsen-Szintigraphie nicht aussagekräftig!

■ **Tab. 8.8** Unerwünschte direkte Nebenwirkungen/Reaktionen auf KM

	Dosisabhängige Reaktion	Dosisunabhängige Reaktion
Reaktionsart	Direkter (lokaler) Effekt auf Organe und Gewebe sowie Organsysteme	Systemische Reaktion
Pathologischer Vorgang	Chemotoxisch	Anaphylaktisch
Symptome	Wärme-/Kältegefühl, Hautrötung, Kopfschmerzen	Übelkeit, Erbrechen, Urtikaria, Juckreiz

8.6.3 Nebenwirkungen

Durch das KM bedingte unerwünschte Reaktionen können dosisabhängig oder dosisunabhängig auftreten (■ Tab. 8.8).

Es kann u. a. zu einer Gefäßerweiterung (Vasodilatation) kommen, die einen Blutdruckabfall (Hypotonie) bedingt. Aus Mastzellen freigesetzte Histamine sind für eine allergische Sofortreaktion verantwortlich und führen wiederum zu einer Vasodilatation der kleinen peripheren Gefäße. Diese ist Ursache eines möglichen Kreislaufschocks. Ferner wird eine Beteiligung des Gerinnungssystems und des ZNS diskutiert.

Viele Patienten gehen davon aus, dass eine KM-Reaktion mit einer Iodallergie einhergeht – eine Iodallergie wäre aber nicht mit dem Leben vereinbar, da wir Iod als unentbehrlichen Bestandteil unseres menschlichen Stoffwechsels benötigen.

➤ **Eine unerwünschte KM-Reaktion basiert nicht auf einer Iodallergie, sondern ist auf eine Unverträglichkeit des KM-Komplexes zurückzuführen.**

Lokal kann es, vor allem bei iodhaltigen Kontrastmitteln, zu Schmerzen, Schädigungen der Gefäßwände, Gefäßweitstellung (→ Blutdruckabfall) kommen.

➤ **Niederosmolare KM sind i. d. R. besser verträglich als hochosmolare, nichtionische besser als ionische.**

❗ **Besondere Vorsicht und genaue Überprüfung des Einsatzes von KM ist erforderlich bei Patienten mit:**

■ **Status nach schwerer KM-Reaktion**

- **Allergien**
- **Asthma bronchiale**
- **Nierenerkrankungen**
- **Schilddrüsenerkrankungen**

Kontrastmittelinduzierte Nephropathie (CIN)

Unter einer kontrastmittelinduzierten Nephropathie versteht man eine Verschlechterung der Nierenfunktion (symptomatisch durch pathologische Kreatininwerte 3–10 Tage nach der KM-Applikation) nach Gabe iodhaltiger, intravasal applizierter Kontrastmittel. Sie tritt bei 7–10 % der Patienten auf, wobei gerade solche Patienten mit einer vorbestehenden Niereninsuffizienz oder einem Diabetes mellitus mit Niereninsuffizienz gefährdet sind. Bei dieser Personengruppe sollte möglichst keine Kontrastmittelapplikation erfolgen. Lässt sie sich aus zwingenden diagnostischen Gründen dennoch nicht vermeiden, sind folgende Aspekte zu beachten:

- Vor der Untersuchung sollte der Patient ausreichend hydriert, also mit Flüssigkeit versorgt werden (optimal ist eine i. v. Hydrierung mit isotoner NaCl-Lösung).
- Nephrotoxische Substanzen sollten als Begleittherapien vermieden oder ggf. abgesetzt werden.
- Während der Untersuchung:
 - Verwendung eines niederosmolaren und -viskosen KM
 - So wenig KM wie möglich verwenden!
 - Wiederholte KM-Gaben sollten unbedingt vermieden werden!

Hyperthyreose und thyreotoxische Krise

Wird iodhaltiges Kontrastmittel verwendet (z. B. im Rahmen einer Angiographie), kommt es durch Abspaltung des Iodnukleotids zur Erhöhung des Iodplasmaspiegels. Eine normale gesunde Schilddrüse kann sich der erhöhten Iodbelastung anpassen. Liegt aber z. B. bereits eine autonome Produktion oder eine Immunerkrankung der Schilddrüse vor, kann es zu einer Hyperthyreose bis hin zur thyreotoxischen Krise kommen.

Die Häufigkeit, mit der eine Hyperthyreose auftritt, hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Schweregrad des Iodmangels vor Iodexposition,
- Ausmaß der Iodexposition,
- Häufigkeit funktionell autonomer Zellen in der Schilddrüse,
- Alter der Patienten.

■ Symptome einer Hyperthyreose sind u. a.

- Gewichtsabnahme (trotz ausreichender Nahrungszufuhr)
- erhöhter Puls
- Schwitzen
- Bluthochdruck
- Nervosität, Unruhe
- Schlafstörungen
- evtl. Struma

■ Symptome einer thyreotoxischen Krise sind u. a.

- Stadium 1 (Letalität unter 10 %): Extreme Sinustachykardie (> 150/min) oder Tachyarrhythmie bei bestehendem Vorhofflimmern, Herzinsuffizienz; hohes Fieber; gastrointestinale und neurologische Symptome, Exsikkose, Dehydration
- Stadium 2: Bewusstseinsstrübung
- Stadium 3 (Letalität: über 30 %): Bewusstlosigkeit

Bei Risikopatienten wird prophylaktisch Perchlorat (Irenat) vor und 1–2 Wochen nach der Untersuchung mit einem Thyreostatikum eingesetzt. Perchlorat vermindert die Iodaufnahme in die Schilddrüse.

Prophylaxe mit Perchlorat

Beispiel einer prophylaktischen Behandlung der iodinduzierten Hyperthyreose

- 2–4 Stunden vor KM-Gabe 25 Tropfen Irenat (Perchlorat)
- 1 Woche lang 3 × 15 Tropfen Irenat/Tag
- TSH basal, T4, T4 nach 3 und 6 Wochen kontrollieren

Beispiel einer Behandlung bei manifester Hyperthyreose und vitaler Indikation

- 2–4 Stunden vor KM-Gabe 25 Tropfen Irenat (Perchlorat)
- 2 Woche lang 3 × 15 Tropfen Irenat/Tag
- 2 Wochen lang 20 mg/Tag Favistan (Thiamazol)

Nephrogene systemische Fibrose (NSF)

Diese Fibroseform kann (sehr selten) bei Patienten auftreten, die bereits an einer Niereninsuffizienz Stadium 4 oder 5 leiden und einer Untersuchung mit Gadolinium unterzogen werden. Warum sie auftritt, ist noch nicht vollständig geklärt. Sie kann im Zeitraum von 2 Tagen bis 18 Monate nach dem Kontakt mit gadoliniumhaltigen KM symptomatisch werden. Es gibt prophylaktische Maßnahmen, durch die das Risiko einer NSF reduziert werden kann. Hierzu zählen:

- Wenn eine KM-Gabe diagnostisch bei Risikopatienten unverzichtbar ist, dann sollte zyklisches Gadolinium-KM bzw. KM mit einer niedrigen Risikoklassifizierung verwendet werden (■ Tab. 8.9).
- Es sollte die geringstmögliche Dosis angestrebt und eine wiederholte Gabe unbedingt verhindert werden.

Kreislaufstillstand

■ Symptome

- fehlender (Karotis-)Puls
- Atemstillstand, Schnappatmung evtl. nach 15–40 s
- zerebrale Krampfanfälle nach 15–45 s möglich
- Pupillenerweiterung und Verlust der Lichtreaktion nach 30–60 s

Tab. 8.9 Risikoklassifizierung von Gadolinium-Kontrastmittel im Zusammenhang mit der Entwicklung einer NSF (nach EMEA)

Risikoklasse	Kontrastmittel
Hohes Risiko	Optimark, Omniscan, Magnevist, Gado-MRT-Ratiopharm
Mittleres Risiko	Vasovist, Primovist, Multihance
Niedriges Risiko	Gadovist, ProHance, Dotarem

■ Reanimation

- Herzdruckmassage: Harte Unterlage suchen, sofern noch nicht vorhanden → Druckpunkt in der Mitte des Brustkorbs (untere Hälfte des Brustbeins) → Kompressionstiefe ca. 4–5 cm → 100 Kompressionen
- Beatmung: nach den ersten 30 Kompressionen (Frequenz 100–120/min) → erster Beatmungszyklus von ca. 1 s mit zweimaliger Beatmung
- Weiterverfahren wie oben im Verhältnis **30 (Herzkompressionen) : 2 (Beatmungen)**
- **Besonderheiten:**
 - bei Schwangeren ab der 20. SWS bei der Lagerung vor der Herzdruckmassage Becken rechts anheben und den Uterus nach links verlagern
 - bei Kindern zunächst 5 Beatmungen; sofern nur ein Helfer anwesend ist, 30 (Herzkompressionen) : 2 (Beatmungen); bei der 2-Helfer-Methode 15 (Herzkompressionen) : 2 (Beatmungen)

■ Notfallmedikation

- Suprarenin® (Adrenalin 1:1000): 1 ml (1 mg) mit 9 ml physiologischer Kochsalzlösung verdünnen
- Glukokortikoide (z. B. Dexamethason 40–100 mg, Prednisolon 200–500 mg)
- H1- und H2-Antagonisten
- Atropin 0,5 mg
- Midazolam 5 mg
- i. v.-Narkotika
- kristalloide Lösungen
- kolloidale Volumenersatzmittel

Krampfanfälle

Ein Krampfanfall muss nicht als Nebenwirkung auftreten, kann aber durch eine bereits existierende Grunderkrankung (Epilepsie, Hirntumore, Metastasen, Narbenbildung im Gehirn etc.) zu jeder Zeit, also z. B. auch im MRT oder CT während des Untersuchungsablaufes, auftreten.

Es gibt verschiedene Formen von Krampfanfällen, von denen notfallmedizinisch vor allem der Grand-mal-Anfall und der Status epilepticus relevant sind.

■ Grand-mal-Anfall

Diese Anfallsform ist in verschiedene Phasen unterteilt:

- Präkonvulsive Phase mit Allgemeinsymptomen wie Kopfschmerzen, Müdigkeit, Halluzinationen
- Konvulsive Phase (tonisches Stadium) mit Sturz, Bewusstseinsverlust, Apnoe, Zungenbiss, Strecktonus
- Konvulsive Phase (klonisches Stadium) mit rhythmischen Kontraktionen der Muskulatur, Einnässen, Zungenbiss, Zyanose
- Postkonvulsive/postiktale Phase mit anschließendem kurzen komatösen Zustand, Umdämmern, Verwirrtheit

Diese Form des Krampfanfalls wird Ihnen am häufigsten begegnen. Wichtigste Behandlungsmaßnahme hierbei ist, Verletzungen des Patienten z. B. durch Fallen vom Untersuchungstisch zu verhindern. Ein Beißkeil oder ähnliches wird heute nicht mehr eingesetzt. Bei einem kurz dauernden Krampfanfall ist in aller Regel auch keine akute medikamentöse Therapie erforderlich. Wichtig ist, dass Sie sich Unterstützung durch den zuständigen Arzt holen.

■ Status epilepticus

- Dauert ein tonisch-klonischer Anfall länger als 5 Minuten oder erfolgt eine ganze Anfallsreihe, ohne dass der Patient zwischenzeitlich sein Bewusstsein wiedererlangt, spricht man von einem Status epilepticus. Die Gefahr ist hierbei eine Unterversorgung mit Sauerstoff (Hypoxie) und eine gefährliche Herz-Kreislauf-Belastung.

■ Akuttherapie bei Status epilepticus

- Sauerstoffzufuhr, Blutdruckkontrolle, wenn möglich EKG- und Blutzuckerkontrolle
- Benzodiazepine i. v., z. B. 2–4 mg Lorazepam (alternativ Diazepam 10–20 mg oder Clonazepam 1–2 mg)
- Bleibt nach 5 Min eine Wirkung aus, wird die Gabe wiederholt.
- Phenytoin und Valproat sind Reservemittel, die nur dann gegeben werden, wenn der Status epilepticus auch durch Gabe von Benzodiazepinen nicht beendet werden kann.

8.6.4 Schwangerschaft und Stillzeit

Eine Schwangerschaft stellt eine relative Kontraindikation für eine Röntgenuntersuchung dar. Die Strahlenbelastung ist für das ungeschützte Kind je nach geplanter Untersuchung relativ hoch. In bestimmten Notfallsituationen ist es dennoch nicht zu verhindern, eine Untersuchung an einer schwangeren Patientin durchzuführen. Eine genaue Datenlage, inwieweit in diesem Fall KM auf den Fetus übergeht und ihn belastet, existiert nicht.

In der Muttermilch findet sich etwa 1 % KM wieder. Dass diese Menge schädigend auf den Säugling wirkt, konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Die derzeitige Empfehlung fordert keine speziellen Maßnahmen. Trotzdem kann eine 24-stündige Stillpause erwogen werden.

✓ Zurück zu unserem Fall:

1. Wichtig ist in erster Linie, dass Sie selbst die Ruhe bewahren und beruhigend mit der Patientin reden. Lassen Sie Frau Gerdes in keinem Fall alleine! Laufende KM-Applikationen sind umgehend abzustellen,

die Verweilkanüle hingegen unbedingt zu belassen!

2. Behandelnder Arzt bzw. Reanimationsteam
3. Medikamente: Antihistaminika, Kortikosteroide; Trachealtubus, Beatmungsgerät

8.7 Andere Medikamente in der Radiologie und Nuklearmedizin

M. Kahl-Scholz

8.7.1 Glucagon

Glucagon wird von der Bauchspeicheldrüse gebildet, aber auch als Medikament bei Unterzuckerung (Hypoglykämie) verabreicht. Es erhöht durch Abbau von Glykogen (Zuckerspeicher) in der Leber den Blutzuckerspiegel und gilt als Gegenspieler von Insulin. Es hemmt zudem auch die Motilität des Magen-Darm-Traktes und wird daher zu diagnostischen, bildgebenden Zwecken alternativ zu Butylscopolamin (Buscopan®) eingesetzt.

Unerwünschte Wirkungen (UEW): Häufig Übelkeit, gelegentlich Erbrechen, selten Bauchschmerz; sehr selten Überempfindlichkeitsreaktion einschl. anaphylaktischer Reaktion/Schock. Zusätzliche NW nach Anwendung bei diagnostischen Verfahren: Gelegentlich Hypoglykämie; sehr selten Hypo-/Hypertonie, Brady-/Tachykardien, hypoglykämisches Koma

Kontraindikationen (KI): Überempfindlichkeit gegenüber Glucagon, Phäochromozytom

8.7.2 Butylscopolamin (Buscopan®)

Buscopan®, auch bekannt als Butylscopolaminbromid, ist ein sehr brauchbares Hilfsmittel bei der Röntgendiagnostik des Gastrointestinaltraktes. Die Anwendung von Buscopan® ermöglicht es, den Tonus von Magen und Duodenum herabzusetzen, und so diese Organe, vor allem das letztgenannte, ausreichend für die Bildgebung, z. B. im Rahmen einer virtuellen Coloskopie, mit Gas zu füllen. Als Gegenspieler des Parasympathikus blockiert Butylscopolaminbromid die ACh-Wirkung und relaxiert die glatte Muskulatur.

Unerwünschte Wirkungen (UEW): Abnahme der Schweißdrüsensekretion (Wärmestau), Hautrötung, Nervensystem und Psyche: Zentralnervöse Störungen (z. B. Unruhe, Halluzinationen) (vorwiegend bei Überdosierung)

Augen: Akkommodationsstörungen, Glaukomauslösung (Engwinkelglaukom), Überempfindlichkeitsreaktionen, Bronchospasmen

Kontraindikationen (KI): Bei Patienten mit Glaukom, schweren Herzerkrankungen (z. B. Herzrhythmusstörungen) oder einer benignen Prostatahyperplasie (BPH) oder anderen Harnentleerungsstörungen sowie mechanischen Stenosen im Bereich des Magen-Darm-Kanals oder einem Megakolon darf Butylscopolaminbromid nicht angewendet werden.

8.7.3 Metoclopramid (Paspertin®)

Metoclopramid, der Wirkstoff bei Paspertin®, wirkt als Dopamin-Antagonist vor allem am Magen-Darm-Trakt und zentral gegen Übelkeit und Bewegungsstörungen des Magen-Darm-Traktes.

Unerwünschte Wirkungen (UEW): Hautausschlag (gelegentlich), Müdigkeit, Kopfschmerzen, Schwindel, Angst, Ruhelosigkeit (Häufigkeit nicht bekannt), Parkinsonismus u. Spätdyskinesien (bei älteren Patienten nach Langzeittherapie) (sehr selten), Diarrhö (Häufigkeit nicht bekannt), Prolaktinerhöhung, Galaktorrhö, Gynäkomastie, Störungen der Regelblutung (nach längerer Anwendung) (Häufigkeit nicht bekannt), Methämoglobinämie (sehr selten)

Kontraindikationen (KI): Phäochromozytom, mechanischer Darmverschluss, Darmdurchbruch u. Blutungen im Magen-Darm-Bereich, prolaktinabhängige Tumore, Epilepsie, extrapyramidal-motorische Störungen, Säuglinge u. Kleinkinder ≤ 2 J.

8.7.4 Metamizol (Novalgin®)

Der Wirkstoff in Novalgin® ist das Metamizol bzw. Novaminsulfon. In der bildgebenden Diagnostik wird Metamizol (Novalgin®) vor allem wegen seiner schmerzstillenden und krampflösenden Wirkung eingesetzt.

Unerwünschte Wirkungen (UEW): Überempfindlichkeitsreaktionen, Übelkeit, Erbrechen, Rotfärbung des Urins, Hautveränderungen, Stimmungsveränderungen, Agranulozytose (Störung der Granulozytenbildung im Knochenmark), Herzrhythmusstörungen, Blutdruckabfall, Nierenfunktionsstörungen, Analgetika-induziertes Asthma-Syndrom

Kontraindikationen (KI): bekannte Unverträglichkeit, Porphyrrie, Glukose-6-Phosphat-Dehydrogenase-Mangel, Störungen der Knochenmarkfunktion/Erkrankungen des hämatopoetischen Systems, akute hepatische Porphyrrie

! Vorsicht ist bei Patienten mit Asthma bronchiale und chronischen Atemwegserkrankungen geboten, da ein akuter Schub ausgelöst werden kann!

8.7.5 Diazepam

Diazepam wird als Benzodiazepin bei akuten Angst-, Erregungs- und Spannungszuständen, aber auch beim Status epilepticus (► Abschn. 8.6.3) eingesetzt.

Unerwünschte Wirkungen (UEW): Diese sind zahlreich, es seien hier daher nur exemplarisch einige wichtige genannt – Muskelschwäche, Müdigkeit, Mundtrockenheit, Magen-Darm-Beschwerden, Blutdruckabfall, Atemdepression

Kontraindikationen (KI): Bekannte Überempfindlichkeit gegen Benzodiazepine, Medikamenten-, Drogen-, Alkoholabhängigkeit, Kinder u. Jugendliche (Ausnahme: Prämedikation vor chirurgischen Eingriffen, Krampfanfälle, Status epilepticus), akutes Engwinkelglaukom

8.7.6 Metoprolol

Metoprolol gehört (wie auch Esmolol, zu den β -Blockern (► Abschn. 8.1.4) und wird während des Kardio-CTs (zur Senkung der Herzfrequenz) eingesetzt.

Unerwünschte Wirkungen (UEW): u. a. allergische Hautreaktionen, Muskelschmerzen, Müdigkeit, Sehstörungen, Dyspnoe, Veränderungen des Blutbilds

Kontraindikationen (KI): Überempfindlichkeit gegenüber anderen Betarezeptorenblockern, Schock, AV-Block II. od. III. Grades, Sinusknotensyndrom (sick sinus syndrome), Sinuatrialer Block, Bradykardie (Ruhepuls < 50 Schläge/Minute vor Behandlungsbeginn), Hypotonie (systolisch < 90 mmHg), Azidose, bronchiale Hyperreagibilität (z. B. bei Asthma bronchiale), Spätstadien peripherer Durchblutungsstörungen, gleichzeitige Gabe von MAO-Hemmstoffen (Ausnahme MAO-B-Hemmstoffe), manifeste Herzinsuffizienz, i. v.-Applikation von Calciumantagonisten vom Verapamil- und Diltiazem-Typ oder anderen Antiarrhythmika (wie Disopyramid) (Ausnahme: Intensivmedizin)

8.7.7 Adenosin

Mit der Stress-MRT des Herzens kann die Durchblutung der Herzmuskulatur in Ruhe und unter Belastung eingeschätzt werden. Dadurch lässt sich bestimmen, ob eine Minderversorgung des Herzmuskels mit Blut vorliegt. Die Belastung des Herzens wird durch die Gabe von Adenosin simuliert, denn Adenosin stellt u. a. die Gefäße weit (wirkt also vasodilatierend) und erhöht so den Blutfluss. Mit dem Adenosin-Stress-MRT lässt sich also die **Durchblutung des Herzens** beurteilen.

Unerwünschte Wirkungen (UEW): Gelegentlich bis häufig: Kopfschmerzen, Schwindel, Brustschmerzen, Gesichtsrötung, ReflEXTachykardie, Übelkeit, Dyspnoe, thorakales Druckgefühl, Parästhesien. Selten: Schwitzen, Herzklopfen, Hypotension, metallischer Geschmack, Hyperventilation, Unruhe, verschwommenes Sehen. Sehr selten: verstärkte Asthmabeschw., massiver Blutdruckabfall, ventrik. Arrhythmien, Vorhofflimmern. Gelegentlich bis häufig: Kopf-, Brust- u. Kieferschmerzen, Schwindel, Gesichtsrötung, AV-Block I-II, ST-Senkung, Übelkeit, Oberbauchschmerzen, Dyspnoe

Kontraindikationen (KI): AV-Block II./III. Grades, Sick-Sinus-Syndrom (ausgenommen b. Pat. mit funktionierendem Herzschrittmacher). QT-Verlängerung, Vorhofflattern oder -flimmern, schwere obstruktive Atemwegserkrankung (Bronchialasthma), erhöhter intrakranieller Druck, Hypovolämie, schwere Hypotonie, instabile Angina pectoris

Antidot bei Überdosierung: Theophyllin

8.7.8 Dobutamin

Das Dobutamin-Stress-MRT erlaubt eine Aussage über die **Funktion des Herzens**. Durch Dobutamin (ein Katecholamin, ► Abschn. 8.1.4) wird die Herzfunktion gesteigert: es wirkt positiv inotrop (die Kontraktionskraft des Herzens erhöhend) und chronotrop (die Schlagfrequenz des Herzens erhöhend).

Unerwünschte Nebenwirkungen (UEW): u. a. Anstieg der Herzfrequenz und des systolischen Blutdrucks, erhöhte Kammerfrequenz bei Pat. mit Vorhofflimmern, vereinzelt Bradykardien mögl. Übelkeit, Kopfschmerz, pektanginöse Beschwerden, unspezifische Brustschmerzen, Herzklopfen oder Kurzatmigkeit, erniedrigter Serumkaliumspiegel; geringfügige Vasokonstrikt., v. a. bei Vorbehdlg. mit β -Blockern; vermehrter Harndrang; Hautausschlag, Fieber, Eosinophilie, Bronchospasmus

Kontraindikationen (KI): Mechan. Behind. der ventrikulären Füllung u./od. des Ausflusses, wie z. B. Perikardtamponade, Perikarditis constrictiva, hypertrophe obstruktive Kardiomyopathie, schwere Aortenstenose; hypovoläm. Zustände; Gabe von MAO-Hemmstoffen. instabiler Angina pectoris; Hauptstammstenose der linken Herzkranzarterie

8.7.9 Piritramid (Dipidolor®)

Dipidolor® (Wirkstoff Piritramid) wird als Opiodanalgetika (► Abschn. 8.1.4) bei starken bis stärksten Schmerzen eingesetzt.

Unerwünschte Wirkungen (UEW): u. a. Stupor, Somnolenz, Würgereiz, Blässe, erhöhte Herzfrequenz, erniedr. Blutdruck, Hyperhidrose, vermind. Atemfrequenz, Anaphylaxie, anaphylakt. Schock, Bewusstlosigkeit, Bradyarrhythm., Zyanose, Atemstillst., respirat. Insuff., Status asthmaticus, Dyspnoe, allerg. Dermatitis, Mundtrockenheit

Kontraindikationen (KI): Komatöse Zustände, Atemdepression

Antidot ist wie bei allen Opioden der Opiod-Anatgonist Naloxon.

8.7.10 Heparin

Heparin hat eine gerinnungshemmende Wirkung, zählt zu den Glykosaminoglykanen (► [Abschn. 8.1.4](#)) und wird in Kombination mit NaCl-Lösungen (z. B. Heparin-Natrium Braun 25.000 I.E. / 5 ml Injektionslösung) in der Angiographie zur Prophylaxe von Thrombosen eingesetzt.

Unerwünschte Wirkungen (UEW): u. a. reversibler Haarausfall (selten), Hautnekrosen (selten), Gewebsreaktionen an der Injektionsstelle (Verhärtungen, Rötungen, Verfärbungen, kleinere Hämatome) (gelegentlich), Pruritus, Urtikaria, Anstieg von Serumtransaminasen (GOT, GPT), γ -GT, LDH, Lipase (häufig, klinisch nicht bedeutsam, reversibel), Gliederschmerzen, Übelkeit, Erbrechen, Blutdruckabfall, anaphylaktischer Schock, Antikörpervermittelte schwere Thrombozytopenie (Typ II), Blutungen

Kontraindikationen (KI): Heparinallergie einsch. allergisch bedingter Thrombozytopenie (Typ II) auf Heparin, akute zerebrale Blutungen, Abortus imminens, Lumbalpunktion, Periduralanästhesie, Spinalanästhesie

Die Heparinwirkung kann durch Gabe von Protamin (bindet an Heparin und bildet einen gerinnungsunwirksamen Komplex) aufgehoben werden.

8.7.11 Furosemid

Bei der Nierenfunktionsszintigraphie werden teilweise auch Schleifendiuretika (► [Abschn. 8.1.4](#)), wie das Furosemid eingesetzt, um die Urinausscheidung zu erhöhen. Unerwünschte Wirkungen (UEW): Exantheme, Wadenkrämpfe, Kopfdruck, Schwindel, Schwäche (diuresebedingt), Sehstörungen (diuresebedingt), Hörstörungen (selten) (v. a. bei zu rascher Injektion, insbes. bei Niereninsuffizienz), Mundtrockenheit (diuresebedingt), gastrointestinale Störungen, Hyperurikämie, Gichtanfälle (bei Disposition), Cholesterin-, Triglyceridanstieg (passager), Verschlechterung einer prädiabetischen od. diabetischen Stoffwechsellage (selten), Vaskulitis, Hypovolämie bedingte Thromboseneigung (insbes. bei Therapiebeginn, v. a. bei älteren Pat.), Verschlechterung der Symptome einer Harnabflussbehinderung, Harnstoff- u. Kreatininanstieg (passager)

Kontraindikationen (KI): Schwere Leberfunktionsstörungen (Präkoma u. Coma hepaticum), schwere Hypokaliämie, Hyponatriämie, Hypovolämie, Überempfindlichkeit gegen Sulfonamide (mögliche Kreuzreaktionen beachten), Niereninsuffizienz mit Anurie (wirkungslos, wenn kein Glomerulusfiltrat mehr produziert wird)

8.7.12 Lidocain

Lidocain ist ein Lokalanästhetikum, genauer ein Natriumkanalblocker (► [Abschn. 8.1.4](#)), dient also der örtlichen Betäubung, und wird z. B. bei der Angiographie angewendet.

Unerwünschte Wirkungen (UEW): Schwindel, Erbrechen, Benommenheit, Krämpfe, Bradykardie, Rhythmusstörungen, Urtikaria, Ödem, Bronchospasmus, Atemnotsyndrom. Die Auslösung einer malignen Hyperthermie ist nicht auszuschließen.

Kontraindikationen (KI): Schwere Überleitungsstörungen, akut dekompensierte Herzinsuffizienz, bekannte Überempfindlichkeit gegen Lokalanästhetika vom Säureamid-Typ

8.8 Rechtslage

T. Hartmann

Stellen Sie sich vor, dass Sie selbst mit Frau Gerdes den Aufklärungsbogen zur Untersuchung durchgegangen sind, die Venenverweilkanüle gelegt und die Kontrastmittelspritze angeschlossen haben. Natürlich haben Sie auch die Untersuchung durchgeführt und den KM-Injektor bedient.

Der Arzt war die ganze Zeit im Nachbarraum und hätte jederzeit kommen können.

So oder so ähnlich ist es in vielen radiologischen Abteilungen Alltag – die Arbeit wird geteilt, damit viele Patienten versorgt werden können.

Ist das rechtlich alles „sauber“?

Die Kontrastmittel applizieren MTRA tagtäglich, oft ohne die Venenverweilkanüle selbst zu legen – aber sie bedienen den Injektor! Gerade im Bereich der Kontrastmittelinjektion kommt es immer wieder zu rechtlichen Grauzonen. Wer darf jetzt eigentlich was?

8.8.1 Kontrastmittelinjektion

Das Oberlandesgericht Dresden (OLG) hat schon vor einigen Jahren entschieden, dass MTRA generell berechtigt sind, unter Aufsicht eines Arztes, schwach radioaktives Technetium intravenös zu verabreichen. Nach Meinung des Gerichtes handelt es sich dabei um eine Tätigkeit, die auf Grund der damit verbundenen Schwierigkeit, Gefährlichkeit oder Unvorhersehbarkeit NICHT zwingend vom Arzt erbracht werden muss. MTRA sind Fachkräfte mit einer entsprechenden Ausbildung, Fachwissen und Fertigkeiten.

Dieses Urteil wurde im Anschluss auf die Gabe von Kontrastmittel und Medikamente übertragen.

Auch die Bundesärztekammer (BÄK) und die Deutsche Röntgengesellschaft (DRG) plädieren für die Übertragung intravenöser Injektionen an nicht-ärztliches Fachpersonal, insbesondere an MTRA unter der Prämisse, dass die MTRA dafür ausgebildet ist, sich der Arzt von ihren Fähigkeiten überzeugt hat und sich, für den Fall einer allergischen Reaktion, in unmittelbarer Nähe befindet.

Grundsätzlich dürfen Sie auch Frau Gerdes das KM verabreichen. Um rechtlich auf der sicheren Seite zu sein, sollten aber ein paar Voraussetzungen geklärt sein:

- Die MTRA muss über die spezifische Qualifikation in der Punktions- und Injektionstechnik verfügen.
- Der direkte Fachvorgesetzte (i. d. R. Radiologe) muss sich von den Fähigkeiten und dem Wissen der MTRA überzeugen und es schriftlich bestätigen.
- Der Arzt muss für jeden einzelnen Patienten eine (Einzel-)Anforderung unter Berücksichtigung des Zustandes des Patienten, des Schweregrads und der Wirkung des Medikaments geben. Bei schwierigen Umständen muss der Arzt selbst tätig werden.
- Die Anordnung hat schriftlich, unter Benennung des Patienten, des Medikaments (inkl. Art, Menge, Zeitpunkt), vom Arzt abgezeichnet zu erfolgen.

! **Die allgemeine Überwachungs- und Beaufsichtigungspflicht des Arztes bleibt jederzeit erhalten.**

Sind die Voraussetzungen erfüllt, können Sie loslegen. Allerdings sollten Sie daran denken, dass die Anforderungsverantwortung beim Arzt, die **Durchführungsverantwortung** aber bei Ihnen liegt. Das bedeutet, dass Sie, im Falle eines Schadens des Patienten, haftbar gemacht werden können, wenn Sie die Tätigkeit nicht ordnungsgemäß durchgeführt haben.

Aus arbeits- und haftungsrechtlicher Sicht sollten Sie auf folgende Aspekte achten:

1. Sie können die **Injektion ablehnen**, wenn Sie sich im Einzelfall der Aufgabe nicht gewachsen fühlen. Daraus dürfen sich keine arbeitsrechtlichen Konsequenzen wegen „Dienstverweigerung“ ergeben.
2. Klären Sie im Vorfeld mit dem Arbeitgeber und einer Versicherung (Berufshaftpflicht) das Vorgehen in einem Haftungsfall. Da Sie durch die Übernahme der Injektion ein erhöhtes Risiko haben, muss sichergestellt sein, dass Sie ausreichend und ohne Kosten **gesetzlich haftpflicht-versichert** sind.

! **Auf Nachfrage des Patienten, ob Sie der Arzt sind, müssen Sie wahrheitsgemäß antworten. Will der Patient dann den Arzt, muss dieser die Injektion durchführen.**

8.8.2 Aufklärung zu medizinischen Untersuchungen und Eingriffen

Obwohl die Aufklärung eine nicht-delegierbare ärztliche Tätigkeit darstellt, kommt es immer wieder vor, dass auch andere Berufsgruppen diese Arbeit übernehmen. Schließlich hat der Patient den Aufklärungsbogen ausgefüllt und keine Fragen mehr gestellt...

Behandlungsvertrag

Geht man zum Arzt und gibt sich damit in ärztliche Behandlung, so kommt ein Behandlungsvertrag zustande. Für diesen benötigt man nicht zwingend die Schriftform, es genügt die Willenserklärung von Patient und Arzt. Bei einer Gemeinschaftspraxis ist die gesamte Praxisgemeinschaft der Vertragspartner.

Der Vertrag beginnt bereits bei der Terminvergabe und damit die Behandlungspflicht des Arztes. Diese umfasst die Anamnese, Untersuchungen incl.

Befunderhebung, das Stellen einer Diagnose und ggf. Einleitung einer Therapie. Lehnt der Arzt die Behandlung ab, kann er sich wegen unterlassener Hilfeleistung strafbar machen.

Darüber hinaus ist der Arzt verpflichtet ärztliche Leistungen persönlich zu erbringen. Dazu gehören insbesondere die Diagnosestellung, das Ergreifen therapeutischer Maßnahmen, die Beratung und Aufklärung.

Aufklärung

Ist eine Aufklärung nicht ordnungsgemäß erfolgt, so haftet der Arzt für alle Schäden, da der ganze Eingriff rechtswidrig wird.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen der **Selbstbestimmungsaufklärung** und der therapeutischen Aufklärung. Die therapeutische Aufklärung „warnt“ lediglich vor gesundheitlichen Folgen, wenn der Patient nicht die therapeutischen Anweisungen befolgt, z. B. nach einer Operation zu früh aufsteht.

Die Selbstbestimmungsaufklärung dient der Gewährleistung des freien Willens des Patienten, sich einem ärztlichen Eingriff zu unterziehen.

■ Aufklärung zur Diagnose

Bei der Diagnoseaufklärung erfährt der Patient seinen Befund und die damit verbundene Prognose. In welchem Umfang das geschieht, liegt im Ermessensspielraum des Arztes. Einerseits soll so aufgeklärt werden, dass eine Überreaktion durch Ängste o. ä. verhindert wird. Auf der anderen Seite muss in vollem Umfang aufgeklärt werden, wenn sich der Patient nur so von der Notwendigkeit einer Therapie überzeugen lässt. Das spielt besonders in der Radioonkologie eine Rolle.

■ Aufklärung zur Therapie

Der Arzt muss die beabsichtigte Behandlung oder einen Eingriff so erklären, dass der Patient sich ein Bild von der Art der Behandlung und der Schwere eines Eingriffs machen kann. Dazu gehören insbesondere Folgen welche die Funktionsfähigkeit oder das Aussehen (z. B. durch Operationsnarben) sowie mögliche Komplikationen betreffen.

Auch über die Folgen einer Nichtbehandlung ist aufzuklären.

■ Aufklärung über Risiken

Die Risikoaufklärung dient der Möglichkeit des Patienten, selbst über die Folgen der Behandlung/Untersuchung bzw. einer Ablehnung zu entscheiden.

Die Aufklärung hat in dem Maß erfolgen, dass der Patient Art, Bedeutung und Tragweite der geplanten Untersuchung verstehen kann. Die Aufklärung muss umso ausführlicher sein, je weniger ein Eingriff medizinisch notwendig ist (z. B. Schönheitsoperationen).

Es muss über das schwerste mögliche Risiko informiert werden. Dazu gehört die Aufklärung über mögliche Nervenirritationen durch eine i. v.-Kontrastmittelgabe ebenso wie der mögliche Exitus durch eine angiografische Intervention.

Über die Auswahl der „richtigen“ Behandlungsmethode muss nicht aufgeklärt werden, allerdings wird empfohlen Patienten ggf. über alternative Behandlungsverfahren incl. deren Vor- und Nachteile zu informieren.

Der Umfang der Aufklärung ist darüber hinaus von der Dringlichkeit eines Eingriffes abhängig. Bei rein diagnostischen Verfahren ohne therapeutischen Wert, muss die Aufklärung umfangreicher stattfinden, als z. B. vor lebensnotwendigen Untersuchungen.

■ Wirtschaftliche Aufklärung

Es ist eine Nebenpflicht des Arztes, auf mögliche finanzielle Aspekte der geplanten Untersuchung hinzuweisen. Das gilt besonders dann, wenn die Frage der Kostenerstattung durch die Krankenkasse nicht geklärt ist oder Sonderleistungen angeboten werden, welche die Krankenkassen nicht übernehmen.

■ Zeitpunkt und Ort der Aufklärung

Nach der erfolgten Aufklärung muss der Patient genügend Zeit haben, um seine Entscheidung zu treffen und von seinem Selbstbestimmungsrecht Gebrauch zu machen.

Insbesondere vor einer Intervention muss die Aufklärung am **Tag vor der Untersuchung** stattfinden. Das gilt tendenziell auch für Kontrastmitteluntersuchungen. Allerdings geht man dabei von normalen diagnostischen Eingriffen aus und eine Aufklärung am Untersuchungstag ist ausreichend. Allerdings ist besonders bei der erstmaligen KM-

Gabe auf eine umfassende Aufklärung zu achten. Sie sollte in einem solchen Fall nicht im Untersuchungsraum stattfinden, da dadurch „Zeitdruck“ vermittelt werden kann.

➤ **Die Aufklärung ist unwirksam, wenn sie auf dem Untersuchungstisch stattfindet.**

❗ **Als MTRA kann man mit dem Patienten im Vorfeld den Aufklärungsbogen durchgehen, das ersetzt aber in keinem Fall das Arztgespräch.**

Die Dokumentationspflicht über die erfolgte, individuelle Aufklärung liegt beim Arzt. Laut Patientenrechtegesetz muss dem Patienten eine Kopie des Aufklärungsbogens zum Verbleib mitgegeben werden.

■ Adressat der Aufklärung

Ein **Erwachsener** ist persönlich und mündlich aufzuklären. Im Anschluss muss der Patient schriftlich sein Einverständnis zu einer (KM-) Untersuchung erklären.

Bei **Minderjährigen** ist von der Schwere eines Eingriffes abhängig ob beide Elternteile ein schriftliches Einverständnis geben müssen oder (bei Routineuntersuchungen) die Unterschrift eines Erziehungsberechtigten genügt.

Bei **fremdsprachigen Personen** hat sich der aufklärende Arzt zu versichern, dass der Patient die Inhalte der Aufklärung vollumfänglich versteht. Bestehen dahingehend Zweifel, so ist ein Dolmetscher hinzuzuziehen.

Bei bewusstlosen bzw. **nicht einwilligungsfähigen Patienten** sollte wenn möglich gewartet werden, bis der Patient wieder ansprechbar und aufnahmefähig ist. Kann man, z. B. aufgrund einer akuten Lebensbedrohung nicht warten, so ist vom „mutmaßlichen Willen“ auszugehen und die Untersuchung kann durchgeführt werden.

Bei Patienten mit **psychischen Erkrankungen oder einer geistigen Behinderung** obliegt es dem Arzt zu entscheiden, ob der Patient in der Lage ist die Inhalte der Aufklärung zu verstehen. Im Zweifelsfall kann ein bestellter Betreuer (auch telefonisch) die Einwilligung geben. Bei schweren

Eingriffen muss zusätzlich die Zustimmung eines Vormundschaftsgerichtes eingeholt werden.

In Kürze

- In der Pharmakologie sind der Ort und der Mechanismus der Wirkung entscheidend. Wichtige Begriffe sind ferner die Indikation, (relative und absolute) Kontraindikation sowie Nebenwirkungen.
- Kontrastmittel werden häufig in der Radiologie angewendet. Ihre Unterteilung erfolgt zunächst nach KM mit geringerer Dichte als die darzustellende Umgebung (negativ) und solchen mit höherer Dichte als die darzustellende Umgebung (positiv). Weitere Unterscheidungskriterien sind wasserlöslich/unlöslich, ionisch/nichtionisch, monomer/dimer.
- Bei einem Kontrastmittelzwischenfall oder anderen Notfällen, wie z. B. Krampfanfällen ist es wichtig, die grundlegenden Notfallmedikamente zu kennen.
- Die intravenöse Kontrastmittelgabe kann unter bestimmten Voraussetzungen an MTRA delegiert werden.
- Die Aufklärung gehört zu den nicht-delegierbaren ärztlichen Tätigkeiten. Das Ausfüllen eines Aufklärungsbogens ersetzt nicht das Arztgespräch.

Literatur

- Bae KT et al (2008) Aortic and Hepatic Contrast Enhancement with Abdominal 64-MDCT in Pediatric Patients: Effect of Body Weight and Iodine Dose. *AJR* 191:1589–1594
- Becht S et al (2008) Lehrbuch der röntgendiagnostischen Einstellungstechnik, 6. Aufl. Springer Medizin Verlag, Heidelberg <http://online.rote-liste.de>
- (2000) Mitteilungen. Arzneimittelkommission der deutschen Ärzteschaft. BfArM ordnet Widerruf von ionischen Röntgenkontrastmitteln (Amidotrizoesäure, Iotalaminsäure) zur intravasalen Anwendung an. *Deutsches Ärzteblatt* 97(33):18
- Müller-Rawlins E (2009) Darf eine MTRA eine Kontrastmittelinjektion vornehmen? MTA-Dialog (online 23.4.14)
- Plumhans C, Mahnken AH, Schoth F, Günther RW, Behrendt FF (2010) Intraindividueller Vergleich einer Kontrastmit-

telinjektion via Hochdruckport-System und peripheren Venenzugang zur Durchführung einer kontrastangehobenen Spiral-CT. Fortschr Röntgenstr (182 - VO404_6) doi:10.1055/s-0030-1252878

Rendl J, Saller B (2001) Schilddrüse und Röntgenkontrastmittel: Pathophysiologie, Häufigkeit und Prophylaxe der jodinduzierten Hyperthyreose. Dtsch Arztebl 98(7): (A-402/B-339/C-316)

Seminarunterlagen „Das Abenteuer ComputerTomographie“
by Alex Riemer

Ziegenfuß T (2011) Notfallmedizin, 5. Aufl. Springer Medizin Verlag, Heidelberg

Vosshenrich R, Kühn S, Reimer P (2013) Aufklärung in der Radiologie. Radiologie up2date 2013(2)

www.awmf.org/leitlinien/aktuelle-leitlinien.html

www.dg-pharmakologie.de/

Strahlentherapie

D. Dohr, C. Marks, J. Thiele

- 9.1 Historische Entwicklung – 223**
 - 9.1.1 Die „Neue Art von Strahlen“ und deren Nebenwirkung – 223
 - 9.1.2 Die Entdeckung der Radioaktivität – 224
 - 9.1.3 Die Telekobalttherapie – 224
 - 9.1.4 Der Linearbeschleuniger – 224
 - 9.1.5 Die Geschichte der Bestrahlungsplanung – 225
- 9.2 MTRA in der Strahlentherapie mit speziellem Strahlenschutz – 225**
 - 9.2.1 Aufgaben der MTRA in der Strahlentherapie – 225
 - 9.2.2 Strahlenschutz in der Strahlentherapie – 227
- 9.3 Aufbau und Funktion radioonkologischer Bestrahlungsgeräte – 230**
 - 9.3.1 Linearbeschleuniger – 230
 - 9.3.2 Dosisverteilung im Gewebe – 234
 - 9.3.3 Dosisverteilung im Bestrahlungsplan – 236
 - 9.3.4 Bestrahlungstechniken – 237
 - 9.3.5 Linearbeschleuniger speziellen Bautyps – 240
 - 9.3.6 Röntgentherapiegeräte – 241
 - 9.3.7 Brachytherapie – 242
 - 9.3.8 Partikeltherapie – 243
- 9.4 Tumorpathologie – 247**
 - 9.4.1 Ursprung und Wachstum der Krebszelle – 247
 - 9.4.2 Histo-pathologische Begutachtung – 249
 - 9.4.3 Krebsentstehung – 250
 - 9.4.4 Tumorklassifikationen – 251
 - 9.4.5 Zellreaktionen bei Strahleneinwirkung – 253
 - 9.4.6 Wirkung der Bestrahlung auf Krebszellen – 254
 - 9.4.7 Das linearquadratische Modell zur Beschreibung der Zell-Schädigung bzw. Zell-Erholung nach Bestrahlung – 256
 - 9.4.8 Wirkung der Bestrahlung auf gesunde Zellen – 257

9.5 Möglichkeiten und Prinzipien der Radioonkologie – 258

9.5.1 Therapiekonzepte in der Radioonkologie – 258

9.5.2 Fraktionierungskonzepte – 260

9.6 Bestrahlungsplanung – 261

9.6.1 Diagnose und Vorstellung im Tumorboard – 261

9.6.2 Information des Patienten, Einschätzung
der Durchführbarkeit, spezielle Vorbereitungen – 261

9.6.3 Bestrahlungsverordnung – 262

9.6.4 Lagerung des Patienten und Planungs-CT – 262

9.6.5 3D-CT-Planung – 263

9.6.6 Weiterverarbeitung des CT: Fusion und Konturierung – 264

9.6.7 Erstellen des Bestrahlungsplanes – 265

9.6.8 Beurteilung und Freigabe des Bestrahlungsplanes – 265

9.6.9 Erste Bestrahlung mit Verifikation – 266

9.7 Der Patient in der Radioonkologie – 267

9.7.1 Information der Patienten – 267

9.7.2 Psychoonkologische Betreuung – 268

9.7.3 Einschränkungen während der Bestrahlung – 269

9.7.4 Ängste des Patienten – 271

9.7.5 Maßnahmen zur Vermeidung/Behandlung
radiogener Nebenwirkungen – 272

9.8 Allgemeine Qualitätskriterien nach Leitlinien – 274

9.8.1 Richtlinien, Leitlinien und Empfehlungen – 274

9.8.2 Evidenzbasierte Medizin (EBM) – 275

9.8.3 Standard Operating Procedure (SOP) – 275

Literatur – 277

Am Freitagnachmittag erhält der diensthabende Strahlentherapeut eine Konsilanforderung über eine 65jährige Patientin, die kurz zuvor in die Notaufnahme eingeliefert wurde. Sie hat seit mehreren Tagen „Pudding“ in beiden Beinen, d.h. die Beine sind gefühllos und versagen ihr. Inzwischen kann sie aus eigener Kraft weder stehen noch laufen. Der Strahlentherapeut entnimmt der digitalen Krankenakte der Patientin, dass sie bereits vor 8 Jahren, nach Diagnose eines Mammakarzinoms, an der rechten Brust bestrahlt worden ist. Eine aktuelle Bildgebung (Ganzkörper-CT) zur Ausbreitungsdiagnostik wurde bereits von den Ärzten der Notaufnahme veranlasst und zeigt eine Raumforderung in der Lendenwirbelsäule, die den Wirbelkanal sichtbar einengt und bereits in mehrere Wirbelkörper eingewachsen ist.

- ?
1. Was könnten die neurologischen Ausfälle der Patientin ausgelöst haben?
 2. Welche Behandlungsoptionen werden die Ärzte anhand des radiologischen und neurologischen Befundes in Erwägung ziehen?
 3. Welche Fraktionierungsschemata könnte der Strahlentherapeut verordnen?
 4. Wie wird die notfallmäßige Bestrahlung der betroffenen Bereiche in der Wirbelsäule geplant?
 5. Welche Wirkung hat die Bestrahlung auf die Raumforderung in der Wirbelsäule?
 6. Welche Rolle spielen die MTRA im Falle einer notfallmäßigen Bestrahlung? Was sind ihre Aufgabenbereiche?

9.1 Historische Entwicklung

J. Thiele

Die Strahlentherapie hat von dem technischen Fortschritt der letzten 30 Jahre und von den Ergebnissen klinischer Studien auf hohem Niveau sehr profitiert. Durch die Nutzung des CT, MRT und PET in der Bestrahlungsplanung kann die Tumorvernichtung gezielter erfolgen und das gesunde Gewebe noch besser geschont werden. Die Nebenwirkungen und Rezidivraten haben sich erheblich reduziert. Durch den enormen technischen Wandel konnten neue Bestrahlungs-

konzepte und Techniken, wie z. B. die Intensitätsmodulierte Radiotherapie (IMRT), Tomotherapie oder Stereotaxie, entwickelt und in den klinischen Alltag implementiert werden. Es war ein langer Weg mit vielen innovativen Ideen, die die Behandlung von Tumorerkrankungen ermöglichten und verbesserten.

9.1.1 Die „Neue Art von Strahlen“ und deren Nebenwirkung

Schon 1896 wurden die ersten Röntgenapparate gebaut und in Betrieb genommen. Sehr schnell merkte man, dass die Röntgenstrahlen erfolgreich bei Tumoren und Gelenksbeschwerden angewandt werden können. Allerdings fehlten die Erfahrungen im Umgang mit der neuen Technologie, vor allem Ärzte und das Assistenzpersonal erlitten Hautentzündungen, weil sie aus Unwissenheit ihre Hände im Strahlengang hielten.

Später folgte die Erkenntnis, dass diese Röntgenstrahlen Sterilität und Krebs verursachen können, zudem wurden Veränderungen im Blut und in den blutbildenden Organen beobachtet. Erst Mitte der 1920er Jahre des letzten Jahrhunderts wurde der Einfluss der Röntgenstrahlen auf das Erbgut und die genetischen Veränderungen von dem amerikanischen Genetiker Herman J. Muller (1890–1967) beschrieben.

■ Die konventionelle Röntgentherapie

Die guten Ergebnisse in der Tumorbehandlung mittels Röntgenstrahlen inspirierten zur Weiterentwicklung der Röntgenröhre. Die Strahlung sollte aufgehärtet werden, dies gelang Georg Perthes (1905) mithilfe von Aluminiumfiltern. Später wurde mit der Konstruktion aus Glühkathode und Antikathode aus Wolfram eine größere, gleichmäßigere und reproduzierbare Strahlenausbeute erreicht. Mitte der 1920er wurden erstmals mit einem definierten Fokus-Haut-Abstand (20 cm) und dem Einsatz von Aluminium- oder 0,5 mm Kupferfilter erste Mehrfeldtechniken am Becken angewendet (Gauss 1956). Diese Form der Applikation brachte einen besseren Strahlenschutz und eine höhere Sicherheit – sowohl für den Patienten als auch für den Anwender.

9.1.2 Die Entdeckung der Radioaktivität

Ein weiterer Meilenstein war die Entdeckung der natürlichen Radioaktivität durch Henri Becquerel 1896 und 1898 durch Marie Curie anhand von Uran und später Radium. Man erkannte, dass der Gammastrahlenanteil des Radiums tiefer in das Gewebe eindringt als Röntgenstrahlung. Nun konnte therapiert werden, indem man für kurze Zeit das radioaktive Material sehr nahe an den Tumor brachte. Anfang des letzten Jahrhunderts kam das Radium-226 vorzugsweise in der Gynäkologie zur Anwendung. So wurde beispielsweise 1949 eine „Kleinraumbestrahlung“ (nah = griechisch: Brachy) zur Behandlung von gynäkologischen Tumoren mit Radium-226 an der Universität Göttingen vorgestellt. Sie gilt als Vorläufer des heutigen Afterloading. Hier wurde das Radium gelagert in Applikatoren in die Körperhöhle gebracht, ebenfalls konnten der radioaktive Stoff in Moulagen (► Abschn. 9.3) eingebettet und auf die Körperoberfläche gelegt werden. Durch die Angaben der Lieferanten zur Aktivität konnte die Dosisierung in „mg-Element-Stunden“ mit der Liegezeit in Stunden berechnet werden. Das Radium wurde in den 1960er Jahren durch andere Nuklide ersetzt, da sich aufgrund seines Zerfalls in Radon-222 große Nachteile für den Strahlenschutz der Patienten und des Personals ergaben. In Deutschland setzte sich das Radionuklid Iridium-192 durch. Das Bestrahlungsgerät befindet sich nun im Bestrahlungsraum und die Steuereinheit in einem Schaltraum außerhalb des Bestrahlungsraumes.

Um Tumore auch in tieferen, nicht direkt zugänglichen Regionen schonend zu behandeln, wurde nach weiteren Möglichkeiten der Strahlenapplikation gesucht. Die Lösung hierfür fand sich in der Entwicklung und Einführung der Teletherapie Anfang der 1950er Jahre.

9.1.3 Die Telekobalttherapie

Ab Mitte der 1950er Jahre kam das Kobaltgerät als Teletherapie zum Einsatz. Die ersten Anwendungen gab es in Kanada. Nun war es möglich, mit dem radioaktiven Kobalt-60 tiefliegende Tumore mit



■ Abb. 9.1 Kobalt-Kanone. (► <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-42621051.html> „Kobalt-Kanone“ 51/1958)

ausreichender Dosis und guten Dosisverteilungen zu bestrahlen. Telekobaltgeräte gelten als unkompliziert und nahezu störungsfrei. Nachteilig ist jedoch die Halbschattenzone, zwischen bestrahltem und nicht bestrahltem Gebiet, da die Quelle eine größere Ausdehnung als der Fokus eines Röntgenerätes hat. Durch den flachen Halbschatten wurde unter Umständen mehr Dosis im gesunden Gewebe appliziert. Zudem stellen auch die niedrige Dosisleistung und die Notwendigkeit eines Quellenwechsels alle 3–5 Jahre einen Nachteil dar (zum Beispiel einer Kobaltkanone s. ■ Abb. 9.1).

9.1.4 Der Linearbeschleuniger

Der Linearbeschleuniger (engl. linear accelerator, kurz: Linac) löste in den 1970er Jahren das ebenfalls weit verbreitete Hochvoltgerät Betatron ab. Das Betatron, ein Kreisbeschleuniger, brachte wenig biologische Vorteile und war aufgrund der Größe des Bestrahlungsgerätes und Handhabung eher nachteilig für die Behandlung von Tumorpatienten.

Die Idee von der Entwicklung des Linearbeschleunigers gab es schon Mitte der 1920er Jahre, amerikanischen Wissenschaftlern gelang es mit einer relativ geringen Wechselspannung, Teilchen zu beschleunigen. Erst Mitte der 1940er Jahre wurden in Amerika größere Wanderwellenbeschleuniger entwickelt. Die Linearbeschleuniger gelten als technisch stabil und können sowohl mit Photonen als auch mit Elektronen bestrahlen.

Heute ist der Linac das wichtigste Therapiegerät in der Strahlentherapie. Aus einem Injektor werden Elektronen in einem hochfrequenten elektrischen Feld beschleunigt. Diese Elektronen können direkt verwendet oder durch ein Target abgebremst werden, wodurch ultraharte Röntgenstrahlung (Photonen) entsteht (► Abschn. 9.3).

Bedeutend für die Arbeit am Linac ist die Entwicklung des Multileaf-Kollimators (MLC). Dieser löste Mitte der 1990er Jahre die feldspezifische und individuell gegossene Blende als Feldformung ab. Die Weiterentwicklung des MLC durch Bewegung während der Bestrahlung (► Abschn. 9.3), ist seit Mitte des letzten Jahrzehntes Basis für die Einführung der intensitäts-modulierten Radiotherapie (IMRT, ► Abschn. 9.3) oder der Applikation klein-volumiger stereotaktischen Bestrahlungsfelder via Mikro-MLC. Dieser enorme technische Fortschritt ermöglicht uns heute eine hochpräzise, für das gesunde Gewebe weitgehend schonende Strahlentherapie und ist Standard in jeder Strahlenklinik.

■ Moderne Bildgebung

Mit der Entwicklung elektronischer Bildgebungssysteme (electronic portal imaging device: EPID) Anfang der 1990er Jahre, wurden der Portfilm als Felddokumentation schrittweise abgelöst und durch Flachbilddetektoren, die am Linac eingebaut sind, ersetzt.

Image Guided Radiotherapy (IGRT) oder bildgeführte Strahlentherapie gewinnt immer mehr an Bedeutung in der Strahlentherapie. Moderne Verifikationssysteme ermöglichen die Positionsbestimmung des Zielvolumens mithilfe von 2D- und 3D Techniken. In vielen Kliniken ist die CT-gestützte Strahlentherapie und der Einsatz von Goldmarkern (z. B. Prostata) für eine präzise Lokalisation des Bestrahlungsgebietes ebenfalls Standard.

Die Anwender können von der Einführung komplexer onkologischer Informationssysteme der führenden Hersteller profitieren. Anfänglich wurden die Bestrahlungsdaten per Hand aufgeschrieben, später dann durch Magnetkarten ersetzt. Heute werden diese Daten größtenteils im onkologischen Informationssystem gespeichert und zusätzlich auf Papier (Einzeldosis, Einverständnis und Verordnung) dokumentiert. Der Trend geht allerdings zur papierlosen digitalen Patientenakte.

9.1.5 Die Geschichte der Bestrahlungsplanung

Die Einführung der Mehrfelder-Bestrahlungstechniken und die gewonnenen Erkenntnisse zur Strahlen-

biologie in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts veranlasste die Anwender, Konzepte zur Fraktionierung und Dosisverteilung auszuarbeiten und in die Röntgentherapie zu implementieren. Mit der Gründung der ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurement) im Jahr 1925, wurden erstmals internationale Einheiten zur Messung der Strahlung am Menschen festgelegt. Heute werden die Empfehlungen des ICRU Komitees international angewandt und regelmäßig aktualisiert.

Die Planung der Bestrahlung erfolgte ab Mitte der 1930er Jahre zweidimensional, Herr Hans Holfelder (1891–1944) veröffentlichte in diesen Jahren seine Idee zur Dosisverteilung. Die von ihm konstruierten Felder wurden mit durchsichtigen Schablonen aufgezeichnet, damit konnten Tiefendosiskurven (► Abschn. 9.3) auf einen errechneten Körperdurchschnitt aufgelegt und berechnet werden.

Die zweidimensionale Therapieplanung wurde in den 1980er Jahren durch die Einführung der Computertomographie in der Strahlentherapie durch eine dreidimensionale Planung schrittweise ersetzt. Die Bilddaten und virtuellen Dichtewerte des Gewebes (Hounsfield Unit kurz: HU) im Planungs-CT bilden heute die Basis für eine individuelle Therapieplanung (► Abschn. 9.6). Spezielle Planungsprogramme ermöglichen, unter Berücksichtigung der spezifischen Anatomie, die Erstellung eines virtuellen Bestrahlungsplanes. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Ärzten, Medizinphysikexperten, MTRA, Pflegepersonal und Informatikern dient seit vielen Jahren als Basis für eine sehr gute Qualität der Behandlung von Tumorpatienten.

9.2 MTRA in der Strahlentherapie mit speziellem Strahlenschutz

C. Marks

9.2.1 Aufgaben der MTRA in der Strahlentherapie

Während der Strahlentherapie haben die MTRA den engsten Patientenkontakt und sind über mehrere Wochen für die Patienten direkter Ansprechpartner und Bezugsperson.

Zu den wichtigsten Aufgaben gehören:

- Bestrahlungsplanung
- Durchführung der Bestrahlung
- Patientenbetreuung (vor, während und nach der täglichen Bestrahlung)
- Organisationsaufgaben

Bestrahlungsplanung

Die Tätigkeiten der MTRA in der Bestrahlungsplanung können unterschiedliche Arbeitsbereiche umfassen. Dieser Arbeitsplatz setzt einige Erfahrung als MTRA in der Strahlentherapie voraus: bezüglich der optimalen Lagerung, zusätzlichen Hilfsmitteln etc. Es werden die ersten Termine für die CT-Planung und die Ersteinstellung vereinbart, im CT werden in enger Zusammenarbeit mit den Ärzten individuelle Lagerungshilfen angefertigt und Schnittbilder erstellt.

- **Detaillierte Informationen finden Sie in diesem Buch im ► Abschn. 9.6 „Bestrahlungsplanung“ und in „Strahlentherapie und Onkologie“ (Sauer 2003).**

Durchführung der Bestrahlung

Die Durchführung der täglichen Bestrahlung ist der Hauptaufgabenbereich der MTRA in der Strahlentherapie.

Vor der Ersteinstellung

Die Patientenakte wird auf Vollständigkeit überprüft: Einverständnis und Bestrahlungsverordnung müssen unterschrieben sein. Die MTRA macht sich mit der Patientenakte, eventuellen Besonderheiten (wie z. B. bekannte Klaustrophobie des Patienten, zusätzliche Hilfsmittel für die Lagerung) und dem Bestrahlungsplan vertraut, u. a. mit der Bestrahlungstechnik, der Anzahl der Felder und der Lagerung des Patienten. Die Lagerung mit sämtlichen Lagerungsmitteln, wie angefertigte Bestrahlungsmasken oder Lagerungskissen, wird vorbereitet.

Die MTRA vergewissert sich vor Beginn der Behandlung über die korrekte Identität des Patienten und erläutert den weiteren Ablauf der ersten Bestrahlung. Der Patient wird auf dem Bestrahlungstisch gelagert und auf das Isozentrum (► Abschn. 9.3.5) eingestellt.

Alle weiteren Schritte sind unter ► Abschn. 9.6.9 „Erste Bestrahlung“ ausführlich erläutert.

Tägliche Bestrahlung

Der Patient kommt i. d. R. über einen Zeitraum von mehreren Wochen an den Werktagen zur Bestrahlung. In dieser Zeit lernt man als MTRA den Patienten näher kennen. Die Identitätsprüfung zu Beginn einer jeden Behandlung stellt somit künftig kein Problem dar.

Ist einem der Patient unbekannt, ist die Identitätsprüfung nach dem Aufrufen des Patienten im Wartebereich die erste und wichtigste Handlung: Steht der richtige Patient bereit und wurde der richtige Bestrahlungsplan (richtiges Isozentrum) am Computer aufgerufen?

- **Eine mögliche Verwechslung des Patienten und die Bestrahlung der falschen Bestrahlungsfelder muss unter allen Umständen ausgeschlossen werden. Vergewissern Sie sich selbst vor Beginn der Bestrahlung, ob alles korrekt eingestellt wurde. Auch wenn Sie im Stress sind, rechtfertigt das eine unachtsame oder nachlässige Arbeitsweise nicht!**

Die Lagerung des Patienten erfolgt wie bei der Ersteinstellung. Falls nötig, können vorab Verifikationsaufnahmen angefertigt und die Lagerung korrigiert werden (► Abschn. 9.6.9). Bei korrekter Position des Patienten wird die Bestrahlung durchgeführt. Der Patient wird dabei die ganze Zeit über Videokameras überwacht, um im Notfall (z. B. Unruhe des Patienten bei starken Schmerzen, plötzlicher Luftnot, Wadenkrampf, Hustenanfall) die Behandlung sofort unterbrechen zu können.

Patientenbetreuung

Neben der erforderlichen technischen Begabung zur MTRA, benötigen wir in unserem Beruf ebenso ein hohes Einfühlungsvermögen. Die Patienten kommen anfangs angespannt zur Bestrahlung. Sie haben viele Fragen und Sorgen und sind froh und dankbar für ein „offenes Ohr“. Dabei erwarten sie i. d. R. keine Musterantwort auf ihr Anliegen, sondern sind einfach nur dankbar, jemanden zum Reden zu haben.

Die tägliche Routine erleichtert es dem Patienten, ihre Anspannung und die Angst vor der Be-

handlung im Lauf der Therapie zu verlieren. Manche Patienten mit Schmerzen oder Behinderungen, benötigen eventuell Hilfe beim An- und Ausziehen oder beim Positionieren. Patienten, die zu Klaustrophobie neigen, benötigen Ihre Fürsprache, auch während des Bestrahlungsvorgangs.

Viele MTRA, aber auch Auszubildende, tun sich schwer im Umgang mit krebserkrankten Menschen und wissen oft nicht, wie sie sich ihnen gegenüber verhalten sollen. Sie haben Angst etwas Falsches zu sagen oder sich falsch zu verhalten. Man weiß, dass sie krank sind und möchte sie nicht noch durch ein Gespräch darauf hinweisen. Aber man muss ja nicht über die Erkrankung selber reden, viele Patienten wollen das auch gar nicht. Oft ergeben sich Gespräche mit dem Patienten von ganz alleine, bei der täglichen Begegnung, beim Lagern und Einstellen. Im Laufe der Zeit, wenn man schon viele Patienten behandelt hat, merkt man recht schnell mit welchem Patienten man es zu tun hat. Ist er ängstlich und verschlossen und möchte durch ein Gespräch eher abgelenkt werden? Ist er offen und neugierig und fragt Sie regelrecht über alles Mögliche aus? Oder ist er umgänglich und macht auch mal einen Scherz?

- **Haben Sie keine Bedenken, wenn ein Patient Sie in ein längeres Gespräch verwickelt und schon der Nächste wartet. Hin und wieder sollte man sich auch im eng terminierten Arbeitsablauf die Zeit nehmen, mit einem Patienten zu sprechen, vor allem wenn dieser einen Rat braucht. Durch die zunehmende Anzahl an Patienten pro Tag, die bestrahlt werden müssen, gleicht die tägliche Arbeit oft einer „Fließbandarbeit“ – wir haben es aber in erster Linie mit Menschen zu tun und einen sozialen Beruf ergriffen!**

Organisation

Eine anspruchsvolle Aufgabe ist das Zeitmanagement am Bestrahlungsgerät. Sämtliche Termine aller Patienten müssen aufeinander abgestimmt und nach Möglichkeit auch ihre „Wunschzeiten“ berücksichtigt werden. Darüber hinaus haben viele Patienten weitere Behandlungstermine, die sie wahrnehmen müssen. Diese können in anderen Praxen oder Kliniken stattfinden, aber auch in der

Abteilung selber, wie Hyperthermie oder Chemotherapie. Für den Handlungsablauf am Gerät ist es aus Zeit- und Praktikabilitätsgründen am günstigsten, Behandlungen mit identischer Lagerung (z. B. Mamma-Board) in kontinuierlicher Reihenfolge durchzuführen. Das alles miteinander in Einklang zu bringen, erfordert Vorausschau und Organisationstalent.

Während der wöchentlichen Qualitätskontrollen und der jährlichen Wartungsarbeiten kann das Bestrahlungsgerät für den Patientenbetrieb vorübergehend nicht benutzt werden. Dann ist es erforderlich, dass die Bestrahlungen an anderen Geräten fortgesetzt werden. Davon sind nicht nur die Termine der Patienten betroffen, meist bedeutet das auch für die MTRA eine Umorganisation der Arbeitszeiten. Manchmal ist eine Bestrahlungspause wegen der Geräteüberprüfung nicht zu verhindern. Der Arzt wird in diesem Fall entscheiden, wie der Ausfall der Therapie kompensiert wird (► [Abschn. 9.5](#), Hyperfraktionierung).

Tritt ein unerwartetes technisches Problem im laufenden Betrieb auf, kann es einige Zeit dauern, bis die Störung behoben werden kann. Häufig reagieren Patienten bei längeren Wartezeiten ungehalten und fragen sich, was los ist. Informieren Sie darum umgehend die Patienten im Wartebereich. Die Patienten werden Ihnen für die rasche Mitteilung dankbar sein. Sie fühlen sich dadurch eingebunden und haben eher Verständnis, länger warten zu müssen.

- **Informationen über die Radioonkologie und aktuelle Fortbildungsangebote und Stellenangebote für MTRA in der Strahlentherapie auf der Internetseite der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie e.V. unter ► www.degro.de**

9.2.2 Strahlenschutz in der Strahlentherapie

Vorschriften

Die Vorschriften für den Aufbau und die Arbeit in einer strahlentherapeutischen Einrichtung sind in der **Strahlenschutzverordnung (StrSchV)** geregelt.

Die MTRA, die Radioonkologen und auch die MPEs (Medizinphysikexperten) müssen nach § 30 StrSchV für den Umgang mit ionisierender Strahlung über die entsprechende Fachkunde ver-

fügen und diese mindestens alle 5 Jahre erneuern bzw. aktualisieren. Zusätzlich muss jährlich an einer Strahlenschutzunterweisung teilgenommen werden.

Strahlenschutz für den Patienten

Für die Bestrahlung eines Patienten mit ionisierender Strahlung muss durch eine **rechtfertigende Indikation** von einem fachkundigen Arzt gestellt werden. Er ist dazu verpflichtet abzuwägen, ob alternative Behandlungsmethoden ein gleiches oder sogar besseres Ergebnis liefern würden.

Bleischürzen oder andere in der diagnostischen Radiologie verwendeten Strahlenschutzmaßnahmen finden in der Strahlentherapie keine Verwendung. Die hochenergetische Strahlung erzeugt beim Auftreffen auf das Material, durch den Comptoneffekt, zusätzliche Streustrahlung in Form von Photonen und Elektronen.

Der Radioonkologe erstellt zusammen mit dem MPE einen individuellen Bestrahlungsplan. Dabei wird darauf geachtet, eine ausreichend hohe und homogene Dosis am Tumor zu erzielen, das gesunde Gewebe dabei aber möglichst wenig zu belasten, um die Nebenwirkungen der Radiotherapie auf ein Minimum zu reduzieren.

Die individuell angepasste Lagerung kann ebenfalls zum Strahlenschutz beitragen. Die Bauchlage auf dem Lochbrett, in dessen Aussparung der Bauch bzw. die Dünndarmschlingen gelagert werden, kann bei Beckenbestrahlungen zur Vermeidung von Durchfall und Bauchkrämpfen beitragen. Hodenkapseln schützen die Gonaden und erhalten die männliche Zeugungsfähigkeit.

Feldkontrollaufnahmen dienen einerseits zur Überprüfung der Lagerung und Gewährleistung der präzisen Radiotherapie, stellen aber auch eine zusätzliche Strahlenbelastung dar und sollten nur im Bedarfsfall täglich durchgeführt werden.

Bei der Lagerungskontrolle mithilfe des Cone-Beam-CT (X-Ray Volume Imaging Device, ► Abschn. 9.3.2) können nicht nur Knochenstrukturen, sondern auch Organe wie die Prostata oder die Blase sichtbar gemacht werden, aber auch Risikostrukturen wie das Myelon. Dadurch ist die Lagerungskorrektur noch genauer, allerdings ist die Strahlenbelastung für den Patienten nicht zu vernachlässigen. Für ein CT als Feldkontrolle im Be-

ckenbereich kann sich eine zusätzliche Dosis von bis zu 30 mGy, bei Kopf-/Hals-CTs zwischen 0,6 und 1,2 mGy pro Untersuchung ergeben.

Strahlenschutzbereiche in der Strahlentherapie

Die in § 36 StrSchV festgelegten Strahlenschutzbereiche sind für die Strahlentherapie wie folgt geregelt:

Überwachungsbereich

Im Überwachungsbereich innerhalb der Strahlentherapieabteilung können Personen eine effektive Dosis (= Körperdosis) von > 1 mSv/a oder eine Organdosis von > 15 mSv auf die Augenlinsen oder von > 50 mSv auf die Haut oder die Extremitäten erhalten.

Hierzu gehören der Wartebereich, die Flure der Abteilung und die Bereiche um die Beschleunigerbunker.

Zugang haben nach § 37 StrSchV nur Personal, das dort beschäftigt ist, Patienten und deren Angehörige oder Besucher und Auszubildende oder Studenten.

Kontrollbereich

Im Kontrollbereich können Personen eine effektive Dosis (= Körperdosis) von > 6 mSv/a oder eine Organdosis von > 45 mSv auf die Augenlinsen oder von > 150 mSv auf die Haut oder die Extremitäten erhalten.

Dazu gehört der Beschleunigerbunker, da sich hier bei hohen Strahlungsenergien zusätzlich Radioaktivität entwickeln kann. Ab 8 MeV können Materialien (Luft, Bunkerwände, Teile des Linearbeschleunigers) Neutronen einfangen und selbst strahlen (aber mit geringer Halbwertszeit). Auch der Bestrahlungsraum für die Brachytherapie gehört zum Kontrollbereich, sofern die Strahlenquelle nicht ausgefahren ist.

Dieser Bereich muss durch ein Warnschild mit der Aufschrift „KONTROLLBEREICH“ deutlich gekennzeichnet werden. Er darf nur von dort arbeitendem Personal betreten werden oder als Patient, Angehöriger oder als helfende Person. Auszubildende oder Studenten dürfen sich dort nur aufhalten, wenn es für die Ausbildung zwingend nötig ist. Hier ist von jeder Person, außer dem

Patienten, zur Überwachung der Körperdosis ein Personendosimeter zu tragen. Zusätzlich müssen diese Personen, wie das Personal, eine Unterweisung über die entsprechenden Strahlenschutzmaßnahmen erhalten.

Schwangere Frauen dürfen sich nur nach Zustimmung der Strahlenschutzverantwortlichen dort aufhalten und müssen mit zusätzlichen Überwachungsmaßnahmen ausgestattet werden.

Sperrbereich

Der Kontrollbereich wandelt sich in dem Moment, in dem bestrahlt wird, in den Sperrbereich. Hier beträgt die Ortsdosisleistung mehr als 3 mSv pro Stunde, die Kennzeichnung mit einem Warnschild „SPERRBEREICH – KEIN ZUTRITT“ ist Pflicht. Es dürfen sich nur Personen dort aufhalten, wenn es für ihre berufliche Ausübung unumgänglich ist und sie der Kontrolle des Strahlenschutzverantwortlichen unterstehen oder als Patient, der dort behandelt werden muss. Auch hier ist das Tragen eines Personendosimeters zwingend erforderlich.

Schwangere Frauen dürfen diesen Bereich unter keinen Umständen betreten, außer sie sind selbst Patientin und müssen sich aus medizinischen Gründen einer Bestrahlung unterziehen.

Zu den Sperrbereichen der Strahlentherapie gehören der Bestrahlungsraum für die Brachytherapie, wenn die Strahlenquelle ausgefahren ist und der Beschleunigerbunker, allerdings nur so lange das Bestrahlungsgerät strahlt. Für die Notfall-Bergung des Patienten aus dem Brachytherapieraum ist eine spezielle Unterweisung nach Strahlenschutzverordnung nötig.

Personendosimetrie

Die Personendosimetrie ist vorgeschrieben für strahlenexponiertes Personal und Auszubildende oder Studenten, die sich zu Ausbildungszwecken in den Strahlenschutzbereichen aufhalten müssen. Die Auswertung erfolgt monatlich über die Strahlenschutzbehörde. Besucher oder Angehörige müssen für den Zeitraum des Aufenthaltes mit entsprechenden Überwachungsmaßnahmen ausgestattet werden, um die Körperdosis ermitteln zu können. Hierfür werden direkt ablesbare Dosimeter verwendet. Die Aufenthaltsdauer und die Körperdosis müssen dokumentiert werden.

Bauliche Maßnahmen

Der Beschleunigerbunker muss durch bauliche Strahlenschutzmaßnahmen gewährleisten, dass Personen außerhalb des Bunkers keine Dosis abbekommen können.

Um die Beschleunigerwände bei der Verwendung von hochenergetischer Strahlung in alle Richtungen möglichst undurchlässig zu machen, wird heutzutage meist Barytbeton (Baryt: „Schwerspat“, Bariumsulfat) verwendet. Je nach möglicher Höchstenergie und Ausstattung des Bunkers werden die Räume mit 1–2 m dicken Barytbetonwänden ausgestattet.

Ist der Raum mit einem Strahlenfang, auch Labyrinth genannt, ausgestattet, reicht eine Strahlenschutztür aus einem Verbundmaterial von bis zu 3 cm Blei und 30 cm Paraffin aus. In neueren Strahlentherapieanlagen wird aus Platzgründen meist auf ein Labyrinth verzichtet. Das Strahlenschutztor besteht hierbei aus Barytbeton, um die entsprechende Abschirmwirkung zu erreichen.

Durch die hochenergetische Strahlung kann die Raumluft aktiviert werden, wobei radioaktives N-13 und O-15 entstehen können. Es muss deswegen immer ein gut funktionierendes Lüftungssystem vorhanden sein, um einen stetigen Luftaustausch (10 Mal pro Stunde) zu gewährleisten.

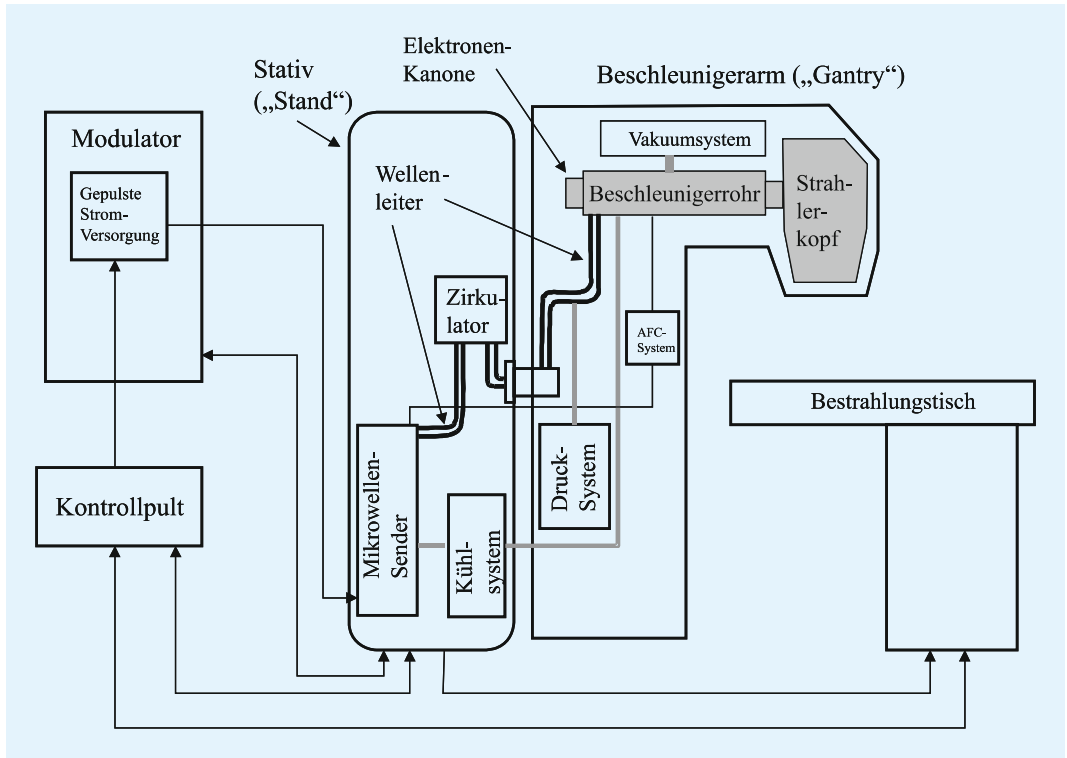
Notfallbergung

Kommt es zu Problemen mit der Beschleunigeranlage (z. B. das Strahlenschutztor lässt sich nicht mehr öffnen, der Linearbeschleuniger schaltet nicht ab) muss ein Notfallkonzept das Vorgehen zur Bergung des Patienten aus dem Beschleunigerraum regeln.

Dazu gehört die Öffnung des Strahlenschutztors, entweder manuell oder mit Flaschenzug. Sollten es die baulichen Gegebenheiten nicht zulassen oder ist das Tor aus der Verankerung gerissen, muss die Feuerwehr hinzugerufen werden.

Die Maßnahmen und der Ablauf einer Notfallbergung muss standardmäßig mit dem Personal geübt werden, um im Ernstfall schnell und korrekt handeln zu können.

➤ **Ist das Öffnen des Bestrahlungsraumes während des Patientenbetriebs durch technische Probleme oder einen Defekt nicht möglich,**



■ Abb. 9.2 Aufbau eines medizinischen Elektronenlinearbeschleunigers. (Aus Wannemacher 2006)

sollten Sie als MTRA anhand des Notfallkonzeptes sofort reagieren. Lassen Sie dabei den Patienten nie außer Acht. Sprechen Sie sich mit einem Kollegen ab, wer die zuständigen Personen informiert, um Hilfe zu erhalten und wer mit dem Patienten über die Sprechanlage in Kontakt bleibt und diesen beruhigend informiert.

9.3 Aufbau und Funktion radioonkologischer Bestrahlungsgeräte

D. Dohr, C. Marks, J. Thiele

Das klassische, am häufigsten eingesetzte Behandlungsgerät in der Radiotherapie ist der Linearbeschleuniger, obwohl natürlich noch weitere Apparate und andere Bestrahlungsmethoden zur Abtötung von Tumorzellen zur Verfügung stehen.

9.3.1 Linearbeschleuniger

D. Dohr, C. Marks

Der Linearbeschleuniger (■ Abb. 9.2) besteht aus einem Röntgengerät, das mit einem Beschleunigungsrohr als zusätzlicher Vorrichtung die Strahlen mit höherer Energie ausstattet. Man nennt sie **ultraharte Röntgenstrahlung** oder auch **hochenenergetische Photonenstrahlung**, mit der es möglich ist, tiefer gelegene Tumoren zu erreichen – im Gegensatz zur konventionellen Röntgentherapie (► Abschn. 9.3.7), die nur oberflächlich wirkt.

Der Beschleunigerarm, Gantry genannt, kann sich in einer Ebene um den Behandlungstisch drehen. Seine Position wird als Gantrywinkel angegeben. Der Strahlerkopf, der sich am Ende des Beschleunigerrohrs befindet, ist drehbar. Da sowohl der Behandlungstisch, die Gantry als auch der Strahlerkopf beweglich sind, hat man beinahe uneingeschränkte Möglichkeiten, um den Tumor

aus allen Richtungen zu bestrahlen. Der Tischwinkel gibt dabei die Position des Tisches und der Kollimatorwinkel die des Strahlerkopfes an.

Bauteile

Elektronenkanone – Beschleunigerrohr – Strahlerkopf

Der Abschnitt, in dem die Elektronen erzeugt werden, wird als **Elektronenkanone** (engl. electron gun) bezeichnet. Die Beschleunigung der Elektronen erreicht man, indem am 1–2,5 m langen **Beschleunigerrohr**, das die Elektronen durchlaufen müssen, eine Wechselspannung mit hoher Frequenz angelegt wird. Das Ende des **Beschleunigungsrohrs** liegt im Strahlerkopf des Linearbeschleunigers. Dort wird der Elektronenstrahl mittels Magneten in einer Kreisbewegung um 270 Grad umgelenkt. Dadurch werden die bis dahin unterschiedlich hohen Energielevel der einzelnen Elektronen aneinander angeglichen, der Strahl gewinnt an Homogenität. Auch aus Platzgründen ist die Umlenkung sinnvoll, denn sonst wäre der Behandlungsraum riesig.

Bauteile für Photonenstrahlung im Strahlerkopf (Abb. 9.3)

Beim Aufprall der beschleunigten Elektronen auf das **Target** entstehen hochenergetische Photonen, die keulen- bzw. birnenförmig aufgestreut werden. Das Target wird bei diesem Vorgang stark erwärmt, sodass zur Kühlung eine Wasserleitung und ein Kupferblock in der Maschine integriert sind. Die entstehenden Photonen werden größtenteils weiter vorwärts gestreut und gelangen durch den **Primärkollimator** hindurch. Ein Kollimator ist ein allgemeiner Begriff für Vorrichtungen, die dazu dienen, Photonen zu absorbieren, die sich nicht in Richtung des Nutzstrahls bewegen. In diesem Fall handelt es sich um einen Bleitrichter, der an den Wänden die Strahlen absorbiert, welche sich nicht auf den Patienten richten und somit keine therapeutische Wirkung haben. Im weiteren Strahlenverlauf ist ein Ausgleichsfilter aus Metall (**Photonenausgleichskörper**) angebracht, der die Photonenstrahlung homogenisiert: da die höchste Dosisintensität in der Mitte der keulenförmigen Strahlenwolke liegt, ist der Ausgleichsfilter dort am dicksten und zum Rand hin auslaufend.

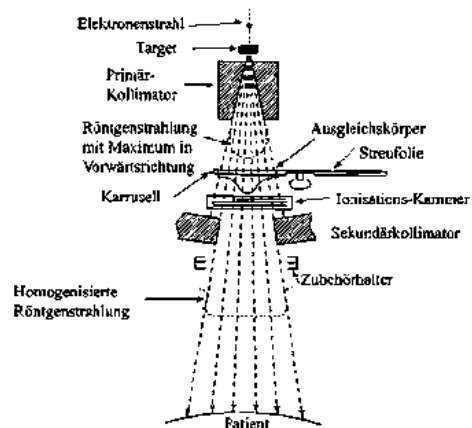


Abb. 9.3 Strahlenfelderzeugendes System. Anmerkung: Die abgebildete Skizze gibt den Geräteaufbau im Prinzip wieder. Medizinische Linearbeschleuniger können sich in der Form und in der Anordnung der Bauteile im Strahlerkopf unterscheiden. So ist z. B. der Elektronenfänger im Primärkollimator eingebaut oder erst am Ende des Strahlbearbeitungsprozesses. Auch beim Wechsel zwischen Photonenmodus und Elektronenmodus kennt man mehrere Methoden: Möglich ist u. a. ein Drehtisch (Karussell), auf dem der Ausgleichskörper für die Photonen und die Metallfolie für die Elektronen gelagert sind. Je nach Bedarf wird dieses Tablett in die benötigte Position rotiert. (Aus Wannemacher 2006)

Ein weiteres Element ist der Elektronenfänger (engl. beamstopper od. **beamhardener**). Er besteht aus Metall und fängt die weichen (niederenergetischen) Strahlungsanteile ab, sodass nur die höher energetischen Anteile durchgelassen werden. Man bezeichnet diesen Vorgang als „Aufhärtung“.

Bauteile für Elektronenstrahlung im Strahlerkopf

Will man nicht mit Photonen, sondern mit Elektronen behandeln, lässt man die Strahlung direkt austreten, ohne dass sie auf das Bremstarget prallt, das dabei zur Seite gefahren wird. Der Elektronenstrahl durchläuft ebenfalls den Primärkollimator. Statt auf den Ausgleichkörper treffen die Elektronen auf eine mikrometer-dicke Metallfolie (**Streufolie**), die den nadeldünnen Elektronenstrahl auf einen vergrößerten Durchmesser aufweitet.

Dosiskontrolle mit Monitorkammern

Unterhalb des Ausgleichsfilters sind zwei Durchstrahl-Ionisationskammern eingebaut, welche die Energiedosis in **Monitoreinheiten** (ME bzw. engl. monitor units, „MU“) messen. Die beiden Monitorkammern sind aus Überwachungsgründen unabhängig voneinander. Der Strahl wird automatisch abgeschaltet, wenn die voreingespeicherten MEs für das entsprechende Bestrahlungsfeld erreicht wurden. Bei Ausfall der ersten Messkammer erwirkt die zweite Kammer ein sofortiges Abschalten der Strahlung.

Installationen zur individuellen Feldeinstellung für jeden Patienten

Lichtvisier und Entfernungsmesser als Einstellhilfe

Im Strahlerkopf sind eine Lampe und ein Spiegel montiert, die exakt das Strahlenfeld als Lichtfeld wiedergeben, damit die MTRA eine visuelle Kontrolle bei der Feldeinstellung haben. Durch den Spiegel wird das zu bestrahlende Feld mittels einer Lichtquelle auf die Oberfläche des Patienten projiziert. Die Position der Lichtquelle hat denselben Abstand zur Haut bzw. Oberfläche wie das Bremstarget. Sie dient als optischer Entfernungsmesser und gibt den **Fokus-Haut-Abstand** (FHA oder engl. source skin distance, SSD) an, der bei den Feldeinstellungen eine wichtige Rolle spielt.

Blenden und Lamellenkollimator (MLC)

Vier Wolfram- oder Bleiblöcke (Blenden) begrenzen die 4 Feldränder. Sie werden auch **Kollimatoren** (► Abschn. 9.3.1) genannt, ihre Seitenflächen sind der Strahlendivergenz angepasst. Die vier Blenden sind verschieblich, darüber definiert man die Feldlängen und die Feldbreiten (X1, X2, Y1, Y2). Diese rechteckigen Felder können nun zusätzlich durch Multileaf-Kollimatoren aus Wolfram variiert werden. Strenggenommen besteht der Multileaf-Kollimator (MLC) aus vielen dünnen Platten, auch **Lamellen** genannt. Schaut man aber auf den Strahlerkopf, so ist die 3. Dimension (Tiefe) verborgen, deshalb wird häufig von „Stäbchen“ gesprochen gemäß der für den Betrachter sichtbaren Form. Die Lamellen haben, je nach Geräteausstattung, verschiedene Breiten bis 10 mm. Damit gelingt eine millimetergenaue Anpassung des Bestrahlungsfel-

des an die Kontur des Tumors. Manchmal kann das Gewebe besser geschützt werden, wenn die MLC, die vom linken und rechten Feldrand eingeschoben werden, von oben und unten kommen. In diesen Fällen dreht man das Feld bzw. seinen Kollimatorwinkel um 90 Grad.

Haltevorrichtungen

Zur Bestrahlung mit Elektronen wird ein Tubus zur Bündelung des Elektronenstrahls am unteren Ende des Strahlerkopfes befestigt. Je nach Wahl der Elektronen-Eindringtiefe und der Feldgröße ist ein unterschiedlich großer Tubus nötig. Patientennah kann man in den Tubus Bleirahmen einsetzen, die es erlauben, das eckige Bestrahlungsfeld zu verkleinern oder umzuformen. Manchmal gießt man dafür extra eine individuell angepasste Bleiform. Zur Einstellung erfolgt der direkte Hautkontakt des Rahmens auf der Haut, der FHA beträgt hierbei 95 cm.

Installationen zur Kontrolle der korrekten Feldeinstellung, IGRT

Vor der ersten Sitzung und in gewissen Abständen während der Behandlung wird überprüft und dokumentiert, ob bzw. dass auch tatsächlich exakt so bestrahlt wird, wie im berechneten Plan vorgegeben. Wenn diese Verifikationsaufnahme direkt vor der Bestrahlung erfolgt und nötige Korrekturen sofort vorgenommen werden, spricht man von **IGRT** (engl. image guided radiotherapy, bildgeführte Radiotherapie).

Die Kontrollaufnahmen der Bestrahlungsfelder werden entweder mit dem Therapiestahl aus dem Linearbeschleuniger selbst angefertigt, bei einer Spannung im Megavolt-Bereich (MV), oder sie stammen aus einem zusätzlichen Röntgengerät bei einer Spannung im Kilovolt-Bereich (kV). Man vergleicht sie mit den DRR, die während des Planungsprozesses entstanden sind (► Abschn. 9.6.9). Bei Abweichungen wird dementsprechend eine Korrektur vorgenommen, meistens als Verschiebung der Tischposition vertikal, horizontal und longitudinal. Einige Tische können sogar durch einen speziellen Tischaufbau eine Rotation bis zu einem gewissen Grad ausgleichen. Computerprogramme erleichtern die Arbeit, indem sie automatisch den Abstand von vorgegebenen Strukturen (z. B. Knochenkontur, Trachea, Zähne) ausmessen (**matchen**).

Die IGRT kann verfeinert werden, indem man zusätzlich Clips aus Metall (**Marker**) ins Gewebe einbringt. Damit ist das Zielvolumen eindeutiger festgelegt, Lageveränderungen von Organen sind sehr gut erkennbar.

Die Prostata bewegt sich je nach Stuhlfüllung im Rektum um mehrere Millimeter. Mit drei winzigen Goldmarkern, die man in die Prostata dauerhaft implantiert, erkennt man vor jeder Sitzung die tatsächliche Lage des Organs und passt die Einstellung für die Bestrahlung in o.g. Weise an.

Bei den neueren Geräten ist der Behandlungstisch mit dem Matching-Vorgang gekoppelt, sodass der Behandlungstisch auf Knopfdruck / Befehl auf die empfohlene Position fährt. Unverzichtbar ist dennoch die Plausibilitätskontrolle durch die MTRA, die die vorgenommenen Korrekturen kontrollieren müssen, da auch Computerprogramme nicht unfehlbar sind.

Feldaufnahmen in MV-Qualität

Die Verifikationsaufnahmen mit dem Linearbeschleuniger sind in der Bildqualität schlechter als diagnostische Röntgenbilder. Der Grund liegt im unterschiedlichen Verhalten von Strahlung (Photonen) mit Materie in Abhängigkeit des Energiebereichs. Während man in der Röntgendiagnostik mit geringen Energien arbeitet, die den Photoeffekt hervorrufen, ist der hauptsächliche Prozess in der Therapie mit Linearbeschleunigern der Comptoneffekt, der im Energiebereich zwischen 100 keV und 10 MeV beobachtet wird. Ab 1.022 MeV tritt in geringem Maß zunehmend auch der Paarbildungseffekt auf (► Abschn. 2.1).

Technisch realisiert man die Aufnahmen (engl. Portal Images), indem am Linearbeschleuniger unter dem Behandlungstisch ein Schwenk-Arm mit dem Röntgendetektor (Imager) ausfährt. Bei optimaler Einstellung sind dennoch nur Strukturen mit großem Dichteunterschied voneinander abgrenzbar, wie z. B. knöcherne Strukturen der Wirbelsäule oder im Becken. Die Kontrolle wird unmittelbar nach der Belichtung am Computerbildschirm dargestellt. Sie kann aber ebenso mit einer tragbaren Speicherfolienkassette aufgenommen und an einem Auslesegerät ausgewertet werden. Diese Methode

findet bei Bestrahlungsfeldern Anwendung, die zu groß für den Röntgendetektor sind.

Feldaufnahmen in kV-Qualität

Ein Bildgebungssystem in kV-Qualität benötigt zusätzliche Installationen am Linearbeschleuniger, nämlich zwei Arme (► Abb. 9.4), die mit einem Röntgengerät einerseits und einem Flachbild-Detektor andererseits ausgerüstet sind. Vor der Bestrahlung werden orthogonale kV-Röntgenaufnahmen der Bestrahlungsfelder oder der Set-Up-Felder angefertigt (z. B. von 0 und 90 Grad).

Cone-Beam-CT

Neuere Linearbeschleuniger besitzen ein Cone-Beam-CT, auch „Kegel-Strahl-CT, digitale Volumentomographie oder Mini-CT genannt, da es im Vergleich zum diagnostischen CT in Qualität und weiteren Bearbeitungsmöglichkeiten eingeschränkt ist. Es drehen sich die beiden Arme mit Röntgengerät und Detektor um den ausgefahrenen Behandlungstisch bzw. den Patienten. Die dabei aufgenommenen CT-Schichten werden mit den Schichten des Planungs-CT übereinandergelegt. Der Vorteil zu den 2D-kV-Röntgenaufnahmen ist, dass man einen direkten Vergleich der realen Aufnahmen hat und nicht auf einen Zwischenschritt mit rekonstruierten Aufnahmen (DRR) zurückgreifen muss. In den CT-Schichten können neben den Knochen auch Organe wie die Prostata und die Harnblase abgegrenzt werden.

Atemgesteuerte Bestrahlung (engl. respiratory gated radiotherapy)

Die Bestrahlung wird auf die Atembewegungen des Brustkorbs abgestimmt. Die Atemkurve wird aufgezeichnet, und die Strahlung schaltet sich immer nur in einem bestimmten Atemabschnitt ein, nämlich für die Zeitspanne, in der der Tumor bzw. das PTV in günstiger Position liegt.

Indikationen

Mit Atemsteuerung ist bei der Bestrahlung von Lungentumoren nur ein schmaler kranialer und kaudaler Sicherheitssaum nötig, da die atembedingte Tumorbewegung nicht berücksichtigt werden muss.

Ebenso schon die Methode bei linksseitigem Brustkrebs das Herz. Es wird nur in Inspiration bestrahlt, denn während dieser Phase ist der Brust-



■ **Abb. 9.4** Linearbeschleuniger mit Bildgebungssystem in kV-Qualität. (Aus Short 2013)

korb gedehnt, und die Lungen sind mit Luft gefüllt. Der Abstand zwischen Herz und Brustwand/Brust ist dadurch grösser als bei Expiration, und das Herz erhält dementsprechend weniger Streustrahlung.

Sensorsystem und Planungs-CT

Der erforderliche Atemzyklus wird mit dem Patient geübt. Er soll regelmäßig, nicht zu tief und nicht zu flach atmen. Unterstützt sieht der Patient seine eigene Atemkurve auf dem Monitor (visuelle Rückwirkung). Die Aufzeichnung geschieht mit einem Sensorsystem: Auf dem Brustkorb des Patienten sind Reflektoren befestigt. Fest installierte Laserstrahlen von der Decke und den Wänden des Raumes treffen auf die Reflektoren, die den Strahl wie ein Katzenauge am Fahrrad zurückspiegeln. Die Rückstrahlung wird von einer Kamera aufgenommen. Aus Zeitpunkt, Winkel und Geschwindigkeit wird eine Kurve errechnet, bei der jede Phase der Atmung exakt bestimmt werden kann. Während des Planungs-CT ist gleichzeitig dieses Sensorsystem in Betrieb, das die Inspiration/Expiration zum Zeitpunkt eines jeden Scan festhält.

Verarbeitung und Bestrahlung

Nun wird das zeitliche Bestrahlungsfenster festgelegt. Wenn z. B. die Bestrahlung nur bei Expiration erfolgen soll, werden alle Scans in genau dieser Atemlage zusammengestellt. Gleichzeitig weiß man durch die Lasersensoren, wie hoch die Thoraxwand bei der Ausatmung steht. Der Linearbeschleuniger wird gemäß dieser Daten programmiert, sodass während der Bestrahlung die Strahlung ein- oder ausgeschaltet

wird, je nach Position des Brustkorbes, die ihm vom Sensorsystem gemeldet wird. Ist der Bestrahlungsplan in üblicher Weise fertig erstellt, erfolgen die Ersteinstellung und alle weiteren Behandlungen in gleicher Lagerung inkl. Sensorsystem wie bei der Planung.

Gating oder Breath-Hold-Technik

Die o. g. Technik bezeichnet man als Gating (engl. gate, das Tor, das sich öffnet und schließt). Eine einfachere Methode stellt die Bestrahlung bei angehaltenem Atem (engl. breath hold) dar, die bevorzugt bei linksseitigem Brustkrebs zur Herzschonung angewandt wird. Die Vorbereitung mit Sensorsystem gestaltet sich gleich, nur dass auf das zeitintensive Training für die optimale Atemkurve verzichtet werden kann. Die Patientin atmet ein und hält den Atem an, während das Planungs-CT angefertigt wird. Bei den späteren Bestrahlungen wird genauso verfahren. Da die Behandlungszeiten sehr kurz sind, reicht üblicherweise eine Atemanhaltphase pro Feld völlig aus. Falls nicht, würde das Gerät wie beim Gating automatisch unterbrechen, sobald die Sensoren eine Brustkorbbewegung im Sinne einer Ausatmung bemerken und die Bestrahlung erst fortsetzen, wenn durch die nächste Einatmung wieder die optimale Weite des Brustkorbs erreicht ist.

9.3.2 Dosisverteilung im Gewebe

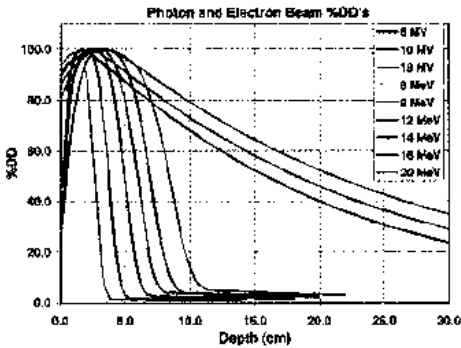
D. Dohr, C. Marks

Tiefendosisverlauf

Die Strahlung dringt ins Gewebe ein und überträgt dabei seine Energie. Elektronen und Photonen zählen beide zur Partikelstrahlung (schnell bewegte Atome, Ionen oder Elementarteilchen mit Ruhemasse), sind aber unterschiedlich schwer und haben ein unterschiedliches Verhalten, wann und in welchem Maße sie ihre Energie abgeben. Diagramme mit sog. **Tiefendosiskurven** (■ **Abb. 9.5**) charakterisieren den Dosisverlauf im Gewebe.

Faktoren, die den Verlauf der Tiefendosiskurve beeinflussen

- **Strahlenmodalität:** Mit hochenergetischen Photonen erreicht man tiefer gelegene



■ **Abb. 9.5** Tiefendosisverlauf für 6–18 MeV Elektronen und 6–18 MV Photonen. Y-Achse: Dosis in Prozent, x-Achse: Gewebetiefe. (Aus Purdy et al. 2012)

Volumina. Elektronen verwendet man bei oberflächlichen Prozessen, siehe Tiefendosis-kurven (■ **Abb. 9.4**)

- **Strahlenenergie:** Höhere Energien dringen tiefer ein. 18 MV-Photonen reichen weiter als 6 MV-Photonen. 12 MeV Elektronen reichen weiter als 6 MeV Elektronen.
- **Feldgröße:** Die Reichweite der Photonen- und der Elektronenstrahlung erhöht sich mit zunehmender Feldgröße. Dagegen zeigen Photonen und Elektronen ein unterschiedliches Verhalten in der Oberflächendosis bei Änderung der Feldgröße (► **Abschn. 9.3.2**).
- **Fokus-Haut-Abstand (FHA)** (FHA ► **Abschn. 9.3.1**): Je grösser der Abstand, desto geringer die Dosis an der Oberfläche und desto grösser die Reichweite in die Gewebetiefe.
- **Durchstrahltes Material:** Je dichter das Gewebe, z.B. Weichteilgewebe gegenüber luftgefüllter Lunge, desto mehr wird die Strahlung absorbiert. Sie gelangt deshalb weniger tief ins Gewebe.

Photonen

Beim Auftreffen auf die Haut bzw. Oberfläche gibt der Photonenstrahl etwa 70–80 % seiner Dosis ab. Er dringt auf seiner Bahn weiter ins Gewebe ein und gewinnt durch die Sekundärelektronen wieder

an Energie. Diese Elektronen gehören zu den Molekülen des Gewebes, sie werden durch den Photonenstrahl angestoßen und bewegen sich dann ebenfalls fort. Das Phänomen bezeichnet man als Aufbau-Effekt: die maximale Dosis entfaltet sich erst in der Tiefe des Gewebes. Je höher die Energie des Photonenstrahls ist, desto weniger Dosis erhält die Haut und desto tiefer liegt das Dosismaximum im Gewebe (■ **Abb. 9.5**). Mit 18 MV-Photonen schont man die Haut stärker als mit 6 MV Photonen und man erreicht tiefer gelegene Tumoren. Mit zunehmender Feldgröße erhöht sich allerdings die Dosis an der Oberfläche wieder.

Elektronen

Elektronen entwickeln ihr Dosismaximum ebenfalls unter der Haut, sie haben aber anschließend ein anderes Verhalten als die Photonen. Der Grund dafür ist, dass die Photonen nach dem Durchdringen der Haut die Richtung ihrer Bewegung beibehalten und tief in das Gewebe vordringen, während die Elektronen nur z. T. auf ihrer Bahn vorwärts wandern und eben auch nach allen Seiten hin streben. Daraus resultiert, dass man mit Photonen tiefergelegene PTV besser erreicht. Für oberflächliche Prozesse verwendet man gerne Elektronen, da sie dafür zwei günstige Merkmale besitzen: eine ausreichende Reichweite und einen steileren Dosisabfall als die Photonen. Gesundes Gewebe hinter bzw. unterhalb des Zielvolumens wird dadurch fast vollständig geschont.

Spezielle Eigenschaften der Elektronen

- Mit Erhöhung der Energie kann man zwar wie bei den Photonen die Reichweite im Gewebe vergrößern: So liegt mit 6 MeV-Elektronen das Dosismaximum in 12 mm Gewebstiefe und mit 12 MeV-Elektronen in 24 mm Gewebstiefe (das ist eine einfache Rechnung: man multipliziert die Energie mit 2). Im Gegensatz zu den Photonen erhöht sich aber die Dosis auf der Haut mit steigender Energie.
- Das Dosismaximum bei Elektronen ist nur abhängig von der Feldgröße, wenn die Bestrahlungsfelder kleiner als 5 cm × 5 cm sind. In diesem Fall zieht es das Dosismaximum mehr und mehr an die Oberfläche.

- Bei kleinen Bestrahlungsfeldern zieht sich die Dosis an den seitlichen Feldrändern oberflächennah zusammen. Die Form der Dosisverteilung erinnert an einen Pinsel. So wird unter Umständen ein 1 cm großer Hauttumor in einem 2 cm großen runden Feld nicht mit ausreichender Dosis bestrahlt.

9.3.3 Dosisverteilung im Bestrahlungsplan

D. Dohr, C. Marks

Eine Gesellschaft, die International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), hat Empfehlungen für die Dosisverschreibung in der Strahlentherapie erarbeitet, veröffentlicht als Report ICRU 50 und ICRU62. Darin sind neben der Definition von GTV, CTV und PTV (► Abschn. 9.6.6) beschrieben, wie bei der Erstellung eines Bestrahlungsplans vorgegangen werden soll. Unter anderem wird eine homogene Dosisapplikation im Zielvolumen PTV gefordert mit einem Minimum von 95 % und einem Maximum von 107 %.

Hilfsmittel zur Umformung der Dosisverteilung

Optimal für die Bestrahlung wäre es, wenn der Körper einem Wasserquader mit homogener Dichte und gerader Linienführung gleichen würde. Um die physikalischen Anforderungen einer Strahlentherapie trotzdem zu erfüllen, ist es manchmal nötig, mit Hilfsmitteln die Unebenheiten der Körper- und Organkonturen auszugleichen.

Keilfilter

Keile aus Metall mit unterschiedlicher Dicke sind entweder im Gerät eingebaut oder werden von Hand in den Strahlengang eingeschoben. Je nach Bedarf werden sie entlang des Strahlengangs oder quer dazu, mit dem dicken oder spitzen Ende voran positioniert. Eine Sonderform, der dynamische Keil ist gar kein Keil, sondern nur die Bewegung der Blende über das Feld mit dem gleichen Effekt. Es ergibt sich eine Ablenkung der Dosisverteilung

(► Abb. 9.6). Je nach dem Winkel, den die 50 %-Isodose (► Abschn. 9.3.4) mit der Horizontalen bildet, werden die Keilfilter als 10, 15, 20, etc. Grad-Keil (engl. wedge-15-20-30) bezeichnet.

Moulagen

Mithilfe von Moulagen (auch Bolus oder Flab genannt), die die gleiche Dichte besitzen wie Körpergewebe (körperäquivalentes Material) kann man bei oberflächlichen Prozessen (Hautmetastasen, Operationsnarben, Hautlymphome o. ä.) eine optimale Dosisabdeckung erreichen. Es wird eine Moulage, z. B. aus Wachs, Gelkissen, Wasserkissen, Plexiglas, auf die Haut gelegt. Statt auf die Haut, trifft der Strahl nun zuerst auf die Moulage und entwickelt ab diesem Moment den für ihn typischen Tiefendosisverlauf. Die Isodosen werden angehoben, sie verziehen sich zur künstlichen Oberfläche mit der Konsequenz, dass sich das Dosismaximum jetzt auf das Niveau des PTV ausbreitet.

Der Körperdurchmesser kann mit Moulagen künstlich vergrößert werden, um eine unzureichende Dosisverteilung auszugleichen. Z. B. wird bei der Ganzkörperbestrahlung (a. p./p. a.) der Hals-Schulter-Übergang ausgepolstert. Bei der konventionellen Röntgentherapie legt man am abgewinkelten Ellenbogen ein Kissen an.

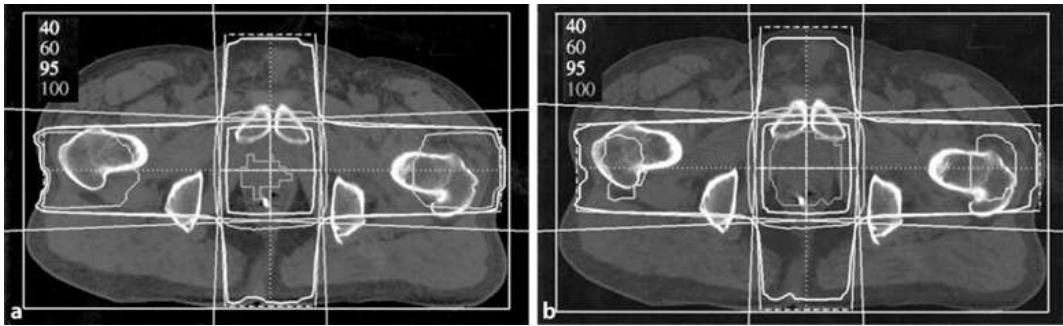
Satelliten-Bleibblöcke

Satelliten-Bleibblöcke haben den Zweck der individuellen Feldbegrenzung oder der Ausblockung strahlenempfindlichen Gewebes inmitten des Bestrahlungsfeldes. Im Zeitalter von IMRT, VMAT und Tomotherapie (► Abschn. 9.3.5) wird der Einsatz dieser Bleibblöcke, die auf einem Träger in den Strahlengang gesetzt werden, immer seltener. Ein Beispiel ist die Lungenabdeckung bei Bestrahlung eines Mantelfeldes (► Kap. 22).

Halbfeldtechnik (Halfbeam)

Bei dieser Technik wird die Divergenz der Strahlen durch Schließen einer Blende „abgeschnitten“.

Bei Bestrahlung der HWS über seitliche Felder erhält der Rachen durch die Strahlendivergenz eine Dosis, die zu Schluckbeschwerden führen könnte. Schließt man nun die ventrale Blende bis zum Zentralstrahl, verläuft der Strahl im Bereich Wirbelkörpervorderkante / Rachenschleimhaut nicht mehr divergent,



■ Abb. 9.6a,b Isodosenverteilung ohne (a) und mit (b) Keilfilter

sondern parallel und die Rachenschleimhaut wird geschont.

9.3.4 Bestrahlungstechniken

D. Dohr, C. Marks

Wichtige Begriffe und Definitionen

Isozentrum und isozentrische Bestrahlung am Linearbeschleuniger

Das Isozentrum ist der Punkt, der auf dem Zentralstrahl in 100 cm Abstand zum Target liegt und in dem sich die Achsen von Gantry, Kollimator und Tisch kreuzen. Der Patient wird im Planungs-CT entsprechend gelagert, damit sich das Isozentrum in der Mitte des Zielvolumens befindet. Gelingt dies manchmal nicht, wird am Planungscomputer errechnet, wie weit und in welche Richtungen der Patient bei der Ersteinstellung mit dem Tisch verschoben werden muss (off-set), um die Vorgabe zu erfüllen.

Bei der isozentrischen Bestrahlung treffen sich die Zentralstrahlen aller Felder im Isozentrum. Der Abstand zwischen Target und dem Isozentrum (Fokus-Isozentrum-Abstand) ist definiert für alle Felder und beträgt 100 cm. Darüber ergibt sich auch der Fokus-Haut-Abstand (FHA):

Liegt das Isozentrum 9 cm unter der Haut, beträgt der FHA 91 cm.

Die Dosierung muss nicht unbedingt Bezug auf das Isozentrum nehmen. Gemäß Richtlinien von ICRU 50 und ICRU 62 kann man auch einen anderen Punkt innerhalb des Zielvolumens auswählen, den sog. Normierungspunkt, auf den 100% der Dosis verordnet sind.

Koplanare Bestrahlung

In der herkömmlichen Radiotherapie legt man die Zentralstrahlen aller Felder in eine Ebene, die typischerweise quer zur Patientenachse verläuft (koplanare Bestrahlung). Bei der Stereotaxie (► Abschn. 9.3.5) wird nicht-koplanar bestrahlt. Dazu ist es manchmal nötig, dass der Patient bzw. der Tisch während einer Sitzung neu ausgerichtet wird. Einen Vergleich zeigt ■ Abb. 9.7.

Isodosen

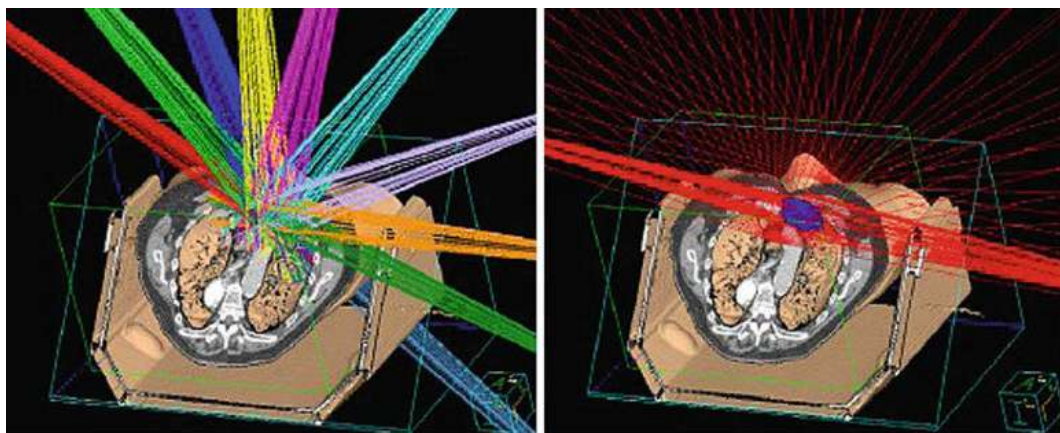
Isodosen stellen Punkte mit gleicher Dosis dar. Werden sie über Linien miteinander verbunden, spricht man von Isodosenkurven.

Einfache Techniken ggf. unter Einsatz des Simulators

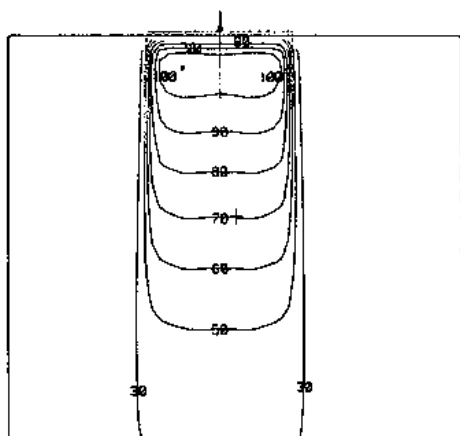
Bei den einfachen Techniken werden Felder homogen bestrahlt. Stehfelder und opponierende (sich gegenüberliegende) Felder können statt mithilfe des Planungs-CT auch am Simulator eingestellt werden.

Am Simulator wird die Bestrahlungs-Situation nachempfunden („so getan, als ob“, „simuliert“). Die Anlage besteht aus dem Behandlungstisch und einem diagnostischem Röntgenapparat, der genau wie ein Linearbeschleuniger aussieht und ebenso bewegt werden kann.

Per Röntgen-Durchleuchtung orientiert man sich an den Knochenstrukturen und legt die Bestrahlungsfelder bzw. -volumina (Länge, Breite, Tiefe) fest. Außerdem werden die Gantry-, Kollimator- und Tisch-Winkel bestimmt und der Fokus-Haut-Abstand (FHA) abgelesen. Zum Abschluss dokumentiert man die Felder und das Isozentrum mit zwei orthogonalen Röntgenauf-



■ **Abb. 9.7** Nicht koplanare Stereotaxie mittels 10 Felder im Vergleich zu koplanarer VMAT



■ **Abb. 9.8** Isodosenverlauf bei Stehfeld-Bestrahlung

nahmen (z. B. 0 und 90 Grad). Nun werden die Bestrahlungsfeldkonturen und die Lasermarkierungen auf die Haut gezeichnet.

Neuere Abteilungen haben aus Platz- und Kostengründen auf die Anschaffung eines Simulators verzichtet und planen auch die einfachen Techniken mithilfe des Planungs-CT.

Stehfeld

Die einfachste Technik ist das Stehfeld, bei dem die Feldgröße, die Herdtiefe und die Energie festgelegt sind. Einzelfelder sind nur für oberflächlich gelegene Zielvolumina geeignet, z. B. bei der Bestrahlung von Wirbelkörpern, Weichteiltumoren oder

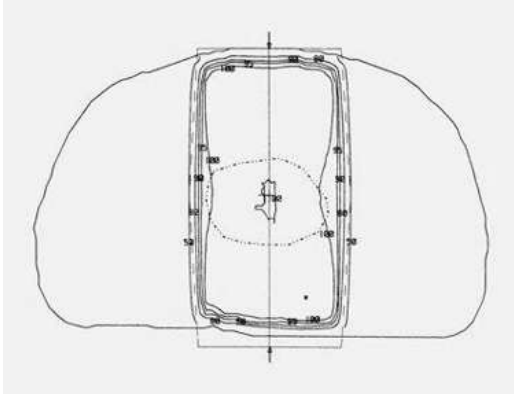
Rippenmetastasen. Bei der Stehfeldtechnik gelingt die PTV-Abdeckung und gleichzeitige Schonung des gesunden Gewebes oft besser mit Elektronen als mit Photonen. Das Stehfeld wird entweder mit Fokus-Haut-Abstand von 100 cm eingestellt oder isozentrisch: Liegt das Isozentrum in 3 cm Tiefe, beträgt der Fokus-Haut-Abstand 97 cm. ■ **Abb. 9.8** zeigt eine typische Isodosenverteilung bei Stehfeldbestrahlung.

Gegenfelder

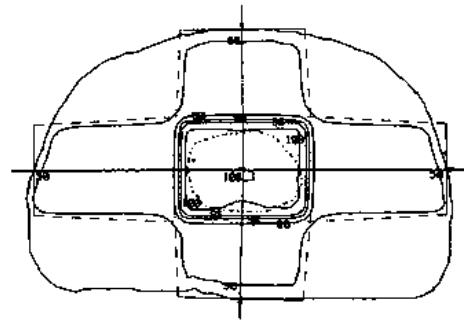
Bei tiefer im Körper gelegenen Zielvolumina ist ein Stehfeld nicht geeignet, da mit sehr hohen Energien gearbeitet werden müsste, um das PTV mit einer ausreichenden Dosis abdecken zu können. Dabei würde allerdings gleichzeitig viel gesundes Gewebe im Strahlenkorridor unnötig belastet werden. Durch Gegenfelder (opponierende Einzelfelder) wird die Strahlenbelastung des gesunden Gewebes halbiert, denn sie wird auf zwei Eintrittsfelder verteilt. Zwei sich gegenüber liegende Felder (z. B. Gantry-Winkel 0 und 180 Grad oder 90 und 270 Grad) decken in vielen Fällen (Extremitäten, Gehirn, Wirbelsäule) das Zielvolumina ausreichend ab und sind einfach am Simulator zu planen und einzustellen. ■ **Abb. 9.9** zeigt eine typische Isodosenverteilung bei Gegenfeldbestrahlung.

Mehrfeldertechnik – konformale Bestrahlung

Die klassische konformale Bestrahlungstechnik ist das Mehrfelder-Verfahren, bei dem die Felder zusätzlich durch die unter ▶ **Abschn. 9.3.4** aufge-



■ **Abb. 9.9** Isodosenverlauf bei Gegenfeld-Bestrahlung



■ **Abb. 9.10** Isodosenverlauf bei Mehrfeld-Bestrahlung

fürten Methoden optimal der Zielkontur angepasst werden. Sie ist zur Einstellung am Simulator zu kompliziert. Man benötigt die exakten Körperquerschnitte und ein Computerprogramm für die Berechnung der Dosisverteilung. Man würde dafür ein Planungs-CT veranlassen (► [Abschn. 9.6.7](#)). Bei Bestrahlung über mehrere Felder schmiegen sich die Isodosen enger an das PTV an, mit dem Effekt, dass die Dosis außerhalb des Zielvolumens steiler abfällt und das gesunde Gewebe besser geschont werden kann. Außerdem erlaubt die Kombination mehrerer Felder eine erhöhte Variation, was den Einsatz von Keilfiltern, unterschiedliche Gewichtung der Bestrahlungsfelder, MLC etc. betrifft. Der Plan kann dadurch individueller gestaltet werden.

■ **Abb. 9.10** zeigt eine typische Isodosenverteilung bei Mehrfeldbestrahlung.

Bestrahlung mit inhomogener Dosisverteilung

Während bei Stehfeld-, Gegenfeld- und Mehrfeld-technik die Dosis über das Feld gleichmäßig verteilt ist (homogen), werden bei den speziellen Techniken Dosismodulationen vorgenommen: innerhalb eines Feldes gibt es Bereiche mit hoher und mit niedriger Dosis.

IMRT

Die IMRT (Intensitätsmodulierte Radiotherapie) stellt ein weiterentwickeltes Verfahren der konformalen Bestrahlung dar, bei der die nötige Dosis aus wenigen unterschiedlichen Richtungen auf den Patienten appliziert wird. Mit der relativ neuen Tech-

nik der IMRT ist es nun möglich, aus einer Vielzahl von verschiedenen Winkeln, bzw. über viele verschiedene Gantrypositionen die Dosis noch exakter auf den Patienten einzustrahlen.

Während der Bestrahlung wandern die Multi-leaf-Lamellen über das Bestrahlungsfeld. Dies geschieht entweder in Sliding Window-Technik, die Bestrahlung läuft, während sich die MLC bewegen oder in Step and Shoot-Technik, die Bestrahlung wird während der Bewegung der MLC unterbrochen. Dadurch lässt sich die Dosis von Punkt zu Punkt variieren. So kann man Tumore mit hoher Dosis bestrahlen und empfindliche Organe, die in direkter Nähe liegen, besser schonen, weil die reduzierte Dosis exakter an die Organkontur angeformt werden kann.

Der Nachteil der Methode liegt im „Dosisbad“ für das gesunde Gewebe: Da sehr viele Einstrahlrichtungen notwendig sind, wird viel gesundes Gewebe mit niedriger Dosis bestrahlt – im Gegensatz zur konformalen Bestrahlung, bei der im Vergleich weniger gesundes Gewebe im Strahlenkorridor liegt, das aber mit höherer Dosis belastet wird. Ob sich daraus gesundheitliche Folgen ergeben, kann heutzutage noch nicht sicher beurteilt werden.

VMAT

Die Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) ist eine Weiterentwicklung der IMRT-Technik: Die Anzahl der kleinen dosismodulierten Felder nimmt zu, die in vielen unterschiedlichen Gantry-Positionen bestrahlt werden. Dazu bleibt die Gantry nicht mehr auf den einzelnen Positionen stehen, sondern

bewegt sich im Kreis oder Halbkreis. Die Bestrahlungsdauer verkürzt sich dadurch deutlich. Die Dosisverteilung ähnelt derjenigen der Tomotherapie (► Abschn. 9.3.6)

9.3.5 Linearbeschleuniger speziellen Bautyps

D. Dohr, C. Marks

In den letzten Jahren wurden Linearbeschleuniger entwickelt, die ebenfalls Photonen erzeugen und ausstrahlen, aber bautechnisch so verändert sind, dass sie ganz bestimmte Bedürfnisse erfüllen.

Tomotherapie

Das Tomotherapiegerät ist eine Kombination aus Linearbeschleuniger und Computertomogramm. Es besteht aus einem breiten Ring, auf dem sich der Linearbeschleuniger kreisförmig bewegt (genau wie die CT-Röntgenröhre in der Diagnostik) und Strahlen mit einer Energie von 6 MV aussendet. Zusätzlich wird der Behandlungstisch kontinuierlich vorwärts durch den Ring geschoben. Im Ring ist gegenüber der Strahlenquelle ein CT-Detektor integriert. Damit wird vor jeder Bestrahlungssitzung ein CT in 6 MV-Qualität aufgenommen, das sofort die korrekte Lage des Patienten überprüft. Anschließend erfolgt die Behandlung in intensitätsmodulierter Weise, d. h. der Strahl wird durch Schlitz- und Multileaf-Lamellen variiert (vgl. IMRT ► Abschn. 9.3.5).

Die Vorteile des Tomotherapiegerätes liegen darin, dass man mehrere Volumina in einer Prozedur bestrahlen kann (z. B. HWK 3–5 und BWK 4–7), dass lange Bestrahlungsvolumina, wie z. B. eine Spinalachse (ZNS und Wirbelkanal) ohne Feldanstückelungen gelingen und dass bei schalenförmigen Zielvolumina das Nachbargewebe optimal geschont werden kann (z. B. Aussparung des Gehirns bei Basaliomen der Kopfhaut).

Stereotaktische Strahlentherapie

Der Begriff **Stereotaxie** leitet sich vom Griechischen ab. „Stereo“ bedeutet räumlich und „taxis“ ist die Anordnung. Damit bezeichnet man eine Radiotherapie, die räumlich gezielt und hoch präzise

appliziert wird. Die Methode wurde für Hirntumore entwickelt, wird nun aber auch im restlichen Körper als Body-Stereotaxie z. B. für Primärtumore und Metastasen in Lunge und Leber eingesetzt, solange der Tumordurchmesser nicht grösser als 3 cm ist.

Die Behandlung erfolgt über zahlreiche, sehr kleine Bestrahlungsfelder des Linearbeschleunigers in nonkoplanaren Bögen (► Abschn. 9.3.4 und ► Abb. 9.7). Die Begrenzung wird entweder mit Mikro-MLC oder mit einem Lochkollimator (Bleibende aus Wolfram mit einem Loch von 2–50 mm-Durchmesser) vorgenommen.

In der eigentlichen **Stereotaxie** (engl. Stereotactic Radiotherapy, SRT) wird 3–5 Mal mit jeweils hohen Einzeldosen behandelt. Man spricht von **Radiochirurgie** (engl. Stereotactic Radiosurgery, SRS), wenn die hohe Dosis (12–25 Gy) auf einmal appliziert wird.

Die **hohe Zielgenauigkeit** ist insbesondere bei der Hirnbestrahlung äußerst wichtig, da in direkter Nähe des Tumors (z. B. beim Akustikusneurinom, Meningeom) hoch radiosensible Risikoorgane liegen. Man erreicht sie entweder durch **Immobilisation des Patienten** oder durch ein spezielles System (**Cyberknife**), das die Bewegungen des Patienten bzw. des Zielvolumens ausgleicht.

Eine **absolute Immobilisation** gelingt mit einem Ring, der in die Schädelkalotte des Patienten geschraubt wird. Dies wird vor allem bei der Radiochirurgie angewandt, bei der durch die sehr hohe Dosis eine Lageveränderung bzw. die ungenaue Dosisapplikation um wenige Millimeter fatale Folgen haben kann. Nachteil der Methode ist das Infektionsrisiko und die Unbequemlichkeit für den Patienten. Aus diesen Gründen wird der Ring nur für kurze Zeit getragen.

Eine **unblutige Methode** ist Kombination aus Maske, Beißblock und einem Rahmen mit Fixpunkten am Kiefer, den äußeren Gehörgängen, der Nase und des Hinterkopfes.

Das **Cyberknife** ist ein Roboter-gesteuerter 6 MV-Linearbeschleuniger mit einem mehrgelenkigen Arm, kombiniert mit einem Ortungssystem aus zwei Röntgenanlagen, die an der Raumdecke befestigt sind. Während der Behandlung werden ständig orthogonale Röntgenaufnahmen angefertigt und mit dem Bildmaterial aus der CT-Planung ver-

glichen. Dementsprechend wird die Positionierung des Patienten bzw. des Behandlungstisches unter der laufenden Bestrahlung angepasst. Das Gerät eignet sich sehr gut für die Body-Stereotaxie, bei der die Lage des Zielvolumens durch Atmung und andere Organbewegungen ständig wechselt. Der Tumor muss dafür mit einem röntgendichten Material markiert werden. In der Lunge wird mittels Bronchoskopie ein Metallclip in der Nähe des Tumors platziert. In der Leber geschieht die Markerapplikation durch Punktion. Bei Hirntumoren reicht eine Maskenfixation aus.

Intraoperative RT

Die intraoperative RT (IORT) bleibt wegen des enormen Aufwands hochspezialisierten Zentren vorbehalten. In einem Operationsaal mit Linearbeschleuniger, der deshalb den Strahlenschutz-Gesetzen unterliegt, wird nach Entfernung des Tumors am offenen Operationsfeld das Tumorbett unter sterilen Bedingungen über ein Elektronenstehfeld bestrahlt, z. B. bei Pankreaskarzinomen, fortgeschrittenen Rektumkarzinomen oder speziellen Weichgewebstumoren. Ziel ist die Applikation einer hohen Dosis, während die Risikoorgane aus dem Feld herausgehalten werden können. Oft ist zusätzlich eine postoperative fraktionierte Strahlentherapie notwendig, weil die erforderliche Dosis (z. B. 50 Gy bei Adenokarzinom in der adjuvanten Situation (► Abschn. 9.5) dem gesunden Gewebe nicht auf einmal zugemutet werden kann. Die Höhe der intraoperativen Dosis hängt von der Radiosensibilität der Nachbarorgane und der Größe des Bestrahlungsvolumens ab. Die noch erforderliche Restdosis und Fraktionierung wird nach dem linear-quadratischen Modell (► Abschn. 9.4.7) errechnet, das die biologische Wirksamkeit unterschiedlicher Bestrahlungsprotokolle angibt.

Bei brusterhaltender Operation eines Mammarkarzinoms wird zur Zeit in Studien untersucht, ob ein intraoperativ gegebener Boost mittels Elektronen oder kV-Röntgenstrahlen die postoperative Radiotherapie in bestimmten Fällen ersetzen oder sinnvoll ergänzen kann.

9.3.6 Röntgentherapiegeräte

D. Dohr, C. Marks

Röntgentherapiegeräte findet man leider nur noch selten in radioonkologischen Einrichtungen. Aus epidemiologischen Gründen (die Menschen werden älter und bleiben länger körperlich aktiv) steigt jedoch die Nachfrage. Denn mithilfe dieses Apparates lassen sich typische Erkrankungen des Alters (► Abschn. 9.3.6) sehr gut behandeln.

Zur Radiotherapie im kV-Bereich wird ein konventioneller Röntgenapparat verwendet, der aber mit höherer Spannung als in der Diagnostik ausgestattet ist, sodass die Röntgenstrahlen mit einer Energie zwischen 30–200 kV therapeutisch eingesetzt werden können. Die weiche, niederenergetische Strahlung wird mittels Metallfilter absorbiert, da sie zur Behandlung ungeeignet ist. Mehrere Filter aus Beryllium, Aluminium oder Kupfer mit unterschiedlicher Dicke stehen zur Auswahl. Früher wurden sie per Hand eingelegt, in den neueren Geräten geschieht das automatisch. Über den Filter und die Röhrenspannung wird die Eindringtiefe der Röntgenstrahlen ins Gewebe bestimmt. Auch der Fokus-Haut-Abstand beeinflusst die Dosisverteilung, meistens wird aber von Seiten des Geräteherstellers nur eine Distanz, z. B. 40 cm, zugelassen. Gläserne Tuben fixieren diesen Abstand. Sie sind rechteckig bis ungefähr zu einer Größe von 10 × 15 cm oder rund bis minimal 2 cm Durchmesser. Das obere Ende des Tubus ist am Strahlerkopf eingehängt, das untere Ende des Tubus berührt die Haut des Patienten. Manchmal ist es für eine ausreichende Dosisverteilung auch nötig an einer Körperkontur eine Moulage anzulegen, z. B. um die Spitze des abgewinkelten Ellbogens (► Abschn. 9.3.4).

Indikationen

Entzündlich-degenerative Erkrankungen

Bei vielen Formen von Fersenschmerzen (Achillo-dynie, Fasciitis plantaris, Fersensporn) und anderen entzündlich-degenerativen Erkrankungen, wie z. B. beim Tennisellbogen (Epicondylitis humeroradialis) besteht neben der (altersbedingten) Abnutzungserscheinung eine Entzündung der Weichteile (Bindegewebe, Bänder, Sehnen) mit den klassischen

Merkmale Schmerz, Rötung und Schwellung. In diesen Fällen ist eine Röntgentherapie mit kleinen Einzeldosen zwischen 0,5 und 1 Gy und Gesamtdosen von ca. 6 Gy, auch Reizbestrahlung genannt, sehr effektiv. Beobachtet werden eine Linderung oder eine komplette Rückbildung der Schmerzen, verbunden mit verbesserter Beweglichkeit. Der genaue Wirkmechanismus ist immer noch unerforscht. Wahrscheinlich wird der entzündliche Anteil der Erkrankung durch die Radiotherapie positiv beeinflusst, evtl. durch Wirkung auf die bei Entzündung einwandernden Zellen und Plasmaproteine. Die Schwellung (Ansammlung von Gewebeflüssigkeit) ist rückläufig, das Weichteilgewebe wird vom Druck entlastet und die Entzündung heilt aus.

Hauttumore

Basaliome und Spinaliome, deren operative Entfernung kosmetisch unschöne Ergebnisse liefern würden (z. B. an der Nase, Lippe) oder mit funktionellen Einschränkungen verbunden wären (z. B. am Auge) können mit konventioneller Therapie erfolgreich behandelt werden. Eine Hypofraktionierung, z. B. $1 \times 7 \text{ Gy} / \text{Woche}$ bis 49 Gy ist gut durchführbar und kommt den meistens hochbetagten Patienten sehr entgegen. Andere übliche Schemata sind $3 \times 4 \text{ Gy} / \text{Woche}$ bis 48 Gy oder 52 Gy oder normofraktionierte (Standardfraktion) mit $5 \times 2 \text{ Gy} / \text{Woche}$ bis 60 Gy.

9.3.7 Brachytherapie

D. Dohr, C. Marks

Die bisher beschriebenen Techniken sind alle unter dem Begriff „Teletherapie“ einzuordnen: Die Strahlung wird extern und über eine Distanz von über 80 cm auf den Körper appliziert. Bei der Brachytherapie beträgt der Abstand der Strahlenquelle zum Körper weniger als 10 cm (griech. brachy = kurz, über kurze Strecken, im Gegensatz zu griech. „tele“: weit, über lange Strecken). Es kommen umschlossene radioaktive Substanzen zum Einsatz (► Abschn. 10.5 „Radionuklide in der medizinischen Anwendung“), die eine hohe Dosis in unmittelbarer Nähe und einen steilen Dosisabfall gewährleisten.

Anwendungsformen

Die Brachytherapie kommt in verschiedenen Formen zur Anwendung: **Intrakavitäre** Applikation (lat. cavum = Höhlung) bedeutet, dass das Radionuklid für kurze Zeit in einen Körperhohlraum platziert wird. **Interstitielle** Behandlung heißt, dass das Radionuklid entweder temporär oder permanent im Gewebe liegt. Bei der Kontakttherapie arbeitet man das Radionuklid in einen Träger (Moulage) ein, der für eine gewisse Zeit auf oberflächlichem Gewebe verbleibt.

Intrakavitär

Klassische Indikation für die intrakavitäre Brachytherapie ist die vaginale Applikation zur Bestrahlung des Scheidenstumpfes bei einem Korpuskarzinom. Sie ist aber auch möglich für kleine oberflächliche Karzinome im Ösophagus oder anderen Hohlräumen. Der Transport der radioaktiven Substanz an den Zielort erfolgt ferngesteuert aus einem Bleitresor im sog. Nachladeverfahren (engl. Afterloading). Dazu ist der Bleitresor über einen oder mehrere Schläuche mit dem Applikator verbunden, der seinerseits in die Körperhöhle eingebracht wird. Der Applikator ist meist ein Stab von unterschiedlicher Dicke, angepasst an den Durchmesser des Hohlorgans mit einer oder mehreren Längsbohrungen. Die korrekte Lage des Applikators wird mit einer Röntgenaufnahme (C-Bogen) dokumentiert. Erst wenn das medizinische Personal den Raum verlassen hat, fährt die 1 mm dicke und wenige Millimeter lange Quelle ferngesteuert über die Verbindung in die Längsbohrungen des Applikators und verweilt an einer oder an verschiedenen Positionen, so wie es vorher der Strahlentherapeut gemeinsam mit dem Strahlenphysiker bestimmt hat. Die Isodosenverteilung wird neben der Verweildauer an den unterschiedlichen Positionen auch durch die Form des Applikators beeinflusst. Als Radionuklid wird meist Iridium-192, ein Gamma-Strahler mit einer Halbwertszeit von 74 Tagen, verwendet. Die Dosisleistung des verwendeten Strahlers beträgt $> 10 \text{ Gy/h}$ (High Dose Rate, HDR), sie reduziert sich aber je nach Alter der Quelle (durch die Halbwertszeit) bzw. bereits erfolgten Radionuklidzerfälle. Dies bedeutet, dass die Dauer der einzelnen Sitzungen unterschiedlich sein kann, obwohl immer die gleiche Dosis appliziert wird.

Interstitiell

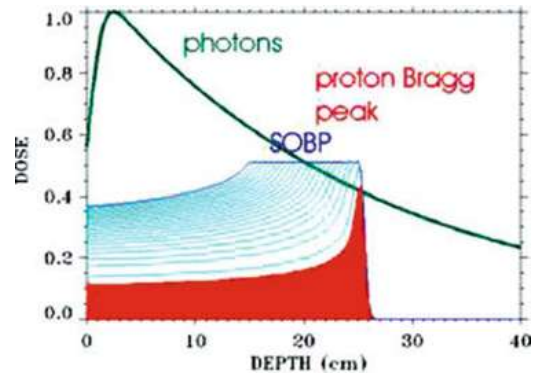
Das Radionuklid wird entweder temporär oder permanent im Gewebe eingebracht. Das Verfahren ist immer mit einer OP und Narkose verbunden. Unter Ultraschallkontrolle werden über Hohlnadeln die Strahlungsquellen aus ^{125}I od (= Seeds) eingeführt, die im Gewebe verbleiben, z. B. in der Prostata bei Karzinomnachweis. Je nach Größe der Prostata liegt ihre Anzahl zwischen 80 und > 100 Stück, ihre Dosisleistung ist niedrig (Low Dose Rate, LDR, < 1 Gy/h), die Halbwertszeit liegt bei 60 Tagen.

Für die temporäre Methode werden intraoperativ mehr oder weniger flexible und mehrere Millimeter dicke Plastikröhrchen mit einer scharfen Metallnadel durch das Gewebe gezogen. Über einen Zeitraum von einigen Tagen werden diese Hohlräume mehrmals mit radioaktivem Material bestückt, meist mit 192 Iridium per Afterloading (► Abschn. 9.3.7). Die Technik kommt bei HNO-Tumoren, bei großen Weichteiltumoren oder als interstitieller Boost beim Analkarzinom oder beim brusterhaltend operierten Mammakarzinom zur Anwendung.

Kontakttherapie

Die Kontakttherapie wird selten durchgeführt, da das zu bestrahlende Areal klein sein und oberflächlich liegen muss. Außerdem wird man mit dieser sehr speziellen Methode nur Tumore behandeln, die nicht auf andere Weise, z. B. mit Elektronen oder konventioneller Röntgentherapie bestrahlt werden können und für die auch eine Operation ausscheidet, da das Narkoserisiko zu hoch ist oder mit funktioneller Einschränkung, z. B. Erblindung zu rechnen ist. Die verwendeten Radionuklide sind Betastrahler mit wenigen Millimetern Reichweite, z. B. 106 Ruthenium, 90 Strontium, 90 Yttrium, die in einem Träger (Schale, Moulage) eingearbeitet sind.

Zur Behandlung eines Aderhautmelanoms am Auge trägt der Patient für mehrere Tage eine millimeterdünne radioaktive Schale, die auf dem Augapfel aufgenäht wurde.



■ **Abb. 9.11** Dosisprofil der Protonen vs. Photonen, rot ist der unmodulierte Protonenstrahl, hellblau der durch verschiedene Energien entstehende tiefenmodulierte Protonenstrahl sog. SOPB (Spread Out Bragg Peak), grün im Vergleich der Photonenstrahl

9.3.8 Partikeltherapie

J. Thiele

Der technische Fortschritt der letzten Jahrzehnte in der Strahlentherapie ist enorm, in ► Abschn. 9.3 wurde über die vielen modernen und hochpräzisen Bestrahlungstechniken der Photonentherapie berichtet. In diesem Teilkapitel wird nun über eine neue Technik, die der Tumorbehandlung dient, geschrieben. Die Partikeltherapie, zu der Protonen und Schwerionen gehören, hat sich in den letzten Jahrzehnten weltweit in der Radioonkologie etabliert. In Deutschland gibt es derzeit 5 Zentren, an denen Patienten mit Schwerionen oder Protonen behandelt werden können. In der Schweiz befindet sich ein Protonentherapiezentrum und in Österreich eine Schwerionenanlage im Bau.

Physikalische Eigenschaften von Protonen und Schwerionen

Der große klinische Vorteil der Protonen- und Ionenstrahlung liegt in deren Dosisprofil (■ Abb. 9.11). Die Eindringtiefe der Protonen im Körper ist exakt begrenzt. Während bei Photonen die Dosis unmittelbar nach dem Eindringen in den Körper abnimmt, verlieren Protonen oder Schwerionen nur eine geringe Dosis zwischen Körperoberfläche und Tumor. Daher kann nahezu die gesamte Dosis am Ende einer definierten Reichweite abgegeben werden,

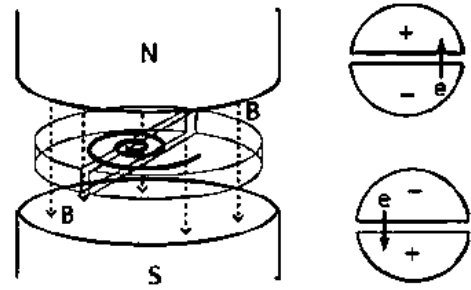
dieses Dosismaximum ist der sog. „Bragg Peak“. Nach Erreichen des Maximums fällt die Dosis hinter dem Tumor innerhalb von Millimetern auf Null ab. Aufgrund dieses steilen Dosisabfalls ist es möglich, eine hochpräzise Dosisverteilung zu erzeugen, um das umliegende gesunde Gewebe und die angrenzenden Risikoorgane noch besser zu schonen. Der Vorteil der Partikeltherapie findet vor allem in der Kinderonkologie großen Anklang. Das Risiko eines strahleninduzierten Zweitumors wird durch die deutlich bessere Dosisverteilung, vor allem im Niedrigdosisbereich, erheblich reduziert.

Strahlenqualität und relative biologische Wirksamkeit

In der Partikeltherapie spielt der Lineare Energietransfer (LET), also der Energieübertrag eines Teilchens, eine entscheidende Rolle. Der Begriff LET ist in dem ICRU Report 16 (1970) genau definiert, er beschreibt den Energieverlust pro Wegstrecke. Treffen Protonen oder Schwerionen auf Materie kommt es zu Ionisationen, durch diese Ionisationen entstehen Sekundärelektronen. Die Strahlenqualität und die relative biologische Wirksamkeit (RBW) sind abhängig vom LET der jeweiligen Strahlung. Man unterscheidet locker ionisierende Strahlung (niedriger LET) von dicht ionisierender Strahlung (hoher LET), ein hoher LET hat demnach eine höhere biologische Wirksamkeit, als der niedrige LET (► Abschn. 2.2). Berechnet wird er meist für Wasser als Gewebeäquivalent und wird in der Einheit keV/μm angegeben,

Der Begriff relative biologische Wirksamkeit (RBW oder RBE, engl. relative biologic effectiveness) wurde ebenfalls von der ICRU im Report 40 (1986) definiert. Sie ist der Quotient aus der Dosis für Röntgen- und Teilchenstrahlung für einen definierten Effekt $RBW = D \text{ Röntgen} / D \text{ Teilchen}$. Die Definition relative biologische Wirksamkeit wird in den meisten biologischen Strahlenreaktionen angewendet (► Abschn. 2.2).

Protonen zählen zu den Niedrig-LET-Strahlen. Ihre relative biologische Wirksamkeit liegt bei 1.1, das entspricht ungefähr dem Wert von Photonen und Gammastrahlen, deren RBW bei 1 liegt. Schwerionen mit einem hohem LET haben eine RBW von 2–4. Die Dosis wird in Gray Equivalent (GyE) oder in RBE (relative biologic effectiveness) angegeben.



■ **Abb. 9.12** Prinzip und System der Zyklotron-, Magnetfeld B biegt Partikelbahn in eine kreisförmige Umlaufbahn und einem elektrischen Wechselfeld über zwei „Dees“ angewendet beschleunigt Teilchen (Dee = Kupferspule)

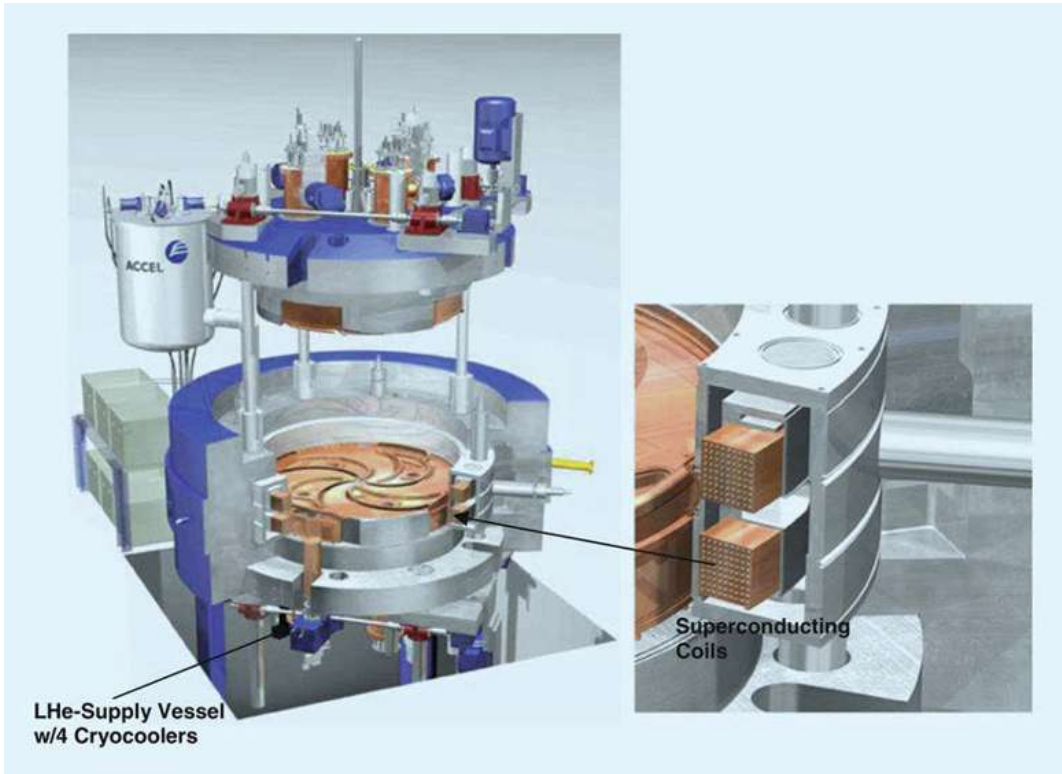
Wenn zum Beispiel mit Protonen eine Dosis von 60 GyE gegeben wird, müsste man mit Photonen 66 Gy (10 % mehr) applizieren um den gleichen biologischen Effekt zu erreichen.

Zyklotron und Synchrotron

■ Zyklotron (lat.: *cyclus* Kreis, *Umlauf*)

Es gibt zwei verschiedene Möglichkeiten, Teilchen zu beschleunigen. In der alleinigen Protonentherapie wird das kompakte Zyklotron eingesetzt. Hier können Energien von 70–250 MeV erzeugt werden. In ■ Abb. 9.12 und ■ Abb. 9.13 wird das Prinzip und System der kreisförmigen Beschleunigung bildlich dargestellt: Das Kernstück ist ein runder Vakuumbehälter, in dem zwei Elektroden (Duanden) als D-förmige Kammern wie die zwei Hälften einer durchgeschnittenen Torte in einer runden Kuchenform liegen. In der Zwischenritze sitzt die Ionenquelle. Sie gibt Protonen, die aus Wasserstoffgas in einem elektrischen Verfahren gewonnen wurden, in das Vakuum ab. Im Vakuumbehälter herrscht senkrecht zur Duanden-Ebene ein Magnetfeld. Darin werden die Protonen sofort kreisförmig beschleunigt und zwar durch die Lorentzkraft, die immer dann auftritt, wenn stromdurchflossene Leiter (Elektroden = Duanden) sich in einem Magnetfeld befinden. Den Stromdurchfluss gewährleistet man, indem zwischen den Duanden eine (Wechsel-) Spannung anliegt.

Die Protonen werden auf ca. 184.000 km/h beschleunigt, das entspricht etwa 60 % der Lichtgeschwindigkeit, und in die sog. „Beamline“ oder auch



■ **Abb. 9.13** Schematische Darstellung der 250 MeV-Zyklotron-SC von Accel / Varian, Gewicht ca. 90 t, 300 kW, supraleitende Magnetspule 2.4–3.8 T, das Durchmesser beträgt 3.5 (p)–6 m (c)

Strahlrohr elektrostatisch extrahiert (■ **Abb. 9.14**). Die „Beamline“ ist ein Vakuumrohr, in der der Strahl mithilfe von Magneten „transportiert“ und gelenkt wird. In vielen Zentren bedient eine „Beamline“ mehrere Arbeitsplätze, d. h. man kann nicht gleichzeitig in 2 Räumen bestrahlen, sondern muss warten, bis der Strahl von einem zum anderen Arbeitsplatz umgeleitet wird. Dies geschieht allerdings in wenigen Sekunden.

■ **Synchrotron (synchron: gleichzeitig)**

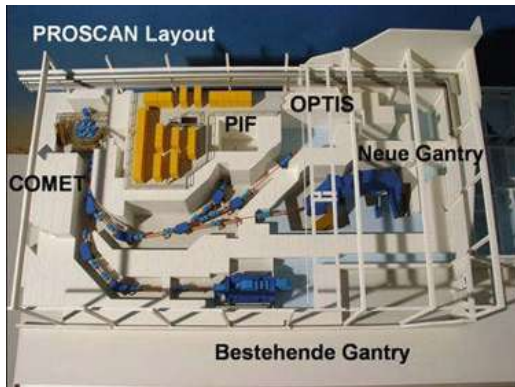
Anders als beim Zyklotron werden die Teilchen über einen Vorbeschleuniger (Injektor) in das Synchrotron eingespeist. Hier werden die geladenen Teilchen auf einer Kreisbahn beschleunigt, entsprechend große Umlenkmagneten führen die Teilchen. Zum Beschleunigen auf der geraden Strecke zwischen den Magneten dienen hochfrequente elektrische Wechselfelder innerhalb sog. Hohlraumresonatoren. Das Beschleunigungsrohr ist ebenfalls

ein Hochvakuumrohr. Die Geschwindigkeit der Teilchen nimmt bei der Beschleunigung zu, somit muss die die Stärke des Magnetfeldes so geregelt werden, dass die Teilchen auf einer geschlossenen Bahn umlaufen. Das Magnetfeld muss synchron zu der Geschwindigkeit der Teilchen geändert werden. Dieses Prinzip macht es möglich, dass nicht nur Protonen, sondern auch schwere Ionen, wie das Kohlenstoff-12 auf sehr hohe Energien beschleunigt werden können. Wie auch beim Zyklotron werden die Teilchen über eine „Beamline“ zum Patienten geleitet. Das Synchrotron hat ein Durchmesser von ca. 25 m und kann Energien bis 500 MeV erzeugen.

Bestrahlungstechniken

■ **Scattering oder Streufolientechnik**

Das Scattering (Streuung) wird nur in der Protonentherapie angewandt. Je nachdem, welche Indikation zur Bestrahlung gestellt wird, unterscheidet man zwischen single Scattering oder double Scatte-



■ **Abb. 9.14** Am Ausgang des Zyklotrons (Comet) befindet sich der Extraktor hier werden die Protonen in die „Beamline“ extrahiert, die „Beamline“ ist eine Vakuumröhre. Weitere wichtige Komponenten sind die Magneten (1,1 T) die die Protonen fokussieren und umlenken, der Degradier schwächt die Protonen auf die gewünschte Energie ab und befindet sich gleich am Anfang der „Beamline“. In der Anlage Proscan vom PSI werden derzeit zwei Gantries und ein horizontal Arbeitsplatz bedient

ring. Für das single Scattering wird eine Streufole in den Strahlengang gefahren, diese „streut“ den Strahl nur gering auf. Dementsprechend können nur kleine Zielvolumina behandelt werden, wie z. B. Augentumore oder kleine Metastasen.

Um größere Zielvolumina zu behandeln, wie z. B. Kopftumore, bedarf es einer zweiten Streufole, die den Strahl ein zweites Mal „streut“, hier spricht man von der double Scattering Technik.

Der Strahl ist monoenergetisch, d. h. er hat nur eine definierte Energie, für die Energiemodulation des Strahls gibt es die sog. Modulatorräder. Diese bestehen aus unterschiedlich dickem Plexiglas, welche sich ganz schnell drehen und die Tiefenmodulation bestimmen. Um den Tumor in allen Dimensionen, (Länge, Breite und Tiefe) zu bestrahlen, werden am Ende des Strahlrohres ein Reichweitenkompensator aus Plexiglas und eine Apertur aus Messing manuell in den Strahlengang geschoben. Diese werden patienten- und feldspezifisch je nach Tumorform angefertigt. Der große Vorteil der Scattering-Technik ist die „robuste“ Dosisapplikation, bewegte Organe lassen sich leichter erfassen und bestrahlen.

■ Scanning-Technik

Bei dieser Technik wird der bleistiftdicke Strahl (Pencil Beam) mithilfe von Magneten Punkt für

Punkt auf den Tumor gelenkt, der Tumor wird Schicht für Schicht gescannt. Die Energieänderung für jede einzelne Schicht erfolgt mit dem Degradier (Abschwächer). Er befindet sich am Ausgang des Zyklotrons und reagiert in Bruchteilen von Sekunden. Die dreidimensionale, homogene und hochpräzise Applikation der Strahlendosis wird durch Überlagern der Spots im Tumor erreicht: Die Bestrahlung dauert nur wenige Minuten und ist abhängig vom Tumolvolumen.

Eine zweite Scanning Technik, das sog. Uniformscanning beinhaltet eine Applikation des Strahls ähnlich dem der Scattering Technik. Der Strahl wird mithilfe von Magneten gelenkt, aber da dieser Strahl ebenfalls monoenergetisch ist, bedarf es einer Reichweitenmodulation. Für die Feldmodulation wird ein individueller Reichweitenkompensator und eine Apertur in den Strahlengang geschoben.

Klinische Anwendungen

Ob die teurere Partikeltherapie wirklich von neuem wertem Vorteil gegenüber der Photonentherapie ist, wird sich in den nächsten Jahren herausstellen. Die klinische Forschung muss hier die Erwartungen durch Studienergebnisse beweisen.

Anerkannte Indikationen, die von den Krankenkassen bezahlt werden sind Aderhaut- und Iris melanome, Chordome und niedriggradige Chondrosarkome der Schädelbasis, Meningeome und einige Kopf-Hals Tumore. Tumore im Kindesalter sollen nur im Rahmen von Studienkonzepten behandelt werden.

Die Arbeitsabläufe in der Partikeltherapie

Auf dem ersten Blick sind die Arbeitsabläufe und Organisationseinheiten in der Partikeltherapie ähnlich dem der Strahlentherapie mit Photonen. Um einen reibungslosen Ablauf zu garantieren, ist eine gute Zusammenarbeit zwischen Ärzten, Medizinphysikexperten, MTRA, Techniker, Informatiker und Wissenschaftlern von großem Vorteil. Häufig werden die Aufgaben fachübergreifend verteilt, so unterstützt z. B. die MTRA die Physiker bei der Qualitätssicherung und Therapieplanung.

Die täglichen Qualitätssicherungen sind aufwändiger und zeitintensiver als an einem Linear-

beschleuniger – gutes Zeitmanagement spielt hier eine bedeutende Rolle. Da der Strahl in vielen Partikeltherapien mehrere Arbeitsplätze bedient, muss die Terminierung mit den Kollegen abgesprochen werden. Nicht selten werden die Arbeitsplätze nach dem Patientenbetrieb für Messungen und Forschung genutzt.

■ **Verordnung, Vorbereitung und Lokalisation**

Die Vorbereitung für die Bestrahlung des Patienten beginnt schon mit der Terminierung. Da die Behandlung in speziellen Zentren erfolgt, sollten die Patiententermine so aufeinander abgestimmt sein, dass der Patient möglichst alle vorbereitenden Untersuchungen und Gespräche an einem Tag bekommt, somit kann der Patient bis zum Therapiestart noch einmal nach Hause fahren.

Nach dem ausführlichen Patientengespräch füllt der Arzt die Bestrahlungsverordnung aus. Auf dem Verordnungsbogen müssen die rechtfertigende Indikation, die Gesamt- und Einzeldosis stehen. Um Verwechslungen auszuschließen, wird die Dosis in GyE (Gray Equivalent) oder RBE (relative biologische Effektivität) angegeben. Die Behandlung erfolgt meistens ambulant und einmal täglich. Die Patienteneinwilligung muss vor dem Therapiestart vorliegen.

Was die Immobilisation des Patienten betrifft, so wird das Rad nicht neu erfunden. Wichtig ist, dass der Patient reproduzierbar bequem und hochpräzise gelagert wird. Ebenfalls sollte so wenig wie möglich Material im Strahlengang liegen (Atemschläuche, Katheter, Kleidung). Das Gewicht des Patienten muss wöchentlich gemessen und notiert werden. Zu viel Material im Strahlengang und Gewichtsveränderungen können sich negativ auf die Dosisverteilung auswirken.

Die Dichte des zu bestrahlenden Organs ist entscheidend für die Reichweite der Protonen, die Kalibrierungskurve des Planungs-CT wird daher mit ins Planungsprogramm eingespielt und regelmäßig überprüft. Parameter wie kV, mAs und FOV dürfen nicht verändert werden.

Ebenfalls gut für eine perfekte Dosisverteilung der Protonen, ist ein möglichst geringer Luftspalt zwischen Strahlaustritt und Patientenoberfläche. Um eine Kollision an der Gantry zu verhindern ist es daher wichtig die Bestrahlungsregion des Patienten mit kompletter Lagerungshilfe zu scannen.

■ **Therapieplanung**

Das Planungs-CT wird in das Planungsprogramm eingespielt, für das Konturieren der Bestrahlungsregion sollte immer die bestmögliche Bildgebung z. B. MRT oder PET-CT vorliegen, dieses wird dann mit dem Planungs-CT fusioniert. Ist das CTV, GTV und PTV vom dem Arzt eingezeichnet, kann der Medizinphysikexperte oder Dosimetrist die Bestrahlungsplanung durchführen. Hier ist es entscheidend zu wissen, welche Technik angewendet wird. Zur Erinnerung, für das Scattering und Uniformscanning bedarf es eines individuellen Reichweitenkompensators und einer Apertur für jedes Feld. Man sollte daher mit wenig Einstrahlwinkeln arbeiten. Die Reichweite der Protonen ist stark von der Dichte des zu bestrahlenden Organs abhängig. Wird sie durch Gewichtsunterschiede oder durch anatomische Veränderungen beeinflusst, kann sich dies negativ auf die Dosisverteilung auswirken. Sollten z. B. die Nasennebenhöhlen im Strahlengang liegen, muss der Füllungszustand regelmäßig überprüft und bei Veränderung gegebenenfalls neu geplant werden.

■ **Behandlungsdurchführung**

Am ersten Behandlungstag muss die Patienteneinwilligung vorliegen.

Jedes Zentrum hat hier seine eigenen Arbeitsabläufe, wöchentliche Gewichtskontrollen und tägliche IGRT sind aber Standard. Eine Behandlung dauert ca. 20–30 min, die meiste Zeit wird hier für das Positionieren des Patienten und Verifizieren der Lagerung benötigt. Die Patiententermine sollten auch mit den Kollegen der Anästhesie abgestimmt werden. Kleine Kinder werden in Narkose bestrahlt, dementsprechend müssen die Nüchternzeiten eingehalten werden.

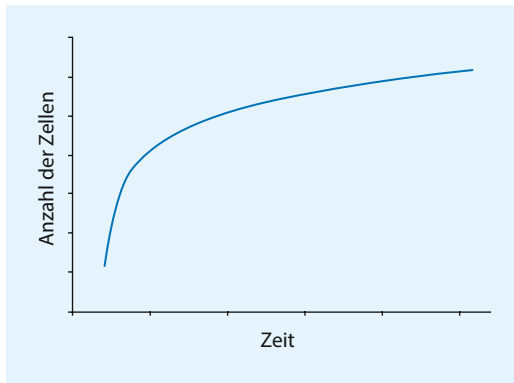
9.4 Tumorpathologie

D. Dohr

9.4.1 Ursprung und Wachstum der Krebszelle

Merkmale einer bösartigen Zelle

Der Ursprung eines malignen Tumors liegt in der Umwandlung einer normalen, gesunden Zelle in



■ Abb. 9.15 Tumor-Wachstumskurve nach Gompertz

eine „entartete“, bösartige Zelle. Dies geschieht am häufigsten während des Prozesses der Zellteilung. Wenn die Ursprungs-Tumorzelle weiterhin die Fähigkeit besitzt, sich wie eine normale Zelle zu teilen und zu vermehren (■ Abb. 9.15), entsteht nach einigen Zyklen ein Knoten. Der Tumor nimmt anfangs sehr rasch an Größe zu. Das Wachstum verläuft exponentiell (aus 2 Zellen werden 4 Zellen, aus 4 Zellen werden 16 Zellen), da sich viele Zellen in der Teilungsphase bzw. Wachstumsphase befinden (► Abschn. 9.5). Das Tempo verlangsamt sich aber, sobald nicht mehr alle Tumorzellen mit Sauerstoff versorgt werden können, weil die Neubildung von Blutgefäßen (Angiogenese) der Tumorzellbildung hinterher hinkt und somit sterben Zellen ab (► Abschn. 9.4.6). Typischerweise trifft es am stärksten die Zellen im Tumorzentrum, erkennbar an den dortigen Nekrose-Zonen. Im Vergleich zu einem gutartigen Tumor führt ein maligner Tumor sehr viel schneller und häufiger Zellteilungen durch, da die Krebszelle während der Umwandlung Eigenschaften erworben hat, die die normalen Mechanismen einer Zelle wie z. B. Respektierung von Wachstumssignalen außer Kraft setzen.

Unterschiede zwischen gutartigen und bösartigen Zellen

Nicht alle Raumforderungen sind maligne – auch gutartiges Gewebe kann verstärkt aktiv sein und Tumore bilden. In ■ Tab. 9.1 sind die Kriterien zur Unterscheidung zwischen einem bösartigen und einem gutartigen Tumor aufgeführt.

Unterscheidung der bösartigen Tumore nach Gewebetyp

Wenn man von Krebs spricht, ist damit ein bösartiges Tumorleiden gemeint. Im medizinisch-wissenschaftlichen Bereich unterscheidet man allerdings genauer nach Ausgangsgewebe. Für die malignen Neoplasmen aus den folgenden 3 Gewebetypen existieren unterschiedliche Therapien, und sie werden nach unterschiedlichen Klassifikationen eingeteilt (► Abschn. 9.4.4).

Karzinome bilden sich aus Epithelzellen

Damit bezeichnet man Gewebe, die die Oberfläche bedecken oder Organe auskleiden, also Haut und Schleimhaut. Der Rachen ist mit Plattenepithel ausgestattet, Magen und Darm besitzen Schleimhäute mit Drüsen und die Harnblase Urothelzellen. Dementsprechend finden wir im HNO-Bereich ein Plattenepithelkarzinom, im Verdauungstrakt ein Adenokarzinom und in den harnableitenden Organen ein Urothelkarzinom.

Sarkome bilden sich im Weichteilgewebe (Muskel, Fett, Binde- und Nervengewebe) und Stützgewebe (Knochen, Knorpel)

Oft ist das Ursprungsgewebe im Tumornamen erkenntlich: Das Fibrosarkom entwickelt sich aus fibrösem Bindegewebe, das Liposarkom aus Fett, das Angiosarkom aus Blutgefäßen, das maligne Schwannom aus peripherem Nervengewebe, das Rhabdomyosarkom aus quergestreifter Skelettmuskulatur, das Leiomyosarkom aus der glatten Eingeweidemuskulatur, das Osteosarkom aus Knochen und das Chondrosarkom aus Knorpel.

Leukämien und Lymphome sind bösartige Erkrankungen des Blutes und der blutbildenden Zellen

Die Leukämie wird im Knochenmark diagnostiziert. Sie verändert die weißen Blutzellen bzw. die Blutzell-Zusammensetzung, und sie kann auch die Leber, die Milz und das zentrale Nervensystem befallen. Man unterscheidet nach dem Verlauf in akut und chronisch und ob die Lymphozyten (lymphatisch) oder die Granulozyten (myeloisch) betroffen sind.

Die Lymphome, umgangssprachlich Lymphdrüsenkrebs, sind Erkrankungen des lymphatischen

■ **Tab. 9.1** Unterschiede zwischen gutartigen und bösartigen Zellen

	Benigne	Maligne
Wachstum	Langsam, expansiv, die Umgebung verdrängend, mit Kapselbildung	Rasch, destruktiv und infiltrativ, Nachbar-gewebe zerstörend, ohne Kapselbildung
Ausbreitung	Respektiert Organgrenzen, keine Absiedelungen in Lymphknoten oder andere Organe	Einbruch in Lymphgefäße Blutgefäße, Perineuralscheiden, bildet Metastasen in anderen Organen
Verhalten nach Operation	Selten Rezidiv	Sehr oft Rezidive und Metastasen
Histopathologi-sche Merkmale		► Abschn. 9.4.2, ► Abschn. 9.4.2

Systems. Am häufigsten sind die Lymphknoten befallen. Der extralymphatische Befall in Organen tritt dagegen seltener auf. Die Lymphome werden in 2 Gruppen unterteilt: Das Hodgkin-Lymphom, bei dem sich die spezielle Hodgkin-Zelle nachweisen lässt und das sich im Wachstum und Verlauf deutlich abgrenzt von der anderen Gruppe der Non-Hodgkin-Lymphome.

9.4.2 Histo-pathologische Begutachtung

Gewinnung von Untersuchungsmaterial

Die endgültige Entscheidung, wie ein Tumor ein-zustufen ist, trifft der Pathologe am Gewebe bzw. an den Zellen. Mit dem Wattebausch oder einer speziellen Bürste streicht man z. B. in der gynäko-logischen Untersuchung oder in einer Bronchosko-pie oberflächliche Zellen des Tumors ab (Abstrich). Aussagekräftiger sind allerdings Proben, die aus Biopsien stammen. Man sticht mit einer Nadel in das Weichteil, z. B. in einen verdächtigen Knoten in der Brust oder über den Enddarm in die Prostata und gewinnt einen Gewebezylinder. Die Probe wird in hauchdünne Scheiben geschnitten, angefärbt und durch den Pathologen beurteilt.

Merkmale für Malignität, die der Pathologe unter dem Mikroskop erkennt

Normalgewebe stellt sich typisch, also immer gleich dar, hat wenig Mitosen und keine Zellkernatypien

(anormale Zellkerne). Dagegen hat sich das Gewebe eines bösartigen Tumors stark gegenüber dem Aus-gangsgewebe verändert. Im schlimmsten Fall kann man gar nicht mehr erkennen, aus welchem ur-sprünglichen Organ (z. B. Prostata, Harnblase) der Tumor abstammt. Das Bild ist unruhig: Zellen und Zellkerne haben sehr viele unterschiedliche Formen. Die sehr großen Zellkerne besitzen viele Nukleolen (Kernkörperchen), weisen eine (abnormal) erhöhte Mitose-Rate auf und lassen sich verstärkt anfärben.

Immunhistochemische Merkmale

Spezielle Untersuchungen, die man am Gewebe vor-nehmen kann, geben weitere Aufschlüsse über das Wachstums- und Absiedelungsverhalten. Die Er-kenkung gewisser Proteine auf der Oberfläche oder im Innern der Tumorzellen hilft oft entscheidend weiter, die Erkrankung zu charakterisieren.

Mit dem immunhistologischen Nachweis von TTF-1 (Thyroidaler Transkriptionsfaktor 1) in Tumorzellen lässt sich ein primäres Lungenkarzinom gegenüber einer Lungenmetastase abgrenzen. Follikuläre Lym-phome sind immunologisch gekennzeichnet durch eine hohe Expression des CD20-Antigens.

Nicht nur in der Diagnostik, auch in der Therapie spielen immunologische Ansätze eine immer grö-ßere Rolle.

Weist man in Brustkrebs-Zellen das Antigen Herceptin nach, bedeutet das, dass die Erkrankung aggressiver verlaufen wird als bei Herceptin-Negativität. Anderer-seits ist gerade in diesem Fall die Therapie mit Anti-

körpern, die exakt darauf ausgerichtet ist, erfolgreich in der Tumorzellvernichtung.

9.4.3 Krebsentstehung

Mechanismen der Krebsentstehung

Warum in unserem Körper Krebszellen entstehen, ist noch immer nicht vollständig gelöst. Man glaubt, dass viele Faktoren zusammen kommen müssen (wie in einem Puzzle), damit sich die Erkrankung manifestiert. Gleichzeitig besitzen wir mit unserem Immunsystem einen Mechanismus, der in der frühen Phase der Krebszell-Entwicklung gegensteuern kann. Das Immunsystem ist in der Lage, schadhafte Zellen, die während eines Zellteilungszyklus durch einen fehlerhaften Prozess entstanden sind, auszusortieren. Es funktioniert wie die Kontrollinstanz am Ende eines Produktions-Fließbandes in einer Fabrik. Fällt diese Überwachung ganz oder teilweise aus, können fehlerhafte Zellen weiter existieren, Zellteilung machen und sich zu bösartigen Tumoren entwickeln.

Ein hoher Anteil der Krebserkrankungen kann durch eine gesunde Lebensweise vermieden werden. Die Erfahrung lehrt uns, welche Faktoren, auf die wir teilweise Einfluss nehmen können, die Krankheits-Entstehung begünstigen. Um immer mehr Wissen über Krebs und seine Behandlung zu sammeln und auszuwerten, ist es deshalb wichtig, alle Daten in Krebsregistern aufzunehmen.

Risikofaktoren für Krebsentstehung

Erworbene Risikofaktoren

Nikotin begünstigt die Umwandlung der gutartigen Zelle in eine bösartige. Es ist häufigster Auslöser des Lungenkrebses (Altersgipfel um das 60. Lebensjahr, der typische Patient hat 40 Jahre lang zirka 20 Zigaretten täglich geraucht).

Alkohol, vor allem der Konsum hochprozentiger Spirituosen in Kombination mit Nikotin wird für HNO- und Ösophaguskarzinome verantwortlich gemacht.

Adipositas bzw. körperliche Untätigkeit spielen eine Rolle bei der Entwicklung und Rezidivierung des Brustkrebses.

Geographische Faktoren

Sonnenexposition erhöht die Gefahr für Hautkrebs.

Ernährung mit hohem Fleischkonsum und hohen Anteilen von gesättigten und einfach gesättigten Fetten birgt die Gefahr von Darmkrebs.

Die genannten Faktoren werden als geographische Faktoren bezeichnet, da sie auf der Weltkarte „zugeordnet“ werden können. So ist besonders in den Industrieländern eine Zunahme der Darmkrebserkrankungen durch eine fleischreiche Ernährung zu beobachten.

Erbliche Faktoren

Familiäre Häufung von Krebserkrankungen gibt Anlass zu regelmäßigen Kontrolluntersuchungen bei den Betroffenen (z. B. Brustkrebs in der 3. Generation). Gene im Erbgut des Menschen können sich verändern (Mutation). Auf dem langen Arm des Chromosoms 17 wurde z. B. ein Gen entdeckt, das bei Mutation für die betroffene Frau ein höheres Risiko birgt an Brustkrebs zu erkranken im Vergleich zu Frauen ohne diese Mutation. Das Gen wird BRCA-1 genannt (für englisch **BR**east**CA**ncer und 1, weil es das 1. Brustkrebsgen ist, das entdeckt wurde. Man kennt inzwischen auch BRCA-2 und weitere). Aber nicht alle Träger dieses Defektes erkranken zwangsläufig an Krebs. Bei familiärer Krebs-Belastung wird ein Gentest bei den Erkrankten und deren engen Blutsverwandten angeraten, da eine solche Mutation vorliegen könnte. Weist man ein mutiertes BRCA-1 Gen nach, kommen verschiedene präventive Maßnahmen in Betracht (engmaschige Vorsorge, gesunder Lebensstil).

Exogene Krankheitsursachen

■ Chemische Kanzerogene

Bestimmte Schadstoffe in der Umwelt oder am Arbeitsplatz können Krebs verursachen.

Bauarbeiter, die mit Asbest in Berührung gekommen sind, erkranken sehr häufig an einem Mesotheliom, einem bösartigen Tumor der Pleura. Das Material ist in Deutschland inzwischen verboten. Bei Erkrankung übernimmt die Berufsgenossenschaft die Kosten der Behandlung.

■ Virale Onkogene

Krebs ist nicht ansteckend. Es gibt jedoch eine Reihe von verschiedenen Viren für andere Erkrankungen, die die Entstehung von Krebs fördern können. Bis-

her gibt es für HNO-Tumoren, beim Analkarzinom und Gebärmutterhalskrebs Belege für diesen Zusammenhang.

Eine Infektion mit HPV (Humane Papillomviren) erhöht das Risiko für Gebärmutterhalskrebs. Für mindestens 70% aller Fälle von Gebärmutterhalskrebs ist die Infektion mit humanen Papillomviren (HPV) verantwortlich. Solange man den Virus nicht in sich trägt, kann man sich dagegen impfen lassen und so das Risiko für die Krebserkrankung reduzieren. Ein Impfstoff gegen HPV 16 und 18 sowie gegen HPV 6 und 11 schützt gegen eine Neuinfektion. Da aber 25% der Gebärmutterhalskrebserkrankungen durch HPV-Typen verursacht werden, die nicht im Impfstoff enthalten sind, ist eine regelmäßige Vorsorge mit Abstrich vom Muttermund (Portio) weiterhin unerlässlich. Nach dem heutigen Wissensstand hält der Impfschutz mindestens 8 Jahre. Ob und wann eine Auffrischimpfung nötig ist, wird zurzeit in Studien untersucht (Merkblatt Eidg. BGA).

■ Physikalische Einflüsse

Auf der Erde sind wir der natürlichen und immer mehr der zivilisatorischen Strahlenexposition ausgesetzt.

Radon ist ein radioaktives Edelgas, das beim Zerfall von Uran im Erdreich entsteht. Radonfolgeprodukte schweben in der Atemluft, geraten beim Einatmen in die Lunge und können zu Lungenkrebs führen. Zur Energiegewinnung wird seit zirka 1950 der Prozess der Kernspaltung durchgeführt, bei dem radioaktive Stoffe anfallen.

Die CT-Diagnostik entwickelte sich zum vielfältigen und präzisen Instrument und wird deshalb häufiger eingesetzt als noch vor 20 Jahren.

■ Natursubstanzen

Hormonelle Faktoren betreffen vor allem Frauen. Die Einnahme von Östrogenen/Gestagenen schiebt die Veränderungen der Wechseljahre hinaus, erhöht aber das Risiko für Brust- und Gebärmutterkrebs.

Alter

Fast alle Krebsarten treten bei älteren Menschen sehr viel häufiger auf als bei Jüngeren. Auf einen unter 15-jährigen, der eine Krebsdiagnose erhält,

kommen 200–300 über 80-jährige. Der Grund könnte in der Akkumulation schädlicher Umwelteinflüsse oder auch in der höheren Fehlerrate beim Zellteilungszyklus liegen.

Epidemiologie

Aus o.g. Gründen ist die Häufigkeit von Krebserkrankungen in verschiedenen Ländern sehr unterschiedlich, je nach Geographie (z.B. Ozon bzw. Sonnenexposition in Australien), Gebräuchen (Rauchgewohnheit, Still-Verhalten der Mütter) und Ernährungsgewohnheiten (Pökelfleisch-Nitrate in asiatischen Ländern), als Summe auch „Life-Style“ genannt: Wenn Japanerinnen in die USA auswandern, ändert sich ihr geringes Brustkrebsrisiko kaum. Das Risiko ihrer Töchter und noch mehr ihrer Enkelinnen, an Brustkrebs zu erkranken, nähert sich jedoch dem hohen Brustkrebsrisiko amerikanischer Frauen an. Die Vermutung liegt nahe, dass die Ursache in der Adaption an den nordamerikanischen Lebensstil liegt (höheres Alter bei erster Geburt, Kinderlosigkeit, kalorienreiche Ernährung, hoher Alkoholkonsum).

Die häufigsten Krebsarten in Deutschland

Nach Angaben der Deutschen Krebsgesellschaft im Jahr 2007/2008 sind die häufigsten Krebsarten bei der Frau das Mammakarzinom und beim Mann das Prostatakarzinom.

Danach folgen kolorektale Karzinome und Lungenkarzinome, unabhängig vom Geschlecht.

9.4.4 Tumorklassifikationen

Tumorklassifikationen sind Einstufungen, die in einer Formel aus Zahlen und Buchstaben beschreiben, wie sich der Tumor ausgebreitet hat und wie weit fortgeschritten die Erkrankung ist.

TNM-Klassifikation

Weltweit hat sich die Beschreibung der Karzinomausdehnung gemäß der TNM-Klassifikation eingebürgert. Diese „Kurzschrift“ wurde von Pierre Denois 1943–1952 erfunden. Ihr Hauptzweck besteht darin, die Tumorsituation anderen auf eindeutige Weise mitzuteilen. Die Gruppeneinteilung (z.B. T1 oder T2) ist nicht willkürlich, sondern basiert auf

statistischen Auswertungen über die Krankheitsprognose. Dementsprechend bestimmt das TNM-Stadium auch die Therapie.

Bei einem Harnblasenkarzinom T1a ist eine transurethrale Abtragung der Schleimhaut mit anschließender Installation einer Chemotherapie intravesikal ausreichend. Bei T2 wird dagegen ein größerer Eingriff, eine Zystektomie oder eine Radiochemotherapie empfohlen.

In regelmäßigen Abständen aktualisiert die Union internationale contre le cancer (UICC) die TNM-Klassifikation nach den neuesten statistischen Erkenntnissen.

- **T steht für die Ausdehnung und das Verhalten des Primärtumors.**
- **N beschreibt das Fehlen bzw. Vorhandensein von regionären Lymphknotenmetastasen.**
- **Der Zusatz *sn* gibt den / die Schildwächterlymphknoten an (erster Lymphknoten, der die abfließende Lymphe des Primärtumors aufnimmt, engl. „sentinel node“). Je nachdem, ob er tumorfrei ist, kann auf eine größere Operation der Lymphknotenregion verzichtet werden.**
- **M erklärt, ob Fernmetastasen existieren.**

Pathologische versus klinische Klassifikation

Stammt die Information zur TNM-Einteilung aus klinischen Untersuchungen, wie Inspektion, Palpation, Bildgebung, Endoskopie, Biopsie wird vor den TNM-Komplex ein „c“ gestellt.

Das pTNM ist die postoperative histopathologische Klassifikation. Die darin verschlüsselten Informationen hat man durch einen chirurgischen Eingriff bzw. die pathologische Untersuchung gewonnen. I. d. R. wird das cTNM im Verlauf ergänzt oder abgeändert auf das pTNM und bleibt – einmal festgesetzt – in den medizinischen Aufzeichnungen unverändert.

Histopathologisches Grading

Die Abstufung (Gradeinteilung oder engl. grading), wie weit sich Tumorgewebe von seinem Ur-

sprungsgewebe unterscheidet und wie aggressiv es wächst, wird nach Kriterien vorgenommen, die der Pathologe unter dem Mikroskop beurteilt nach einem Vorschlag der WHO. Es sind maßgebend: Die Größe und Form der Zellkerne, die Ähnlichkeit mit dem Normalgewebe, die Schwere der Zellatypien, die Zahl der Mitosen, der Zellreichtum.

Gradingstufen

- G1 = gut differenziert (viele Charakteristika des Ausgangsgewebes)
- G2 = mäßig differenziert (stärker verwildert)
- G3 = schlecht differenziert (Herkunftsgewebe schlecht zu bestimmen)
- G4 = undifferenziert (Herkunftsgewebe nicht mehr zu bestimmen)

Allerdings wurden für viele Tumore eigene Kriterien erarbeitet, die gemäß der Leitlinien dem allgemeinen histopathologischen Grading vorgezogen werden sollen. Beispiele: Beim Prostatakarzinom wird das Grading in Form des Gleason-Score angegeben (► Abschn. 19.3.2 Prostata). Das Mammakarzinom wird nach dem Vorschlag von Elston und Ellis klassifiziert.

Zusätzliche Kennzeichen: Symbole m, y, r

Der Buchstabe „m“ wird benutzt, um multiple Primärtumore in einem anatomischen Bezirk anzuzeigen. Rezidivtumore nach krankheitsfreiem Intervall werden mit dem Buchstaben „r“ gekennzeichnet. Bei der Klassifikation nach dem Abschluss medizinischer Maßnahmen, die zur Vorbereitung für eine endgültige Tumorthherapie durchgeführt wurden (neoadjuvant), wird der Buchstabe „y“ vor das TNM gesetzt.

Durch eine neoadjuvante Chemotherapie schrumpft ein Mammakarzinom von 6 cm (cT3) auf 12 mm, sodass brusterhaltend operiert werden kann. Der Pathologe wird das T-Stadium nun mit ypT1c angeben.

Zusätzlich mögliche Beschreibungen L, V, Pn

L0, V0, Pn0 bzw. L1, V1, Pn1 machen deutlich, ob die Lymphgefäße, Venen und Perineuralscheiden tumorinfiltriert sind.

Residualtumorklassifikation

Die R-Klassifikation gibt das Fehlen oder Vorhandensein von Resttumor nach Operation an.

Residualtumorklassifikation

R0 = Tumorfreiheit

R1 = mikroskopischer Resttumor

R2 = makroskopischer Resttumor

Spezielle Klassifikationen

Es gibt noch zahlreiche Einteilungen, die bei einzelnen Erkrankungen Anwendung finden. Die Hodgkin- und Non-Hodgkin-Lymphome werden in der Ann-Arbor-Klassifikation beschrieben. Die chronisch lymphatische Leukämie wird nach Rai und Binet eingeteilt, die akute myeloische Leukämie nach der FAB-Klassifikation, Melanome nach Breslow und Clark und das Multiple Myelom nach Durie und Salmon.

9.4.5 Zellreaktionen bei Strahleneinwirkung

Vorgänge in der Zelle

Wird ein Zellverband bestrahlt, sind davon nach dem Zufallsprinzip nur ein Teil der Zellen betroffen. Nicht vorhersagbar ist ebenfalls, wo und wie schwer die Zelle beschädigt wird. Zur besseren Vorstellung präge man sich das Bild von einem Rasensprenger und vorbeilaufenden Passanten ein: Einige Leute bleiben trocken und nicht alle, die es erwischt, werden am gleichen Körperabschnitt nass. Ionisierende Strahlen können Elektronen aus einem Molekül der Zelle herauslösen. Dadurch zerbrechen die Moleküle und verlieren ihre biologischen Eigenschaften. Treten die Schäden an lebenswichtigen Strukturen der Zelle auf, ist sie nicht mehr lebensfähig. Das empfindlichste Ziel ist die DNA, die sich im Zellkern befindet. Aber Strahlung kann auch beim Auftreffen auf Zellorganellen, die spezialisierte Stoffwechselaufgaben erfüllen oder auf die Zellwand biologische Effekte verursachen, die die Zelle in den Tod treibt.

Strahlenempfindlichkeit in den verschiedenen Zellzyklusphasen

Der Zellzyklus ist nötig zur Bildung neuer Zellen. Er besteht aus der Zellteilungsphase (Mitose) und der Wachstumsphase (Interphase = Zeitspanne zwischen zwei Mitosen), in der die Vorbereitungen auf die Mitose getroffen werden. Die Zeit für einen Zyklus ist je nach Zelle und Alter des Organismus variabel. Zellen sind in der Mitose am empfindlichsten und in der späten S-Phase (Synthesephase), einem Abschnitt der Interphase, in dem die DNA im Zellkern verdoppelt wird, am unempfindlichsten gegen Strahleneinwirkung.

Zell-Reparatur auf molekularer Ebene

Verschiedene biochemische Mechanismen beseitigen sublethale (beinahe tödliche, ernste) Schäden, die durch Strahlung an der Zelle entstanden sind. Die Anleitung, sozusagen das Handbuch zur Reparatur befindet sich auf der DNA im Zellkern. Sogar wenn der Kern selbst einen Strahlentreffer erleidet, ist im gewissen Ausmaß noch die Möglichkeit zur Reparatur gegeben. Die DNA besteht aus Nukleinsäuren, zusammengekettet in Form einer in sich gedrehten Strickleiter. Am häufigsten sind die Querstränge (Sprossen) von Defekten betroffen, dies bezeichnet man als Basenschäden. Sie werden relativ schnell und einfach behoben, genauso wie die Einzelstrang-Brüche, bei denen nur ein Holm der Strickleiter aufgerissen wurde: Ein Enzym, die DNA-Ligase verknüpft die beiden losen Enden wieder miteinander. Seltener sind Doppelstrang-Brüche, bei denen beide Leiterholme nah beieinander aufgebrochen sind. Bei dieser Form und auch bei einer Kombination der 3 beschriebenen DNA-Brucharten stößt der Reparaturmechanismus an seine Grenzen. Eine Behebung wird immer schwieriger und gelingt seltener, je grösser die Läsion ist.

Lebt die Zelle mit einem Schaden an der DNA weiter, der überhaupt nicht oder nur teilweise repariert wurde, nennt man diese Veränderung Mutation. Die Mutation kann unbedeutend, von Vorteil (z. B. Laktosetoleranz beim Menschen) oder von Nachteil sein.

Das erblich bedingte (hereditäre) Mammakarzinom geht mit einer Mutation der Gene BRCA1, BRCA2 einher (► Abschn. 9.4.3).

Zelltod

Interphasetod oder Mitosetod

Wenn die Reparatur nicht möglich ist, stirbt die Zelle ab. Bei einer hohen Strahlendosis ist die Zelle so geschädigt, dass sie sofort nach Strahlenexposition und vor Erreichen der nächsten Mitose den Interphasetod stirbt. Bei geringerer Strahlendosis ist die Zelle zwar angeschlagen, sie kann aber ihre Stoffwechseltätigkeit noch für einige Zeit aufrecht erhalten und wenige Mitosen durchführen, bevor die Tochterzellen dann die Proliferation einstellen und absterben (Mitosetod, Reproduktiver Zelltod).

Nekrose oder Apoptose

Unabhängig davon, ob es der Zelle noch gelingt einige Zellteilungen durchzuführen oder ob sie sofort stirbt, gibt es zwei Wege des Unterganges. Der Zelltod kann entweder abrupt als Nekrose oder langsam im geordneten Rückzug als Apoptose geschehen.

Bei der Nekrose wird die Zelle durch starke äußere Reize zerstört. Die Zelle schwillt an, zerreißt und die Zellorganellen lösen sich durch Enzyme selbst auf.

Die Apoptose dient dem Wohle des Gesamtorganismus. Die Zelle steuert aktiv intrazelluläre Prozesse. Sie reduziert ihr Volumen und teilt sich in apoptotische Körperchen auf mit dem Ziel, die verwertbaren Substanzen für andere Zellen zu erhalten. Die apoptotischen Körperchen werden von umgebenden Zellen aufgenommen (phagozytiert) und intrazellulär ausgeschlachtet.

Maligne Lymphome und gesunde Zellen der Parotis (Speicheldrüse) und des Dünndarms praktizieren häufig die Apoptose – Muskeln, Bindegewebe und Knochen dagegen weniger.

9.4.6 Wirkung der Bestrahlung auf Krebszellen

Tumorregression und lokale Tumorkontrolle

Der Grund, warum Strahlentherapie bei Krebsleiden erfolgreich angewandt werden kann, ist, dass die Tumorzelle strahlensensibler ist als die gesunde Zelle. Oder anders herum ausgedrückt, weil die gesunde Zelle über einen perfekteren Reparaturmechanismus verfügt, der innerhalb weniger Stunden

einen Defekt beheben kann. Wie beim gesunden Gewebe gibt es auch beim Tumor verschiedene Zellen: diejenigen, die ausdifferenziert sind und die Stammzellen. Die ausdifferenzierten Zellen sind am Ende ihrer Entwicklungsstufen angekommen und teilen sich nur noch selten, wenn überhaupt. Die Stammzellen dagegen produzieren Tochterzellen, die entweder selbst wieder Stammzellen sein können oder die sich zur ausdifferenzierten Zelle entwickeln.

Vor allem gegen diese malignen Stammzellen richtet sich die Strahlentherapie, da sie eine unbegrenzte Teilungsfähigkeit besitzen, die gestoppt werden muss, wenn man eine Heilung anstrebt. Die Bestrahlung provoziert Doppelstrangbrüche, die die Stammzelle nicht oder nur falsch reparieren kann mit der Folge, dass die Mitose unmöglich wird (reproduktive Inaktivierung der Stammzellen). Wenn ein Teil der Stammzellen inaktiviert ist, kann der Tumor nur noch langsamer wachsen (Tumorstillstand). Wenn alle Stammzellen getroffen sind, ist ein Wachstums-Stillstand erreicht. Im weiteren Verlauf wird sich der Tumor zurückbilden (Tumorregression), da die Stammzellen (und auch die ausdifferenzierten Tumorzellen) absterben. Die lokale Tumorkontrolle ist erreicht.

Die 4 Rs der Radiotherapie

Die Reaktionen der Tumorzelle kann man in 4 Rs zusammenfassen (Withers):

- **Reparatur:** Auch die bösartige Zelle kann bis zu einem gewissen Grad den sublethalen Strahlenschaden reparieren.
- **Repopulierung:** Wenn die unbegrenzte Teilungsfähigkeit erhalten ist, bildet der Tumor weiterhin Kolonien, d. h. eine Schar von Tochterzellen aus.
- **Reoxygenierung:** Sind bereits einige Tumorzellen abgestorben und sind nekrotische Areale entstanden, verschafft dies den verbliebenen Zellen mehr Zugang zur Sauerstoffversorgung (► Abschn. 9.4.1). Das kommt den Stoffwechselsvorgängen in der Zelle zugute, die Zelle kann häufiger Mitosen durchführen.
- **Redistributierung:** Zellen in der Mitose reagieren am empfindlichsten auf Bestrahlung. Um den Verlust dieser untergegangenen Zellen auszugleichen, werden verstärkt Zellen in diese

Zyklusphase eingeschleust. Dafür werden die ruhenden Zellen aus der G0-Phase in den Zellzyklus rekrutiert. Mit zunehmender Zeit verteilen sich die Zellen wieder auf alle Phasen des Zellzyklus.

Tumorkontrolle in Abhängigkeit von der Dosis

Die Abtötung der Tumorzellen infolge Radiotherapie lässt sich als Überlebenskurve in einem Diagramm darstellen, die anfangs und gegen Ende flacher als im Mittelteil verläuft, aus folgenden Gründen:

- Niedrige Strahlendosen führen zu sehr geringem Effekt, da die Zelle den Schaden mittels der „4R“ noch kompensieren kann (► [Abschn. 9.4.6](#)).
- Bei Bestrahlung mit höheren Dosen wird immer ein konstanter Prozentsatz der Tumorzellen abgetötet. Die Anzahl der überlebenden Zellen nimmt exponentiell ab (von 100 Zellen überleben die Hälfte, also 50 Zellen, von denen wiederum die Hälfte überleben, also 25 Zellen). Das bedeutet, dass die Tumorkontrollrate steil ansteigt.
- Bei sehr hoher Dosis wird die Kurve wieder flacher, da der Nutzen einer zusätzlichen Dosiserhöhung immer geringer wird.

Einflussfaktoren auf die lokale Tumorkontrolle

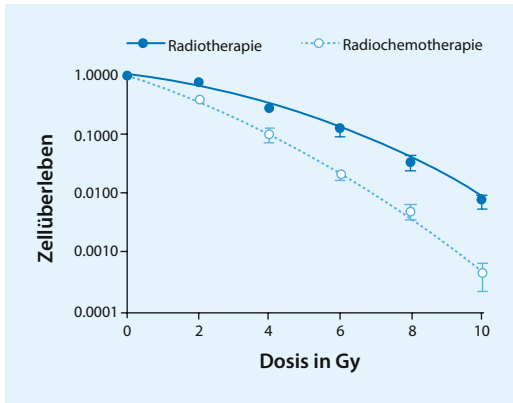
Wie gut sich der Tumor auf die Bestrahlung zurückbildet, ist von vielen Faktoren abhängig:

1. Tumorvolumen bzw. Dichte der Tumor-Stammzellen: Das Tumorvolumen ist proportional zur Anzahl der Tumorzellen. Eine Tumorheilung setzt eine komplette Vernichtung aller Tumorstammzellen voraus (► [Abschn. 9.4.6](#)). Mit zunehmendem Tumorvolumen werden höhere Strahlendosen benötigt.
2. Histologie, intrinsische Strahlenempfindlichkeit und Zellzyklusphase: Die verschiedenen Gewebe reagieren unterschiedlich empfindlich auf Strahlen. Aber auch Tumore der gleichen Histologie müssen bei zwei Patienten nicht genau gleich auf Radiotherapie ansprechen, weil anscheinend jede einzelne Zelle eine ihr eigene (intrinsische) Strahlenempfindlichkeit besitzt.

Außerdem ist die Strahlenempfindlichkeit einer Zelle abhängig von der Zellzyklusphase (► [Abschn. 9.5](#)), in der sich die Zelle während der Bestrahlung gerade befindet.

Für Seminome und Lymphome ist bereits eine Dosis um 30 Gy ausreichend, während Plattenepithelkarzinome und Sarkome unterhalb von 60 Gy ineffizient behandelt sind.

3. Gesamtdosis und Fraktionierung: Letale Treffer verteilen sich nicht homogen, es herrscht das Gesetz des Zufalls. Aber je höher die Gesamtdosis ist, umso wahrscheinlicher ist es, dass alle Tumorzellen abgetötet werden. Bei der Fraktionierung wird die Gesamtdosis nicht auf einmal gegeben, sondern in kleinen Portionen auf mehrere Sitzungen aufgeteilt. Damit schont man das gesunde Gewebe, das sich in der Bestrahlungspause vom sublethalen Strahlenschaden erholen kann (► [Abschn. 9.4.5](#)). Allerdings überleben auch mehr Tumorzellen, wenn die gleiche Dosis anstatt in einer Bestrahlung über mehrere Sitzungen appliziert wird. Grund dafür ist, dass auch in den Tumorzellen während der Bestrahlungspause intrazelluläre Erholungsvorgänge (Reparatur und Repopulierung, ► [Abschn. 9.6.2](#)) ablaufen. Wenn man also von einer Einzeitbestrahlung auf eine fraktionierte Bestrahlung wechselt, muss konsequenterweise die Gesamtdosis erhöht werden, um dieselbe biologische Wirksamkeit zu erzielen. Dasselbe gilt, will man die Einzeldosis einer fraktionierten Bestrahlung reduzieren: 10×3 Gy entsprechen in der strahlenbiologischen Wirkung nicht 15×2 Gy!
4. Gesamtbehandlungszeit bzw. Zeitintervall zwischen den Fraktionen: Die Gesamtbehandlungszeit einer fraktionierten Bestrahlung sollte im Hinblick auf die Tumorzellvernichtung kurz gehalten werden, gleichzeitig sind Therapiepausen mit einem Minimum von 6–8 Stunden für das gesunde Gewebe nötig. Manchmal wird die Therapie seitens des Patienten aus medizinischen oder persönlichen Problemen, aus Geräte- bzw. technischen Gründen oder wegen kalendarischer Feiertage in die Länge gezogen. Die Unterbrechung wird dann mittels zusätzlicher Bestrahlungssitzung und/oder Dosiserhöhung



■ **Abb. 9.16** Zellüberlebenskurve bei Bestrahlung mit/ohne zusätzlicher Chemotherapie

(6×2 Gy / Woche oder 2×2 Gy am Freitag) ausgeglichen (► Abschn. 9.5). Je schneller ein Tumor wächst (dafür bekannt ist z. B. das Plattenepithelkarzinom), umso wichtiger ist diese Kompensation.

5. O_2 -Versorgung der Tumorzellen: Sauerstoffreiche Zellen sind radiosensitiver als sauerstoffarme (hypoxische oder anoxische) Zellen. Bei anaerober Sauerstofflage ist deshalb eine erhöhte Dosis nötig. Das Hämoglobin, der rote Blutfarbstoff in den Erythrozyten nimmt den Sauerstoff in der Lunge auf und verteilt ihn im Körper. Um die Wirksamkeit der Strahlentherapie zu steigern, versucht man die Sauerstoffversorgung im Tumor dadurch zu verbessern, indem man den Hämoglobinwert auf hohem Niveau hält. Der Gedanke dahinter ist, dass dann auch der Tumor mehr Sauerstoff abbekommt. Eine weitere Strategie ist die Nikotinabstinenz während der gesamten Radiotherapie-Behandlungszeit, da das Rauchen bekanntermaßen die Sauerstoffversorgung des Gewebes verschlechtert: Nikotin bindet sich an das Hämoglobin und verdrängt dadurch den Sauerstoff. Bei Strahlen mit hohem LET (► Abschn. 2.2) ist der Sauerstoffeffekt weniger ausgeprägt oder fehlt ganz.
6. Kombination der Bestrahlung mit anderen Behandlungen: Der Erfolg der Radiotherapie lässt sich durch Kombination mit Chemotherapie steigern, die die Tumorzellen für die Bestrahlung sensibilisieren kann neben ihrer eigenen zytostatischen und zytotoxischen Wirkung (Tu-

morzellhemmung bzw. -abtötung) (■ Abb. 9.16). Eine Radiosensibilisierung erreicht man auch durch Hyperthermie. Die Gewebetemperatur wird kurz vor oder nach Radiotherapie auf 39–41 Grad erhöht. Da sich der Effekt gleichermaßen auf Tumor und Normalgewebe auswirkt, ist große Vorsicht geboten. Denn bei Temperaturen zwischen 40 und 42 Grad beginnen die Reparaturmechanismen der gesunden Zelle zu versagen. Sie sind nicht mehr oder nur in geringem Maß in der Lage, die Schäden durch die Bestrahlung zu kompensieren.

7. Strahlenqualität: Auch die Eigenschaften der Strahlung beeinflussen die Wirkung der Radiotherapie. So spielen der Linear-Energie-Transfer (► Abschn. 2.2), die Beschleunigungsspannung und die Teilchenart eine wichtige Rolle (► Abschn. 9.3).

9.4.7 Das linearquadratische Modell zur Beschreibung der Zell-Schädigung bzw. Zell-Erholung nach Bestrahlung

Bestrahlt man gesundes Gewebe und trägt den prozentualen Anteil der abgetöteten Zellen auf der y-Achse gegen die Dosis auf der x-Achse auf, so erhält man wie beim Tumorgewebe eine Kurve (■ Abb. 9.16). Wird die y-Achse logarithmisch eingeteilt, stellt sich die Dosis-Effekt-Kurve im Anfangsbereich gekrümmt und später linear dar.

Anhand dieses Diagramms, das für alle Zelltypen auf der Grundlage von Zellexperimenten erstellt wird, ordnet man jedem Gewebe einen sog. alpha/beta-Wert in Gy zu, der am Übergang des gekrümmten zum linearen Kurvenverlauf lokalisiert ist. Im günstigsten Fall ist der alpha/beta-Wert eine Zahl, meistens kann man aber wegen verschiedener Unwägbarkeiten nur einen Dosisbereich angeben. Die Höhe des alpha/beta-Wertes drückt aus, wie schnell die Erholung vom Strahlenschaden von statten geht. Der Vorgang ist abhängig von der Reparaturfähigkeit der Zellen, der Anzahl der teilungsfähigen Zellen und der Geschwindigkeit, mit der die Zellteilung verläuft.

Bei kleinem alpha/beta-Wert (1–4 Gy) ist die Regeneration des Gewebes zwischen zwei Bestrah-

lungssitzungen ausgeprägt. In diesem Fall würde man eher fraktionieren, also viele kleine Dosen mit einem zeitlichen Mindestabstand von 6–8 Stunden geben.

Bei Radiotherapie eines Pharynxkarzinoms gleicht die gesunde Rachenschleimhaut die entstandenen Defekte mittels Reparatur und Repopulierung zwischen zwei Bestrahlungen aus. Die stärkere Fraktionierung bis Hyperfraktionierung kommt der Schonung des normalen Gewebe entgegen.

Bei großem alpha/beta-Wert (>8 Gy) behebt das Gewebe den Schaden zwischen zwei Bestrahlungen eher nicht und damit ist auch eine Fraktionierung weniger wirkungsvoll im Hinblick auf die Schonung des gesunden Gewebes.

Zur Behandlung einer Knochenmetastase kann man die Fraktionierung gering halten (4×5 Gy / Woche) oder aufheben (1×8 Gy), da das gesunde Knochengewebe zwischen zwei Bestrahlungen wenig Aktivität zeigt. Der weiteren Eskalation sind jedoch Grenzen gesetzt aufgrund der Erholungsfähigkeit der Haut und des Weichteilmantels, die zwangsläufig mitbestrahlt werden.

Der alpha/beta-Wert ist Teil einer mathematischen Formel, die den Effekt der Radiotherapie beschreibt. Insbesondere kann man damit von einer Fraktionierung auf ein anderes Bestrahlungsprotokoll umrechnen, das die gleiche biologische Wirksamkeit besitzen soll. In der Gesamtheit bezeichnet man die Berechnungen als linearquadratisches Modell – Modell deshalb, weil nicht nur messbare Daten, sondern auch gewisse theoretische Überlegungen einfließen.

9.4.8 Wirkung der Bestrahlung auf gesunde Zellen

Bei palliativer Therapie, bei der eine Linderung von Schmerzen, eine Lebensverlängerung oder Verbesserung der Qualität der letzten Lebensphase das Ziel ist, dosiert man selten bis zur Toleranzgrenze. Bei kurativer Therapie wird dagegen oft bis nahe an die maximale Belastbarkeit gesunder Organe dosiert, da

man die höchste Dosis im Hinblick auf die Tumorzellvernichtung anstrebt.

Klassifikationen zur Dokumentation von Strahlenfolgen an Normalgewebe

Es existiert eine Vielzahl von Klassifikationen für die Beschreibung von Nebenwirkungen der Radiotherapie, hier die gebräuchlichsten:

- **RTOG/EORTC Toxicity Criteria** der europäischen und nordamerikanischen radio-onkologischen Fachgesellschaften.
- **LENT-SOMA** steht für Late Effect Normal Tissue mit den Kategorien: S = subjektive Beschreibung, O = objektive Befunde, M = Management, A = Analytik = Erfassung der Befunde in Spezialuntersuchungen.
- **CTC** (Common Terminology Criteria for adverse effects) für jede onkologische Therapie.

Organs at Risk (OAR)

Aufgeführt sind exemplarisch mögliche Nebenwirkungen an Organen und Geweben, die nicht das Ziel einer Bestrahlung sind, aber zwangsläufig im Bestrahlungsvolumen liegen und darauf reagieren können. Die Beschwerden müssen nicht in jedem Fall auftreten und auch die angegebene Toleranzdosis ist ein ungefährender Richtwert. Die Angaben gelten für die alleinige normofraktionierte Radiotherapie von 5×2 Gy/Woche. Mit zusätzlicher Chemotherapie sinkt erfahrungsgemäß die kritische Grenzdosis. Für ausführlichere Informationen sollten die unter ▶ **Abschn. 10.1** erwähnten Klassifikationen herangezogen werden.

- **Haut:** ab 20 Gy Erythem (Rötung), später trockene, dann feuchte Epitheliolysen (wunde Stellen), Ulkus (tiefer Defekt). Beeinträchtigung der Talgdrüsen ab 12 Gy, der Schweißdrüsen ab 30 Gy und der Haarfollikel ab 10 Gy mit meist vorübergehendem Haarverlust.
- **Spätfolgen:** Dünne, unelastische, trockene, leicht verletzbare Haut, Teleangiektasien (sichtbare Äderchen).
- **Schleimhaut:** ab 16 Gy Mukositis (Schleimhautentzündung), vereinzelte und später größere Erosionen (wunde Stellen), Ulkus. Speicheldrüsen: ab 10 Gy Speichelreduktion, ab 26 Gy permanenter Funktionsausfall, Empfindlichkeit steigt mit dem Alter, mögliche

Kompensation durch die übrigen Speicheldrüsen.

- **Spätfolgen:** Trockene und für Infektionen anfällige, leicht verletzbare Schleimhaut, reduzierter Speichelfluss mit Auswirkung auf Schluckakt, Sprache und Zahnreinigung, dadurch erhöhte Kariesgefahr.
 - Mund- und Rachenschleimhaut: reduzierter Speichelfluss mit Auswirkung auf Schluckakt, Sprache und Zahnreinigung, dadurch erhöhte Kariesgefahr.
 - Vaginale Schleimhaut: erschwelter Geschlechtsverkehr
- **Herz:** akut Rhythmusstörungen, Perikarditis (Herzbeutelentzündung).
 - **Spätfolgen:** Herzinsuffizienz, Veränderungen an Koronararterien mit Angina pectoris, Herzinfarkt, Rhythmusstörungen, Perikarditis.
- **Lunge:** ab 20 Gy auf > 30 % des Lungenvolumens und ab 30 Gy auf > 20 % des Lungenvolumens erhöhtes Risiko für Pneumonitis mit Husten, Fieber, Atemnot.
 - **Spätfolgen:** Lungenfibrose mit rezidivierenden Pneumonien und Einschränkung der Lungenfunktion.
- **Schilddrüse:** keine schwerwiegenden akuten Nebenwirkungen bekannt.
 - **Spätfolgen:** Hypothyreose
- **Speiseröhre:** ab 20 Gy Dysphagie (Schluckbeschwerden), siehe Schleimhaut.
 - **Spätfolgen:** Fibrose (Vermehrung des Bindegewebes mit Verlust der Elastizität). Am stärksten beeinträchtigen zirkuläre Lumeneinengungen den Schluckakt.
- **Darm:** ab 20 Gy Durchfall, Tenesmen (Bauchkrämpfe), Blähungen.
 - **Spätfolgen:** am häufigsten ist der Enddarm betroffen, mit chronischer Schleimhautentzündung, Blutungen und Ulzera.
- **Pankreas:** keine schwerwiegenden akuten Nebenwirkungen bekannt.
 - **Spätfolgen:** Diabetes
- **Leber:** ab 30 Gy auf das komplette Organ Übelkeit, Oberbauchbeschwerden.
 - **Spätfolgen:** Aszites (freie Flüssigkeit in Bauchhöhle), Funktionsstörung bis zum Leberversagen.
- **Niere:** Keine schwerwiegenden akuten Nebenwirkungen bekannt.
 - **Spätfolgen:** ab 6–12 Monaten nach Radiotherapie Niereninsuffizienz, Schrumpfniere, Bluthochdruck, Proteinurie (übermäßige Eiweiß-Ausscheidung mit dem Urin), Anämie (Blutarmut)
- **Harnblase:** ab 20 Gy Zystitis mit Dysurie (schmerzhaftes/erschwertes Wasserlassen), erhöhte Miktionsfrequenz, Drangharninkontinenz. Spätfolge: Fibrose (Vermehrung des Bindegewebes mit Verlust der Elastizität), Schrumpfbhase
- **Eierstöcke und Hoden:** akut → Schädigung bereits bei geringer Dosis möglich. Ausgereifte Spermato- und Eizellen sind strahlenresistenter als die Vorläuferzellen.
 - **Spätfolge:** ab ca. 5 Gy Unfruchtbarkeit
- **Augen:** ab 5 Gy Katarakt (Trübung der Augenlinsen).
 - **Spätfolgen:** Hornhautdefekte aufgrund einer Funktionseinschränkung der Tränenrüsen und der Meibomschen Talgdrüsen.
- **Schulter- und Hüftgelenke:** ab 50 Gy Arthrosebeschwerden mit Schmerzen und Einschränkung in der Beweglichkeit.
- **Gehirn:** akut Hirnödem (Schwellung) mit Kopfschmerzen, Übelkeit, Erbrechen
 - **Spätfolgen:** Beeinträchtigung der Hirnleistungsfähigkeit und des Hormonhaushaltes.
- **Rückenmark:** ab 50 Gy Ausfall sensibler und motorischer Nerven.

9.5 Möglichkeiten und Prinzipien der Radioonkologie

D. Dohr, C. Marks

9.5.1 Therapiekonzepte in der Radioonkologie

Anwendungsbereiche

Die Bestrahlung wird auch zur Therapie gutartiger Erkrankungen eingesetzt, aber hauptsächlich be-

handelt man damit Krebsleiden mit dem Ziel der Kuration (Heilung) oder Palliation (Beschwerdelinderung). Sie kann als alleinige Behandlungsform durchgeführt werden oder in Kombination mit Chemotherapie, Antikörpertherapie oder Hormonen („**primär**“ oder „**definitiv**“) oder in Kombination mit einer Operation (**prä- oder post- oder intraoperative Strahlentherapie**).

Alleinige Radiotherapie

Die **alleinige Radiotherapie** wird häufiger in palliativen Situationen angewendet. Nur bei kleineren und radiosensiblen Tumoren, wie z. B. einem Lymphom im Stadium IA oder einem Larynxkarzinom, das auf die Stimmbänder begrenzt ist, ist die Bestrahlung ohne zusätzliche Maßnahmen die kurative Therapie der Wahl. Eine Hyperfraktionierung bei einem HNO-Karzinom ist eine Alternative zur Radiochemotherapie, wenn eine Kombinationsbehandlung nicht möglich ist, z. B. bei Niereninsuffizienz.

Radiotherapie in Serien

Die Radiotherapie kann entweder in einer Serie ohne Änderung im bestrahlten Volumen oder in mehreren Serien erfolgen. Der Hintergrund dabei ist, dass es Regionen mit unterschiedlichem Rezidivrisiko gibt, also wird wie bei der Russischen Puppe nach dem Schachtelprinzip vorgegangen: Zuerst behandelt man ein großes Volumen, das das Organ mit dem Tumor und die Lymphknoten einschließt. In einer zweiten Serie wird verkleinert und nur auf das Organ und die allernächsten Lymphknoten dosiert und in der dritten Serie wird lediglich der Tumor selbst (**Boost**, kleines Feld mit hoher Dosis) bestrahlt. Die Anzahl der Serien und deren Zielstrukturen sind von der Erkrankung, der Vorbehandlung und auch der individuellen Situation abhängig.

Boost-Bestrahlung

Der **Boost** wird auf einen makroskopischen Tumor oder auf einen Bereich appliziert, in dem ein erhöhtes Risiko auf ein Rezidiv besteht, z. B. an der Stelle, an der operativ nur knapp oder nicht im Gesunden reseziert werden konnte. Perkutan erfolgt er in mehreren Sitzungen, bei der interstitiellen oder intrakavitären Brachytherapie gelegentlich auch als einmalige Anwendung.

Es gibt die Möglichkeit den Boost **sequentiell**, d. h. im Anschluss an die Bestrahlungsserie durchzuführen oder während der Bestrahlungsserie entweder **konkomitierend** oder als **simultan integrierter Boost (SIB)**.

Man weiß, dass sich bei rasch wachsenden Karzinomen, z. B. einem Plattenepithelkarzinom im Mund-Rachenraum, eine Behandlung an allen Wochentagen statt der Bestrahlung von Montag bis Freitag günstiger auf die Tumorzerstörung auswirkt. Allerdings intensivieren sich auch die akuten Nebenwirkungen. Als Kompromiss wird ein konkomitierender Boost 1x/Woche, bevorzugt freitags, gegeben, während das große Bestrahlungsvolumen im gleichen Zeitraum 5x/Woche behandelt wird. Das gesunde Nachbargewebe hat dann über das Wochenende Zeit zur Erholung.

Der simultan integrierte Boost (SIB) ist nur bei Anwendung einer dosismodulierten Technik möglich wie IMRT, VMAT, Tomotherapie. Dabei erhält das große Bestrahlungsfeld eine tägliche Dosis von z. B. 1,8 Gy, während der Tumor selbst bzw. der Hochrisikobereich in der gleichen Sitzung mit einer leicht höheren Dosis von z. B. 2,0 Gy behandelt wird.

Bei postoperativer Radiotherapie des Mammakarzinoms bestrahlt man zuerst die gesamte Brust und ggf. die supra-/infraclavikulären Lymphknoten. Danach wird das Bestrahlungsfeld auf die ehemalige Tumoregion (Tumorbett) verkleinert, in der das Risiko für ein Rezidiv am höchsten ist.

Beim Analkarzinom werden der Tumor und die Lymphknoten mit einer täglichen Dosis von 1,8 Gy bestrahlt. Der Tumor selbst kann während der gleichen Sitzung mittels SIB eine leicht erhöhte Dosis von z. B. 2,0 Gy erhalten.

Radiotherapie kombiniert mit anderen Behandlungen (multimodal)

Kombination mit Chemotherapie: Plattenepithelkarzinome bilden sich unter Bestrahlung besonders gut zurück, wenn zusätzlich eine platinhaltige Chemotherapie gegeben wird (► Abschn. 9.4 „Tumorphatologie“).

Kombination mit Antikörper: Falls bei einem Patienten mit HNO-Tumor aufgrund **von Risikofaktoren eine Chemotherapie kontraindiziert ist**, kann stattdessen zur Bestrahlung der monoklonale Antikörper Cetuximab gegeben werden.

Kombination mit Hormonen: Bei Prostatakarzinom im höher gradigen Stadium erwirkt man bessere Therapieergebnisse mit einer zusätzlichen Hormonentzugstherapie, die über den Bestrahlungszeitraum hinaus alle 3 Monate als intramuskuläre Injektion für 2–3 Jahre appliziert wird.

Kombination mit Operation:

Präoperativ („neoadjuvant“), i. d. R. kombiniert mit Chemotherapie: Ziel ist die Tumorverkleinerung. In der anschließenden Operation wird der Tumor so entfernt, dass die Funktion des Organs erhalten bleibt.

Liegt ein Rektumkarzinom sehr nahe am Sphinkter (Schließmuskel), wird bei der Exzision die Anlage eines künstlichen Ausgangs (Anus praeter, kurz AP) nötig. Schrumpft der Tumor in der Vorbehandlung und die Distanz zum Sphinkter vergrößert sich, kann ein künstlicher Ausgang vermieden werden.

Postoperativ bzw. adjuvant: Auch wenn der Pathologe die Schnittländer des Operationspräparates als tumorfrei (R0-Resektion) bewertet, hat die Erfahrung gezeigt, dass trotzdem Tumorzellen verbleiben können, die mit unseren heutigen technischen Möglichkeiten nicht zu erkennen sind. Nur in diesem Fall spricht man streng genommen von „adjuvanter“ Behandlung (lat. unterstützender). Bei verbliebenen Tumorzellen (R1-Resektion) oder sogar makroskopischem (mit bloßem Auge erkennbarem) Resttumor (R2-Resektion), handelt es sich zwar immer noch um eine postoperative, aber nicht mehr adjuvante Radiotherapie.

Bei Mammakarzinomen, die brusterhaltend reseziert wurden, ist ohne adjuvante Bestrahlung des Restdrüsengewebes die Lokalrezidivrate deutlich höher und die 5-Jahres-Überlebensrate dadurch um 25 % niedriger.

Intraoperativ (► Abschn. 9.3.5): Der Vorteil der Methode besteht darin, dass man am offenen Operationsitus (geöffneten Körper) direkt das Zielgebiet erreicht. Es wird eine einmalige und hohe Dosis appliziert. Diese Technik erfordert eine spezielle Ausstattung, sie ist deshalb nur an größeren onkologischen Zentren praktikabel. Ziel der Bestrahlung ist es, wie in der postoperativen Situation Tumorzellen im Operationsgebiet abzutöten.

In der TARGIT-Studie appliziert man direkt nach Entfernung des Brustkrebstumors eine Dosis, die entweder den Boost der postoperativen Radiotherapie ersetzt oder bei bestimmten sehr günstigen Voraussetzungen auch als alleinige Radiotherapie ausreichend ist.

9.5.2 Fraktionierungskonzepte

Fraktionierung in der Kuration

Die Standard-Schemata sind 5×2 Gy / Woche und $5 \times 1,8$ Gy / Woche (Normofraktionierung). Die Gesamtdosis richtet sich hauptsächlich nach der Histologie (► Abschn. 9.4 Tumorpathologie) und wie viel Tumormasse durch die Bestrahlung vernichtet werden soll: Bei einem makroskopischen Tumor ist die Dosis höher als in der postoperativen adjuvanten Situation. Außerdem spielt es eine Rolle, ob die Bestrahlung mit einer anderen Behandlung kombiniert ist. Bei der zusätzlichen Gabe der Chemotherapie verstärkt sich die tumorizide Wirkung (Abtötung des Tumors), aber gleichzeitig kann es leider auch Auswirkungen auf das gesunde Nachbargewebe haben. Aus Vorsichtsgründen reduziert man in diesen Fällen die Bestrahlungsdosis.

Hypofraktionierung

Eine Hypofraktionierung bedeutet die Reduktion der Fraktionen. Um denselben Effekt wie bei der Standardfraktionierung zu erhalten, erhöht man gleichzeitig die Einzeldosis. Die Vorteile einer Hypofraktionierung liegen in der kürzeren Behandlungszeit. Besonders die Ärzte in Ländern, in denen Patienten weite Wege zur Radioonkologie-Einrichtung zurück legen müssen (Skandinavien, Australien) oder in denen die Geräteauslastung sehr hoch ist, sind sehr an klinischen Studien interessiert, die vergleichen, ob größere Einzeldosen gleich gute Therapieergebnisse bringen.

Beim frühen Prostatakarzinom wird derzeit eine stereotaktische Bestrahlung geprüft mit 5 Fraktionen zwischen 9–10 Gy, jeweils mit einem Zeitintervall von 2 Tagen. Die englische START B Studie vergleicht die Fraktionierung von 5×2 Gy / Woche über 5 Wochen gegenüber $5 \times 2,67$ Gy / Woche über 3 Wochen beim Mammakarzinom. Bei einer Nachbeobachtungszeit von 10 Jahren hat sich bisher kein Unterschied in der

Rezidivrate ergeben. Die deutsche S3 Leitlinie des Mammakarzinoms von 2012 empfiehlt aber bisher die Hypofraktionierung nur bei älteren Patientinnen mit kleinem Primärtumor ohne Lymphknotenbefall, da erst ein längerer Beobachtungszeitraum abgewartet werden muss und auch eine erhöhte Fibrosierung der Brust mit Einschränkung des kosmetischen Ergebnisses befürchtet wird.

Hyperfraktionierung

Der Begriff Hyperfraktionierung bedeutet die Erhöhung der Fraktionen in einer Zeiteinheit. Eine Aussage, ob und wie die Gesamtdosis und/oder Einzeldosis geändert werden, wird dadurch nicht getroffen. Diese Methode wird angewandt, um den Ausfall einer Bestrahlung zu kompensieren. Die nachzuholende Einzeldosis wird gerne vor dem Wochenende, also am Freitag als 2. Sitzung zur planmäßigen Radiotherapie appliziert. Die Idee ist, dass sich das Normalgewebe bis zum Montag vom sublethalen (fast tödlichen) Strahlenschaden erholt hat. Aus dem gleichen Grund ist auch ein Intervall von 6–8 Stunden zwischen den beiden Bestrahlungen abzuwarten.

Die **dosiseskalierte, akzelerierte Hyperfraktionierung** findet bei Tumoren mit hoher Zellteilungsrate Anwendung, z. B. bei Plattenepithelkarzinomen des Rachenraumes. Anstatt mit einer täglichen Bestrahlung von 2 Gy an 5 Wochentagen zu behandeln, gibt man 2x täglich jeweils eine etwas geringere Einzeldosis, ebenfalls an 5 Tagen pro Woche. Die Gesamtbehandlungszeit ist leicht verkürzt (akzeleriert), die Gesamtdosis wird leicht angehoben (dosiseskaliert). Der Vorteil ist die höhere Tumorkontrollrate als in der Standardfraktionierung, es steigt aber auch die Rate subkutaner Fibrosen an.

Fraktionierung in der Palliation

Das Fraktionierungsschema ist individuell auf die Situation des Patienten und das Therapieziel (z. B. Schmerzlinderung) gerichtet. Ein erprobtes effektives Schema ist 10×3 Gy, aber auch andere Fraktionierungen sind möglich.

Bei schmerzhaften Knochenmetastasen erzielen 1×8 Gy eine schnelle Linderung, gegen heftige

Atemnot bei oberer Einfluss-Stauung sind 4×5 Gy mediastinal erfolgreich, $16 \times 2,5$ Gy wird gegen Makrohämaturie bei Einbruch eines Prostatakarzinoms in die Harnblase angewandt.

9.6 Bestrahlungsplanung

D. Dohr, C. Marks

9.6.1 Diagnose und Vorstellung im Tumorboard

Sobald alle wichtigen Informationen über die Krebserkrankung wie TNM-Stadium, Histologie, Rezeptorstatus, etc. vorliegen, wird der Patient im interdisziplinären Tumorboard vorgestellt und das Therapiekonzept festgelegt.

9.6.2 Information des Patienten, Einschätzung der Durchführbarkeit, spezielle Vorbereitungen

Der Radioonkologe bespricht mit dem Patienten das empfohlene Vorgehen. Hilfreich ist die Anwesenheit von Angehörigen, die eventuell mehr oder andere Details aufnehmen als der Patient (vier Ohren hören mehr) und später durch ihr Wissen die Behandlung besser unterstützen können. Der Sinn der Behandlung (► Abschn. 9.5 „Möglichkeiten und Prinzipien der Radioonkologie“) wird erläutert. Es wird erklärt, warum dieser Therapie der Vorzug gegeben wird gegenüber alternativen Vorgehensweisen. Außerdem werden der Ablauf, die zu erwartenden Nebenwirkungen und das Risiko von Komplikationen (Art und Häufigkeit) aufgelistet.

Der Arzt macht sich in einer körperlichen Untersuchung selbst ein Bild vom Ausmaß des Tumorleidens und schätzt im Gespräch ein, ob die Strahlentherapie ambulant erfolgen kann, welche Lagerung auf dem Behandlungstisch möglich bzw. sinnvoll ist und ob gewisse Vorbereitungen notwendig sind, z. B. Implantation von Markern in das Zielorgan oder eine Zahnsanierung bei Behandlung im Mund-Rachenraum.

➤ **Bestehen Entzündungen an den Zahnwurzeln riskiert man mit der Bestrahlung eine Verschlimmerung bis hin zur Osteonekrose.**

Außerdem wird geklärt, inwieweit der Patient zur Therapie bereit ist. Die Motivation und die persönlichen Umstände des Patienten können die Gesamtdosis und die Fraktionierung beeinflussen.

Bei einer 85-jährigen Patientin mit Basaliom, für die bereits der Transport zur Radioonkologie beschwerlich ist und die auf Kosmetik keinen Wert legt, wird man ein Schema mit wenigen, aber dafür höheren Einzeldosen wählen.

Ist der Patient einverstanden mit der Therapie, müssen ihm in Deutschland 24 Stunden Bedenkzeit eingeräumt werden, bevor er schriftlich sein Einverständnis gibt. In anderen Ländern reicht häufig die mündliche Einwilligung. Der Strahlentherapeut erstellt dann die Bestrahlungsverordnung.

9.6.3 Bestrahlungsverordnung

Gemäß gesetzlicher Bestimmungen enthält die Bestrahlungsverordnung:

- Intention (kurativ, palliativ)
- Definition des Zielvolumen
- Definition der Risikoorgane (OAR = Organ at Risk)
- Strahlenart: Photonen oder Elektronen
- Strahlenenergie: Beispiel 6 oder 15 MV Photonen, 4 oder 18 MeV Elektronen
- Bestrahlungstechnik: Stehfeld-/Mehrfelderbestrahlung, IMRT, Stereotherapie, Brachytherapie etc. (► Abschn. 9.3 RT-Geräte)
- Einzel- und Gesamtdosis
- Fraktionierung (► Abschn. 9.5.2 Fraktionierungskonzepte)
- Lagerung und Lagerungshilfen des Patienten
- Name, Vorname, Geburtsdatum und Diagnose des Patienten
- Bestrahlende Institution, Name und Unterschrift des behandelnden Facharztes, Datum

Ebenfalls werden zusätzliche therapeutische Maßnahmen angegeben, die im Zeitraum der Be-

strahlung notwendig sind, wie Chemotherapie, unterstützende pflegerische oder medikamentöse Anwendungen (supportive Maßnahmen) oder Hyperthermie und ob die Behandlung ambulant oder stationär erfolgen soll.

9.6.4 Lagerung des Patienten und Planungs-CT

Überlegungen zur Lagerung

Eine der wichtigsten Voraussetzungen, damit die Bestrahlung exakt angewendet werden kann, ist eine gut durchdachte und exakte Lagerung. Dazu sind Vorüberlegungen nötig:

- — Die Lagerung muss für den Patienten für eine gewisse Zeit ohne Probleme einzunehmen sein, im Einklang mit der geplanten Technik stehen. Beispiel: Zur Bestrahlung eines Lungentumors ist es ratsam mit erhobenen Armen zu lagern.
- Man muss sie täglich über einen Zeitraum von mehreren Wochen exakt reproduzieren können (cave: Lagerungskissen, die ihre Form verlieren).
- Eine nicht korrekte Lagerung kann eine überhöhte Dosis am gesunden Gewebe mit Spätfolgen für den Patienten oder eine Unterdosierung des Tumors mit Verfehlung des Therapieziels zur Folge haben, speziell bei dosismodulierter Bestrahlungstechnik (► Abschn. 9.3.4 und ► Abschn. 9.3.5).

Gelegentlich stellt diese Aufgabe eine Herausforderung dar, und es ist ein Kompromiss erforderlich.

- Eine harte Unterlage gewährleistet eine stabile Lagerung, ist jedoch für viele Patienten schmerzhaft. Im weichen Polster sinkt der Körper jeden Tag unterschiedlich ein. Eine exakte, auf den Millimeter genaue Bestrahlung ist nicht möglich. Den goldenen Mittelweg findet man mit Zeit und Geduld.
Nur mit eng anliegender Gesichtsmaske kann der Sicherheitssaum knapp gehalten und eine maximale Schonung der gesunden

Schleimhaut erreicht werden. Hat der Patient allerdings Platzangst, wird man die Mund-Nasenpartie ausschneiden oder sogar nur ein Stirn- und Kinnband anlegen.

Lagerungshilfen

Früher hatte jede Strahlentherapie ihren eigenen Feinmechaniker, der in seiner Werkstatt individuelle Bleiblöcke und Lagerungshilfen erstellte. Heutzutage verwendet man in erster Linie standardisierte Lagerungshilfen und greift nur im Einzelfall auf individuelle Lösungen zurück. Die Gründe dafür sind vielfältig: es wird Personal eingespart, bei einer späteren Radiotherapie (auch in einer anderen Einrichtung) ist die Lagerung gut nachvollziehbar und der Feldanschluss gelingt ohne Mühe. Nicht zuletzt erfüllt man damit Forderungen der Zertifizierung, nämlich, dass alle Gegenstände, mit denen der Patient in Berührung kommt, TÜV-geprüft, also einem gewissen Sicherheitsniveau entsprechen müssen.

Beispiele für Lagerungshilfen

Kopf/Hals: Kopfschalen aus Schaumstoff oder Plexiglas, die eine unterschiedlich starke Reklination (Rückwärtsneigen des Kopfes) erlauben (um bei einer Halsbestrahlung den Kiefer aus dem Bestrahlungsvolumen zu halten). Individuell angefertigte Kopf-Hals-Maske, die mit einem Beißblock kombiniert werden kann, z. B. für die Stereotaxie (► Abschn. 9.3.5). Das Maskenmaterial ist wie ein Sieb perforiert, bei Angstgefühlen des Patienten vor Luftnot kann die Mund-Nase-Region ausgeschnitten werden. Bei Prozessen im Unterkiefer (Mundboden, Zunge) wird der Oberkiefer durch einen Mundkeil weggespreizt. Durch die Distanz kann die Dosisbelastung deutlich reduziert werden.

Oberkörper: Zur Bestrahlung der Brust gibt es viele Modelle (Mammaboard) zur Lagerung des Oberkörpers in einem leichten Lehnwinkel inklusive Armstützen, die manchmal auch für die flache Position z. B. zur Therapie eines Lungen- oder Speiseröhrentumors geeignet sind. Anderenfalls wird der Patient mit Einzelstücken wie Kopfschale und einer Vorrichtung zur Lagerung der Arme über Kopf (Wingboard) positioniert.

Becken/Beine: Festere Schaumstoffkissen eignen sich für den Unterkörper, z. B. als Kniekeil oder Fußstützen. Um den Grad der Hüftbeugung winkelgenau reproduzieren zu können, gibt es Fixationen für das komplette Bein.

Vielzweck: Vakuumkissen gefüllt mit kleinen Styropor-Kügelchen können durch Luftentzug individuell angepasst werden. Eine Gefahr besteht allerdings im schleichenden Formverlust, wenn die Hülle porös und luftdurchlässig wird.

9.6.5 3D-CT-Planung

Formalitäten

Um ohne Zeitnot und mit Sorgfalt den optimalen Bestrahlungsplan erarbeiten zu können, wird der Patient einige Tage vor seinem Behandlungsbeginn ins Planungs-CT einbestellt. Die MTRA nimmt den Patienten in Empfang, informiert ihn noch einmal kurz über die Untersuchung und vergewissert sich dabei, dass es sich um die richtige Person handelt.

Zudem prüft die MTRA die Vollständigkeit der Patientenunterlagen: Sind die Bestrahlungsverordnung und das Einverständnis vorhanden und unterschrieben? Gibt es spezielle Anweisungen des Arztes zur Lagerung und andere Besonderheiten?

Durchführung des CT mit Festlegen des Anatomischen Referenzpunkt

Gemäß der ärztlichen Verordnung nehmen die MTRA die Patientenlagerung vor und legen gemeinsam mit dem Radioonkologen den „anatomischen Referenzpunkt“ (auch „Null-Punkt“ genannt) fest. Dies geschieht mit einem Lasersystem. Von der Zimmerdecke und den seitlichen Raumwänden treffen dünne farbige Laserstrahlen auf den Patienten und markieren 4 Linien: eine entlang der Körpermitte (entlang dem Sternum) und jeweils eine an der rechten und linken Körperseite (von der Achsel zur Hüfte) und eine Querlinie, die alle 3 Längslinien miteinander verbindet. Die 3 Kreuzungen sind die Fixpunkte der äußeren Markierung. Sie werden mit röntgendichtem Material, z. B. Metallkügelchen (und mit Filzstift für später) gekennzeichnet, damit man sie in den CT-Schnitten lokalisieren kann. Bei

exakter Einstellung findet man die 3 Fixpunkte auf einem einzigen CT-Schnittbild wieder. Durch die 3 Punkte auf der Haut ist gleichzeitig der innere Fixpunkt (= **Anatomischer Referenzpunkt**) festgelegt, nämlich der Punkt, in dem sich die 3 äußeren Fixpunkte kreuzen.

Nun werden im CT dreidimensionale axiale Schnittbilder von der zu bestrahlenden Körperregion angefertigt. Die Schichtdicke variiert zwischen 2 mm (z. B. für Bestrahlungen am Auge) und 10 mm (z. B. für große Metastasen).

- **Zur Bestrahlungsvorbereitung gehört in den meisten Fällen ein Planungs-CT, das CT wird aber auch zur Katheterkontrolle beim Afterloading, zur Sondenlegung und Lageprüfung für Hyperthermiebehandlungen und zur Stagingkontrolle vor Boost-Bestrahlungen genutzt.**

Aufgaben der MTRA im CT

- Patienten im Porträt photographieren zur Wiedererkennung und Dokumentation
- Patienten optimal und reproduzierbar lagern mit Lagerungshilfen
- den sog. Anatomischen Referenzpunkt (innerer Fixpunkt) festlegen, d. h. auf der Haut bzw. der Maske die 3 äußeren Fixpunkte (= Kreuzungen der Laserstriche) anzeichnen
- das CT mit der benötigten Schichtdicke (zwischen 2 und 10 mm) durchführen
- die Lagerung und alle verwendeten Hilfsmittel (auch als Photo) dokumentieren
- Dokumentation der verwendeten kV und mAS (nach RöV), ggf. Röntgenpass ausfüllen
- Schnittbilder an die Medizinische Physik versenden oder selbst in das Planungssystem einlesen (je nach Organisationsstruktur).

9.6.6 Weiterverarbeitung des CT: Fusion und Konturierung

Matching mit diagnostischen Aufnahmen

Nicht nur die Schichten des Planungs-CT können an den Planungsrechner geschickt werden, sondern auch diagnostische Aufnahmen. MRT- und/oder PET-CT-Schnitte werden mit den Planungs-CT-Bil-

dern übereinandergelegt (= Fusion, Matching) und unterstützen so die Bestimmung der Konturen. Der Radioonkologe zeichnet anschließend auf den axialen Schnittbildern verschiedene Volumina ein:

Konturierung Zielvolumen

Tumervolumen (GTV = Gross Tumor Volume): Das GTV beinhaltet den makroskopischen Tumor, sei es der Primärtumor, seien es Lymphknotenmetastasen oder Fernmetastasen.

Klinisches Zielvolumen (CTV = Clinical Tumor Volume): Das CTV umschließt den Bereich des makroskopischen Tumors (GTV) und die Region, in der noch Tumorzellen verstreut sein könnten.

Beim Glioblastom weiß man aufgrund von Hirnge-webeuntersuchungen in den Obduktionen, dass sich viele einzelne Krebszellen rund um den Primärtumor befinden. Das CTV ist demnach der Hirntumor (GTV) plus ein Saum von zirka 2 cm, der die mikroskopische Ausbreitung abdeckt. Konnte der Hirntumor operativ entfernt werden, existiert kein GTV mehr, das CTV umfasst dann die ehemalige Tumorregion plus dem subklinischen Sicherheitssaum.

Planungszielvolumen (PTV = Planning Target Volume): Das Planungszielvolumen (PTV) beinhaltet das CTV und wird erweitert im Hinblick auf Veränderungen, die während der Bestrahlung auftreten können. Dazu gehören: Lagerungsungenauigkeiten durch die MTRA, Patientenunruhe, Organbewegungen durch Atmung, Peristaltik (Wellenbewegung des Darms), unterschiedliche Füllungszustände von Blase und Rektum, aber auch Gewichtszu- oder abnahme.

Risikoorgane

Nach dem hippokratischem Grundsatz „dem Patienten so gut es geht zu helfen und ihm auf keinem Fall zu schaden“, soll das gesunde Gewebe, das den Tumor umgibt bzw. im Bestrahlungsareal liegt, so geschont werden, dass der Patient keine neuen Einschränkungen in seiner Lebensqualität hinnehmen muss. Aus langjähriger Erfahrung sind die Dosiswerte für die einzelnen Organe bekannt, bei deren Überschreitung eine Funktionsminderung droht (siehe auch ► Abschn. 9.4.8 Tumorphathologie).

Eine große Rolle spielt dabei, ob die Bestrahlung das Organ komplett oder nur teilweise erfasst.

Wird bei einer Beckenbestrahlung das Rektum in seiner gesamten Zirkumferenz mit einer hohen Dosis bestrahlt, fibrosiert die Darmwand. Die Peristaltik, die für einen geregelten Stuhlgang sorgt, wird stark beeinträchtigt. Bei derselben Dosis, nur auf ein Drittel des Lumens appliziert, ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass der Patient davon etwas spürt.

In Diagrammen, sog. **Dosisvolumenhistogrammen** stellt man zeichnerisch die Organvolumen dar, die eine bestimmte Dosis erhalten. Zur Beurteilung ist die Kenntnis der Toleranzdosen (TD) wichtig.

Die TD 5/5 = 3 Gy für die Linse bedeutet, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% in 5 Jahren eine Linsentrübung auftritt, wenn bei der Bestrahlung mit einer Dosierung von 5×2 Gy / Woche die Linse insgesamt 3 Gy erhalten hat. Die TD 50/5 gibt die Dosis für die Entwicklung einer späten Nebenwirkung mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% in 5 Jahren an, für die Linse beträgt sie 6 Gy.

9.6.7 Erstellen des Bestrahlungsplanes

Liegt die Konturierung des PTV und der Risikoorgane sowie deren Dosisvorgaben vor, erstellt der Medizinphysikexperte an den CT-Schnitten einen Bestrahlungsplan, meist mithilfe eines kommerziellen Computerprogramms. Nur für einfache Felder kommt eine Einstellung der Felder am Simulator in Frage (► Abschn. 9.3.4 einfache Techniken). Für die Bestrahlung mit mehreren Feldern (► Abschn. 9.3.4) und sowieso bei inhomogener Dosisverteilung ist die Berechnung so kompliziert, dass die Durchführung mit Blatt und Bleistift viele Tage dauern würde und auf riesige Tabellen zurück gegriffen werden müsste – ein Computerprogramm erledigt die Aufgabe in Minuten.

Zuerst werden die Feldgrößen und die Einstrahlwinkel festgelegt. Mit MLC (► Abschn. 9.3.1) wird das Bestrahlungsfeld an die Kontur des Tumors angepasst. Die Berechnung der Dosierung muss nicht immer, nimmt aber häufig Bezug auf das Isozentrum. Um diesen Punkt zu bestimmen, gibt man an, wie weit entfernt sich das Isozentrum

vom Anatomischen Referenzpunkt (innerer Fixpunkt ► Abschn. 9.6.5) auf der x-, y- und z-Achse in Millimetern/Zentimetern befindet.

Am Computer kann man per Knopfdruck die Position der MLC-Stäbchen befehlen, z. B. „Fahre die MLC auf das PTV mit einem Abstand von 7 mm!“. Ebenso berechnet das elektronische Programm die Dosisverteilung. Dieser Automatismus ist verführerisch und eine Gefahr für Fehlerquellen, umso mehr, weil die Pläne immer komplizierter werden. Deshalb soll ein Bestrahlungsplan ohne Zeitnot, in Konzentration und ohne Störungen von außen vom dafür ausgebildeten Personal erstellt und nach dem Vier-Augen-Prinzip kontrolliert werden.

Frage: Woher weiß der Computer, wie sich die Dosis bei dieser und jener Feldanordnung im Gewebe verteilt? Diese große Datenmenge wurde gesondert für jeden Gerätetyp mittels realer Messungen am Phantom erhoben und in den Computer eingegeben.

9.6.8 Beurteilung und Freigabe des Bestrahlungsplanes

Der Radioonkologe, u. U. der Dosimetrist und der Medizinphysikexperte (MPE) beurteilen gemeinsam den Bestrahlungsplan gemäß den Empfehlungen der „International Commission on Radiation Units and Measurements“ (► Abschn. 9.3.3). Wie auf einer Wanderkarte, auf der die unterschiedlichen Höhen als Ringe eingezeichnet sind, werden im Bestrahlungsplan Isodosen abgebildet. So umschließt die 95%-Isodose den Bereich, in dem überall mindestens 95% der verordneten Dosis ankommen.

► Unter anderem diskutiert man folgende Fragen: Wird das PTV homogen mit 95–107% der geplanten Dosis abgedeckt? Ist der Dosisabfall am Rand des Bestrahlungsvolumens ausreichend steil? Werden Risikoorgane genügend geschont? Sind die MLC in optimaler Position? Benötigt es einen Bolus (= künstliche Verdickung der Haut mit Weichteil-äquivalentem Material, zum Ausgleich einer unregelmässigen Patientenoberfläche oder um an der

Oberfläche ausreichend Dosis applizieren zu können, z.B. bei tumoröser Hautinfiltration)?

Ist der Plan akzeptiert, wird die definitive Bestrahlungsverordnung erstellt, die zusätzlich noch genaue Feld-Bezeichnungen (Nummerierung und Name, Größe) sowie den Gantry-Kollimator- und Tischwinkel, die Position des Isozentrums, die Wichtung der einzelnen Felder, die Dosis und die Monitoreinheiten pro Feld, den Fokus-Haut-Abstand (FHA) sowie die Verwendung von Keilfiltern angibt (► Abschn. 9.3.3).

9.6.9 Erste Bestrahlung mit Verifikation

Erste Bestrahlung – CT-gestützt

Die Bestrahlungsdaten werden an das Bestrahlungsgerät übermittelt, gleichzeitig mit Vergleichsaufnahmen, sog. DRRs (digital reconstructed radiograph). Das sind aus den Planungs-CT-Schichten rekonstruierte konventionelle Röntgenaufnahmen, die die Körperregion mit dem Bestrahlungsfeld und den MLCs zeigen. Pro Feld wird ein DRR angefertigt.

Bei der ersten Bestrahlung erklärt die MTRA dem Patienten das Vorgehen und die Sicherheitsvorkehrungen (ständiger Kontakt per Kamera und Mikrofon, jederzeit Unterbrechung der Sitzung möglich). Dann lagert sie ihn exakt wie im Planungs-CT, wobei die Markierungen des Anatomischen Referenzpunktes (äußere Fixpunkte) mit dem im Bestrahlungsraum integrierten Lasersystems in Übereinstimmung gebracht werden. I. d. R. wird anschließend eine Verschiebung (off-set) vom Anatomischen Referenzpunkt zum Isozentrum hin vorgenommen. Abhängig von der Klinik sind bei diesem Vorgang der verantwortliche Facharzt und der Physiker/Dosimetrist, der den Plan erstellt hat, anwesend.

Zur Kontrolle der Feldeinstellung fertigt man Aufnahmen jedes Bestrahlungsfeldes an und vergleicht sie mit den DRRs (► Abschn. 9.3.1). Erst, wenn die Einstellung absolut korrekt ist, wird das Isozentrum auf dem Patient bzw. auf der Bestrahlungsmaske definitiv fixiert (z.B. mit Filzstift, Pflaster, Tattoo, siehe auch ► Abschn. 9.7 Pat in RT / RT-Markierungen) und die erste Bestrahlung durchgeführt.

➤ **Die Striche sollen dünn gezogen werden für optimale Genauigkeit in der Lagerung. Bei Verblassen unbedingt bei Laserlicht-Einstellung nachzeichnen, auf gar keinen Fall frei Hand!**

Unterschiedliche Farben helfen bei der Unterscheidung zwischen der Markierung des Isozentrums und den Begrenzungen des Bestrahlungsfeldes. Auch wenn mehr als ein Bestrahlungsvolumen behandelt wird, kann man sich mit dieser Methode einfach zurechtfinden.

Erste Bestrahlung – Direkteinstellung und Notfallbestrahlung

Reguläre Direkteinstellung

Liegen keine Risikostrukturen in unmittelbarer Nähe und ist die zu bestrahlende Region von außen, also ohne Röntgendiagnostik gut abgrenzbar (z.B. Hauttumor, Ellenbogen am Röntgentherapiegerät), kann mittels einfacher Technik (Stehfeld oder Gegenfelder) bestrahlt werden. Nach Bestimmung der Feldgröße(n) und -tiefe(n), des Tisch-, Gantry- und Kollimator-Winkels und weiteren Angaben (Strahlenart, Energie, Bolus) kalkuliert der Physiker anhand von Tabellen die Dosis bzw. Monitoreinheiten pro Feld. Kurze Zeit später kann bereits die Bestrahlung durchgeführt werden.

Direkteinstellung im Notfall

Im Notfall wird auf umfangreiche Bestrahlungsplanung verzichtet. Falls ein Simulator zur Verfügung steht, werden die Felder dort festgelegt (► Abschn. 9.3.4). Wenn eine Abteilung auf dieses Gerät nicht zurückgreifen kann, wird der Patient direkt auf dem Behandlungstisch nach Anweisung des Radioonkologen gelagert. Das weitere Vorgehen ist identisch zur regulären Direkteinstellung.

Die Direkteinstellung am Linearbeschleuniger wird äußerst selten vorgenommen und ist sehr seltenen Notfall-Situationen vorbehalten, in denen möglichst schnell mit der Bestrahlung begonnen werden soll, z.B. bei Blutungen, drohendem Querschnitt, oberer Einflusstauung, die am Wochenende oder nachts aufgetreten sind.

9.7 Der Patient in der Radioonkologie

C. Marks

9.7.1 Information der Patienten

Die detaillierte Information der Patienten über die ihm bevorstehende Therapie ist unerlässlich, da die Bestrahlung immer noch mit starken Vorurteilen behaftet ist und bei Patienten wie auch bei den Angehörigen Ängste und Misstrauen hervorruft. Die Gerüchte, durch eine Radiotherapie „verstrahlt“ oder „verbrannt“ zu werden, halten sich auch heute noch hartnäckig und stammen teilweise aus Erfahrungen mit dem Kobaltgerät, unter dessen Anwendung sich tatsächlich oft flächige feuchte Epitheliolysen (vor allem im HNO-Bereich), Hautfibrosen und Teleangiectasien entwickelten. Dieser Gerätetyp ist seit den 90er-Jahren ein Auslaufmodell. Mit den heutigen Linearbeschleunigern kann weitaus präziser und dementsprechend gewebeschonender bestrahlt werden. Viele Internetseiten und Informationsbroschüren helfen zusätzlich, sich mit dem Thema Strahlentherapie zu befassen.

Bereits beim ersten Kontakt mit dem Patienten sollte beachtet werden, dass es unterschiedliche Patientencharaktere gibt und dass die Zugangsweise auf den Patienten dahingehend abgestimmt wird:

1. Der **neugierige Patient**: Dazu gehören Patienten, die über die Maßen genau informiert werden möchten. Er sammelt alles, was es über seine Erkrankung und die Behandlung zu wissen gibt.
2. Der **ablehnende Patient**: Einige Patienten lehnen es ab, genauer informiert zu werden, sie verdrängen die Erkrankung und die Behandlung. Über die Situation soll nicht gesprochen werden, sie ergeben sich aber häufig in ihr Schicksal. Der Patient gibt sein Einverständnis zur Therapie und ist kooperativ.
3. Der **ängstliche, in sich gekehrte Patient**: Die Tatsache an Krebs erkrankt zu sein überfordert ihn. Er weiß nicht, was ihm bevorsteht und wie es weitergehen soll. Von sich aus werden diese Patienten eher selten aus sich herausgehen. Sie sind angewiesen auf einen offenen, mitfühlenden Umgang, der ihnen die Angst nimmt.

4. Der **uninformierte Patient**: Durch die ausdrückliche Bitte von Angehörigen kann es vorkommen, dass dem Patienten von Seiten der Ärzte und dem Personal Informationen bewusst verschwiegen werden sollen, um ihn nicht zu belasten. Hierbei wird dem Patienten sein Gesundheitszustand oder seine Prognose wissentlich vorenthalten. Mit der in Deutschland gesetzlich vorgeschriebenen Aufklärungspflicht und -form ist dieses Vorgehen praktisch nicht vereinbar.

Sowohl der Strahlentherapeut als auch die MTRA müssen im Umgang mit dem Patienten behutsam vorgehen und abschätzen können, mit welchem Patienten-Charakter sie es zu tun haben, um Vertrauen und Kooperation zu erwerben. Von großem Vorteil ist auch eine gewisse Konstanz des MTRA-Teams am Bestrahlungsgerät. So kann sich der Patient auf feste Ansprechpartner verlassen und sich auf seine tägliche Behandlung mental besser einstellen.

Ambulanzgespräch

Dem Patienten wird vom Strahlentherapeuten genauestens der Sinn, der Ablauf und die Dauer der geplanten Bestrahlung erklärt. Auf Besonderheiten und mögliche Nebenwirkungen wird mithilfe eines Aufklärungsbogens hingewiesen. Auch über Therapiemöglichkeiten anstelle der Bestrahlung muss aufgeklärt werden. In Deutschland ist festgelegt, dass der Patient, außer im Notfall, nach einer 24-stündigen Bedenkzeit sein Einverständnis schriftlich geben muss. In anderen Ländern gelten weniger strenge Regeln. Spezielle Broschüren und Merkblätter liegen zusätzlich in jeder Radioonkologie-Abteilung aus, z. B. die „Blauen Ratgeber“ der Deutschen Krebshilfe e. V. oder die Hefte zur Radiotherapie der Schweizer Krebsliga (► Abschn. 9.6.2 RT-Planung / Patienteninformation).

Behandlungsablauf während der Bestrahlung

Direkt vor der Ersteinstellung bespricht die MTRA nochmals genau mit dem Patienten den Ablauf der Sitzung. Ihre Aufgabe ist es vor allem, Ängste zu nehmen und ein Sicherheitsgefühl zu vermitteln. Auf diese Weise wird der erste Schritt für eine Vertrauensbasis zwischen den MTRA und dem Patienten geschaffen.

Bei der Festlegung der täglichen Termine sollte der Patient mit Fragen nach seinen Vorlieben / Möglichkeiten eingebunden werden. Er wird sich dadurch nicht als Bittsteller, sondern als kooperativer Partner im Behandlungsprozess wahrnehmen (► Abschn. 9.2.1).

Regelmäßige Arztgespräche

In mindestens wöchentlich stattfindenden Arztgesprächen verfolgt der Strahlentherapeut den Behandlungsverlauf. Idealerweise läuft das Gespräch ungestört ab. Probleme werden besprochen, Nebenwirkungen dokumentiert, bei Bedarf entsprechende Maßnahmen eingeleitet, wie z. B. Medikamenteneinnahme oder Intensivierung der unterstützenden Pflege. Auch die Anbindung an eine Pflegeambulanz oder Tagesklinik, sofern solche speziellen Einrichtungen vorhanden sind oder die stationäre Unterbringung können erforderlich sein.

Nachsorge

Im Abschlussgespräch erhebt der Strahlentherapeut einen körperlichen Untersuchungsbefund, um bereits eingetretene Therapieerfolge und das Ausmaß an Nebenwirkungen zu dokumentieren. Er wird mit dem Patienten und seinen Angehörigen über die nächsten notwendigen Schritte sprechen. Diese Informationen erhält auch der weiterbehandelnde Haus- oder Facharzt in einem Arztbrief.

Nachsorgeuntersuchungen und die Wiedervorstellung in der Radioonkologie erfolgen in regelmäßigen Abständen, um den Heilungsverlauf, die Rückbildung von Nebenwirkungen der Bestrahlung oder die Entwicklung von späten Nebenwirkungen erfassen zu können. Gegebenenfalls werden Kontrolluntersuchungen eingeleitet.

9.7.2 Psychoonkologische Betreuung

Die Psychoonkologie stellt eine Fachdisziplin innerhalb der Onkologie dar. Sie befasst sich mit der seelischen und sozialen Situation von Krebspatienten und deren Angehörigen und unterstützt auch bei sozialrechtlichen Problemen. Die Betreuung erfolgt sowohl im ambulanten wie im stationären Bereich in enger interdisziplinärer Zusammenarbeit mit den Ärzten und Pflegekräften.

➤ **Zum Psychoonkologischen Dienst gehören Ärzte, Psychologen aber auch Sozialarbeiter, die sich in einer umfassenden Weiterbildungsmaßnahme auf den Umgang und die Betreuung von onkologischen Patienten spezialisiert haben. Der psychoonkologische Dienst stellt für die Patienten, deren Angehörigen und das Personal der Onkologie eine große Hilfe dar.**

Die Betreuung des Patienten und dessen Angehörige durch den Psychoonkologischen Dienst umfasst folgende Tätigkeiten:

- Selbsthilfemaßnahmen
- Gesprächstherapien: als Einzel- oder Gruppengespräch mit Angehörigen („Krisengespräche“)
- Sozialberatung (z. B. Organisation von Haushaltshilfen)
- Rehabilitationsberatung: Organisation von Reha, Wiedereingliederung in den Beruf
- Stationär: Teilnahme an Visiten, Supervision und Teambesprechungen
- Sterbebegleitung in palliativer Situation

Die Ziele der psychoonkologischen Betreuung sind der Erhalt sowie die Verbesserung der Lebensqualität des Patienten und ebenso der Angehörigen, da auch sie in dieser Krisensituation hilfsbedürftig sind. Die Familie oder Partner geben dem Kranken größtmöglichen Rückhalt, der auf Dauer kräftezehrend ist. Dazu kommt noch die Unsicherheit, ob man sich in der ungewohnten Situation richtig verhält bzw. die Angst, Dinge offen auszusprechen. Vor allem, wenn keine Hoffnung mehr auf Heilung besteht, kann professionelle Unterstützung den letzten Lebensabschnitt für alle Beteiligten erleichtern.

Auch die Betreuung von Angehörigen ist ein wichtiger Abschnitt in der täglichen Arbeit der Psychoonkologen. Oftmals wird unterschätzt, welch großer, überwiegend seelischer Belastung, Angehörige ausgeliefert sind. Sie sind es, die tagtäglich mit der Erkrankung konfrontiert sind und den Patienten als Familienmitglied oder Freund verängstigt oder leidend erleben müssen. Dabei sind viele Angehörige überfordert und wissen nicht, wie sie sich richtig verhalten und mit der Situation umgehen sollen.

- **Manchmal erleben MTRA als Bezugsperson im täglichen Bestrahlungsbetrieb Patienten, von denen sie das Gefühl haben, dass ihnen die Information über psychoonkologische Angebote im Haus sehr weiterhelfen könnte.**

Der psychoonkologische Dienst ist in der onkologischen Patientenbetreuung noch nicht überall zugänglich, sollte aber nach Möglichkeit eingebunden werden.

9.7.3 Einschränkungen während der Bestrahlung

Kommt der Patient zum ersten Mal in die Strahlentherapie, hat er viele Fragen und Sorgen, wie es die nächsten Wochen für ihn weitergehen soll, wie er sich zu verhalten hat und wie sich die Therapie in seinen Alltag einbinden lässt.

Bestrahlungsmarkierungen

Damit täglich die Lagerung des Patienten korrekt reproduziert werden kann, sind spezielle Markierungen auf der Haut oder der Bestrahlungsmaske unabdingbar. Dazu gibt es zahlreiche Methoden, von manchen ist man mittlerweile abgekommen und hat sie durch andere ersetzt. Sie begleiten den Patienten während der gesamten Bestrahlungszeit und sollten nach Möglichkeit nicht für jedermann sichtbar sein, um dem Patienten ein gewisses Maß an Privatsphäre zu gewährleisten.

Auf Bestrahlungsmasken lässt sich am einfachsten die Isozentrumsmarkierung oder die Markierungen für die Raumlaser und das Bestrahlungsfeld anzeichnen, ohne den Patienten zu entstellen.

Anzeichnungen auf dem Körper werden oft mit handelsüblichen, dünnen Filzstiften aufgemalt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Kreuze und Striche der Hautmarkierungen nicht frei Hand gemalt werden, sondern in möglichst dünnen Linien ausschließlich entlang der Laserstrahlen. In vielen Radiotherapien wird anschließend mit durchsichtigen Pflastern abgeklebt, um dem Patienten das Duschen zu ermöglichen, ohne dass die Anzeichnungen verloren gehen. Bei Patienten mit einer Pflasterallergie können die Pflaster auch weggelassen werden, allerdings müssen die Patienten dann entsprechend

vorsichtiger beim Waschen vorgehen, und die Markierungen werden häufig nachgezogen.

- **Achten Sie bei den Anzeichnungen auf der Haut darauf, dass Sie nur die wirklich nötigen Bereiche markieren und den Patienten nicht großflächig bemalen. Bei der Mamma-Bestrahlung kann es passieren, dass Sie die Patientin bittet, die cranialen Anteile des Bestrahlungsfeldes wegzulassen, damit diese nicht aus dem Dekolleté schauen – es könnte ihr unangenehm sein.**

Eine weitere Methode ist es, markante Punkte wie das Isozentrum mit hauchdünnen Nadeln eines Tätowierungsstifts zu fixieren. Die Patronen sind in unterschiedlichen Farben vorrätig: einerseits zur Abstimmung auf die Hautfarbe, andererseits, um auch verschiedene Fixpunkte unterscheiden zu können (z. B. bei zwei RT-Volumina). Der große Vorteil besteht in der Unauffälligkeit der Zeichen und in ihrem völligen Verschwinden in den Monaten nach der Radiotherapie. Da Tattoo-Stift und Farben teuer sind, verwenden manche Abteilungen stattdessen gewöhnliche Tinte und eine feine Injektionsnadel. Da in diesem Fall die Farbe mit der Zeit nur verblasst, ist die Methode im sichtbaren Bereich im Sinne einer dauerhaften Stigmatisierung kritisch zu sehen.

Terminvergabe

Für den Patienten ist seine Radiotherapie das zentrale Thema. Es ist die Tätigkeit des Tages, um die sich alles dreht und das über mehrere Wochen. Falls er nicht stationär behandelt wird, erfordert allein schon der hohe Zeitaufwand eine Umorganisation seines gewohnten Lebensrhythmus. Zu den Behandlungs- und Wartezeiten vor Ort summiert sich gewöhnlich ein langer Anfahrtsweg gepaart mit einem Zeitpuffer im Hinblick auf Verkehrsstau und Parkplatzprobleme. Der Patient bewältigt das alles, während er sich ständig Sorgen um seine Genesung macht und vielleicht sogar noch körperlich eingeschränkt ist.

Verständlich aus Sicht des Patienten und eigentlich wünschenswert wäre es, wenn sich neben der Bestrahlung auch noch Zeit findet für Entspannung und Ablenkung. Auch im Fall einer fortge-

setzen Berufstätigkeit oder bei Müttern mit Kindern erleichtert ein Plan für die gesamte Zeit der Radiotherapie mit festen Terminen die Organisation der nicht-strahlentherapeutischen Angelegenheiten. Der Bestrahlung sollte immer der Vorrang gegeben werden, da es dabei schließlich um die Gesundheit des Patienten geht. Dennoch sollten bei der Vergabe der Behandlungszeiten die MTRA zusammen mit dem Patienten eine gemeinsame Lösung finden. Dem Patienten wird so ermöglicht, die Bestrahlungstermine ohne größere Einschränkungen wahrzunehmen und gleichzeitig auch den reibungslosen Ablauf innerhalb der Abteilung zu gewährleisten. Diese Aufgabe ist nicht immer leicht zu bewältigen, sie erfordert Organisationstalent und Kompromissfähigkeit (► Abschn. 9.2.1, Organisation). Die MTRA stehen dabei häufig vor einer enormen Herausforderung, es einerseits dem Patienten recht zu machen und andererseits sämtliche weiteren Behandlungstermine, wie z. B. Chemotherapie und Hyperthermie, der anderen Patienten mit den Bestrahlungsterminen zu koordinieren. So können den Patienten unnötige Wartezeiten zwischen den einzelnen Terminen erspart werden.

Gelegentlich treten Patienten auch spontan auf die MTRA zu und wünschen für den nächsten Tag einen Alternativtermin. Trotz Verständnis und Bereitschaft zur Flexibilität lässt sich das oft nicht realisieren. Zu Beginn einer Radiotherapie sollte auf die Komplexität der Terminvergabe hingewiesen werden, damit sich der Patient darauf einstellt, seine weiteren privaten Termine langfristig zu planen.

Patienten, die im Bereich des Beckens bestrahlt werden und zu jeder Bestrahlung mit gut gefüllter Blase erscheinen müssen, leiden am ehesten unter täglich wechselnden Terminen oder unter Verzögerungen durch außerplanmäßige Ereignisse oder Geräteausfälle. Bei voraussichtlich längerer Wartezeit sollte umgehend informiert werden, damit der Patient ggf. seine Blase entleeren kann und sich nicht quälen muss. Patienten mit Prostatakrebs, die mit leerem Rektum zur Bestrahlung kommen sollen, sind geradezu auf einen gewissen Rhythmus der Termine angewiesen. Denn die sofortige Entleerung des Darmes lässt sich nicht erzwingen, sie kann nur mittels Abführmittel gesteuert werden.

Fatigue

Diese Form der Müdigkeit tritt bei Krebspatienten auf. Die Fatigue kann sich physisch mit Schwäche, Abgeschlagenheit, Schlafproblemen oder emotional mit seelischer Erschöpfung, Gereiztheit, Angstzuständen, Absonderung von der Außenwelt auswirken. Patienten können ihren Alltag nicht mehr meistern und müssen sich oft ausruhen. Ursache kann die Krebserkrankung selbst oder die Krebstherapie, wie z. B. die Bestrahlung sein. Die Behandlung besteht in der Reduktion körperlicher Betätigung und dem Versuch, sich vor weiterer seelischer Belastung zu schonen. Falls die Radiotherapie die Symptome der Fatigue verursacht, klingen die Beschwerden einige Monate nach Therapieabschluss meist von allein wieder ab.

Körperpflege

Für die entsprechende Pflege, je nachdem welche Körperregion bestrahlt werden soll, wird dem Patienten bereits in der Ambulanz ein Merkblatt mit den wichtigsten Informationen ausgehändigt. Dennoch haben die Patienten meist noch viele Fragen, darum sollten die MTRA dem Patienten Auskunft über die Körperpflege geben können.

Wichtige Pflegehinweise für den Patienten

- Bei der Bestrahlung der Brust
 - nur pH-neutrale Seifen/Lotions verwenden
 - keine BHs anziehen, die Druckstellen verursachen
 - keine enganliegende Kleidung tragen, die auf der Haut scheuert
 - nur Salben oder Cremes anwenden, wenn die Haut bereits Probleme macht (Trockenheit, Juckreiz, Rötungen), nur in Absprache mit dem Arzt
- Bei der Bestrahlung im Kopf-Hals-Bereich
 - nur pH-neutrale Seifen/Lotions verwenden
 - keine scharfen oder sauren Speisen/Getränke zu sich nehmen
 - auf Alkohol und Nikotin verzichten
 - direkte Sonnenexposition der bestrahlten Haut vermeiden

- auf Mundhygiene mit regelmäßigem Zähneputzen und Mundspüllösungen achten
- Bei der Bestrahlung im Beckenbereich
 - nur pH-neutrale Seifen/Lotions verwenden
 - keine scharfen, blähenden oder sauren Speisen/Getränke zu sich nehmen

In vielen Kliniken gibt es speziell geschultes Pflegepersonal, das den Patienten während der gesamten Zeit der Bestrahlung betreut. Sie sind die erste Anlaufstelle für alle unterstützenden (supportiven) und pflegerischen Maßnahmen. Aus langjähriger Erfahrung geben sie Tipps und Tricks zur richtigen Pflege, mit denen die Unannehmlichkeiten der Behandlung erleichtert und das Auftreten gewisser Nebenwirkungen vermieden werden können. Sie entlasten dadurch die anderen Berufsgruppen im Radioonkologie-Team.

Durch die Markierungen auf der Haut ist der Patient in seiner üblichen Körperpflege eingeschränkt. Meist ist das Duschen mit pH-neutraler Seife erlaubt, aber Baden oder Schwimmen sind nicht möglich, da sonst die Anzeichnungen verloren gehen würden. Außerdem würde die bestrahlte Haut im Wasser aufweichen und empfindlicher werden.

Intimpflege: Die bisherigen Versuche, mittels Applikator und speziellen Cremes die Vaginalschleimhaut vor radiogenen Spätfolgen zu schützen, haben sich leider nicht als zuverlässig wirkungsvolle Maßnahmen erwiesen. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass die Beeinträchtigung sehr individuell wahrgenommen wird.

Sportliche Aktivitäten

Sport in Maßen ist erlaubt, so lange es dem Patienten dabei gut geht, und er sich nicht überanstrengt. Es ist darauf zu achten, dass die Markierungen erhalten bleiben, und die Haut weder durch Reibung noch starkes Schwitzen zu sehr beansprucht wird.

9.7.4 Ängste des Patienten

Patienten, die die Diagnose „Krebs“ erhalten haben, sind emotional belastet, und es bedarf eines hohen

Maßes an Einfühlungsvermögen, Verständnis und Offenheit im Umgang mit dieser Patientenklientel. Sie erwarten Ehrlichkeit und ein „offenes Ohr“, wenn es ihnen schlecht geht.

In Abhängigkeit ihrer Prognose, ob es sich um ein kuratives oder palliatives Therapiekonzept handelt, treten unterschiedliche Sorgen und Ängste auf.

➤ **Für weitere Informationen rund um die Krebserkrankung und für Informationsmaterial für Patienten, Ärzte und Angehörige: Deutsche Krebshilfe e.V. (► www.krebshilfe.de)**

Angst vor der Diagnose „Krebs“

Die Diagnose, an Krebs erkrankt zu sein, überfordert die meisten Patienten und ihre Angehörigen zu Beginn. „Krebs“ wird zunächst mit dem Tod gleichgesetzt und dabei vergessen, dass viele Karzinomleiden heilbar sind. Auch gibt es unterschiedliche Arten von bösartigen Erkrankungen, und auch das Tumorwachstum kann bei gleichartigen Zellen unterschiedlich sein. Viele Patienten neigen leider dazu, sich mit anderen Personen, z. B. aus dem Bekanntenkreis, vergleichen zu wollen, die die gleiche Diagnose erhalten haben. Dabei ist jede Krankengeschichte je nach Entstehungsursache, Gewebetyp, Ausbreitungsmuster, Rezeptorpositivität etc. ein Fall für sich, und deswegen wird das Therapieangebot auch individuell für jeden einzelnen Patienten erstellt.

Angst vor Strahlung

Viele Patienten sind der Meinung, dass sie durch die Strahlentherapie völlig „verstrahlt“ werden und auch eine Gefahr für ihr Umfeld darstellen, weil sie die Bestrahlung aufnehmen und nach der Behandlung selbst strahlen würden. Die Bedenken lassen sich zerstreuen, indem man dem Patienten vorab erklärt, wie die bei der Radiotherapie eingesetzte Strahlung wirkt (► Abschn. 9.3, RT-Geräte und ihre spez. RT-Techniken) und dass sie keine Bedenken bezüglich der Strahlenbelastung ihres Umfeldes haben müssen.

Angst vor der Bestrahlung

Zahlreiche Untersuchungen und Behandlungen haben dem Patienten meist schon sehr zugesetzt, bevor er zur Bestrahlung kommt. Die Radiothera-

pie ist den meisten Patienten unheimlich. Sie fragen sich, ob es schmerzhaft oder laut ist oder ob man ein Wärmegefühl empfindet.

Ein weiteres Phänomen ist, dass im Umfeld des Patienten und selbst im Wartebereich der Abteilung regelrechte Horrorgeschichten über die Bestrahlung und deren Nebenwirkungen erzählt werden, wie: „Meine Haut war total verbrannt.“ Nebenwirkungen können, müssen aber nicht auftreten und sind in den seltensten Fällen so dramatisch wie erzählt. Der Ursprung der Gerüchte liegt wohl darin, dass Beschwerden vom Patienten selbst als schlimmer empfunden werden können, als sie eigentlich sind. Haus- bzw. Fachärzte, die ihre Patienten an die Strahlentherapie überweisen, haben naturgemäß kein Detailwissen über die Bestrahlung (wie auch ein Strahlentherapeut nicht über Operationen). Dies wird vom Patienten oft so ausgelegt, dass der Arzt ihnen die unangenehme Wahrheit verschweigen will. In diesem Fall hilft nur, an den Patienten zu appellieren, mit Fragen am besten die Spezialisten zu bemühen – nämlich das Fachpersonal in der Strahlentherapie.

Klaustrophobie

Jeder Patient, der zum ersten Mal den Bestrahlungsraum betritt, verspürt ein mulmiges Gefühl, wenn er die wuchtige Tür zum Bestrahlungsraum passiert und den Bestrahlungsraum mit dem Gerät sieht. Bei Platzangst sind die Empfindungen noch unangenehmer, regelrecht panisch. In diesem Fall ist es äußerst hilfreich, sich genug Zeit zu nehmen, um genau zu erklären, was während der Bestrahlung passiert. Wenn der Patient weiß, was ihn erwartet, wird er sich i. d. R. beruhigen. Der Hinweis auf die Kameras im Bestrahlungsraum und die eingebaute Sprechanlage zur Kommunikation mindern die Anspannung, während der Bestrahlung alleine im Raum bleiben zu müssen. Wenn es nötig ist, können die MTRA auch während der Sitzung ständig mit dem Patienten reden. Meist ist keine medikamentöse Hilfe nötig, wenn der Patient sich gut informiert und ernst genommen fühlt.

- **Reagiert ein Patient zu Beginn der Behandlung panisch, bleiben Sie ruhig und erzeugen nicht zusätzlich Unruhe, indem auch Sie in Panik geraten oder hektisch werden. Versuchen Sie, dem Patienten durch ein Gespräch die Angst**

zu nehmen und erklären ihm die Abläufe genau. Sollte er dennoch nicht bereit sein, sich bestrahlen zu lassen, holen Sie einen Arzt dazu, der dem Patienten möglicherweise mit einem Beruhigungsmittel weiterhelfen kann.

Patienten, denen zur Bestrahlung eine Maske angelegt werden muss, berichten oft über ein Gefühl der Enge und des Ausgeliefertseins. Wer schon einmal selbst unter einer Maske lag, kann dieses Empfinden sehr gut nachvollziehen – es hat nicht zwangsläufig mit Platzangst zu tun. Wird die Maske nicht toleriert, kann der Bereich um die Augen ausgeschnitten werden. Meist reicht das bereits aus, damit der Patient sich nicht so eingesperrt fühlt, da er wahrnehmen kann, was um ihn herum passiert. Wichtig ist es auch, nicht direkt über den Nasenlöchern oder dem Ohr Pflasterstreifen für Markierungen anzubringen, um das Atmen bzw. Hören nicht einzuschränken.

- **Es besteht die Möglichkeit, im Bestrahlungsraum Musik über eine Stereoanlage abzuspielen. Vielen Patienten hilft diese kleine Ablenkung, auch wenn die Bestrahlung nur wenige Minuten dauert. Auch eine ansprechende Raumausstattung durch Photos oder Dekorationen empfinden die meisten Patienten als sehr angenehm.**

9.7.5 Maßnahmen zur Vermeidung/ Behandlung radiogener Nebenwirkungen

Während und nach der strahlentherapeutischen Behandlung ist mit Nebenwirkungen zu rechnen, die den Patienten wenig bis stark beeinträchtigen können. Dabei wird zwischen akuten und späten Nebenwirkungen unterschieden.

Als **akut** werden Nebenwirkungen bezeichnet, wenn sie innerhalb von **90 Tagen nach Beginn** der Strahlentherapie auftreten. **Spätnebenwirkungen** entwickeln sich definitionsgemäß **ab dem 90. Tag**.

Die meisten akuten Nebenwirkungen können durch einfache pflegerische Maßnahmen therapiert werden, bei schwerwiegenderen Nebenwirkungen ist eine intensive Behandlung z. B. unter stationä-

ren Bedingungen nötig, vor allem wenn dadurch das Allgemeinbefinden des Patienten stark beeinträchtigt ist.

Über die möglichen Nebenwirkungen muss der Patient vor Beginn der Bestrahlung umfassend vom Radioonkologen aufgeklärt werden.

Im Folgenden sollen die am häufigsten strahlenbedingten Nebenwirkungen näher betrachtet werden.

Hautveränderungen

Da die Haut bei der perkutanen Behandlung zwangsläufig bei jeder Form der Bestrahlung durchdrungen werden muss, treten hier häufig Veränderungen auf. Ob und wie stark sich eine Hautreizung entwickelt, hängt u. a. auch von der Strahlenart (Photonen, Elektronen oder Protonen), der Strahlenenergie und der Einzel- bzw. Gesamtdosis ab. Am empfindlichsten reagiert die Haut im Bereich von Falten (z. B. axillär, submammär, inguinal oder an der Gesäßfalte) aufgrund der mechanischen Reibung und der Feuchtigkeit beim Schwitzen. Auch bei vorgeschädigter Haut kommt es schneller und ausgeprägter zu radiogenen Beschwerden.

Mögliche Hautreaktionen:

- Veränderung der Hautfarbe (Hyper- oder Depigmentierung)
- Trockenheit
- Spannungsgefühl
- Juckreiz
- Entzündungen

- **Klären Sie vor der ersten Bestrahlung mit dem Patienten, ob er über die entsprechenden Hautpfleßmaßnahmen während der Bestrahlung informiert ist (► Abschn. 9.7.3 Körperpflege). Empfehlen Sie, die Haut trocken und sauber zu halten und pH-neutralen Waschlotionen zu verwenden. Wenn der Patient Cremes oder Salben nimmt, sollte dies unbedingt nach der Bestrahlung erfolgen.**

Haarverlust durch Strahlung (Alopezie)

Durch die Chemotherapie vor oder während der Bestrahlung verlieren die Patienten ihre Haare, aber auch durch die Bestrahlung können die Haare ausgehen. Viele Patienten gehen davon aus, dass, wie bei der Chemotherapie, auch bei der Bestrahlung

alle Haare ausfallen. Davon betroffen sind Kopfhare, Wimpern, Barthare aber auch andere behaarte Regionen, aber nur in Bereichen, die direkt im Bestrahlungsfeld liegen. Die Haare wachsen nach Ende der Therapie nicht immer vollständig nach.

Wie stark oder schnell die Haare ausfallen ist abhängig von der Strahlendosis und dem Bestrahlungsvolumen (z. B. Ganzhirnbestrahlung oder nur partiell).

- **Der Patient kann sich vorsorglich eine Perücke verschreiben lassen, die es ihm erleichtert, sich bei Haarausfall ohne Hemmungen in der Öffentlichkeit zu zeigen. Patienten/-innen mit langen oder dicken Haaren oder einem fülligen Bart wird vor Therapiebeginn angeraten, die Haare zu kürzen, sodass beim späteren Haarverlust während der Radiotherapie die Bestrahlungsmaske weiterhin passt und nicht zu viel Bewegungsspielraum auftritt. Andernfalls müsste eine neue Maske angefertigt und der Vorgang der Bestrahlungsplanung komplett wiederholt werden.**

Haare kommen in anderer Qualität gelockt statt glatt, manchmal dünner, manchmal schon grau oder dunkler wieder innerhalb von 6–12 Wochen (bei den in der Therapie üblichen Dosen, nur bei sehr hoher Dosis endgültiger Haarverlust).

Entzündungen der Schleimhäute Mukositis

Eine Schleimhautentzündung (Mukositis) entwickelt sich regelhaft bei der Radiotherapie von Mundhöhlen- und Rachenkarzinomen. Sie führt aufgrund der Wundschmerzen zu Schluckbeschwerden, sodass der Patient Probleme beim Essen und Trinken bekommt und sich sein Allgemeinzustand (weiter) verschlechtern kann. Erschwerend können sich bakterielle oder virale Infektionen der Schleimhaut entwickeln, die die Symptome verstärken und die Abheilung behindern. Die zusätzliche Gabe von Chemotherapeutika machen die Schleimhäute noch empfindlicher für o. g. Einflüsse.

Dem Appetit nicht förderlich ist die gleichzeitige Zerstörung der Geschmacksknospen unter Radiotherapie. Oft beschreibt der Patient, dass alles nach Metall schmecken würde.

Auch im Hinblick auf den Therapieerfolg ist vom Rauchen dringend abzuraten (► Abschn. 9.4.6, O₂-Versorgung der Tumorzellen).

Als Therapiemaßnahmen dienen Schmerzmittel und antibakterielle Mundspüllösungen, die auch prophylaktisch verordnet werden können, wie z. B. Tepalta und Diflucan. Gegebenenfalls kann ein Antibiotikum verordnet werden.

Nach Abschluss der Radiotherapie bilden sich die Beschwerden erfahrungsgemäß innerhalb von wenigen Wochen zurück.

Mundtrockenheit bleibt meist bestehen, der Speichel ist mehr mukös als serös. Die verminderte Speichelproduktion begünstigt die Kariesbildung. Der Geschmackssinn kommt meist innerhalb von Wochen wieder, wobei die Geschmacksqualitäten salzig, bitter, süß unterschiedlich schnell zurückkommen.

Enteritis, Kolitis und Proktitis

Die häufigsten Nebenwirkungen, die während der Bestrahlung im Beckenbereich auftreten, sind die Enteritis (Entzündung des Dünndarms), die Kolitis (Entzündung des Dickdarms) und die Proktitis (Entzündung des Rektums). Dies äußert sich in Form von Tenesmen (Krämpfe in Form schmerzhaften Harn- und Stuhldrangs), in Verbindung mit starkem Durchfall.

Bei der Beckenbestrahlung liegen zwangsläufig Darmabschnitte im Bestrahlungsfeld. Der Patient kann durch Schonkost versuchen, den Darm zu entlasten und auf eine ausreichende Elektrolyt- und Flüssigkeitszufuhr achten. Bei anhaltenden Durchfällen können Medikamente (z. B. Loperamid) die Darmaktivität herabsetzen und Erleichterung verschaffen.

Mit gewissen Maßnahmen soll erreicht werden, dass die Radiotherapie schonend angewendet werden kann: Bei spezieller Lagerung auf dem Lochbrett in Bauchlage kann ein Teil der Dünndarmschlingen aus dem Bestrahlungsfeld herausgehalten werden. Auch eine gut gefüllte Harnblase drückt die Darmschlingen nach kranial. So wird zusätzlich gewährleistet, dass die Bauchorgane zu jeder Bestrahlung in der möglichst gleichen Position liegen.

Bei der Bestrahlung im Bauchbereich sollte der möglich auftretende Gewichtsverlust beachtet werden. Durch kalorienreiche Kost, z. B. Butter statt Margarine, Sahne in die Suppe geben, ein Gläschen

Rotwein als Appetitanreger vor dem Essen oder hochkalorische Ersatznahrung bei drohender Kachexie, sollte versucht werden, dass der Patient sein Gewicht hält. Bei Bedarf kann eine Ernährungsberatung hinzugezogen werden.

Auftretende Übelkeit und Erbrechen sind meist nur medikamentös beherrschbar.

Die Patienten müssen ausreichend trinken, da die zerstörten Zellen (durch die Bestrahlung) hauptsächlich über die Nieren ausgeschieden werden.

Blase

Blasen- und Harnröhrentzündung: Behandlung wie bei bakterieller Zystitis: Wärme, viel trinken, Blasentee, vom Arzt entzündungshemmende, schmerzlindernde Medikamente

Hämorrhoiden

Die Verschlimmerung der Hämorrhoiden durch die RT kann mithilfe von Zäpfchen und Salben behandelt werden.

9.8 Allgemeine Qualitätskriterien nach Leitlinien

J. Thiele

Qualitätsmanagement spielt in der heutigen Praxis eine weitreichende und bedeutende Rolle. In der Strahlentherapie laufen viele medizinische, physikalische und technische Teilprozesse zusammen. Um die Strahlenbehandlung der Patienten zu strukturieren, standardisieren und zu vereinfachen, wurden Gesetze erlassen, Richtlinien geschrieben, Leitlinien verfasst und Qualitätsmanagementsysteme eingeführt (QMS).

9.8.1 Richtlinien, Leitlinien und Empfehlungen

1. **Richtlinien** sind Handlungs- und Ausführungsvorschriften, aber kein förmliches Gesetz. Sie werden von höheren Instanzen, wie z. B. vom Gemeinsamen Bundesausschuss (GBA) veröffentlicht und regeln das Handeln und Unterlassen ärztlicher Tätigkeiten. Jedem Beteiligten

wird hier ein gewisser Ermessensspielraum eingeräumt.

2. **Leitlinien** der Medizin prägen die Qualität der ärztlichen Tätigkeit nicht nur in der Strahlentherapie, die Maßstäbe hierfür werden von Experten aus verschiedenen Berufsgruppen (Mediziner, Rechtswissenschaftler, Ethiker) und Fachgesellschaften zusammengetragen und festgelegt. Sie bilden die Basis für die Entwicklung neuer Leitlinien, die die Behandlung von Patienten in jeder medizinischen Fachrichtung verbessern.

Leitlinien sind systematisch entwickelte Entscheidungshilfen, sie stellen keine gesetzliche Regelung dar. Sie sind nicht bindend und sorgen dafür, dass bei spezieller medizinischer Fragestellung, ob therapeutisch oder diagnostisch, angemessen gehandelt wird. Anders als bei den Richtlinien kann der Arzt einen größeren Ermessungsspielraum zulassen und im begründeten Einzelfall auch abweichen.

Für die Klassifizierung von Leitlinien gibt es einen 3 Stufen Prozess (S1, S2 und S3) der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Fachgesellschaften (AWMF). In den einzelnen Entwicklungsstufen werden Empfehlungen erlassen, die sich aus Expertenmeinungen, Erfahrungen oder Grundprinzipien sowie wissenschaftlichen Nachweisen zusammensetzen. Zusätzlich werden auch sog. „Level of Evidence“ angegeben, diese beruhen auf der Auswertung wissenschaftlicher Studien.

- **Bei akuter Blinddarmreizung ist die Operation das einzig richtige therapeutische Mittel. Beim Prostatakarzinom kommen Strahlentherapie, Operation, Hormonbehandlung und Abwarten in Frage. Radio-Onkologen, Onkologen oder Chirurgen, Pathologen, Laborärzte oder Präventivmediziner sitzen in dieser Runde zusammen. Da in der Leitlinie Maßnahmen von der Früherkennung über Diagnostik, Therapie bis hin zur Rehabilitation beschrieben werden. Nicht für jede bösartige Erkrankung liegt bereits eine Leitlinie vor, denn der Organisations- und Arbeitsaufwand ist enorm. Es wird in 3 Entwicklungsschritten vorgegangen, deshalb heißt die Endfassung „S3-Leitlinie“.**

Für viele Tumorerkrankungen und Arbeitsprozesse in der Radioonkologie gibt es Leitlinien, diese kann man auf den Internetseiten der Fachgesellschaften wie der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie (DEGRO) oder der Deutschen Krebsgesellschaft (DKG) abrufen. Weitere Beispiele hierfür wären die Veröffentlichung der interdisziplinären S3 Leitlinien für die Behandlung des Mammakarzinoms.

3. In **Empfehlungen**, z. B. von der Bundesärztekammer sollen die ärztlichen Kollegen auf änderungsbedürftige und beachtenswerte Sachverhalte hingewiesen werden. Der Inhalt dieser Schreiben dient einer umfassenden Aufklärung und Information und kann die Urteilsbildung des Arztes unterstützen.

9.8.2 Evidenzbasierte Medizin (EBM)

Liest man die Leitlinien, so stößt man auf den Begriff „Evidenzbasierte Medizin“ – das bedeutet, dass Forschungsergebnisse aus klinischen Studien in die klinische Praxis implementiert werden. Die sog. „Level of Evidence“ dienen bei der Erstellung von Leitlinien als zusätzliche Empfehlung. Die höchsten Level sind die Ergebnisse aus mehreren randomisierten klinischen Studien, die mittleren Level beruhen sich auf einer einzigen randomisierten klinischen Studie, und das niedrigste Level begründet sich auf Expertenmeinungen und Grundprinzipien.

Ein Beispiel: Die EBCTCG-Meta-Analyse beweist an 7287 Frauen mit einer Nachbeobachtungszeit von 10 Jahren, dass die Bestrahlung nach brusterhaltender Operation das Rezidivrisiko von 31 % auf 15,6 % reduziert.

Der Begriff „evidenzbasierte Leitlinien“ ist seit dem Jahr 2000 in das Sozialgesetzbuch (SGB V, § 137f und § 137g) aufgenommen, damit sind alle Akteure im Gesundheitswesen gesetzlich verpflichtet, Evidenz-basierte Medizin anzuwenden.

9.8.3 Standard Operating Procedure (SOP)

Standard Operating Procedures sind Arbeitsanweisungen und wichtiger Bestandteil des klinischen

Alltags. Hier werden immer wiederkehrende Prozesse als Arbeitsabläufe aufgeschrieben. Z. B. die Maskenfixation: hier wird beschrieben, welcher Maskentyp für die jeweilige Tumorbehandlung vorgesehen ist und was dabei beachtet werden muss. Die SOP sollen neuen Mitarbeitern eine schnelle und umfassende Einarbeitung ermöglichen. I. d. R. werden die Arbeitsanweisungen als Gemeinschaftswerk erstellt, von mehreren Personen geprüft und dann als Standardprozess mit Datum und Versionsnummer eingeführt. Die Arbeitsanweisungen werden regelmäßig aktualisiert.

✓ Zurück zu den Fragen vom Anfang des Kapitels:

1. Das Mammakarzinom hat trotz erfolgter Behandlung Fernmetastasen im Körper gebildet. In der Lendenwirbelsäule hat sich eine große Metastase entwickelt, die den Wirbelkanal beengt und auf die darin befindlichen Nervenfasern drückt. Diese Kompression verursacht die neurologischen Ausfälle.
2. Die Entlastung der Nervenwurzeln versucht man entweder operativ oder strahlentherapeutisch. Je schneller die Nerven vom Druck befreit werden, desto höher ist die Chance, dass die Patientin die Beine wieder bewegen kann. Deshalb ist der Operation der Vorrang zu geben. Lehnt der Chirurg ab, z.B. da viele Wirbelkörper hochgradig metastatisch zersetzt sind, und die Wirbelsäule nach dem Eingriff instabil wäre, wird die Strahlentherapie durchgeführt.
3. Der Strahlentherapeut kann verschiedene Fraktionierungen verordnen: Ein übliches Schema ist 5×3 Gy pro Woche bis zu einer Gesamtdosis von 30 Gy. Eventuell wird anfangs die Einzeldosis auf 4 Gy erhöht, um eine möglichst schnelle Wirkung auf die Metastase zu erwirken. Dadurch kann das Weichteilgewebe aber anschwellen und zusätzlich Druck auf die Nervenwurzeln ausüben. Eine vorherige Gabe von Kortikosteroiden sollte deshalb erfolgen.
4. In aller Regel wird auf ein Planungs-CT verzichtet, da die Strahlentherapie rasch erfolgen soll und mittels Simulation das Bestrahlungsfeld an der Wirbelsäule zuverlässig bestimmt werden kann. Unter

bestimmten Gesichtspunkten macht ein Planungs-CT aber Sinn, z.B. wenn benachbarte Abschnitte der Wirbelsäule schon bestrahlt wurden und ein exakter Feldanschluss gewährleistet sein muss.

5. Die Bestrahlung bewirkt ein Schrumpfen der Metastase durch Abtötung von Tumorzellen.
6. Die meisten Strahlentherapie-Abteilungen bieten außerhalb der regulären Arbeitszeit einen telefonischen Bereitschaftsdienst an. Notfälle sind eher selten. Nur wenige Male im Jahr ist es tatsächlich notwendig, dass MTRA, Physiker und Ärzte nachts oder am Wochenende tätig werden. Die gesamte Organisation obliegt dann der MTRA, da alle Stellen, die normalerweise den Ablauf regeln (Anmeldung, Archiv, Transport) nicht besetzt sind. Sie muss alle Arbeitsschritte von der Dateneingabe am Simulator bis zur Bedienung des Linearbeschleunigers sicher und ohne die übliche Unterstützung im Routinebetrieb beherrschen. Und das wichtigste: Die MTRA kümmert sich um den Patienten mit all seinen Bedürfnissen (Durst? Telefonate mit Angehörigen? Toilette?) vom Zeitpunkt, an dem er in die Abteilung gebracht wird, bis zu seiner Verlegung.

In Kürze

- Hauptanwendungsgebiet der Strahlentherapie ist die Behandlung von Krebserkrankungen.
- Bösartige Tumore lassen sich von benignen Tumoren anhand bestimmter Kriterien unterscheiden. Die Ausbreitung wird international mit einem Code ausgedrückt, entweder in der TNM-Klassifikation oder einer anderen Einteilung, die speziell für bestimmte Tumore gilt.
- Strahlen können innerlich mittels radioaktiven Materials als Brachytherapie oder äußerlich mittels konventionellen Röntgenstrahlen, Photonen, Elektronen, Protonen oder Schwerionen als Teletherapie angewandt werden.

- Die Behandlungskonzepte begründen sich auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und den Leitlinien.
- Moderne Geräte und Techniken gewährleisten eine ausreichend hohe Dosis im Zielvolumen unter gleichzeitiger Schonung der Risiko-Organen. Das Auftreten bzw. die Ausprägung akuter und später Nebenwirkungen wird dadurch reduziert.
- Vorbereitende Maßnahmen sind das Aufklärungsgespräch, die körperliche Untersuchung, die exakte und reproduzierbare Lagerung des Patienten und das Planungs-CT.
- Computerprogramme errechnen Bestrahlungspläne, die sich untereinander vergleichen lassen. Das Zielvolumen und die Risiko-Organen werden 3-dimensional und in Beziehung zueinander dargestellt. Ein Matching mit diagnostischen Aufnahmen kann hilfreich sein.
- Kontroll-Aufnahmen in Bestrahlungsposition (IGRT) stellen die korrekte Strahlenanwendung sicher.
- Die MTRA ist Bezugsperson des Patienten, beinahe vom ersten Kontakt an und während der gesamten Therapie, die mehrere Wochen dauern kann. Neben dem technischen Verständnis und Können ist beim Umgang mit den Patienten hohes Einfühlungsvermögen gefragt, die sich oft von ihrer Erkrankung lebensbedroht fühlen.
- Der gesetzlich vorgegebene Strahlenschutz muss jederzeit beachtet werden.

Literatur

Literatur zu 9.1

- Bamberg M, Molls M, Sack H (2009) Radioonkologie, 2. Aufl. W. Zuckschwerdt Verlag, München, Wien, New York, S 1
- (2003) Göttinger Methode. In: Roche Medizinisches Lexikon, 5. Aufl. Urban und Fischer, Stuttgart
- Hiddemann (2004) Die Onkologie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S 225–264
- Lütolf UM. Skriptum Radioonkologie 1999, Department Medizinische Radiologie Klinik und Poliklinik für Radio-Onkologie Universitätsspital Zürich

- Rosenbusch G, Oudkerk M, Ammann E (1994) Radiologie in der medizinischen Diagnostik. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin
- Sauer R (1998) Strahlentherapie und Onkologie, 3. Aufl. Urban und Schwarzenberg, München

Literatur zu 9.1 – Originalveröffentlichungen

- Boyer AL et al (1992) A review of electronic portal imaging devices (EPIDs). Med Phys 19
- Dessauer F, Lion K, Gökmen M. Versuche mit Rotationsbestrahlung. Strahlentherapie 60 (1937) 1-12
- Du Mesnil de Rochemont R. Dosisverteilung bei Rotationsbestrahlung. Strahlenther 68 (1940) 221-253
- Gauss CJ. Zur Geschichte der gynäkologischen Strahlentherapie. Unwissenschaftliche Erinnerung an ihren Anfang und Aufstieg. Strahlentherapie 100 (1956) 633-648
- Handbuch der Medizinischen Radiologie/Encyclopedia of Medical Radiology Volume 2/1, 1966, pp 271-354
- Holtusen H (1936) Erfahrungen über die Verträglichkeitsgrenze für Röntgenstrahlen und deren Nutzenanwendung zur Verhütung von Strahlenschäden. Strahlentherapie 57(254):269
- Hohlfelder H (1938) Die Röntgentiefentherapie. Georg Thieme, Leipzig
- Hug et al. „Der Zeitfaktor“ Strahlenbiologie/Radiation Biology Jones DTL. ICRU – 20130409 Poster 09/2013
- Muller HJ. Artificial Transmutation of the Gene. Science 46 (1927) 84-87
- Perthes G. Versuch einer Bestimmung der Durchlässigkeit menschlicher Gewebe für Röntgenstrahlen mit Rücksicht auf die Bedeutung der Durchlässigkeit der Gewebe für die Radiotherapie. Fortschritte Röntgenstrahlen 8 (1905) 12-25
- Röntgen WC. Über eine neue Art von Strahlen. Ann Phys. Chem 64 (1898) 1-37
- Scherer E. Du Mesnil de Rochemont „Ein Rückblick auf Leben und Werk“. Strahlentherapie und Onkologie 2004 No.5 Urban und Vogel
- Scherer E. 100 Jahre Röntgenstrahlen, Strahlentherapie und Onkologie. 171 709-714, Urban und Vogel 1995

Literatur zu 9.2

- Bachmann-Mettler I, Gaisser A, Kroner T, Margulies A (Hrsg) (2010) Onkologische Krankenpflege, 5. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg
- Sauer R (2003) Strahlentherapie und Onkologie, 4. Aufl. Urban & Fischer, München Jena

Literatur zu 9.3

- Bamberg M, Molls M, Sack H (2009) Grundlagen Radioonkologie, 2. Aufl. W. Zuckschwerdt Verlag, München Wien New York
- Debus J, Kraft G, Hug E (2009) „Hadronentherapie“, Grundlagen Radioonkologie, 2. Aufl. W. Zuckschwerdt Verlag, München Wien New York, S 95–108
- Debus J. Refresher-Kurs ownload/pdf/Protonen_Stellungnahme_010808.pdf006chromosome aberrations and stran

- Geräte manual Wolf-Medizintechnik GmbH, X-Ray Therapy T 200, 07629 St. Gangloff
- ICRU Report 16 (1970) „Linear Energy Transfer“
- ICRU Report 40 (1986): „The Quality Factor in Radiation Protection“
- Kraft G. Radiobiological Effects of very heavy ions: Inactivation, Induction of chromosome aberrations and strand breaks. Nuklear Science Application 3, 1-28 (1987)
- Krieger H (2011) Strahlungsmessung und Dosimetrie. Vieweg und Teubner, Springer Fachmedien, Wiesbaden
- Lederer L (2013) Protonenstrahlentherapie am Paul Scherrer Institut. Radiologietechnologie 26(2):4–7
- Paganetti H (2012) Proton Therapy Physics. CRC Press, Florida
- Richter E, Feyerabend T (2002) Grundlagen der Strahlentherapie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Sauer R (2002) Strahlentherapie und Onkologie. Urban und Fischer bei Elsevier Verlag, Stuttgart
- Schäfer B, Hödl P (1999) Medizinisch-technische Assistenz in der modernen Strahlentherapie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Schippers M (2012) Proton Accelator. In: Proton Therapy Physics. CRC Press, Florida, S 61–98
- Wannenmacher M (2006) Strahlentherapie. Springer-Verlag, Heidelberg
- Washington C (2010) Principles and Practice of Radiation Therapy. Elsevier, St. Louis, Missouri
- www.degro.org/dav/html/download/pdf/Protonen_Stellungnahme_010808.pdf

Literatur zu 9.4

- Herrmann T (2006) Klinische Strahlenbiologie kurz und bündig. Urban und Fischer, München/Jena
- Wannenmacher M (2006) Strahlentherapie. Springer, Heidelberg
- Withers HR (1975). Cell cycle redistribution as a factor in multifraction irradiation (1975) Radiology 114: 199-202
- Wittekind C (2010) TNM Klassifikation maligner Tumore. Wiley-VCH, Weinheim

Literatur zu 9.5

- Bachmann-Mettler I, Gaisser A, Kroner T, Margulies A (Hrsg) (2010) Onkologische Krankenpflege, 5. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg, S 127–133
- Boike TP, Lotan Y, Cho LC et al (2011) Phase I dose-escalation study of stereotactic body radiation therapy for low- and intermediate-risk prostate cancer. J Clin Oncol 29:2020–2025
- Budach W (2006) A meta-analysis of hyperfractionated and accelerated radiotherapy and combined chemotherapy and radiotherapy regimens in unresected locally advanced squamous cell carcinoma of the head and neck. BMC Cancer 6:28
- James et al (2010) Hypofraktionierung Mamma. Cochrane Review, updated Nov 10, 2010
- Piroth MD (2013) Literatur kommentiert: Risiken ungünstiger Kosmetik und Toxizität nach perkutaner akzelerierter Teilbrustbestrahlung. Strahlenther Onkol 189:1054–1055

- Sauer R et al (2012) Preoperative versus postoperative chemoradiotherapy for locally advanced rectal cancer: results of the German CAO/ARO/AIO-94 randomized phase III trial after a median follow-up of 11 years. J Clin Oncol 30:1926–1933
- Sedlmayer F et al. (2013). DEGRO practical guidelines: radiotherapy of breast cancer I: radiotherapy following breast conserving therapy for invasive breast cancer. Strahlenther Onkol 189: 825-833
- Vaidya JS (2013) Risk-adapted targeted intraoperative radiotherapy versus whole-breast radiotherapy for breast cancer: 5-year results for local control and overall survival from the TARGIT-A randomised trial. Lancet 8: 603–613 (pii: S0140-6736(13)61950-9) doi:10.1016/S0140-6736(13)61950-9

Literatur zu 9.6

- Dhermain F (2014) Radiotherapy of high-grade gliomas: current standards and new concepts, innovations in imaging and radiotherapy, and new therapeutic approaches. Chin J Cancer 33(1):16–24. doi:10.5732/cjc.013.10217
- Herrmann T (2006) Klinische Strahlenbiologie kurz und bündig. Urban und Fischer, München/Jena
- International Commission on Radiation Units and Measurement ICRU Report 62. Prescribing, recording, and reporting photon beam therapy (supplement to ICRU 50). Bethesda, MD 1999
- Krieger H (2011) Strahlungsmessung und Dosimetrie. Vieweg und Teubner, Springer Fachmedien, Wiesbaden
- Richter E, Feyerabend T (2002) Grundlagen der Strahlentherapie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Wannenmacher M (2006) Strahlentherapie. Springer-Verlag, Heidelberg
- Washington C (2010) Principles and Practice of Radiation Therapy. Elsevier, St. Louis, Missouri

Literatur zu 9.7

- Bachmann-Mettler I, Gaisser A, Kroner T, Margulies A (Hrsg) (2010) Onkologische Krankenpflege, 5. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg
- De Gryuter W (2002) Psychyrembel Klinisches Wörterbuch, 259. Aufl. De Gryuter, Berlin New York
- Hein-Nau B, Kusch M, Labouvie H (2013) Klinische Psychoonkologie. Springer, Berlin Heidelberg
- Menche N (2003) Biologie Anatomie Physiologie, 5. Aufl. Urban & Fischer, München Jena
- Sauer R (2003) Strahlentherapie und Onkologie, 4. Aufl. Urban & Fischer, München, S 321–325

Literatur zu 9.8

- ACC Medicine: Evidence-based Medicine (EBM) 2003
- AWMF online: Erarbeitung von Leitlinien für Diagnostik und Therapie, „Methodische Empfehlung“, Leitlinien für Leitlinien, Stand 2004
- Interdisziplinäre S3 Leitlinie für Diagnostik, Therapie und Nachsorgen des Mammakarzinom, AWMF-Register-Nummer: 032 – 045OL, Juli 2012

Literatur

Interdisziplinäre Leitlinie der Qualität S3 zur Früherkennung, Diagnose und Therapie der verschiedenen Stadien des Prostatakarzinoms, Version 1.03-März 2011, Deutsche Gesellschaft für Urologie (DGU)

Sackett D (1996) Evidence based medicine: „What it is and what it isn't“ BMJ 312:13

SGB V (§ 137 f und § 137 g, 266)

Nuklearmedizin

U. Blum, T. Hartmann, I. Offenhäusser

- 10.1 Historische Entwicklung, Abbildungs- und Therapiemöglichkeiten – 282**
 - 10.1.1 Abbildungsmöglichkeiten – 282
 - 10.1.2 Therapiemöglichkeiten – 283
- 10.2 MTRA in der Nuklearmedizin mit speziellem Strahlenschutz – 286**
 - 10.2.1 Heißlabor – 286
 - 10.2.2 Gammakamera – 287
 - 10.2.3 Verlassen der Abteilung – 288
- 10.3 Detektion von Radioaktivität – 288**
 - 10.3.1 Grundlagen – 288
 - 10.3.2 Szintillationsdetektoren – 289
 - 10.3.3 Messsysteme im Strahlenschutz – 291
- 10.4 Bildentstehungssysteme – 293**
 - 10.4.1 Gammakamera – 293
 - 10.4.2 Qualitätskontrolle der Gammakamera – 301
- 10.5 Radionukleotide in der medizinischen Anwendung – 303**
 - 10.5.1 Diagnostische Bildgebung – 304
- 10.6 Radiopharmakologie – 305**
- 10.7 Qualitätssicherungsmaßnahmen von Radiopharmaka – 305**
 - 10.7.1 Radioisotopenreinheit – 306
 - 10.7.2 Chemische Reinheit – 307
 - 10.7.3 Radiochemische Reinheit – 307
 - 10.7.4 Spezifische Aktivität – 309
 - 10.7.5 Stabilität – 309
 - 10.7.6 Mikrobiologische Reinheit – 309
- 10.8 Kontamination und Dekontaminationsmaßnahmen – 309**
- 10.9 Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien – 311**
- Literatur – 312**

Bettina ist 43 Jahre alt und seit fünfzehn Jahren in der Nuklearmedizin tätig. Nach ihrer Ausbildung war sie ein paar Jahre in einer radiologischen Praxis, hat dann aber gewechselt, da sie keine Schichtdienste mehr machen wollte. Abgesehen davon hat ihr die Nuklearmedizin schon während der Ausbildung gut gefallen.

Sie empfindet die Arbeit in der Nuklearmedizin als sehr spannend und abwechslungsreich. Das liegt auch daran, dass in ihrer Abteilung nicht nur verschiedene diagnostische, sondern auch therapeutische Verfahren angewendet werden. Dadurch muss sie immer darauf achten, welches Nuklid an den Messgeräten gerade eingestellt ist oder wie sie sich im Umgang mit den Nukliden zu verhalten hat. „Betriebsblindheit“ kann so kaum entstehen.

Heute Vormittag ist sie in der Diagnostik eingeteilt, bereitet die Nuklide im Heißlabor vor und übernimmt zwei Untersuchungen an der Gammakamera.

Am Nachmittag hat Bettina Zeit für die wöchentlichen Konstanzprüfungen eingeplant und assistiert der Oberärztin bei den Radiosynoviorthesen.

10.1 Historische Entwicklung, Abbildungs- und Therapiemöglichkeiten

U. Blum

Das Prinzip der Bilderstellung bzw. der Radioaktivitätsdetektion ist bei den Gammascannern, der Gammakamera und der Gammasonde gleich.

Bei den heute nicht mehr gebräuchlichen Scanner-Systemen wurde das zu untersuchende Organ zeilenweise abgetastet und eine Art Strichbild des Organs erstellt. Die Bilderstellung erfolgte häufig über einen direkt angeschlossenen Plotter.

Die Gammakamera löste die Scanner ab. Mit der Gammakamera werden alle Untersuchungen durchgeführt. Es gibt sie als spezielle Schilddrüsenkamera, als Einkopf-, Zwei- und Drei-Kopfsysteme. Man unterscheidet außerdem zwischen planaren Gammakameras (nicht Kameraköpfe zur stationären Aufnahme einer Körperregion) und Kameras mit SPECT-Systemen (Rotation einer oder mehrerer Kameraköpfe um den Patienten).

10.1.1 Abbildungsmöglichkeiten

Szintillationszähler: Scanner, Gammakamera, Gammasonde

Gammasonden sind sehr kleine Meßgeräte, die insbesondere im Operationssaal zur Detektion von Wächterlymphknoten genutzt werden. Andere Einsatzmöglichkeiten sind die intraoperative Detektion der Nebenschilddrüsen. Hierbei wird die Strahlung in ein akustisches Signal umgesetzt.

Die radioaktive Strahlung trifft auf einen Szintillationskristall (i. d. R. ein thalliumverstärkter Natrium-Iodid-Kristall). Im Kristall entsteht hierbei ein Lichtblitz, der auf eine Photokathode trifft. Es wird ein Elektron freigesetzt. Dieses wird nachfolgend durch einen Sekundärelektronenvervielfacher (SEV, bzw. Photomultiplier, PM) verstärkt (■ Abb. 10.1). Von Dynode zu Dynode steigt die Spannung, sodass auf der Anode eine Vielzahl von Elektronen (Verstärkung ca. 105–109) auftritt. Es erfolgt eine Verstärkung und Diskriminierung, mittels einer angeschlossenen EDV werden Bilder erzeugt. Um Streustrahlung weitgehend zu vermeiden, ist vor dem Kristall üblicherweise ein Kollimator angebracht.

Dynode

Eine Dynode ist eine Elektrode aus einer Serie von Einzelelektroden.

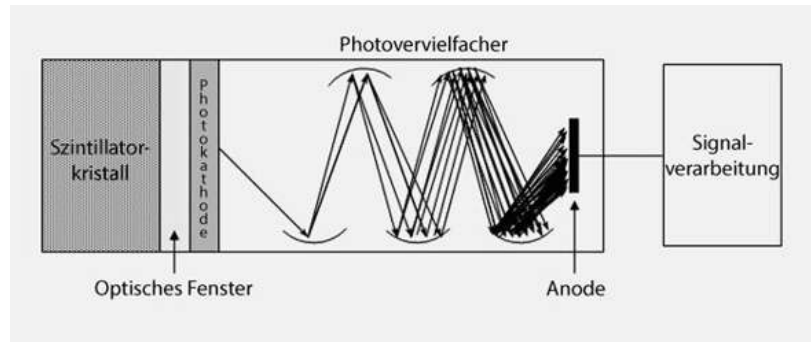
Halbleiterkameras: aktuell nur als spezielle Kamera erhältlich (z. B. Herz, Brust)

Die Strahlung wird direkt vom Halbleiter (z. B. Kadmium-Zink-Tellurid) aufgefangen und in elektrische Ladung umgewandelt. Die Detektoren sind deutlich kleiner als bei einer „normalen“ Gammakamera, die Untersuchungszeiten können aufgrund der guten Energieauflösung deutlich reduziert werden.

Halbleiter

Ein Halbleiter ist ein Festkörper, der – je nach seinem Zustand – elektrisch leiten oder nicht.

■ **Abb. 10.1** Aufbau eines Szintillationszählers (SEV)



PET

Wenn ein Positronenstrahl zerfällt, bildet sich ein positiv geladenes Antiteilchen (= Positron). Dieses trifft im Körper dann auf ein Elektron. Es entsteht die sog. Vernichtungsstrahlung; hierbei wird immer ein Paar γ -Quanten mit einer Energie von 511 keV gebildet (■ **Abb. 10.2**). Die γ -Quanten werden in einem Winkel von 180° zueinander ausgesendet. Nur wenn beide γ -Quanten auf den Detektionskristall treffen, werden diese als wahre Strahlung vom Gerät erkannt und als wahres Signal weiter verarbeitet. Dieses nahezu gleichzeitige Auftreffen der Strahlung wird als **Koinzidenz** bezeichnet. Aufgrund der verschiedenen weiteren Faktoren, wie das zeitliche Auftreffen der Strahlung und der örtlichen Registrierung der Strahlung, werden 3-dimensionale Schnittbilder erzeugt. Eine räumliche Zuordnung der Anreicherung ist manchmal schwierig, da sich nicht alle anatomischen Strukturen anhand ihres Stoffwechsels voneinander eindeutig unterscheiden.

Ein PET-Gerät besteht normalerweise aus vielen kleinen Detektionskristallen (Wismutgermanat, BGO oder Lutetiumoxyorthosilicat, LSO), die ringförmig und hintereinander angeordnet sind. Mehrere Kristalle werden über einen SEV verstärkt.

Die Untersuchung erfolgt in 2D- oder 3D-Technik mit einer Schwächungskorrektur. 2D-Technik bedeutet, dass nur Koinzidenzen innerhalb einer Kollimatorreihe erkannt werden; in der 3D-Technik werden diese über alle Kollimatorreihen erkannt. Damit ist die 3D-Technik deutlich empfindlicher als die 2D-Technik, die 2D-Technik liefert dagegen sehr homogene Bilder.

Eine Schwächungskorrektur ist immer notwendig. Unterschiedliche Gewebe bewirken eine

unterschiedliche Schwächung der durchtretenden Strahlung. Bei den reinen PET-Systemen erfolgt die Schwächungskorrektur über eine sog. Transmissionsmessung. Dabei wird eine externe Strahlenquelle (68 Gy Stabquelle) benutzt und eine Aufnahme gestartet. Das hierbei erstellte Tomogramm wird dann mit den Emissionsdaten der PET-Untersuchung überlagert. Dieses Verfahren muss für jede Bettposition durchgeführt werden und verlängert damit die Liegezeit des Patienten im Gerät erheblich. In den Hybrid-Geräten erfolgt die Schwächungskorrektur durch den CT- bzw. MRT-Datensatz.

Hybrid-Systeme

SPECT-CT, PET-CT, PET-MRT: Hierbei werden die nuklearmedizinischen Systeme mit dem jeweiligen radiologischen Gerät kombiniert. Die Kombination erlaubt damit eine sichere anatomische Zuordnung der Anreicherungen. Reine PET-Systeme sind selten geworden. Die Hybridgeräte können durch den radiologischen Datensatz immer eine Schwächungskorrektur der nuklearmedizinischen Daten bieten. Hierbei können alle Untersuchung durchgeführt werden. Die SPECT-CT erfolgt in der konventionellen nuklearmedizinischen Diagnostik (z. B. Herz, Hirn, Knochen), Die PET-CT bzw. PET-MRT überwiegend bei onkologischen Fragestellungen.

10.1.2 Therapiemöglichkeiten

Fast alle nuklearmedizinischen Therapien erfolgen aus Strahlenschutzgründen stationär. Ausnahme hiervon bilden die Radiosynoviorthese (► **Ab-**

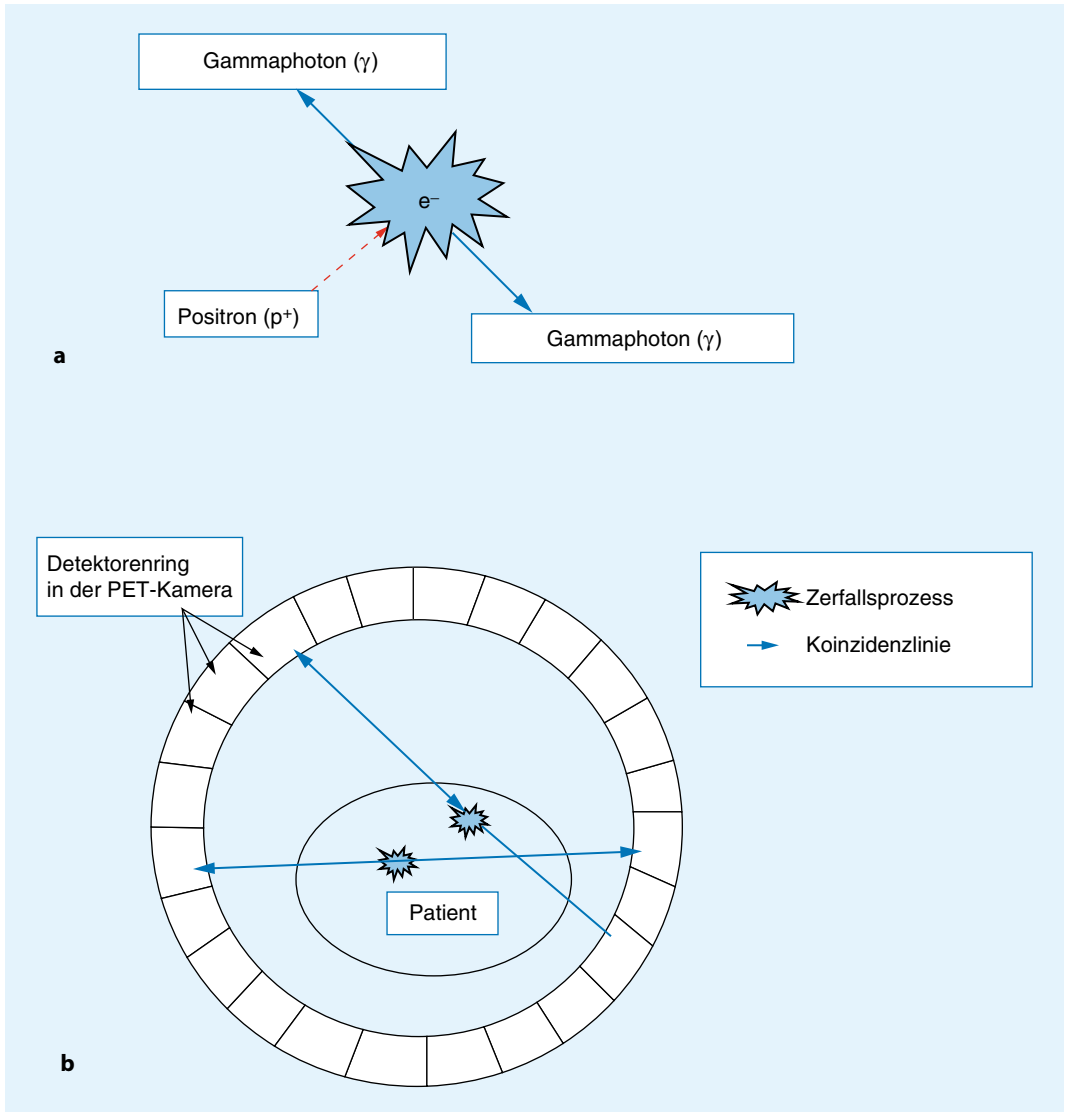


Abb. 10.2a,b Vernichtungsstrahlung und Detektion der γ -Quanten im PET-Ringsystem

schn. 10.1.2) und die palliative Schmerztherapie bei Knochenmetastasen (► Abschn. 10.1.2).

Radioiodtherapie

Üblicherweise wird das radioaktive Iod (^{131}I -NaI) in Kapselform eingenommen. Seltener kann es flüssig verabreicht oder intravenös gespritzt werden. Das radioaktive Iod verteilt sich gemäß dem normalen Iodstoffwechsel. Die Aufnahme erfolgt über den Magen-Darm-Trakt ins Blut, danach in die Schild-

drüse. Hier wird es in das aktive Schilddrüsengewebe aufgenommen. Je nach Erkrankung werden unterschiedliche Dosen im Zielgewebe erreicht.

Bei bösartigen Erkrankungen der Schilddrüse kann die Radioiodtherapie zur Ausschaltung noch verbliebenen Restgewebes oder zur Therapie von Metastasen genutzt werden.

Der Patient wird mindestens 48 Stunden stationär aufgenommen werden. Der Entlassungszeitpunkt richtet sich nach der gesetzlich vorge-

schriebenen Restaktivität im Körper. Ggf. sollte der Patient nach der Entlassung noch einige Strahlenschutzmaßnahmen einhalten (z. B. eingeschränkter Kontakt zu strahlenempfindlichen Personen, externe Radioaktivitätsmessungen), diese werden dem Patienten bei der Entlassung mitgeteilt.

Radiosynoviorthese (RSO)

Die RSO ist eine gezielte Behandlung einer chronischen Entzündung der Gelenkinnenhaut (Synovialitis). Für verschiedene Gelenke stehen unterschiedliche Substanzen zur Verfügung. Gesicherte Erfolge gibt es u. a. bei rheumatischen Gelenkerkrankungen und der Psoriasisarthritis (kann bei einer Schuppenflechte auftreten). Angewendet wird die RSO auch bei aktivierten Arthrosen oder bei Reizzuständen nach Implantation künstlicher Gelenke. Zum Einsatz kommen:

- ⁹⁰Yttrium: Kniegelenk
- ¹⁸⁶Rhenium: Schulter-, Ellbogen-, Hüft-, Hand- und Sprunggelenke
- ¹⁶⁹Erbium: Finger- und Zehengelenke, Mittelhand- und Mittelfußgelenke

- **Die Applikation erfolgt streng intraartikulär unter Röntgenkontrolle (Ausnahme Kniegelenk). Eine falsche Injektion führt zu einer Gewebnekrose des betroffenen Areals.**

Das behandelte Gelenk sollte 48 h ruhig gestellt werden.

Palliative Schmerztherapie bei Knochenmetastasen

Skelettmetastasen, die in der Skelettszintigrafie anreichern, können mit verschiedenen radioaktiven Stoffen behandelt werden. Die Indikationsstellung erfolgt üblicherweise interdisziplinär mit allen behandelnden Ärzten und nach Ausschöpfung der konservativen Schmerztherapie.

Mögliche Stoffe zur Therapie sind die Strahler ⁸⁹Strontium, ¹⁵³Samarium, ¹⁸⁶Rhenium, ¹⁸⁸Rhenium und ³²Phosphor. Alle Stoffe werden intravenös appliziert. Nach der Gabe sollte der Patient 2–3 Stunden überwacht werden. Es kann eine Szintigrafie nach der Gabe von Samarium oder Rhenium erfolgen.

Neu zugelassen (November 2013) wurde der α -Strahler ²²³Ra-Radiumdichlorid für die Be-

handlung von Knochenmetastasen bei Prostatakrebs. Auch dieses Präparat wird intravenös verabreicht.

Radioimmuntherapie

Bei der Radioimmuntherapie werden Antikörper (hier CD20-Oberflächenantigen) radioaktiv markiert. Zugelassen ist das ⁹⁰Yttrium-markierte Ibritumomab-Tiuxetan (Zevalin®) zur Therapie von B-Zell-Lymphomen.

¹³¹I-MIBG (Meta-iodo-benzyl-guanidin)-Therapie

Spezielle Tumore können MIBG anreichern. Diese Tumore sind dann einer MIBG-Therapie zugänglich. Dazu zählen z. B. das maligne Phäochromozytom, das maligne Paragangliom, Karzinoide, das medulläre Schilddrüsenkarzinom sowie ein Neuroblastom im Stadium II oder IV.

Verschiedene Medikamente können die Aufnahme des MIBG stören und sollten daher entsprechend der Halbwertszeit ausgesetzt werden. Sowohl das Phäochromozytom als auch das Paragangliom können Katecholamine freisetzen, sodass diese Patienten u. U. eine Medikation mit α - und β -Blockern benötigen.

- **Die Therapie erfolgt über eine langsame intravenöse Infusion, hierbei sollten Blutdruck und Herzfrequenz kontrolliert werden.**

Peptid-Therapie

Bei neuroendokrinen Tumoren zeigt sich eine Vermehrung von Somatostatinrezeptoren. Diese Rezeptoren können genutzt werden, um neuroendokrine Tumore durch eine Szintigrafie nachzuweisen. Tumore, die eine entsprechende Anreicherung zeigen, sind einer Peptid-Therapie zugänglich. Hierbei kommen ⁹⁰Yttrium-DOTATOC oder ¹⁷⁷Lu-DOTATOC zur Anwendung.

Selektive interne Radiotherapie (SIRT)

Mit der SIRT können inoperable primäre Lebertumore oder inoperable Metastasen anderer Tumore therapiert werden. Hierbei werden kleine – mit ⁹⁰Y markierte – Glas- oder Kunstharzpartikel intraarteriell in die Leber gespritzt. Die Mikrosphären haben einen Durchmesser von 20–30 μ m (Glasmikrosphären) bzw. 20–60 μ m (Harzmikrosphären).

Mikrosphären

Mikrosphären sind kleine, kugelförmige Molekülaggregate. In diesem Fall dienen sie dazu, sich nah am Tumor abzulagern und ihre Strahlung zur Karzinombekämpfung abzugeben.

Vor der Behandlung werden in einer selektiven Leberangiografie alle Gefäße verschlossen, die zu extrahepatischen Geweben führen (z. B. Magen, Darm), und es wird ein Verteilungsszintigramm mit ^{99m}Tc -MAA durchgeführt. Diese Szintigrafie dient dem Ausschluss extrahepatischer Anreicherungen sowie der Berechnung des Leber-Lungen-Shunts.

➤ Leber-Lungen-Shunt

Hierunter versteht man Gefäßverbindungen zwischen Lunge und Leber, über die die Mikrosphären auch zur Lunge gelangen und dort Gewebe zerstören könnten.

Finden sich lediglich eine intrahepatische Anreicherung und ein nur geringer Lungenshunt, kann die eigentliche SIRT in einem nahen zeitlichen Abstand geplant werden.

➤ In der SIRT ist auf die exakt gleiche Katheterlage wie in der MAA-Untersuchung zu achten.

Bei einer extrahepatischen Anreicherung der Mikrosphären kann es zu deutlichen Nebenwirkungen wie einer Strahlenpneumonitis oder einem Strahlenulcus kommen.

10.2 MTRA in der Nuklearmedizin mit speziellem Strahlenschutz

T. Hartmann

Als MTRA in der Nuklearmedizin ist man nicht nur für die Bilderstellung der Szintigraphien zuständig, sondern auch für die Bereitstellung und Portionierung der benötigten Radiopharmaka.

Aus diesem Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen ergeben sich für den persönlichen Strahlenschutz spezielle Anforderungen. Alle Bereiche,

in denen man mit offenen radioaktiven Stoffen in Berührung kommen kann (d. h. auch radioaktive Körperflüssigkeiten der Patienten, z. B. Blut), finden im Kontrollbereich einer nuklearmedizinischen Abteilung statt, für den strenge Strahlenschutzvorschriften gelten.

So sind alle Tätigkeiten verboten, durch die man etwas leicht in den Körper aufnehmen, also **inkorporieren** kann. Dazu gehört insbesondere das **Essen, Trinken, Rauchen** oder **Schminken**.

10.2.1 Heißlabor

Im Heißlabor steht der Molybdän-Technetium-Generator, der arbeitstäglich eluiert werden muss. Außerdem werden dort die Radiopharmaka vorbereitet und die Spritzen portioniert.

Die Anforderungen an die technische Ausstattung eines Heißlabors sind in der DIN 6844 festgeschrieben. Die verwendeten Arbeitsmittel und -möbel müssen desinfizierbar und, im Fall einer Verschmutzung mit Radioaktivität, dekontaminierbar sein.

Bei der Arbeit im Heißlabor sind natürlich **Handschuhe** zu tragen und ein **zusätzlicher Schutzkittel** über die normale Dienstkleidung zu ziehen. Sollten ein paar Tropfen Radioaktivität auf Kittel oder Handschuh landen, kann man diese schnell ausziehen, bevor die Flüssigkeit auf Haut oder Unterkleidung gelangt.

Grundsätzlich sollten MTRA bei der Arbeit im Heißlabor zusätzliche **Fingerringdosimeter** tragen. Diese sind so zu positionieren, dass der Detektor im **Handinneren** getragen wird (wo die meiste Strahlung auftrifft) und nicht wie bei einem Schmuckstein zum Handrücken hin.

Beim Verlassen des Heißlabors muss man mind. seine Hände auf Kontaminationen prüfen. Dafür hängen z. B. Wanddetektoren am Ausgang.

➤ Für die Arbeit im Heißlabor gelten grundsätzlich wieder die „3 A des Strahlenschutzes“:

- **Abstand:** Bei jeder Tätigkeit sollte man möglichst viel Entfernung zwischen sich und die Strahlenquelle bringen.
- **Abschirmung:** Wenn möglich sind radioaktive Stoffe mit Blei abzuschirmen.

- **Aufenthaltsdauer:** Im Heißlabor muss sorgfältig und zügig gearbeitet werden, ein unnötiger Aufenthalt ist zu vermeiden.

■ Bleiburg

In der Nuklearmedizin versteht man unter der Bleiburg den direkten Vorbereitungsbereich der Radiopharmaka.

Eine Bleiburg besteht aus Bleibausteinen, die ggf. mit Edelstahl ummantelt sind, um ein Versickern von Flüssigkeiten in den Fugen zu verhindern. Die dicken Bleibausteine sind variabel kombinierbar und absorbieren die Strahlung sehr gut.

Bei der Verarbeitung der Radiopharmaka befinden sich nur die Hände und Unterarme der MTRA innerhalb der Burg, der Rest des Körpers wird abgeschirmt.

Um auch die empfindlichen Augenlinse vor Strahlung zu schützen, befindet sich zusätzlich ein Bauteil mit einer eingebauten Bleiglasscheibe an der Burg. Anfangs ist es etwas gewöhnungsbedürftig, in ungewöhnlichen Arm- und Handstellungen hinter einer Wand und unter einer Scheibe zu arbeiten, zumal zusätzlich Abstandshalter zu benutzen sind.

■ Abstandshalter

Gemäß dem Abstandsquadratgesetz nimmt die Dosis pro Fläche aufgrund der Divergenz der Strahlung mit dem Abstand zur Strahlenquelle ab. So erhält man nur noch ein Viertel der Dosis, wenn man den Abstand zur Strahlenquelle verdoppelt. Mit einem Abstandshalter (einer Art Zange für Medikamentenfläschchen) vergrößert man den Abstand von 0 cm (Fläschchen in der Hand) schnell um ein Vielfaches.

Auch hier muss man üben, um mit dieser „Handverlängerung“ sicher arbeiten zu können.

■ Spritzenabschirmungen

Jede aufgezogene Spritze ist in eine Abschirmung eingespannt. Bei Gammastrahlern (^{99m}Tc etc.) sind diese aus Blei bzw. Blei mit Edelstahl.

Bei Betastrahlern, wie sie z. B. für die Radiosynoviothese eingesetzt werden, genügen ggf. schon Abschirmungen aus Plexiglas oder Plastik mit Bleieinlagerung.

- ➔ Bei der Verwendung einer Spritzenabschirmung aus Plastik mit Bleiummantelung wird

die Aktivität einer Spritze mit $^{90}\text{Yttrium}$ um den Faktor 1000 (in unmittelbarer Nähe zur Spritze) gesenkt.

■ Transporteinrichtungen

Zur Applikation des Radiopharmakons kommt der Patient selbstverständlich nicht in das Heißlabor. Die aufgezogenen Spritzen müssen also transportiert werden.

Um die Transportwege so gering wie möglich zu halten wurden in einigen Abteilungen die Applikationsräume direkt neben dem Heißlabor eingerichtet und durch eine Schleusenklappe miteinander verbunden. Die Schleuse ist ebenfalls wieder mit Blei abgeschirmt.

Für alle anderen Wege der Radiopharmaka innerhalb der Abteilung sind geeignete Transportbehälter aus Blei zu verwenden. Diese gibt es in verschiedenen Größen, je nachdem, ob man einen einzelnen Spritze oder einen größeren Behälter (z. B. zur Abfallentsorgung) transportieren muss.

■ Abfallbehälter

In einem Heißlabor findet eine strikte Mülltrennung statt. Unterschieden wird zwischen kontaminiertem Abfall (inkl. solchem, bei dem eine Kontamination nicht sicher ausgeschlossen werden kann) und nicht-kontaminiertem Abfall.

Der kontaminierte Abfall wird in speziellen, bleiummantelten Behältern gesammelt und gelagert. Hier muss man aufpassen, dass nicht „aus Versehen“ etwas in diesem Abfall landet. In diesem Fall muss ein Mitarbeiter den gesamten „Müll durchwühlen“ und ist dabei einer hohen Strahlenbelastung ausgesetzt.

10.2.2 Gammakamera

An der Gammakamera ist, nach erfolgter Applikation des Radiopharmakons, der Patient die größte Strahlenquelle.

Natürlich darf man den Patienten während der Untersuchung nicht allein im Raum lassen.

Um sich als MTRA trotzdem vor einer unnötigen Strahlenbelastung zu schützen sollte auch hier der mögliche Abstand gewahrt werden. Man muss sich nicht direkt neben den Patienten und die Kamera setzen.

Darüber hinaus gibt es mobile Bleischutzwände, die wie ein Paravent im Raum bewegt werden können.

Beim Umgang mit Blutproben (z. B. bei Nierenszintigrafien) sind selbstredend wieder Handschuhe zu tragen.

Wird eine Lungenventilationsszintigraphie durchgeführt, besteht eine erhöhte Gefahr durch die radioaktiven Aerosole, die bei dieser Untersuchung zur Anwendung kommen. Aus diesem Grund sollten sich möglichst wenige Mitarbeiter im Raum befinden und darauf achten, keine Aerosole oder die Ausatemluft des Patienten („Para-Atmung“) selbst einzuatmen.

- **In einer nuklearmedizinischen Abteilung ist es zwingend erforderlich, dass alle Radiopharmaka gekennzeichnet und abgeschirmt (Bleiburg, Transportbehälter etc.) werden. Auf jeder Spritze ist mindestens anzugeben, welches Nuklid sie enthält, und wann welche Aktivität aufgezogen wurde.**

10.2.3 Verlassen der Abteilung

Bei jedem Verlassen des Kontrollbereiches müssen sich die Mitarbeiter „**ausmessen**“, also kontrollieren, ob sie frei von radioaktiven Kontaminationen sind. Dazu dient ein **Kontaminationsmonitor** am Ein- bzw. Ausgang des Kontrollbereiches. Dieser besitzt verschiedene Detektoren, um nicht nur die Hände, sondern auch Schuhe und Kleidung zu prüfen.

Die Ergebnisse der Messung sind zu dokumentieren und müssen sich innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen befinden. Anderenfalls darf man den Bereich nicht verlassen, sondern muss sich auf die Suche nach der Ursache der Kontamination machen, ggf. die Kleidung zum Abklingen verwahren und duschen.

- **Wenn man als MTRA die notwendigen Strahlenschutzmaßnahmen beachtet und umsetzt, beträgt die berufliche Strahlenexposition pro Jahr ca. 1–3 mSv.**

10.3 Detektion von Radioaktivität

1. Offenhäuser

Nach Strahlenschutzbelehrung wird Schülerin Jelena im Heißlabor mit dem Aufziehen und der Markierung radioaktiver Substanzen vertraut gemacht. Sie darf zum ersten Mal Aufziehen, die Hände sind zittrig. Geübt hat sie mit Wasser lang genug, dennoch macht sie der Umgang mit Technetium ein wenig nervös. Jelena hat die Haare zusammengebunden, mag aber keine Hosen, die in Knöchelhöhe abschließen. Nach einem doch anstrengenden Praktikumstag stellt sie sich auf den Hand-Fuß-Monitor, der ihr signalisiert, dass sie kontaminiert ist. Sie schaut hinter sich, ob im Flur ein Patient sitzt oder eine Kollegin mit einer Aktivitätsspritze vorbeiläuft. Nichts dergleichen. Sie zieht den Kittel aus, es piept, sie zieht die Schuhe aus, es piept; und da kommt auch noch die Lehrkraft um die Ecke. Hat sie nicht erst gestern etwas von Hosen erzählt, die in keinem Fall über den Boden schleifen dürfen?

- ❓ Was ist zu tun?

10.3.1 Grundlagen

Die in der nuklearmedizinischen Diagnostik und Therapie verwendeten radioaktiven Substanzen werden mithilfe unterschiedlicher Detektoren registriert. Zur in vivo (im lebenden Organismus) und in vitro (im Reagenzglas) Messung von Gammastrahlung werden geeignete Detektoren eingesetzt, die die von Photonen ausgelösten Wechselwirkungsprozesse (Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung) in Materie nachweisen können. Die im Detektor entstandene Absorption wird in einen elektronischen Impuls umgewandelt. Dieser wird nur dann weitergeleitet, wenn er der Energie des zu messenden Nuklides entspricht. Die Registrierung der weitergeleiteten Ereignisse erfolgt über Zählgeräte oder Computersysteme. Die registrierte Zählrate ist proportional zur vom Strahler ausgehenden Aktivität.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Detektoren zum Nachweis von Gammastrahlung ist das im Detektor verwendete Material.



■ Abb. 10.3 Gammasonde intraoperativ

10.3.2 Szintillationsdetektoren

Ein Medium hoher Ordnungszahl Na/OZ 53, wird im sog. Szintillationsdetektor genutzt. Szintillationsdetektoren geben die beim Durchgang von Photonen oder Elektronen entstehende Anregungsenergie in Form von Licht ab. Ein solcher Szintillationsdetektor ist das Kernstück der Gammakamera, die die Verteilung einer applizierten Aktivität im Patienten aufzeichnet (► Abschn. 10.4.1).

Sondenmessplatz

Ein einfacher in der in-vivo Diagnostik benutzter Szintillationsdetektor ist der sogenannte Sondenmessplatz. Der enthaltene NaJ-Kristall ist hier nur mit einem einzelnen, relativ großen, Kollimator ausgestattet (► Abschn. 10.4.1). Dieser hat die Aufgabe, den Detektor vor Umgebungsstrahlung zu schützen. Ein Sondenmessplatz wird zur Bestimmung der prozentualen Aktivitätsaufnahme (Up-Take) eines applizierten Radiopharmakons zu unterschiedlichen Zeitpunkten benutzt. Die Up-Take-Messung ist z. B. für die Planung einer Radioiodtherapie von besonderer Bedeutung.

Gammasonde

Besonders klein ist der Szintillationsdetektor der Gammasonde mit 10–20 mm, der von einem Bleikollimator umgeben ist. Die Gammasonde wird zur prä- bzw. intraoperativen Auffindung des Sentinel-Lymphknotens verwendet (► Abschn. 21.4, ■ Abb. 10.3). Dieser kann mithilfe eines akustischen Signals bzw. einer optischen Anzeige detektiert werden.

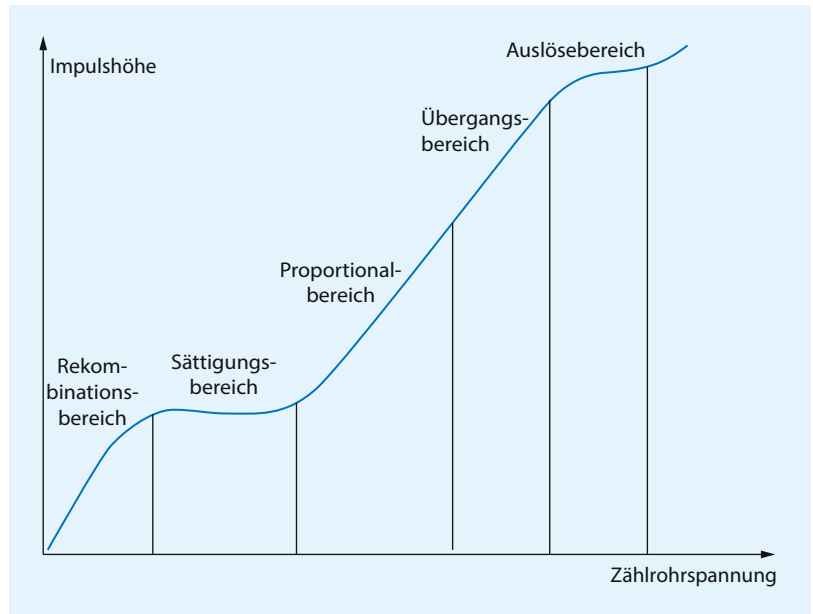


■ Abb. 10.4 Bohrlochmessplatz

Bohrlochmessplatz

Ein weiterer Szintillationsdetektor befindet sich im sog. Bohrlochmessplatz, der zum Nachweis geringer Aktivitäten eingesetzt wird. So können Allergene oder Hormonspiegel über Antigen- oder Antikörper-Reaktionen (IRMA/RIA) im Patientenserum oder -urin über die Messung radioaktiver Verbindungsanteile bestimmt werden. Da es sich um sehr geringe Aktivitätsmengen handelt, muss auch hier ein Detektormaterial hoher Ordnungszahl (NaJ/OZ 53) eingesetzt werden, das U-förmig die Probe umschließt. Das Probelvolumen muss so gewählt werden, dass es komplett in der zentralen Bohrung versenkt werden kann, sodass alle ausgehenden Quanten den Detektor erreichen. Er ist zum Schutz gegen Umgebungsstrahlung mit Blei ummantelt. Patientenproben können einzeln und mit der Hand oder über einen Probenwechsler automatisch zugeführt werden. Auch gibt es Messplätze, die mehrere einzelne NaJ Bohrlochdetektoren besitzen, sodass eine gleichzeitige Messung mehrerer Proben möglich ist (■ Abb. 10.4). Diese werden über ein Kunststoff-Rack in die korrekte Messposition gebracht. Allerdings können nur Tracer niede-

■ **Abb. 10.5** Impulshöhencharakteristik einer Ionisationskammer



rer Energie gemessen werden, da bei hoher Energie Impulse der Nachbarprobe einfließen.

Qualitätskontrolle Bohrlochmessplatz

Das Energiefenster wird mit einem langlebigen Prüfstrahler z. B. ^{137}Cs eingestellt. Der Nulleffekt ist täglich durchzuführen, denn bei der geringen Aktivität der zu messenden Probe kann eine kleine Verunreinigung der Bohrung die Messergebnisse extrem verändern. Bei Plätzen, die mit Racks oder Ketteneinsätzen befüllt werden, müssen diese in die Nulleffektmessung mit einbezogen werden. Zur Bestimmung der Ausbeute wird ein ^{137}Cs -Prüfstrahler bekannter Aktivität verglichen mit der angezeigten Aktivität. Die Funktion des Zählers und des Zeitgebers eines Messplatzes wird mit einem internen oder externen Impulsgenerator überprüft. Zur Konstanzprüfung der Nuklidtasten misst man zwei Radionuklide unterschiedlicher Energie in manueller Einstellung und ein weiteres Mal unter Einsatz der Festtasten. Der Quotient beider Messungen wird gebildet und mit dem Referenzwert verglichen, der bei 1 liegt.

Flüssigszintillatoren

Niederenergetische Betateilchen können wegen ihrer geringen Reichweite Festkörperszintillatoren

nicht erreichen. Sie werden mithilfe flüssiger, organischer Szintillatoren nachgewiesen (z. B. ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr). Der gelöste Szintillator wandelt die entstandenen Elektronen in Licht um. Sie werden von zwei PMP gemessen.

Gasionisationsdetektoren

Als Medium niederer Ordnungszahl wird ein in einer Kammer befindliches Gas (Luft, Edelgase wie He, Ar, Kr, Xe) eingesetzt. Wird eine solche Gasionisationskammer von einem Gammastrahler getroffen, so werden aus den Gasmolekülen Elektronen gelöst, das Gas wird ionisiert. Es verbleibt ein positiv geladenes Gasmolekül auf der einen Seite und ein freies Elektron auf der anderen Seite. Diese Ladungsträger werden bei angelegter Hochspannung zur negativ geladenen Kathode bzw. zur positiv geladenen Anode transportiert. Es fließt ein Strom, der gemessen werden kann. Abhängig von der angelegten Hochspannung definiert sich der Arbeitsbereich der Ionisationskammer. Im sog. Rekombinationsbereich entgehen die Ladungsträger der Messung, da sich negative und positive Teilchen wieder verbinden. Im sich spannungsmäßig an den Rekombinationsbereich anschließenden Sättigungsbereich ist die angelegte Hochspannung so hoch, dass keine Rekombinationen mehr stattfinden kön-

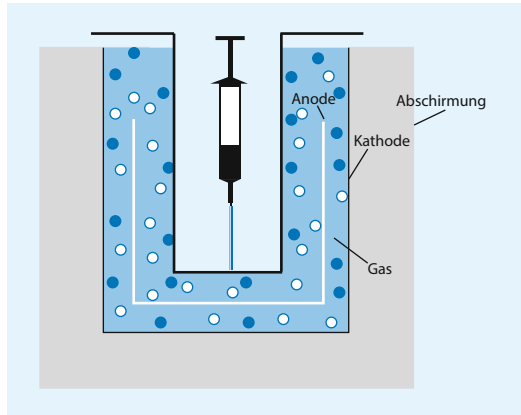
nen, jeder Ladungsträger wird registriert. In diesem Bereich arbeiten Ionisationskammern. Bei weiterer Hochspannungserhöhung werden die primär erzeugten Elektronen so stark beschleunigt, dass sie weitere Atome ionisieren. Es entsteht eine Elektronenlawine, die proportional zum Primäreignis ist (Arbeitsbereich der Proportionalitätszählrohre). Wird die Hochspannung weiter in den sog. Auslösbereich gesteigert, kann ein einziges Primärelektron zur Ionisation des gesamten Kammervolumens führen, was beim Nachweis kleinster Aktivitätsmengen im Strahlenschutz von Bedeutung ist (■ Abb. 10.5).

Aktivimeter

Eine Ionisationskammer ist als zylinderförmiger Schacht der Grundbaustein des sog. Aktivimeters. In dieses wird mithilfe eines Probenhalters die Aktivitätsprobe oder -spritze eingesetzt, sodass immer die gleiche Messgeometrie gegeben und die Kammer vor Kontamination geschützt ist. Die die Schachtionisationskammer umgebende Bleiabschirmung von 3–16 mm Dicke, schützt diese vor Untergrundstrahlung, die zur Verfälschung des Messergebnisses führen würde (■ Abb. 10.6). Über Nuklidtasten, hinter denen sich gespeicherte Isotopenfaktoren verbergen, sind die verschiedenen Energiefenster bequem anwählbar. Das Ansprechvermögen des Aktivimeters liegt in einem Messbereich bis 200 GBq und in einem Energiebereich von 35 KeV bis 3 MeV sehr weit.

Qualitätskontrolle des Aktivimeters

Die Proportionalität zwischen der Anzeige und den unterschiedlichen Aktivitäten muss gegeben sein. Sie unterliegt der arbeitstäglichen Prüfung. Die Abweichung darf nicht größer als 5 % sein und wird mit einem Prüfstrahler, der 3,7 MBq ^{137}Cs enthält, überwacht. Verglichen wird die Anzeige des Aktivimeters mit der tatsächlichen Aktivität des Prüfstrahlers. Die tägliche Kontrolle der Zählrate ohne Probenaktivität (Nulleffekt) soll eine Kontamination des Messgerätes und des Probenhalters ausschließen. Die halbjährlich notwendige Prüfung der Systemlinearität wird über den radioaktiven Zerfall einer Probe eines kurzlebigen Radionuklids (z. B. $^{99\text{m}}\text{Tc}$) bestimmt. Dabei werden Aktivitäten zwischen 1 MBq und 60 % der maximal zu messenden Aktivität (z. B. Generatoreluat) verwendet.



■ Abb. 10.6 Aufbau eines Aktivimeters

Es werden zwei Messwerte je HWZ bestimmt, die Abweichung darf auch hier maximal 5 % von dem durch Zerfall errechneten Aktivitätswert betragen (DIN 6855 Teil 11). Bei Prüfung der Nuklidtasten wird der EKA von Hand auf den gleichen Energiebereich (z. B. 141 KeV / $^{99\text{m}}\text{Tc}$) eingestellt wie er über die Festtaste eingegeben wurde. In beiden Einstellungen müssen die Impulsraten der gemessenen Probe übereinstimmen.

Die Herstellerkalibrierung des Aktivimeters muss alle 6 Jahre wiederholt werden.

10.3.3 Messsysteme im Strahlenschutz

Jeder im Überwachungs- oder Kontrollbereich arbeitende Mitarbeiter ist laut StrlSchV verpflichtet, die Personendosis an einer repräsentativen Stelle der Körperoberfläche äquivalent zu bestimmen.

Personendosimeter

Die Überwachung der Strahlenbelastung kann z. B. durch ein Filmdosimeter erfolgen, wenn mit Photonen-, Elektronen- oder Neutronenstrahlung umgegangen wird. Ein solches Dosimeter (■ Abb. 10.7) besteht aus einer zweiteiligen Gleitschattenkassette, die Absorber unterschiedlicher Ordnungszahl enthält (z. B. Aluminium, Kupfer, Blei). Die Absorber auf Vorder- und Rückseite sind unterschiedlich geformt und versetzt angeordnet, sodass bei Auswertung der Schwärzung der innenliegenden Filme



■ Abb. 10.7 Film dosimeter

unterschiedlicher Empfindlichkeit festgestellt werden kann, aus welcher Richtung die Strahleneinwirkung stattgefunden hat. Durch die unterschiedliche Dichte der Absorber kann bei Durchtritt von Strahlung deren Energie bestimmt werden. Die Auswertung des an der Vorderseite des Rumpfes getragenen Personendosimeters erfolgt durch die zuständige zentrale Personendosimetriestelle einmal monatlich.

Ringdosimeter

Ein weiteres in der nuklearmedizinischen Routine verwendetes Dosimeter ist das Ringdosimeter, das die Strahlenbelastung der Hand ermittelt und im Heißlabor eingesetzt wird (■ Abb. 10.8). Der Ring enthält einen Thermo-Lumineszenz-Detektor, eine Substanz (z. B. Calciumfluorid verunreinigt mit Mangan), die die absorbierte Strahlungsenergie speichert. Der Kristall wird durch eine entsprechende Auswertstelle einmal monatlich erhitzt. Dadurch wird die gespeicherte Energie in Form von sichtbarem Licht abgegeben. Der Ring wird zusätzlich zum Film dosimeter eingesetzt.

Elektronische Dosimeter

Elektronische Dosimeter sind sofort ablesbar und deshalb besonders zur Überwachung schwangerer Frauen geeignet, die im Überwachungsbereich tätig sind. Sie zeigen die gemessenen Werte digital an (■ Abb. 10.9) und warnen akustisch, wenn die eingestellte Dosis bzw. Dosisleistung überschritten ist. Sie enthalten spezielle Photodioden, die die Energie der einfallenden Photonen in elektrischen Strom umwandeln.



■ Abb. 10.8 Ringdosimeter



■ Abb. 10.9 Elektronisches Dosimeter

Ganzkörperzähler

Zum Nachweis inkorporierter Strahlung werden Ganzkörperzähler eingesetzt, mit deren Hilfe das im Körper befindliche Nuklid identifiziert und die vorhandene Aktivitätsmenge bestimmt werden kann. Ganzkörperzähler enthalten Szintillations- und auch Halbleiterdetektoren zur Erhöhung der Nachweisempfindlichkeit. Halbleiter sind kristalline Stoffe, z. B. Germanium oder Silizium verunreinigt mit Lithium, die bei niedrigen Temperaturen isolieren, aber durch Energiezufuhr zu Leitern werden. Sie zeichnen sich durch eine gute Energieauflösung aus, sind aber weniger empfindlich als Szintillationsdetektoren. Wegen der extrem hohen Empfindlichkeit eines Ganzkörperzählers ist die Abschirmung gegen Umgebungsstrahlung extrem aufwendig.

Kontaminationsmessgeräte

Die in der nuklearmedizinischen Routine eingesetzten Kontaminationsmessgeräte (■ Abb. 10.10) sind mit im Proportionalitäts- bzw. Auslösebereich arbeitenden Ionisationsdetektoren ausgestattet. Sind Eingangsereignisse hoch und leicht erfassbar, so können sie mit dem Proportionalitätszählrohr verhältnismäßig zum Eingangsereignis festgehalten werden (Anwendung in Kontaminationsmessgeräten und tragbaren Ortsdosimetern). Kleinere Ak-

■ **Abb. 10.10** Hand-Fuß-Monitor

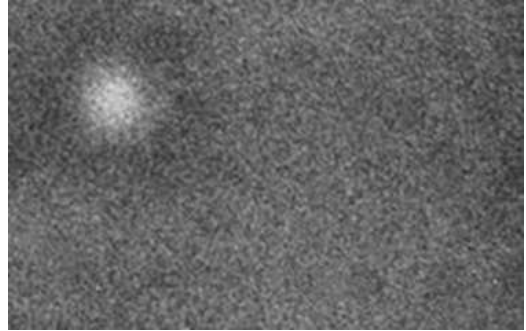


tivitätskontaminationen werden mit den im Auslösebereich arbeitenden Geiger-Müller-Zählrohren nachgewiesen (Anwendung in handlichen Orts- und elektronischen Personendosimetern). Immer häufiger werden Kontaminationsmessgeräte auch mit Szintillationsdetektoren bestückt. Sie können zum Nachweis von Verunreinigungen mit Alpha-, Beta- und Gammastrahlen eingesetzt werden.

- ✓ Jelena wechselt zunächst ihre kontaminierte Kleidung und bringt diese in den Abklingraum, wo sie ca. 10 HWZ verbleibt, bis die Aktivität abgeklungen ist. Gut, dass ihre Freundin aus dem Personalwohnheim eine Jeans holt, sonst hätte Jelena in einer OP-Hose heimwärts ziehen müssen, denn ihre über den Boden schleifende Hose war kontaminiert. Jelena, bewaffnet mit Handschuhen, Überschuhen, tragbarem Messsystem, Putzlappen, Dekontaminationsmittel und Mülltüte, sucht die kontaminierte Stelle des Bodens. Als sie fündig wird, reinigt sie diese mit von außen nach innen kreisenden Bewegungen. Handschuhe, Überschuhe und Putzlappen entsorgt sie im Abklingraum. Auf dem Heimweg weiß sie eines: Sie wird noch heute ihre Hose kürzen.

In Kürze

Die zum Nachweis von Photonenstrahlung eingesetzten Detektoren unterscheiden sich in dem verwendeten Material. Zum Nachweis



■ **Abb. 10.11** Homogenitätsprüfung. Kreisförmiger Aktivitätsausfall

kleiner Aktivitätsmengen (z. B. im Patienten) wird ein Material hoher Ordnungszahl eingesetzt, der Nachweis großer Aktivitätsmengen (z. B. Generatoreluat) gelingt mit Gasen geringer Dichte. Dabei wird die an die Ionisationskammer angelegte Spannung dem Verwendungszweck des Messgerätes angepasst.

10.4 Bildentstehungssysteme

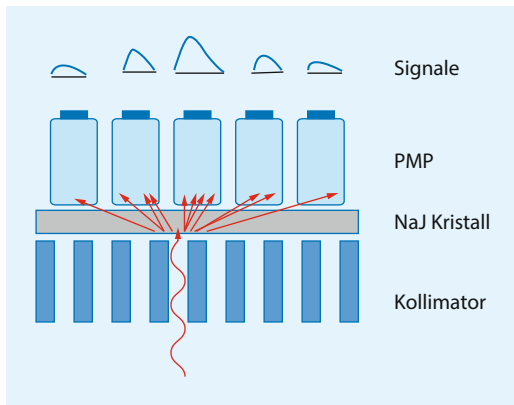
1. Offenhäuser

Nach Homogenitätsprüfung der Gammakamera stellt Frau Meier fest, dass sich ein runder weißer Fleck im Szintigramm des Phantoms befindet (■ **Abb. 10.11**). Der Terminkalender ist randvoll und die erste Patientin sitzt wartend vor der Tür. So kann sie die Patientin nicht untersuchen! Das sieht sie sofort, denn wenn nun der Befund in diesem nicht funktionstüchtigen Bereich liegt, ist alles umsonst. Die Patientin ist bereits ungeduldig und wartet auf ein Startsignal.

- ? Was verbirgt sich hinter diesem weißen Punkt auf der Abbildung?

10.4.1 Gammakamera

Die Gammakamera (■ **Abb. 10.12**) ist ein Detektorsystem, das ein dreidimensionales Aktivitätsverteilungsmuster im Patienten als zweidimensionales



■ Abb. 10.12 Gammakamera

Bild (Szintigramm) wiedergibt. Das aufgenommene Szintigramm gibt je nach eingesetztem Tracer Aufschluss über Durchblutung, Speicherung, Stoffwechsel und Rezeptordichte eines Organsystems. Es können Einzelbilder bei konstanter Aktivitätsverteilung (statische Aufnahmen) oder dynamische szintigrafische Bildserien aufgenommen werden, bei denen sich die Aktivitätsverteilung während des Aufnahmezeitraums ständig verändert.

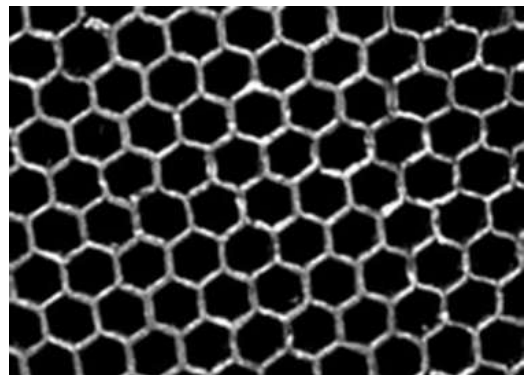
Der Messkopf der Gammakamera besteht aus einem Kollimator, dem Natrium-Iodid-Kristall, der zur Wandlung der Gammaquanten in Licht dient, sowie den über eine lichtleitende Schicht mit diesem verbundenen Photomultipliern, die das Licht in elektrische Signale umwandeln.

Kollimatoren

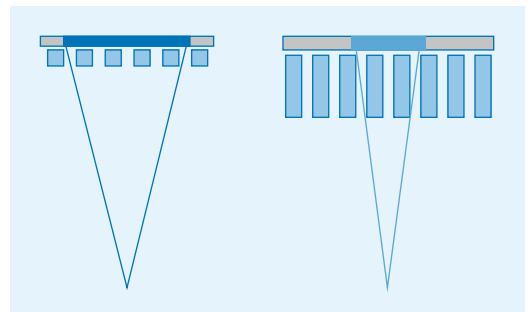
Voraussetzung für die korrekte Ortsanalyse der einfallenden Gammaquanten ist der Einsatz eines sog. Kollimators. Er sorgt dafür, dass nur Gammaquanten einer bestimmten Flugrichtung durchgelassen werden und besteht aus vielen Bleisepten, die durch kleine Bohrungen voneinander getrennt sind (■ Abb. 10.13).

➤ Die Dicke der Bleisepten richtet sich nach der Energie des verwendeten Radionuklids.

Sind sie zu dünn, können Gammaquanten das Blei durchdringen (**Septenpenetration**), sind sie zu dick, werden zu viele Gammaquanten absorbiert, die Zählrate sinkt. Während zu dünne Septen zur Verschlechterung der Ortsauflösung führen, kann der Einsatz



■ Abb. 10.13 Ausschnitt eines Parallellochkollimators in Aufsicht



■ Abb. 10.14 Zusammenhang zwischen Geometrie und Abbildungseigenschaften eines Kollimators

eines Kollimators mit zu dicken Septen durch Verlängerung der Aufnahmezeit kompensiert werden.

Die Abbildungseigenschaften eines Kollimators hängen von seiner Geometrie und seinem Abstand zur Quelle, also zum Patienten ab. Die Geometrie eines Kollimators hängt vom Verhältnis Bohrungsgröße/Septenlänge ab. Der Divergenzwinkel α ist die Bezugsgröße und gibt an, unter welchem Maximalwinkel Gammaquanten die Bohrungen noch gerade durchdringen können.

Dabei gilt:

- lange Septen/kleine Bohrungen/kleiner Divergenzwinkel/hohe Ortsauflösung,
- kurze Septen/große Bohrungen/großer Divergenzwinkel/geringe Ortsauflösung (■ Abb. 10.14).

Die Ortsauflösung ist ebenso abhängig vom Abstand des Patienten zum Kollimator. Je größer der

■ **Abb. 10.15a,b** Schilddrüsenphantom.
Abstand: 0 cm (a). Abstand: 0 cm (b)



Quell-Detektorabstand, desto schlechter ist die Abbildungsqualität. (■ Abb. 10.15, ■ Abb. 10.16)

➤ **Der Kollimator muss immer so dicht wie möglich an den Patienten herangefahren werden.**

Bei Patienten, die unter Platzangst leiden, kann fast immer durch intensive Aufklärung über die Wichtigkeit der Kollimatornähe eine optimale Qualität der Aufnahme erreicht werden.

Die Empfindlichkeit eines Kollimators wird beschrieben durch das Verhältnis der ausgehenden zu den nachgewiesenen Quanten. Je mehr Quanten den Detektor erreichen, desto höher ist die Empfindlichkeit des Kollimators. Beeinflusst wird sie

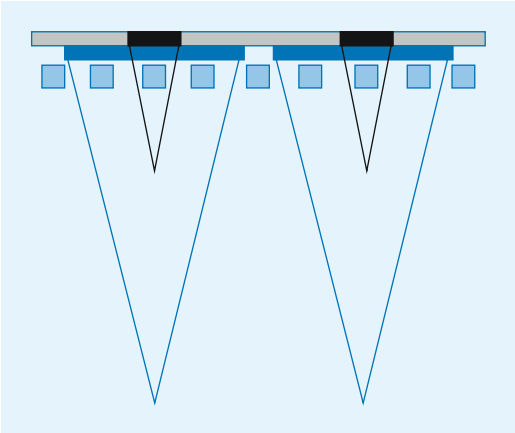
durch die Bohrungsgröße, die Anzahl der Löcher und die Septenlänge.

Dabei gilt:

- große Bohrungen/kurze Septen/hohe Empfindlichkeit,
- kleine Bohrungen/lange Septen/geringe Empfindlichkeit.

Allerdings nimmt die Ortsauflösung mit größer werdender Bohrung und kürzer werdenden Septen ab.

➤ **Ortsauflösung und Empfindlichkeit sind konkurrierende Eigenschaften. Ein Kollimator mit guter Ortsauflösung ist wenig empfindlich, ein**



■ **Abb. 10.16** Zusammenhang zwischen Objekt-Kollimator-abstand und Ortsauflösung

solcher mit hoher Empfindlichkeit ist schlecht ortsauflösend.

Bei Verwendung von Radiopharmaka zweier Energien (Doppeluntersuchung) wird der Kollimator der höheren Energie angepasst (■ Tab. 10.1, 10.2).

Der in der Routine am häufigsten benutzte Kollimator ist der **Parallellochkollimator**, dessen Septen senkrecht zur Detektorebene stehen. (■ Abb. 10.17)

Bei **konvergierenden Kollimatoren** laufen die Septen vom Patienten aus betrachtet konisch auseinander (■ Abb. 10.18). Diese Geometrie hat eine Vergrößerung des Objektes zur Konsequenz.

Der **divergierende Kollimator** wird benutzt (■ Abb. 10.19), wenn die Abmessungen des Objektes grösser sind als das Sichtfeld der Kamera, die er verkleinert. Seine Septen laufen vom Patienten aus betrachtet konisch zusammen.

Der selten eingesetzte **Pinehole Kollimator** (■ Abb. 10.20) arbeitet nach dem Prinzip der Lochkamera. Er besitzt nur ein Loch und vergrößert die Abbildung maximal. Das Auflösungsvermögen ist hervorragend, die Empfindlichkeit wegen des einen Loches sehr gering.

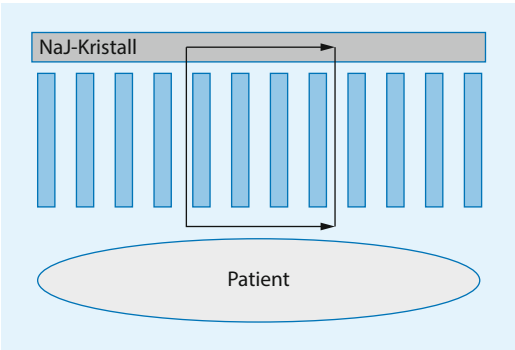
! Kollimatoren wiegen zwischen 10 und 100 kg. Wird der Kollimator gewechselt, muss seine Befestigung auf dem Messkopf gewissenhaft überprüft werden, um eine Gefährdung des Patienten zu verhindern.

■ **Tab. 10.1** Einsatz der Kollimatoren entsprechend der Nuklidenergie

Low Energie (LE)	140–200 KeV
Medium Energie (ME)	200–400 KeV
High Energie (HE)	Ab 400 KeV

■ **Tab. 10.2** Einsatz der Kollimatoren entsprechend der Ortsauflösung/Empfindlichkeit

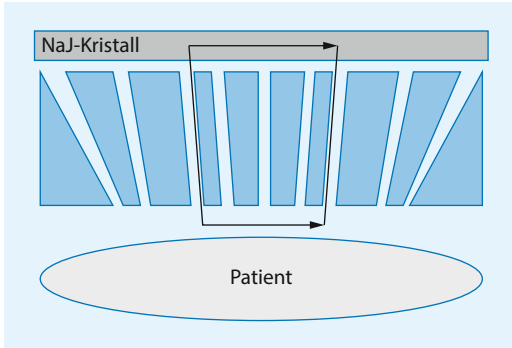
High Resolution (HR)	Kleine Bohrungen, lange Septen
High Sensitivity (HS)	Große Bohrungen, kurze Septen
General (GP)/All Purpose (AP)	Mittlere Bohrungen/mittlere Septen



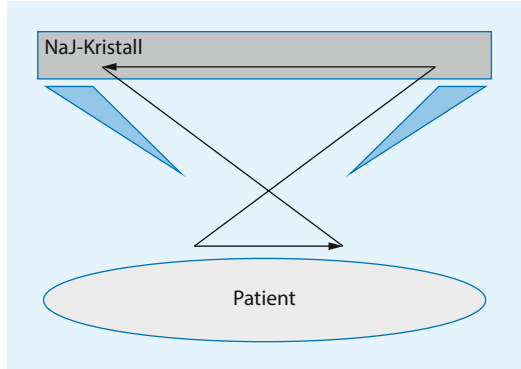
■ **Abb. 10.17** Parallellochkollimator

Natrium-Iodid-Kristall

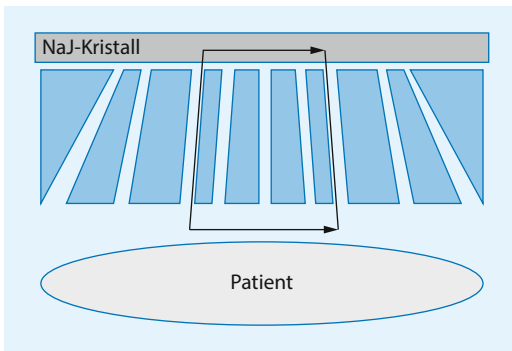
Das Sichtfeld des mit Thallium dotierten Natrium-Iodid-Kristall (UFOF, useful field of view) beträgt bei Einkopfkameras 54×40 cm und bei einem Dreikopfsystem 42×31 cm. Als CFOV (central field of view) wird der tatsächliche Aufnahmebereich bezeichnet, der 75 % des UFOF ausmacht. Unter Einwirkung von Photonenstrahlung werden einzelne Moleküle des Kristallverbandes angeregt. Fallen diese in den Grundzustand zurück, wird die Anregungsenergie in Form von Licht abgegeben. Die Helligkeit des Lichtes ist proportional zur absorbierten Photonenenergie, die Lichtmenge proportional zur Anzahl der auftretenden Ereignisse. Die hohe Ordnungszahl von NaJ bedingt ein gutes Absorptionsverhalten. Der Kristall muss der Energie des verwendeten Radionuklids angepasst werden. Ist er zu dünn, verlassen



■ Abb. 10.18 Konvergierender Kollimator



■ Abb. 10.20 Pinehole Kollimator



■ Abb. 10.19 Divergierender Kollimator

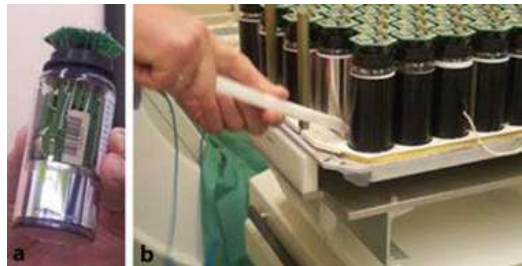
viele Quanten den Kristall ungeschwächt, die Nachweiswahrscheinlichkeit sinkt. Ist er zu dick, kommt es zu einer Mehrfachabsorption. Die Dicke beträgt bei hauptsächlichem Gebrauch von ^{99m}Tc 9,53 mm.

❗ **Der Kristall darf keinen großen Temperaturunterschieden ausgesetzt (geöffnetes Fenster im Winter) und nicht ungeschützt, also ohne vorgeschalteten Kollimator zurückgelassen werden, er kann brechen.**

Photomultiplier

Über eine lichtdurchlässige Silikonschicht sind etliche **Photomultiplier (PMP)** reflektionsfrei an den Kristall gekoppelt. Diese haben die Aufgabe, das entstandene Szintillationslicht in elektrisch messbare Impulse umzuwandeln. PMP sind Vakuumröhren, auf die eine dünne Metallschicht = Kathode aufgedampft ist (■ Abb. 10.21).

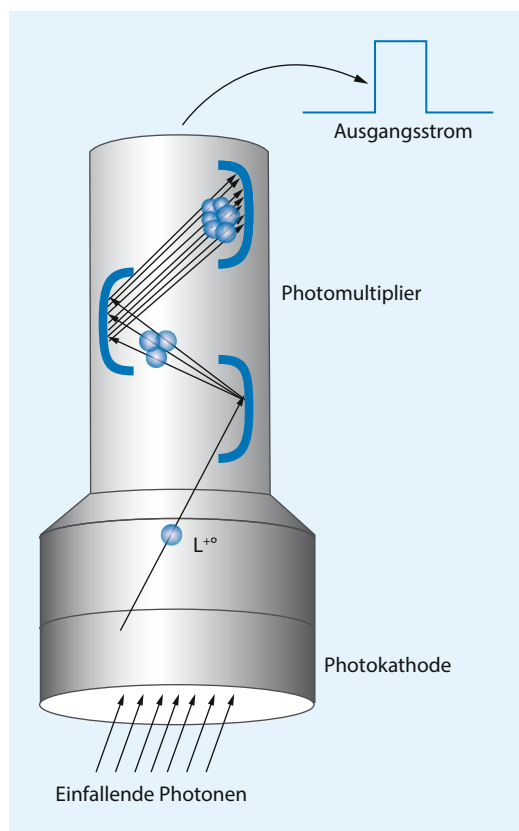
Aus ihr werden durch Auftreffen des Szintillationslichtes Elektronen ausgelöst. Die Elektro-



■ Abb. 10.21 Austausch eines defekten Photomultipliers

nenzahl ist proportional zur Menge des aus dem Kristall emittierten Lichts. Durch Anlegen einer Hochspannung werden die frei gewordenen Elektronen auf Bleche (Dynoden) beschleunigt und lösen Sekundärelektronen aus, die jeweils wieder auf die nächste Dynode beschleunigt werden. Die Teilspannung liegt so an den Dynoden an, dass von Kathode zu Anode jede Dynode positiv zur vorhergehenden ist. Die Hochspannung zwischen den einzelnen Dynoden muss gleich bleiben, damit die Proportionalität zum eingefallenen Szintillationslicht erhalten bleibt. An der am Ende der Beschleunigungsstrecke befindlichen Anode trifft schließlich eine Elektronenlawine ein (■ Abb. 10.22). Jedem PMP ist ein Vorverstärker zugeordnet, der die ankommenden Ladungsimpulse in Spannungsimpulse umwandelt, deren Höhe wiederum proportional zur absorbierten Quantenenergie ist.

Der ihm angeschlossene Linearverstärker verstärkt die Spannungsimpulse linear. Die Form der Signaldauer wird gekürzt, um möglichst schnell weitere Signale empfangen zu können.



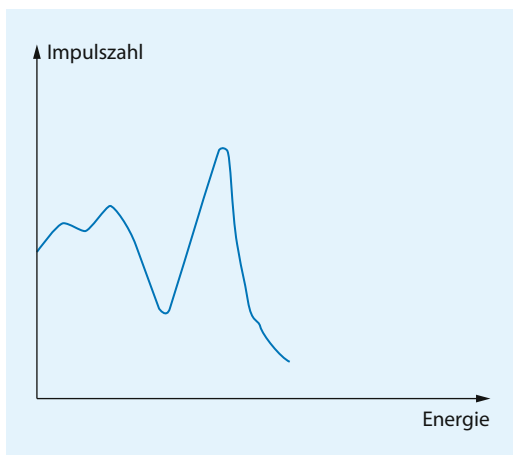
■ Abb. 10.22 Funktionsweise der PMP-Röhren

Gammastrahlung

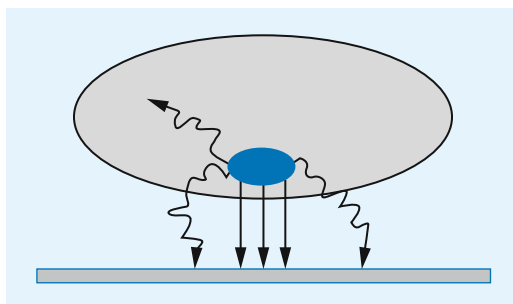
Geht man nun von ^{99m}Tc aus, so müssten bei gegebener Proportionalität alle gemessenen Impulse mit der Energie von 141 KeV registriert werden. Durch Spannungsschwankungen, Inhomogenitäten des Kristalls, Streuung der eingehenden Photonen etc. entsteht eine relativ breite Energieverteilung um 141 KeV herum. Gestreute Quanten lösen einen Impuls niedriger Energie aus als solche, die über einen Photoeffekt absorbiert wurden, man erhält ein Impulsspektrum (■ Abb. 10.23). Radionuklide können über einen oder mehrere Energiepeaks verfügen, z. B. ^{111}In (171 KeV und 215 KeV).

Impulshöhenanalyse

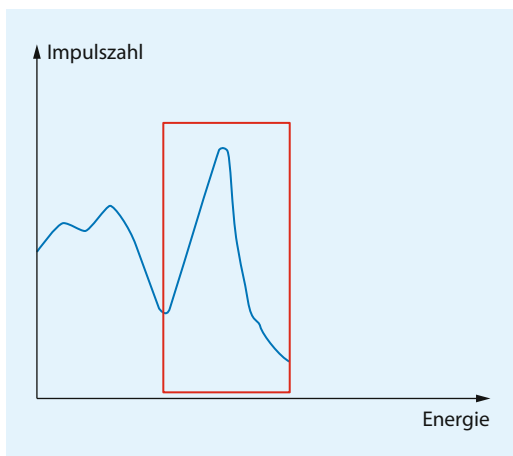
Nur die über einen Photoeffekt absorbierten Quanten dürfen zur Registrierung durchgelassen werden, denn nur diese werden auch dort registriert, wo sie im Kristall aufgetreten sind. (■ Abb. 10.24) Die Aus-



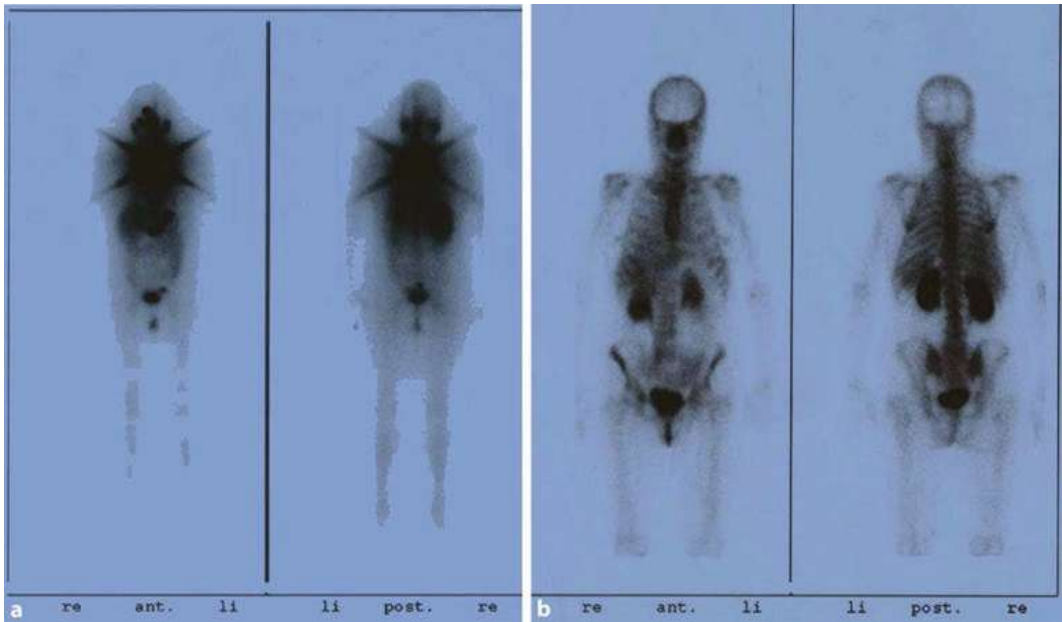
■ Abb. 10.23 Gammastrahlungsspektrum. Aufnahme mit Streumedium



■ Abb. 10.24 Streuung der Gammaquanten im Patienten



■ Abb. 10.25 Impulshöhenanalyse nach Fenstereinstellung des Impulshöhenanalysators im Bereich des Photopeaks



■ **Abb. 10.26a,b** Follikuläres SD Karzinom: $^{131}\text{J}/\text{HWZ } 8\text{Tg}$ /Energie 364 KeV, Aufnahme 8:00 (a). $^{99\text{m}}\text{Tc}/\text{HWZ } 6\text{Std.}$ /Energie 141 KeV, Aufnahme 11:00 (b). Anmerkung: Beide Szintigramme der Patientin wurden am gleichen Tag akquiriert, da die Patientin nach Ausschluss von Skelettmetastasen umgehend einer Radioiodtherapie zugeführt werden sollte. Das Energiefenster wurde um 11:00 auf die Energie von $^{99\text{m}}\text{Tc}$ eingestellt, sodass das vorhandene ^{131}J , vor allem im Bereich der Schilddrüse, ausgefenstert wurde

sonderung der Streustrahlen erfolgt durch den sog. Impulshöhenanalysator. Dieser besteht aus zwei Diskriminatoren, die in Antikoinzidenz geschaltet sind. Sie bilden eine obere und eine untere Schwelle. Die Differenz beider Schwellen wird als Fensterbreite, die Mitte der Schwellen als Fensterlage bezeichnet. Dieser elektronische Schaltkreis lässt nur Impulse passieren, die in die Fensterbreite fallen (■ [Abb. 10.25](#)). Das Fenster wird mit einer Energiebreite von $\pm 10\%$ so gelegt, dass die Fensterlage der Energie des verwendeten Radionuklids entspricht. Eine Gammakamera besitzt mehrere solcher Messkanäle. Bei einem Nuklid mit mehreren Photopeaks können alle Energien erfasst werden, was zum Erreichen hoher Impulsraten beiträgt. Werden dem Patienten zwei unterschiedliche Nuklide zum gleichen Zeitpunkt verabreicht (z. B. $^{99\text{m}}\text{Tc}/^{131}\text{J}$, ■ [Abb. 10.26](#)) so kann durch entsprechende Einstellung der Fensterlage nur eine der beiden Aktivitätsverteilungen szintigrafisch erfasst werden.

Messkopfelektronik

Die entstandenen Signale werden im Messkopf über ein spezielles Widerstandsnetzwerk geortet. Es unter-

teilt das Ausgangssignal eines jeden PMP in 4 Ortssignale: x^+ , x^- , y^+ , y^- . Der PMP, der dem Absorptionsort am nächsten ist, registriert die meisten Lichtquanten und liefert den höchsten Ausgangsimpuls. Alle vom Absorptionsort weiter entfernten PMP registrieren entsprechend weniger Licht, der Ausgangsimpuls ist niedriger (Abstand-Quadrat-Gesetz) (■ [Abb. 10.12](#)). Aus den Ortssignalen aller vorhandenen PMP werden die Summensignale x^+ , x^- , y^+ , y^- , geliefert, die über zwei Differenzverstärker x und y ein Signal erzeugen. Die Summe der entstandenen Ausgangsimpulse bildet das Z-Signal, welches der Höhe der absorbierten Energie entspricht. Dieses wird an den Impulshöhenanalysator weitergeleitet und nur dann, wenn es im eingestellten Energiefenster liegt, werden x und y an die angeschlossene Elektronik zur Registrierung weitergeleitet und der Inhalt des entsprechenden Bildelementes der Bildmatrix erhöht sich um 1. Je mehr Zerfälle an ein und demselben Ort nachgewiesen werden, umso größer wird die Zahl der im zugehörigen Bildelemente. Gängige Matrixgrößen sind 64×64 , 128×128 , 256×256 , 512×512 . Allerdings benötigt jeder Detektor eine bestimmte Zeit um die

absorbierten Quanten zu verarbeiten. Ein weiteres Signal kann in dieser Zeit nicht angenommen werden, es entgeht der Messung (Totzeit). Die entstehenden Zählratenverluste steigen mit höher werdender Aktivitätsmenge.

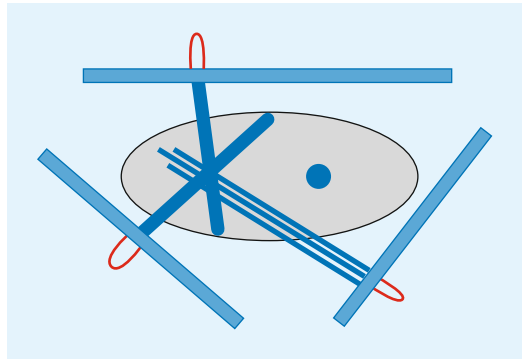
Eine moderne digital arbeitende Gammakamera wird über einen Computer gesteuert und überwacht. Für die Akquisition werden Protokolle erstellt und abgespeichert, die folgende Untersuchungsparameter enthalten:

- Kollimator
- Radionuklid
- Energiefenster, dem Radionuklid entsprechend
- Orientierung des Messkopfes
(00/900/1800/2700)
- Bewegung des Messkopfes
- Aufnahmezeit/Count-rate
- Position des Patienten
- Homogenitätskorrektur
- Patientendaten

Der Messkopf ist gegen Umgebungsstrahlung abgeschirmt und an einem Stativ (Gantry) befestigt. Er kann von allen Seiten patientennah eingesetzt werden. Stativ und Patientenliege können über mechanische Funktionstasten in die entsprechende Position gebracht werden. Die meisten Kamerasysteme können entlang der Patientenachse verschoben werden und bieten damit die Möglichkeit einer Ganzkörperszintigrafie.

SPECT

SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)-Kameras bestehen i. d. R. aus zwei bis drei Messköpfen, die an einem Ringsystem laufen. Zur Bestimmung der dreidimensionalen Abbildung der Nuklidverteilung in einem Objekt erfasst man mit einer Gammakamera zweidimensionale Bilddaten. Die Messung wird unter verschiedenen Projektionswinkeln wiederholt, wobei die Kamera schrittweise um das Objekt rotiert. Jedes der dabei akquirierten Szintigramme stellt eine zweidimensionale Projektion der dreidimensionalen Nuklidverteilung dar. Hierbei werden alle Objektpunkte (3D) in einem parallel zur Detektionsfläche der Kamera orientierten 2D-Bild des Objektes wiedergegeben. Durch Rückprojektion kann aus diesem Satz 2D-Bilder ein dreidimensionales Bild der



■ Abb. 10.27 Rückprojektion

Nuklidverteilung erzeugt werden. Bei dieser Art der Bildrekonstruktion werden also die 2D-Bilddaten auf das Objektvolumen zurückprojiziert (daher der Name des Verfahrens), indem die Intensität jedes Bildpunktes als Linie senkrecht zur Detektionsfläche zurück im Objektvolumen abgebildet wird (■ Abb. 10.27). Die Tiefeninformation geht dabei natürlich verloren. Sie kann durch Kombination von in unterschiedlichen Winkeln aufgenommenen Bildern zurückgewonnen werden. Diese Art der ungefilterten Rückprojektion der Rohdaten führt zu einer Verschmierung des Bildes, weshalb man Filter zur Verbesserung der Bildqualität einsetzt (gefilterte Rückprojektion). Auch dieses Verfahren muss als Näherung betrachtet werden, da die Schwächung der Gammastrahlung durch Photoeffekt und Streuung beim Weg durch das Objekt nicht einfließt. Diese Effekte werden bei den iterativen Rekonstruktionsverfahren berücksichtigt, bei denen gemessene mit mittels Korrekturfaktoren berechneten Projektionen verglichen werden. Durch Wiederholungen, bei denen diese Korrekturfaktoren immer weiter verfeinert werden, wird die dreidimensionale Nuklidverteilung bestimmt, die den durch die Kamera gemessenen 2D-Projektionen entsprechen würde. Die akquirierten Szintigramme werden auf einem Monitor des Computersystems dargestellt, auf Festplatte gespeichert, und wenn gewünscht über ein angeschlossenes Dokumentationssystem ausgegeben. Eine geeignete Software ermöglicht die Auswertung und Nachbearbeitung.

Bei der Darstellung der Tomogramme besteht ein Zeitfenster von ca. 30 Minuten zwischen der ers-

ten und der letzten Akquisition, sodass eine schnell verlaufende Aktivitätsveränderung im Patienten nicht mit einer SPECT-Kamera aufgezeichnet werden kann.

10.4.2 Qualitätskontrolle der Gammakamera

Die Qualitätskontrolle nuklearmedizinischer Geräte ist in der „Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin“ geregelt. Messverfahren und Ergänzungen sind in der DIN 6855 Teil 1,2,4 und 11 sowie in der DIN 60789 und in der DIN 61675 Teil 3 geregelt. In den USA hergestellte Geräte unterliegen der NEMA-Norm.

Die Abnahme bei Neuinstallation und die Zustandsprüfung nach Reparatur des Gerätes durch den Hersteller werden von diesem selbst durchgeführt und bleiben hier unerwähnt. Die wichtigsten, vom Betreiber im Rahmen der Konstanzprüfungen durchgeführten Kontrollen seien im Folgenden kurz beschrieben (■ Tab. 10.3).

Einstellung des Energiepeaks

Die tägliche Einstellung des Energiefensters erfolgt mit einer unkollimierten Strahlenquelle (Spritze), die in ca. 30 cm Abstand unter die Kamera gebracht wird. Der Energiepeak muss für das verwendete Nuklid an allen Köpfen der Gammakamera eingestellt werden. Die Lage des Fensters wird als Zahlenwert dokumentiert.

Bestimmung des Nulleffektes

Zur arbeitstäglich durchgeführten Nulleffektmessung wird eine Aufnahme über 300 Sekunden frei in Luft, ohne radioaktive Quelle, in immer gleicher Messgeometrie akquiriert. Sie dient dem Ausschluss einer eventuellen Kontamination des Gerätes. Ein vor dem Untersuchungsraum sitzender Patient oder eine schon zur Applikation vorbereitete Spritze können den Untergrund fälschlicherweise erhöhen.

$$\text{Auswertung: Untergrund} = \frac{\text{Impulszahl}}{\text{Messzeit}}$$

Der Messwert wird mit dem Referenzwert verglichen und dokumentiert.

■ Tab. 10.3 Konstanzprüfung Gammakamera

Energiefenster	Arbeitstäglich und bei Wechsel des Nuklids
Nulleffekt	Arbeitstäglich und bei Verdacht auf Kontamination
Homogenität	Einmal wöchentlich
Ausbeute	Monatlich
Linearität	Halbjährlich
Ortsauflösung	Halbjährlich
Abbildungsmaßstab	Halbjährlich
Center of Rotation (COR)	Halbjährlich
Dokumentationssystem	Halbjährlich

Bestimmung der Inhomogenität

Wöchentlich wird die Homogenität geprüft. Homogen bildet eine Gammakamera dann ab, wenn bei homogener Einstrahlung jeder Pixel der Matrix mit einer konstanten Zählrate belegt ist. Planare Kameras können ohne Kollimator (Intrinsic-Messung) mit einer im fünffachen Detektorabstand befindlichen Spritze überprüft werden. Die Kontrolle einer SPECT-Kamera erfolgt mit Kollimator (Extrinsic-Messung) mittels eines aus Plexiglas bestehenden Flächenphantoms (■ Abb. 10.28), das mit einer im Routinebetrieb genutzten Aktivität gefüllt wird (z. B. 700 MBq ^{99m}Tc). Die homogene Mischung ist Voraussetzung für eine korrekte Anwendung des Phantoms. Nachteil ist die während der Füllung bestehende Kontaminationsgefahr. Eine Alternative bietet das mit 80 bis 400 MBq ^{57}Co belegte Flachfeldphantom. Als Streumedium wird diesem eine Plexiglasplatte aufgelegt, um die Streuung im Patienten zu simulieren. Allerdings ist das ^{57}Co Flachfeldphantom teuer, seine Entsorgung schwierig und die Energie mit 122 KeV weicht von derjenigen des in der Routine benutzten Nuklids (oft ^{99m}Tc , 141 KeV) ab. Beide Phantome müssen größer sein als das Sichtfeld der zu prüfenden Kamera. Die erzeugte Abbildung wird qualitativ mit einem Referenzbild verglichen. Des Weiteren wird rechnergestützt quantitativ die integrale und die differenzielle Inhomogenität bestimmt. Zur Erfassung der integralen Inhomogenität wird der



■ Abb. 10.28 Flächenphantom

kleinste (Min) und der größte (Max) Pixelinhalt des gesamten Kamerafeldes ermittelt und in folgende Beziehung gesetzt:

$$\frac{\text{Max} - \text{Min}}{\text{Max} + \text{Min}} \times 100$$

= Integrale Inhomogenität in %

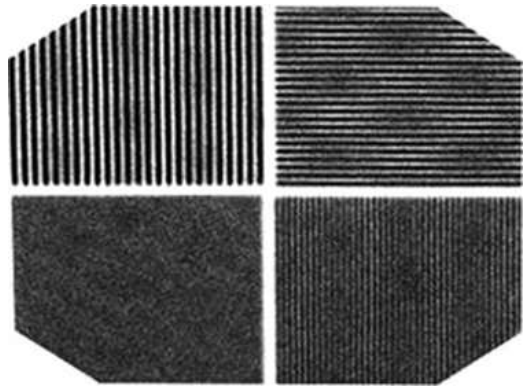
Zur Bestimmung der differentiellen Inhomogenität wird ein aus fünf benachbarten Pixeln bestehendes Feld über das gesamte Sichtfeld um je einen Pixel verschoben. Das Fenster mit der größten Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert wird zur Berechnung wie folgt herangezogen:

$$\frac{\text{Max} - \text{Min}}{\text{Max} + \text{Min}} \times 100$$

= Differenzielle Inhomogenität in %

Als inhärente Inhomogenität wird die Messung ohne Kollimator, als Systemhomogenität die sich auf den gesamten Messkopf inklusive Kollimator beziehende Messung, bezeichnet.

Die Verringerung der Restinhomogenität erfolgt über eine abgespeicherte Korrekturmatrix (Flood), die aus einer speziellen Homogenitätsaufnahme regeneriert wird. Für SPECT-Kameras muss die Flood mit Kollimator (Extrinsic-Flood), für Kameras im planaren Einsatz kann sie auch mit einer Punktquelle im fünffachen Detektorabstand ohne Kollimator (Intrinsic-Flood) erstellt werden. Bei Grenzwertüberschreitung wird die Aufnahme ei-



■ Abb. 10.29 Aufnahme eines Streifenphantoms zur Kontrolle der Linearität/ Ortsauflösung/Abbildungsmaßstab

ner neuen Flood erforderlich. Ohne entsprechende Korrektur kommt es in transversalen Rekonstruktionen zu kreisförmigen Artefakten im Zentrum der Matrix.

Bestimmung der Ausbeute

Die Ausbeute wird mit einem Referenzstrahler bekannter Aktivität durchgeführt. Die gemessene Aktivität wird mit der Ist-Aktivität des Strahlers verglichen

Kontrolle der Linearität/Ortsauflösung

Linearität und Ortsauflösung werden in der Routine mit einem Streifen- oder Lochphantom überprüft, das mit einem Flachfeld- oder Flächenphantom unterlegt wird. Die Linearität beschreibt die Nichtkrümmung einer Linie, die Ortsauflösung die örtliche Trennbarkeit zweier benachbarter Organstrukturen. Die Ortsauflösung einer Gammakamera hängt im Wesentlichen vom eingesetzten Kollimator ab und muss deshalb als Prüfung des Systems durchgeführt werden.

Die erstellte szintigrafische Abbildung wird mit einem Referenzbild verglichen.

Die systembedingte Restabweichung der x-, y-Signale von den Sollwerten wird im Patientenbetrieb über eine eingeschaltete Linearitätskorrektur ausgeglichen.

Kontrolle des Abbildungsmaßstabs

Der halbjährlich zu bestimmende Abbildungsmaßstab kann ebenfalls mit einem Streifen- oder Lochphantom (■ Abb. 10.29), das von einer homogenen

Quelle durchstrahlt wird, für jedes verwendete Zoom und Energiefenster überprüft werden. Die aufgenommene Aktivitätsverteilung wird mit dem Referenzbild verglichen. Rechnerisch ergibt sich der Abbildungsmaßstab durch den Quotienten des Abstandes zweier Punkte im Szintigramm und dem Abstand dieser Punkte im Objekt.

Kontrolle des Abbildungsmaßstabs bei Kameras mit Ganzkörperzusatz

Kameras mit Ganzkörperzusatz müssen halbjährlich in der Konstanz des Abbildungsmaßstabs in beiden Bewegungsrichtungen überprüft werden. Dazu werden in den gesamten Abtastbereich Punktquellen in definierten Abständen positioniert. Die Ortsauflösung und die korrekte Bilderzeugung können mithilfe eines von einer Flächenquelle durchstrahlten Bleistreifen- oder Lochphantom kontrolliert werden.

Kontrolle des Rotationszentrums

Bei rotierenden Kameras muss überprüft werden, ob sich die Kamera in einem perfekten Kreis um das Rotationszentrum dreht (Center of Rotation, COR) und ob dieses mechanische Zentrum mit dem Zentrum der Bildmatrix übereinstimmt. Hierzu wird eine Linienquelle um einen exakten Betrag zum Rotationszentrum verschoben (z. B. 5 cm) und auf der Patientenliege fixiert (s. Herstellerangaben). Die Kamera wird in mindestens 32 Winkelschritten um die Linienquelle geführt und die Aktivitätsverteilung in jedem der Winkel akquiriert. Trägt man nun die Linie im Verhältnis zum Rotationswinkel der Kamera auf, so erhält man eine Sinuskurve. Aus dieser lässt sich die Verschiebung der Rotationsachse gegenüber der Mitte der Bildmatrix bestimmen. Diese Verschiebung wird COR-Shift genannt. Bei einem COR-Shift von ± 6 mm muss das System nachjustiert werden.

Kontrolle der Dokumentationseinrichtungen

Nicht zu vergessen ist die halbjährlich erforderliche Kontrolle der Dokumentationssysteme. Graustufenbild des Rechnerbildschirms, Laserausdruck oder Filme werden mit entsprechenden Referenzbildern verglichen.

➤ **Eine konstante Messgeometrie ist die wichtigste Voraussetzung der korrekten Prüfung. Die Ergebnisse der Konstanzprüfungen müssen mindestens drei Jahre aufgehoben werden.**

✓ Leider muss Frau Meier die wartende Patientin enttäuschen. Die kreisförmige Inhomogenität ist zurückzuführen auf den Ausfall eines Photomultipliers. Dieser muss vor Aufnahmestart ausgetauscht werden. Anschließend ist durch entsprechende Kontrollen die fehlerfreie Funktion der Kamera sicherzustellen. Erst dann kann der Routinebetrieb wieder aufgenommen werden.

In Kürze

Die Gammakamera besteht aus einem Szintillationskristall, der über einen Lichtleiter mit den Photomultipliern verbunden ist. Die im Kristall durch Absorption entstandenen Lichtquanten werden vom PMP umgewandelt in Elektronen, verstärkt und an die angeschlossene Elektronik weitergeleitet. Um nur Quanten einer definierten Flugrichtung zum Kristall durchzulassen, sind dem NaJ-Kristall Kollimatoren vorgeschaltet, deren Bleisepten in ihrer Dicke der Energie des verwendeten Nuklids angepasst werden müssen.

10.5 Radionukleotide in der medizinischen Anwendung

U. Blum

Verschiedene radioaktive Stoffe werden in der Medizin angewendet (■ Tab. 10.4). Hierbei wird zwischen Stoffen zur diagnostischen Bildgebung, zu Therapie Zwecken und zur laborchemischen Diagnostik unterschieden.

In der laborchemischen Diagnostik werden neben radioaktiven Stoffen (überwiegend ^{125}I) im RIA (Radioimmunoassay) oder IRMA (Immunradiometrischer Assay) auch andere, nicht radioaktive Stoffe eingesetzt; zu nennen sind hierbei insbesondere Enzyme im Enzymimmunoassay (EIA) bzw. enzyme-linked

■ **Tab. 10.4** Auflistung einiger gebräuchlicher Radioisotope (modifiziert nach Nuklearmedizin, 4. Auflage, Kuwert)

Isotop	Anwendung	Strahlung, keV	HWZ	Herstellung
[^{99m} TcO ₄] ⁻	Diagnostik	γ, 140	6,01 h	Generator
[¹²³ I] ⁻	Diagnostik	γ, 159	13,3 h	Zyklotron
[¹²⁴ I] ⁻	PET	β ⁺ , 188	4,18 d	Zyklotron
[¹³¹ I] ⁻	Therapie	β ⁻ , 191 γ, 364	8,02 d	Reaktor
[¹¹¹ In]In ³⁺	Diagnostik	γ, 171, 245	2,80 d	Zyklotron
[⁹⁰ Y]Y ³⁺	Therapie	β ⁻ , 934	2,67 d	Generator
[⁸⁹ Sr]Sr ²⁺	Therapie	β ⁻ , 583	50,5 d	Reaktor
[¹⁸⁶ Re]ReO ₄ ⁻	Therapie	β ⁻ , 359 γ, 137	3,72 d	Reaktor
[¹⁸⁸ Re]ReO ₄ ⁻	Therapie	β ⁻ , 795 γ, 155	17 h	Generator
[⁸⁸ Sm]Sm ³⁺	Therapie	β ⁻ , 203, 228 γ, 103	1,93 d	Reaktor
[¹⁸ F]F ⁻	PET	β ⁺ , 242	109,8 min	Zyklotron
[¹¹ C]CO ₂	PET	β ⁺ , 385	20,4 min	Zyklotron
[¹³ N]NH ₃ ⁻	PET	β ⁺ , 491	10 min	Zyklotron
H ₂ ¹⁵ O	PET	β ⁺ , 735	2 min	Zyklotron

HWZ: Halbwertszeit, Tc: Technetium, TcO₄: Pertechnetat, I: Iod, In: Indium, Y: Yttrium, Sr: Strontium, Re: Rhenium, Sm: Samarium, F: Fluor, C: Kohlenstoff, CO₂: Kohlendioxid, N: Stickstoff, NH₃: Ammoniak, H₂O: Wasser

immunosorbet assay (ELISA), fluoreszierende oder lumineszierende Stoffe. Auf die laborchemischen Verfahren wird hier nicht weiter eingegangen.

10.5.1 Diagnostische Bildgebung

Der am häufigsten verwendete radioaktive Stoff in der Bildgebung ist das ^{99m}Technetium (^{99m}Tc). Es hat eine physikalische Halbwertszeit von 6,01 h. Es zerfällt in ⁹⁹Technetium und sendet dabei γ-Strahlung mit einer Energie von 140 keV aus.

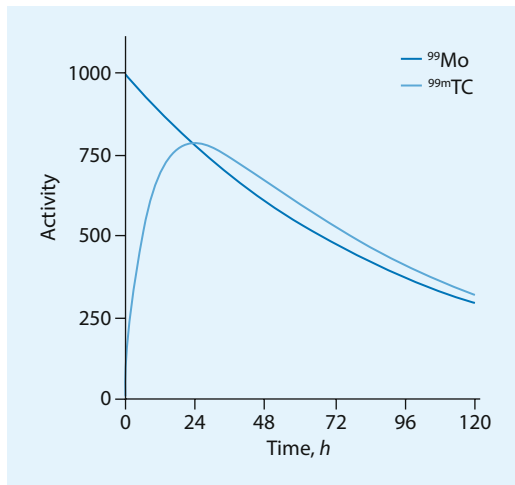
Hergestellt wird ^{99m}Technetium in einem Generatorsystem. In dem System ist ⁹⁹Molybdän (HWZ 65,9 h) fest gebunden als Natriummolybdat (Na₂⁹⁹MoO₄). Dieses zerfällt zu Natriumpertechnetat (Na^{99m}TcO₄), welches mittels steriler physiologischer Kochsalzlösung und einem Vakuumcontainer aus dem Generatorsystem herausgelöst wird.

Ein Generator ist ca. 1 Woche verwendbar. Die Ausbeute des radioaktiven Technetiums sinkt im Verlauf der Woche ab (■ Abb. 10.30).

Das gewonnene ^{99m}Technetium (^{99m}TcO₄) kann entweder direkt verwendet werden (z. B. in der Schilddrüsendiagnostik) oder es wird mit inaktiven Substanzen in Markierungsbestecken (sog. Kits) verbunden.

Andere Generatorsysteme sind z. B. der ¹⁸⁸Wolfram/¹⁸⁸Rhenium-Generator, der ⁶⁸Germanium/⁶⁸Gallium-Generator oder der ⁹⁰Strontium/⁹⁰Yttrium-Generator.

In der PET-Diagnostik werden Positronenstrahler benötigt. Diese haben unterschiedliche Halbwertszeiten. ¹⁸F-Verbindungen wie z. B. das ¹⁸F-FDG sind über kommerzielle Anbieter erhältlich.



■ Abb. 10.30 Verlaufskurve des Technetiums

10.6 Radiopharmakologie

U. Blum

In der Routinediagnostik spielen insbesondere die $^{99m}\text{TcO}_4^-$ markierten Radiopharmaka eine große Rolle. Die Verwendung von ^{99m}Tc ist einfach. Entweder kann das Eluat sofort injiziert werden (z. B. Schilddrüsenuntersuchung) oder es wird mittels kommerziell erhältlicher Markierungsbestecke (Kits) überwiegend durch eine chemische Reduktion zu Komplexverbindungen verarbeitet.

Die Markierungsbestecke werden i. d. R. als Pulver in einer kleinen verschlossenen Glasphiole geliefert. Die Lagerung erfolgt nach Herstellerangabe. Sie bestehen in geringem Anteil aus einem Reduktionsmittel (Zinn[II]salze) sowie im Überschuss aus dem Komplexbildner (Chelatligand). Der Komplexbildner ist für die jeweilige Untersuchung entwickelt worden, z. B. die Phosphonatverbindungen für die Knochenszintigrafie. Die Liganden werden gefriergetrocknet (lyophilisiert) und in einer Schutzatmosphäre (Stickstoff oder Argon) verpackt. Alle Kits sind steril und pyrogenfrei.

Die radioaktive Markierung mit dem Eluat erfolgt nach Herstellerangabe. Häufig kann die Markierung bei Zimmertemperatur innerhalb weniger Minuten durchgeführt werden. Das dabei entstandene Radiopharmakon kann innerhalb der angegebenen Verfallszeit verwendet werden.

Schritte der Markierung

(hierbei muss die Sterilität des Kits und auch des fertigen Radiopharmakons gewährleistet bleiben)

1. Metallverschluss der Glasflasche entfernen, Membran desinfizieren
2. Glasflasche in eine geeignete Ummantelung einbringen
3. Aktivität aufziehen: Alter des Eluats, Menge und Volumen beachten
4. Sterile Injektion in die Glasflasche: **Ohne** Belüftungskanüle
5. Entlüften: Das eingebrachte Volumen muss als Luftvolumen aus der Schutzatmosphäre abgezogen werden, um einen Überdruck in der Glasflasche zu vermeiden.
6. Schwenken, ggf. weitere Maßnahmen nach Herstellerangabe
7. Inkubation nach Herstellerangabe
8. Sterile Entnahme der benötigten Patientendosis
9. Ggf. Lagerung nach Angabe, Verwerfen des Kits nach Erreichen der angegebenen Verfallszeit

10.7 Qualitätssicherungsmaßnahmen von Radiopharmaka

U. Blum

Radiopharmaka unterliegen verschiedenen Qualitätskriterien. Diese sind im europäischen Arzneimittelbuch (Ph. Eur.) und dem deutschen Arzneimittelgesetz festgeschrieben. Hierzu zählen:

- Radioisotopenreinheit,
- chemische Reinheit und Identität,
- radiochemische Reinheit,
- spezifische Aktivität,
- Stabilität,
- mikrobiologische Reinheit.

Die Qualitätskriterien müssen immer erfüllt werden. Hierbei unterscheidet sich z. T. die Verantwortung für die einzelnen Unterpunkte.

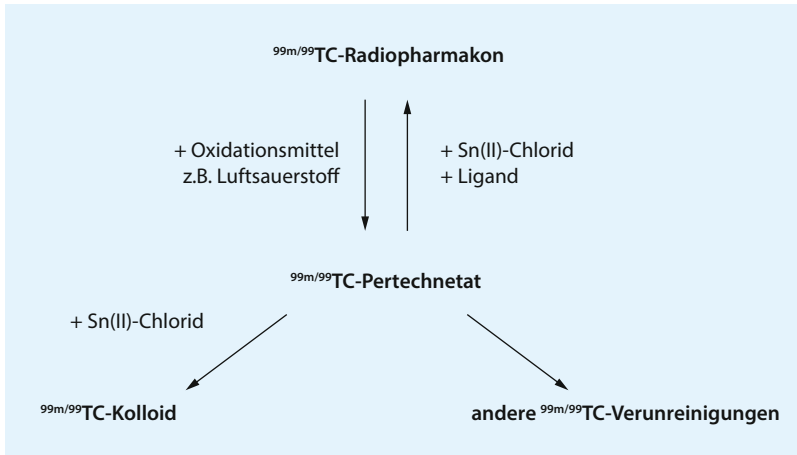


Abb. 10.31 Schematische Darstellung der Markierung eines Liganden mit ^{99m}Tc zu einem Radiopharmakon. (Mit freundlicher Genehmigung von FJ Gildehaus)

- Gebrauchsfertige Radiopharmaka:** Diese werden vom Anwender nicht verändert, sondern nur appliziert (z. B. Injektionslösungen, Kapseln). Die Qualitätssicherung obliegt hier allein dem Hersteller. Der Anwender sollte die Angaben auf dem gelieferten Produkt mit dem Begleitschein sowie die Aktivität überprüfen.
- Kitpräparationen.** Für die Inhaltsstoffe der Kits tragen die Hersteller die Verantwortung. Die Inhaltsstoffe sind garantiert steril und pyrogenfrei. Zudem erfolgen Kontrollen der Präparation mittels Mustergeneratoren und Musterkits.

In der jeweiligen Abteilung trägt der Hersteller, lt. Gesetz der Arzt, die Verantwortung für die Herstellung des Radiopharmakons und dessen Eigenschaften. Hierbei können während aller Präparationsschritte Fehler auftreten. Als Hauptstörfaktoren treten hierbei insbesondere freies pertechnetat und reduziertes Tc-Kolloid in Erscheinung. **Abbildung 10.31** zeigt die schematische Darstellung der Markierung mit ^{99m}Tc .

- Selbst hergestellte Radiopharmaka:** die gesamte Verantwortung liegt bei dem Hersteller. Diese Radiopharmaka sind z. B. selbst hergestellte Zyklotronprodukte oder radioaktiv markierte Patientenanteile (z. B. Thrombozyten, Erythrozyten).

10.7.1 Radioisotopenreinheit

- »** Das in Prozent ausgedrückte Verhältnis der Radioaktivität des Radioisotops, bezogen auf die Gesamtradioaktivität im radioaktiven Arzneimittel (Ph. Eur. 4. Ausgabe)

In der Praxis zählt hierzu die Prüfung des sog. Molybdän-Durchbruchs. Jeder $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ -Generator muss vor der ersten Anwendung getestet werden, um eine ggf. nicht sichtbare Leckage (z. B. durch einen Transportschaden) von ^{99}Mo in das Eluat auszuschließen.

Hierbei wird der Generator normal eluiert. Danach wird das Eluat ohne Abschirmung und mit einer entsprechenden allseitigen Bleiummantelung (6 mm Blei) im Aktivimeter im Technetium-Fenster gemessen. Durch die Bleiummantelung wird die niederenergetische Strahlung des ^{99m}Tc (141 keV) abgeschirmt, die des höher energetischen ^{99}Mo (739 keV) nur zu 65 %. Der Quotient Q muss < 0.04 % sein.

$$Q = \frac{\text{Eluatmessung mit Abschirmung (MBq)}}{\text{Eluatmessung ohne Abschirmung (MBq)}} \times 100$$

Aktivimeter

Das Aktivimeter, das früher auch Curiemeter genannt wurde, ist eine Messeinrichtung, die die Aktivität einer Messprobe anzeigt.

10.7.2 Chemische Reinheit

Chemische Reinheit

Hierunter versteht man den Anteil des gewünschten Stoffes im Gesamtstoffgemisch. In den Monographien über radioaktive Arzneimittel sind die Anforderungen an die chemische Reinheit durch Spezifizierung von Grenzwerten für die chemischen Verunreinigungen festgelegt.

Die chemische Reinheit muss vom Hersteller garantiert werden.

10.7.3 Radiochemische Reinheit

Radiochemische Reinheit

Das in Prozent ausgedrückte Verhältnis der Radioaktivität des Radionuklids in der gewünschten chemischen Form, bezogen auf die Gesamtradioaktivität des Radionuklids im radioaktiven Arzneimittel, wird als radiochemische Reinheit bezeichnet.

Die Hauptursachen für Verunreinigungen liegen in der **Präparation**. Neben einer nicht erwünschten Sauerstoffzufuhr (z. B. undichter Stopfen, Belüftungskanüle) kann auch eine zu hohe Radioaktivitätsmenge zu einer mangelhaften Markierungsausbeute führen (viel hilft nicht immer viel). Auch „alte“ Eluate oder das erste Eluat nach einer längeren Eluationspause (z. B. Wochenende, Feiertage) haben Einfluss auf die radiochemische Reinheit. Andere Ursachen einer Verunreinigung sind technisch bedingt, wie z. B. chemische Instabilitäten oder Autoradiolysen.

Zur Bestimmung der radiochemischen Reinheit werden die einzelnen Bestandteile chromatografisch aufgetrennt und gemessen. Eine andere Möglichkeit ist eine Festphasenextraktion in Kartuschenform.

SOP Papier- oder Dünnschichtchromatografie (mod. nach Gildehaus), Abb. 10.32

1. Feste Phase vorbereiten

- Feste Phase auswählen: Papier oder Glasfasergewebe mit Kieselgel
- Streifen von 8 * 1 bzw. 8 * 2 herstellen
- Startmarkierung mit Bleistift: ca. 1,5 cm vom unteren Rand entfernt
- Frontmarkierung: ca. 0,5 cm vom oberen Rand entfernt außerhalb des Probenfeldes: entweder wasserlöslicher oder wasserfester Stift, je nach Lösungsmittel

2. Mobile Phase vorbereiten

- In das Probengefäß das Lösungsmittel einfüllen, sodass ca. 3–5 mm des Bodens bedeckt sind. Bei organischen (nicht wässrigen) Lösungsmitteln Behälter abdecken und Gefäß schwenken.

3. Probe aufbringen (Abb. 10.32a)

- Kleine Probe (0,05–0,1 ml) als einzelnen, möglichst kleinen Tropfen auf die Platte aufbringen. Je nach Probe ggf. vorher mit Lösungsmittel anfeuchten, nicht unbedingt trocknen lassen.

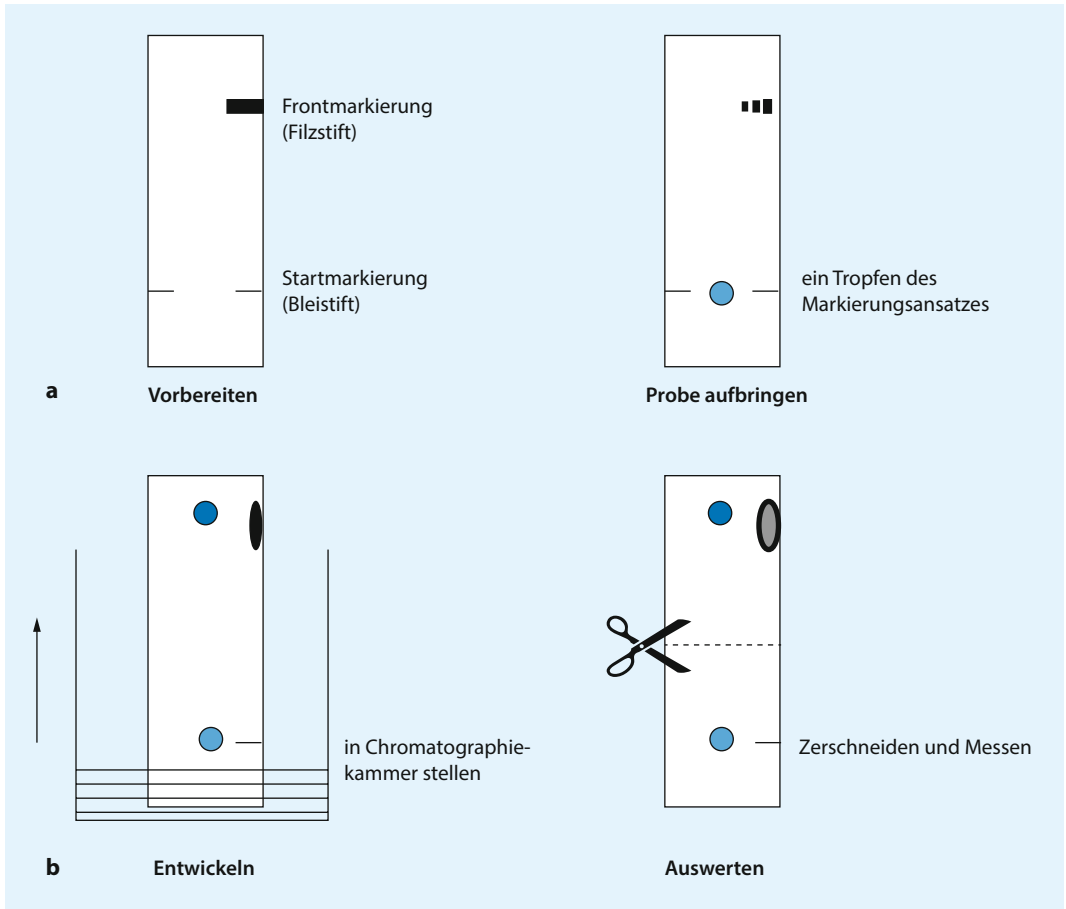
4. Entwicklung des Chromatogramms (Abb. 10.32b)

- Streifen in Lösungsmittel einhängen, wobei der Startpunkt oberhalb des Lösungsmittelspiegels liegt. Durch Kapillarkräfte steigt die Probe auf und wird in ihre Bestandteile getrennt. Wenn die Frontmarkierung bis zum oberen Rand des Teststreifens verläuft, wird der Streifen sofort aus der Kammer genommen und getrocknet.

5. Auswertung (Abb. 10.32b)

- Scanner: Gerätespezifische Auswertung mittels ROI. Hierbei müssen Start und Front klar markiert sein.
- Ionisationskammer: Streifen in der Mitte teilen und Proben messen, zudem Bestimmung der Hintergrundaktivität.

Je nach Radiopharmakon kann die Verunreinigung an der Front oder am Start liegen, z. T. müssen auch 2 Streifen ausgewertet werden.



■ **Abb. 10.32** a Aufbringen der Probe, b Entwicklung Auswertung in der Chromatographie. (Mit freundlicher Genehmigung von FJ Gildehaus)

■ Verunreinigung an der Front:

$$\frac{\text{Start}}{\text{Start} + \text{Front}} \times 100 = \% \text{ Reinheit}$$

■ Verunreinigung am Start

$$\frac{\text{Front}}{\text{Front} + \text{Start}} \times 100 = \% \text{ Reinheit}$$

■ Zwei Streifen

$$1 - \frac{\text{Front}}{\text{Front} + \text{Start}} - \frac{\text{Start}}{\text{Start} + \text{Front}} \times 100 = \% \text{ Reinheit}$$

■ Mögliche Fehler in der Qualitätskontrolle

■ Präparation und Probenentnahme

- noch nicht abgeschlossene Reaktion im Kit
- Sauerstoffzufuhr während der Präparation
- Sedimentation der Probenentnahme

■ Chromatografie

- Trocknen der Probe
- Verunreinigung der Probe oder des Streifens
- Auftragepunkt ragt in das Lösungsmittel
- Oxidation durch das Laufmittel
- Fettabdrücke auf dem Streifen (Fingerabdrücke)
- Chromatografiestreifen berührt die Wand des Gefäßes
- falsches Laufmittel
- Bewegung der Trennkammer

SOP Qualitätskontrolle mit Kartuschen (mod. n. Gildehaus)

1. **Kartusche vorbereiten:** Konditionieren der Kartusche mittels einem organischen Lösungsmittel (z. B. Ethanol), welche langsam in die Kartusche gedrückt wird, danach spülen mit Wasser
2. **Probe aufbringen:** 0,3 ml werden in einer 1 ml aus der Probe entnommen. Die Spritze wird ohne Nadel auf die Kartusche gesetzt, die Probe langsam in die Säule gedrückt.
3. **Elution:** Lösen der einzelnen Bestandteile mittels Eluation, beginnend mit einer wässrigen Lösung, danach weitere Eluationen mit unpolaren Lösungsmitteln durch Zugabe von z. B. Ethanol. Jede Eluation wird einzeln gesammelt.
4. **Auswertung in der Ionisationskammer:** Messung der einzelnen Probenröhrchen sowie Bestimmung der Restaktivität in der Kartusche

$$\frac{\text{Röhrchen mit Produkt}}{\text{Röhrchen mit Produkt} + \text{Röhrchen 1} + \text{Röhrchen 2} + \dots + \text{Kartusche}} \times 100$$

= % Reinheit

Je nach Kit und Abteilung können verschiedene Qualitätskontrollen durchgeführt werden. Alle verwendeten Kits müssen nach der Richtlinie im Strahlenschutz von 2011 überprüft werden. Die Ergebnisse sind zu dokumentieren.

10.7.4 Spezifische Aktivität

Die spezifische Aktivität ist charakteristisch für jedes Isotop und ergibt sich aus dem Maß aus dem Verhältnis der Aktivität zur Masse.

10.7.5 Stabilität

Die Stabilität des Radiopharmakons ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Insbesondere bei hochenergetischen therapeutischen Stoffen kann es

durch die Strahlung zu Veränderungen kommen, sodass diese Stoffe relativ zügig nach der Herstellung verbraucht werden müssen.

10.7.6 Mikrobiologische Reinheit

Jedes Radiopharmakon sollte nach Möglichkeit bakterienfrei sein. Aufgrund der teilweise nur kurzen Halbwertszeiten verschiedener Stoffe kann der genaue Status manchmal erst nach Abklingen der Radioaktivität erfolgen. Ein schneller Test, der sog. Limulus-Amoebocyten-Lysat-Test (LAL-Test), ist z. B. für das ^{18}F FDG vorgeschrieben. Hierbei wird die Probe mit dem Lysat zusammengeführt. Wenn sich Endotoxine in der Probe befinden, wird dieses mittels verschiedener Methoden sichtbar. Erst nach Erhalt des Ergebnisses darf die Injektionslösung zum Verbrauch frei gegeben werden. Die Freigabe ist durch den applizierenden Arzt zu prüfen.

10.8 Kontamination und Dekontaminationsmaßnahmen

U. Blum

Kontamination

Hierunter versteht man eine (ungewollte) Verunreinigung der Umgebung (einschl. der Luft), von Gegenständen oder Personen mit radioaktiven Stoffen.

Eine Kontamination ist nicht unbedingt direkt erkennbar, da Radioaktivität mit den Sinnen des Menschen nicht wahrgenommen werden kann. Der Umgang mit allen offenen radioaktiven Stoffen muss daher sehr sorgsam geschehen.

Kontaminationsgefahren bestehen in allen Arbeitsschritten, angefangen bei der Eluation des Generators, über Kit-Präparationen, Aufziehen der Patientendosis bis hin zur Applikation.

Auch der **Patient** ist eine **mögliche Kontaminationsquelle**. Hierzu zählen insbesondere eine fehlerhafte Inhalation radioaktiver Substanzen (z. B. Lungenventilationsuntersuchung), eine unkontrollierte Ausscheidung der Substanzen bei

verschiedenen Inkontinenzkrankungen mit ggf. Kontamination von Gegenständen (Stühle, Toilette, Türklinken) sowie aufgrund von Kontakt mit allen Ausscheidungen des Patienten (z. B. Urin, Stuhl, Speichel, Mageninhalt, Blut).

Kontaminationskontrollen müssen im Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen an jedem Arbeitsplatz mindestens einmal pro Tag erfolgen, bei einem Kontaminationsverdacht sofort. Die entsprechenden Ergebnisse sind zu protokollieren.

Bei Verlassen des Kontrollbereiches hat das Personal eine **Kontaminationskontrolle** durchzuführen, hier z. B. mittels eines Hand-Fuß-Kleidermonitors (■ Abb. 10.10) oder Handmonitors in der Personalschleuse. Die Messergebnisse sind zu protokollieren.

Auch Gegenstände, die den Kontrollbereich verlassen (z. B. Putzutensilien, Abfall, Rollstuhl), müssen überprüft werden; die Ergebnisse sind zu protokollieren.

Dekontamination

Hierunter versteht man die Entfernung von (gefährlichen) Verunreinigungen, hier den radioaktiven Stoffen.

Das vorrangige Ziel ist das Herabsetzen der Strahlenwirkung auf den Körper; weitere Ziele sind die Vermeidung der Verbreitung einer Kontamination und eine Verhinderung der Inkorporation.

Kontamination: Was ist zu tun?

- Sperren des Kontaminationsbereiches
- Kontaktieren einer weiteren Person. Falls dieses nicht möglich ist, deutliche Kennzeichnung des Kontaminationsbereiches, Verschleppung vermeiden
- Bei möglicher Personenkontamination: möglichst rasche Dekontamination
- Kontaminierte Arbeitskleidung ohne weitere Kontamination anderer Bereiche entfernen
- Möglichst genaue Lokalisation kontaminierter Hautareale
- Mehrfache trockene Dekontamination der Haut mittels Klebefolie, dieses führt zu einer Entfernung von > 90 % der Aktivität

- Waschen mit viel lauwarmem Wasser und Dekontaminationsmittel, mit Einmalhandtüchern trocknen
- Erfolgskontrolle mittels Monitor, bei weiterhin nachweisbarer Kontamination → erneut gründlich waschen unter Verwendung einer weichen Bürste
- **Mangelnder Dekontaminationserfolg:** Wiederholung aller Punkte. Betragen der Effekt < 10 % und die Kontamination < 10 Bq/cm² kann auf weitere Maßnahmen verzichtet werden. Ansonsten muss der Strahlenschutzbeauftragte weitere Maßnahmen einleiten.
- **Spezielle, situationsangepasste Maßnahmen:** z. B. Haare waschen; Augen- und Mundspülung, bei Hautverletzung ggf. Wundnahe venöse Stauung und Wundspülung
- Erst nach einem Ausschluss einer Personenkontamination sollte sich der **Fläche** zugewandt werden:
 - Bestimmung von Ort und Ausdehnung der Kontamination von Flächen und Gegenständen: Jede Dekontamination sollte das Kontaminationsrisiko und Inkorporationsrisiko des Personals nicht steigern, daher ist entsprechende Schutzkleidung Pflicht.
 - Aufnehmen von Flüssigkeiten mit saugfähigem Material von außen nach innen
 - Ggf. nass wischen (von außen nach innen)
 - Ggf. weitere, physikalische Maßnahmen (Schaben, Schleifen, Bürsten)
 - Nicht entfernbare Kontaminationen werden abgedeckt (Klebefolie) und gekennzeichnet.
 - Bei Kontamination von Arbeitsgeräten mit kurzlebigen Stoffen Abklingzeit abwarten (im Abklingraum, gekennzeichnet)
- Aufklärung der Kontaminationsursache
- Dokumentation der Kontamination

10.9 Allgemeine Qualitätskriterien laut Leitlinien

U. Blum

Die Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin hat verschiedene Leitlinien veröffentlicht, darunter u. a. auch die SOP für Heißlabore in der Nuklearmedizin.

Rechtliche Grundlagen sind dabei u. a. die Strahlenschutzverordnung, die Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin, das Arzneimittelgesetz, das Medizinproduktegesetz sowie das Gefahrgutbeförderungsgesetz. Zudem kommen Leitlinien sowie verschiedene DIN (Deutsches Institut für Normung)-Normen zur Anwendung.

Die baulichen Voraussetzungen einer nuklearmedizinischen Abteilung sind komplex. Die entsprechenden Auflagen werden vom zuständigen Amt überprüft. Erst nach Freigabe der Abteilung durch die Behörde kann der Betrieb aufgenommen werden.

Jede nuklearmedizinische Abteilung bzw. Praxis besitzt einen **Kontrollbereich**. Dieser wird von der jeweils zuständigen Behörde festgelegt. Der Zugang zum Kontrollbereich ist z. B. für nicht medizinisches Personal (z. B. Patient, Reinigungskraft, Techniker, Handwerker) eingeschränkt. Wenn diese den Kontrollbereich betreten müssen, ist die Anwesenheit eines Strahlenschutzbeauftragten erforderlich. Befugte Personen dürfen den Kontrollbereich betreten, hierbei sind jedoch die Aufenthalte entsprechend den gesetzlichen Vorgaben zu regeln. Die effektive Personendosis muss dabei kontrolliert werden.

Befugte Personen müssen die entsprechende **Fach- und Sachkunde** besitzen. Für MTRA gilt die Fachkunde mit der erfolgreichen Abschlussprüfung als erbracht. Befugte Personen werden im Umgang mit den radioaktiven Stoffen vor Aufnahme der Tätigkeit eingewiesen, zudem erfolgen jährliche Belehrungen durch den Strahlenschutzbeauftragten. Alle 5 Jahre ist zudem ein **Strahlenschutzkurs** zur Aktualisierung der Kenntnisse vorgeschrieben.

Für das Heißlabor, die Untersuchungen, die vorhandenen Geräte und die Qualitätskontrollen werden in den jeweiligen Abteilungen und Praxen Arbeitsanweisungen verfasst. Hierbei sind die einzelnen Arbeitsschritte unter Beachtung aller geltenden Richtlinien, Gesetze und Normen auszuarbeiten.

Jede Bestellung und der Eingang der Radioaktivität, ggf. auch der Ausgang, muss dokumentiert werden. Die Unterlagen müssen über 10 Jahre nachvollziehbar sein.

Der fach- und sachkundige Arzt stellt die rechtfertigende Indikation einer Untersuchung oder Therapie. Es gilt das **ALARA-Prinzip** („as low as reasonably achievable“), um die Strahlenexposition des Patienten und aller Beteiligten möglichst niedrig zu halten. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat eine Tabelle der diagnostischen Referenzwerte (DRW) für häufige und dosisintensive Untersuchungen veröffentlicht. Die angegebenen DRW sollten nur in Ausnahmefällen überschritten werden, die Begründung für eine Überschreitung ist zu dokumentieren.

In Kürze

- Die Nuklearmedizin stellt ein anspruchsvolles und abwechslungsreiches Handlungsfeld für MTRA dar. Neben den klassischen diagnostischen Verfahren an einer Gammakamera hat in den letzten Jahren die Bedeutung von Hybridgeräten (PET-CT, PET-MRT) zugenommen.
- Auch im Bereich der nuklearmedizinischen Therapie bestehen viele Anwendungsmöglichkeiten mit unterschiedlichen Nukliden.
- Die Detektion der Strahlung und die technischen Möglichkeiten der Bilddarstellung sind u. a. abhängig von dem jeweils verwendeten Radionuklid.
- Durch die Verwendung offener radioaktiver Stoffe gelten in der Nuklearmedizin strenge Regeln und gesetzliche Vorgaben zur Qualitätssicherung und zum Strahlenschutz, von welchen die Tätigkeiten der MTRA maßgeblich beeinflusst werden.
- Die Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin veröffentlicht und überarbeitet regelmäßig verschiedene Leitlinien, in denen nuklearmedizinische Methoden unter Berücksichtigung des Strahlenschutzes (ALARA-Prinzip) festgeschrieben sind.

Literatur

- Ärzttekammer Nordrhein, Ärztliche Stelle Nuklearmedizin und Strahlentherapie,
DIN 6855-2:2013-01, Konstanzprüfung nuklearmedizinischer Messsysteme - Teil 2: Einkristall-Gamma-Kameras zur planaren Szintigraphie und zur Einzel-Photonen-Emissions-Tomographie mithilfe rotierender Messköpfe
- Elser H (2003) Leitfaden Nuklearmedizin. Steinkopff Verlag, Darmstadt
- Gildehaus FJ. Kleiner Ratgeber Nuklearmedizin, Qualitätssicherung im Nuklearmedizinischen Labor. Bundesamt für Strahlenschutz, (www.bfs.de)
- Goretzki G (2004) Medizinische Strahlenkunde. Urban Schwarzenberg Verlag, München
- Hermann HJ (2004) Nuklearmedizin. Urban Schwarzenberg Verlag, München
- Kuwert T et al. Nuklearmedizin. 4. Auflage. Thieme-Verlag, 2008 ISBN-978-3-13-118504-4
- Nicoletti R, Oberladstätter M, König F (2005) Messtechnik und Instrumentierung in der Nuklearmedizin facultas
- Pharmacopoea Europaea, 4. Ausgabe
- Rödel R et al (2003) Effizienz von Spritzenabschirmungen bei Radionuklidanwendung zur Radiosynoviorthese, online 27.4.14
- Schicha H et al. Nuklearmedizin. 7. Auflage. Schattauer Verlag, 2013, ISBN-978-3-7945-2889-9
- SOP für Heißlabore in der Nuklearmedizin, Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin, www.nuklearmedizin.de
www.covidien.co

MTRA im Gesundheitswesen

Kapitel 11 Stellenwert der MTRA im Gesundheitswesen – 315

T. Hartmann, M. Kahl-Scholz, Ch. Nowarra, C. Vockelmann

Stellenwert der MTRA im Gesundheitswesen

T. Hartmann, M. Kahl-Scholz, Ch. Nowarra, C. Vockelmann

11.1	Organisation des Gesundheitswesens in Deutschland – 316
11.2	Finanzierungsmöglichkeiten einer Radiologie – 317
11.2.1	Ambulanter Sektor – 317
11.2.2	Stationärer Sektor – 318
11.3	Arbeiten im interdisziplinären Team – 319
11.4	Entstehung von Gesundheit und Krankheit – 322
11.4.1	Das innere Milieu – 322
11.4.2	Grundbegriffe der Krankheitslehre – 323
11.4.3	Krankheitsursachen – 324
11.4.4	Wachstum und Wachstumsstörungen – 325
11.5	Hygienemaßnahmen – 327
11.5.1	Übertragungswege von Infektionskrankheiten – 328
11.5.2	Krankenhausinfektionen – 328
11.5.3	Verfahren zur Desinfektion – 329
11.5.4	Umsetzung von Hygienestandards für MTRA – 330
11.6	Steriles Arbeiten – 336
11.6.1	Verpackung von Sterilgut – 337
11.6.2	Lagerung von Sterilgut – 337
11.6.3	Umgang mit Sterilgut – 337
11.6.4	Vorbereitung von Injektionen und Infusionen – 338
11.6.5	Steriles Ankleiden – 338
11.7	Der Patient im Krankenhaus – 340
11.8	Gesund bleiben im MTRA-Beruf – 344
11.8.1	Belastungen im MTRA-Beruf – 344
11.8.2	Hautschutz – 345
11.8.3	Rückengerechtes Arbeiten – 346
11.8.4	Stressbewältigung – 346
	Literatur – 348

Lisa ist MTRA-Schülerin im 3. Ausbildungsjahr. Abgesehen von der beginnenden Prüfungsvorbereitung hat sie momentan noch ganz andere Dinge im Kopf: Die Bewerbungen stehen an, und sie muss entscheiden, wo und für wen sie später arbeiten möchte.

Der Stellenmarkt lässt ihr momentan jede Menge Freiheiten: Von Radiologiepraxen über kleinere Krankenhäuser in malerisch-ländlichen Regionen bis hin zu großen Unikliniken – alle suchen MTRA.

Ihre praktische Ausbildung hat Lisa sowohl in einer großen Klinik als auch in einer kleinen Praxis absolviert. Gefühlt stand in der Praxis das Geld verdienen an erster Stelle. Das Team war klein und übersichtlich: MTRA, Radiologen, medizinische Fachangestellte und Schreibkräfte. Gearbeitet wurde schnell und effizient. Oft hörte Lisa Dinge wie „Das machen wir jetzt nicht, das kann nicht abgerechnet werden.“

In der Klinik gestaltete sich der Arbeitsalltag etwas anders. Neben den Mitarbeitern in der Radiologischen Abteilung musste sich Lisa noch mit Mitarbeitern des Transportdienstes, Pflegekräften, Ärzten anderer Abteilungen und vielen Menschen mehr auseinandersetzen. Dazu kam, dass die Patienten, im Gegensatz zur Praxis, schwerer erkrankt waren, und jede Menge Notfälle „reingeschoben“ werden mussten. Da spielte die Abrechnung keine so große Rolle. Wenn man z. B. in der Angio einen Katheter mehr brauchte, ging man an den Materialschränk und nahm sich einen. Und es machte auch keiner einen Aufstand, wenn etwas unsteril wurde. Man nahm einfach etwas Neues.

„Das Arbeiten in der Klinik ist abwechslungsreicher, für mich aber auch viel anstrengender. Jeder hat etwas zu sagen und macht Vorschriften. Allein die eine Pflegekraft neulich, die mich auf Station angepöfeln hat, weil ich einen Kittel in einem Isolierzimmer nicht an der richtigen Stelle abgelegt hatte. Dann noch die Nachtdienste. Das hätte ich in einer Praxis nicht, ganz abgesehen von den Feiertagen. Dafür sehe ich die Patienten in der Klinik manchmal wieder und bekomme mit, wie sie wieder gesund werden. In der Praxis fühle ich mich stärker wie in einer Durchlaufstation. Patient kommt, wird geröntgt und ist wieder weg.“

Ich weiß einfach nicht, wie ich mich entscheiden soll. Warum ist das alles so unterschiedlich, obwohl doch die Arbeit die gleiche ist?“ klagt sie in einem Gespräch ihrer besten Freundin Janine.

„Dafür hast du einen Job im Gesundheitswesen. Ich habe neulich erst irgendwo gelesen, dass das eine

wirtschaftliche Wachstumsbranche ist. Ich weiß gar nicht, warum da immer so gejammert wird. Das Personal bekommt, im Vergleich zu Frisören, doch ein gutes Gehalt.“

Und selbst wenn du irgendwo anfängst, und es dir nicht gefällt, kannst du wieder wechseln. Einen Job bekommst du immer.“ hält Lisas Freundin dagegen. „Fang doch erst mal in der Klinik an und wenn du in ein paar Jahren keine Lust mehr auf Dienste hast und dein Rücken das Heben nicht mehr mitmacht, dann wechselst du in eine kleine Praxis.“

„So viel Kohle gibt es in den Krankenhäusern schon lange nicht mehr.“ erwidert Lisa, „Die müssen auch sparen. Früher hatten die mehr MTRA in der Abteilung.“

„Du Arme“, witzelt Janine, „jetzt hast du die Qual der Wahl zwischen mehreren Stellen statt zwischen den Sachbearbeitern bei der Agentur für Arbeit.“

11.1 Organisation des Gesundheitswesens in Deutschland

C. Vockelmann

Das Gesundheitssystem in Deutschland ist zweigeteilt in einen **ambulanten** und einen **stationären** Sektor, die relativ isoliert voneinander arbeiten. Beide Sektoren sind hauptsächlich privatwirtschaftlich geführt, abgesehen von staatlichen Krankenhäusern. Zum Gesundheitssystem gehören neben den **Empfängern von Leistungen**, also den **Patienten**, die verschiedenen **Leistungserbringer**. Dazu gehören Ärzte, Pflegepersonal, MTRA, Apotheker, Physiotherapeuten etc. Als **Leistungszahler** treten die Kostenträger, also **Krankenversicherungen, Pflege- und Unfallversicherungen** sowie **Beihilfestellen** ein. Letztlich finanzieren aber natürlich der Versicherte und der Arbeitgeber das Gesundheitssystem.

Seit 1972 werden die Krankenhäuser in Deutschland nach dem System der **dualen Finanzierung** finanziert. Das bedeutet, dass die Krankenhäuser zum einen durch die erbrachten Leistungen an ihren Patienten Geld von den Krankenkassen einnehmen, zum anderen Geld pauschal für das Vorhalten der Planbetten und Sonderfinanzierungen z. B. bei Neubauten oder Großgeräteanschaffungen vom Bundesland erhalten. Dieser zweite Teil

der Finanzierung ist in den letzten Jahren aufgrund der schlechten Finanzsituation der Bundesländer jedoch deutlich zurückgefahren worden.

Sowohl im ambulanten als auch im stationären Sektor sind die Leistungen der gesetzlich Versicherten sozusagen gedeckelt. Ein Krankenhaus verhandelt jährlich mit den gesetzlichen Krankenkassen ein **Jahresbudget** für eine bestimmte Leistungsmenge. Überschreitet das Krankenhaus diese Leistungsmenge, implantiert also z. B. statt bei 100 Patienten bei 200 eine Hüftgelenksprothese, werden die über die Vereinbarung hinaus geleisteten Fälle nicht mehr voll vergütet, das Krankenhaus muss Abschlüsse in Kauf nehmen. Erst im Folgejahr kann dann über Mehrleistungen neu verhandelt werden, damit das Haus ein höheres Jahresbudget erhält.

Eine ähnliche Regelung gibt es im ambulanten Bereich. Auch hier gibt es Abschlüsse bei der Vergütung einer Leistung, wenn mehr Leistungen erbracht werden, als im Vergleichsquartal des Vorjahres.

Einen neuen Ansatz in der Versorgung der Bevölkerung stellt das Konzept **der integrierten Versorgung** dar. Hierbei schließen sich Krankenkassen, Patienten, Ärzte und Krankenhäuser z. B. einer Region zusammen. Die Krankenkassen stellen diesem Netzwerk einen Betrag für jeden teilnehmenden Patienten zur Verfügung, das Netzwerk versorgt mit diesem Betrag seine Mitglieder. Vorteil ist, dass auch gesundheitsfördernde Maßnahmen übernommen werden können (z. B. Rauchentwöhnung). Eine Gefahr stellt aber ein „sehr teurer“ Patient, z. B. mit einer Bluterkrankheit dar, der dann durch die zur Verfügung stehende Pauschale nicht mehr adäquat behandelt werden kann. Ein Beispiel für eine Art der integrierten Versorgung stellt die **Knappschaft** dar, die als Besonderheit **zeitgleich Krankenkasse und Träger von Krankenhäusern und Rehakliniken** ist. Hierdurch ergeben sich deutlich bessere Steuerungsmöglichkeiten für den Hauptakteur im Netzwerk.

11.2 Finanzierungsmöglichkeiten einer Radiologie

C. Vockelmann

Die Einnahmen einer Radiologie, vergleichbar auch einer Strahlentherapie oder einer Nuklearmedizin,

unterscheiden sich im ambulanten und stationären Sektor elementar voneinander. Für beide Sektoren im Gesundheitswesen gilt aber genauso wie in der eigenen Haushaltskasse: Nur langfristig schwarze Zahlen sichern das eigene Überleben.

11.2.1 Ambulanter Sektor

Einnahmen im ambulanten Bereich können aus **drei Töpfen** generiert werden. Spielen wir einmal die drei Fälle durch:

Privat und gesetzlich versicherte Patienten

■ Gesetzlich krankenversicherte Patienten

Max Mustermann hat Rückenschmerzen und geht zu seinem Orthopäden. Dieser schlägt eine Röntgenaufnahme der Lendenwirbelsäule, kurz LWS, vor und schickt Herrn Mustermann mit einem gelbem Überweisungsschein in Ihre Praxis zu Dr. Leucht.

Hier wird der Patient zunächst in der Praxissoftware erfasst, indem Sie die Versichertenkarte einlesen. Nachdem Sie die notwendigen Informationen zu der Untersuchung mit Dr. Leucht abgesprochen haben, fertigen Sie die Röntgenaufnahme an. Sie dokumentieren in der Praxissoftware die Untersuchung Röntgen LWS in 2 Ebenen und erfassen die zugehörigen Dosisflächenprodukte.

Wissen Sie noch, was das Dosisflächenprodukt ist?

Anschließend schicken Sie den Patienten zu Dr. Leucht, der den Befund mit dem Patienten bespricht. Bevor Sie den Patienten entlassen, geben Sie ihm noch eine CD mit, der Befund wird im Laufe der nächsten Tage von Dr. Leucht zu dem Orthopäden gefaxt. Für Sie ist der Job damit erledigt, aber noch hat die Praxis kein Geld verdient.

Dazu muss Dr. Leucht, unterstützt von Ihrer Chef-MTRA, am Quartalsende die KV-Abrechnung erstellen. Was heißt aber jetzt eigentlich Quartalsende? Für die Abrechnung ist das Jahr in 4 Teile aufgeteilt. Die Abrechnung ist jeweils am 31.03., 30.06., 30.09. und 31.12. fällig. Mit KV wird die kassenärztliche Vereinigung abgekürzt bezeichnet. Diese verteilt das Honorar an alle niedergelassenen Ärzte, die gesetzlich versicherte Patienten behandelt und einen sogenannten KV-Sitz haben. Ein KV-Sitz

bedeutet, dass man eine Abrechnung gegenüber der KV erstellen darf. Die Honorarverteilung wird jedes Jahr neu verhandelt. Dabei wird nicht ausgehandelt, dass ein Röntgen LWS in 2 Ebenen 10 € kostet, sondern 0,3 Punkte wert ist. Vergleichbar ist das mit der neuen Internetwährung Bit-Coin, von der Sie vielleicht schon gehört haben. Wie viel Geld man nun tatsächlich für die Röntgenaufnahme der LWS bekommt, hängt davon ab, wie viel Leistungen von allen niedergelassenen Ärzten in einem KV-Bereich erbracht worden sind. Die KV bekommt das Geld, das sie verteilt, von den Krankenkassen der gesetzlich Versicherten. Und die Krankenkasse bekommt das Geld von den Versicherten.

- **Und wie viel bekommt Ihre Praxis jetzt für die Röntgenaufnahme der LWS?**
Ungefähr 20 €

■ **Privatversicherte Patienten**

Prof. von Schlau hat immer wieder Kopfschmerzen. Sein Neurologe überlegt, ob es von Veränderungen der Halswirbelsäule (HWS) kommt. Sicherheitshalber möchte er aber auch einen Tumor im Kopf mit einem MRT ausschließen. Daher schreibt er dem Patienten ein Privatrezept, auf dem er Dr. Leucht mitteilt, was er vermutet und welche Untersuchungen er vorschlägt. Die Sprechstundenhilfe ruft bei Ihnen an, um einen Termin für den Patienten auszumachen. Am Untersuchungstag röntgen Sie die HWS in 2 Ebenen und bringen den Patienten dann zum Kernspintomographen zur Untersuchung. Als alle Untersuchungen fertig sind, spricht Dr. Leucht mit Prof. von Schlau, sie brennen die Untersuchungen auf eine CD und dokumentieren die Leistungen in der Praxissoftware.

Am Abend, nachdem alle Befunde fertig sind, setzt sich Dr. Leucht noch hin und überprüft Ihre Eingaben bei dem Patienten. Da der Patient gehbehindert war, setzt er einen Steigerungsfaktor ein und gibt diese Informationen an eine Abrechnungsfirma weiter. Diese schreibt dem Patienten eine Rechnung über die Beratung und Befundbesprechung, die Röntgenuntersuchung und das MRT nach GOÄ, der Gebührenordnung für Ärzte. Prof. von Schlau war sehr zufrieden mit der Behandlung in der Praxis, überweist das Geld direkt nach Erhalt der Rechnung an Dr. Leucht und reicht die Rechnung an seine

Krankenkasse weiter. Diese überprüft die Rechnung und erstattet dann Prof. von Schlau die Kosten.

- **Und wie viel bekommt Ihre Praxis jetzt für die Röntgenaufnahme der HWS?**
Ungefähr 50 €

■ **IGEL**

IGEL steht für **individuelle Gesundheitsleistung**. Die gesetzlichen Krankenkassen haben einen bestimmten Leistungskatalog, in dem alle Untersuchungen und Maßnahmen aufgelistet sind, die einem Versicherten zustehen. Wenn eine Untersuchung geplant ist, die in diesem Katalog nicht enthalten ist, kann der Patient eine Anfrage bei der Krankenkasse stellen, ob die Kosten übernommen werden. Beispiel für eine solche Untersuchung ist eine PET-CT-Untersuchung bei einem Lymphom. Bei anderen Untersuchungsverfahren kann der Patient die Kosten selbst übernehmen. Beim Hausarzt kann das der große jährliche Gesundheitscheck mit EKG und Blutuntersuchungen sein. Beim Radiologen ist z. B. eine periradikuläre Therapie zur Behandlung eines Bandscheibenvorfalles eine solche Leistung. In diesen Fällen schließen Patient und Arzt vor der Untersuchung einen Vertrag über die Behandlung und die Kosten, die der Patient dann selbst übernimmt.

11.2.2 Stationärer Sektor

Auch im Krankenhaus erfolgt die Vergütung der durchgeführten Maßnahmen unterschiedlich für GKV und PKV-versicherte Patienten. Gemeinsam ist beiden Versicherungsgruppen, dass die Vergütung über die sog. DRG abgebildet wird. Eine **DRG (diagnosis related group)** setzt sich zusammen aus Diagnose und Therapie. Dabei wird in operative und konservative Gruppen unterschieden. Zu der DRG wird noch eine Bewertung der Schwere des Falls vorgenommen. Resultierend aus dieser Eingruppierung wird für den Fall eine Pauschale überwiesen. Dabei ist für den Betrag nicht entscheidend, welche Mittel eingesetzt werden. Eine Appendizitis bei einem 20-jährigen jungen Mann wird immer mit dem gleichen Betrag vergütet. Dabei ist es egal, ob eine oder fünf Blutentnahmen durchgeführt

wurden, und ob eine Computertomographie vor der Operation zur Diagnosesicherung erforderlich war. Auch wie lange ein Patient im Krankenhaus gelegen hat, ist nur sehr begrenzt wichtig für den Rechnungsbetrag. Die Rechnung kann nicht für jeden Verweildauertag im Krankenhaus erhöht werden. Andererseits können die Krankenkassen die Rechnung sogar kürzen, wenn an einem Tag keine Untersuchungen oder Maßnahmen bei dem Patienten durchgeführt wurden.

Wie viel von diesem Betrag der radiologischen Abteilung gutgeschrieben wird, ist nicht einheitlich geregelt. Es gibt Krankenhäuser, bei denen eine interne Verrechnung durchgeführt und der anfordernden Abteilung eine Art Rechnung geschrieben wird. In anderen Häusern wird die Leistung der radiologischen Abteilung nach GOÄ-Ziffern bemessen, d. h. die Leistung wird ähnlich wie die von Privatpatienten dokumentiert. Wenn die radiologische Abteilung Interventionen, z. B. eine Angiographie, durchführt, kann auch hieraus die DRG für den Patienten entstehen, sodass die Radiologie für die abzurechnende DRG und damit die Rechnungshöhe gegenüber der Krankenkasse verantwortlich ist.

Bei privatversicherten Patienten werden zusätzlich, ähnlich wie im ambulanten Bereich, die durchgeführten Maßnahmen und Untersuchungen in Rechnung gestellt. Der Rechnungsbetrag für die Maßnahmen, also z. B. der Röntgen-Thorax, wird um 25 % gekürzt als Ausgleich für die bereits in der DRG enthaltenen Kostenrechnung.

11.3 Arbeiten im interdisziplinären Team

T. Hartmann

Lisa berichtet ihrer Freundin, dass sie im Rahmen der praktischen Ausbildung in Teams gearbeitet hat, in denen nicht nur MTRA, sondern auch Ärzte, Medizinische Fachangestellte (MFA), Pflegekräfte und viele mehr gearbeitet haben.

In solchen Arbeitsbereichen, in denen mehrere Berufsgruppen auf ein gleiches Ziel hinarbeiten, spricht man von einer **Arbeitsgruppe** oder einem **interdisziplinären Team**.

So eine Arbeitsgruppe zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Es sind mehrere Personen beteiligt (MTRA, Ärzte, MFA, Pflegekräfte etc.).
- Die Personen arbeiten über einen längeren Zeitraum zusammen (Dauer des Arbeitsverhältnisses).
- Innerhalb der Gruppe werden unterschiedliche Rollen bzw. berufliche Aufgaben wahrgenommen (unterschiedliche Berufe und Hierarchiestufen).
- Alle Mitarbeiter des Teams haben gemeinsame, übergeordnete Normen und Werte (die Gesundheit der Patienten).
- Die Mitarbeiter sind durch ein „Wir-Gefühl“ miteinander verbunden (arbeiten in der gleichen Praxis/im gleichen Krankenhaus o. ä.).

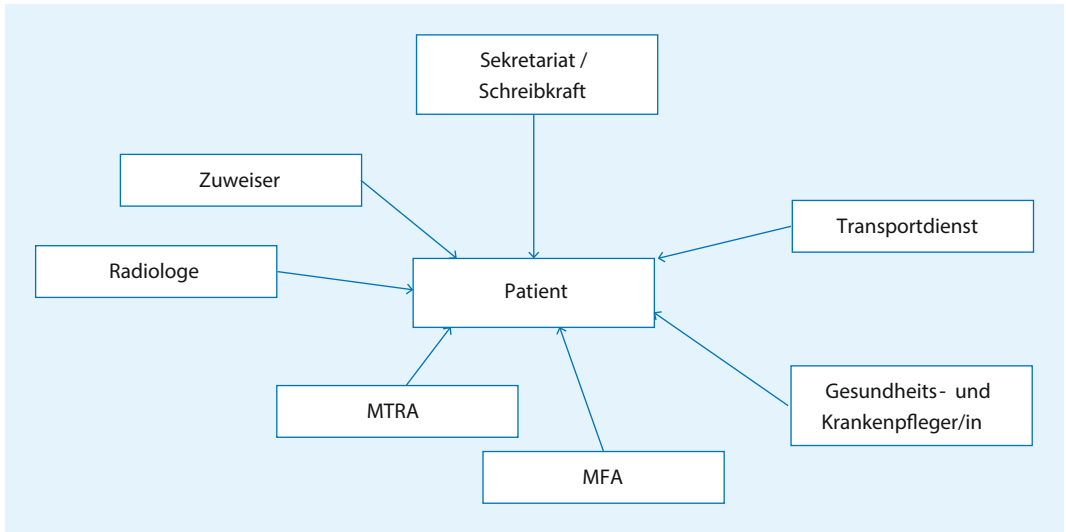
Im Gesundheitswesen findet man auch den Begriff „multidisziplinäres Team“. Dieses wird definiert als Betreuungsteam für einen Patienten, in dem mehrere spezialisierte Berufsgruppen zusammen, an einem gemeinsamen Ziel arbeiten. Für den Patienten steht im besten Fall die Genesung als Ziel im Mittelpunkt aller Bemühungen. Dieses Ziel sollte auch Teil des „Wir-Gefühls“ eines Teams sein.

■ Wie sehen solche Teams in der Arbeitswelt der MTRA aus?

In der Praxis, in der Lisa gearbeitet hat, bestand das Team aus MTRA, Ärzten, MFA und Schreibkräften. Welche spezialisierten Arbeitsaufgaben nimmt die jeweilige Berufsgruppe ein?

Am besten wird das durch ein Beispiel deutlich: Herr Meier wird von seinem Hausarzt zum CT geschickt. Pünktlich um 08.00 Uhr erscheint er zu seiner Untersuchung. An der Anmeldung der Röntgenpraxis sitzt eine Medizinische Fachangestellte (bis 2006 Arzthelferin). Entsprechend ihrer Ausbildung ist sie für die Koordination der Untersuchungsabläufe in der Praxis, Überprüfung der Vollständigkeit der Untersuchungsunterlagen von Herrn Meier und am Ende für die Abrechnung der Untersuchung mit den Krankenkassen zuständig.

Darüber hinaus hat sie in ihrer Ausbildung gelernt, wie man eine Venenverweilkanüle legt, ggf. Verbände macht usw. Eine MFA mit „Röntgen-



■ Abb. 11.1 Behandlungsteam der Patientenversorgung

schein“ (Kenntnisse im Strahlenschutz) kann, unter der ständigen Aufsicht eines Arztes, Röntgenaufnahmen anfertigen.

Im Anschluss wird Herr Meier von einem Radiologen oder einer Radiologin über die Untersuchung und die eventuelle Kontrastmittelgabe aufgeklärt und zur nächsten Station geschickt – die eigentliche Untersuchung.

Jetzt kommen die MTRA. Entsprechend der gesetzlichen Vorbehaltstätigkeiten führen sie die Untersuchung selbstständig durch und beurteilen deren Qualität hinsichtlich der Befundbarkeit. Ihre Expertise liegt besonders im Bereich der Gerätebedienung.

Dann kommt wieder der Radiologe, der den Befund erstellt. Wenn keine automatische Spracherkennung installiert ist, muss noch jemand den Befund schreiben und schriftlich an den überweisenden Arzt übermitteln. Es sind also viele Personen an der Untersuchung von Herrn Meier beteiligt.

Natürlich gehören zum Behandlungsteam noch viel mehr Personen, z. B. der Hausarzt, ein weiterbehandelnder Facharzt, eventuell noch ein Physiotherapeut o. ä. Das Team ist also ungleich größer als das kleine Praxisteam (■ Abb. 11.1).

Und genau darin liegt die Herausforderung in einem Krankenhaus. Dort sind die verschiedenen Professionen nicht räumlich voneinander getrennt. Der überweisende Facharzt einer Station ist nicht

selten direkt in der Abteilung, um einen Befund mit dem Radiologen zu besprechen. Auf Station begegnet man den Pflegekräften, welche die Patienten betreuen und sich mit den Rahmenbedingungen auf Station auskennen und so weiter.

Solche Teamkonstellationen bergen Risiken und Nebenwirkungen.

Laut Definition ist ein Team eine „aktive Gruppe von Menschen, die sich auf gemeinsame Ziele verpflichtet haben, harmonisch zusammen arbeiten, Freude an der Arbeit haben und hervorragende Leistung erbringen.“ (Francis & Young, 2006).

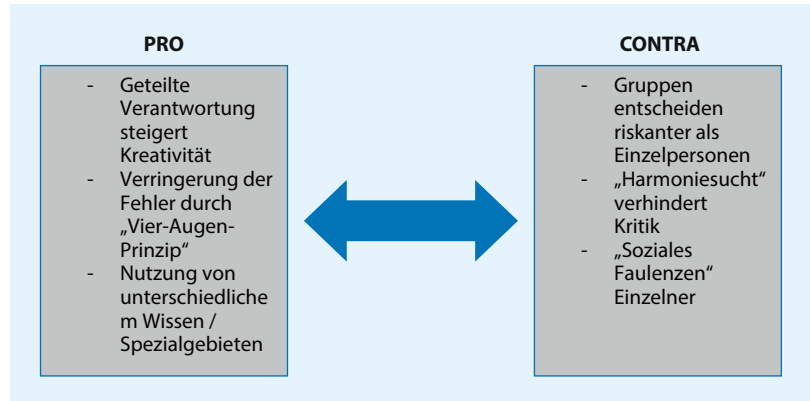
Eine saloppe Definition drückt aber auch das Gegenteil aus: „**TEAM** = **T**oll **E**in **A**nderer **M**achts“. Ein sicher bekanntes Phänomen.

■ Warum macht überhaupt ein interdisziplinäres und multiprofessionelles Team Sinn?

Es sind viele Personen notwendig, um den Untersuchungs- und Genesungsprozess von z. B. Herrn Meier erfolgreich zu gestalten. Jeder kann etwas besonders gut und führt diese Tätigkeit dann aus. Natürlich gibt es auch Aufgaben, die Vertreter von unterschiedlichen Berufsgruppen durchführen könnten.

Ein weiterer Vorteil der Teamarbeit ist das „Vier-Augen-Prinzip“ zum Wohle des Patienten. So werden z. B. Laborwerte von mehreren Mitar-

■ **Abb. 11.2** Vor- und Nachteile von Teamarbeit



beitern überprüft. Und noch ein Vorteil ist nicht zu unterschätzen: Wo viele Menschen mit unterschiedlichen Ausbildungen und Fähigkeiten miteinander arbeiten, ist auch viel unterschiedliches Wissen vorhanden. Es existiert also eine große Vielfalt an Kompetenzen, Fertigkeiten und Sichtweisen: Darüber hinaus hat ein Team eine Funktion als „Stresspuffer“, denn „geteiltes Leid ist halbes Leid.“. Man kann sich austauschen, gemeinsam die Verantwortung tragen und an Lösungen arbeiten.

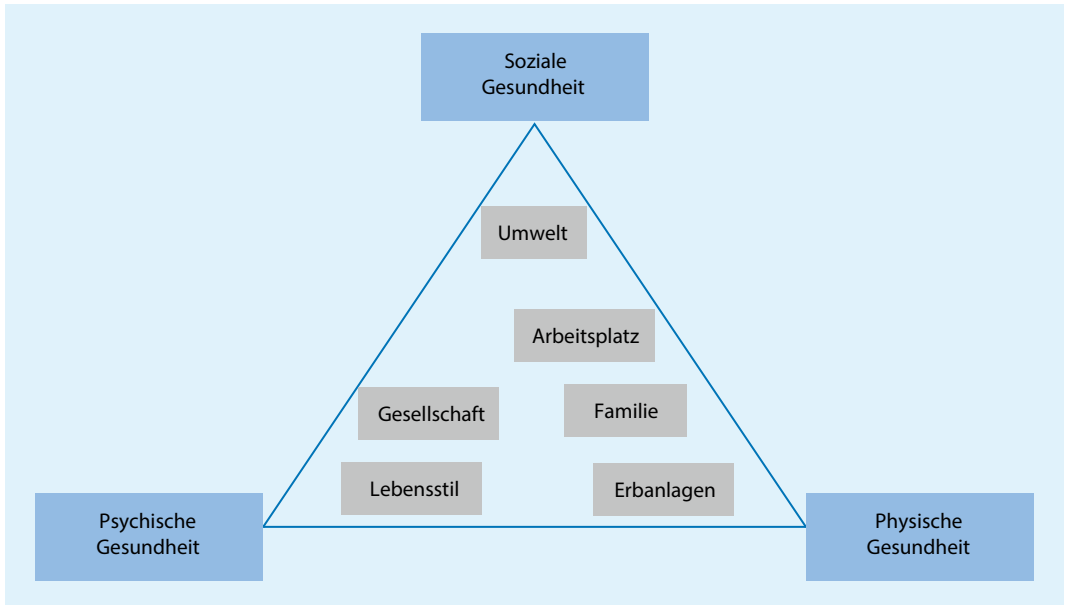
Innerhalb einer Klinik hat die Teamarbeit aber auch ihre Tücken (■ Abb. 11.2). So gilt es als ein Grundproblem, dass an dem Behandlungsprozess eines Patienten mehrere Personen beteiligt sind, die über unterschiedliche Kompetenzen verfügen und mit verschiedenen Machtbefugnissen ausgestattet sind. Wer hat eigentlich wem etwas zu sagen? Oder wer hat die endgültige Entscheidung über den Schritt „XY“ zu treffen? Das allein führt schon zu einem großen Konfliktpotenzial.

Um dem zu begegnen, hilft reden, reden, reden. Es müssen klare Befugnisse und Kompetenzen definiert sein. Jedes Teammitglied benötigt einen Gestaltungsspielraum im Rahmen seiner Fähigkeiten und Befugnisse. Empathie für die Situation des Gegenübers zu entwickeln kann auch nicht schaden. Vielleicht hat die Krankenschwester, die Lisa „angepöffen“ hat, gerade die Nachricht bekommen, dass sich die Infektion über das Isolierzimmer hinaus ausgebreitet hat, und sie muss Stellung dazu nehmen, wie das passieren konnte. Oder sie hat von Lisa erwartet, dass diese ohne Anweisung „von allein“ sehen sollte, wo der Kettel zu entsorgen ist und

reagiert nun enttäuscht – unabhängig davon, dass Lisa die Gepflogenheiten auf der Station gar nicht kennen kann.

➤ Was die Teamarbeit erschwert oder sogar zum Scheitern bringen kann:

- Änderung der Teamzusammensetzung so oft wie möglich – das bringt Unsicherheit, da niemand niemanden richtig kennt.
- Ziele und Funktionen des Teams sollten möglichst nebulös formuliert werden. So verhindert man, dass alle an einem Strang ziehen.
- Die räumliche und sachliche Ausstattung des Arbeitsplatzes sollte auf das Minimum reduziert sein. So ärgern sich die Teammitglieder über den fehlenden Bleistift und arbeiten weniger.
- Innerhalb des Teams sollten möglichst viele unterschiedliche Erwartungen aneinander gestellt werden. Dann weiß keiner, was der andere von ihm möchte, und es bleibt Raum für Enttäuschungen.
- Es sollte nicht verraten werden, wer was kann und wer welche Funktion einnimmt. Damit werden Hierarchien vermieden, und es bleibt bis zum Schluss eine Überraschung, wer denn jetzt den „Hut auf hat“. Außerdem kommt man wegen Zuständigkeitsgerangel immer wieder schnell ins Gespräch miteinander.
- Jeder sollte sich möglichst nur ganz auf sich selbst konzentrieren und verlassen.



■ Abb. 11.3 „Gesundheitspyramide“

11.4 Entstehung von Gesundheit und Krankheit

T. Hartmann

Lisas Freundin Janine ist der Meinung, dass die Jobs im Gesundheitswesen sicher sind, da es immer Kranke geben wird. Damit stellt sich die Frage, warum das so ist bzw. wie Gesundheit und Krankheit überhaupt entstehen.

Die Weltgesundheitsorganisation WHO definiert Gesundheit als Zustand des völligen körperlichen, seelischen und sozialen Wohlbefindens. Entsprechend dieser Definition klingt Gesundheit nach einer sehr erstrebenswerten, aber nicht erreichbaren Situation. Wer bezeichnet sich als krank, nur weil er eine Brille trägt? Was ist mit den sichtbaren Narben nach Stürzen oder kleinen Schnitten, die man im Verlauf des Lebens bekommt? Und wer kann von sich sagen, dass er absolut stress- und sorgenfrei ist? Wer Beschwerden hat, ist noch lange nicht als krank im Sinne der WHO-Definition zu bezeichnen.

11.4.1 Das innere Milieu

Das Modell der Homöostase (Gleichgewicht des inneren Milieus) ist besser geeignet, um die Begriffe Gesundheit und Krankheit voneinander abzugrenzen.

Unter **Homöostase** versteht man lt. Ferdinand Hoff (dt. Internist, 1896–1988) das Gleichgewicht zwischen Bau und Funktion des Organismus und dem seelischen Erleben. Seiner Ansicht nach ist das die Voraussetzung für die volle Leistungsfähigkeit und damit auch für die Lebensfreude und ein Gesundheitsgefühl.

Nach dem Verständnis der WHO ist die Aufrechterhaltung des Inneren Milieus von drei Eckpfeilern abhängig, in dessen Spannungsfeld die Gesundheit aufrechterhalten wird (■ Abb. 11.3).

Innerhalb des Spannungsfeldes existieren wiederum Faktoren, welche die Gesundheit maßgeblich beeinflussen.

Das Gleichgewicht wird erhalten, indem die Bestandteile des Körpers in allen Bereichen ständigen Auf- und Abbauprozessen unterliegen und durch **Anpassungsmechanismen** aufrechterhalten werden.

In den Bereich der Anpassungsmechanismen gehören z. B. das Immunsystem, welches dem Körper

durch die Produktion von Antikörpern eine Reaktion auf Erreger ermöglicht, die Anpassung der Herzleistung an körperliche Arbeit oder die Aufrechterhaltung der Körpertemperatur – indem man zu der Lösung gelangt, sich einen Pullover anzuziehen.

Zusätzlich zu diesen physiologischen, messbaren Größen müssen sich auch psycho-physiologische Faktoren im Gleichgewicht befinden, z. B. ein ausgeglichener Schlaf-Wach-Rhythmus oder eine harmonische Beziehung zu seinen Mitmenschen.

Störungen der Auf- und Abbauprozesse sowie fehlende Anpassungsmechanismen führen zu Erkrankungen. Aus physiologischer Sicht kann ein unkontrollierter Aufbau von Körperstrukturen zu einer Hypertrophie oder Hyperplasie und im schlimmsten Fall zu einer Tumorerkrankung führen. Ein gesteigerter Abbau (Atrophie) führt zu Gewebeabnahme und damit einer Leistungsminderung der betroffenen Organe.

Im Bereich der physischen Gesundheit kann z. B. eine fehlende Anpassung an eine traumatische Erfahrung (Verlust eines Angehörigen) zu psychischen Erkrankungen wie Depressionen führen.

Fehlt die Anpassung an sich verändernde Lebensumstände, z. B. Verlust der Arbeitsstelle, kann auch das krankheitsauslösend sein.

Sind die Anpassungsmechanismen eines Organismus nicht nur vorübergehend gestört (z. B. bei einer Erkältung), sondern dauerhaft, spricht man von einer **Krankheitsdisposition** (Veranlagung). Manche Bevölkerungsgruppen sind von Natur aus für bestimmte Erkrankungen anfälliger als andere. So bekommen Männer häufiger Gicht als Frauen (= Geschlechterdisposition) oder Frauen über 50 Jahre erkranken häufiger an einem Mammakarzinom als jüngere (= Altersdisposition).

Zusätzlich wird noch zwischen ererbten und erworbenen Krankheitsdispositionen unterschieden. So kann man durch fehlende sportliche Betätigung eine Disposition für Diabetes erwerben.

11.4.2 Grundbegriffe der Krankheitslehre

Grundsätzlich wird, in Bezug auf die Entstehung von Krankheiten, zwischen der Pathogenese und der Ätiologie unterschieden.

Unter Ätiologie versteht man die Lehre von den Krankheitsursachen, z. B. dem Tabakkonsum als Ursache für Lungentumore.

Die **Pathogenese** ist die Lehre von der Entwicklung von Krankheiten, bezieht sich also direkt auf die Mechanismen im Organismus, die zu einer Erkrankung führen.

Um eine Krankheit behandeln zu können, müssen Art und Ursachen der Erkrankung bekannt sein. Es wird die medizinische Vorgeschichte des Patienten, die **Anamnese** benötigt. Gibt der Patient selbst Auskunft, spricht man von der Eigenanamnese. Wenn Angehörige oder Begleitpersonen Fragen beantworten müssen, nennt man das Fremdanamnese.

Zusätzlich zur Anamnese wird der Patient nach seinen **Symptomen**, also den Krankheitszeichen befragt bzw. daraufhin untersucht. Dabei wird zwischen objektiven und subjektiven Symptomen unterschieden. Zu den objektiven Symptomen zählt man alle Krankheitszeichen, die durch Untersuchungsmethoden (z. B. CT-Bilder, Laborwerte) festgestellt werden können. Subjektive Symptome werden vom Patienten angegeben, sind jedoch nicht immer nachweisbar, z. B. Schmerzen.

Darüber hinaus wird noch zwischen Allgemeinsymptomen und Kardinalsymptomen unterschieden. Allgemeine Symptome sind unspezifisch und weisen noch nicht auf eine genaue Erkrankung hin. So kann man sich im Anfangsstadium einer Erkältung abgeschlagen und krank fühlen, auch wenn die Nase noch nicht läuft. Erst das Kardinalsymptom der Schleimbildung in der Nase mit allen dazugehörigen Beschwerden bestätigt die Erkältung.

➤ **Häufig auftretende Allgemeinsymptome**
Schmerz (Dolor) = unangenehmes Sinnes- und Gefühlserlebnis, welches mit einer Gewbeschädigung verbunden ist; die Stärke des Schmerzes ist ein Maßstab für das Ausmaß des Schadens; bei manchen Erkrankungen (Tumore) kann das Symptom zunächst ganz fehlen.

Fieber (Febris, Pyrexia) = erhöhte Körpertemperatur durch Sollwertverschiebung innerhalb der Temperaturregulation; Fieber wird durch Pyrogene (Polypeptide) ausgelöst, die von außen (z. B. Bakterien) oder/und endogen eine Temperaturerhöhung auslösen.

Leistungsschwäche = kann langsam oder plötzlich auftreten; die Ursache können nicht nur in physischen, sondern auch psychischen Störungen liegen.

Gewichtsveränderungen = Sowohl die Gewichtszu- als auch -abnahme kann ein Hinweis auf Erkrankungen sein – Zunahme z. B. bei hormonell bedingten Erkrankungen, Abnahme bei Tumoren.

Schlafstörungen = Die Ursachen sind vielfältig, z. B. hormonelle Erkrankung, Schmerzen, Genussmittel, psychische Problematiken, Stress.

Schwindel = Gefühl einer Gleichgewichtsstörung, z. B. als Folge einer Kreislaufstörung, einer psychogenen Störung etc.

Erst mit allen Informationen kann eine zuverlässige **Diagnose** gestellt werden, auf deren Grundlage die **Therapie** begonnen wird.

In vielen Fällen kann schon vor Beginn einer Therapie bzw. deren Wirksamkeit der Verlauf einer Erkrankung auf der Grundlage statistischer Daten vorhergesagt werden. Diese Voraussage wird als **Prognose** bezeichnet. Prognostische Angaben können Krankheitsdauer, Überlebenschancen oder das Ausmaß einer langfristigen Schädigung betreffen.

Oftmals hängt die Prognose auch von der Wahrscheinlichkeit verschiedener Komplikationen ab. Unter einer Komplikation versteht man Zweit- oder Folgeerkrankungen, die mit der Grunderkrankung in einem zeitlichen oder ursächlichen Zusammenhang stehen, z. B. die Entstehung eines Dekubitus (Druckgeschwüre) durch lange Bettlägerigkeit.

11.4.3 Krankheitsursachen

Krankheiten entstehen durch Bedrohungen der Gesundheit von zwei Seiten her: von außen drohen physikalische (Kälte, Hitze), chemische (Gifte), mikrobiologische oder soziale Faktoren. Aber auch der Körper selbst kann von innen durch Erbkrankheiten, Dispositionen oder einfach das Altern Krankheiten begünstigen. Neuere Erkenntnisse weisen darauf hin, dass mehrere Aspekte (äußere wie innere) zusammenwirken müssen, damit eine Krankheit entsteht. Existiert z. B. eine genetische

Disposition, Darmkrebs zu entwickeln, kann dies durch eine entsprechend ungesunde Lebensweise begünstigt werden.

Äußere Krankheitsursachen

Diese Krankheitsursachen sind in erster Linie von den Einflüssen der Umwelt abhängig, wobei die folgenden Schlüsselprobleme zentrale Rollen spielen:

Psychische Krankheitsursachen beziehen sich auf fehlende Anpassungsmechanismen für „seelische Verletzungen“, wie Trennungen oder Konflikte im privaten Bereich. Aber auch wer ständig widersprechenden Anforderungen ausgesetzt ist (z. B. von Familie und Arbeitgeber) oder die Rahmenbedingungen seines Lebens nicht akzeptieren kann (z. B. eigene Leistungsgrenzen) wird bei langfristigem Bestehen solcher Konflikte erkranken. Hierbei gibt es allerdings, wie generell bei der Entstehung von Krankheit, sehr individuelle Grenzen: Was den einen krank macht, bewirkt bei dem nächsten noch lange nichts. Man spricht hier auch im Zusammenhang mit der psychischen Gesundheit von der sog. **Resilienz**.

Wenn die Gesellschaft, in der man lebt, krank macht, z. B. Arbeitslosigkeit zu Armut, Hunger und Krankheit führt, spricht man von **sozialen Krankheitsursachen**.

Ebenso hat die **moderne Zivilisation Auswirkungen auf die Gesundheit**. So steigt die Schadstoffbelastung in der Luft oder dem Boden und damit den Nahrungsmitteln oder schlicht dem Wasser, das aus der Leitung kommt. Hinzu kommen Belastungen durch Baustoffe in geschlossenen Räumen und viele weitere Faktoren. Mit diesen Aspekten der gesundheitlichen Belastungen beschäftigt sich das Gebiet der Umweltmedizin bzw. Umwelthygiene.

Auch **Nahrungsmittel** können zu den Krankheitsursachen zählen, da sie zunehmend mit Fremdstoffen belastet sind. Darüber hinaus spielt die Ausgewogenheit der Ernährung eine wichtige Rolle bei der Gesunderhaltung bzw. im Umkehrschluss bei der Entstehung von Krankheiten wie Adipositas oder Diabetes und unterschiedlichen Krebsformen.

Infektionskrankheiten nehmen in den Industrieländern zwar nicht mehr die zentrale Rolle ein wie in den vergangenen Jahrhunderten. Trotzdem sind **Mikroorganismen** ein nicht zu unterschätzender Quell der Krankheitsentstehung bis hin zum kanzerogen Potential (z. B. sind Infektionen mit be-

stimmten Typen des HPV-Virus mit der Entstehung von Gebärmutterhalskrebs assoziiert). Anders als früher stehen auch multiresistente Erreger im Fokus, für die es keine Antibiotika gibt oder Viren, bei denen Antibiotika nicht helfen.

➤ **Medikamente sind Fluch und Segen zugleich. Sie können unter Umständen zu schwerwiegenden Erkrankungen führen, z. B. Contergan®, welches in der 1960er Jahren zu Fehlbildungen an den Extremitäten führte, obwohl es als unbedenklich während der Schwangerschaft verabreicht wurde. Auch Schmerzmedikamente können nicht nur heilen bzw. lindern, sondern zu Magengeschwüren o.ä. führen.**

Innere Krankheitsursachen

Die inneren Krankheitsursachen werden in zwei Kategorien unterteilt:

- Abweichungen im Erbmaterial
- Altersveränderungen

Beide greifen oft ineinander und führen so nicht nur zu genetisch bedingten Erkrankungen (z. B. Trisomie 21), sondern z. B. zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen, wenn es z. B. genetisch bedingt zu einer frühzeitigen Gefäßalterung kommt.

Da diese für MTRA eine eher untergeordnete Rolle spielen, werden diese Krankheitsursachen hier nicht näher beleuchtet. Für MTRA sind die Folgeerkrankungen diagnostisch bedeutsam. Allerdings würden diese, alle aufgezählt und erläutert, den Rahmen sprengen.

11.4.4 Wachstum und Wachstumsstörungen

Wachstumsvorgänge gehören zu den grundlegenden Merkmalen von Organismen. Sie dienen der Ausbildung und Aufrechterhaltung der Organe und Gewebe. Gesteuert werden Wachstumsvorgänge durch die Eiweißsynthese sowie die Duplikation der DNA während der Zellteilung. Wachstumsvorgänge werden durch die Bedürfnisse des Organismus bestimmt und erfolgen, biologisch reguliert, nur bis zu einer bestimmten Organgröße.

Unreguliertes Wachstum, zu welchem auch die Geschwülste gehören, ist ein pathologischer Vorgang.

Es werden drei Arten von Zellen mit bestimmten Wachstumsmustern unterschieden:

1. Zellen mit **intermitotischem Wachstum**. Diese behalten lebenslang ihre Teilungsfähigkeit, z. B. Hautzellen, Blutzellen.
2. Zellen mit **reversiblen postmitotischem Wachstum**. Diese Zellart erlangt bei Bedarf ihre Teilungsfähigkeit zurück und kann so Reparationsvorgänge in Gang setzen, z. B. Leber- und Nierenzellen.
3. Zellen mit einem **fixierten postmitotischen Wachstum**. Sie sind nicht mehr teilungsfähig wie z. B. Herz- oder Skelettmuskelzellen. Kommt es hier zu einem Defekt, kann dieser nicht mehr vollständig repariert werden, und es kommt zur Narbenbildung mit unspezifischem Bindegewebe.

Zellen mit einer hohen Teilungsfähigkeit sind häufiger von Tumoren betroffen. Die meisten Tumore gehen von stark teilungsfähigen Zellen aus, z. B. dem Epithelgewebe, welches Organstrukturen umgibt.

Wachstum als Anpassungsreaktion

Werden an Organe höhere Stoffwechselanforderungen gestellt, wachsen sie entweder in Form der Hypertrophie oder Hyperplasie.

Unter **Hypertrophie** versteht man die Organvergrößerung durch die Vergrößerung der nicht mehr teilungsfähigen Zellen, z. B. am Herzen oder der Skelettmuskulatur. Aus diesem Grund haben Leistungssportler größere Muskeln.

Dieser Vorgang kann auch pathologisch sein, wenn der Körper sich z. B. an Erkrankungen anpasst. So übernimmt nach einer Nierentransplantation die Niere der Gegenseite alle Aufgaben und wächst hypertrophisch.

Bei der **Hyperplasie** kommt es durch eine verstärkte Zellteilung (bei Zellen, die dazu fähig sind) und damit einer höheren Zellzahl zur Vergrößerung des Organs. Ein typisches Beispiel dafür ist die Vergrößerung der Schilddrüse bei Iodmangel. Die Zellen der Schilddrüse „denken“, dass sie nur mehr arbeiten müssen, um mehr Hormone herstellen zu können.

Wachstum zum Wiederersatz

Im Organismus findet ein ständiger Um-, Ab- und Aufbau von Zellen statt. Viele Zellen gehen täglich verloren (z. B. Hautzellen) und werden ersetzt.

Diesen Vorgang bezeichnet man als **Regeneration**.

Regeneration

Regeneration ist die Fähigkeit des Organismus, abgestorbene, verlorene und funktionsuntüchtige Zellen zu ersetzen.

Die Regenerationsfähigkeit ist unter anderem abhängig von der Größe eines Zellverlustes, dem Alter des Organismus, dem Ernährungsstatus des Organes und der Blutversorgung. Aus diesem Grund heilen Knochenbrüche bei Kindern auch schneller als bei Erwachsenen – der Organismus eines Kindes ist auf Wachstum ausgerichtet und stellt daher eine bessere Blutversorgung und Ernährung zur Verfügung.

Zu den Grundvorgängen der Regeneration gehören die Proliferation (Wachstum und Vermehrung der Zellen), die Hypertrophie und die Differenzierung (z. B. undifferenzierte Stammzellen spezialisieren sich).

Pathologische Regenerationsvorgänge entstehen, wenn die Zellen sich nicht physiologisch teilen können und führen zu atypischen Zellen, bei denen die Regulation des Wachstums gestört ist. So entstehen z. B. Geschwüre im Magen oder Polypen im Darm.

Geschwülste

Unter **Geschwülsten** versteht man Begriffe wie „Tumor“, „Gewächse“ oder „Neoplasien“. Die Lehre von den Geschwülsten wird als Onkologie bezeichnet.

Geschwülste

Geschwülste sind Wachstumsexzesse körpereigener Gewebe, bei denen sich die Zellen parasitär zum Organismus verhalten. Sie sind örtlich begrenzt, irreversibel und autonom, unterliegen also keinen Regulationsvorgängen. Die Fähigkeit der Zellen zur Entartung bezeichnet man als Onkogenese

Geschwülste werden allgemein nach ihrem Ursprungsgewebe bezeichnet, in dem man die Endung „-om“ anhängt.

So heißen z. B. Knochengeschwülste „Osteom“ abgeleitet von der Bezeichnung für Knochenzellen (Osteon) und der Endung „-om“

Im Verlauf der Diagnostik werden Geschwülste dann differenziert und entsprechend bezeichnet.

Die Unterscheidung der Geschwülste erfolgt nach folgenden Kriterien:

1. nach dem Ursprungsgewebe,
2. nach der Dignität (biologisches Verhalten), welche wiederum nach benigne (gutartig) und maligne (bösartig) unterscheidet.

Wodurch sich maligne Geschwülste von benignen unterscheiden, ist in Kurzform in der folgenden Tabelle dargestellt (■ Tab. 11.1):

Maligne Geschwülste, die von Epithelgeweben ausgehen, bezeichnet man als Karzinome („karzino“ = Krebs). Als Sarkome („sarx“ = Fleisch) werden maligne Geschwülste bezeichnet, die vom mesenchymalen Gewebe (Bindegewebe, Knochen, Muskeln) ausgehen.

Die Entstehung von Geschwülsten kann unterschiedliche Ursachen haben. Bei 75 % aller menschlichen Tumorerkrankungen gelten Umweltfaktoren als Ursache. Stoffe oder Reize, die eine Tumorerkrankung auslösen können, werden als **Kanzerogene**, die stufenweise Entstehung eines Tumors im Organismus als **Kanzerogenese** bezeichnet.

Man fasst die Ursachen in verschiedene Gruppen zusammen. Kanzerogene können, müssen aber nicht krebsauslösend sein. Das ist abhängig von vielen individuellen Faktoren des Organismus.

Allen Ursachen gemein ist, dass sie zunächst zu einer Aktivierung von Regulationsvorgängen führen können, die sich im weiteren Verlauf der Kontrolle des Organismus entziehen, auch wenn der ursprüngliche Auslöser nicht mehr vorhanden ist.

■ Exogene Ursachen

- Physikalische Reize, z. B. ionisierende Strahlung, Sonneneinstrahlung, Rauch, Asbestfasern in der Lunge
- Chemische Reize, z. B. Zusatzstoffe in Zigaretten oder Lebensmitteln, Farbstoffe
- Viren, z. B. Herpesviren (Epstein-Barr-Virus)

■ **Tab. 11.1** Unterscheidungskriterien zwischen maligner und benigner Geschwüre

Kriterium	Maligne	Benigne
Begrenzung zum umliegenden Gewebe	Unscharf, infiltrierend (in die Umgebung wachsend)	Scharf, verdrängende Wachstum ohne Einbruch in Nachbargewebe
Gefäßinfiltration (Einwachsen in Blut- und Lymphgefäße)	Ja	Nein
Wachstumsgeschwindigkeit	Relativ schnell	Langsamer
Metastatisierung (Tochtergeschwülste in anderen Organen)	Ja	Nein

■ **Endogene Ursachen**

- Vererbung der (genetische) Bereitschaft, an einem Tumor zu erkranken

In diesem Zusammenhang sorgte die Brustamputation von Angelina Jolie 2013 für viel Aufmerksamkeit. Sie ließ sich die Brüste „vorsorglich“ entfernen, da bei ihr eine (genetische) Bereitschaft an Brustkrebs zu erkranken genetisch festgestellt wurde.

■ **Metastasierung**

Was genau heißt es nun, wenn ein Tumor „metastasiert“? „Metastasis“ bedeutet „Wanderung, Auswanderung“, und genau das trifft auf einige Tumorzellen zu: Sie lösen sich von ihrem Ursprungstumor und begeben sich im Körper auf Wanderschaft. Dies geschieht entweder über die Lymphbahnen (lymphogen) oder das Blut (hämatogen). Den meisten Tumoren kann dabei ein bestimmtes Metastasierungsmuster zugeordnet werden (Verlaufsrichtung des venösen/arteriellen/lymphatischen Versorgungsgebietes des Karzinoms). Erfolgt die Metastasierung lymphogen, können sich Metastasen in den Lymphknoten bilden, daher ist es wichtig, die regionären Lymphknotenstationen in der Umgebung des befallenen Organs oder Gewebes zu kennen und mit zu untersuchen. Manche Karzinommetastasen (z. B. von Mammakarzinomen) siedeln sich im Knochenmark an und können dort zu Knochenabbau (Osteolyse) und dadurch bedingt sogar zu Frakturen führen.

11.5 Hygienemaßnahmen

Ch. Nowarra

Im Januar 2013 sorgte der Gesundheitsbericht der Krankenkasse AOK für viel Presse. Nach Angaben der Krankenkasse sorgten Krankenhausinfektionen in 5–10 % der Fälle zu einem sog. unerwünschten Ereignis, wie Entzündungen von Operationswunden.

Etwa 4 % der unerwünschten Ereignisse sei auf Krankenhausinfektionen zurückzuführen.

Das Bundesministerium für Gesundheit (BMG) beziffert die jährliche Erkrankungsrate an nosokomialen Infektionen (Erkrankungen, die im Zusammenhang mit einer stationären oder ambulanten Behandlung erworben wurden) auf 400.000 bis 600.000 Patienten.

Ein Grund für diese Infektionen sind u. a. die fehlende Händedesinfektion und Umsetzung der hygienischen Maßnahmen. Auf allen Oberflächen siedeln Bakterien oder Krankheitserreger. So sind z. B. mehr als 1000 Bakterien/cm² Haut zu finden. Vor allem die Hand ist dabei nicht nur Träger, sondern häufig auch Überträger von Bakterien oder anderen Erregern (■ [Abb. 11.4](#)). In der Presse ist von bis zu 40.000 Toten jährlich durch mangelnde Hygiene in deutschen Krankenhäusern zu lesen (Das BMG geht von 7500 bis 15.000 Toten pro Jahr aus).

Medizinische Einrichtungen sind nach dem Infektionsschutzgesetz verpflichtet, Hygienemaßnahmen umzusetzen und so die Patienten vor nosokomialen Infektionen zu schützen. Darüber hinaus haben die Betreiber medizinischer Einrichtungen nach der Biostoffverordnung auch ihre Mitarbeiter



■ **Abb. 11.4** Ein Abdruck der Hand in der Petrischale mit Anzucht mehrere Bakterienkolonien. (Mit freundlicher Genehmigung des Robert-Koch-Institutes)

beim Umgang mit Krankheitserregern (Biostoffen) vor Infektionen zu schützen.

Unabhängig davon sollte es jedem Mitarbeiter im Gesundheitswesen eine ethische Verpflichtung sein, die Gefahr von Infektionen für die Patienten und sich selbst so gering wie möglich zu halten. Das Robert Koch-Institut bezeichnet das als „Eine Frage des Respekts“.

Das Robert Koch-Institut (RKI) ist das Bundesinstitut für Infektionskrankheiten und nicht übertragbare Krankheiten. Das RKI ist ein Überwachungs- und Forschungsinstitut, welches direkt dem Bundesministerium für Gesundheit unterstellt ist und aktuelle Hygienerichtlinien und -empfehlungen herausgibt.

Es ist anzunehmen, dass besonders stark frequentierte Abteilungen in einem Krankenhaus nicht unwesentlich zur Vermeidung oder Entstehung von Krankenhausinfektionen beitragen können. Schließlich unterziehen sich an einem CT-Arbeitsplatz ca. bis zu 50 Patienten an einem Wochentag einer Untersuchung. Die Patienten haben unterschiedliche Erkrankungen, Infektionen oder einen geminderten Immunstatus. Hinzu kommen Hygienegefährdungen, die das Personal oder Besucher von der Straße mit in das Krankenhaus bringen. Aus diesem Grund spielt die Umsetzung hygienischer

Maßnahmen in diagnostischen Abteilungen eine zentrale Rolle.

11.5.1 Übertragungswege von Infektionskrankheiten

Infektionskrankheiten können direkt oder indirekt übertragen werden. Zu den **direkten Übertragungswegen** gehören:

- Schmierinfektionen (fäkal-oral, bes. bei Kindern)
- Tröpfcheninfektion
- Geschlechtsverkehr
- Hautkontakt
- während der Schwangerschaft oder der Geburt.

Zu den indirekten Übertragungswegen zählt man (exemplarisch):

- Lebensmittel
- Trinkwasser
- Übertragung durch Gegenstände oder Flüssigkeiten
- Übertragung durch den Menschen (im Krankenhaus durch das medizinische Personal).

Im Krankenhausalltag spielen besonders die Infektionswege über das medizinische Personal und über Gegenstände oder Flüssigkeiten eine Rolle.

11.5.2 Krankenhausinfektionen

Zu den am meisten gefürchteten Infektionen gehören nosokomiale (im Krankenhaus erworbene) Infektionen mit **MRSA (Methicillin-resistenter *Staphylococcus aureus***, auch „Multi-resistenter“ *Staphylococcus aureus*). Gegen dieses Bakterium sind die meisten Antibiotika unwirksam. MRSA treten besonders an Stellen auf, an denen viele Antibiotika zum Einsatz kommen – also in medizinischen Einrichtungen.

Der *Staphylococcus aureus* ist ein kugelförmiges Bakterium, das fast überall in der Natur vorkommt. Bei schätzungsweise einem Viertel aller Menschen besiedelt das Bakterium die oberen Atemwege ohne eine Erkrankung auszulösen. Kann sich das Bakterium im Körper einnisten, kommt es zunächst zu

Hauterkrankungen (Karbunkel, Furunkel). In ungünstigen Fällen, bei immungeschwächten Personen, kann die Besiedlung mit dem Bakterium zu lebensbedrohlichen Erkrankungen wie Lungenentzündungen, Endokarditis oder zu einer Sepsis führen.

MRSA sind zudem gegen nahezu alle bekannten Antibiotika immun, d. h. eine Behandlung ist sehr schwierig, wenn nicht gar unmöglich. Ist bei einem Patienten eine MRSA-Infektion bekannt, muss er isoliert werden, um weitere Infektionen zu verhindern. Das bedeutet konkret für die Radiologie, dass solche Patienten nach Möglichkeit erst am **Ende eines Arbeitstages** untersucht werden und im Anschluss an die Untersuchung eine spezielle Reinigung der Räumlichkeiten und Geräte zu erfolgen hat.

Die Übertragung der MRSA-Erreger erfolgt in erster Linie über Hautkontakt oder die Atemwege.

Neben den nosokomialen Infektionen können Erkrankungen übertragen und verbreitet werden, wegen denen ein Patient überhaupt erst in ein Krankenhaus kommt, z. B. Tuberkulose, HIV-Infektionen, Hepatitis oder Durchfallerkrankungen. Besonders die letztgenannten verbreiten sich in einer medizinischen Einrichtung sehr schnell, z. B. Noroviren, welche zu einem Brechdurchfall führen. Gerade für ältere Menschen und Kinder kann diese Erkrankung eine Gefahr darstellen, da sie zu einer Dehydrierung führt.

Noroviren werden durch direkten Kontakt als Schmierinfektion, aber auch über Gegenstände übertragen und treten besonders häufig in Krankenhäusern, Pflegeheimen und Kindertagesstätten auf. Die Infektion ist seit 2001 meldepflichtig. Im Jahr 2007 wurden knapp 200.000 Erkrankungen an das Robert-Koch-Institut gemeldet.

Da die Viren Temperaturschwankungen von -20°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ überstehen und wochenlang überleben können, stellt die Desinfektion mitunter eine Herausforderung dar.

11.5.3 Verfahren zur Desinfektion

Es gibt, je nach Keim und zu desinfizierendem Gegenstand, unterschiedliche Verfahren der Desinfektion. Hier sind exemplarisch einige vorgestellt, die

in medizinischen Einrichtungen zur Anwendung kommen.

1. Physikalische Verfahren

Zu diesen Verfahren zählen:

- Erhitzung (trocken, nass, Pasteurisierung)
 - dieses Verfahren gilt als einfach, billig und wirksam. Durch die Hitze werden die Proteine in den Keimen denaturiert und sie sterben ab.
- Bestrahlung – UV-Strahlung (nichtionisierend) wird z. B. die Keimzahl in der Luft von OP-Sälen verringert. Ebenso ist eine Bestrahlung von Gegenständen mit ionisierender Strahlung möglich.
- Filtration – dieses Verfahren kommt bei der Entkeimung von Flüssigkeiten oder Gasen zu Anwendung. Durch Membranfilter können z. B. Bakterien oder Viren filtriert werden

2. Chemische Verfahren

Zu den chemischen Desinfektionsverfahren zählen alle Stoffe, die zur Keimabtötung verwendet werden können, z. B. Ethanol (Alkohol), Halogene (Chlor, Iod), Oxidationsmittel (Wasserstoffperoxid), Ethylenoxid, oberflächenaktive Substanzen (anionische, kationische, nichtionische Stoffe, z. B. Kupfer) oder Formaldehyd.

Jeder dieser Stoffe hat Vor- und Nachteile. So können Desinfektionsmittel, die Formaldehyd nahezu alle Keime abtöten, reizen aber Haut und Schleimhaut bei direktem Kontakt und gelten als krebserregend.

Alkoholische Präparate wirken gut gegen Bakterien und Pilze, haben aber kaum eine Wirkung auf Viren. Oberflächenaktive Substanzen sind gut hautverträglich und geruchlos, wirken allerdings nicht bei Tuberkulosebakterien und Pilzsporen.

Einige der Mittel greifen die Haut an und sind daher nicht für den dauerhaften Gebrauch durch das Personal, sondern nur für bestimmte Oberflächen geeignet. Andere Stoffe greifen auch Kunststoff an und dürfen nicht bei allen Geräten verwendet werden.

Es ist eine Wissenschaft für sich, in einem Krankenhaus Infektionen wirksam zu verhindern, da viele Faktoren zu beachten sind.

11.5.4 Umsetzung von Hygienestandards für MTRA

Wie bereits beschrieben, existieren gesetzliche Vorgaben zum Schutz vor Infektionen für Patienten und Personal.

➤ Die Biostoffverordnung gilt ausschließlich dem Schutz des Personals.

Laut Biostoffverordnung (BioStoffV) gelten Mikroorganismen, die Infektionen, toxische oder sensibilisierende Wirkungen hervorrufen können, zu biologischen Arbeitsstoffen, mit denen das Personal im Gesundheitswesen in Berührung kommen kann. Dabei werden vier Risikogruppen unterschieden:

1. Risikogruppe 1: Mikroorganismen, bei denen eine Krankheitsübertragung auf den Menschen unwahrscheinlich ist, z. B. Bäckerhefe
2. Risikogruppe 2: Stoffe, die eine Krankheit auslösen können, aber eine Verbreitung in die Bevölkerung ist unwahrscheinlich und es existieren wirksame Behandlungsmaßnahmen, z. B. Herpes-Viren
3. Risikogruppe 3: Stoffe, die eine schwere Krankheit hervorrufen können und eine ernsthafte Gefahr für Beschäftigte darstellen, außerdem besteht die Gefahr einer Verbreitung in der Bevölkerung, allerdings existieren i. d. R. wirksame Vorbeuge- und Behandlungsmaßnahmen, z. B. Hepatitis C und E, MRSA, Tuberkulose.
4. Risikogruppe 4: bei diesen Stoffen besteht eine große Gefahr für Beschäftigte und die Bevölkerung eine schwere Krankheit hervorzurufen, eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung ist nicht möglich, z. B. Pocken, Ebola-Virus.

In medizinischen Einrichtungen arbeiten Beschäftigte häufig mit biologischen Arbeitsstoffen (Blut o. ä.) der Risikogruppe 3. Je nach Gefährdungsgrad werden vier Schutzstufen unterschieden:

- Schutzstufe 1: Tätigkeiten ohne Kontakt mit Körperflüssigkeiten, z. B. im konventionellen Röntgen, MRT wenn keine KM-Gabe erfolgt
- Schutzstufe 2: Tätigkeiten mit Kontakt mit Körperflüssigkeiten, Ausscheidungen oder Gewebe, z. B. KM-Injektionen, Blutentnahmen, Operationen, Angiographien
- Schutzstufe 3: Tätigkeiten mit Körperflüssigkeiten bei bekannten Infektionen, z. B. Behandlung/Diagnostik bei offener Tuberkulose, HIV-Infizierten
- Schutzstufe 4: Tätigkeiten mit Krankheiten aus der Risikogruppe 4

Je nach Risikogruppe muss das Personal eine Schutzausrüstung (Handschuhe, Kittel, Masken) tragen, um nicht nur sich selbst zu schützen, sondern auch die Übertragung auf andere Menschen zu verhindern.

Dazu gehören Maßnahmen der Händedesinfektion, das Ablegen von Schmuck, Uhren etc. an den Händen und Unterarmen sowie das Verbot von Verzehr oder Lagerung von Nahrungs- und Genussmitteln an gefährdeten Arbeitsplätzen.

Den Mitarbeitern stehen eigene sanitäre Anlagen zur Verfügung, die nicht von Patienten oder Besuchern frequentiert werden sollen. Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass ausreichende Waschplätze, Desinfektionssponder und Hautschutzpflegemittel vorhanden sind.

Auch für das gefahrlose Sammeln und Entsorgen von Arbeitsmaterialien (Spritzen, Handschuhe, Skalpelle, Kittel) hat der Arbeitgeber zu sorgen. Es müssen entsprechende Behältnisse vorhanden sein, die klar als Abfallbehälter gekennzeichnet sind.

Eine weitere Schutzmaßnahme stellen jährliche Belehrungen und die Einweisung von neuen Mitarbeitern und Praktikanten dar sowie ein Tätigkeitsverbot für Jugendliche, Schwangere und Stillende, wenn eine potenzielle Gefährdung vorliegt.

➤ **Für jeden Arbeitsbereich muss ein Hygieneplan vorliegen, in dem alle Maßnahmen festgelegt sind. Der Mitarbeiter ist verpflichtet diesen Plan einzuhalten. Anderenfalls kann sein Versicherungsschutz bei der Berufsgenossenschaft erlöschen und er sich sogar strafbar machen, wenn er andere Personen/Patienten durch sein Handeln nachweislich gefährdet. Darüber hinaus muss jede Einrichtung einen Hygienebeauftragten (Arzt/Ärztin) benannt haben, der die Einhaltung der Hygieneregeln überwacht.**

Grundregeln der Basishygiene

Zur sog. Basishygiene zählen die „Selbstverständlichkeiten der guten Kinderstube“: Körperhygiene, Kleidung und Händehygiene. Sie dienen allgemein

- der Minimierung der Eigengefährdung durch Krankheitserreger,
- der Vermeidung der Übertragung von Krankheitserregern (von Patient zu Patient oder Personal zu Patient oder Patient zu Personal),

■ **Tab. 11.2** Grundregeln der Basishygiene

Körperhygiene	Kleidung	Schmuck	Informationen über Infektionskrankheiten bei:
Körperpflege	Berufskleidung – sauber – bei mind. 90 °C waschbar – Kittel geschlossen	Nicht an Händen und Unterarmen: – Uhren – Ringe	Hauterkrankungen
Mundhygiene	Keine Strickjacken o. ä.	Keine Piercings an sichtbaren Körperstellen	Durchfallerkrankungen
Haare: – nicht über Schulterlänge offen tragen – ggf. Verwendung von Kopfhäuben	Schuhe: – sicherer Halt (mind. Fersenriemchen) – geschlossene Kappe – desinfizierbar – nicht außerhalb der Einrichtung zu tragen (keine Straßenschuhe)		Krankheiten durch Blutübertragung (z. B. Hepatitis)
Fingernägel: – kurz geschnitten – kein Nagellack (auch nicht farblos) – keine Kunstnägel	Schutzkleidung, wenn erforderlich		Parasitenbefall

- dem Schutz der unbelebten Umgebung (Geräte etc.) vor Kontamination mit Krankheitserregern.

Wie bereits in ► **Kapitel 1** beschrieben, sind die Anforderungen an die Basishygiene höher als im normalen Alltag.

Die obenstehende Tabelle (■ **Tab. 11.2**) fasst die wichtigsten Grundregeln noch einmal zusammen:

- ❗ **Eine Ausnahme stellt die Verwendung von Fingerringdosimetern dar. Diese sind durch die Strahlenschutzverordnung in ausgewählten Bereichen (z. B. Nuklearmedizin) vorgeschrieben. Für diese Dosimeter gilt:**
 - Herstellerangaben zur Desinfektion prüfen.
 - Ggf. Dosimeter nach jeder Verwendung abwaschen (Waschlotion und Wasser), danach 10 Minuten in Händedesinfektionsmittel legen und lufttrocknen lassen (Herstellerempfehlung).
 - Bei operativen Eingriffen/Angiographien das Fingerringdosimeter und zwei Paar sterile Handschuhe tragen.

Noch nicht erwähnt ist die Händereinigung, besser bekannt als Händewaschen.

In einer medizinischen Einrichtung gilt: NICHT waschen um jeden Preis.

- **Die Händedesinfektion ist dem Waschen vorzuziehen, da zu häufiges Händewaschen die Haut austrocknet und so zu winzigen Verletzungen der Hautoberfläche führen kann. Durch diese wiederum können Krankheitserreger eindringen.**

Schon im Kindergarten lernen die meisten „Nach dem Klo und vor dem Essen – Händewaschen nicht vergessen!“

Eine Händereinigung ist notwendig:

- vor dem Arbeitsbeginn,
- vor dem Umgang mit Lebensmitteln,
- vor dem Essen,
- nach dem Gang zur Toilette,
- wenn die Hände anderweitig verschmutzt, klebrig oder verschwitz sind.

Hat man z. B. Blut an die Hände bekommen, muss man zunächst die Hände so waschen, dass nichts

auf die Kleidung oder die Umgebung spritzt. Im Anschluss sind die Hände zu desinfizieren.

Händedesinfektion

Die Händedesinfektion ist die wirksamste Maßnahme zur Vermeidung von nosokomialen Infektionen.

Dazu stehen in medizinischen Einrichtungen Präparate auf Alkoholbasis zur Verfügung, die effektiv Keime abtöten und gleichzeitig die Haut pflegen. Das frühere Problem des Austrocknens der Haut ist nicht mehr vorhanden. Beim RKI sind geeignete Präparate gelistet.

Desinfektionsspender sind nahezu an jeder Ecke zu finden.

Unterschieden wird zwischen hygienischer und chirurgischer Händedesinfektion.

Hygienische Händedesinfektion

Wann muss man sich jetzt die Hände desinfizieren? Eigentlich immer.

Die fünf Momente der hygienischen Händedesinfektion sind

1. VOR jedem Patientenkontakt
2. VOR einer aseptischen (keimfreien) Tätigkeit
3. NACH dem Kontakt mit potentiell infektiösem Material
4. NACH jedem Patientenkontakt
5. NACH dem Kontakt mit der unmittelbaren Patientenumgebung (z. B. Bett)

Bei der Versorgung eines Standardpatienten am Röntgenarbeitsplatz würde das jetzt so aussehen:

- Patienten in die Kabine rufen und den Arbeitsplatz vorbereiten (Schaltpult einstellen etc.)
- Hände desinfizieren
- Patienten aus der Kabine holen, dabei die Türklinke drücken
- **Hände desinfizieren**
- Patienten zur Aufnahme einstellen
- **Hände desinfizieren**
- Aufnahme auslösen, ggf. Aufnahmewerte notieren
- **Hände desinfizieren**
- Patienten zur zweiten Aufnahme einstellen

— Hände desinfizieren

— Aufnahme auslösen

— Hände desinfizieren

— Patienten „befreien“ und verabschieden

— **Hände und Oberflächen desinfizieren** (Gerät UND Kabine)

„Das macht doch keiner!?“ – Stimmt vermutlich, deswegen gibt es ja auch so eine hohe Zahl an nosokomialen Infektionen.

Stellen wir uns den Fall doch mal vor, wie er täglich in der Praxis stattfinden könnte:

Die MTRA röntgt einen Patienten, von dem sie nicht weiß, dass er an einer Infektion (z. B. Grippeerregern) leidet. Die Aufnahme ist eine Routineaufnahme des Thorax vor einer geplanten Operation. Der Patient wirkt nicht krank oder „ekelig“. Während der Untersuchung hat der Patient das Stativ angehustet. Zwischen den beiden Aufnahmen hat sich die MTRA ihre Hände nicht desinfiziert, während der Einstellung aber Patient und Stativ angefasst.

Wo befinden sich jetzt Keime? An ihren Händen und allen Oberflächen, die sie berührt hat. Zwischen zwei Aufnahmen sind das: das Schaltpult, die Touchscreen-Oberfläche des Betrachtungsmonitors, die Türklinke, ggf. die PC-Tastatur und ihr Kugelschreiber.

Nachdem sie den Patienten verabschiedet hat, desinfiziert sie noch die Oberfläche des Röntgenstativs. Die Kabine macht jeden Morgen die Reinigungskraft, darauf achtet sie nicht.

Sie desinfiziert ihre Hände, während sie die nächste Patientin aufruft. Die Keime auf dem Stativ und ihren Händen sind also abgetötet.

Die folgende Patientin ist eine Tumorpatientin, die bei laufender Chemotherapie eine Kontrollaufnahme erhält. Ihr Immunsystem ist durch die Medikamente stark herabgesetzt. Auch ihr soll der Thorax geröntgt werden. Nach der ersten Einstellung sind noch alle vorhandenen Keime (außer die aus der Kabine) an ihrem Platz. Auch hier berührt die MTRA zwischen den beiden Aufnahmen das Schaltpult, den Monitor, den Kugelschreiber usw. Wo finden sich jetzt überall Keime?

Ein paar Tage später kommt die Patientin wieder zur Untersuchung, da sie unter einer schweren Lungenentzündung leidet.

Wer weiß schon, ob sie sich die Infektion im Röntgen geholt hat?

➤ **Mangelnde Hygiene ist kein Kavaliersdelikt, sondern eine fahrlässige Patientengefährdung.**

Die in medizinischen Einrichtungen verwendeten Desinfektionsmittelspender geben pro Hub die benötigte Menge von 3 ml Desinfektionsmittel ab. Diese müssen dann **30 Sekunden** lang eingerieben werden, wobei die Hände feucht zu halten sind. Die Einwirkzeit ist zu beachten, um sicherzustellen, dass die Erreger abgetötet wurden.

Folgende 6 Schritte sind jeweils 5 Sekunden lang durchzuführen, um eine vollständige Händedesinfektion zu gewährleisten (■ Abb. 11.5):

1. Schritt: Handfläche auf Handfläche einschl. der Handgelenke
2. Schritt: rechte Handfläche über dem linken Handrücken und umgekehrt
3. Schritt: Handfläche auf Handfläche mit verschränkten, gespreizten Fingern
4. Schritt: Außenseite der verschränkten Finger auf den gegenüberliegenden Handflächen
5. Schritt: kreisendes Reiben des umschlossenen rechten Daumens in der linken Handfläche und umgekehrt
6. Schritt: kreisendes Reiben mit geschlossenen Fingerkuppen der rechten Hand in der linken Handfläche und umgekehrt

❗ **Häufige Benetzungslücken nach der Händedesinfektion: Handrücken, Daumen, zwischen den Fingern, Handgelenke, Fingerspitzen.**

Für den Alltag

Man kann sich ein Lied suchen, dessen Refrain 30 Sekunden lang dauert. Das erleichtert die Zeiteinteilung und steigert vielleicht sogar die Stimmung, so wie der Song eines Partykrachers über einen Mann aus Tirol, dessen Refrain genau 30 Sekunden lang ist.

Für die Desinfektion von Flächen (Stativ, Röntgentisch etc.) gibt es sog. Flächendesinfektionsmittel.

Diese dienen der routinemäßigen Desinfektion der Arbeitsgeräte und verhindern die Ausbreitung von Krankheitserregern während der täglichen Diagnostik bzw. Therapie. Auch hier gilt: Nach jedem Kontakt eines Patienten mit einer Oberfläche muss diese desinfiziert werden!

Die Desinfektionsmittel findet man in gesonderten Behältern und darf sie nur für Arbeitsflächen verwenden, nicht für die Händedesinfektion. Beim Umgang mit diesen Mitteln muss das Personal Handschuhe tragen. Auch hier ist eine Einwirkzeit zu beachten. I. d. R. genügt es, die Abtrocknung des Mittels abzuwarten. Eine Verkürzung dieser Zeit durch das Abwischen mit einem trockenen Lappen darf jedoch nicht erfolgen.

Warum zwei unterschiedliche Mittel zum Einsatz kommen? Weil die Haut anders beschaffen ist als eine Gummimatte auf dem Untersuchungstisch. Mittel, welche Geräte gut desinfizieren, greifen die Haut an und umgekehrt.

Sorgenkind Ultraschallgerät

Die Schallköpfe von Ultraschallgeräten sind aus besonderem Kunststoff und kommen direkt mit den Patienten, auch im Intimbereich und mobil auf Station, in Kontakt. I. d. R. reinigt der untersuchende Arzt den Schallkopf unmittelbar nach der Verwendung vom Sonogel. Und danach?

Unbedingt auf die Desinfektionsanleitung des Geräteherstellers achten, da falsch verwendete Desinfektionsmittel den Schallkopf beschädigen können.

Zur Reinigung gehören nicht nur die Schallköpfe, sondern alle Kontaktflächen des Gerätes.

Chirurgische Händedesinfektion

Die chirurgische Händedesinfektion ist im OP und vor allen interventionellen Eingriffen durchzuführen. Damit spielt sie für MTRA besonders im Bereich der Angiographie eine große Rolle.

Hier sind die Vorschriften natürlich strenger, als bei der hygienischen Händedesinfektion, da das Personal bzw. die von ihnen verwendeten Materialien einen direkten Kontakt zum Inneren des Patientenkörpers haben. Eine generelle Anleitung zur korrekten Waschung der Hände zeigt

■ **Abb. 11.6.**

Folgende Voraussetzungen sind zu erfüllen:

- Die Fingernägel sind kurz und rund geschnitten (um einen Defekt der sterilen Handschuhe zu verhindern).

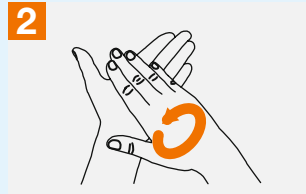
How to Handrub?

RUB HANDS FOR HAND HYGIENE! WASH HANDS WHEN VISIBLY SOILED

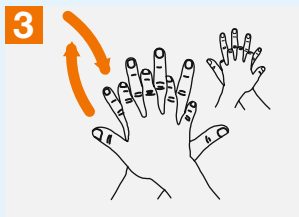
C Duration of the entire procedure: **20-30 seconds**



Apply a palmful of the product in a cupped hand, covering all surfaces;



Rub hands palm to palm;



Right palm over left dorsum with interlaced fingers and vice versa;



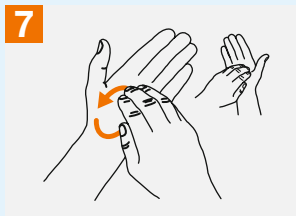
Palm to palm with fingers interlaced;



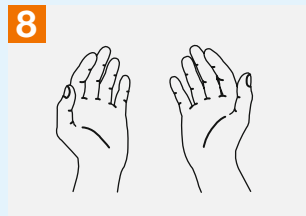
Backs of fingers to opposing palms with fingers interlocked;



Rotational rubbing of left thumb clasped in right palm and vice versa;



Rotational rubbing, backwards and forwards with clasped fingers of right hand in left palm and vice versa;



Once dry, your hands are safe.



**World Health
Organization**

Patient Safety

A World Alliance for Safer Health Care

SAVE LIVES
Clean **Your** Hands

May 2009

Abb. 11.5 Beispiel einer korrekten Händedesinfektion nach den Standards der WHO. (Mit freundlicher Genehmigung der WHO)

How to Handwash?

WASH HANDS WHEN VISIBLY SOILED! OTHERWISE, USE HANDRUB



Duration of the entire procedure: 40-60 seconds

0



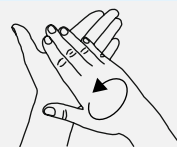
Wet hands with water;

1



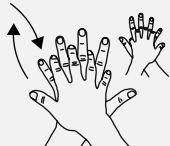
Apply enough soap to cover all hand surfaces;

2



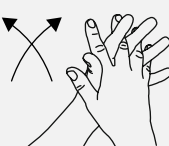
Rub hands palm to palm;

3



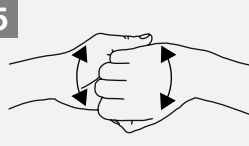
Right palm over left dorsum with interlaced fingers and vice versa;

4



Palm to palm with fingers interlaced;

5



Backs of fingers to opposing palms with fingers interlocked;

6



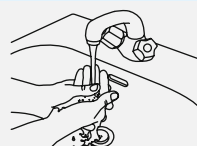
Rotational rubbing of left thumb clasped in right palm and vice versa;

7



Rotational rubbing, backwards and forwards with clasped fingers of right hand in left palm and vice versa;

8



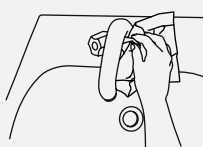
Rinse hands with water;

9



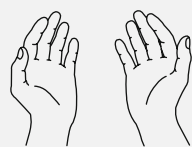
Dry hands thoroughly with a single use towel;

10



Use towel to turn off faucet;

11



Your hands are now safe.



World Health Organization

Patient Safety

A World Alliance for Safer Health Care

SAVE LIVES

Clean Your Hands

May 2009

- Es dürfen weder Nagelbettverletzungen noch andere entzündliche Prozesse an den Händen vorliegen.
- Mit einer weichen und desinfizierten Bürste dürfen nur Fingernägel und Nagelfalz gereinigt werden, wenn das notwendig ist.
- Die Haut der Hände und Unterarme darf NICHT mit einer Bürste gereinigt werden, da es zu Hautirritationen, verbunden mit einer höheren Keimabgabe kommen kann.
- Wascharmaturen (Wasserhähne) und Seifen- bzw. Desinfektionsspender dürfen NICHT mit der Hand bedient werden (alternativ bietet sich der Ellenbogen an).

Auch bei der Ausführung der Waschung gibt es Vorgaben. So muss bei Arbeitsbeginn in einem solchen Bereich zunächst eine Händewaschung mit nach oben zeigenden Fingerspitzen und tiefliegenden Ellenbogen durchgeführt (Hände nicht über Schulter und nicht unter Thoraxniveau halten). Diese sollte 1 Minute dauern, nicht länger, damit potenzielle Hautschäden vermieden werden. Abgetrocknet wird sich mit einem keimarmen Einmalhandtuch, im Anschluss erfolgt die Desinfektion von Händen und Unterarmen. Dabei ist die Einwirkzeit des Herstellers zu beachten. Während der Einwirkzeit müssen Hände und Unterarme immer feucht sein, danach sollte keine Abtrocknung mehr erfolgen.

Allerdings sind sterile Handschuhe erst anzuziehen, wenn die Hände lufttrocken sind. Bis dahin sollten die Hände – möglichst wie zum Gebet verschränkt – auf Höhe, aber mit Abstand zum Brustbein gehalten werden, sodass die Arme nicht unter das oben beschriebene Niveau sinken können.

Hygienische Schutzausrüstung

Die Verwendung einer hygienischen Schutzausrüstung ist vom Einsatzbereich abhängig, z. B. bei Isolierzimmern oder der Versorgung infizierter Patienten.

Nachfolgend sind einige Hinweise für die Verwendung aufgelistet:

- Schutzkittel
 - hinten verschließen
 - langärmelig mit Bündchen
 - täglicher Wechsel bzw. sofort nach Verschmutzung

- dürfen bei Isolierzimmern diese nicht verlassen
- Flüssigkeitsdichte Einmalschürzen
 - Bei erwartetem Verspritzen oder Durchnässen
 - Bei Gefahr von Kontamination mit Sekreten
 - Nach Gebrauch zu entsorgen
- Normaler Mund- und Nasenschutz (OP-Maske)
 - Eigenschutz vor hustenden Patienten
 - Patientenschutz bei eigener Erkältung
 - Wechsel bei Durchnässung (Atemluft) oder nach 2 Stunden
- **In der Angiographie nach JEDER Untersuchung bzw. nach jedem Patientenwechseln**
- Mund- und Nasenschutz mit Schutzbrille/Visier
 - Bei erwartetem Spritzkontakt, z. B. bei Gerätereinigung
 - Beim Umgang mit Chemikalien, Zytostatika
- Atemschutzmasken (FFP2- und FFP3-Masken) = partikelfilternde Halbmasken (filtering face-piece)
 - Einsatz nur bei besonderen Anordnungen/ Infektionsgefahr
 - Filterleistung und Atemwiderstand nehmen von FFP2 zu FFP3 zu
 - FFP2 – bei Patienten mit offener TBC
 - FFP3 – bei z. B. Influenzaepidemien, im Katastrophenfall

❗ Es bringt nichts, einem infektiösen Patienten eine FFP2-Maske zu geben, da die Luft nur beim Ein- und nicht beim Ausatmen filtriert wird. Infizierte Patienten erhalten außerhalb ihres Zimmers eine OP-Maske.

11.6 Steriles Arbeiten

Ch. Nowarra

Unter Sterilität im hygienischen Sinne versteht man die Freiheit von Mikroorganismen und Viren.

Dies ist für alle Materialien (z. B. Medikamente, Kontrastmittel, Katheter, Drainagen etc.) wichtig, die in den Patientenkörper gelangen. Durch Sterilisation wird versucht, die Anzahl der Bakterien so zu verringern, dass nach einer Sterilisation etwa eine

Zehnerpotenz weniger Erreger vorhanden sind, als nach einer Desinfektion.

Es existieren unterschiedliche Verfahren zur Sterilisation von Medikamenten, Geräten und Materialien. Allen ist gemein, dass sie für die Haut unverträglich sind. I. d. R. ist eine absolute Keimfreiheit also auch unter Laborverhältnissen unmöglich.

Daher versteht man unter dem Begriff des „Sterilen Arbeitens“ nicht die universelle Keimfreiheit des Personals, sondern den Umgang mit sterilen Materialien, während dem alles getan wird, um eine Kontamination der verwendeten Materialien mit Mikroorganismen oder Viren zu verhindern. Diese Maßnahmen der Vermeidung von Kontaminationen werden als **Asepsis** bezeichnet.

Verwendung finden sowohl Einmalmaterialien als auch mehrfach steril aufbereitete Geräte, z. B. Pinzetten.

11.6.1 Verpackung von Sterilgut

In jeder medizinischen Einrichtung sind sterile Materialien in den unterschiedlichsten Formen verpackt: Medikamente z. B. in Fläschchen, Spritzen in Klarsichtverpackungen oder Mehrwegverpackungen wie Aluminiumbehälter, die auch direkt zur Sterilisation verwendet werden.

Zusätzlich gibt es noch Ein- oder Zweifachverpackungen. Einfachverpackungen sind z. B. die einfachen Folienverpackungen von Spritzen. In der Angiographie oder dem OP verwendetes Material ist i. d. R. zweifach verpackt. Die Art der Verpackung muss gewährleisten, dass eine aseptische Entnahme problemlos möglich ist.

Jede sterile Verpackung (bes. bei Mehrwegmaterialien) muss folgendermaßen gekennzeichnet sein:

- Inhalt
- Sterilisationsart und -datum
- Verfallsdatum
- Chargennummer

11.6.2 Lagerung von Sterilgut

Sterilgut sollte in Schränken oder Schubladen gelagert werden, da sie dort geschützt werden vor:

- Verschmutzung (Staub)

- Feuchtigkeit
- UV-Strahlung
- Mechanischer Beanspruchung
- Temperaturschwankungen

Bei der Reihenfolge gilt das „first in – first out“-Prinzip. Aus diesem Grund werden neu bestellte Materialien immer nach hinten gepackt und solche, die kurz vor dem Verfallsdatum stehen, farblich markiert.

11.6.3 Umgang mit Sterilgut

Der Umgang mit sterilen Materialien hat immer aseptisch zu erfolgen, also so, dass eine Kontamination mit Keimen verhindert wird.

Aus diesem Grund gilt:

- Verfallsdatum und Unversehrtheit der Verpackung überprüfen, bes. Schweißnähte und Vorhandensein von Kondenswasser (dann ist Material nicht mehr steril)
- Öffnen der Verpackung erst unmittelbar vor Gebrauch (nicht schon am Morgen KM-Spritzen für den gesamten Tag herrichten)
- Vor der Öffnung der Verpackung hygienische Händedesinfektion durchführen
- Verpackungen nur an der vorgesehenen Stelle öffnen, nicht das Sterilgut durch die Verpackung drücken/stechen
- Für eine ausreichende Arbeitsfläche sorgen
- Verpackung kontaminationsfrei entfalten, um Material steril anreichen bzw. entnehmen zu können
- Bei Öffnung und Entnahme – nicht sprechen, niesen, husten
- Sterile und unsterile Materialien deutlich voneinander trennen
- In der Nähe von steril abgelegten Materialien das Aufwirbeln von Luft (und Staub) vermeiden
- Ggf. Information von Mitarbeitern/Patienten, die sich in unmittelbarer Nähe der sterilen Materialien befinden
- KEINE Verwendung wenn Material unsteril wurde oder man sich dessen nicht sicher ist

Natürlich müssen Untersuchungen vorbereitet werden, das kann man nicht erst unmittelbar vor

Beginn machen, wenn der Patient schon auf dem Tisch liegt und wartet. Daher werden z. B. sterile Tische in der Angiographie im Vorfeld vorbereitet. Ist der Tisch fertig, muss er mit einem **sterilen Tuch** abgedeckt werden. Zusätzlich erfolgt eine **Markierung der Zeit**, wann der Tisch gerichtet wurde, da nach **sechs Stunden** nicht mehr davon ausgegangen werden kann, dass noch alle Materialien steril sind. Alle Materialien auf dem Tisch müssen dann verworfen werden.

11.6.4 Vorbereitung von Injektionen und Infusionen

Infusionen und Injektionen gelten als eine der möglichen Quellen nosokomialer Infektionen, da Infusionslösungen und vor allem -systeme schnell durch Mikroorganismen kontaminiert werden. Daher ist beim Herrichten von Infusionen oder der Vorbereitung der Kontrastmittelspritzen aseptisches Arbeiten von großer Bedeutung.

- **Grundsätzliche gilt: Vor jedem Herrichten einer Infusion oder Injektion ist eine hygienische Händedesinfektion sowie die Flächen-desinfektion der Arbeitsfläche durchzuführen.**

Folgende Handlungsschritte sind zwingend zu beachten:

1. Infusionen sind erst kurz vor ihrem Gebrauch herzurichten, max. **eine Stunde** im Voraus.
2. Im Vorfeld muss kontrolliert werden, ob das Verfallsdatum eingehalten wird und keine Haarrisse an der Verpackung sowie Ausflockungen oder Trübungen des Inhaltes vorliegen.
3. Der Gummistopfen der Infusionsflasche oder ungeschützte Membranen müssen vor dem Durchstechen mit einer Nadel desinfiziert werden – Einwirkzeit 15 Sekunden (überschüssiges Desinfektionsmittel mit einem Tupfer entfernen).
4. Es sollten möglichst Einzeldosisampullen verwendet werden.
5. Bei Verwendung von Mehrdosisbehältnissen (Kontrastmittelflaschen, NaCl-Flaschen) muss:
 - Anbruchdatum und -uhrzeit auf der Flasche vermerkt werden.

- die Aufziehkanüle nach dem Aufziehen aus dem Gummistopfen entfernt werden.
- nach Möglichkeit zum Aufziehen sog. „Spikes“ verwendet werden“.

Nach dem Herrichten muss die Spritze/Infusion mit **Datum, Uhrzeit und Inhalt** beschriftet werden.

Tips

Tips für den Umgang mit Kontrastmitteln an Hochdruckinjektoren

- Nur Einmalschläuche mit Doppelrückschlagventil verwenden – dieser muss NACH JEDEM Patienten gewechselt werden.
- Beim Wechseln erst den patientenfernen, danach den patientennahen Verschluss öffnen.
- Vor jeder Manipulation am System eine hygienische Händedesinfektion durchführen, möglichst Einmalhandschuhe tragen.
- Nach Abschluss der Injektion bei Venenverweilkanülen/Dreiwegehähnen muss ein NEUER steriler Verschluss angebracht werden.

- **In den Jahren 2004 und 2008 wurden Fälle veröffentlicht, in denen durch den fehlenden bzw. unkorrekten Gebrauch der KM-Injektionsschläuche (ohne Doppelrückschlagventil) Meningitis und Hepatitis C bei Patienten verursacht wurden.**

11.6.5 Steriles Ankleiden

Das sterile Ankleiden spielt ebenfalls in der Angiographie eine große Rolle.

In diesem Bereich ist besonders auf die Basis-hygiene zu achten. Zusätzlich trägt das Personal sog. Funktionskleidung (grüne oder blaue OP-Hosen und Kasacks, desinfizierbare Schuhe), die nur an diesem Arbeitsplatz getragen werden darf. Bei Verlassen oder Betreten des Bereiches müssen sich die Mitarbeiter aus- bzw. einschleusen, also neue Kleidung anziehen.

Im eigentlichen Untersuchungsraum sind häufig grundsätzlich (je nach Art der durchgeführten Inter-

ventionen) eine OP-Haube und ein Mundschutz zu tragen, welche bereits im Vorraum angelegt werden.

- **Vor sterilen Materialien und sterilen Tischen gilt: Eine Armlänge Abstand, wenn man selbst keine sterile Kleidung trägt.**

Wie kommt man jetzt in den sterilen Kittel, ohne diesen zu kontaminieren?

1. Chirurgische Händedesinfektion
2. Der Kittel ist so gefaltet, dass die Innenseite zum Personal zeigt, die sterile Seite ist nach innen gerichtet.
3. Mit möglichst wenigen Berührungspunkten der Hände in die Ärmel schlüpfen und dabei den Kittel von seiner sterilen Unterlage nehmen und einen Schritt in den leeren Raum treten, um eine Berührung mit anderen Gegenständen zu vermeiden.
4. Ein unsteriler Springer (Kollege/in) greift von hinten in die Innenseite des Kittels (ohne etwas anderes zu berühren) und hilft beim Hochziehen der Ärmel. Die Bündchen des Kittels müssen noch ein Stück der Hand bedecken.
5. Der Springer schließt den Kittel am Hals und an der Innenseite des Kittels.
6. Anziehen der sterilen Handschuhe
7. An der Vorderseite des Kittels ist ein Band, an dem i. d. R. ein markierte Pappe hängt: auf einer Seite steht STERIL, auf der anderen Seite UNSTERIL.
8. Man fasst diese Pappe auf der sterilen Seite an und reicht dem Springer die unsterile Seite, ohne etwas anderes zu berühren. Pappe loslassen und Hände auf Schulterhöhe nach oben nehmen.
9. Einmal im Kreis drehen, der Springer bleibt stehen. Dabei wickelt sich der Kittel um den steril angekleideten Mitarbeiter.
10. Der Springer, der jetzt die Pappe in der Hand hält, zieht daran und löst sie damit vom Band des Kittels.
11. Der steril eingekleidete Mitarbeiter schließt das Band vor dem Bauch.

(Es gibt jede Menge frei zugängliche Videos, in denen man die Reihenfolge ansehen kann. Am besten ein paar Mal üben, bevor es an den Patienten geht,

■ **Abb. 11.7** Hygienevideo



z. B. ► <http://www.krankenhaushygiene.de/informationen/videos/>, siehe auch ■ **Abb. 11.7**).

Hat man als sterile MTRA keine Arbeiten auszuführen, wartet man in „Gebetsposition“, also mit den gefalteten Händen vor dem Brustbein. Grundsätzlich darf man jetzt nur noch nach sterilen Materialien greifen. Fällt etwas herunter o. ä. muss man „unhöflich“ sein.

Bei jeder gefühlten oder gesehenen Verletzung der Sterilität ist JEDER Mitarbeiter verpflichtet, dass allen Anwesenden im Raum mitzuteilen, um Kontaminationen zu verhindern. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass in der Angiographie der Patient häufig wach und bei vollem Bewusstsein ist. Er darf nicht das Gefühl bekommen, dass jemand einen schwerwiegenden Fehler gemacht hat, der seine Gesundheit gefährdet, da er sonst das Vertrauen verliert und unruhig wird.

Im Zweifelsfall muss Material verworfen und das Personal neu steril eingekleidet werden.

- ❗ **Strahlenschutzkleidung (Bleischürze und Schilddrüsenschutz) gehört UNTER den sterilen Kittel und wird damit als erstes angezogen.**

Auch das Anziehen der sterilen Handschuhe unterliegt einer festen Reihenfolge und sollte ein paar Mal geübt werden. Nachfolgend sind die einzelnen Schritte beschrieben:

1. Äußere Verpackung entfernen und so legen, dass die Abbildung der Hände in nicht auf dem Kopf steht.
2. Die innere Papierverpackung einmal auseinanderfalten.
3. Die innere Papierverpackung auseinanderziehen ohne das Gummi der Handschuhe zu berühren – die Handschuhe liegen nun offen da.

4. Untere Kante des Papiers einmal nach hinten falten, damit das Papier nicht mehr zusammenklappen kann.
5. Mit einer Hand (Rechtshänder meist mit Links) das umgestülpte Ende des Handschuhs der Gegenseite fassen und mit der anderen Hand hineingleiten, Handfläche zeigt dabei nach oben (Korrekturen des Sitzes erfolgen am Ende).
6. Mit Zeige- und Mittelfinger der nun behandschuhten Hand von oben unter die Stulpe des anderen Handschuhs greifen und mit der freien Hand hineingleiten.

Erst jetzt finden Korrekturen statt. Es ist darauf zu achten, dass die Bündchen des sterilen Kittels noch bis zur Hand ragen, damit keine Lücke zwischen Handschuhen und Kittel entstehen kann.

➤ **Grundsätzlich gilt: Haut auf Haut und Gummi auf Gummi**

für die anästhesiologische Einleitung zu treffen. Einen Zugang haben Sie bereits und bekommen nun wortlos ein Puloxymeter und das EKG angeklemt. Neben Ihnen gibt der Monitor plötzlich Piepstöne von sich. Der Anästhesist, der sich eben zu Ihnen umgedreht hat, setzt sich neben Sie, dreht den Dreivegehahn so, dass die Verbindung zum Tropf abgeschnitten ist, um nacheinander unterschiedliche Spritzen anzusetzen, die ihm der OP-Pfleger reicht. „Es kann sein, dass Sie gleich ein leichtes Brennen verspüren.“ sagt er, während er die Flüssigkeit einspritzt. Ihnen laufen Tränen über die Wangen, dann merken Sie nichts mehr.

Die Situation, wie sie hier geschildert wird, ist mit Sicherheit eine Extremform und mit einer gewissen Dramatik dargestellt – aber sie ist nicht vollkommen unrealistisch. Was sie sehr gut zeigt ist:

➤ **Was für den Mitarbeiter im Gesundheitswesen, also z. B. Sie als MTRA nach einiger Zeit Routine ist, ist für den Patienten i. d. R. ein Ausnahmezustand.**

11.7 Der Patient im Krankenhaus

T. Hartmann, M. Kahl-Scholz

Stellen Sie sich vor, Sie liegen in einem Krankenhausbett und werden in den OP-Bereich gefahren. In der Schleuse nickt Ihnen die OP-Schwester knapp zu ohne sich vorzustellen. Sie werden auf eine andere Liege gelagert und in die Einleitung gefahren. Dort stehen bereits mehrere Personen in grüner OP-Kleidung und mit halb nach unten gezogenem Mundschutz, die sich über ein Thema aufzuregen scheinen. Einer von Ihnen dreht sich zu Ihnen um und sagt: „Ich bin Ihr Anästhesist, ich komme gleich zu Ihnen“. Danach redet er mit den anderen beiden weiter über den Dienstplan. Sie fühlen sich etwas verloren und unwohl in der liegenden Position und haben Angst vor der bevorstehenden Narkose. Einfach „weg zu sein“ ist kein schöner Gedanke. Sie sehen die Schläuche, Monitore und wie im OP-Saal ein geschäftiges Treiben zur Vorbereitung auf die OP herrscht, und Ihnen wird noch mulmiger. Auch wenn Sie es sich selbst nicht erklären können, aber plötzlich steigen Ihnen die Tränen in die Augen, und Sie fühlen sich wie ein kleines, hilfloses Kind. Die drei Anwesenden bemerken all das gar nicht, beenden einfach nur Ihr Gespräch und beginnen, die Vorkehrungen

Natürlich ist es eine Herausforderung, offen zu bleiben für die Beziehung zum Patienten. Wenn Sie sich irgendwann sicher und routiniert fühlen, die Kollegen kennen und auch ihre Angst gesunken ist, es könnte doch einmal eine schwerwiegende Kontrastmittelreaktion auftreten, befinden Sie sich im „Arbeitstrott“. Und das kann manchmal dazu führen, dass man in all der Routine vergisst, dass man mit Menschen arbeitet – zudem mit Menschen, für die diese Situation alles andere als Routine ist. Egal, ob es sich um eine computertomographische, sonographische oder durchleuchtende Diagnostik handelt, um die Untersuchung im MRT oder „bloß“ einer Röntgenbildaufnahme im nativen Röntgen – Sie können davon ausgehen, dass die meisten Patienten bisher wenig Berührungspunkte mit den bildgebenden Verfahren hatten. Und selbst, wenn sie schon einmal geröntgt wurden oder es sich um ein erneutes CT-Staging handelt, heißt das nicht, dass das zweite oder dritte Mal mit weniger Ängsten oder Unsicherheiten verbunden ist.

■ Die Geschichte hinter dem Menschen

Ein Mensch ist im Krankenhaus, weil er krank ist. Und wie Sie aus eigener Erfahrung wissen: Krankheit

versetzt uns in einen Zustand der Missempfindung und meistens auch der Schwäche und Verletzlichkeit. Der Grund, warum der Patient einer bildgebenden Diagnostik unterzogen werden muss, kann vielfältiger Natur sein und von leichten bis schwerwiegenden, das Leben bedrohenden Erkrankungen reichen. Vielleicht weiß er auch längst, dass er so schwer erkrankt ist, dass ihm nicht viel Zeit bleibt. Und er macht sich darüber Gedanken, was das für ihn und seine Angehörigen bedeutet. Vielleicht ist er oder sie aber auch ganz alleine und wird nach der Untersuchung in ein Krankenzimmer zurückkehren, in dem niemals Besuch auf ihn oder sie wartet.

➤ **Natürlich ist es wichtig, dass Sie solchen Aspekten nicht zu viel Gewicht geben, denn Sie brauchen Ihre professionelle Distanz. Aber versuchen Sie sich, auch nach einigen Jahren Berufserfahrungen und Routine, immer wieder vor Augen zu rufen, dass es hier nicht um eine Akte oder einen Untersuchungsbogen geht, sondern um einen Menschen.**

➤ **Für die Genesung ist die sog. Compliance wichtig. Darunter versteht man das kooperative Verhalten eines Patienten zur Untersuchung oder Therapie. Fehlt diese Compliance, wird sich der Patient vielleicht weigern, ein Medikament einzunehmen oder eine wichtige Untersuchung durchführen zu lassen. Zu den Grundvoraussetzungen für die Compliance gehören die Einsicht in die Ernsthaftigkeit einer Erkrankung und die Zufriedenheit mit der medizinischen Betreuung.**

■ Jeder Mensch ist anders

Es gibt in der Anatomie des Menschen unzählige anatomische Varianten: die Leber kann links liegen, der Blinddarm oben rechts, selbst das Herz kann eine andere Position innehaben. Gefäße können zweifach vorhanden sein, wo sie nur einfach sein sollten, manch ein Knochen etwas anders geformt als beim Durchschnitt der Bevölkerung. Genauso unterschiedlich kann der Stoffwechsel eines Menschen sein, sein Immun- und Gerinnungssystem. Der eine Mensch reagiert allergisch auf Nüsse, der nächste auf Gräserpollen, ein weiterer gar nicht. Kurzum: Egal, wie lange Sie schon in Ihrem Bereich

arbeiten und egal, wie viele Patienten Sie bisher betreut haben, ohne, dass ein Zwischenfall passiert wäre: Jeder neue Patient ist anders und kann auf ein Medikament, das bisher alle 1000 Patienten vor ihm vertragen haben, mit Nebenwirkungen reagieren. Also:

➤ **Bleiben Sie aufmerksam gegenüber jedem Patienten und nehmen Sie die Äußerungen des Patienten über Missempfindungen oder Angstgefühle ernst.**

■ Patientenkommunikation

Nicht ohne Grund wird zunehmend an deutschen Universitäten ein besonderer Wert auf die Arzt-Patienten-Kommunikation und die Psychologie des Umgangs mit dem Patienten gelegt. Patienten sind aufgrund ihrer Lage häufig sehr feinfühlig und offen für jede Form der Kommunikation – in positiver wie in negativer Hinsicht.

Wie schon, viel zitiert, aber nicht weniger wahr, Paul Watzlawik (1921–2007) sagt:

» Man kann nicht nicht kommunizieren.

Denken Sie an das Beispiel zu Beginn des Abschnittes zurück, versetzen Sie sich bitte noch einmal kurz in die dort geschilderte Lage: Wie würden Sie das Verhalten des Anästhesisten beschreiben? Wie würden Sie seine Haltung Ihnen gegenüber einschätzen, obwohl (oder vielleicht gerade weil) er nur zwei Sätze mit Ihnen gesprochen hat, bevor er Sie in die Narkose brachte? Er hat kaum mit Ihnen gesprochen und das, was er zu Ihnen gesagt hat „Ich bin Ihr Anästhesist, ich komme gleich zu Ihnen.“ und „Es kann sein, dass Sie gleich ein leichtes Brennen verspüren.“ war weder besonders freundlich noch unfreundlich gesprochen. Eigentlich hat er also kaum mit Ihnen kommuniziert. Und trotzdem vermittelt er Ihnen in diesem Moment den Eindruck, dass Sie ihm gleichgültig sind oder sein Dienstplan gerade zumindest wesentlich wichtiger ist, und er routiniert seiner Arbeit nachgeht, ohne Sie als Menschen wahrzunehmen. Er hat Ihnen seine Haltung Ihnen gegenüber vermittelt, ohne einen Satz über diese Haltung zu sagen. Das genau meint, dass Sie mit einem Menschen nicht nicht kommunizieren können. Selbst ein Schweigen kann viele

unterschiedliche Dinge bedeuten oder zumindest von den Anwesenden auf vielerlei Weise gedeutet werden.

- **Sie als MTRA kommunizieren also immer mit den Patienten, selbst, wenn Sie sich dessen gar nicht bewusst sind oder mit Ihren Gedanken und Worten gerade ganz „woanders“ sind.**

Versuchen Sie sich immer wieder vor Augen zu führen, welchen Umgang Sie sich wünschen würden, wenn Sie krank, evtl. schwach und verletzlich wären; und wenn Sie nicht durch Ihren Beruf mit dem Krankenhaus vertraut wären, sondern vollkommen unwissend, eben als Laie, nun etliche Untersuchungen über sich ergehen lassen müssten.

Worauf Sie in der Kommunikation achten können:

- **Augenkontakt:** Schauen Sie den Patienten wenn möglich während Sie mit ihm sprechen in die Augen, damit er das Gefühl bekommt, dass Sie aufmerksam sind und voll in der Kommunikation mit ihm stehen.
- Verwenden Sie im Gespräch **keine medizinische oder technische Fachsprache**, sondern eine verständlich einfache Sprache.
- **Freundliche und ruhige Erklärungen**, gerade bei geäußerten Ängsten oder Bedenken, können häufig zu einer Beruhigung führen.
- Achten Sie auf Ihre **Körpersprache** (Zu- und Abwendung).
- Wirklich wichtig ist, auch nach langer Berufserfahrung, das **Eingehen auf Ängste, Bedenken und Fragen**, selbst wenn Sie sie schon zum 100sten mal beantworten – für den Patienten bleibt die Situation ein Ausnahmezustand.

■ **Besondere Patientengruppen**

Sie werden in Ihrem Wirken als MTRA mit vielen verschiedenen Patienten zu tun haben, und nicht immer wird dieser Umgang für Sie einfach sein. Besonders schwierig ist dabei sicherlich der Kontakt mit betrunkenen oder drogenabhängigen Personen, Patienten mit einer psychischen Störung, Menschen mit mangelnder Körperhygiene und auch Patienten, die z. B. an einer Demenz erkrankt sind. Aber auch der Umgang mit Kindern und deren Eltern wird Sie vor besondere Herausforderungen stellen.

- **Generell gilt: Sofern Sie sich, gerade in der Anfangszeit, unsicher fühlen, bitten Sie wenn möglich eine Kollegin oder einen Kollegen hinzu.**

Ebenso wird es Ihnen niemand übel nehmen, wenn Sie sich bei Patienten, die sich z. B. aufgrund ihrer Lebensumstände nicht mehr genügend um die eigene Körperhygiene kümmern können oder bei denen nicht klar ist, ob sie **schwerwiegende ansteckende Krankheiten (Hepatitis B, AIDS etc.) haben, entsprechend schützen (doppelte Handschuhe, nur so viel Körperkontakt wie nötig usw.)**.

■ **Kommunikation mit demenzerkrankten Patienten**

Demenz ist eine Erkrankung, die in den letzten Jahren immer häufiger diagnostiziert wurde und die sich in unterschiedlichen Formen zeigen kann. Der Umgang mit Menschen, die von dieser Erkrankung betroffen sind, kann für alle Beteiligten eine große Herausforderung darstellen. Zum klinischen Bild der Demenz kann es gehören, dass die Betroffenen ruhelos sind, schreien evtl. sogar drohen. Manchmal ist dann keine Möglichkeit mehr gegeben, mit den Patienten in den direkten kommunikativen Austausch zu gehen (verbale Kommunikation), also die Kommunikation ohne Worte. Allgemeine Kommunikationsregeln, die sich im Umgang mit dementen Patienten bewährt haben, sind u. a.:

- Umsetzung einer entspannten und freundlichen Interaktion
- Ruhe ausstrahlen
- Unvermittelte Handlungen und Bewegungen vermeiden (da diese als bedrohlich missverstanden werden können)
- Sich namentlich vorstellen, von vorne nähern, auf Augenhöhe kommunizieren
- Evtl. Stuhl nehmen und in einem gebührenden Abstand hinsetzen
- Augenkontakt wahren, berühren und dabei auf Grenzen achten
- Erklären, was man tut, wenn möglich auch durch nonverbale Gesten
- Genügend Zeit und Geduld haben, nicht fordern, drängeln, antreiben

■ ■ Der Umgang mit Kindern und ihren Eltern

1976 – Tina ist 11 Monate alt, hustet seit ein paar Tagen und wirkt auffallend schlapp. Nun ist sie mit ihrer Mutter im Krankenhaus und soll geröntgt werden, um eine Lungenentzündung auszuschließen.

Die Mutter wird gebeten, in einem Vorraum zu warten und muss ihr Kind „abgeben“. Die MTRA vergisst die Tür zum Untersuchungsraum zu schließen, und so kann die Mutter beobachten, wie ihre weinerliche, kranke und mit 11 Monaten noch sehr hilflose Tochter entkleidet und in ein Plexiglasgestell (Babixhülle) „gepresst“ wird. Die Arme sind nach oben gestreckt und Tina wird, mithilfe der sog. Babixhülle, senkrecht vor einem Stativ aufgehängt.

Der Mutter kommen die Tränen. Als die MTRA sie so sieht, schließt sie schnell die Tür zum Untersuchungsraum.

Die Lungenentzündung bestätigt sich, und Tina muss für mehrere Wochen in der Klinik bleiben. In den ersten 14 Tagen darf sie nicht einmal Besuch erhalten.

Wie klingen die Erlebnisse von Tina und ihrer Mutter für Sie? Würden Sie das heute auch noch so machen?

Im Bereich der Pädiatrie hat sich, gerade im Umgang mit den Kindern und deren Eltern, in den vergangenen Jahren viel verändert. Heute ist es selbstverständlich, dass man Kinder nicht wie „kleine Erwachsene“ behandelt. Es wird darauf eingegangen, dass, je nach Entwicklungsstand, Kinder ihre Umwelt anders erleben, verstehen und interpretieren als Erwachsene. Und sich demzufolge auch anders verhalten, Abläufe anders wahrnehmen und in einer anderen Weise kommunizieren.

In der Kinderradiologie sind der Umgang und die Betreuung der Kinder und der Eltern während der Untersuchung eine zentrale Aufgabe der MTRA. Davon unbenommen sind natürlich die originären Aufgaben der Untersuchungsdurchführen, Bildverarbeitung etc.

Für eine gelungene Kommunikation und Compliance ist die erste Kontaktaufnahme mit dem Kind und der Begleitperson besonders wichtig. Kinder orientieren sich an den begleitenden Eltern und reagieren auch auf deren Gefühlslage. MTRA müssen in diese Situationen Einfühlungsvermögen, Geduld und Kreativität beweisen, nicht selten aber auch das Selbstbewusstsein, sich die notwen-

dige Zeit im oft hektischen Arbeitsalltag zu nehmen.

Kommt es zu emotional stark belastenden Situationen zwischen den Kindern und den Begleitpersonen oder überträgt sich die Angst der Eltern auf das Kind, suchen Sie das Gespräch, und scheuen Sie sich nicht, die Eltern aus dem Untersuchungsraum zu bitten.

Babies und Kleinkinder Bei Kindern dieses Alters sind die Eltern häufig besonders angespannt. Sie wissen nicht, wie so eine Untersuchung abläuft oder ob sie überhaupt mit in den Untersuchungsraum dürfen. Nicht zu vergessen: Sie haben Angst um ihr krankes Kind.

Daher muss den Eltern vor Beginn die Untersuchung genau erklärt werden. Vor allem ist wichtig, dass die Eltern wissen, wie sie z. B. ihr Kind festhalten sollen. Nach Möglichkeit lässt man das die Eltern bzw. Begleitpersonen machen, da sie dem Kind bekannt sind und ein entsprechendes Vertrauensverhältnis besteht.

Die Begleitpersonen müssen verstehen, warum es wichtig ist, das Kind gut zu fixieren (festhalten oder unter Verwendung von Hilfsmitteln), da es sonst zu Fehlaufnahmen und einer zusätzlichen Strahlenbelastung kommen kann.

Hat das Kind bereits ein Sprachverständnis entwickelt, muss es in die Erklärungen einbezogen werden. Da Kinder ihre Welt im wahrsten Sinn des Wortes „begreifen“, sollte es im Vorfeld die Untersuchungsmaterialien berühren dürfen.

- **Schaffen Sie ein möglichst ruhiges und entspanntes Umfeld. Dazu gehört, dass die Untersuchung so weit wie möglich vorbereitet ist, inkl. Hilfsmittel, Einstellung der Belichtungs- werte etc. Eventuell kann ein Kuscheltier, eine Spieluhr oder Singen helfen, das Kind zu entspannen und die Aufmerksamkeit von der Untersuchungsangst abzulenken.**
- Machen Sie die Begleitperson zur Ihrem Untersuchungspartner.**

Schulkinder Schulkinder benötigen i. d. R. keine Begleitperson mehr im Untersuchungsraum. Es sollte allerdings nicht untersagt werden, wenn das Kind den Wunsch äußert. Auch hier steht die Er-

klärung der Untersuchung im Mittelpunkt. Kinder sind schließlich von Natur aus neugierig und experimentierfreudig.

Haben Sie es als Kind auch gehasst, wenn man Sie nicht ernst genommen hat? Oder die Erwachsenen haben über einen geredet, als wäre man nicht anwesend? Das mögen Kinder generell, also auch heutzutage nicht.

Entsprechend müssen Äußerungen der Kinder wahr und vor allem ernst genommen werden. Das gilt insbesondere für Schmerzen oder Ängste. Für Ablenkung kann die Frage nach Geschwistern oder Erlebnissen sorgen.

- **Melzack und Wall beschrieben bereits 1965, dass die Weiterleitung und Wahrnehmung von Schmerzreizen gehemmt werden kann. Entsprechend der Gate-Control-Theorie erfolgt die Weiterleitung von peripheren Schmerzen im Rückenmark letztendlich durch ein einziges Neuron, welches wie ein Tor wirkt. Die Weiterleitung an das Gehirn kann gehemmt werden, in dem man z. B. abgelenkt ist oder lachen muss, da dadurch wiederum andere Neurone und körpereigene Stoffe (z. B. Serotonin) aktiviert werden.**

Hat der kleine Patient die Untersuchung gut hinter sich gebracht, darf natürlich Lob nicht vergessen werden. Wer weiß, vielleicht steht er ja bald wieder vor der Tür.

Jugendliche Jugendliche befinden sich am Übergang zwischen Kindern und Erwachsenen, was eine sehr schwierige Lebensphase darstellt. Wie geht man am besten auf einen Teenager zu?

Auch hier gilt wieder: einfühlsam sein, Gefühle akzeptieren und alle Vorgänge erklären. In diesem Alter kann das Schamgefühl stark ausgeprägt sein. Entsprechend ist besonders auf die Achtung der Privatsphäre zu achten.

Und daran denken: „Mit 12 ist man schließlich kein Kind mehr!“.

11.8 Gesund bleiben im MTRA-Beruf

T. Hartmann

„Lange halte ich das nicht mehr durch“, klagt Susanne und hält sich den Rücken. Sie ist gemeinsam mit ihrer Kollegin Birgit im Pausenraum der Strahlentherapie. „Wenn das so weiter geht mit der Heberei suche ich mir einen anderen Job. Oder ich gehe früher in Rente und verzichte auf ein paar Euro. Hast du keine Probleme damit?“

„Nein“, antwortet Birgit. „Ich gehe regelmäßig zur Rückenschule und zum Schwimmen. Mich machen manche Patientenschicksale fertig. Wenn ich so wie heute eine junge Frau bestrahlen muss, die meine Tochter sein könnte. Ich denke dann, so ein bisschen Rückenschmerzen sind nicht so schlimm.“

In diesem Moment geht die Tür auf und ein aufgebrachter Robert betritt den Raum. „Die spinnen doch! Was sollen wir denn noch alles machen? Die Arbeit wird immer mehr und das Personal immer weniger. Glauben die denn, dass wir uns hier langweilen?“

Die kurze Szene zeigt, dass es zahlreiche Aspekte gibt, welche zu beruflichen Belastungen beitragen. Langfristig können schlechte Arbeitsbedingungen zu Kündigung oder Krankheit führen.

Nicht nur MTRA, sondern auch Arbeitgeber, Krankenkassen und Rentenversicherungen wünschen sich gesunde und zufriedene Arbeitnehmer. Sicher aus Kostengründen, aber dafür lassen sich diese Vertreter die Gesundheit auch etwas kosten, denn fehlende Gesundheit kostet. Das ist mehr als ein Wortspiel, wie die nachfolgenden Beispiele der beruflichen Gesundheitsförderung zeigen werden.

Doch zunächst beschäftigen wir uns mit der Frage, was im Job überhaupt krank machen kann.

11.8.1 Belastungen im MTRA-Beruf

Der MTRA-Beruf ist ein sehr verantwortungsvoller Beruf, der sich durch den engen Kontakt zu Patienten und der Verwendung hochkomplexer technischer Geräte auszeichnet. Hinzu kommt die Stellung innerhalb der Patientenversorgung. Im Bereich der Diagnostik sind MTRA die „Schnittstelle“ zu allen medizinischen Versorgungsbereichen. In der The-

rapie betreuen MTRA häufig Patienten, die sich in einer Ausnahmesituation befinden, da es sich i. d. R. um lebensbedrohende Erkrankungen (Unfälle, Polytrauma, Tumorerkrankungen) handelt.

In diesem Kapitel werden mögliche Belastungen aus dem Umgang mit ionisierender Strahlung nicht behandelt, da dieses Thema andernorts sehr ausführlich beschrieben wird.

Somit entsteht ein multifaktorielles Belastungsgefüge, dem sich die Berufsangehörigen stellen müssen. Wie gut die Anpassung und Bewältigung an die Belastungen funktioniert, ist sehr individuell und hängt ebenfalls von vielen verschiedenen Faktoren, wie ein Zufriedenheitsgefühl und einem stabilen sozialen Umfeld, ab. Wer privat unglücklich ist, nimmt das Gefühl auch mit in den Job.

Aus Sicht des Arbeitsschutzes können Belastungen aus folgenden Faktoren heraus entstehen:

1. Der Arbeitsplatz ist ungünstig gestaltet und ausgestattet. Das können z. B. eine bedrückende Raumgestaltung oder fehlende Aufenthaltsräume sein.
2. Es kann zu Belastungen im Umgang mit Chemikalien oder durch physikalische Faktoren kommen. Das gehört auch der Umgang mit infektiösen Patienten, von denen eine Gefahr für die Gesundheit der Mitarbeiter ausgehen kann, z. B. Hepatitis.
3. Am Arbeitsplatz fehlen Hilfsmittel, z. B. zum rückengerechten Arbeiten, oder dieser werden nicht angewendet.
4. Die Arbeitszeitmodelle sind so gestaltet, dass nur wenige Möglichkeiten für das Privatleben bleiben. Oder Arbeitsprozesse sind ungünstig und ineffektiv.
5. Die Mitarbeiter fühlen sich entweder ungenügend geschult und qualifiziert, oder es fehlen Informationen zu Arbeitsabläufen.

Arbeitsbedingte Belastungen für MTRA entstehen aus dem Zusammenwirken von organisatorischen und materiellen Rahmenbedingungen, wirtschaftlichen Strategien und nicht zuletzt der Qualifikation und Ressourcen der Mitarbeiter sowie der persönlichen Einstellung zur beruflichen Tätigkeit.

Zu den Ressourcen der MTRA gehören u. a.

- körperliches und seelisches Wohlbefinden
- Motivation

- Qualifikationen und Berufserfahrung
- Wertschätzung und Anerkennung
- Entscheidungsbefugnisse bzw. Handlungsspielräume
- soziale Unterstützung, Pausen und Erholung

Gelingt die Anpassung, insbesondere an die psychischen Belastungen nicht, kommt es langfristig zu Demotivation und Unzufriedenheit, der Mitarbeiter leistet „Dienst nach Vorschrift“. Irgendwann kann es dann zu Gesundheitsstörungen und damit verbundenen Fehlzeiten kommen.

Die Folge ist eine „Innere Kündigung“, der Mitarbeiter ist nicht mehr bereit sich für seinen Arbeitgeber einzusetzen, entwickelt keine Ideen mehr und die Ausfallzeiten erhöhen sich.

Eine Wirtschaftsstudie (Gallup-Studie 2005) bezifferte die Verluste in deutschen Unternehmen durch „innere Kündigung“ auf **250 Milliarden € pro Jahr**.

Es lohnt sich demnach für die Arbeitgeber in die Gesundheit und Arbeitszufriedenheit ihrer Mitarbeiter zu investieren.

In medizinischen Einrichtungen werden viele Maßnahmen zur Gesunderhaltung der Mitarbeiter durchgeführt. Inwiefern diese zur Vermeidung der „Inneren Kündigung“ beitragen, liegt allerdings auch beim Führungsstil des Unternehmens bzw. der jeweiligen Abteilung und der Bereitschaft des Mitarbeiters diese wahrzunehmen.

Hier werden Maßnahmen besprochen, die unabhängig vom Führungsstil des Vorgesetzten sind und sich in erster Linie mit der Ausstattung des Arbeitsumfeldes beschäftigen.

11.8.2 Hautschutz

Das wichtigste Arbeitsmittel der MTRA sind die Hände. Geräte werden damit bedient und vor allem die Patienten versorgt. Die Hände sind auch die ersten Übertragungswege für Infektionen und müssen daher „ständig“ desinfiziert werden. Daher muss dem Hautschutz der Hände besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Chronische Hauterkrankungen können bis zur Berufsunfähigkeit führen, wenn Pflege- und Schutzmaßnahmen fehlen.

Zu den wichtigsten Maßnahmen gehören:

- Keinen Schmuck tragen, da sich darunter Feuchtigkeit, Seifenrückstände, Keime befinden können, welche die Haut angreifen. Außerdem wird das Eincremen erschwert.
- Auf Piercings und Tattoos in zu desinfizierenden Bereichen verzichten, da die Haut an diesen Stellen besonders empfindlich ist.
- Nasse Hände über einen längeren Zeitraum vermeiden, besonders unter Handschuhen o. ä.
- Hände desinfizieren statt waschen, um den Säureschutzmantel der Haut zu schützen.
- Hautpflege am Arbeitsende (Hautcremes ohne Zusatzstoffe) – am Arbeitsplatz sollte idealerweise ein Hautschutzplan aushängen.

Wenn man auf bestimmte Arbeitsmittel oder Stoffe (Latexhandschuhe, Seifen) mit Hautreizungen reagiert, ist i. d. R. der Arbeitgeber dafür verantwortlich, das Arbeitsumfeld so zu gestalten, dass solche Reizungen nicht mehr auftreten können.

➤ **Sollten Hautreizungen, Ekzeme oder Allergien auftreten, ist der Arbeitgeber zu informieren und eine Haut- oder betriebsärztliche Behandlung einzuleiten.**

11.8.3 Rückengerechtes Arbeiten

Erkrankungen des muskuloskelettalen Systems, zu dem auch der Rücken gehört, führen deutschlandweit zu den höchsten Kosten im Gesundheitswesen. Diagnostik und Therapie sind langwierig und führen nicht selten dazu, dass man den erlernten Beruf verlassen muss. Das ist nicht nur bei Handwerkern oder Möbelschleppern so. Gerade im Gesundheitswesen, in dem viel Gehoben werden muss, wird auf die Vermeidung von Rückenerkrankungen viel Wert gelegt.

Rückenbeschwerden haben häufig vielfältige Ursachen, die sich gegenseitig beeinflussen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass man nicht mit Einzelmaßnahmen versucht, den Rücken zu stärken, sondern langfristig und kontinuierlich Maßnahmen durchgeführt werden, für die Arbeitgeber und Mitarbeiter gleichermaßen verantwortlich sind.

Zu diesen Maßnahmen gehören:

1. Technische/bauliche Maßnahmen wie
 - höhenverstellbare Betten und Untersuchungstische,
 - höhenverstellbare Stühle an Arbeitsplätzen, in denen im Sitzen gearbeitet wird,
 - Monitore, Schaltpulte sind auf ergonomischen Höhen angebracht,
 - Rollboards und Lagerungshilfen zur Umlagerungen der Patienten auf den Untersuchungstisch.
2. Organisatorische Maßnahmen, z. B.
 - Fortbildungen, Unterweisungen im ergonomischen Heben und Arbeiten,
 - Angebot von Rückengymnastik in der Klinik oder Kooperation mit einem Fitnessstudio (z. B. ermäßigter Eintritt für Mitarbeiter),
 - Personalschlüssel, Arbeitszeiten, Arbeitsabläufe.
3. Persönliche Maßnahmen, z. B.
 - Nutzung der vorhandenen Hilfsmittel,
 - Umsetzung rückengerechter Techniken,
 - Aktivierung der Patienten zur Mithilfe (gleichzeitig gut zur Mobilisation der Patienten!!),
 - Tragen geeigneter Arbeitsschuhe,
 - Bereitschaft zu und Teilnahme an angebotenen Schulungsmaßnahmen, Sportangeboten etc.

➤ **Einmal bestehende Fehlhaltungen und Rückenbeschwerden wieder loszuwerden, ist ein langwieriger und anstrengender Prozess, den man sich häufig ersparen oder wenigstens hinauszögern kann.**

11.8.4 Stressbewältigung

Wie bereits beschrieben, führt Stress nicht nur zur Unzufriedenheit im Beruf, sondern kann auch krank machen oder sogar zur Berufsunfähigkeit führen. Aber Stress ist nicht gleich Stress.

Man unterscheidet Eustress (Eu- = „gut“) und Distress (Dis- = „schlecht“).

Eustress ist eine Form der positiven Belastung, durch welche z. B. die Leistungsfähigkeit gesteigert

wird. Sportler kennen das vor einem großen Wettkampf und empfinden den dadurch entstehenden Druck als hilfreich oder befriedigend. Auch die Planung einer großen Feier, auf die man sich richtig freut, ist stressig, macht aber gleichzeitig Spaß.

Disstress hingegen wird besonders durch externen Leistungs- oder Zeitdruck ausgelöst und führt zu einer unangenehmen Belastung. Die negativen Folgen sind Erkrankungen wie z. B. das Burnout-Syndrom.

Zu den stressauslösenden Faktoren gehören u. a. Schichtarbeit, Auseinandersetzungen mit Patienten, Angehörigen und Kollegen sowie der Leistungsdruck und eine zunehmende Arbeitsverdichtung durch den steigenden Kostendruck im Gesundheitswesen. Auch wer glaubt ein „dickes Fell“ zu besitzen und sich durchsetzen zu können, ist langfristig nicht vor den Auswirkungen von Stress gefeit. Anzeichen dafür sind Schlafstörungen, chronische Erschöpfungszustände bis hin zu Depressionen, aber auch dauerhafte Rückenbeschwerden oder eine Suchtfahr.

Der wichtigste Faktor zur Vermeidung von Stresssymptomen ist eine positive, innere Grundeinstellung. Immerhin nehmen MTRA eine sehr verantwortungsvolle Tätigkeit wahr, die nicht einfach von jemand anderem übernommen werden kann. Der Beitrag an der Patientenversorgung kann nicht hoch genug eingeschätzt werden, auch wenn der Beruf vergleichsweise unbekannt ist. Noch immer gilt: „Ohne MTA keine Diagnostik und ohne Diagnostik keine Therapie“.

Ein zweiter Aspekt, der mit der inneren Grundeinstellung zu sich selbst in engem Zusammenhang steht, ist die Erkenntnis, dass man sich selbst in vernünftigem Maß abgrenzen muss. Natürlich möchte jeder seine Arbeit so gut wie möglich machen. Aber dabei darf man sich nicht selbst verlieren. Das bedeutet, dass man nicht jede Tätigkeit selbst ausführen muss oder, um die anderen Kollegen nicht zu belasten, keine Hilfe in Anspruch nimmt. Damit überfordert man sich selbst und bringt sich an seine Belastungsgrenzen. Damit ist den Kollegen noch viel weniger geholfen.

Und auch die Selbstpflege spielt eine große Rolle. Sich selbst etwas Gutes tun, ausreichend schlafen und entspannen, eventuell mithilfe von Entspannungstechniken wie Yoga, kann Wunder

wirken. Viele Einrichtungen bieten inzwischen solche Seminare oder Kurse für ihre Mitarbeiter an.

Ebenso gehört dazu die ausgewogene Ernährung und Aktivitäten mit Freunden oder der Familie. Aber Achtung: auch Freizeit kann stressen, wenn man z. B. jedes Wochenende endlos auf Tanzparties unterwegs ist und am Montag erschöpft zum Dienst erscheint.

Für weiteres Stresspotenzial im Arbeitsleben sorgen ungünstige Voraussetzungen im Arbeitsablauf, die man aber durch gemeinsame Gespräche im Team und mit den Vorgesetzten häufig lösen oder zumindest verbessern kann. Dazu gehören z. B. Pausenregelungen, Dienstplangestaltung und Gestaltung der einzelnen Arbeitsabläufe. Auch Fort- und Weiterbildungen können zur Stressprävention beitragen, da man neue Fähigkeiten erwirbt, die man dann im Arbeitsalltag einbringen kann.

Nicht zuletzt sorgen Auseinandersetzungen und Konflikte mit Kollegen oder schwierige Situationen mit Patienten zu einer Erhöhung des Stresspegels. Hier hilft reden, reden, reden.

Konflikte gehören zum Arbeitsleben dazu und können sogar hilfreich sein, wenn sie wie ein „reinigendes Gewitter“ wirken und auf Probleme überhaupt erst aufmerksam machen. Wichtig ist die sachliche Diskussion im Team, wobei sich alle Beteiligten an Kommunikationsregeln halten sollten. Dazu gehört das Ausreden lassen ebenso wie die Achtung der Persönlichkeit jedes Einzelnen. Eine Prise Diplomatie und Humor haben dabei auch noch nie geschadet.

Nach schwierigen Situationen können ebenfalls Gespräche mit Kollegen oder sogar professionellen Beratern helfen. In einigen Einrichtungen hat sich die Maßnahme der **Supervision** durchgesetzt. Bei dieser Form der Beratung hilft ein Supervisor dabei, das eigene Handeln zu reflektieren, aufzuarbeiten und zu verbessern. Supervisionen finden immer mit mehreren Teammitgliedern statt, wobei jeder die Möglichkeit hat, erlebte, belastende Situationen zu schildern und mithilfe aller anderen zu analysieren.

Eine weitere Möglichkeit der Aufarbeitung ist der Besuch von Beratungsstellen, z. B. beim betriebsärztlichen Dienst. Auch das wird inzwischen von vielen Arbeitgebern angeboten.

➤ Anzeichen für gesundheitsschädigenden Stress:

- Man ist schnell gereizt und genervt.
- Entspannung und Faulenzen fällt schwer – auch in der Freizeit muss ständig „etwas getan werden“.
- Schlafstörungen
- Konzentrationsschwächen, z. B. bei Gesprächen nicht mehr zuhören können
- innerliches „Gehetzt sein“
- Dinge, die immer Spaß gemacht haben, bereiten keine Freude mehr.
- Vernachlässigung von Familien und Freunden
- Rückzug in sich selbst, ausschließen der Außenwelt

➤ Es sollte ein persönliches Anliegen jedes/r MTRA sein „Fit for Job“ zu bleiben und seine Gesundheit zu schützen. Schließlich möchte man ja auch die „Früchte seiner Arbeit“ noch genießen können.

In Kürze

- Das Gesundheitswesen in Deutschland ist in einen stationären und einen ambulanten Sektor unterteilt, welche verschieden finanziert werden. Zusätzlich unterscheidet man zwischen gesetzlich und privat krankenversicherten Patienten.
- Als MTRA nimmt man eine zentrale Rolle im Gesundheitswesen ein und ist damit Teil des therapeutischen Teams eines Patienten. Durch eine funktionierende Teamarbeit können verschiedene Kompetenzen zum Wohle des Patienten kombiniert werden, allerdings hat sie auch ihre Tücken und fordert u. U. Kompromissbereitschaft.
- Innerhalb der gesundheitlichen Versorgung werden die Begriffe „Gesundheit und Krankheit“ definiert. Das Erleben von Gesundheit und Krankheit ist individuell für jeden Menschen. Unabhängig davon kann man pathologische Vorgänge, die zu einer Erkrankung führen, beschreiben.

- In allen Einrichtungen zur medizinischen Versorgung steht, neben Diagnostik und Therapie, der Schutz von Patient und Personal durch die Einhaltung von Hygieneregeln im Mittelpunkt der Bemühungen, da in den letzten Jahren eine Zunahme nosokomialer Infektionen zu verzeichnen ist.
- Bei allen fachlichen Bemühungen sind stets der psychische Ausnahmezustand von Patienten und die empathische Wahrnehmung ihrer Bedürfnisse bei der täglichen Arbeit der MTRA zu beachten.
- Und auch Berufsangehörige selbst können ihrer Tätigkeit auf einem hohen qualitativen Niveau nur dann lange nachgehen, wenn sie auf ihre persönliche Gesundheit achten.

Literatur

- Baltz HJ, Spieß E (2009) Kooperation in sozialen Organisationen. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, S 97
- Bardé B, Matke D (1993) Therapeutische Teams. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, S 77
- BGR 250/TRBA 250 – BGW-Regeln der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege, Stand 2007 Deutschen Gesellschaft für Krankenhaushygiene e. V.
- DIE WELT online, 2.3.14, „Gesund pflegen – gesund bleiben“, Broschüre der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege, Stand 3/2011
- Döhnert M (2009) Möglichkeiten und Grenzen der interdisziplinären Teamarbeit, 28.10.13
- Gebert D, von Rosenstiel L (2002) Organisationspsychologie, 5. Aufl. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, S 141
- Gieseke S (2014) 19.000 tödliche Behandlungsfehler, in Ärztezeitung online, 21.1.2014
- Huch R, Bauer C (Hrsg) (2003) Mensch, Körper, Krankheit, 4. Aufl. Urban & Fischer Verlag, München, Jena
- Klischies R, Panther U, Singbeil-Grischkat V (2008) Hygiene und medizinische Mikrobiologie, 5. Aufl. Schattauer, Verlag
- Meyer R (Hrsg) (2007) Allgemeine Krankheitslehre kompakt, 10. Aufl. Verlag Hans Huber, Bern
- Oppelt B (2010) Pädiatrische Radiologie für MTRA/RT, 1. Aufl. Thieme Verlag, Stuttgart
- Robert-Koch-Institut, www.rki.de
- Synowzik I (2012) Hygiene im radiologischen Alltag. Radiologietechnologie 25(1): S. 9–13
- Vlachou I (2014) Infektion und Hygiene. MTA-Dialog 2014(3):15
- Watzlawick P et al (1969) Menschliche Kommunikation. Huber, Bern Stuttgart Wien

Literatur

Zeyfang A et al (2013) Basiswissen Medizin des Alterns und des alten Menschen. Springer Medizin, Berlin, Heidelberg, New York

Zilles K, Tillmann K (2010) Anatomie. Springer Medizin Verlag, Heidelberg

<http://www.enzyklo.de>, 28.10.13

<http://definition-online.de>, 28.10.13

<http://www.medizinische-fachangestellte.eu>, 28.10.13

Diagnostik und medizinische Anwendungen

- Kapitel 12 Diagnostik und Therapie – allgemein – 353**
T. Hartmann, M. Kahl-Scholz
- Kapitel 13 Muskuloskelettales System – 409**
M. Kahl-Scholz, I. Offenhäusser, C. Vockelmann
- Kapitel 14 Herz und Blutgefäße – 427**
U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Vockelmann
- Kapitel 15 Diagnostik und Therapie – Neurologie – 441**
*U. Blum, D. Dohr, M. Kahl-Scholz,
C. Marks, C. Vockelmann*
- Kapitel 16 Diagnostik und Therapie – Kopf/Hals – 461**
U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Marks, C. Vockelmann
- Kapitel 17 Diagnostik und Therapie –
Respiratorisches System – 471**
J. Thiele, I. Offenhäusser, C. Vockelmann
- Kapitel 18 Diagnostik und Therapie –
Gastrointestinales System – 483**
U. Blum, D. Dohr, M. Kahl-Scholz, C. Vockelmann
- Kapitel 19 Diagnostik und Therapie – Urogenitales System – 507**
U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Marks, C. Vockelmann
- Kapitel 20 Diagnostik und Therapie – Gynäkologie – 523**
*U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Marks,
J. Thiele, C. Vockelmann*

- Kapitel 21 Diagnostik und Therapie –
Endokrinologisches System – 539**
D. Dohr, I. Offenhäusser, C. Marks, C. Vockelmann
- Kapitel 22 Diagnostik und Therapie –
Lymphatisches System – 555**
M. Kahl-Scholz, I. Offenhäusser, J. Thiele, C. Vockelmann
- Kapitel 23 Diagnostik und Therapie – Haut und
Hautanhangsgebilde – 571**
U. Blum, D. Dohr C. Vockelmann

Diagnostik und Therapie – allgemein

T. Hartmann, M. Kahl-Scholz

- 12.1 Einführung in die medizinische Fachsprache – 354**
- 12.2 Topographische Anatomie – 361**
 - 12.2.1 Grundlagen – 362
 - 12.2.2 Obere Extremität/Rumpf – 364
 - 12.2.3 Untere Extremität – 377
 - 12.2.4 Situs – 383
 - 12.2.5 Kopf und Hals – 391
 - 12.2.6 ZNS – 397
 - 12.2.7 Wichtige Gefäßbahnen auf einen Blick – 398
- 12.3 Voraussetzungen zu Diagnostik und Therapie – 401**
 - 12.3.1 Anamnese – 402
 - 12.3.2 Klinische Untersuchung – 402
 - 12.3.3 Aufklärung – 403
 - 12.3.4 Anleitung des Patienten zur Untersuchung – 405
- 12.4 Besonderheiten in der Pädiatrie – 405**
 - 12.4.1 Anatomie und Strahlenempfindlichkeit bei Kindern – 405
 - 12.4.2 Proportionen und Wachstum – 405
 - 12.4.3 Dichteverhältnisse – 405
 - 12.4.4 Strahlensensibilität – 406
 - 12.4.5 Angewandter Strahlenschutz – 406
- Literatur – 408**

Sie haben endlich Urlaub und sind spontan für zwei Wochen nach Lanzarote geflogen, um sich von der stressigen Prüfungsphase der letzten Tage zu erholen. Am dritten Tag gehen Sie früh am Morgen am Strand spazieren, sehen aufs Meer und stolpern über einen Lavastein. Sie fallen unglücklich mit dem Unterarm auf den harten Kieselstrand und spüren umgehend einen scharfen Schmerz, der Ihnen die Tränen in die Augen treibt und die Luft nimmt. Keuchend, und den Arm in Schonhaltung an ihren Körper gepresst, schaffen Sie es so gerade, sich hinzusetzen. Ein Einheimischer, der den Unfall gesehen hat, kommt zu Ihnen gerannt und fragt auf Spanisch, ob alles in Ordnung ist. Vor Schmerzen laufen Ihnen die Tränen über das Gesicht. Da Sie kein Spanisch sprechen, versuchen Sie sich dem Mann auf Englisch verständlich zu machen, aber er kann kein Wort verstehen. Er scheint aber zu begreifen, dass Sie sich ernstlich verletzt haben und fragt „Ambulancia?“. Sie nicken schwach und haben das Gefühl, gleich das Bewusstsein zu verlieren. Der Mann stützt Sie am gesunden Arm und bringt Sie mit seinem Auto zum nächstgelegenen Krankenhaus. In dem sehr kleinen Haus versteht man aber ebenfalls kein Englisch. Man begreift zwar, dass etwas mit Ihrem Arm nicht zu stimmen scheint, kann aber die Pathologie nicht genau einordnen. Als Sie in die Röntgenabteilung geführt werden, fällt Ihnen plötzlich wieder ein, dass Sie kurz vor Ihrem Urlaub bereits Terminologie und Anatomie in Ihrer Ausbildung hatten und plötzlich wissen Sie, wie Sie sich verständlich machen können....

? Was sagen Sie dem spanischen Personal?

12.1 Einführung in die medizinische Fachsprache

M. Kahl-Scholz

Die medizinische Fachsprache setzt sich hauptsächlich aus griechischen und lateinischen Begriffen zusammen. Häufig bildeten griechische Begriffe die Grundlage, die dann in die lateinische Sprache übersetzt wurden. Das liegt daran, dass die Wurzeln der Medizin vor allem im klassischen Altertum zu finden sind. Natürlich gibt es mittlerweile für jedes Land die entsprechenden Übersetzungen, aber der Ursprung, die „Terminologica anatomica“, ist geblie-

ben und ermöglicht allen im Gesundheitsbereich tätigen Personen über Sprachhindernisse hinweg auf eine gemeinsame medizinische Fachsprache zurückgreifen zu können.

Im Folgenden sind einige wichtige medizinische Begriffe nach Bereichen in Tabellen dargestellt, um das Lernen zu erleichtern (■ Tab. 12.1–12.4), wobei vor allem ein Schwerpunkt auf das knöcherne Skelett gelegt wurde (■ Tab. 12.3). Die rechte Spalte enthält eine kurze „Übersetzung“ bzw. Erklärung, was der Begriff bedeutet – manchmal hilft dieses Wissen, um sich eine Eselsbrücke bauen zu können. Manche Begriffe, wie z. B. Fibula (das Wadenbein), haben ihre Benennung aufgrund ihrer Form erhalten. Da kann es durchaus hilfreich sein zu wissen, dass Fibula in der direkten Übersetzung „Spange, Klammer“ heißt, denn ein wenig erinnert dieser Knochen an eine derartige Form.

➤ **Bedenken Sie, dass bei den hier aufgeführten Begriffen nur eine Auswahl dargestellt ist und kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird. Es lohnt sich in jedem Fall, für den Unterricht ein kleines Vokabelbuch parat zu haben, in dem Sie neu hinzukommende Begriffe vermerken.**

Um sich die Richtungsbegriffe besser vorstellen zu können, zeigt ■ Abb. 12.1 die wichtigsten Bezeichnungen direkt am Menschen.

Wer zuerst kommt....

Wer in der Wissenschaft als erster etwas entdeckt, hat auch das Recht, seiner Entdeckung einen Namen zu geben. Einige wissenschaftliche Entdeckungen wurden unabhängig voneinander, aber von unterschiedlichen Wissenschaftlern mehrfach gemacht, ohne dass zunächst klar war, dass es sich um ein und dieselbe Entdeckung handelte. Das ist teilweise der Grund, warum es für einige Krankheiten etc. mehrere Bezeichnungen, sog. Synonyme gibt. Und auch einer der Gründe dafür, dass man sich 1895 in Basel auf eine gemeinsame grundlegende Nomenklatur einigte: die „Terminologia Anatomica“.

■ **Tab. 12.1** Allgemeine Lage- und Richtungsbezeichnungen*

Begriff	Bedeutung	Übersetzung/Ursprung
Rumpf		
Kranial (cranial) oder superior	Zum Kopfende hin	Cranion = Schädel
Kaudal (caudal) oder inferior	Zum Steißende hin	Cauda = Schwanz
Ventral oder anterior	Zur vorderen Bauchwand (nach vorne) hin	Venter = Bauch
Dorsal oder posterior	Zum Rücken (nach hinten) hin	Dorsum = Rücken
Medial	Zur Mittel (Median-)ebene hin	Medius = in der Mitte befindlich
Median	Innerhalb der Mittel (Median-)linie	Medianus = genau in der Mitte liegend
Lateral	Seitlich der Mittel (Median-)linie	Latus = Seite, Flanke
Zentral	Zum Körperinneren hin	Zentral = im Mittelpunkt, den Mittelpunkt bildend
Peripher	Zur Körperoberfläche hin	Peripheres = sich herum bewegend, kreisförmig
Gliedmaßen (Arme, Hände, Beine und Füße)		
Proximal	Zum Rumpf hin	Proximus = Nächster
Distal	Zum Ende der Gliedmaßen hin	Distalis = körperfern
Ulnar – medial	Zur Elle (Ulna) hin	Ulna = Elle
Radial – lateral	Zur Speiche (Radius) hin	Radius = Strahl, Speiche
Tibial – medial	Zum Schienbein (Tibia) hin	Tibia = Schienbein
Fibular – lateral	Zum Wadenbein (Fibula) hin	Fibula = Heftnadel, Spange, Klammer
Palmar – volar	Zur Handinnenfläche hin	Palma = Handfläche
Plantar	Zur Fußsohle hin	Planta = Fußsohle
Anterior	Zur Vorderseite hin	Ante = vorn, vorwärts
Posterior	Zur Rückseite hin	Post = hinten, nach
Kopf		
Rostral	Nach vorn gelegen	Rostralis = „Schnabelwärts“, in Richtung Mund
Frontal	Zur Stirn hin	Frons = Stirn
Nasal	Zur Nase hin	Nasus = Nase
Basal	Zur Schädelbasis hin	Basis = Basis, Grundlage
Okzipital (Occipital)	Zum Hinterhaupt hin	Occiput = Hinterhaupt
Allgemein		
Dextra/dextrum	Rechts	Id.**

* Mod. nach Zilles, Tillmann 2010

**Id. = Idem („dasselbe“ – wie in der Spalte zuvor)

■ **Tab. 12.1** (Fortsetzung) Allgemeine Lage- und Richtungsbezeichnungen*

Begriff	Bedeutung	Übersetzung/Ursprung
Sinistra/sinistrum	Links	Id.**
Achsenbezeichnungen		
Vertikal	Senkrecht, lotrecht; Scheitel-linig	Vertex = Scheitel
Longitudinal	Längs verlaufend	Longitudinalis = längs gerichtet, verlaufend
Transversal	Quer verlaufend	Transversus = uquer liegend, verlaufend
Sagittal	Von ventral nach dorsal, Pfeilrichtung	Sagitta = Pfeil
Ebenen		
Median	s. o.	s. o.
Sagittal	s. o.	s. o.
Frontal	s. o.	s. o.
Transversal	s. o.	s. o.

* Mod. nach Zilles, Tillmann 2010

**Id. = Idem („dasselbe“ – wie in der Spalte zuvor)

■ **Tab. 12.2** Bewegungsbegriffe*

Begriff	Bedeutung	Übersetzung/Ursprung
Extension	Streckung	Extensor = Strecker
Flexion	Beugung	Flexor = Beuger
Retroversion	Rückwärtsneigung	Retro = zurück, rückwärts, verteo = wenden
Anteversion	Vorwärtsneigung	Ante = vorn, vorwärts, verteo = wenden
Lateroversion	Seitneigung	Latus = Seite, Flanke, verteo = wenden
Abduktion	Wegführen der Gliedmaßen vom Körper weg	Abducens = wegführend, zur Seite spreizend
Adduktion	Hinführen der Gliedmaßen zum Körper hin	Adductor = heranführend
Rotation	Innen- und Außendrehung um die vertikale Achse	Rotatio = Drehung
Zirkumduktion	Umführung	Circum = ringsum

* Mod. nach Zilles, Tillmann 2010

Tab. 12.3 Grundlegende Begriffe der Anatomie

Begriff	Bedeutung	Übersetzung/Ursprung
Allgemein		
Nervus (N.), Mehrzahl Nervi (Nn.)	Nerv	Nervus = Nerv, Sehne
Arteria (A.), Mehrzahl Arteriae (Aa.)	Arterie	Arteria = Pulsader, Luftröhre
Vena (V.), Mehrzahl Venae (Vv.)	Vene	Vena = Ader, Blutader, Saugader
Ramus (R), Mehrzahl Rami (Rr.)	Ast	Id.*
Fascia	Faszie (Muskelbinde)	Fascia = Binde, Band
Musculus (M.), Mehrzahl Musculi (Mm.)	Muskel	Musculus = Muskel
Ligamentum (Lig.), Mehrzahl Ligamenta (Ligg.)	Band	Id.*
Os	Knochen	Os = Mund, Öffnung, Knochen
Nodus (N.)	Knoten (z. B. Lymphknoten)	Id.*
Vasa	Gefäß (z. B. Vasa lymphatica)	Vas, vasis = Gefäß, Blutgefäß
Cavitas	Höhle (z. B. Cavitas oris)	Cavitas = Höhle, Hohlraum
Bursa	Beutel bzw. Schleimbeutel	Bursa = Beutel, Tasche
Articulatio	Gelenk (z. B. Articulatio cubiti)	Articulatio = Gelenk
Foramen	Loch, Öffnung	Id.*
Obere Extremität (► Abschn. 12.2.2) und Brustwand		
Sternum	Brustbein	Id.*
Clavicula	Schlüsselbein	Id.*
Scapula	Schulterblatt	Id.*
Costa	Rippe	Id.*
Humerus	Oberarmbein	Id.*
Ulna	Elle	Id.*
Radius	Speiche	Radius = Strahl, Speiche
Manus	Hand	Manus = Hand, eigentlich Arm
Digitus manus	Finger	Digitus = Finger, Zehen
Pulmo	Lunge	Id.*
Cor	Herz	Cor, cordis = Herz
Thymus	Thymusdrüse	Thymos = Lebenskraft, Gemüt
Vertebra	Wirbel	Vertere = drehen, wirbeln
Columna vertebralis	Wirbelsäule	Columna = kleine Säule, Zäpfchen
Vertebrae cervicales	Halswirbel	Cervix = Hals, Nacken

*Id. = Idem („dasselbe“ – wie in den Spalten davor)

■ **Tab. 12.3** (Fortsetzung) Grundlegende Begriffe der Anatomie

Vertebrae thoracica	Brustwirbel	Thorax = Brustkorb
Vertebrae lumbalis	Lendenwirbel	Lumbus = Lende
Discus intervertebralis	Zwischenwirbelscheibe (Band-scheibe)	Discus = (Wurf-)Scheibe
Untere Extremität (► Abschn. 12.2.3)		
Os coxae	Hüftbein	Coxa, Coxae = Hüfte, Schenkelbein
Os ilium	Darmbein	Iliä, Ilium = Weiche, Unterleib, Eingeweide
Os ischii	Sitzbein	Ischium = Gesäß, Hüftgelenk
Os pubis	Schambein	Pubes = Scham, Schamgegend
Os sacrum	Kreuzbein	Sacer, sacra, sacrum = heilig, Heiligtum
Femur	Oberschenkelknochen	Id.*
Patella	Kniescheibe	Patella = Schale, Oberschale
Tibia	Schienbein	Tibia = Pfeife, Flöte
Fibula	Wadenknochen	Fibula = Spange, Klammer
Pedis	Fuß	Pes, pedis = Fuß
Digiti pedis	Fußzehen	Digitus = Finger, Zehen
Situs (► Abschn. 12.2.4)		
Ösophagus	Speiseröhre	Oiso = hereintragen, transportieren
Gaster	Magen	Gastrum = Magen, Bauch
Duodenum	Zwölffingerdarm	Duodenus = zwölfach
Jejunum	Leerdarm (Teil des Dünndarms)	Jejunus = nüchtern, leer
Ileum	Krummdarm (Teil des Dünndarms)	Eileo = winden, krümmen
Kolon	Dickdarm (Grimmdarm)	Kohlýein = zurückhalen
Appendix (vermiformis)	(Wurm-)Fortsatz	Appendix = Anhang, Anhängsel, Zugabe
Rectum	Enddarm, Mastdarm	Rectus = gerade
Hepar	Leber	Häpar = Leber
Vesica biliaris	Gallenblase	Biliosus = reich an Galle, vesica = Blase
Pankreas	Bauchspeicheldrüse	Pan = alles, krea = Fleisch, Drüsensubstanz
Splen (Lien)	Milz	Splän = Milz
Ren	Niere	Id.*
Glandula suprarenalis	Nebennieren	Supra = über
Ureter	Harnleiter	Oureéin = Harn lassen
Vesica urinaria	Harnblase	Urina = Harn

*Id. = Idem („dasselbe“ – wie in den Spalten davor)

Tab. 12.3 (Fortsetzung) Grundlegende Begriffe der Anatomie

Urethra	Harnröhre	Oureín = Harn lassen
Uterus	Gebärmutter	Udáram = Bauch
Vagina	Scheide	Vagina = Scheide des Schwertes
Prostata	Vorsteherdüse	Prostátäs = Vordermann, Beschützer
Penis	Glied, Schwanz	Pés = männliches Glied
Kopf und Hals (► Abschn. 12.2.5)		
Cranium	Schädel	Kranión = Schädel, Hirnschale
Os frontale	Stirnbein	Frons, frontis = Stirn, Stirnseite
Os ethmoidale	Siebbein	Ěthmos = Sieb
Maxilla	Oberkiefer	Id.*
Mandibula	Unterkiefer	Mandere = Kauen
Dens	Zahn	Dens, dentis = Zahn, Zinke
Os palatinum	Harter Gaumen	Palatum = Gaumen, pala = Wölbung
Viscerocranium	Gesichtsschädel	Kránion = Schädel, Hirnschale
Os nasale	Nasenbein	Nasus = äußere Nase
Os lacrimale	Tränenbein	Lacrima = Träne
Os zygomaticum	Jochbein	Zygón = Joch, Jochbein
Os sphenoidale	Keilbein	Sphän = Keil
Os occipitale	Hinterhauptbein	Occiput = Hinterhaupt
Os temporale	Schläfenbein	Tempus = Schläfe, Zeit
Os parietale	Scheitelbein	Paries = Wand
Oculus	Auge	Ocus = Auge, Augenhöhle
Os, oris	Mund	Os, oris = Mund, Eingang, Höhle
Auris	Ohr	Id.*
Lingua	Zunge	Lingere = lecken, schmecken
Gingiva	Zahnfleisch	Geng = Beule, Buckel
Parotis	Ohrspeicheldrüse	Id.*
Tonsilla	Mandel	Tónsles = dehnen, ausdehnen
Larynx	Kehlkopf	Id.*
Glandula thyroidea	Schilddrüse	Thyroideus = schildförmig
Trachea	Lufttröhre	Trachys = rau
ZNS (► Abschn. 12.2.6)		
Encephalon	Gehirn	Kephalé = Kopf
Zerebrum	Großhirn	Cerebrum = Hirn, Großhirn

*Id. = Idem („dasselbe“ – wie in den Spalten davor)

■ **Tab. 12.3** (Fortsetzung) Grundlegende Begriffe der Anatomie

Zerebellum	Kleinhirn	Cerebellum = kleines Hirn
Rhombencephalon	Rautenhirn	Rhombós = Raute
Thalamus	Sehhügel	Thálamós = Gemach, Höhle, Schlafgemach
Hypothalamus	Unterhalb des Thalamus gelegener Teil des Diencephalon	Hypó = unter
Diencephalon	Zwischenhirn	Diá = zwischen, durch
Mesencephalon	Mittelhirn	Mésos = Mitte
Glandula pinealis	Zirbeldrüse	Pinus = Fichte
Truncus encephali	Hirnstamm	Truncus = Stamm, Stock
Gyrus	Hirnwindung	Gyrós = Krümmung, Kreis, Windung
Lobus, Lobulus	Hirnlappen, -läppchen	Lobus = Lappen, Hülse
Ventriculus	Hirnkammer	Id.*
Liquor cerebrospinalis	Hirnflüssigkeit	Liquor = Flüssigkeit, flüssiger Zustand
Nn. Cranialis	Hirnnerven	Id.*
Meningen	Hirnhäute	Meéninx = Haut
Dura mater	Harte Hirnhaut	Durus = hart, Mater = Mutter, beschützende, ernährende Hülle
Arachnoidea	Spinnwebenhaut, mittlere Hirnhaut	Aráchne = Spinne
Pia mater	Weiche Hirnhaut	Mater = Mutter beschützende, ernährende Hülle
Medulla oblongata	Verlängertes Mark	Medulla = Mark, Innerstes; oblongatus = verlängert
Medulla spinalis	Rückenmark	Medulla = Mark, Innerstes
Nervi spinalis	Spinalnerven	Spina = Dorn, Rückgrat, Wirbelsäule
Sonstiges		
Cutis	Haut	Kýtos = Haut, Hülle
Pilus, Capillus	Haar	Pilus = einzelnes Haar
Unguis	Nagel	Unguis = Nagel, Krallen

*Id. = Idem („dasselbe“ – wie in den Spalten davor)

■ **Tab. 12.4** Begriffe der Krankheitslehre

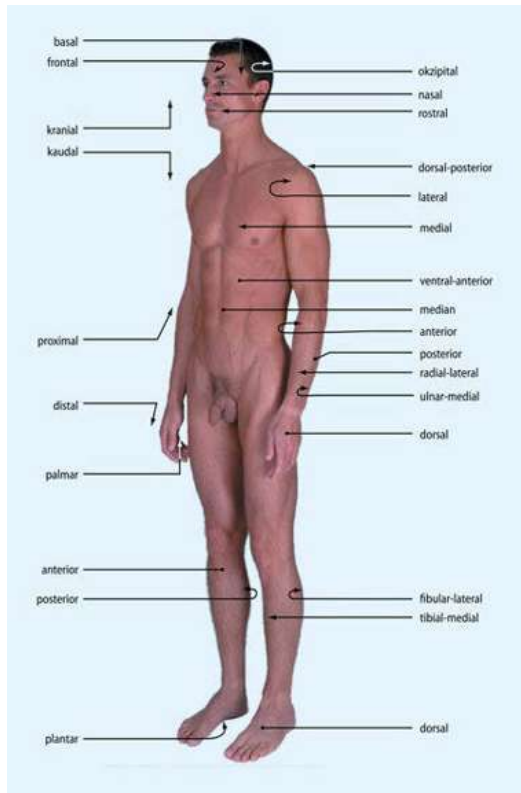
Begriff	Bedeutung	Übersetzung/ Ursprung
Pathologie	Krankheit, krankhaftes Geschehen	Pathos = Leiden
Tumor	Schwellung, Geschwulst	Id.*
Benigne	Gutartig	Benignus = gutartig, bonus = gut
Maligne	Bösartig	Malignus = bösartig
Karzinom	Bösartiger Tumor, Krebs	Karkinos = Krebs, namao = zerfressen
-itis, -itidis	Wortendung, die einen entzündlichen Vorgang beschreibt (z. B. Nephritis, Appendizitis)	
Trauma	Verletzung, Schädigung, Wunde	Trauma = Wunde

*Id. = Idem („dasselbe“ – wie in der Spalte davor)

12.2 Topographische Anatomie

M. Kahl-Scholz

Die Anatomie ist die Lehre davon, wie der (gesunde) menschliche Körper im Detail aufgebaut ist. Der Begriff kommt vom griechischen Wort „anateimnein“ („ana“ = auf; „tomos“ = Schnitt), was „zer-/aufschneiden“ oder „sezieren“ bedeutet (bevor es solche bildgebenden Möglichkeiten wie das konventionelle Röntgen oder die Computertomographie gab, war die einzige Möglichkeit, den menschlichen Körperbau zu erforschen, Leichen zu sezieren und so Stück für Stück zu begreifen, wie die unterschiedlichen Organe Organsysteme bilden und die Organsysteme untereinander zusammenhängen). Begründer der „modernen“ Humananatomie war Andreas Vesal (1514–1564).



■ **Abb. 12.1** Richtungen und Lagebezeichnungen. (Aus Zilles, Tillmann 2010)

Andreas Vesal (1514–1564)

Andreas Vesal lebte in den Niederlanden und studierte 1531 Medizin. Damals waren Sektionen an Leichen verboten und wirklich genaue Darstellungen gab es kaum. Vesal konnte sich damit nicht abfinden und wollte sich mit eigenen Augen über die Anatomie des Menschen Gewissheit verschaffen. Deshalb nahm er die Leiche eines Hingerichteten und erstellte daraus ein Skelett, das im Vergleich mit den ursprünglichen Lehren von Galenos Abweichungen zeigte.

Er führte erste öffentliche Sektionen durch und ermöglichte so auch anderen Studenten, die menschliche Anatomie mit eigenen Augen sehen und begreifen zu können.

Die Anatomie lässt sich in **unterschiedliche Betrachtungsweisen** einteilen:

- **Makroskopisch:** mit dem bloßen Auge oder der Lupe sichtbar
- **Mikroskopisch:** mithilfe von Mikroskopieverfahren sichtbar
- **Deskriptiv:** beschreibende Darstellung der gewonnen Erkenntnisse – also das,

was Sie hier gleich im Folgenden lesen können

- **Systematisch:** Zuordnung von Körperteilen in funktionelle oder entwicklungsgeschichtliche Gruppen
- **Topographisch:** räumliche Vorstellung über die Lage der Teile im Körper und über ihre Beziehungen zueinander – also das, was durch die Radiologie mittlerweile sehr gut dargestellt werden kann
- **Funktionell/klinisch:** Betrachtung der Organfunktionen/-systeme unter klinischer Gewichtung

Die folgenden Übersichten erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und stellen eine anatomische Auswahl dar, die vor allem das knöcherne Skelett und die inneren Organe einschließt. Sie ersetzt in keinem Fall einen ausführlichen anatomischen Atlas.

12.2.1 Grundlagen

Jeder fängt klein an...

Der Grundbaustein, mit dem Alles beginnt und der Alles ausmacht, ist meistens so klein, dass er mit dem bloßen Auge nicht mehr zu erkennen ist: die menschliche Zelle (**cellula** = Kämmerchen). Die meisten Zellen sind gerade mal 7–20 µm (also etwa 0,007–0,02 mm) groß, und nur die größeren Zellen, wie die Eizelle oder Knochenmarkriesenzellen mit einem Durchmesser von 0,1 mm, lassen sich so eben gerade mit dem Auge sehen.

Zellen bestehen aus der sie umgebenden **Membran**, dem Plasma mit den Zellorganen (die als „**Organellen**“ bezeichnet werden) und **Zelleinschlüssen** (z. B. dem Zytoskelett, das in seiner Funktion dem Skelett des menschlichen Körpers gleicht).

Ganz besonderer Bedeutung kommt dabei dem **Zellkern** zu, denn in ihm befindet sich die Erbinformation in Form der **Desoxyribonukleinsäure (DNA)**. Sie dient als Vorlage für viele Bausteine des menschlichen Körpers, wie z. B. Proteine und wird bei der Zellteilung repliziert. Bestimmte Zellen (Stamm- und Vorläuferzellen)

durchlaufen immer wieder einen neuen Zellzyklus, der neue Zellen hervorbringt, während alte absterben. Genau das stellt auch die Sollbruchstelle dar, wenn es um das Thema „Strahlenschäden“ geht.

Wenn die DNA bestrahlt wird....

Wenn ionisierende Strahlen auf die DNA-Doppelstränge treffen, können Veränderungen, sog. Mutationen an den Strängen auftreten. Diese reichen von Brüchen in den Doppelsträngen über den Angriff von freien Radikalen auf einzelne Bausteine der DNA bis hin zur Auflösung der Nucleotidbasen.

Wenn die geschädigte Zelle sich nun teilt und die DNA transkribiert wird, kann es aufgrund der Schäden entweder zum Zelltod oder zur Replikation einer defekten, mutierten DNA und damit auch Zelle kommen. Kommt es zum Zelltod, spricht man von **deterministischen Strahlenschäden** (akute Sofortschäden, nichtkanzeröse Spätschäden, teratogene Schäden). Ist die Mutation Folge der Bestrahlung, handelt es sich um **stochastische Strahlenschäden**, die meist erst Jahre später auftreten (z. B. Karzinome).

Es gibt viele unterschiedliche Zellformen im menschlichen Körper, die im Verbund dazu in der Lage sind, ein Gewebe, ein Organ und im Endeffekt ein Organ- oder Funktionssystem zu bilden.

Zusammen ist man stark

Die **4 Gewebehauptgruppen** sind:

1. das **Epithelgewebe** (Deckgewebe, das die Oberflächen des Körpers – auch die der Organe – schützend umschließt),
2. das **Binde- und Stützgewebe** (das die Form bestimmter Teile des Körpers ausmacht und ihren Zusammenhalt gewährleistet), z. B. kollagene Fasern, retikuläres Gewebe, Fettgewebe, aber auch Knorpelgewebe,
3. das **Muskelgewebe** (das die besondere Fähigkeit zum Zusammenziehen – der Kontraktion – hat), z. B. die glatte und quergestreifte Muskulatur,
4. das **Nervengewebe** (in dem viele variable Zellformen enthalten sein können).

Der Knochen

In der Radiologie waren die ersten Strukturen, die sich unter Röntgenbestrahlung besonders gut hervorhoben, die menschlichen Knochen.

Der Knochen kann als eigenständiges Organ betrachtet und in **verschiedene Typen** unterteilt werden:

1. **Platte Knochen**, wie sie z. B. den Schädel oder das Brustbein bilden
2. **Lange Röhrenknochen** (s. u.)
3. **Kurze Knochen**, wie sie an Hand und Fuß vorkommen
4. **Unregelmäßige Knochen**, z. B. Wirbel oder Knochenanteile der Schädelbasis

■ **Aufbau Röhrenknochen**

Der Röhrenknochen setzt sich aus den Gelenkenden (**Epiphysen**), dem Knochenschaft (**Diaphyse**), der Wachstumszone zwischen Schaft und den Knochenenden (die für die Zeit des Wachstums vorhanden ist und sich später schließt, was als **Epiphysenlinie** sichtbar bleibt) und den Ansätzen (**Apophysen**) für die Sehnen der Muskeln, die die Knochen durch ihre Kontraktion bewegen, zusammen.

Klassische Röhrenknochen sind der Oberarmknochen (Humerus) oder der Oberschenkelknochen (Femur).

■ **Leichtbauprinzip**

So kompakt der Knochen auf den ersten Blick wirkt, ist er auf den zweiten gar nicht: Knochen gehört zwar zu den dichtesten Geweben des menschlichen Körpers, ist aber im Inneren (**Substantia spongiosa**) durch feine Bälkchen durchzogen, zwischen denen kleine Lufträume bleiben – das sog. Leichtbauprinzip. Manche Knochen sind sogar von richtigen Höhlen durchsetzt (z. B. die Nasennebenhöhlen im Gesichtsschädel).

■ **Knochenmark**

In den Knochen befindet sich das Knochenmark (gelbes wie rotes), das für die Blutbildung verantwortlich ist. In den platten, kurzen und unregelmäßigen Knochen befindet sich das Mark zwischen den Bälkchen, in den langen Röhrenknochen hingegen in einer eigenen Höhle des Schaftes. Das rote Knochenmark wird durch zellteilungshemmende Stoffe und ionisierende Strahlen, wie sie zur Therapie von Krebserkrankungen eingesetzt werden, gefährdet. Das ist der Grund, warum z. B. nach einer Hochdosis-Chemotherapie

u. U. eine Knochenmarkstransplantation nötig sein kann.

■ **Wachstumsfugen**

Während der Knochen noch wächst, befindet sich zwischen Epi- und Diaphyse die Epiphysenfuge, in der das Material für das stetige Wachstum nachgeliefert wird. Zunächst wird Knorpel gebildet, der nach und nach verkalkt und zu Knorpelgewebe umgewandelt wird, das dann an den bestehenden Knochen angebaut wird.

Die Verbindung von Knochen zu Knochen

Knochen können auf unterschiedliche Art miteinander in Verbindung stehen. Nicht alle diese Arten verstehen sich im klassischen Sinne als Gelenk, da sie nicht immer eine Bewegung bzw. Biegung zulassen. Man unterscheidet:

- Verbindungen, die durch Bindegewebe gefestigt sind, sog. **Bandfugen** (z. B. die Bänder zwischen den Wirbelbögen oder die Nähte zwischen den Schädelknochen)
- Verbindungen, die durch **Knorpelgewebe** zusammengehalten werden (z. B. zwischen Rippen und Brustbein oder die Schambeinfuge)
- Verbindungen, die aus mehreren Komponenten (Gelenkspalt, -schmiere, -kapsel, ggf. –scheibe und Bindegewebe) zusammengehalten und als „echte Gelenke“ bezeichnet werden.

■ **„Echte“ Gelenke**

Diese Gelenke ermöglichen in einem größeren Umfang die Bewegung des menschlichen Skeletts. Diese Gelenkformen werden nach ihrer Form und Funktion in folgende Arten eingeteilt:

- **Kugelgelenk** (z. B. Schulter- oder Hüftgelenk) mit 3 Bewegungshauptachsen
- **Eigelenk** (z. B. proximales Handgelenk) mit 2 Bewegungshauptachsen
- **Sattelgelenk** (z. B. Handwurzel-Mittelhand-Gelenk des Daumens) mit 2 Bewegungshauptachsen
- **Ebenes Gelenk** (z. B. Wirbelbogengelenke der HWS) mit 2 Bewegungshauptachsen
- **Radwinkलगelenk** (z. B. Kniegelenk) mit 2 Bewegungshauptachsen

- **Scharniergelenk** (z. B. Fingermittel- und Endgelenke) mit 1 Bewegungshauptachse
- **Radgelenk** (z. B. Radioulnargelenk) mit 1 Bewegungshauptachse

12.2.2 Obere Extremität/Rumpf

Zu der oberen Extremität und dem Rumpf werden die Wirbelsäule, der Brustkorb, die Brusteingeweide (Herz, Thymusdrüse etc.), der Schulterkomplex sowie Arm und Hand gezählt.

Wirbelsäule (Columna vertebralis)

Die Wirbelsäule setzt sich aus **5 Abschnitten** zusammen (■ Abb. 12.2):

- Der **Halswirbelsäule (HWS)**, die aus 7 Halswirbeln besteht (C_1 – C_7)
- Der **Brustwirbelsäule (BWS)**, die aus 12 Brustwirbeln besteht (T_1 – T_{12})
- Der **Lendenwirbelsäule (LWS)** mit ihren 5 Lendenwirbeln (L_1 – L_5)
- Dem **Kreuzbein**, das sich aus verschmolzenen Wirbeln zusammensetzt (S_1 – S_5)
- Dem **Steißbein** mit 3–5 rückgebildeten Steißwirbeln (C_{o1} – C_{o3} , C_{o5})

Die Wirbelsäule ist doppelt s-förmig gekrümmt. Dabei unterscheidet man eine **Lordose** (nach vorne gerichtete, konvexe Krümmung an Hals- und Lendenwirbelsäule) und eine **Kyphose** (nach hinten gerichtete, konkave Krümmung an Brustwirbelsäule und Kreuzbein).

► Im Auto befindet sich die sog. „**Lordosenstütze**“. Damit ist die nach vorne gerichtete Wölbung in der unteren Mitte des Sitzes gemeint, die sich der Wirbellordose im Lendenwirbelbereich anpasst. Wenn Sie sich also schwer merken können, was die Lord- und was die Kyphose ist, dann denken Sie an diese Sitzform.

■ Wirbelkörper

Ein „typischer“ Wirbel besteht aus dem Wirbelkörper (**Corpus vertebrae**), dem Wirbelbogen (**Arcus vertebrae**) mit den unterschiedlichen Fortsätzen

und dem Wirbelloch (**Foramen vertebrae**), durch das das Rückenmark zieht.

Die Fortsätze des Arcus vertebrae sind:

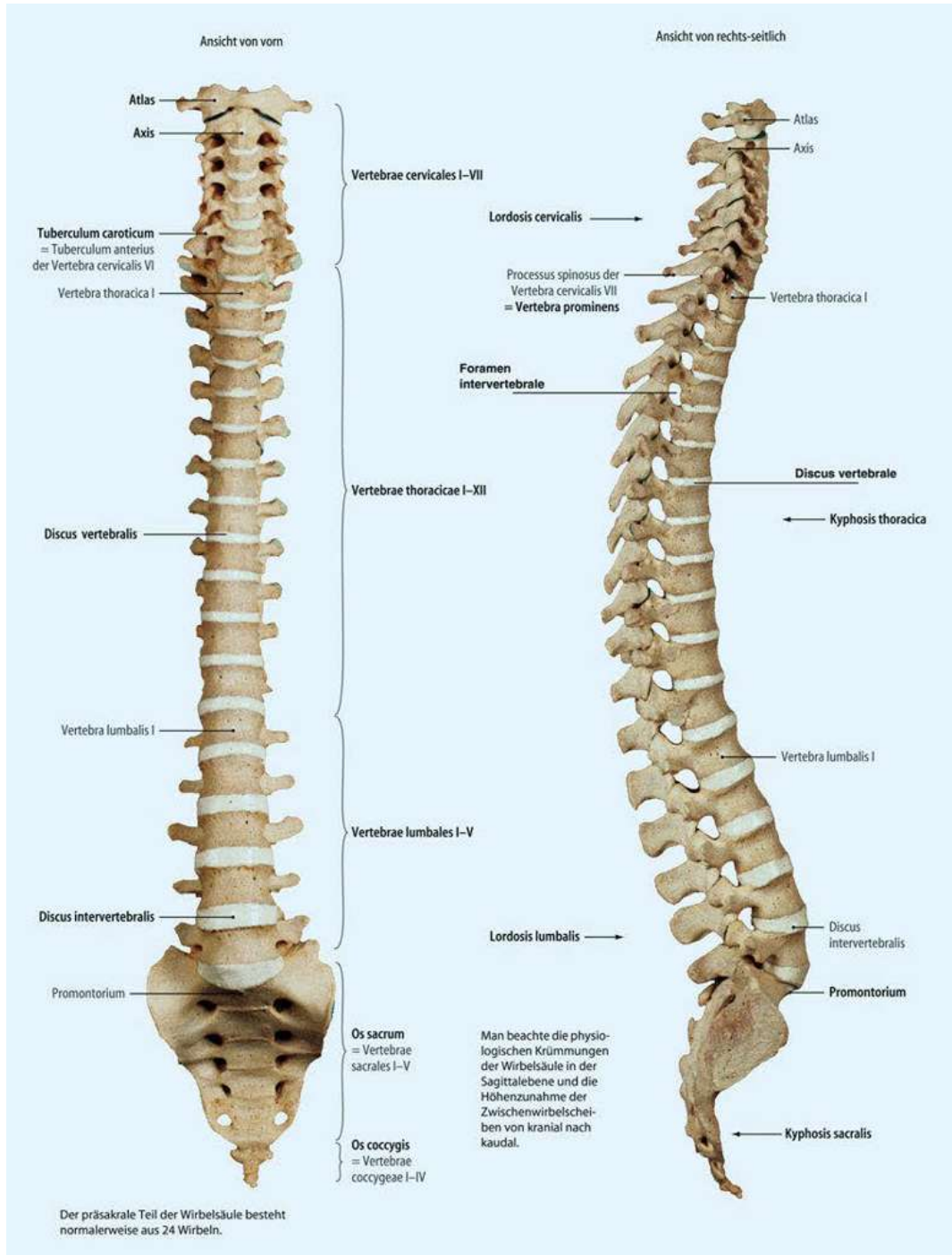
- der Dornfortsatz (**Processus spinosus** – das ist der Anteil, der sich sichtbar unter der Haut am Rücken nach außen wölbt)
- zu beiden Seiten ein seitlicher Fortsatz (**Processus transversus** – hier befindet sich auch die Gelenkfläche, an der die Rippen ansetzen)
- zu beiden Seiten je ein unterer und oberer Gelenkfortsatz (**Processus articularis inferior und superior**)

Ausnahmen stellen der erste und zweite Halswirbel dar. Der erste HW (C_1), der **Atlas**, hat keinen wirklichen Dornfortsatz oder Wirbelkörper, sondern einen vorderen und hinteren Bogen, mit denen er den Knochenzapfen des zweiten Halswirbels (C_2) umschließt. Der 2. HW, **Axis** genannt, hat als zusätzliche anatomische Komponente den **Dens axis**, also den aufragenden Knochenzahn/-zapfen, der im Zusammenspiel mit dem ersten HW eine große Bewegungsfreiheit erlaubt – durch die besondere Form der beiden ersten Halswirbel können wir unseren Kopf weit zur linken und rechten Seite drehen – viel weiter, als es uns die Verbindungen der übrigen Wirbel der Wirbelsäule miteinander erlauben.

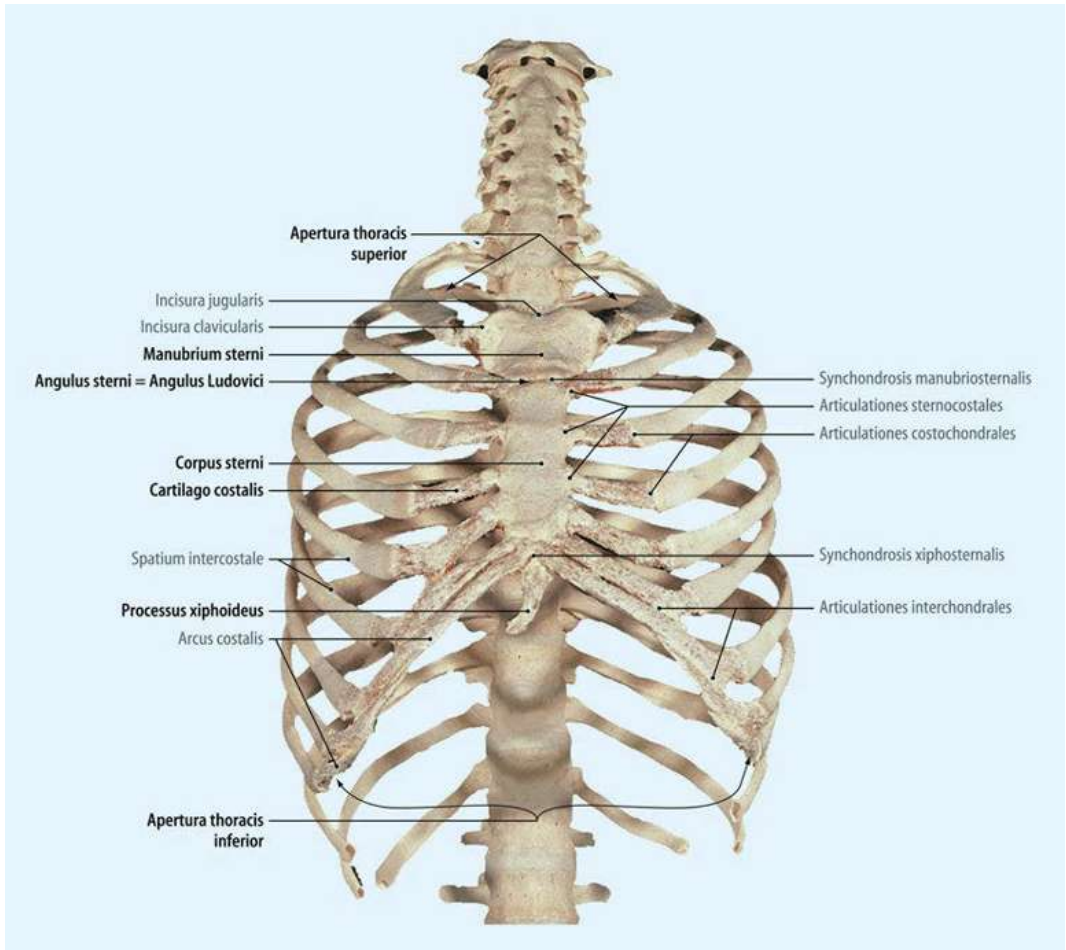
Zwischen den Wirbeln befinden sich seitlich die Zwischenwirbellöcher (**Foramina intervetebralia**), durch die vom Rückenmark ausgehend die Spinalnerven in die unterschiedlichen Körperbereiche ziehen (■ Abb. 12.2).

Zwischen den Wirbeln befinden sich Zwischenwirbelscheiben, auch Bandscheiben genannt (**Discus intervertebralis**). Sie bestehen aus einem Faserring (**Anulus fibrosus**) und einem Gallertkern (**Nucleus pulposus**). Durch degenerative Prozesse kann es dazu kommen, dass der gallertartige innere Kern nach außen dringt. Häufig erfolgt dieser „Bandscheibenvorfall“ in Richtung der Foramina vertebrae mit der Folge, dass die Spinalnervenwurzeln beeinträchtigt werden. Es entstehen für das jeweilige Segment typische Ausfallerscheinungen.

In der griechischen Sage war Atlas ein Titan und derjenige, der die ganze Last der Welt im wahrsten Sinne auf seinen Schultern



■ Abb. 12.2 Wirbelsäule (Columna vertebralis). (Mod. nach Tillmann 2010)



■ Abb. 12.3 Knochen des Brustkorbs. (Aus Tillmann 2010)

trug. Daher ist es nicht verwunderlich, dass der erste Halswirbel diesen Namen bekommen hat – er trägt den Schädel, also die ganze Last unseres Kopfes.

➤ Merksatz

Wann gibt es im Krankenhaus die Mahlzeiten?
Um 7 Uhr gibt es Frühstück, um 12 Uhr Mittag
und um 5 Uhr Abendbrot.
= Anzahl der Wirbelkörper: 7 C + 12 Th + 5 L

Brustkorb

Der Brustkorb setzt sich aus den Rippen (**Costae**) und dem Brustbein (**Sternum**) zusammen (■ Abb. 12.3). Normalerweise hat der Mensch 12 Rippenpaare, von denen die ersten sieben Rippen, die am Sternum ansetzen, als „echte Rippen“ bezeichnet werden.

Hingegen werden die Rippen 8–12, weil sie keine direkte Verbindung zum Sternum haben, als „falsche Rippen“ bezeichnet. Die 8.–10. Rippe legt am knorpeligen Teil des Rippenbogens an, die letzten beiden Rippen enden frei. Jede Rippe besteht aus einem knöchernen Anteil (**Costa**) und einem Rippenknorpel (**Cartilago costis**). An der Wirbelsäule (sowohl am Wirbelkörper als auch am Querfortsatz) liegt der Rippenkopf (**Caput costae**) an. Dann folgt der Hals (**Collum**), Körper (**Corpus**) und schließlich der Winkel (**Angulus**) der Rippe.

Das Sternum besteht aus drei Teilen:

1. dem „Handgriff“ (**Manubrium sterni**)
2. dem Körper (**Corpus sterni**)
3. dem Schwertfortsatz (**Processus xiphoideus**)

■ Tab. 12.5 Gliederung des Mediastinums

Mediastinum superius	Der oberhalb des Herzens gelegene Teil	
Mediastinum inferius	Der das Herz beinhaltende Teil, der weiter gegliedert wird in:	
	Mediastinum anterius	Zwischen Brustwand und Perikard
	Mediastinum medius	Vom Perikard umschlossener Raum
	Mediastinum posterius	Zwischen Perikard und Wirbelsäule

Brustdrüse (Mamma)

Die Brustdrüse besteht hauptsächlich aus Fett- und Bindegewebe, der Haut mit dem Warzenvorhof (**Areola mammae**) und der Brustwarze (**Papilla mammaria**). Ab der Pubertät nimmt das Gewebe bei Frauen zu.

Brusteingeweide Mediastinum

Der „Mittelfellraum“ wird unten vom Zwerchfell und oben (quasi imaginär, da es einen fließenden Übergang zum Hals gibt) durch die 1. Rippe begrenzt. Im Mediastinum, das in mehrere Bereiche gegliedert ist (■ Tab. 12.5), befinden sich wichtige Leitungsbahnen und als eigenständige Organe das Herz und der Thymus.

Herz (Cor, Cordis)

Das Herz ist ein kegelförmiges Organ, das aus der Herzspitze (**Apex cordis**), der Herzbasis (**Basis cordis**), dem linken und rechten Herzohr (**Auricula dextra et sinistra**) sowie mehreren Kammerfurchen (**Sulcus coronarius, interventricularis anterior und posterior**, in denen die Koronararterien verlaufen) besteht (■ Abb. 12.4a, b, ■ Abb. 12.5).

Der Innenraum des Herzens zeigt vier Hohlräume:

- den rechten und linken Vorhof (**Atrium dextrum et sinistrum**)
- die rechte und linke Herzkammer (**Ventriculus dexter et sinister**)

Diese werden durch die Vorhofscheidewand (**Septum interatriale**) und der Kammerscheidewand (**Septum interventriculare**) voneinander getrennt.

In den rechten Vorhof münden die beiden großen Hohlvenen (**V. cava superior und inferior**) mit

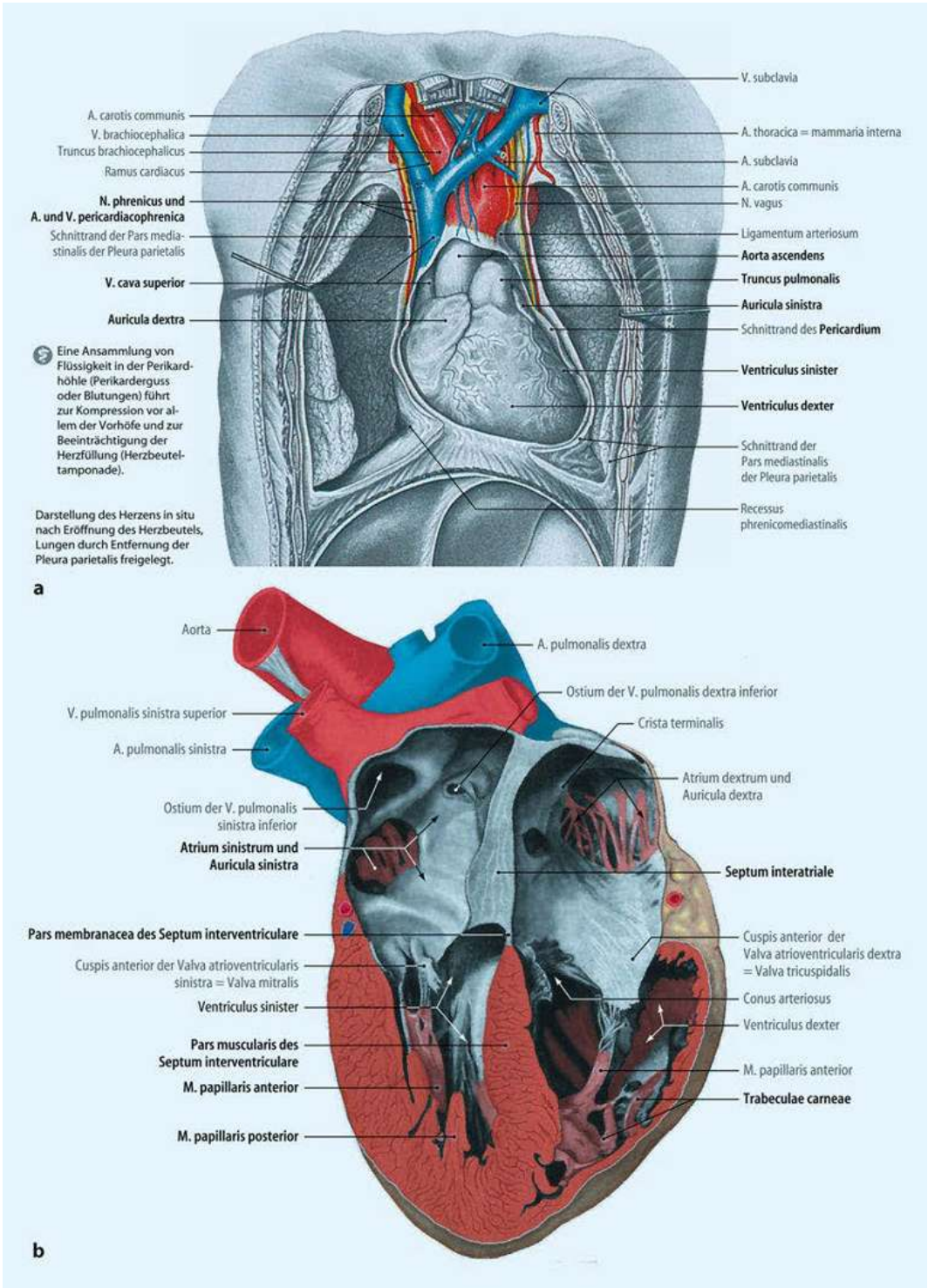
dem sauerstoffarmen Blut aus dem Körperkreislauf. Von dort fließt das Blut weiter durch die Trikuspidalklappe (**Valva atrioventricularis dextra**) in die rechte Kammer und weiter durch die Pulmonalklappe (**Valva trunci pulmonalis**) in die Lungenarterien (**Truncus pulmonalis**) in die Lunge, um mit Sauerstoff angereichert zu werden. Dann geht der Weg des oxygenierten Blutes weiter über die Pulmonalvenen (**Vv. Pulmonalis**) in den linken Vorhof. Von dort passiert der Strom die Mitralklappe (**Valva atrioventricularis sinistra**) zwischen linkem Vorhof und linker Kammer und fließt schließlich durch die Aortenklappe (**Valva aortae**) in die Hauptarterie (**Aorta**) und so wieder in den großen Körperkreislauf.

Die Koronararterien (**Aa. coronariae**), die vor allem den kräftigen Herzmuskel mit Blut versorgen, entspringen dabei kurz hinter der Valva aortae aus der Aorta, um das sauerstoffreiche Blut mitzunehmen, und münden als **Vv. cordis** in den rechten Vorhof, um das sauerstoffarme Blut wieder in den Lungenkreislauf zur Aufsättigung zu bringen.

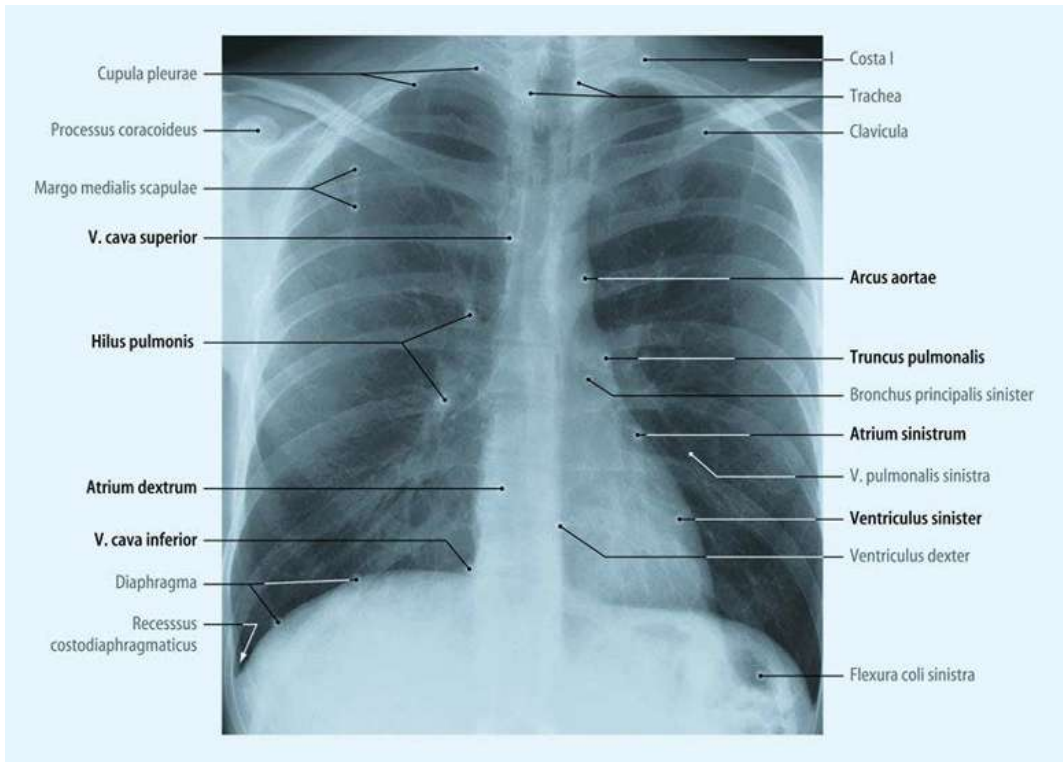
Das Herz wird vom Herzbeutel (**Perikard**) schützend umgeben.

Thymus

Der Thymus liegt im oberen Mediastinum hinter dem Sternum, reicht bis zum Perikard des Herzens und besteht aus zwei Lappen. Er ist ein primäres lymphatisches Organ und wesentlich an der Prägung der Lymphozyten sowie der Entwicklung der Immunkompetenz beteiligt. Der Thymus wächst bis zum Kleinkindalter und behält seine Größe bis zur Pubertät bei. Nach der Pubertät beginnt der Thymus zu verfetten, und das Thymusgewebe nimmt mehr und mehr ab, bis die Drüse hauptsächlich nur noch aus Fettgewebe besteht.



■ Abb. 12.4a,b Herzlage in der Brustwand (a). Frontalschnitt durch das Herz (b). (Aus Tillmann 2010)



■ **Abb. 12.5** Röntgenaufnahme des Brustkorbs eines 35 Jahre alten Mannes im ap-Strahlengang. (Aus Tillmann 2010)

Luftröhre (Trachea) und Lunge (Pulmo)

Die Luftröhre (Trachea) reicht mit etwa 12 cm vom Kehlkopf bis zu den Bronchien der Lunge. Sie setzt sich im Wechsel aus nach hinten offenen Knorpelspannen (**Cartilagine tracheales**) und Ringbändern (**Ligg. anularia**) zusammen und kann sich so mitbewegen, wenn die Lunge sich bei der Einatmung nach unten ausdehnt oder sich der Kehlkopf beim Schlucken oder der Kopfrückneigung nach oben bewegt. Der hintere Teil der Knorpelspannen wird durch Muskeln (**Mm. trachealis**) vervollständigt.

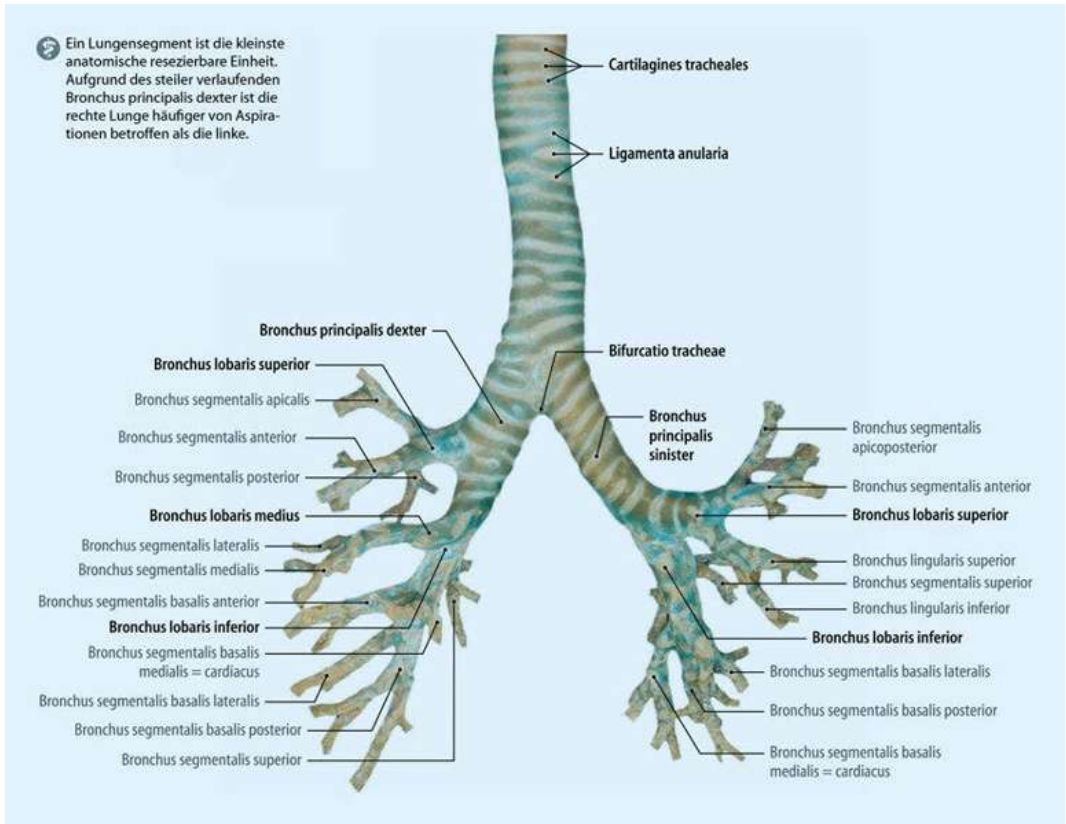
Die Trachea teilt sich in einen linken und rechten Hauptbronchus (**Bronchus principalis dexter et sinistra**, ■ **Abb. 12.6**). Die Teilungsstelle wird **Bifurcatio trachea** genannt und der dort entstehende spornartige Vorsprung **Carina trachea**. Der rechte Hauptbronchus hat einen wesentlich steileren Verlauf als der linke, sodass bei Verlegung der Luftwege durch Fremdkörper (Aspiration) häufiger der rechte Stammbronchus betroffen ist. Innerhalb der Lunge teilt sich der Bronchialbaum immer weiter auf, s. u.

Die Lunge wird in die rechte und linke Lunge geteilt. Die linke Lunge wiederum gliedert sich in zwei Lappen (**Lobus**) und ist etwas kleiner als die rechte Lunge, da ein Großteil des Herzens von medial anliegt und Platz einnimmt. Die rechte Lunge wird in drei Lappen unterteilt und kaudal im Gegensatz zur linken Lunge dadurch begrenzt, dass die Leber das Zwerchfell weiter nach oben schiebt (■ **Abb. 12.7**).

Der **Bronchus principalis dexter et sinister** teilen sich in ihrem Weg durch die Lunge in 2–3 Lappenbronchien und diese wiederum in 2–5 Segmentbronchien (■ **Abb. 12.6**).

- **Rechte Lunge: 3 Lappen, 10 Segmente**
- Linke Lunge: 2 Lappen, 8–10 Segmente**

Eine besondere Struktur beider Lungen ist der Bereich, in denen die Gefäße und Hauptbronchien ein- und ausziehen, die sog. Lungenlichtung (**Hilus**, ■ **Abb. 12.8**).



■ Abb. 12.6 Trachea und Bronchialbaum, Ansicht von vorn. (Aus Tillmann 2010)

In die rechte Lunge ziehen durch den Hilus der Bronchus principalis dexter, die Vv. Pulmonalis, A. pulmonalis, in der linken Lunge entsprechend der Bronchus principalis sinister sowie ebenfalls die A. pulmonalis und die Vv. pulmonalis.

Zwerchfell (Diaphragma)

Das Zwerchfell ist eine sehnig-muskuläre „Trennwand“ zwischen Brust- und Bauchraum (s. schematische Darstellung ■ Abb. 12.7) und den darin liegenden Organen. Es hat zwei Kuppeln und eine Einbuchtung in der Mitte, die dem Herzen Platz bietet. Die rechte Kuppel steht etwas höher als die linke, da die Leber mehr Platz beansprucht.

Schultergelenke und Schultergürtel

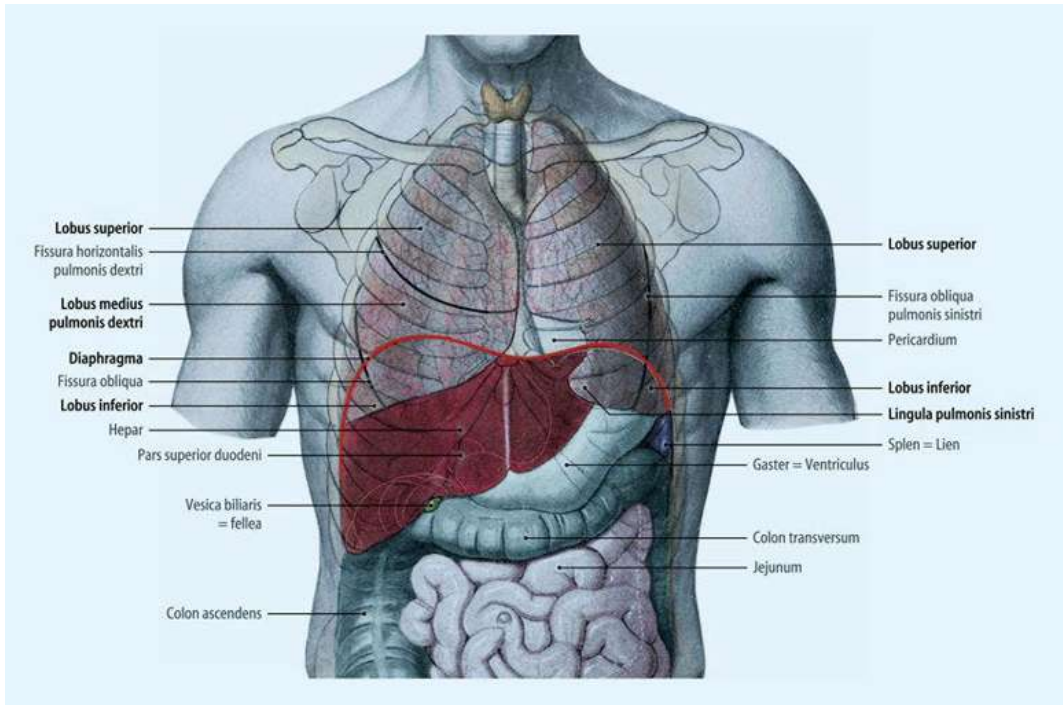
Der Schultergürtel setzt sich aus zwei Hauptknochen zusammen: dem Schlüsselbein (**Clavicula**) und dem Schulterblatt (**Scapula**). Sie befestigen den

Arm am Rumpf, sind an den Bewegungen beteiligt und dienen als Ansatz und Ursprung vieler Muskeln bzw. Sehnen.

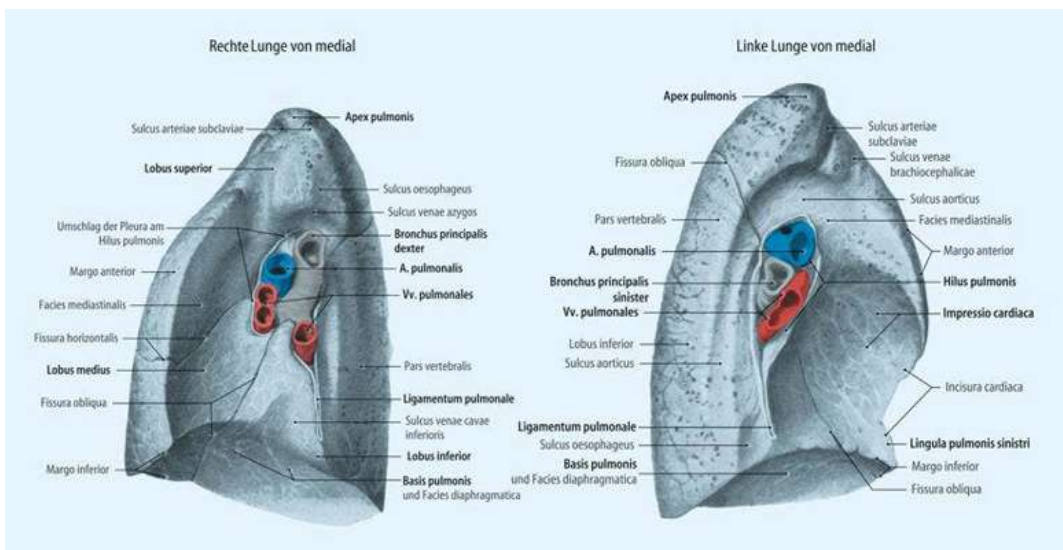
Die Clavicula ist s-förmig gekrümmt, in der ganzen Länge zu tasten und zeigt ein am Sternum ansetzendes und am Akromion ansetzendes Ende (**Extremitas sternalis et acromialis**). Weitere Strukturen zeigt ■ Abb. 12.9a, b.

Die Scapula zeigt eine Rippen- und eine Hinterseite (**Facies costalis et posterior**), eine prominente Erhebung (**Spina scapulae**), zwei grubenartige Vertiefungen (**Fossa supraspinata et infraspinata**), drei Ränder (**Margo**), drei Winkel (**Angulus**) und zwei Knochenvorsprünge, die als Ansatz für Muskeln und Bänder dienen (**Processus coracoideus** = Rabbenschnabelfortsatz, **Acromion** = Schulterreck; ■ Abb. 12.10a, b).

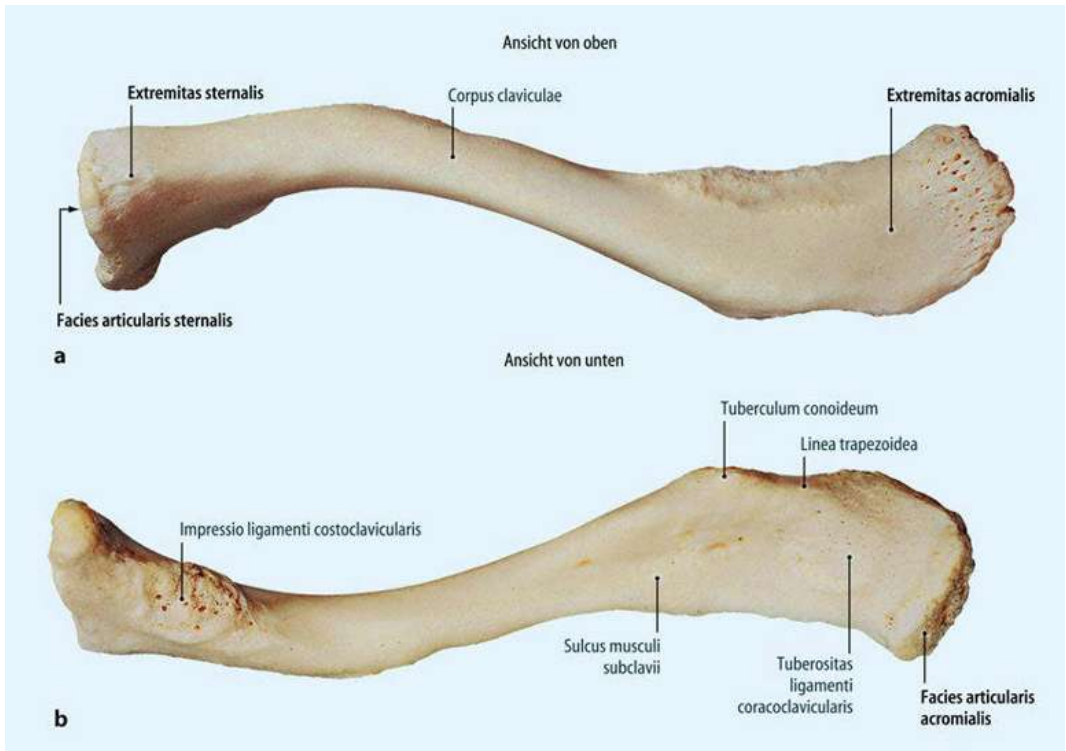
Die beiden Knochen sind an drei wesentlichen Gelenkstrukturen beteiligt:



■ Abb. 12.7 Lage und Größe der linken und rechten Lunge im Brustraum. (Aus Tillmann 2010)



■ Abb. 12.8 Rechte und linke Lunge mit Lungenhili. (Aus Tillmann 2010)



■ Abb. 12.9a,b Rechtes Schlüsselbein (Clavicula). (Aus Tillmann 2010)

1. Schultergelenk (Articulatio humeri), s. u.
2. Brustbein-Schlüsselbein-Gelenk (Articulatio sternoclavicularis)
3. Schultergelenk (Articulatio humeri), s. u.

Oberarm (Humerus)

■ Schultergelenk (Articulatio humeri)

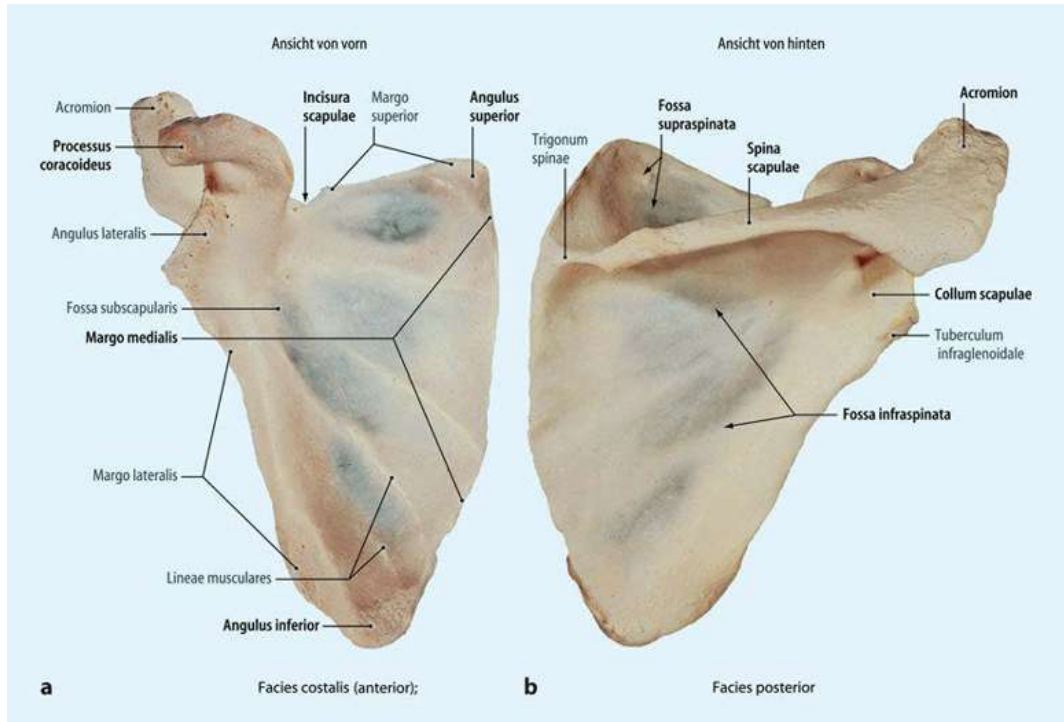
Dieses Gelenk wird knöchern vor allem durch die Scapula (mit der **Cavitas glenoidales**) und dem Oberarmkopf (**Caput humeri**) gebildet. Die Cavitas glenoidales wird durch eine faserige Erweiterung (**Labrum glenoidale**) ergänzt, da sie eigentlich viel kleiner ist als der Humeruskopf.

Die Gelenkkapsel (**Capsula articularis**) ermöglicht einen großen Bewegungsfreiraum – das Schultergelenk ist ein Kugelgelenk mit 6 Hauptbewegungsrichtungen (Abduktion, Adduktion, Anteversion, Retroversion, Innenrotation, Außenrotation) und zeigt den größten Bewegungsspielraum aller Gelenke am Körper (vom Aufbau ist das Ar-

ticulatio humeri vergleichbar mit dem Hüftgelenk, allerdings hindern im Hüftgelenk straffe Bandapparate daran, den gleichen Bewegungsspielraum zu entwickeln).

■ Oberarmknochen (Humerus)

Der Humerus setzt sich aus dem Oberarmkopf (**Caput humeri**), dem anatomischen Hals (**Collum anatomicum**), dem großen und kleinen Hocker (**Tuberculum majus et minus**), die als Ansatz für Muskeln dienen, dem chirurgischen Hals (**Collum chirurgicum**), weiteren Ansetzstellen für Muskeln (z. B. **Crista tuberculi majores** für dem M. pectoralis major), dem Körper bzw. Knochenschaft (**Corpus humeri**) sowie den distalen Anteilen, die mit Elle und Speiche ein Gelenk bilden (**Epicondylus lateralis et medialis**, **Trochlea humeri**, **Capitulum humeri**), zusammen (■ Abb. 12.11).



■ Abb. 12.10a,b Rechtes Schulterblatt (Scapula). (Aus Tillmann 2010)

Unterarm

■ Ellenbogengelenk (Articulatio cubiti)

Der Humerus, die Elle (**Ulna**) und die Speiche (**Radius**) bilden das Ellenbogengelenk. Dabei treten die Gelenkfläche des **Capitulum humeri** mit dem Radius in Kontakt (genauer mit dem **Caput radii**) und die **Trochlea humeri** mit der Ulna (genauer mit der **Incisura Trochlearis**). Ulna und Radius treten zudem noch über die **Circumferentia articularis** (am Radius) und **Incisura radialis** (an der Ulna) in Verbindung.

Sie kennen mit Sicherheit den Ausspruch „Das war der Musik-knochen“, wenn man sich am Ellenbogengelenk gestoßen hat und einen schneidenden Schmerz verspürt. Diese Redewendung ist allerdings etwas irreführend: Schmerzen bereitet hier kein Knochen, sondern der N. ulnaris, der am Ellenbogengelenk neben dem Epicondylus medialis verläuft.

Das Articulatio cubiti ist deswegen ein besonderes Gelenk, weil es sich aus drei Gelenken mit jeweils eigenen Gelenkmöglichkeiten zusammensetzt:

1. Gelenk zwischen Humerus und Ulna: Scharniergelenk; Beugen und Strecken
2. Gelenk zwischen Radius und Ulna: Radgelenk, Supination und Pronation
3. Gelenk zwischen Humerus und Radius: Scharnier- und Radgelenk; Beugen, strecken, Pronation und Supination

➤ **Pronation beschreibt die Einwärtsdrehung des Unterarms (die Handfläche zeigt zum Boden). Supination die Auswärtsdrehung (die Hand zeigt zur Decke).**

Pronation = P(B)rot holen (Hand greift nach unten)

Supination = Suppe holen (Hand ist nach oben gerichtet, um den Suppenteller zu halten)

■ Elle (Ulna)

Die Ulna zeigt als prominente Strukturen proximal das **Olecranon**, die **Incisura trochlearis**, einen Körper (**Corpus ulnae**), einen Hals (Collum ulnae) und weiter distal dann einen Kopf (**Caput ulnae**) sowie

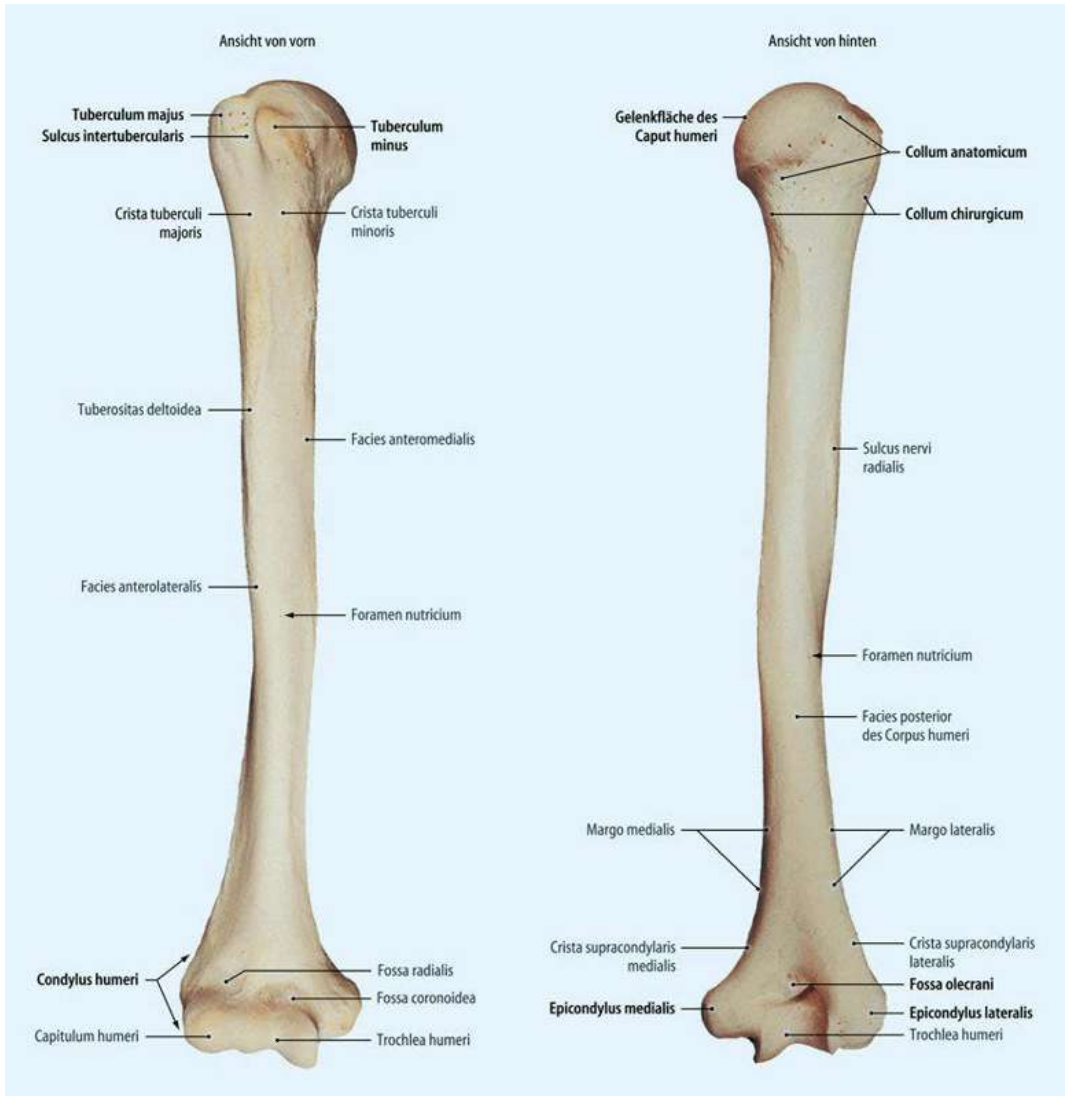


Abb. 12.11 Rechter Oberarmknochen (Humerus). (Aus Tillmann 2010)

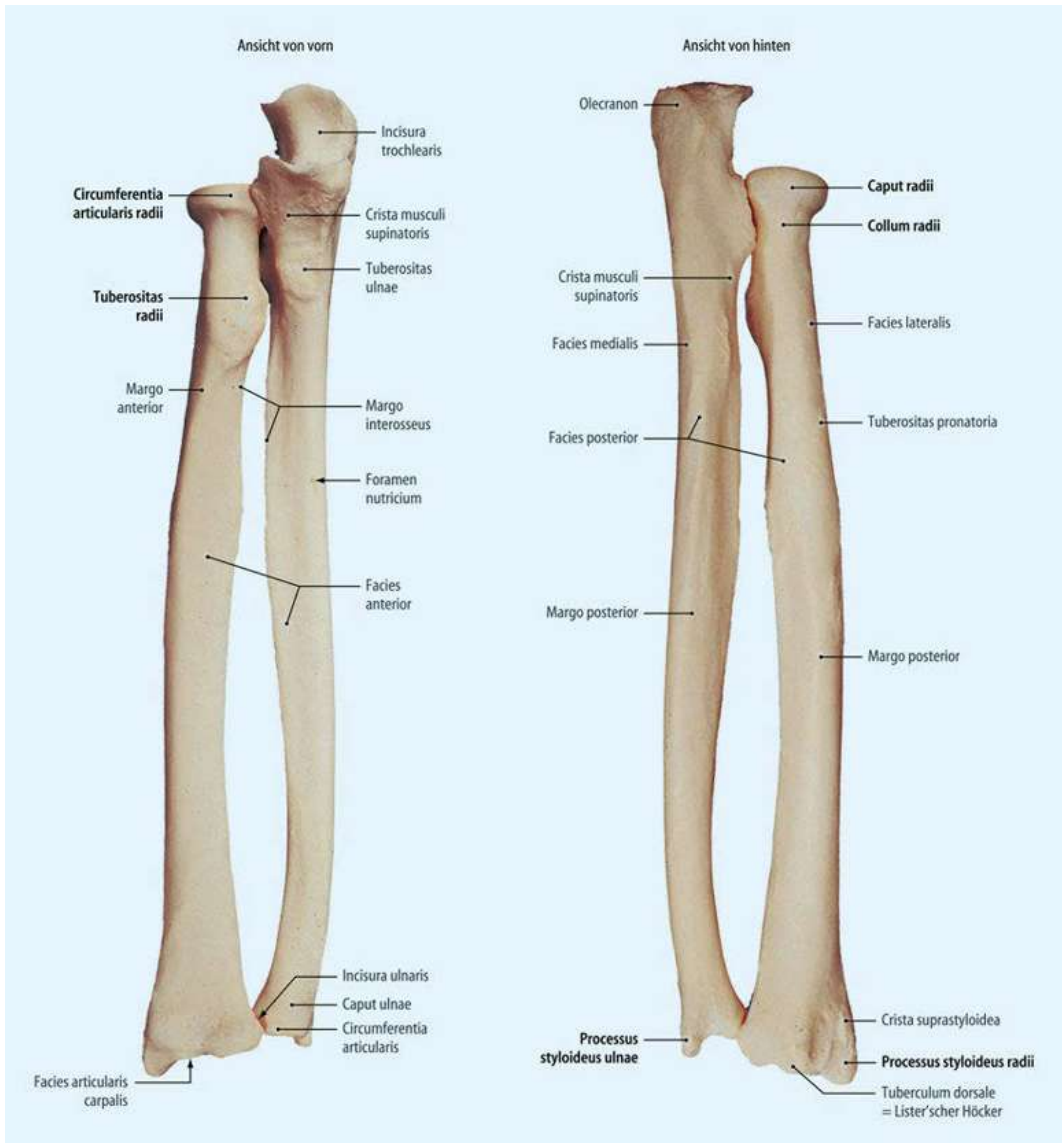
Vorsprung (**Processus styloideus ulnae**), der mit den Handknochen korrespondiert (Abb. 12.12). An der **Tuberositas ulnae** setzt die Sehne des M. brachialis an.

Speiche (Radius)

Der Radius zeigt distal den **Caput radii**, einen Radiushals (**Collum radii**), ebenfalls einen Körper (**Corpus radii**) sowie einen Vorsprung (**Processus styloideus radii**). Weitere Strukturen siehe Abb. 12.12.

Ulna und Radius sind an ihren Schäften durch eine feine Membran (**Membrana interossea antebrachii**) miteinander verbunden.

Wenn Sie zunächst Schwierigkeiten haben, sich zu merken, wo sich die Elle und wo sich die Speiche befindet, folgende Denkanregung. Die „Elle“ war früher eine Maßeinheit, man hat damit z. B. an Stoffbahnen Stoff abgemessen und dabei tatsächlich die eigene Elle als Maß verwendet. Stellen Sie sich vor, vor Ihnen auf



■ **Abb. 12.12** Rechte Elle (Ulna) und Speiche (Radius). (Aus Tillmann 2010)

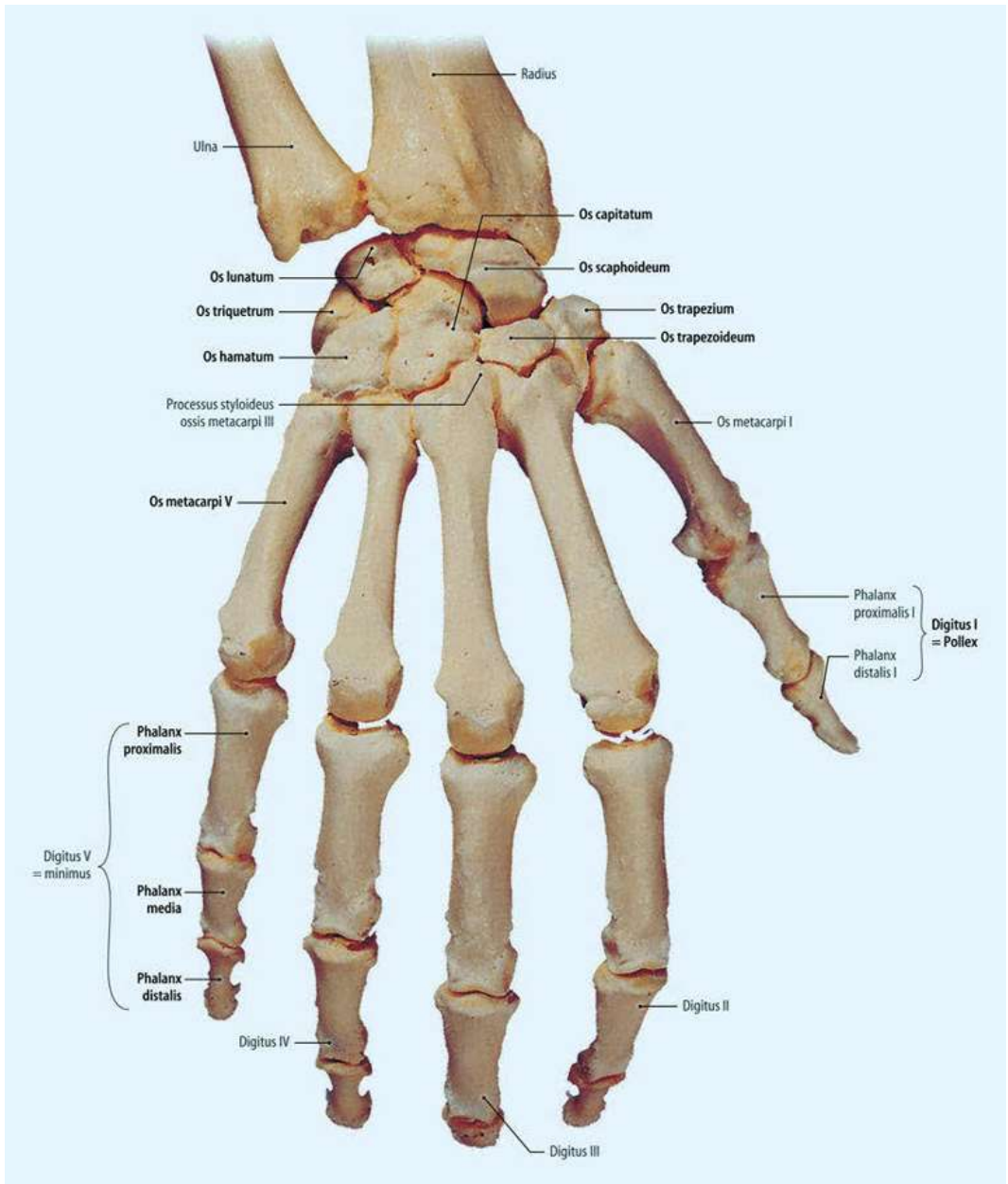
dem Tisch läge ein Stück Stoff, und Sie müssten mit Ihrem Unterarm zwei Ellen abmessen – welche Seite Ihres Unterarms würden Sie nehmen? Die obere (der Radius) würde für diese Aufgabe eine wahre akrobatische Leistung erfordern, die untere (also die Ulna) sich hingegen anbieten. Die Ulna muss also den „untere Teil bzw. die untere Kante“ des Unterarmes bilden.

Hand (Manus)

Die Hand (Manus) ist ein sehr komplexes anatomisches Gebilde, das sich aus vielen feinen Knochen, Sehnen und Muskeln zusammensetzt.

■ Gelenke

Die Facies articularis carpi des Radius korrespondiert mit dem proximalen Handgelenk (**Articulatio radiocarpalis**). Zwischen den beiden Reihen der Handwurzelknochen (s. u.) befindet sich das distale



■ Abb. 12.13 Handskelett (Ossa manus) der rechten Seite. Ansicht von dorsal. (Aus Tillmann 2010)

Handgelenk (**Articulatio mediocarpalis**). Handwurzelknochen und Mittelhandknochen werden durch die Handwurzel-Mittelhand-Gelenke (**Articulationes carpometacarpales**) verbunden. Eine Sonderstellung nimmt das Daumensattelgelenk ein (**Articulatio carpometacarpalis pollicis**), das zwi-

schen Trapezbein und den Mittelhandknochen des Daumens liegt.

■ **Knochen** (■ Abb. 12.13)

- Handwurzelknochen (s. u.)
- Mittelhandknochen (**Ossa metacarpi**)

- Finger (**Digitus manus** mit **Phalanx proximalis**, **medialis**, **distalis** – abgesehen vom Daumen, der nur eine proximale und distale Phalanx hat)

➤ Merkspruch

Ein Kähnlein fuhr im Mondenschein im Dreieck um das Erbsenbein, Vieleck groß und Vieleck klein, der Kopf der muss am Hacken sein.

- **Kahnbein (Os scaphoideum)**
- **Mondbein (Os lunatum)**
- **Dreiecksbein (Os triquetrum)**
- **Erbsenbein (Os pisiforme)**
- **Großes Vieleckbein (Os trapezium)**
- **Kleines Vieleckbein (Os trapezoideum)**
- **Kopfbein (Os capitatum)**
- **Hakenbein (Os hamatum)**

■ Karpaltunnel

Die Handwurzelknochen liegen nicht ebenmäßig, sondern so, dass sich die Hand an der palmaren Seite etwas aushöhlt. Kahnbein und Trapezbein treten radial, Erbsenbein und der Hamulus des Hakenbeins ulnar vor. Zwischen diesen „Vorsprüngen“ liegt ein kräftiges Band (Retinaculum musculorum flexorum), durch das die Beugesehnen der Finger ziehen. Dieser „Tunnel“ wird als Karpaltunnel bezeichnet, in dem neben den Sehnen auch ein Nerv, der N. medianus, verläuft.

■ Guyon-Loge

Oberhalb der Retinaculum musculorum flexorum verlaufen im Ulnarkanal (Guyon-Loge) die A. und der N. ulnaris.

■ Hohlhandsehnenplatte (Aponeurosis palmaris)

Die Faszie der Hohlhand ist durch straffes Bindegewebe verstärkt (**Aponeurosis palmaris**) und ermöglicht einen festen Griff.

12.2.3 Untere Extremität

Becken und Hüftgelenk

■ Becken (Pelvis)

Das Becken (Pelvis) wird durch das Kreuzbein (**Os sacrum**) und dem Hüftknochen (**Os coxae**) gebildet (■ Abb. 12.14a). Das Os coxae wird noch einmal unterteilt in die drei knöchernen Abschnitte (■ Abb. 12.14b):

1. **Os ilium**
2. **Os pubis**
3. **Os ischii**

Diese Abschnitte sind beim Kind durch Wachstumsfugen getrennt und verschmelzen erst am Ende des Wachstums zu einem Knochen.

Ventral werden die beiden Hüftknochen durch die **Symphysis pubica** verbunden, hinten korrespondieren sie mit dem Os sacrum.

■ Hüftgelenk (Articulatio coxae)

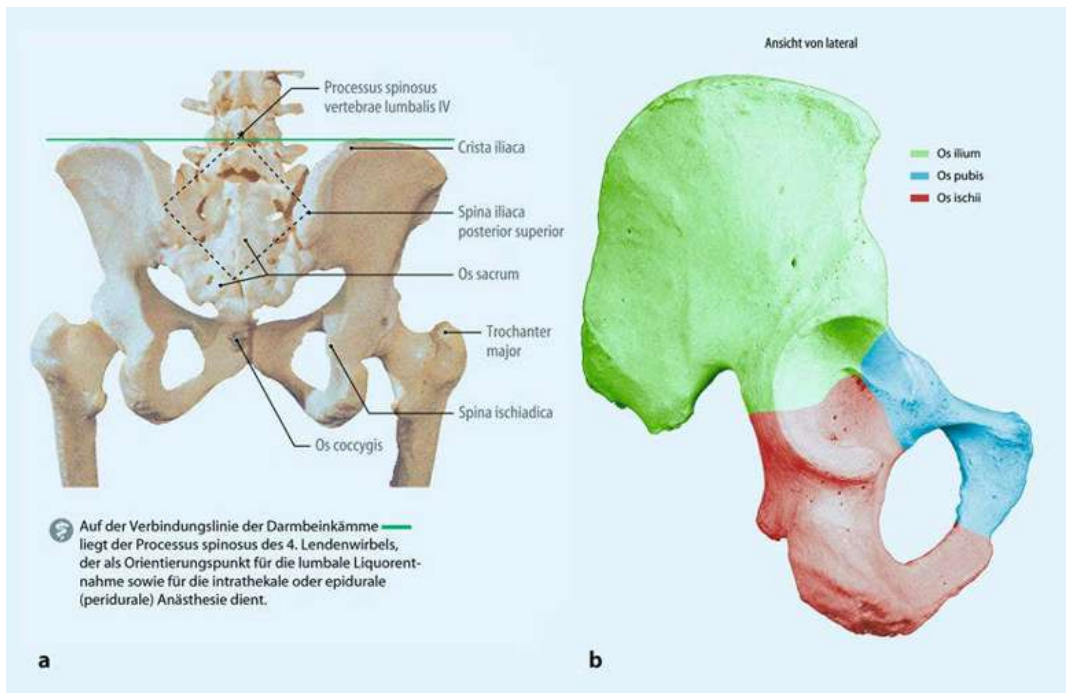
Die Hüftpfanne (**Acetabulum**) wird durch die drei knöchernen Anteile des Os coxae gebildet. In der Grube (**Fossa acetabuli**) findet der Kopf (**Caput femoris**) des Oberschenkelknochens (**Femur**) Platz (■ Abb. 12.16). Bänder und Fasern stabilisieren zusätzlich dieses Gelenk, sodass es auch als „Nussgelenk“ bezeichnet wird, da der Hüftkopf wie eine Nuss in der dazugehörigen Schale (Hüftpfanne) sitzt. Eines der Gelenkkapsel stabilisierenden Bänder, das **Lig. iliofemorale**, ist das stärkste Band des Körpers.

Das Hüftgelenk ist genauso wie das Oberarmgelenk ein Kugelgelenk, hat aber aufgrund des straffen Bandapparates längst nicht den Bewegungsspielraum wie sein Pendant an der oberen Extremität. Trotzdem sind prinzipiell – wenn auch eingeschränkter – folgende Bewegungen möglich:

- Extension, Flexion
- Abduktion, Adduktion
- Außenrotation, Innenrotation

Oberschenkel (Femur)

Der Femur besteht aus einem Hüftkopf (**Caput femoris**) mit einer kleinen Grube (**Fovea capitis**), dem Schenkelhals (**Collum femoris**), dem großen und kleinen Rollhügel (**Trochanter major et minor**), dem Körper (**Corpus femoris**) und den



■ Abb. 12.14a,b Beckenring (a). Hüftknochen (Os coxae) (b). (Aus Tillmann 2010)

Condylen, die mit dem Schien- und Wadenbein korrespondieren (**Condylus mediales et lateralis**). Weitere anatomische Strukturen zeigt ■ Abb. 12.15 und ■ Abb. 12.16.

Knie (Genu)

Das Knie bzw. Kniegelenk wird aus Teilen des Oberschenkelknochens (**Femur**), der Kniescheibe (**Patella**) und des Schienbeins (**Tibia**) gebildet, wobei die Patella das größte Sesambein im menschlichen Körper darstellt.

Das Ende des Femurs weist zwei Gelenkflächen auf, die mit der Tibia in Verbindung stehen (**Condylus medialis et lateralis**) und eine, die mit der Patella eine Verbindung eingeht (**Facies patellaris**). Die Tibia setzt ihrerseits zwei Condylengelenkflächen entgegen (■ Abb. 12.17a, b).

Von besonderer Bedeutung sind im Articulationo genus die straffen Bänder (inneres und äußeres Seitenband = **Lig. collaterale tibiale et fibulare**; vorderes und hinteres Kreuzband = **Lig. cruciatum anterius et posterius**) und die Menisken, die die Rotation im Kniegelenk ermöglichen (**Meniscus lateralis et medialis**).

➤ Das **Lig. collaterale tibiae** ist verwachsen mit dem medialen Meniskus, was bei Sportverletzungen eine häufige „Sollbruchstelle“ darstellt.

Das Kniegelenk ist eine Kombination aus Rad- und Scharniergelenk, in dem

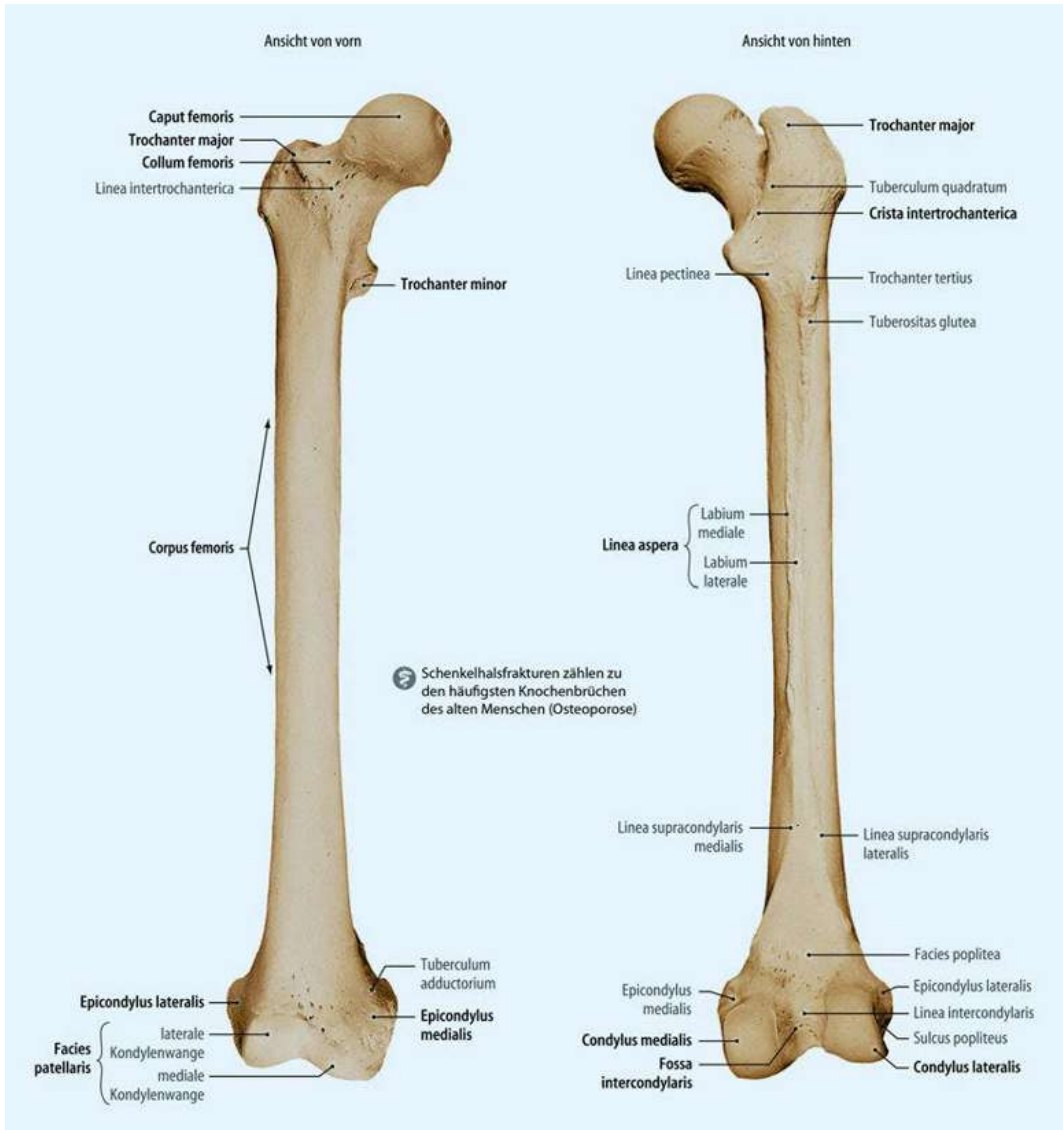
- Extension und Flexion,
- Außenrotation und Innenrotation (+ „Schlussrotation“)

möglich sind.

Unterschenkel

■ Schienbein (Tibia)

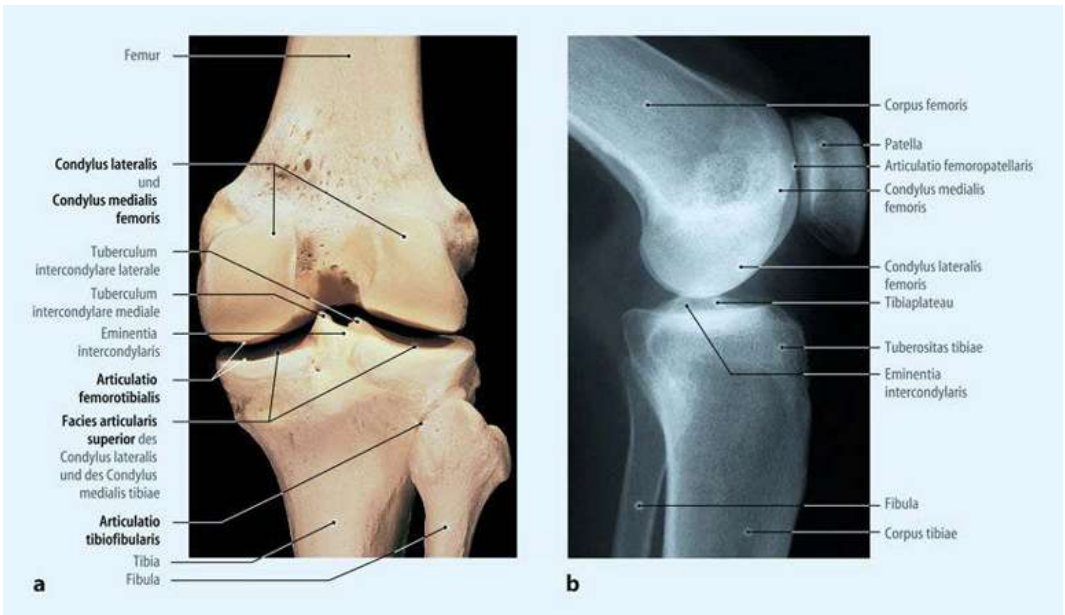
Das Schienbein (Tibia) hat am proximalen Ende die beiden Kondylen, die mit dem Femur korrespondieren (**Condylus mediales et lateralis**). Weiter distal verläuft der Körper (**Corpus tibiae**) mit dem prominenten vorderen Rand (**Margo anterior** und **Tuberositas tibiae**), den man unter der Haut des Schienbeins tasten kann. Das distale Ende zeigt den **Malleolus medialis** und die **Facies articularis inferior**, die mit dem Sprunggelenk (Talus) ein Gelenk



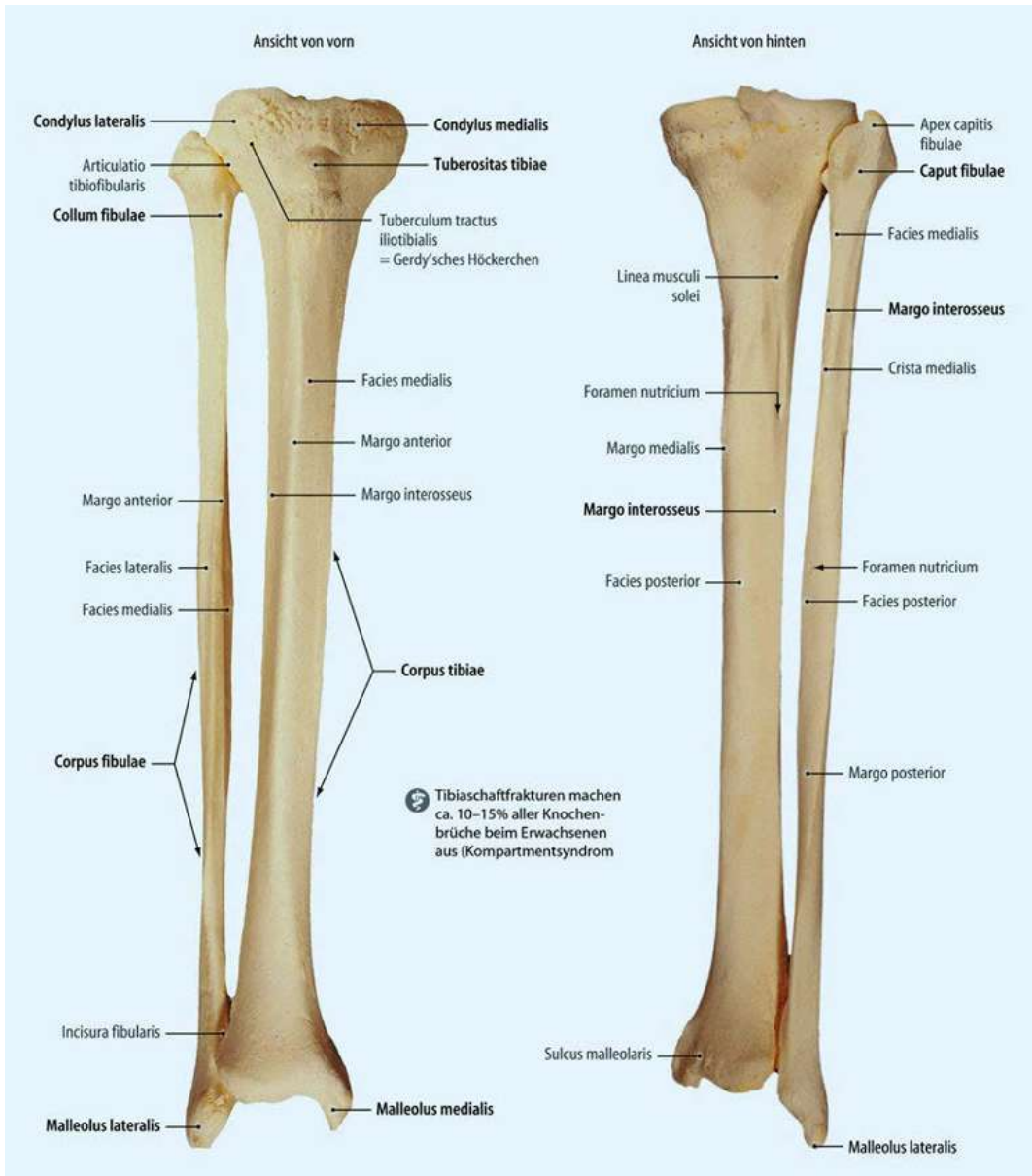
■ Abb. 12.15 Rechter Oberschenkelknochen (Femur). (Aus Tillmann 2010)



■ Abb. 12.16 Röntgenbild des re. Hüftgelenks bei einem 33-jährigen Mann im ap-Strahlengang. (Aus Tillmann 2010)



■ Abb. 12.17a,b Skelettanteile eines rechten Kniegelenks (a). Röntgenaufnahme des linken Kniegelenks einer 47-jährigen Frau im seitlichen Strahlengang (b). (Aus Tillmann 2010)



■ **Abb. 12.18** Rechtes Wadenbein (Fibula) und Schienbein (Tibia). (Aus Tillmann 2010)

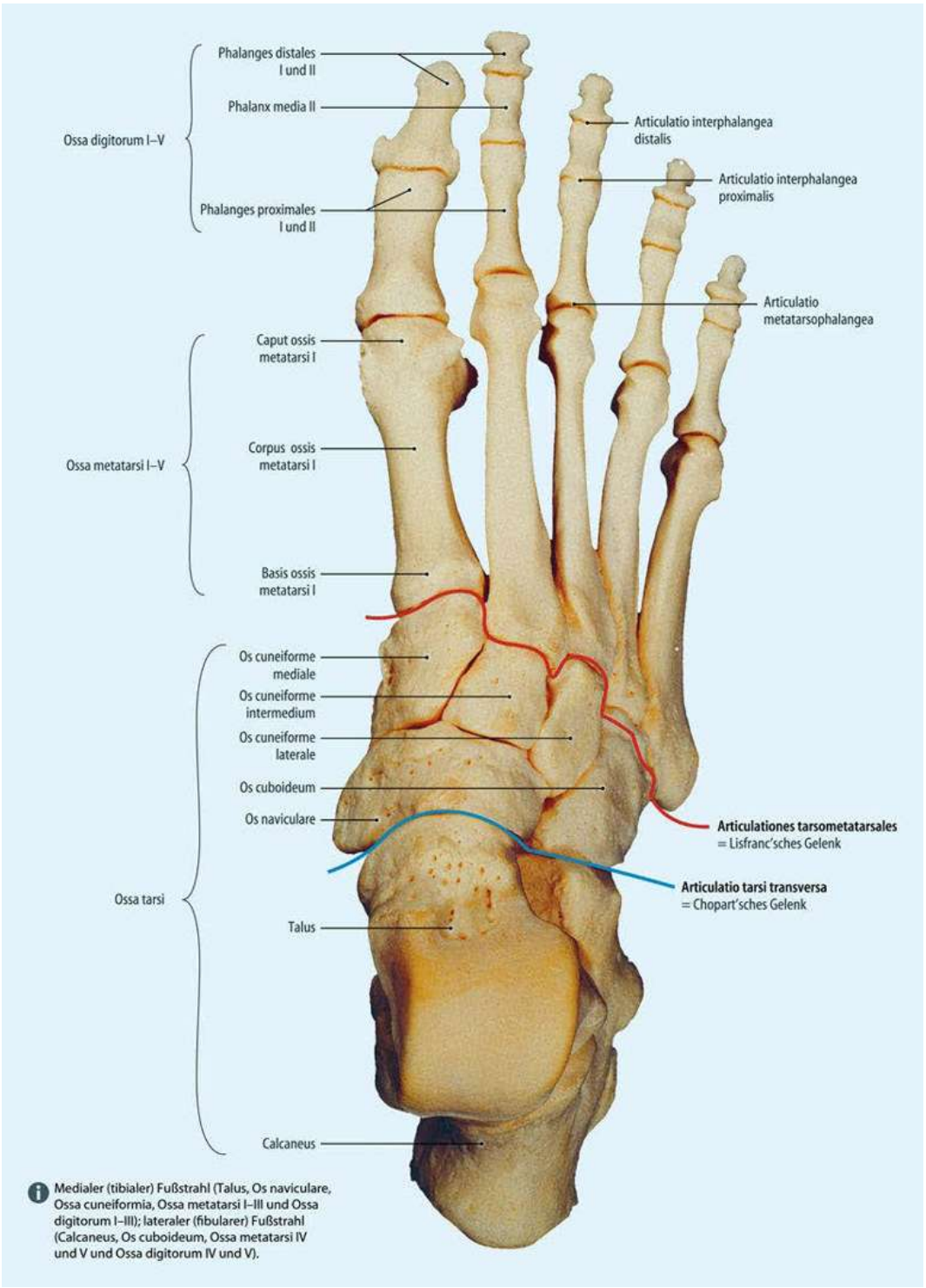
bilden. Ferner hat die Tibia einige Einbuchtungen und Rauigkeiten, die als Ansatzstelle für Bänder und Sehnen dienen (■ [Abb. 12.18](#)).

■ Wadenbein (Fibula)

Das Wadenbein (Fibula) setzt sich aus Kopf (**Caput fibulae**), Körper (**Corpus fibulae**) und dem seit-

lichen Malleolus (**Malleolus lateralis**) zusammen (■ [Abb. 12.18](#)).

Wie auch bei Ulna und Tibia befindet sich zwischen Fibula und Tibia eine Membran (**Membrana interossea cruris**).



■ Abb. 12.19 Rechtes Fußskelett von dorsal. (Aus Tillmann 2010)

Fuß (Pedis)

Wie bei der Hand setzt sich der Fuß aus den Wurzelknochen (**Ossa tarsi**), den Mittelfußknochen (**Ossa metatarsi**) und den Zehenknochen (**Ossa digitorum pedis**) zusammen (■ Abb. 12.19).

■ Ossa tarsi

Zu den Fußwurzelknochen zählen

- proximale Reihe: Sprungbein (**Talus**), Fersenbein (**Calcaneus**) und Kahnbein (**Os naviculare**)
- distale Reihe: mediales, mittleres und laterales Kahnbein (**Os cuneiforme mediale, intermedium, laterale**), Würfelbein (**Os cuboideum**)

■ Oberes Sprunggelenk (Articulatio talocruralis)

Neben den kleineren Gelenken am Fuß spielen vor allem das obere und untere Sprunggelenk für die Beweglichkeit eine große Rolle. Das Articulatio talocruralis ist das Gelenk zwischen der Sprungbeinrolle (**Trochlea tali**) des Talus und der Knöchelgabel, die sich aus **Malleolus medialis** (Tibia) und dem **Malleolus lateralis** (Fibula) zusammensetzt (■ Abb. 12.20).

Es ist in erster Linie ein Scharniergelenk und ermöglicht Extension und Flexion.

■ Unteres Sprunggelenk

■ ■ Hinteres Teilgelenk (Articulatio subtalaris)

Der hintere Teil des unteren Sprunggelenks befindet sich zwischen Talus und Calcaneus.

■ ■ Vorderes Teilgelenk (Articulatio talocalcaneonaviculares)

Der vordere Teil des unteren Sprunggelenkes entsteht durch die Korrespondenz von Taluskopf und Kahnbein sowie Talus und Calcaneus.

Dieser komplizierte Bau zieht auch eine komplexe Bewegung nach sich. Im unteren Sprunggelenk findet Pronation und Supination statt, allerdings verbunden mit anderen Bewegungsqualitäten:

- Die Supination geht mit einer Dorsalextension und Abduktion einher.
- Die Pronation ist mit der Plantarflexion und Adduktion gekoppelt.



■ Abb. 12.20 Röntgenbild eines rechten oberen Sprunggelenkes einer 21-jährigen Frau im ap-Strahlengang. (Aus Tillmann 2010)

12.2.4 Situs

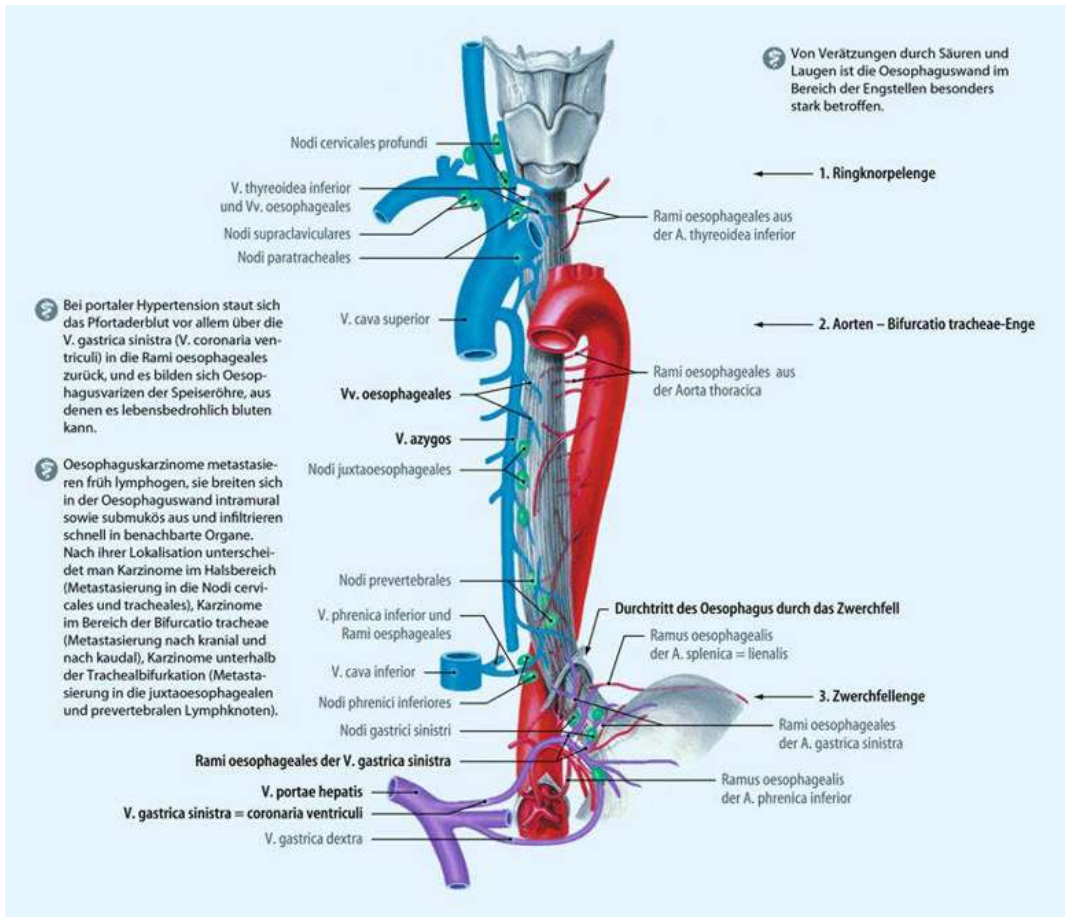
Magen-Darm-Trakt

Speiseröhre (Ösophagus)

Die Speiseröhre ist etwa 25 cm lang, zieht durch den **Hiatus oesophagus** des Zwerchfells vom Brust- in den Bauchraum und wird in einen Hals-, Brust und Bauchteil (**Pars cervicalis, thoracica und abdominalis**) gegliedert. Wie die meisten Hohlorgane besteht er (von innen nach außen) aus Schleimhaut, Muskelschicht und Bindegeweshülle. Er wird auf seinem Weg zum Magen an drei Stellen eingengt (■ Abb. 12.21):

- **Obere Enge:** Übergang vom Rachen in die Speiseröhre auf Höhe des unteren Ringknorpelrands
- **Mittlere Enge:** Anlagerung des Aortenbogens
- **Untere Enge:** Durchtritt durch das Zwerchfell

Diagnostisch wichtig ist zudem seine enge Nachbarschaft zum linken Vorhof des Herzens.



■ Abb. 12.21 Ösophagus, Ansicht von vorne. (Aus Tillmann 2010)

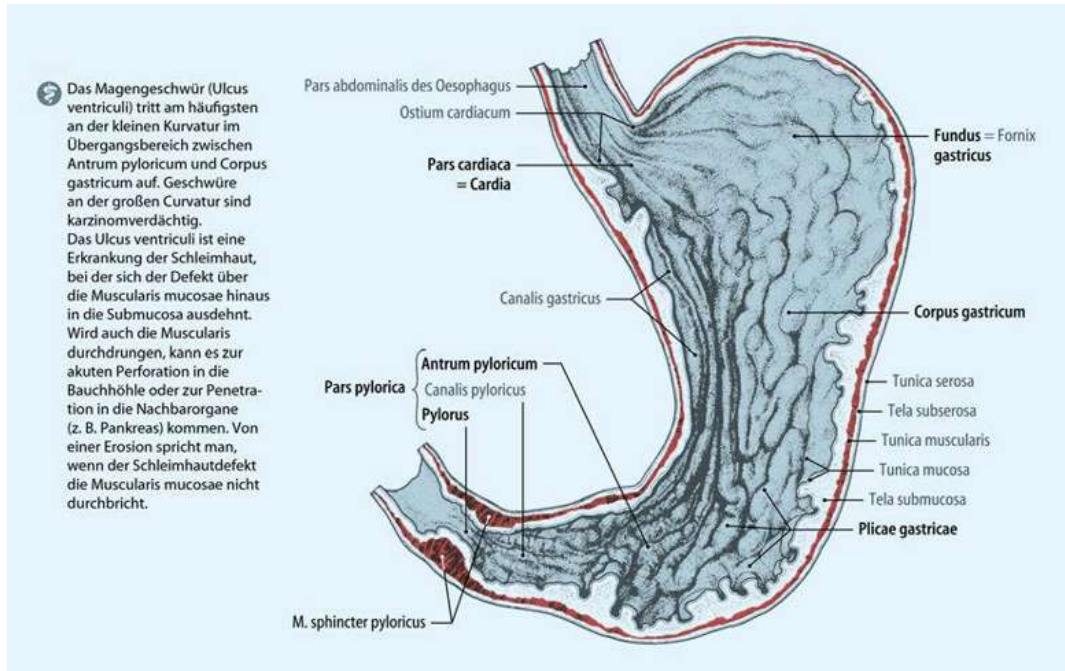
Magen (Gaster)

Der Magen (Gaster) ähnelt einem gekrümmten Schlauch mit einer großen und kleinen Krümmung (**Curvatura minor et major**). Er hat eine Vorder- und Hinterwand (**Paries anterior et posterior**). Am Übergang zum Ösophagus befindet sich der Mageneingang (**Cardia**), gefolgt von der Magenkupe (Fundus gastricus), dem Magenkörper (**Corpus gastricum**) und dem Magenpförtner (Pars pylorica), der mit dem Magenpförtner als Verschluss zum Zwölffingerdarm (**Duodenum**) abschließt (■ Abb. 12.22).

Zwölffingerdarm (Duodenum)

Das Duodenum zählt bereits zum Dünndarm, wird aber wegen seiner besonderen Funktion häufig da-

von abgesondert als eigenständiger Abschnitt im Magen-Darm-Trakt betrachtet. Das Duodenum beginnt hinter dem Pylorus mit einem oberen Teil (**Pars superior**), gefolgt von einem ansteigenden Abschnitt (**Pars descendens**), einem geradlinig verlaufenden Teil (**Pars horizontales**) und geht schließlich mit einem aufsteigenden Abschnitt (**Pars ascendens**) in die **Flexura duodenojejunalis** über. Der größte Teil des Duodenums liegt „sekundär retroperitoneal“, d. h. nicht im vom Peritoneum (Bauchfell) umgebenden Raum, sondern „dahinter“ (■ Abb. 12.23). Im Retroperitonealraum befinden sich u. a. auch die Nieren und ableitenden Harnwege sowie Anteile des Kolons. Die Strukturen, die sich erst im Laufe ihrer Organentwicklung dorthin „bewegt“ haben und nicht von vorneherein dort als



■ Abb. 12.22 Abschnitte des eröffneten Magens. (Aus Tillmann 2010)

Organ angelegt sind, werden als „sekundär retroperitoneal“ bezeichnet.

Leerdarm (Jejunum) und Krummdarm (Ileum)

Jejunum und Ileum sind die beiden anderen Anteile, die den Dünndarm ausmachen. Sie liegen „frei“ im Intraoperitonealraum und unterscheiden sich im Wesentlichen im Aufbau ihrer Schleimhaut.

■ Jejunum

- Hohe Ringfalten (**Plicae circulares**)
- Lange Zotten (**Villi intestinales**)

■ Ileum

- Niedrige oder keine Ringfalten
- Kürzere Zotten
- Peyer-Platten (**Noduli lymphoidei aggregatii**)

Dickdarm (Intestinum crassum)

Der Übergang vom Dünn- zum Dickdarm ist durch die **Papilla ilealis** (■ Abb. 12.24b), auch **Bauhin-Klappe** genannt, gekennzeichnet. Die Bakterienbesiedlung des Dickdarms ist anders

als die des Dünndarms – damit sich beide nicht vermischen, ist ein Verschluss (Bauhin-Klappe) vorhanden, der den Flüssigkeitsstrom nur in eine Richtung zulässt.

Der Dickdarm unterscheidet sich anatomisch u. a. vom Dünndarm durch

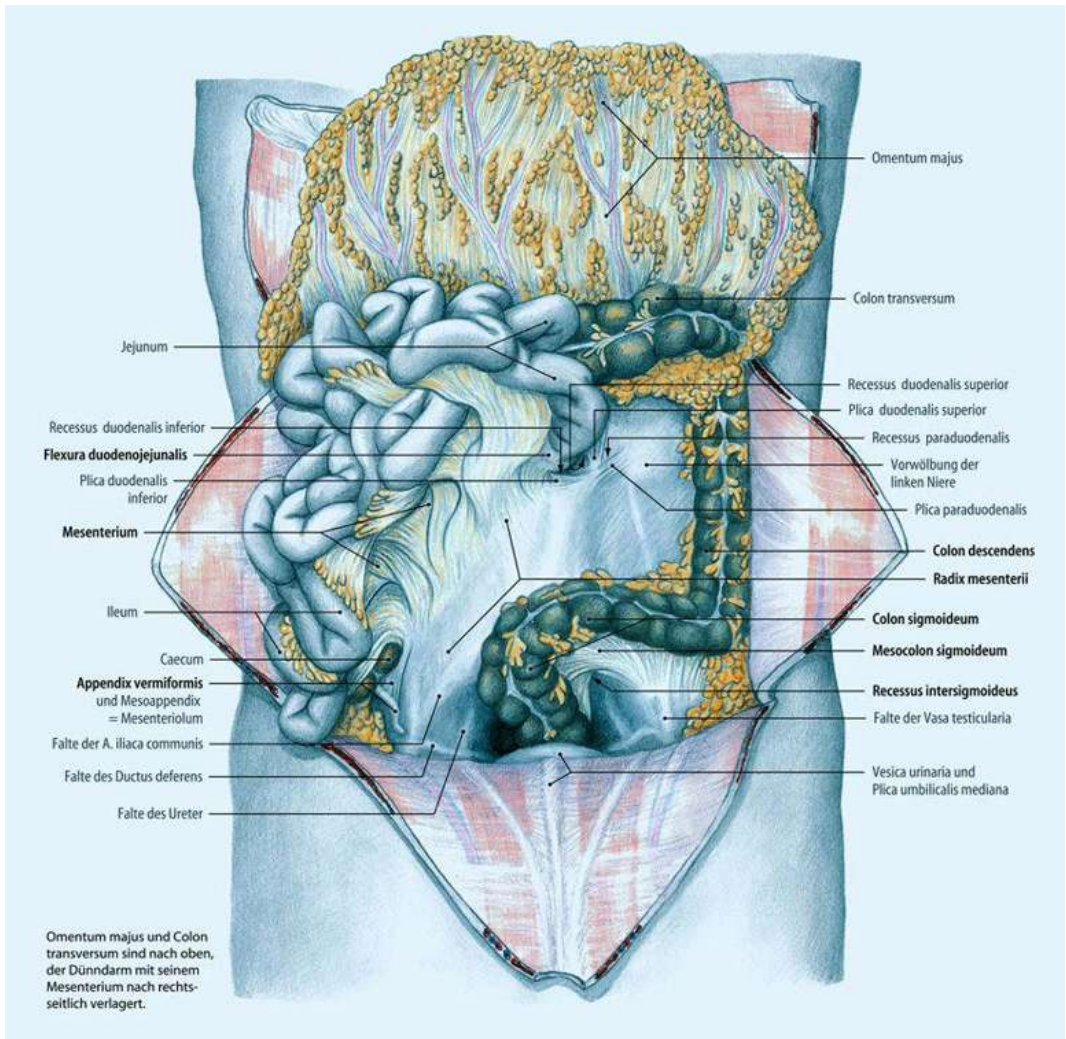
- Bandstreifen (**Tänien**),
- **Haustren**,
- Schleimhautfalten (**Plicae semilunares coli**),
- Fethanhängsel (**Appendices epiplocae**);

■ Abb. 12.24b.

Der Dickdarm wird in den Blinddarm (**Caecum**) mit dem Wurmfortsatz (**Appendix vermiformis**), den Grimmdarm (**Colon**) und den Mastdarm (**Rectum**) unterteilt.

Das Caecum und der Appendix vermiformis liegen direkt hinter der Bauhin-Klappe (■ Abb. 12.24b).

Das Colon zeigt einen aufsteigenden, queren, absteigenden und s-förmigen Anteil (**Colon ascendens, transversum, descendens et sigmoideum**, ■ Abb. 12.25).



■ **Abb. 12.23** Dünndarmkonvolut mit Radix mesenterii und Dickdarm. Zu sehen ist der intraperitoneale Raum und die Umschlagsfalten. Ein Teil der Flexura duodenojejunalis ist zu erkennen, der aus dem Retroperitonealraum nach vorne zieht und in das Jejunum übergeht. (Aus Tillmann 2010)

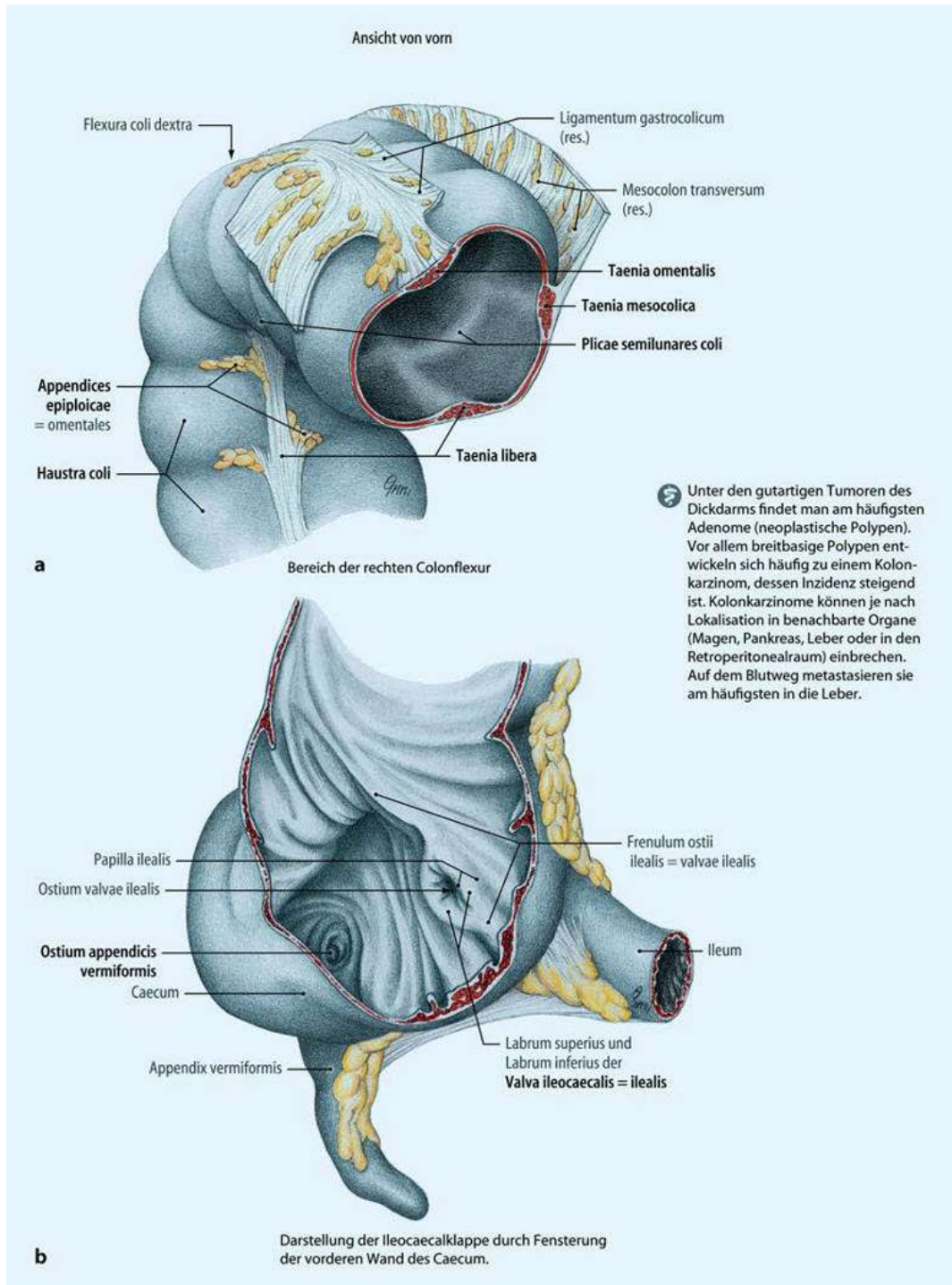
Der Mastdarm (**Rectum**) schließt an das Colon sigmoideum an. Mit dem Afterkanal (**Canalis analis**) endet der Magen-Darm-Trakt.

Leber (Hepar) und Gallenblase (Vesica biliaris)

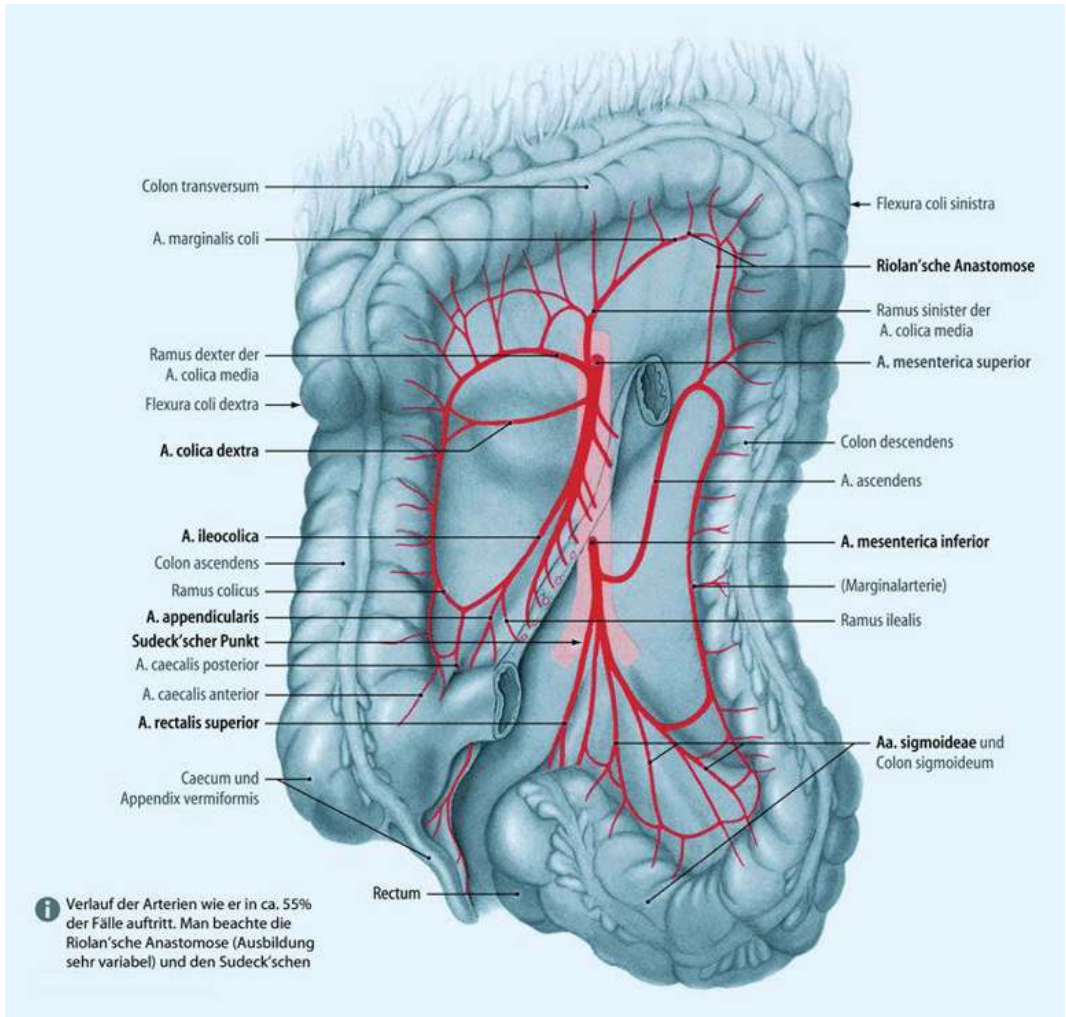
Die Leber (Hepar) liegt zum größten Teil im rechten Oberbauch direkt unter dem Diaphragma. Ihre vordere Fläche ist größtenteils vom Brustkorb bedeckt, nur im epigastrischen Bereich liegt sie direkt unter der Bauchwand und ist dort tastbar.

Sie hat eine Seite, die den Bauchorganen zugewandt ist (**Facies visceralis**) und Abdrücke der jeweiligen Nachbarorgane zeigt, sowie eine Seite, die dem Zwerchfell anliegt (**Facies diaphragmatica**). Ebenso gliedert sie sich in den rechten und linken Leberlappen (**Lobus hepatis dexter et sinister**, ■ **Abb. 12.26a**) sowie an der Facies visceralis zusätzlich in den **Lobus caudatus** und **quadratus**.

An der Facies visceralis sind mehrere Einkerbungen, Abdrücke der umliegenden Strukturen, Bänder, Gefäße, die Gallenblasengrube (**Fossa ves-**



■ Abb. 12.24a,b Kolon sowie Übergang zwischen Ileum und caecum. (Aus Tillmann 2010)



■ Abb. 12.25 Dickdarm, Ansicht von vorne. (Aus Tillmann 2010)

ica billiaria) sowie die Leberpforte (**Porta hepatis**), die den gemeinsamen Gallengang (**Ductus hepatis communis**), die Leberarterie (**A. hepatica propria**) und die Pfortader (**V. portae hepatis**) enthält (Abb. 12.26b).

Die Gallenblase (**Vesica biliaris**) liegt der Leber direkt an. Sie besteht aus einem Gallenblasenboden, -körper und -hals (**Fundus, Corpus et Collum vesicae biliaris**). Ihr Ausführungsgang (**Ductus cysticus**) führt in den gemeinsamen Gallengang (**Ductus hepaticus communis**), der die Gallenflüssigkeit an der **Papilla duodeni** in den Zwölffingerdarm leitet.

Milz (Splen, Lien)

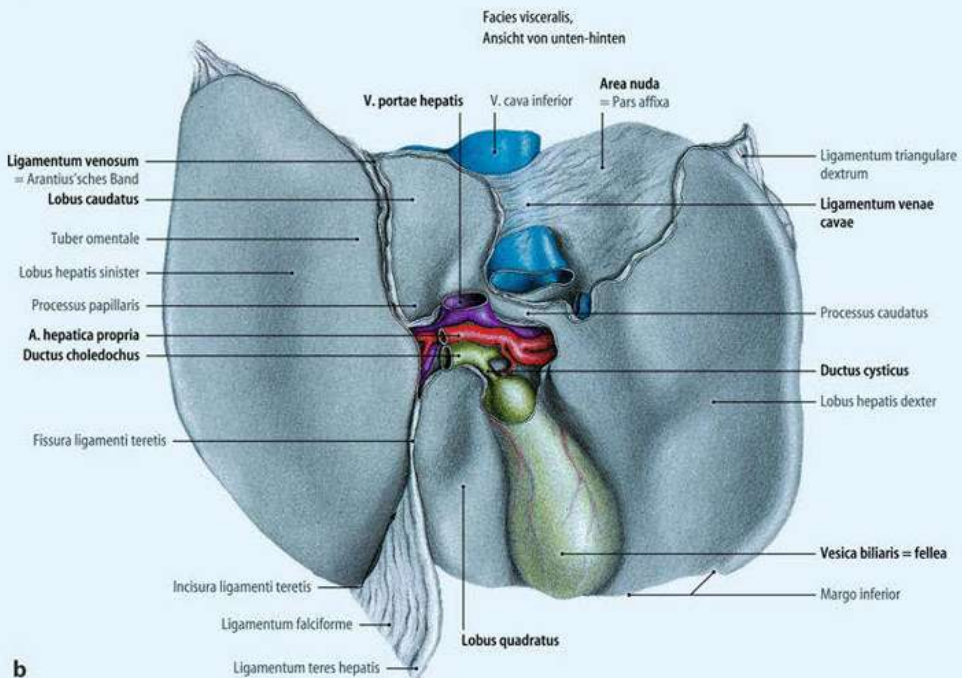
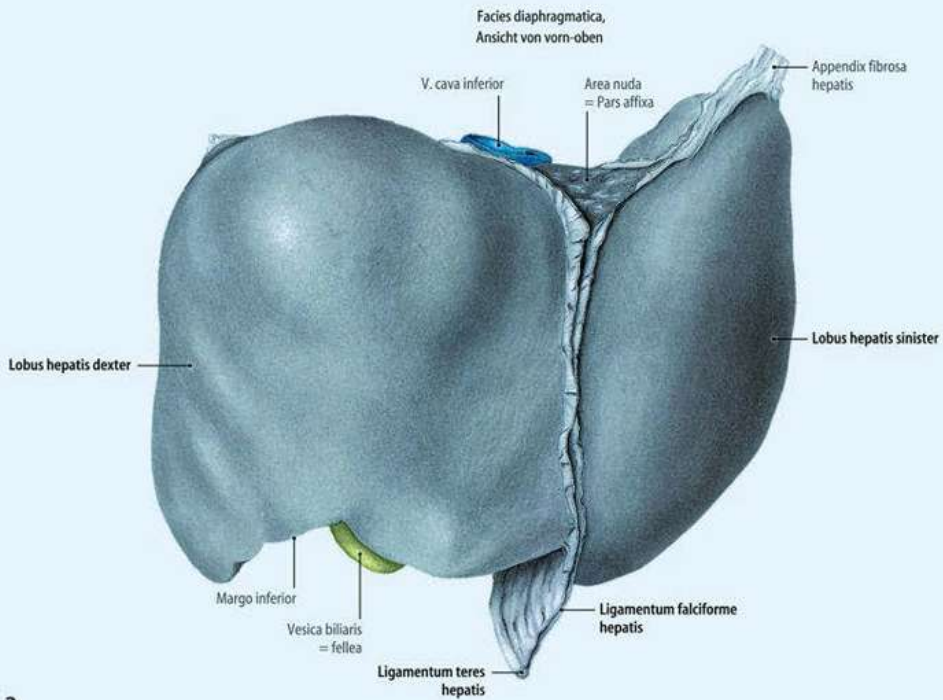
Die Milz liegt im linken Oberbauch in direkter Nachbarschaft zum Magen, Niere und Dickdarm. Die Milz ist etwa 4 cm dick, 7 cm breit und 11 cm lang.

➤ Merkspruch

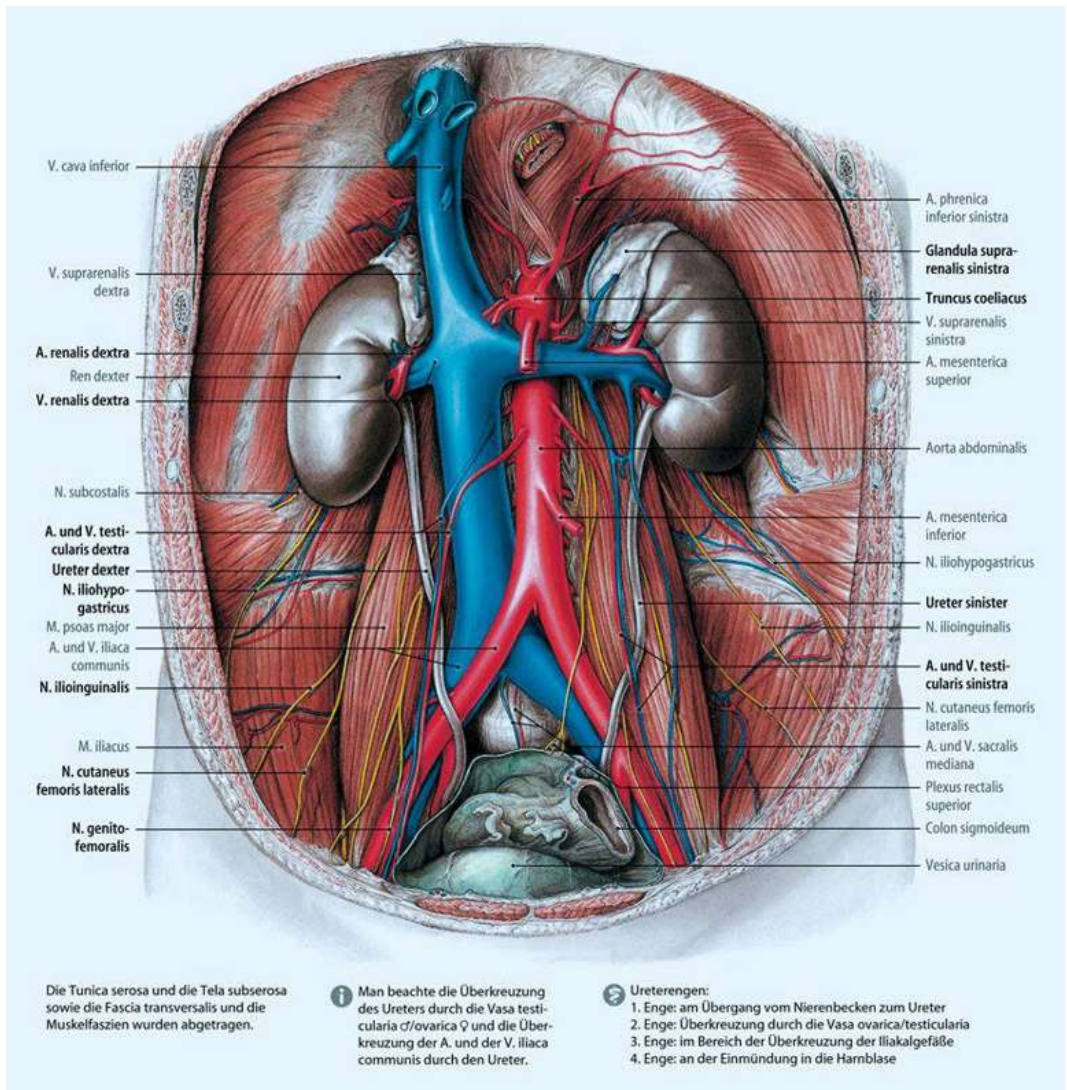
„4711“

Dicke (4), Breite (7) und Länge der Milz (11) in cm.

Sie zeigt eine zum Zwerchfell hingewandte Seite (**Facies diaphragmatica**) und eine zu den Bauchorga-



■ Abb. 12.26a,b Leber (Hepar). (Aus Tillmann 2010)



■ Abb. 12.27 Organe und Leitungsbahnen des Retroperitonealraumes, Ansicht von ventral. (Aus Tillmann 2010)

nen hingewendete Seite (**Facies visceralis**), die in die **Facies gastrica, colica** und **renalis** eingeteilt wird. Am Mizhilus (**Hilus splenicus**) ziehen die **A. und V. splenica** in bzw. aus der Milz.

Bauchspeicheldrüse (Pankreas)

Die Bauchspeicheldrüse liegt der hinteren Bauchwand an (sekundär retroperitoneal). Der Kopf (**Caput pancreatis**) liegt dem Duodenum-„C“ an. Dem Körper (**Corpus pancreatis**) folgt der Schwanz (**Cauda pancreatis**), der am Milzhilus endet.

Nieren (Ren), ableitende Harnwege und Nebennieren (Glandulae suprarenales)

Die Nieren liegen im Retroperitonealraum ventral der 12. Rippe, wobei die rechte Niere durch die darüber liegende Leber weiter nach kaudal verschoben ist als die linke Niere (■ Abb. 12.27). Die Nieren sind etwa 4 cm dick, 7 cm breit und 11 cm lang (wie die Milz). Sie zeigen einen seitlichen und mittleren Rand (**Margo medialis et lateralis**), eine Vorder- und Hinterfläche (**Facies anterior et superior**) und

einen oberen und unteren Pol (**Extremitas superior et inferior**).

Die Niere wird in Mark (**Medulla**), Rinde (**Cortex**) und Nierenbecken (**Pelvis renalis**) unterteilt. Vom Nierenbecken aus führt der Harnleiter (**Ureter**) den Urin über einen Bauch- und einen Beckenteil (**Pars abdominalis et pelvica**) 30–50 cm zur Harnblase (**Vesica urinaria**). Die Harnblase ist das vor- derste Organ im kleinen Becken. Sie liegt der Symphysis pubica an. Die Harnblase wird unterteilt in eine Spitze (**Apex vesicae**), einen Körper (**Corpus vesicae**), einen Blasengrund (**Fundus vesicae**) und einen Harnblasenhals (**Collum vesicae**), der in die Harnröhre (**Urethra**) übergeht. Die Urethra ist bei der Frau ca. 3–5 cm lang, beim Mann hingegen 25–30 cm.

Die Nebennieren (**Glandula suprarenalis**) liegen auf den oberen Nierenpolen und sind ca. 5 cm lang, 3 cm breit und 1 cm dick. Sie sind dreieck- bzw. halbmondförmig und werden ebenfalls in Rinde und Mark unterteilt.

Männliche und weibliche Genitalien

Diese zählen nicht mehr primär zum Situs, sollen der Vollständigkeit halber aber ebenfalls kurz hier besprochen werden.

Weibliche Geschlechtsorgane

Der Eierstock (**Ovarium**) ist etwa pflaumengroß und liegt in der Seitenwand des Beckens in der **Fossa ovaria**. Von ihm geht der Eileiter (**Tuba uterina**) aus, der etwa 10–15 cm lang ist und in der Gebärmutter (**Uterus**) endet. Der Uterus ist birnenförmig und wird in den Körper (**Corpus uteri**) und den Gebärmutterhals (**Cervix uteri**) unterteilt. Letzterer geht in die Scheide (**Vagina**) über, die ca. 10 cm lang ist und zu den Schamlippen (**Labia majora et minora pudendi**) und dem Scheidenvorhof (**Vestibulum vaginae**) führt.

Männliche Geschlechtsorgane

Der Hoden (**Testis**) liegt im Hodensack (**Scrotum**). Dem Hoden liegt der Nebenhoden (**Epididymis**) an. Von dort führt der Samenleiter (**Ductus deferens**), der ca. 35–40 cm lang ist, in die männliche Urethra. Der Ductus deferens ist neben etlichen Gefäßen Teil des Samenstrangs (**Funiculus spermaticus**). Die Vorstehdrüse (**Prostata**) ist etwa kastaniengroß, umschließt die Urethra und liegt vor der Harnblase.

Sie wird unterteilt in eine Basis und ein kegelförmiges Ende (**Basis et Apex prostatae**). Ferner unterscheidet man den **Isthmus prostatae** sowie einen **Lobus dexter, sinister et medius**.

12.2.5 Kopf und Hals

Schädel (Cranium)

Der Schädel (Cranium) wird durch viele einzelne Knochen gebildet, die im Laufe der Entwicklung zusammengewachsen sind (■ [Abb. 12.28](#), ■ [Abb. 12.29](#)).

■ Schädeldach (Calvaria)

Das Schädeldach wird gebildet durch

- Scheitelbein (**Os parietale**)
- Hinterhauptsbein (**Os occipitale**)
- Stirnbein (**Os frontale**)

Diese Anteile werden durch Nähte (Suttureae) miteinander verbunden:

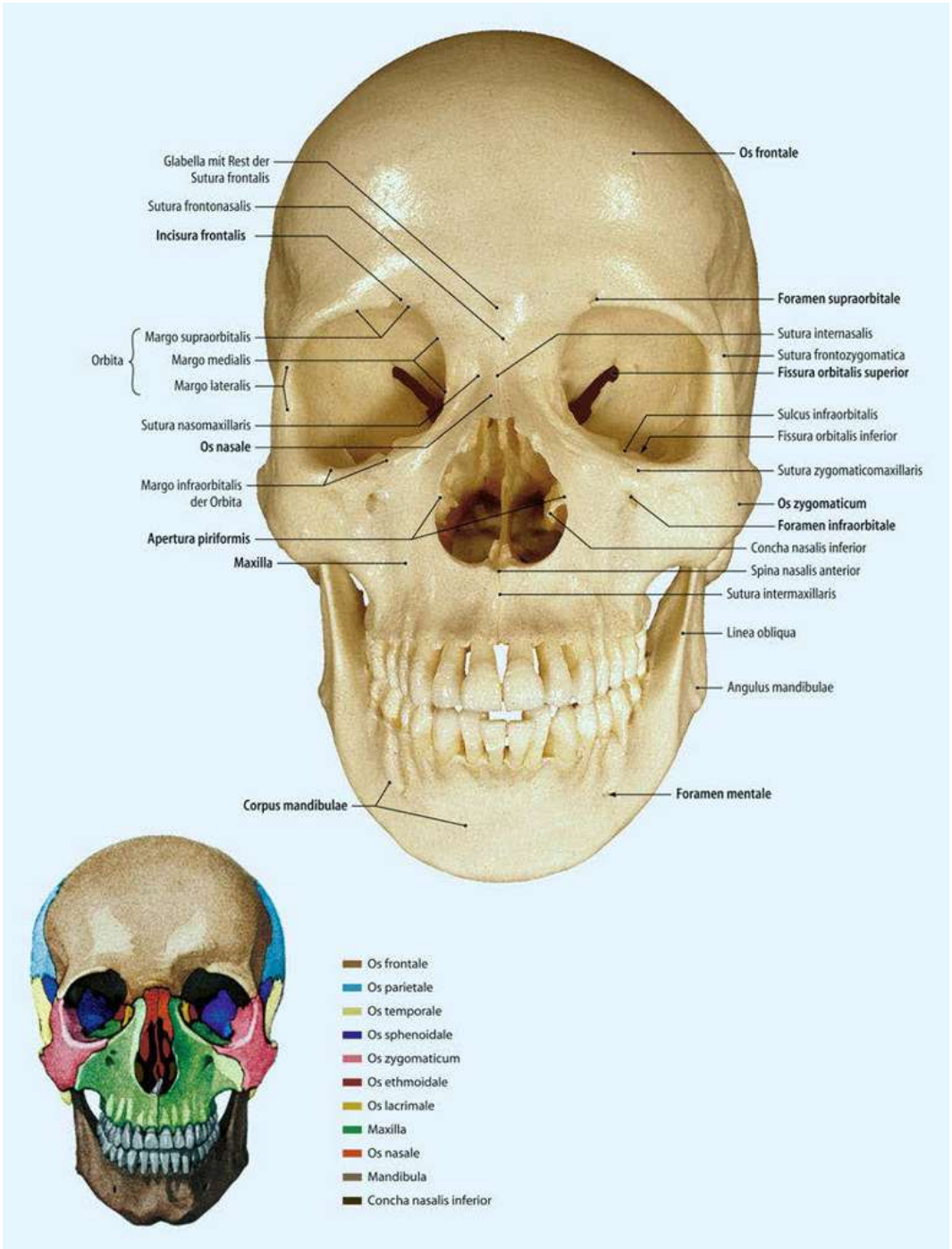
- **Sutura coronalis** zwischen Stirn- und Scheitelbeinen
- **Sutura sagitalis** zwischen den beiden Scheitelbeinen
- **Sutura lambdoidea** zwischen Scheitelbeinen und Hinterhauptsbein
- **Sutura frontalis** zwischen den Stirnbeinen
- **Sutura squamosa** zwischen Scheitelbein und Schläfenbein

Fontanellen (**Fonticuli**) sind die größeren Lücken, die beim Neugeborenen zwischen den Schädelknochen noch existieren (damit der Schädel – der größte Teil des Kindes bzgl. des Umfangs – durch den Geburtskanal passt, hat die Natur dafür gesorgt, dass er sich der äußeren Umgebung noch anpassen kann, und die Schädelknochen verschieblich sind). Zunächst befindet sich hier nur Bindegewebe, mit dem Wachstum schließen sich aber auch diese Bereiche.

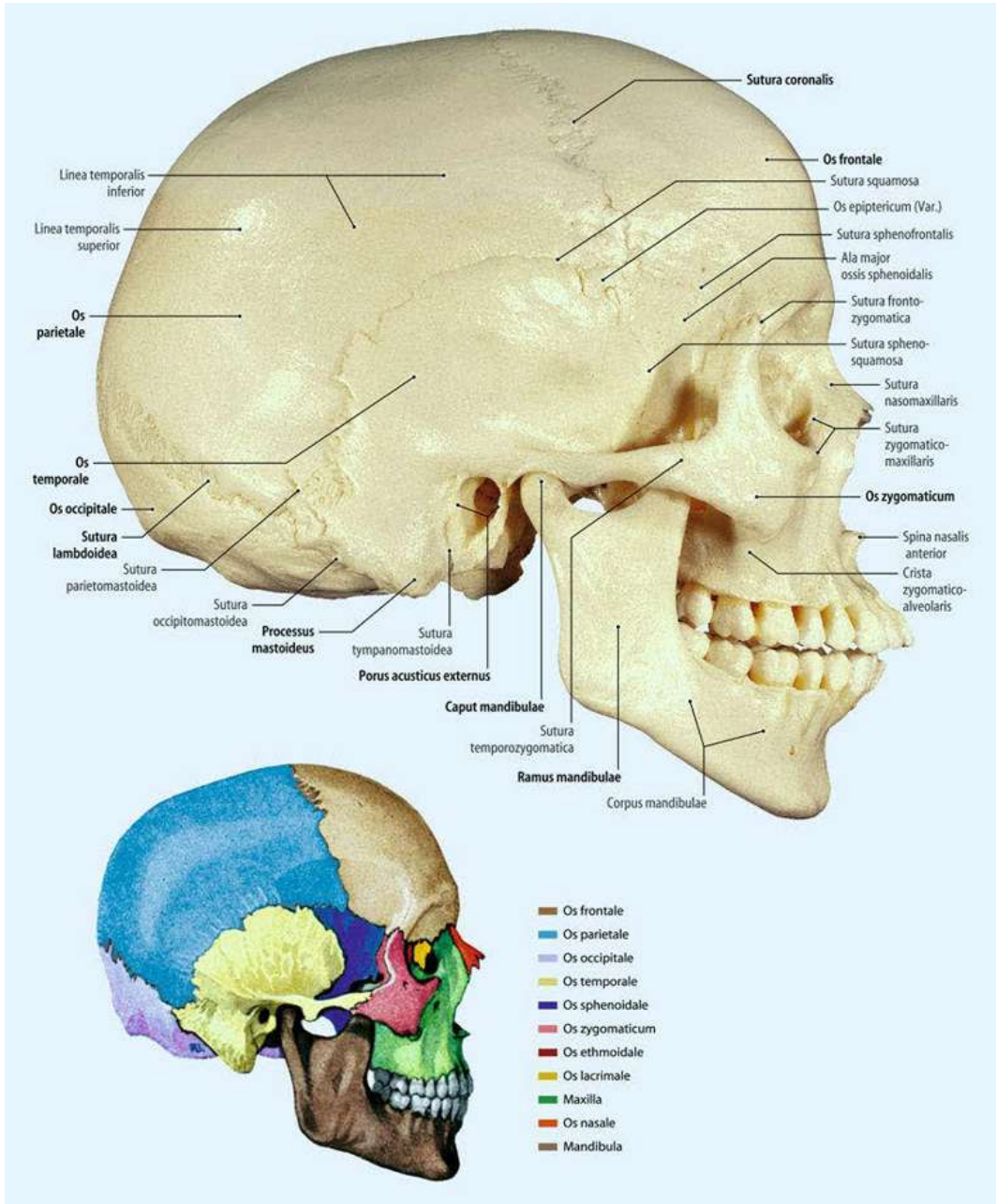
■ Schädelbasis

Die Schädelbasis setzt sich ebenfalls aus mehreren Schädelknochen zusammen (■ [Abb. 12.30](#)):

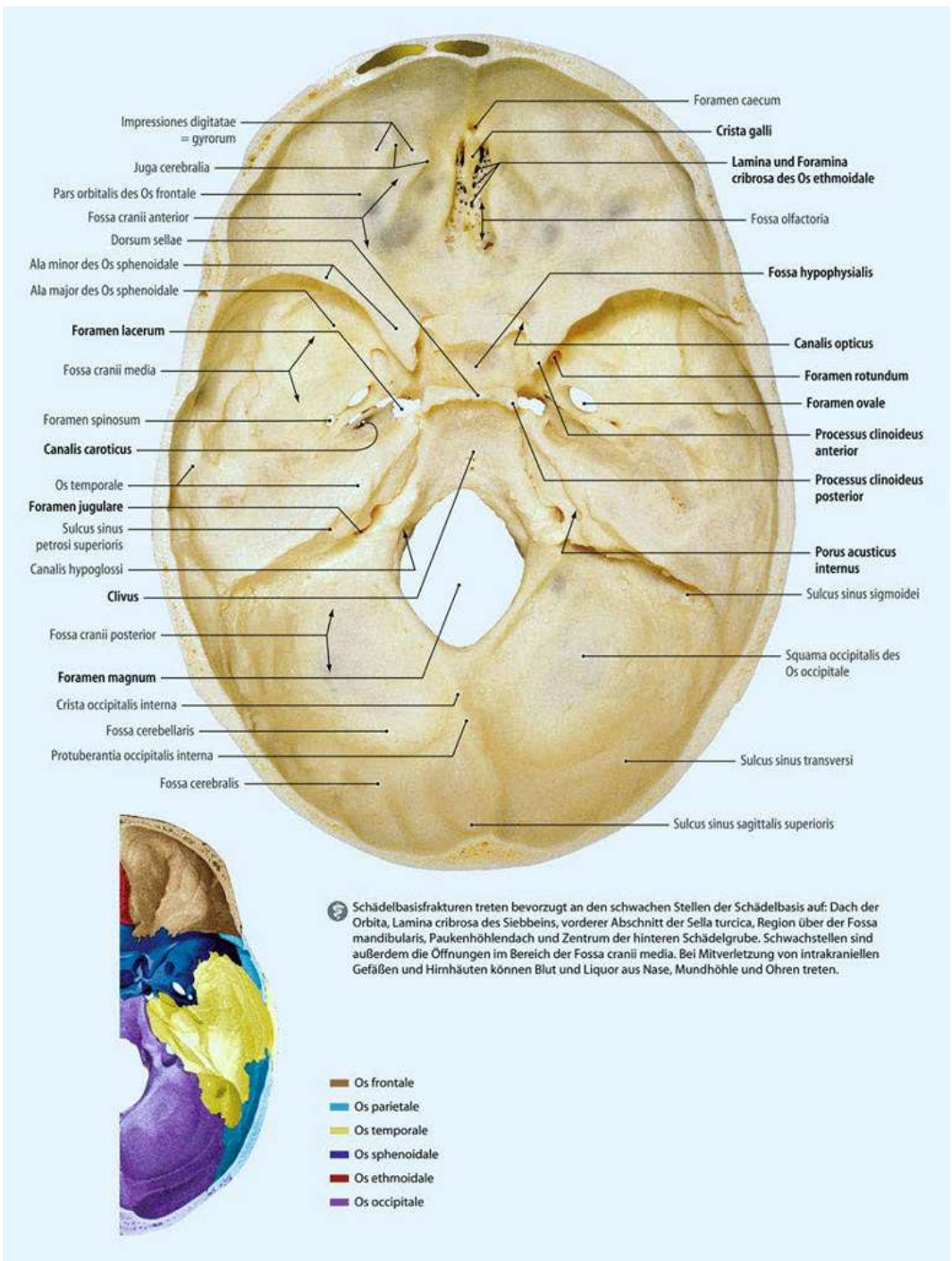
- Stirnbein (**Os frontale**)
- Siebbein (**Os ethmoidale**)



■ Abb. 12.28 Schädel, Ansicht von vorne. (Aus Tillmann 2010)



■ **Abb. 12.29** Schädel, Ansicht von rechts-lateral. (Aus Tillmann 2010)



■ Abb. 12.30 Innere Schädelbasis, von oben. (Aus Tillmann 2010)

- Keilbein (**Os sphenoidale**)
- Hinterhauptsbein (**Os occipitale**)
- Schläfenbein (**Os temporale**)

In der Schädelbasis verlaufen etliche wichtige Gefäße und Nerven. Ebenfalls gibt es eine enge Beziehung zum Hirnstamm.

■ Gesichtsschädel

Der Gesichtsschädel setzt sich aus folgenden knöchernen Anteilen zusammen (■ Abb. 12.28):

- Stirnbein (**Os frontale**)
- Nasenbein (**Os nasale**)
- Keilbein (**Os sphenoidale**)
- Jochbein (**Os zygomaticum**)
- Siebbein (**Os ethmoidale**)
- Schläfenbein (**Os temporale**)
- Scheitelbein (**Os parietale**)
- Tränenbein (**Os lacrimale**)
- Oberkieferknochen (**Maxilla**)
- Unterkieferknochen (**Mandibula**)

Die Augenhöhle (**Orbita**) wird dabei gebildet durch das Os sphenoidale, Os ethmoidale, Os lacrimale, Os frontale, Os zygomaticum und Maxilla.

■ Nasennebenhöhlen (**Sinus paranasalis**)

Die Nasennebenhöhlen sind die luftgefüllten Räume in den der Nasenhöhle naheliegenden Knochen. Sie entsprechen dem Leichtbauprinzip (► Abschn. 12.2.1). Zu den Nebenhöhlen zählen (■ Abb. 12.31a–c):

- Kieferhöhle (**Sinus maxillaris**)
- Stirnhöhle (**Sinus frontalis**)
- Siebbeinzellen (**Cellulae ethmoidales**)
- Keilbeinhöhle (**Sinus sphenoidales**)

Mundhöhle (**Cavitas oris**)

Wesentliche anatomische Bestandteile der Mundhöhle sind die Zunge, Speicheldrüsen, der harte und weiche Gaumen.

■ Große Speicheldrüsen (**Glandula salivariae majores**)

Zu den großen Speicheldrüsen zählt die Ohrspeicheldrüse (**Glandula parotidea**), die vor und hinter dem Ohr auf Unterkiefer und Warzenfortsatz liegt. Der Ausführungsgang (**Ductus parotideus**)

mündet in der Mundhöhle gegenüber dem oberen zweiten Backenzahn. Weitere große speichelproduzierende Drüsen sind die Unterkieferspeicheldrüse (**Glandula submandibularis**) und Unterzungenspeicheldrüse (**Glandula sublingualis**).

■ Kleine Speicheldrüsen (**Glandula salivariae minores**)

Zu den kleinen Speicheldrüsen zählen die Lippen-drüsen (**Glandula labialis**), Gaumendrüsen (**Glandula palatinae**), Wangendrüsen (**Glandula buccales**) und die Zungendrüsen (**Glandula linguales**).

■ Gaumen (**Palatum**)

■ Harter Gaumen (**Palatum durum**)

Der harte Gaumen entspricht dem vorderen, oral gelegenen Teil des Gaumens.

■ Weicher Gaumen (**Palatum molle**)

Der weiche Gaumen besteht aus einer Bindegewebsplatte und entspricht dem hinteren Gaumenanteil.

Nasenhöhle (**Cavitas nasi**)

Die Nasenhöhle wird gegliedert in den Nasenvorhof (**Vestibulum nasi**), die Nasenscheidewand (**Septum nasi**), die Nasenmuscheln (**Conchae nasi**), Nasengänge (**Meatus nasi**) und den Choanen (Grenze zwischen Nasenhöhle und Nasenrachenraum).

Es gibt drei Nasenmuscheln

1. **Concha nasi inferior**,
2. **Concha nasi media**,
3. **Concha nasi superior**

sowie drei Nasengänge

1. **Meatus nasi inferior** (Mündung des Tränen-Nasen-Gangs)
2. **Meatus nasi medialis** (Verbindung zu Kieferhöhle, Stirnhöhle, Siebbeinzellen)
3. **Meatus nasi superior** (Verbindung zu den oberen Siebbeinzellen)

Rachen (**Pharynx**)

Wichtige Bestandteile des vor allem aus für den Schluckakt wichtigen Muskeln bestehenden Rachens sind die Mandeln, die Schilddrüse und der Kehlkopf.

Der lymphatische Rachenring besteht aus mehreren „Abwehrstationen“, zu denen auch die Rachen-, Gaumen- und Zungenmandeln gehören

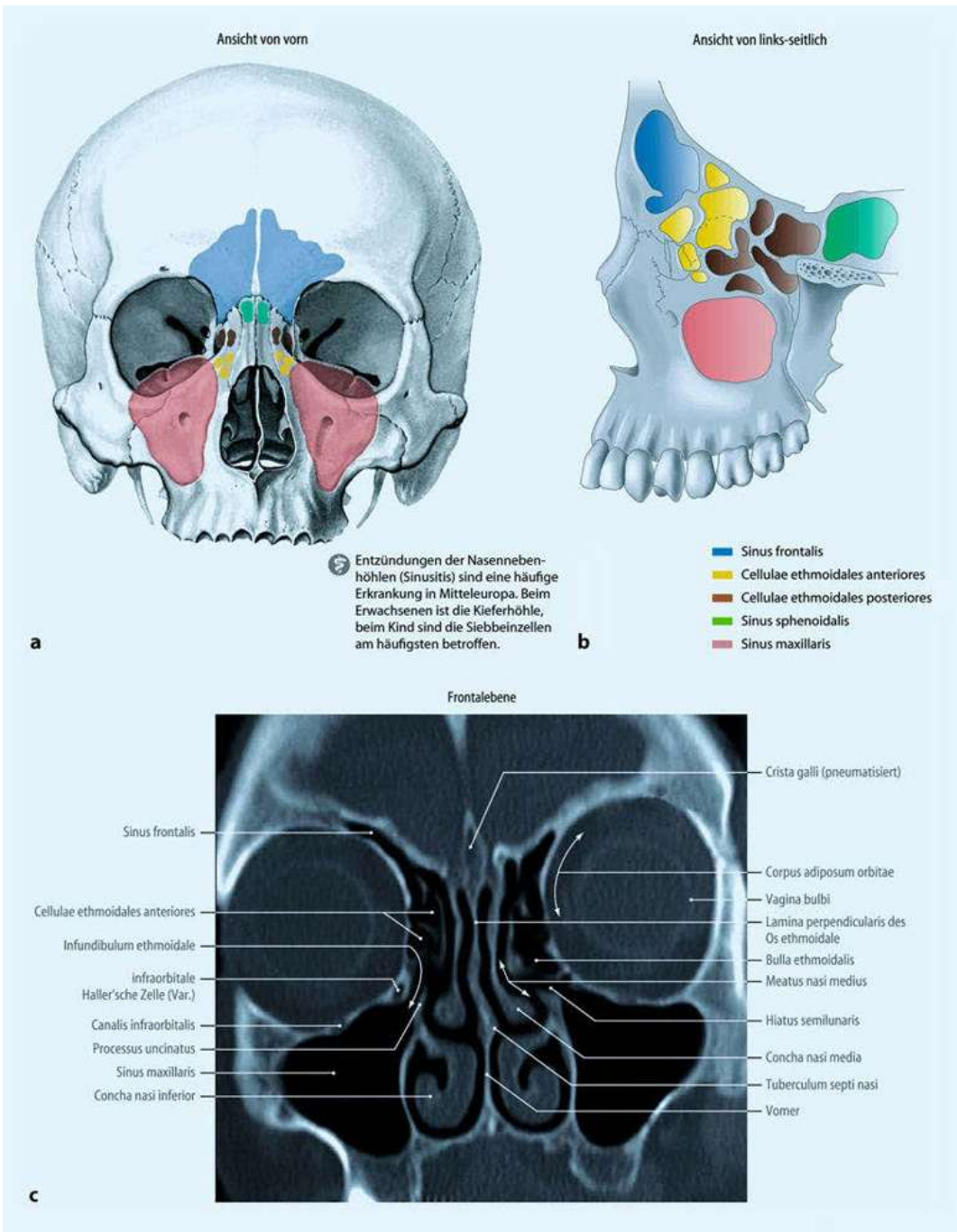


Abb. 12.31a–c Projektion der Nasennebenhöhlen auf den Schädel (a, b). Computertomographie (CT), Nasenhöhle, Nasennebenhöhlen und Orbita in der Frontalebene (c). (Aus Tillmann 2010)

(**Tonsilla palatina, pharyngea et lingualis**). Die prominentesten sind dabei die Gaumenmandeln, die in der Mandelgrube zwischen den beiden Gaumenbögen sichtbar sind.

■ Schilddrüse (**Glandula thyroidea**)

Die Schilddrüse besteht aus zwei Lappen (**Lobus dexter et sinister**), die durch eine schmale Verbindung (**Isthmus glandulae thyroidea**) miteinander in Verbindung stehen. Der Isthmus liegt etwa auf Höhe des 2.–4. Trachealknorpels. Eine gesunde Schilddrüse wiegt beim Erwachsenen etwa 15–20 g.

Die Nebenschilddrüsen (**Glandulae parathyroidea**) sind etwa linsengroß und liegen dorsal an den Schilddrüsenlappen an.

■ Kehlkopf (**Larynx**)

Der Kehlkopf besteht aus Knorpeln, Bändern und Muskeln. Wichtige formende Knorpel sind der Schildknorpel (**Cartilago thyroidea**), der Ringknorpel (**Cartilago cricoidea**) und der Stellknorpel (**Cartilago arytenoidea**). Der Kehlkopfdeckel (**Epiglottis**) verschließt beim Schlucken den Zugang zur Trachea.

12.2.6 ZNS

Zum zentralen Nervensystem (ZNS) zählen die Hirnanteile und das Rückenmark. Das periphere Nervensystem (PNS) beschreibt hingegen den Verlauf und die Aufgaben der Hirn- und Spinalnerven im Körper.

Das Gehirn und seine Anteile sind durch eine schützende Haut umgeben, die in harte Hirnhaut (**Dura mater**) und weiche Hirnhaut (**Pia mater und Arachnoidea**) unterteilt wird.

■ Großhirn (**Telencephalon/Cerebrum**)

Das Großhirn (**Abb. 12.32**) wird grob in zwei Hemisphären eingeteilt und weist mehrere Lappen (**Lobus**) und Furchen (**Sulcus**) auf.

■ Hypophyse und Zirbeldrüse (**Glandula pinealis**)

Die Hypophyse liegt im **Sella turcica** („Türkensattel“) der Schädelbasis. Sie besteht aus einem Vorder- und Hinterlappen und weist einen Hypophysenstiel auf. Die Glandula pinealis liegt an der Hinterwand des dritten Ventrikels.

■ Zwischenhirn (**Diencephalon**)

Zum Zwischenhirn zählen **Epithalamus, Thalamus, Subthalamus** und **Hypothalamus**.

■ Hirnstamm (**Truncus cephalis**)

Der Hirnstamm setzt sich aus **Medulla oblongata**, der Brücke (**Pons**, **Abb. 12.32**) und dem Mittelhirn (**Mesencephalon**) zusammen, wobei im Inneren zusätzlich das Rautenhirn (**Rhombencephalon**) abzugrenzen ist. Im Hirnstamm liegen die Zentren, die lebenswichtige Funktionen steuern, und die Hirnnervenkerne, aus denen die Hirnnerven herausziehen (s. u.).

■ Kleinhirn (**Cerebellum**)

Das Kleinhirn (**Abb. 12.32**) besteht ebenfalls aus zwei Hemisphären (**Hemisphaeria cerebelli**) und dem Kleinhirnwurm (**Vermis cerebelli**). Ebenso sind hier Lappen (**Lobi**) zu unterscheiden und drei Stiele (**Pedunculi**), über die das Kleinhirn mit anderen wichtigen Zentren des ZNS verbunden ist.

■ Liquorräume

Das Hirnwasser (**Liquor cerebrospinalis**) wird hauptsächlich im **Plexus choriodei** gebildet und durch mehrere Räume geleitet:

- Paarige Seitenventrikel (**Ventriculi lateralis**) in den Großhirnhemisphären
- Dritter Ventrikel (**Ventriculus tertius**) im Zwischenhirn
- Vierter Ventrikel (**Ventriculus quartus**) zwischen Mittelhirn und Rückenmark

■ Rückenmark (**Medulla spinalis**)

Das Rückenmark wird unterteilt in die graue und weiße Substanz, in denen die Nervenfasern für die unterschiedlichen Empfindungen aber auch Koordination für Muskelbewegungen etc. verlaufen (**Abb. 12.33**). Vom Rückenmark zweigen die

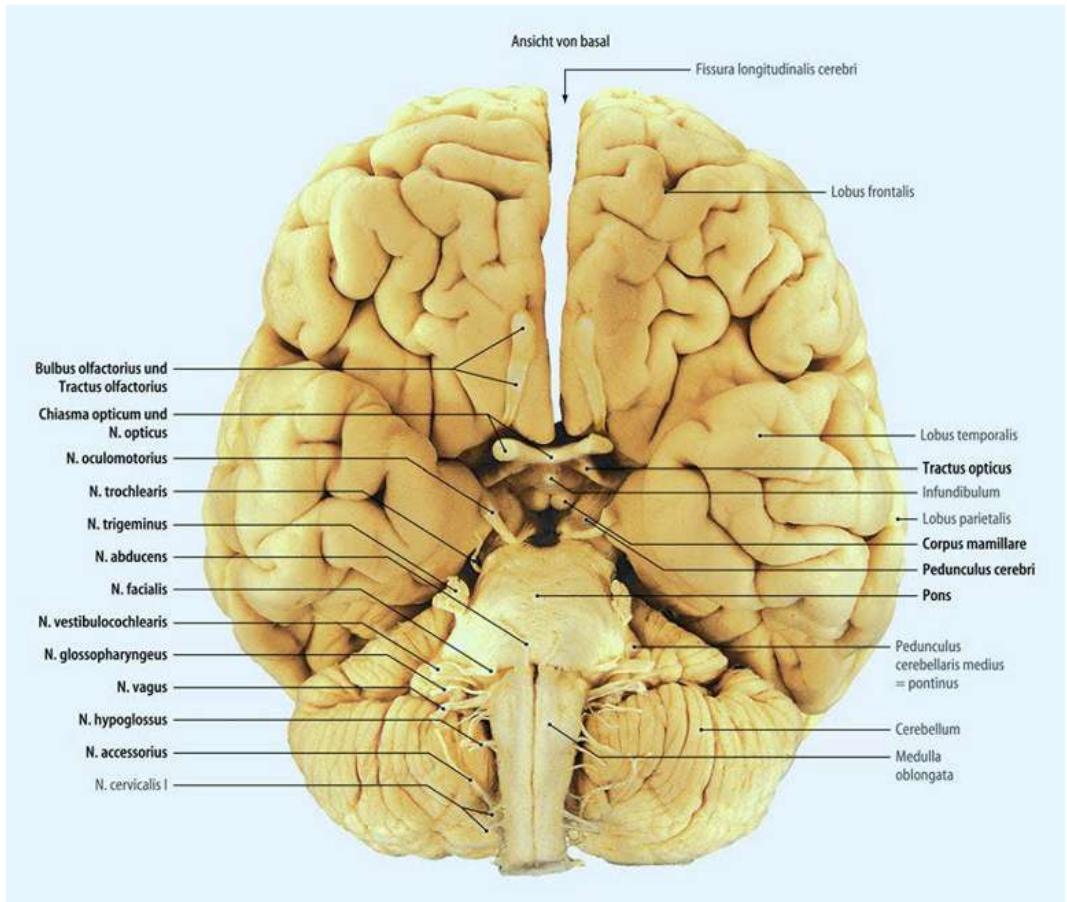


Abb. 12.32 Gehirn. (Aus Tillmann 2010)

Spinalnerven (**Nn. spinalis**) ab und verlaufen durch die **Foramina intervertebrales** in die Peripherie des Körpers.

➤ Merkspruch

12 Hirnnerven

Onkel Otto orgelt tag-täglich, aber freitags
verseisst er gerne viele alte Hamburger.

N. olfactorius (I)

N. opticus (II)

N. oculomotorius (III)

N. trochlearis (IV)

N. trigeminus (V)

N. abducens (VI)

N. facialis (VII)

N. vestibulocochlearis (VIII)

N. glossopharyngeus (IX)

N. vagus (X)

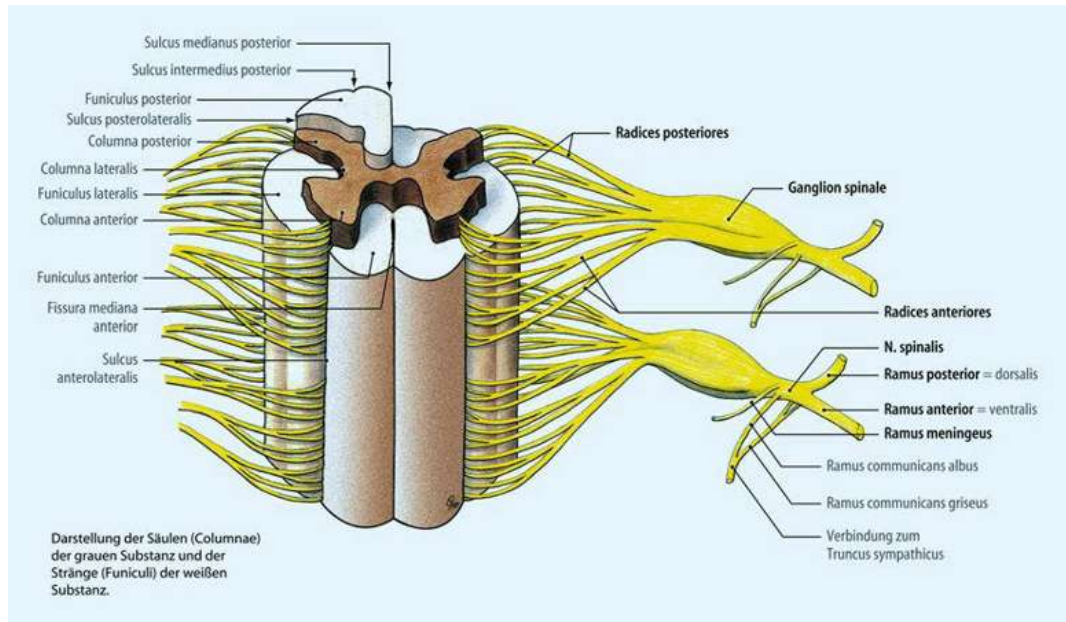
N. accessorius (XI)

N. hypoglossus (XII)

12.2.7 Wichtige Gefäßbahnen auf einen Blick

Das Lymphsystem

Das Lymphsystem im menschlichen Körper verläuft wie in [Abb. 12.34](#) dargestellt. Neben den Lymphgefäßen sind die Lymphknotenstationen (Filterstationen) und die Lymphorgane (z. B. Thymus, Milz, Mandeln sowie Appendix) Bestandteil dieses komplexen Systems. Die Lymphe wird in das Venensystem drainiert.



■ **Abb. 12.33** Rückenmark und Aufbau der Spinalnerven. (Aus Tillmann 2010)

Arterienstämme und Hauptarterien

(■ **Abb. 12.35a**)

■ **Kleiner Kreislauf (Lungenkreislauf)**

A. pulmonalis dexter et sinister

■ **Großer Kreislauf (Körperkreislauf)**

- Aorta ascendens
 - A. coronaria dextra et sinistra
- Arcus aortae
 - Truncus brachiocephalus
 - A. carotis communis dextra
 - A. subclavia dextra
 - A. carotis communis sinistra
 - A. subclavia sinistra
- Aorta descendens (Pars thoracica et abdominalis)
 - Truncus coeliacus
 - A. mesenterica superior
 - A. renalis
 - A. testicularis (ovarica)
 - A. mesenterica inferior
- Bifurcatio aortae
 - Aa. iliacae communes
 - A. iliaca externa
 - A. iliaca interna

➤ **Merkspruch**

Abgänge der A. carotis externa

*Theo Lingen frühstückt stets phantastische
Ochsenschwanzsuppe aus mageren Tieren.*

- A. thyroidea superior*
- A. lingualis*
- A. facialis*
- Rr. sternocleidomastoidei*
- A. pharyngea ascendens*
- A. occipitalis*
- A. auricularis posterior*
- A. maxillaris*
- A. temporalis superficialis*

Venenstämme und Hauptvenen

(■ **Abb. 12.35b**)

■ **Kleiner Kreislauf (Lungenkreislauf)**

Vv. pulmonalis dextra et sinistra superior et inferior

■ **Großer Kreislauf (Körperkreislauf)**

- V. cava superior
 - V. jugularis, interna, externa et anterior
 - V. subclavia
 - V. azygos et hemiazygos
- V. cava inferior

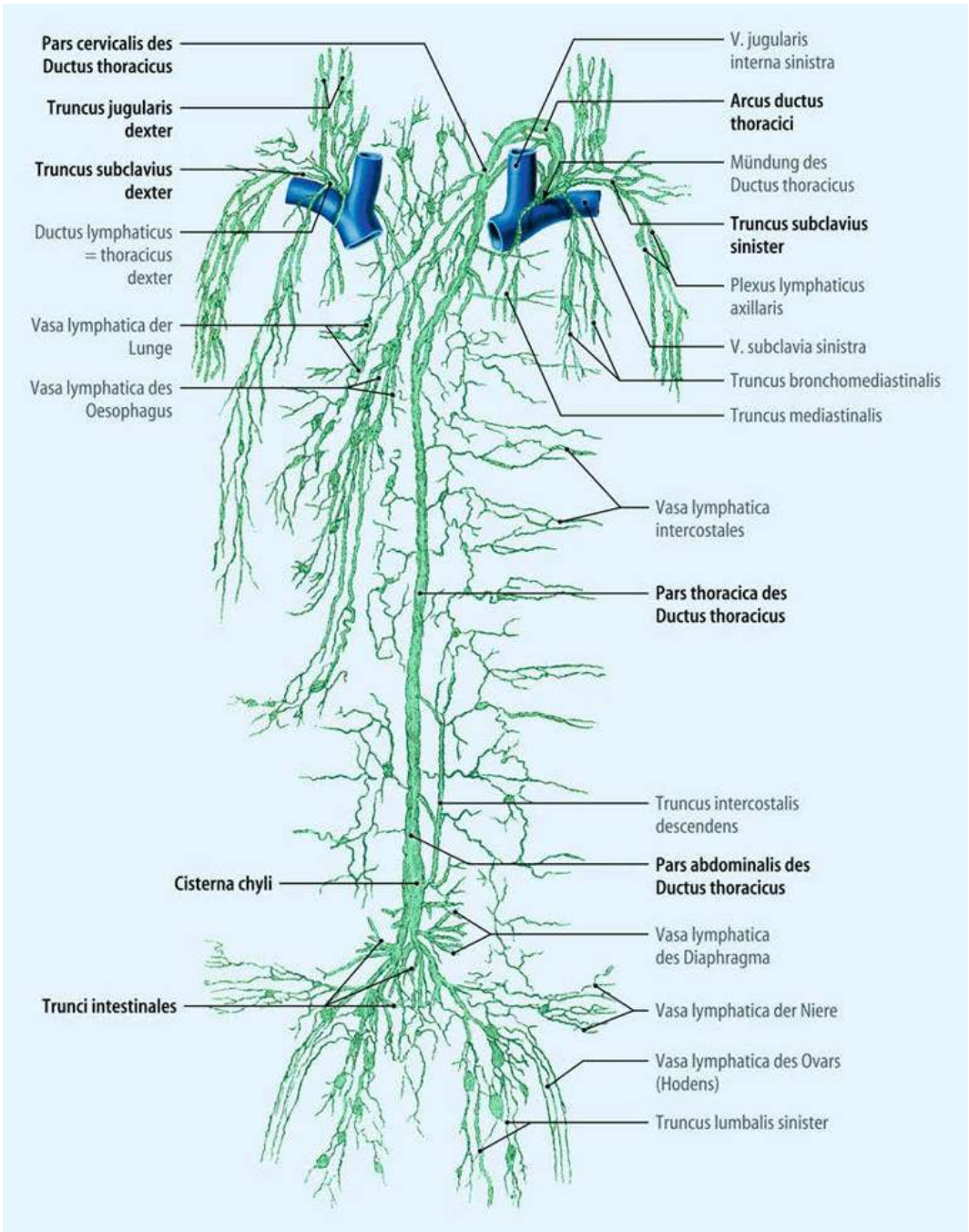


Abb. 12.34 Lymphsystem. (Aus Tillmann 2010)

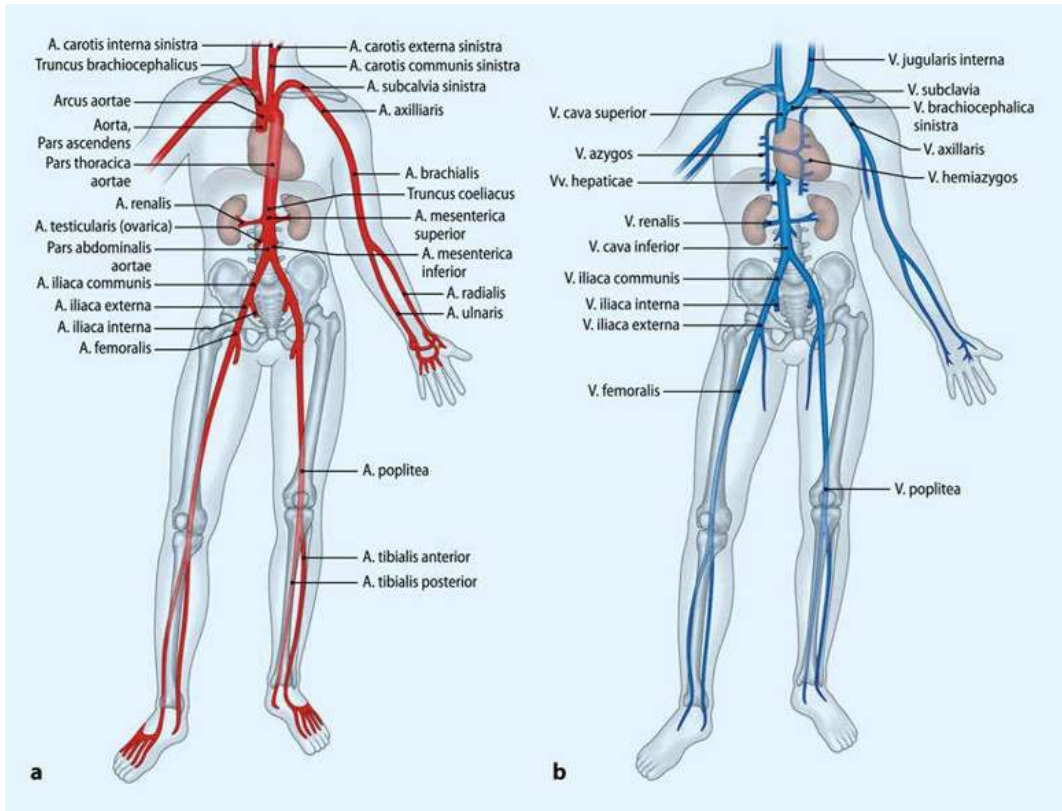


Abb. 12.35a,b Arterienstämme und Hauptäste (a). Venensystem (b). (Aus Zilles et al. 2010)

- Vv. iliaca communes
- V. iliaca interna et externa

✓ Wir sind wieder auf Lanzarote in der Röntgenabteilung des kleinen Inselkrankenhauses. Ihnen ist gerade wieder eingefallen, dass Sie Terminologie und Anatomie seit dem letzten Schulhalbjahr ganz gut beherrschen. Sie sind auf den Unterarm gefallen und vermutlich mit dem Ulnarschaft aufgekommen. Es kann auch gut sein, dass der Radius betroffen ist, denn Sie wissen nicht mehr genau, in welcher Stellung Ihr Unterarm und Ihre Hand waren (Pronation oder Supination), und der Schmerz ist derzeit überall im Unterarm lokalisiert. Um sicherzugehen sagen Sie den spanischen MTRA „Trauma – Ulna – Radius“.

12.3 Voraussetzungen zu Diagnostik und Therapie

T. Hartmann

Bevor Sie allerdings tatsächlich geröntgt werden, müssen Sie noch einige andere Stationen innerhalb einer Klinik durchlaufen. Schließlich darf man nicht einfach so röntgen oder gar Kontrastmittel geben.

In diesem Abschnitt erfahren Sie, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um diagnostische oder therapeutische Verfahren in der Radiologie durchführen zu können.

In dem benannten Fallbeispiel befinden Sie sich im Urlaub im Ausland. Da aber jedes Land seine eigenen Gesetze hat, wird hier ausschließlich auf die Gegebenheiten in Deutschland eingegangen.

Wie sieht es aus, wenn man in Deutschland nach einem Sturz ein Krankenhaus aufsuchen muss?

Als erstes wird i. d. R. die **Solvenz**, also Zahlungsfähigkeit geprüft. Schließlich sind Krankenhäuser auch Wirtschaftsunternehmen. (Die Ausgangslage ist ein leichter Unfall, keine akute Lebensbedrohung – in solch einem Fall MUSS geholfen werden). Sie kennen das, wenn Sie nach Ihrer Krankenversicherungskarte gefragt werden.

Als nächstes werden Sie einem Arzt vorgestellt, der eine Anamnese und eine klinische Untersuchung durchführt.

12.3.1 Anamnese

Der Ursprung des Wortes Anamnese ist im griechischen zu finden und bedeutet „Erinnerung“. Im medizinischen Kontext versteht man darunter die Befragung eines Patienten zu seiner Leidensgeschichte. Je nach Beschwerden und Komplexität einer Erkrankung kann es dabei notwendig sein, die verschiedensten Aspekte zu betrachten.

■ Eigenanamnese

Unter dieser Anamneseform versteht man die Ergebnisse der Patientenbefragung. Dazu gehören z. B. biografische Angaben (Geburtsdatum und -ort, Lebensgewohnheiten, Unfallhergang, Allergien, Medikamente etc.). Mit diesen Daten kann sich der Arzt ein Bild von seinem Patienten machen und Risikofaktoren erkennen oder ausschließen. So ist die Angabe (oder das Verschweigen) einer Allergie entscheidend für eine Medikamentenauswahl.

In vielen Fällen gibt es standardisierte Anamnesebögen, mit denen die wichtigsten Dinge abgefragt werden, z. B. das Vorliegen einer Schilddrüsenerkrankung vor der Gabe eines jodhaltigen Kontrastmittels.

■ Fremdanamnese

Nicht jeder Patient kann die Fragen beantworten oder nimmt Verhaltensweisen (z. B. im Schlaf das Schnarchen oder evtl. Atemaussetzer, die aber für die Diagnose eines Schlaf-Apnoe-Syndroms wichtig

sein können) an sich wahr. In diesem Fall können Familienangehörige oder andere nahestehende Personen Auskunft geben.

■ Familien- und Sozialanamnese

Diese Anamneseform kann Teil der Eigen- und Fremdanamnese sein. Sie spielt eine wichtige Rolle, wenn man familiär gehäufte Erkrankungen und damit verbundene Risikofaktoren erfragen muss.

Auch Familienstand, Religionszugehörigkeit und der soziale Status können eine wichtige Rolle bei der Abschätzung von Krankheitsursachen und Risikofaktoren spielen. Dementsprechend haben diese Daten Einfluss auf die Auswahl der diagnostischen Verfahren und anschließenden Therapieoptionen. So sind bei einigen Religionsgemeinschaften Transplantationen oder Transfusionen verboten.

34 % der alleinstehenden, geschiedenen/getrennt lebenden Frauen in Deutschland empfinden ihren Gesundheitszustand als „weniger gut“ oder „schlecht“. Bei den befragten verheirateten Frauen sind es 20,3 %.

Verheiratete Frauen konsumieren im Durchschnitt 8,3 g Alkohol pro Tag. Bei den alleinstehenden Männern sind es 48,5 g (Schätzwerte).

12.3.2 Klinische Untersuchung

Nach der Anamnese erfolgt die körperliche Untersuchung. Dabei ist der Arzt auf seine „fünf Sinne“ angewiesen und agiert in aller Regel ohne aufwendige diagnostische Apparate. Diese Untersuchung bildet den Ausgangspunkt für alle weiteren Verfahren. Anderenfalls müsste jeder Patient von „der Locke bis zur Socke“ untersucht werden, was nicht nur Kosten, sondern auch eine Strahlenbelastung verursachen würde.

Je nach Fragestellung werden dabei nur einzelne Körperbereiche untersucht, oder es erfolgt eine Ganzkörperuntersuchung.

Am Anfang steht die **Inspektion**, das Betrachten der Patienten. Diese banal klingende Untersuchungsform liefert wichtige Hinweise zu:

- Bewusstseinslage,
- Allgemein- und Ernährungszustand.

Darüber hinaus wird die Farbe der Haut (das sog. Hautkolorit, z. B. Gelbfärbung bei einer Leber- und Gallenerkrankung), die Pupillenreaktion, ein mögliches Zittern der Hände (z. B. Tremor bei Parkinsonpatienten) oder Schwellungen (z. B. Ödeme bei Herzerkrankungen) beobachtet und ggf. dokumentiert. Meist gehört zu diesem ersten Schritt auch schon das **Palpieren**, das Abtasten betroffener Körperregionen um z. B. das Ausmaß einer Schwellung, Verhärtungen oder Schmerzareale herauszufinden.

Als nächstes folgt die **Perkussion**, das Abklopfen. Kranke Körperbereiche können typische „Klopfgeräusche“ oder „Klopfgefühle“ (z. B. im Bereich der Lungen) erzeugen. Auch das Abhören bzw. **Auskultieren** ist fester Bestandteil der klinischen Untersuchung (klassischerweise des Herzens, der Lunge und des Abdomens).

Auch die Wahrnehmung von Gerüchen spielt eine große Rolle. So kann Acetongeruch (also ein Geruch ähnlich dem von Nagellackentferner) einen Hinweis auf eine Diabeteserkrankung liefern.

Zum Schluss folgt die **Funktionsprüfung** von Gelenken, Muskelkraft oder der Wirbelsäule. Dauer und Ausmaß der klinischen Untersuchung sind abhängig von der Fragestellung und erfolgen i. d. R. gezielt nach den in der Anamnese angegebenen Beschwerden.

Erst im Anschluss an die klinische Untersuchung erfolgt eine weiterführende Diagnostik in der Radiologie oder Laboratoriumsmedizin.

12.3.3 Aufklärung

Die oberste Rechtsform in Deutschland ist das Grundgesetz. In diesem ist das Recht auf körperliche Unversehrtheit als Grundrecht beschrieben (Artikel 2 GG). Jede Form des Eingriffs in die körperliche Unversehrtheit erfüllt den Tatbestand der Körperverletzung. Das gilt auch für ärztliche bzw. medizinische Eingriffe. Aus diesem Grund muss im Vorfeld immer eine Aufklärung über geplante Maßnahmen erfolgen, der Patient muss einwilligen und der Eingriff muss fachgerecht durchgeführt werden.

Aufgrund der Aufklärung soll der Patient entscheiden können, ob er in eine Untersuchung oder Therapie einwilligt. Das kann er natürlich nur auf

der Grundlage von Informationen zu seiner Erkrankung und ihren Gefahren sowie zu den geplanten Maßnahmen und deren Folgen (und ggf. auch der Information über mögliche Alternativen). In welcher Form diese Informationen angeboten werden, ist vom Aufklärenden abhängig. Diesem kommt damit eine besondere Verantwortung zu, und er benötigt neben dem medizinischen Fachwissen auch ein hohes Maß an kommunikativen Fähigkeiten und Einfühlungsvermögen in die Lage der Patienten. Der Umfang einer Aufklärung hängt sowohl von der Dringlichkeit wie auch von der Gefährlichkeit des Eingriffs ab. So ist natürlich auch eine einfache Blutentnahme oder eine Röntgenaufnahme des großen Zehs ein Eingriff in die körperliche Unversehrtheit des Patienten. Beide Eingriffe sind aber extrem ungefährlich, sodass hier – zumindest nach derzeitiger Rechtsprechung – keine explizite, schriftlich fixierte Aufklärung erfolgen muss.

➤ **Eine Einwilligung des Patienten muss nicht eingeholt werden, wenn durch den Eingriff eine drohende Gefahr für den Patienten abgewendet wird, und der Patient nicht in der Lage ist, seine Einwilligung zu geben.**

Das Ausmaß der Aufklärung ist von dem bevorstehenden Eingriff abhängig. Grundsätzlich gilt, dass der Patient über Ziel, Tragweite, Notwendigkeit und Dringlichkeit des Eingriffes sowie Art und Verlauf der Maßnahme inklusive möglicher Risiken aufzuklären ist. Der Patient kann auf eine Aufklärung verzichten – aber auch das muss dokumentiert werden.

➤ **Die Aufklärung zu einem medizinischen Eingriff gehört zu den nichtdelegierbaren Vorbehaltstätigkeiten eines Arztes. Damit darf sie auf keinen Fall an MTRA übertragen werden. Davon unbenommen sind die Informationen zu einer geplanten Untersuchung und das „Ausfüllen“ des Anamnesebogens gemeinsam mit dem Patienten. Im Anschluss muss zwingend das Gespräch mit dem Arzt erfolgen bzw. der Patient aktiv darauf hingewiesen werden.**

➤ **Die Ergebnisse der Aufklärung müssen schriftlich dokumentiert werden. I. d. R. gibt**

es dafür Aufklärungsbögen, in denen die wichtigsten Informationen für den Patienten enthalten sind und auf denen Patient und Arzt unterschreiben müssen. Laut Patientenrechtgesetz (PRG) ist dem Patienten eine Kopie des Aufklärungsbogens auszuhändigen bzw. muss er aktiv gefragt werden, ob er diesen möchte. Ein „Er hat ja nicht danach gefragt“ ist unzulässig.

Folgende Leitsätze zum Aufklärungsgespräch wurden durch die Deutsche Krankenhausgesellschaft (DKG) festgelegt:

1. Das Aufklärungsgespräch muss durch einen Arzt erfolgen.
2. Die Aufklärung muss in einem individuellen Gespräch erfolgen. Das Ausfüllen eines Aufklärungsbogens genügt nicht.
3. Aufgeklärt werden muss über die Grundzüge der Untersuchung/Therapie, nicht jedoch über Einzelheiten. Die Ausführlichkeit ist an die Dringlichkeit der Untersuchung und den Bildungs- und Wissensstand des Patienten anzupassen.
4. Über typische Risiken für einen Eingriff muss immer aufgeklärt werden. Die Aufklärung über atypische Risiken erfolgt abhängig von der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Komplikation.
5. Stehen unterschiedliche, wissenschaftlich anerkannte Maßnahmen zur Auswahl, muss über diese Alternativen und deren Risiken aufgeklärt werden.
6. Dem Patienten muss ausreichend Zeit gegeben werden, um seine Entscheidung (abhängig von der gesundheitlichen Dringlichkeit) zu treffen. Eine Aufklärung muss vor der Beeinträchtigung der Entscheidungsfähigkeit (durch Medikamente) erfolgen.
7. Die Aufklärung muss adressatengerecht, also an den Wissensstand und das Aufnahmevermögen des Patienten angepasst, erfolgen. Bei anderssprachigen Patienten ist ggf. ein Dolmetscher hinzuzuziehen.
8. Die Aufklärung muss nicht „schonungslos“ erfolgen, sondern nach dem Gebot der Menschlichkeit.
9. Es dürfen im Anschluss an eine Aufklärung nur solche Eingriffe durchgeführt werden, über die auch aufgeklärt wurde. Eine Ausweitung des Eingriffes ist nicht erlaubt.
10. Bei Minderjährigen müssen die Sorgeberechtigten, i. d. R. beide Elternteile, dem Eingriff zustimmen. Jugendliche unter 18 Jahren dürfen dann selbst einwilligen, wenn sie reif genug sind, um sich der Tragweite ihrer Entscheidung bewusst zu sein. Das ist nicht gleichzusetzen mit der Geschäftsfähigkeit, sondern liegt in der Einschätzung des Arztes.
11. Psychisch oder geistig Kranke sind in dem Maße über den Ablauf der Untersuchungen zu informieren, wie sie in der Lage sind, die Bedeutung und Tragweite zu verstehen.
12. Bei bewusstlosen Patienten ist vom mutmaßlichen Willen des Patienten auszugehen und die Maßnahmen durchzuführen, die zur Herstellung der Gesundheit erforderlich sind. Bei der Beurteilung des mutmaßlichen Willens sind schriftliche Erklärungen der Patienten oder die Aussagen besonders nahestehender Personen zu berücksichtigen. Eine Ausnahme bilden hier Suizidversuche – aus dem Suizidversuch ist nicht der mutmaßliche Wille einer Unterlassung der Hilfeleistung abzuleiten.
13. Bei Bluttransfusionen ist gesondert über die Infektionsgefahren aufzuklären.

➤ **Neben dem Placebo-Effekt (positiver Behandlungserfolg ohne Wirkstoff) existiert auch der Nocebo-Effekt. Bei diesem Effekt werden negative Erwartungshaltungen, besonders bei ängstlichen Patienten, erfüllt. Studien haben gezeigt, dass Nebenwirkungen nach einer Medikamentengabe statistisch gehäuft bei den Patienten auftraten, die besonders gut über die Nebenwirkungen aufgeklärt waren. Patienten, denen man diese verschwiegen hatte, klagten deutlich weniger über diese Nebenwirkungen. Daraus entsteht ein ethisches Dilemma für die Aufklärung. Zum einen muss über mögliche Risiken aufgeklärt werden, zum anderen kann aber gerade die Angst vor einer Komplikation dazu führen, dass sie eintritt.**

12.3.4 Anleitung des Patienten zur Untersuchung

MTRA dürfen den Patienten nicht aufklären, da es zu den nichtdelegierbaren ärztlichen Tätigkeiten gehört. Allerdings müssen sie den Patienten zur Untersuchung anleiten, also über den Ablauf der Untersuchung und seine notwendige Mitarbeit informieren.

In diesem Zusammenhang schadet es nicht, wenn dem Patienten manche Fragen doppelt gestellt oder zusätzliche Informationen erfragt werden. Sind diese relevant, können sie für die Ärzte hilfreich sein.

Abgesehen davon dienen sie, im Sinne des „Vier-Augen-Prinzips“, der Patientensicherheit.

So kann ein allgemeiner Angstzustand, den mitunter nur die MTRA im engen Patientenkontakt wahrnimmt, das Risiko einer Kontrastmittelreaktion bei Patienten mit Vorerkrankungen steigern (s. a. ► [Kap. 8](#)).

12.4 Besonderheiten in der Pädiatrie

T. Hartmann

Da der Umgang mit Kindern nicht nur im zwischenmenschlichen Sinne spezielles Wissen erfordert (► [Kap. 8](#)), werden hier noch einmal die besonderen Aspekte in der Diagnostik kleiner Menschen aufgeführt.

12.4.1 Anatomie und Strahlenempfindlichkeit bei Kindern

Kinder unterscheiden sich in der Anatomie mehr, als man auf den ersten Blick glauben mag, und das betrifft somit auch die Anforderungen an die MTRA.

So sind die Gewichtsunterschiede und die damit verbundenen Absorptionseigenschaften der kleinen Patienten sehr viel größer als bei Erwachsenen. Die Bildqualität muss von den kleinsten Frühchen mit 300 g Körpergewicht bis hin zum adipösen Teenager mit 100 kg immer adäquat sein.

12.4.2 Proportionen und Wachstum

Kinder haben, besonders in den frühen Lebensjahren, einen großen Kopf im Vergleich zum restlichen Körper. Bei einem Neugeborenen ist das Verhältnis zwischen Kopf und Körper 1:4, bei einem Erwachsenen 1:7. Gleichzeitig sind die Knochen durch den hohen Knorpelanteil und die Bänder und Muskeln sehr viel weicher und damit dehnbarer.

Aus diesen Gründen sind Verletzungen des Myelons (welches nicht so dehnbar ist) ohne Verletzungen des Schädels möglich. Im normalen Röntgenbild wäre nichts sichtbar.

Kinder wachsen nicht linear, d. h. Körperoberfläche, Gewicht und Länge nehmen in unterschiedlichem aber beständigem Maß zu, Knochen und Muskeln wachsen dysproportional und Hebelverhältnisse verändern sich. Die Folge sind häufigere Stürze mit typischen Verletzungsmustern.

Darüber hinaus ist der Thorax bei Kindern kürzer und elastischer. Dadurch sind die Oberbauchorgane schlechter geschützt, und das Risiko für Gefäßverletzungen ist bei Kindern erhöht, Rippenserienfrakturen treten hingegen selten auf.

Der Sauerstoffbedarf ist, bezogen auf das Körpergewicht, doppelt so hoch wie bei einem Erwachsenen. Um dem Rechnung zu tragen, atmen Kinder schneller (30–40 Mal pro Minute) und besitzen eine hohe Herzfrequenz (120–160 Schläge pro Minute). Solche Dinge müssen bei der Indikationsstellung und Auswahl des Untersuchungsverfahrens in der Kinderradiologie berücksichtigt werden.

12.4.3 Dichteverhältnisse

Abhängig vom Lebensalter haben Kinderknochen einen hohen knorpeligen Anteil, enthalten blutbildendes Knochenmark und sind damit nicht besonders röntgendicht. Einige Knochen sind noch gar nicht ausgebildet. Epiphyseknorpel (Wachstumsfugen) sind ebenfalls knorpelig weich und verletzungsanfällig. Dafür sind die Bänder stabiler als die weichen Knochen, und es kommt häufiger zu knöchernen Ausrissen als zu „einfachen“ Bänderrissen. Im Gegensatz dazu sind Muskeln noch nicht so

stark ausgeprägt und der Anteil an Baufett ist geringer, was ebenfalls Einfluss auf die röntgenrelevanten Dichteverhältnisse hat.

Im Bereich des Thorax sind bei Kleinkindern die Alveolen noch nicht alle ausgebildet, und es wird weniger Luft aufgenommen. Zusätzlich ist noch die Thymusdrüse hinter dem Sternum vorhanden und beeinflusst die räumliche Lage der Thoraxorgane. Die seitliche Ausdehnung des Thorax ist, bei vergleichsweise schlechten Kontrastverhältnissen, größer als die ap-Ausdehnung. Es macht also wenig Sinn, eine laterale Aufnahme des Thorax anzufertigen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei Kindern die Dichte nicht nur verringert ist, sondern auch deutlich weniger Dichteunterschiede zu finden sind. Damit ist der Kontrast auf Röntgenbildern verringert.

12.4.4 Strahlensensibilität

Wie bereits beschrieben, ist das Risiko für einen Strahlenschaden von der Zellteilungsrate abhängig. Da sich Kinder im Wachstum befinden, teilen sich ihre Zellen häufiger und schneller als bei Erwachsenen. Zusätzlich haben Kinder sehr viel kleiner Organe, und es wird mit einer Aufnahme mehr Strahlung in einer Gewebeeinheit absorbiert. Dementsprechend haben Kinder eine deutlich erhöhte Strahlensensibilität, und Untersuchungsprotokolle müssen angepasst werden.

Bei den Langzeitfolgen der stochastischen Strahlenwirkungen steht die Entstehung von Tumorerkrankungen im Vordergrund.

- **Bei CT-Untersuchungen ist das Risiko an einem strahleninduzierten Tumor zu erkranken etwa um ein Drittel höher als bei Erwachsenen. Dabei sind Mädchen stärker betroffen als Jungen.**
Bei jeder 300–390. CT-Untersuchung des Abdomens und Beckens tritt eine zusätzliche Tumorerkrankung bei Kindern auf.

12.4.5 Angewandter Strahlenschutz

Bereits durch die Auswahl grundlegender Untersuchungsparameter betreibt man in der Kinderradiologie aktiven Strahlenschutz. Nachfolgend werden die wichtigsten Maßnahmen benannt.

■ Indikationsstellung

Der beste Strahlenschutz ist, Strahlung gar nicht erst anzuwenden. Daher gelten strenge Richtlinien zur Indikationsstellung durch den Arzt:

- Gibt es ein strahlungsfreies Alternativverfahren, z. B. Sonographie, MRT?
- Welchen Nutzen hat die Untersuchung? Was kann man tatsächlich herausfinden?
- Ist die gesuchte Erkrankung so schwer, dass man ohne eine radiologische Untersuchung keine Therapieentscheidung treffen kann?
- In welchem Umfang muss eine Diagnostik stattfinden (nur so viel wie muss, nicht so viel wie geht)?

■ Feldgröße

Durch die optimale Einblendung wird nicht nur die Bildqualität verbessert, sondern auch das Dosis-Flächen-Produkt (FDP) verringert.

Bei einer Lungenaufnahme einer Frühgeburt benötigt man in etwa eine Feldgröße von 6×6 cm. Vergrößert man das Feld nur am oberen und unteren Ende um jeweils 1 cm „Sicherheitsabstand“, so nimmt die Eintrittsdosis an dem kleinen Patienten um 33 % zu.

■ Streustrahlenraster

Streustrahlenraster sind in erster Linie „Strahlenschutz für den Film“, da sie eine zusätzliche Schwärzung durch Streustrahlung verhindern. Das Ausmaß der Streustrahlung ist stark vom Objekt abhängig – je größer ein Objekt/Körper, umso mehr Streustrahlung entsteht (► Kap. 3).

Da Kinder vergleichsweise klein sind, sollte bei ihnen erst ab einem Körperdurchmesser von 12–15 cm ein Streustrahlenraster verwendet werden. Das bedeutet, dass erst ab einem Körpergewicht von ca. 40 kg bei einer Lungenaufnahme ein Raster erforderlich ist.

■ Filterung

Durch den Einsatz von Filtern („Metallplättchen“ aus Aluminium oder Kupfer) wird die Strahlung aufgehärtet, d.h. der unwirksame Teil der Röntgenstrahlung wird herausgefiltert. Da Kinder eine andere Dichte und Dicke als Erwachsene haben, ist der für das Bild unwirksame Strahlenanteil größer.

Daher werden in der Kinderradiologie zusätzliche Filter empfohlen, z. B. 1 mm Al und 0,1–0,2 mm Cu. Diese können an der Tiefenblende der Röntgenröhre eingestellt und so in das Nutzstrahlenbündel eingebracht werden. Damit wird die Strahlenbelastung um 30–40 % verringert.

Durch die Verwendung von Filtern wird die Bildqualität verringert, weshalb sie nicht bei Erwachsenen verwendet werden sollte.

- **Bei Kindern sind die Knochenbälkchen (Trabekel) noch nicht so ausgeprägt wie bei Erwachsenen. Aus diesem Grund sind die Anforderungen an die Bildauflösung bei Skelettaufnahmen nicht so hoch.**

■ Belichtung

Die Spannung bestimmt die Strahlenqualität und Durchdringungsfähigkeit. Je höher die kV, umso härter und durchdringungsfähiger ist die Strahlung, und sie wird in einem geringeren Maß absorbiert. Gleichzeitig wird die Strahlung stärker gestreut.

Die Spannung bestimmt die Strahlenquantität und ist wichtig für Kontrast- und Schwärzungsumfang einer Röntgenaufnahme.

In Abhängigkeit von der Fragestellung, der Bildverarbeitungssoftware und dem Aufnahmegerät sollten also kV/mAs möglichst gut aufeinander abgestimmt werden, um eine ausreichende Bildqualität zu erhalten.

■ Bleiabdeckungen

Grundsätzlich sollten bei Kindern alle angrenzenden Körperbereiche einer Aufnahmeregion abgedeckt werden, um die Strahlenbelastung so gering wie möglich zu halten. Besonders das Knochenmark, welches sich bei Kindern in allen Röhrenknochen befindet, ist sehr strahlenempfindlich.

Die Bleigummischürzen müssen einen Bleigleichwert von 0,5 mm Pb besitzen; Hodenkapseln und Ovarialprotektoren müssen einen Bleigleichwert von 1,0 mm aufweisen.

Bei Knaben muss eine Hodenkapsel **IMMER** verwendet werden, bei Mädchen nur dann **NICHT**, wenn das kleine Becken (z. B. nach Unfällen) beurteilt werden muss.

- **Kinder sind keine kleinen Erwachsenen! Untersuchungstechniken in der Kinderradiologie stellen höhere Anforderungen in den Bereichen Auflösungsvermögen, Kontrast, Dichte und Untersuchungszeit. Untersuchungsprotokolle müssen kindgerecht adaptiert werden.**

■ Immobilisierung

Erst bei Schulkindern kann man erwarten, dass sie „freiwillig“ bei einer Röntgenuntersuchung mitmachen und verstehen, dass sie sich nicht bewegen dürfen.

Jüngere Kinder benötigen mehr Beruhigung und müssen mitunter ruhiggestellt werden, um eine Wiederholungsaufnahme zu verhindern.

- **Eine medikamentöse Ruhigstellung darf nur die letzte mögliche Maßnahme darstellen!**

Grundsätzlich gilt:

- Der Untersuchungsablauf muss altersspezifisch erklärt werden.
- Unmittelbar vor der Röntgenuntersuchung sollten schmerzhaftige Maßnahmen (Blutentnahme o. ä.) vermieden werden.
- Wartezeiten sollten so gering wie möglich sein.
- Begleitpersonen/Eltern müssen über Ablauf und Notwendigkeit einer Immobilisierung aufgeklärt sein und ihr Einverständnis geben.

Geeignete Maßnahmen sind so auszuwählen, dass weder der kleine Patient gefährdet wird, noch die Bildqualität leidet.

In einer Kinderradiologie findet man die verschiedensten Möglichkeiten – von Spielzeug zur Beruhigung über Schaumstoffpolster bis hin zu Sandsäcken und einer Kunststoffhülle (Babixhülle)

ist alles dabei. Auch mitgebrachte Decken können, wenn man das Kind fest darin einwickelt, eine einfache Möglichkeit darstellen.

Bei Kleinkindern oder Säuglingen können auch Klebefolien zum Einsatz kommen, wenn z. B. Hände oder Füße geröntgt werden müssen.

Zur Einhaltung der Hygienevorschriften müssen Lagerungshilfsmittel vor dem Gebrauch mit z. B. einer Frischhaltefolie eingewickelt und desinfiziert werden.

Sollten Haltepersonen benötigt werden, sind diese einzuweisen und mindestens mit einer Bleischürze auszustatten. Da Haltepersonen i. d. R. weniger Strahlenbelastungen ausgesetzt sind als beruflich strahlenexponierte MTRA, sollten sie auch vorrangig zur Hilfestellung herangezogen werden.

➤ **Die fehlende Kooperation eines Kindes ist keine Entschuldigung für ein schlechtes Bild!**

In Kürze

- Die medizinische Fachsprache ist wichtig, um sich in der medizinischen Diagnose und Therapie orientieren zu können.
- Anatomische Grundkenntnisse sind komplex, aber unabdingbar, um im MTRA-Alltag bestehen zu können.
- Wichtige Begriffe in der Diagnostik sind die Anamnese, die klinische Untersuchung und die Patientenaufklärung.
- Im Umgang mit Kindern sind – speziell im Hinblick auf Strahlenempfindlichkeit und -schutz – die Besonderheiten in der Entwicklung der kleinen Patienten und im Umgang mit Kindern zu beachten.

Güther et al (2004) Die Lebenssituationen alleinstehender Frauen in Deutschland. www.bmfsfj.de. Zugriffen: 25.3.14

Lippert H (1999) Lehrbuch Anatomie, 5. Aufl. Urban und Fischer, München

Oppelt B (2010) Pädiatrische Radiologie für MTRA/RT. Thieme-verlag, Stuttgart

Patientenrechtegesetz: www.patienten-rechte-gesetz.de, 30.3.14

Schneider A (2006) Staatsbürger-, Gesetzes- und Berufskunde für Fachberufe im Gesundheitswesen, 6. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

Tillmann BN (2010) Atlas der Anatomie des Menschen, 2. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York

Literatur

Ärzteblatt vom 11.6.13: CT-Untersuchungen im Kinder- und Jugendalter

Baethge Ch (2013) Nocebo – Die dunkle Eigenschaft der menschlichen Einbildungskraft. In Deutsches Ärzteblatt online, 25.3.14

Fanghänel J et al (2003) Waldeyer – Anatomie des Menschen, 17. Aufl. De Gruyter, Berlin

Muskuloskelettales System

M. Kahl-Scholz, I. Offenhäusser, C. Vockelmann

13.1 Allgemeines – 410

13.1.1 Topographische Anatomie – 410

13.1.2 Voraussetzungen zu Diagnostik und Therapie – 410

13.2 Radiologische Diagnostik – 411

13.2.1 Sonographie – 411

13.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik – 411

13.2.3 Durchleuchtung/Angiographie – 412

13.2.4 Computertomographie (CT) – 412

13.2.5 Kernspintomographie (MRT) – 414

13.3 Nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie – 415

13.3.1 Untersuchungen des Knochens – 415

13.4 Wertigkeit – 421

13.5 Therapeutische Möglichkeiten – 421

13.5.1 Radiologische Therapie – 421

13.5.2 Strahlentherapie – 422

13.5.3 Nuklearmedizinische Therapie – 424

13.6 Fallbeispiel – 425

Literatur – 426

13.1 Allgemeines

Erkrankungen des muskuloskelettalen Systems führen weltweit die Ursachenliste chronischer Schmerzen an. Sie bilden eine große Erkrankungsgruppe, welche rheumatische Erkrankungen ebenso enthält wie Arthrosen, Frakturen und Bandscheibenvorfälle. Nahezu jeder Deutsche hat im Verlauf seines Lebens einmal eine muskuloskelettale Erkrankung.

Muskuloskelettale Erkrankungen sind zudem der häufigste Anlass für Arbeitsunfähigkeitstage und der zweithäufigste für Frühberentungen in Deutschland. Damit stellen muskuloskelettale Erkrankungen nicht nur eine erhebliche Beeinträchtigung der Lebensqualität der Betroffenen dar, sondern sind auch ein Kostenfaktor für das Gesundheitssystem.

Schätzungsweise 7 Millionen Deutsche leiden an Erkrankungen des muskuloskelettalen Systems und das Statistische Bundesamt schätzt die Behandlungskosten auf ca. 24 Mrd. jährlich.

Prävention Diagnostik und Therapie dieser Erkrankungen sind demnach eine „gesellschaftliche Aufgabe“ und haben 2007 sogar zur Gründung des Zentrums für muskuloskelettale Forschung in Ulm geführt.

13.1.1 Topographische Anatomie

1. Offenhäuser

Das Skelett gewährt dem Körper Stabilität und schützt die inneren Organe vor Verletzungen.

Das Knochengestüt ist wichtiger Mineralien-speicher, insbesondere von Kalzium und Phosphor und im Inneren vieler Knochen der Produktionsort von Blutzellen. Der Mensch besitzt über 200 Knochen. Zu unterscheiden sind Röhrenknochen (Abb. 13.1, z. B. Femur), kurze Knochen (z. B. Handwurzel), flache Knochen (z. B. Schädelknochen) und Sesambeine. Letztere sind in Muskelschichten eingebettet und befinden sich an Orten, wo Sehnen hoher Belastung ausgesetzt sind (z. B. Patella). Röhrenknochen werden in 3 Zonen unterteilt (Abb. 13.1), die mittig liegende Diaphyse die beidseits angrenzende Metaphyse und die gelenk-

bildende und von einer Knorpelschicht bedeckte Epiphyse.

Zwischen Epi- und Metaphyse befindet sich die Epiphysenfuge, die sich nach Ende der Pubertät mit Sinken des Wachstumshormonspiegels knöchern durchbaut und das Längenwachstum beschließt.

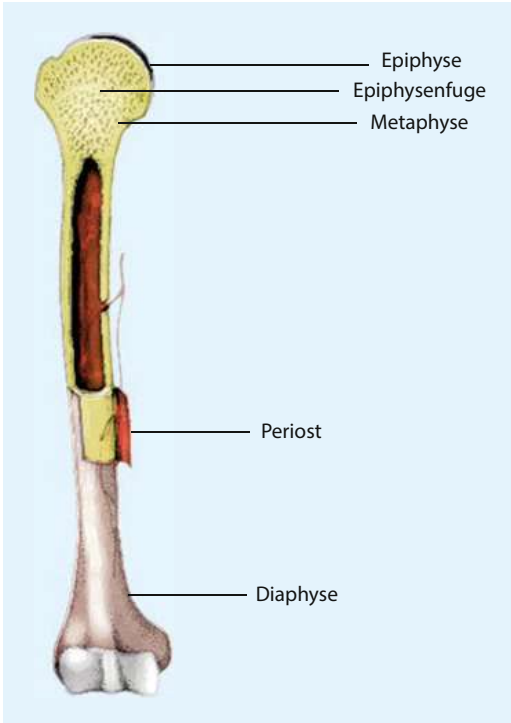
Die wesentlichen Bestandteile des Knochens sind die Kompakta oder Kortikalis, die die äußere Schicht bildet und die im Inneren befindliche aus zarten Knochenbälkchen bestehende Spongiosa. Diese enthält das blutbildende, rote und das vorrangig aus Fett bestehende gelbe Knochenmark. Hämatogen metastasierende Tumore, wie z. B. das Mamma-, das Prostata-, und das Bronchialkarzinom befallen in erster Linie das besonders gut durchblutete rote Knochenmark. Auch Entzündungen hervorrufoende Bakterien gelangen über das Blut ins Knochenmark und infizieren es (Osteomyelitis).

Die Wirbelkörper bestehen hauptsächlich aus Spongiosa, begrenzt durch Kompakta in Grund- und Deckplattenbereich und den hinteren Wirbelanteilen. Knochen sind Ansatzpunkte für Sehnen und Bänder. Gelenke bilden ihre bewegliche Verbindung miteinander.

13.1.2 Voraussetzungen zu Diagnostik und Therapie

Drei Arten von Knochenzellen sind an Auf-, Um- und Abbau des Knochens beteiligt. Die Aufgaben der Osteoblasten sind der Knochenaufbau, die nachfolgende Mineralisation und die Verkalkung des Knochens. Sie scheiden Kalzium, Phosphate und Karbonate, schlecht lösliche Salze, in den interstitiellen Raum aus, ummauern sich und werden jetzt als Osteozyten bezeichnet. Dadurch härtet der Knochen aus, sodass er belastbar wird. Beschädigter oder überalterter Knochen wird durch die Osteoklasten abgebaut.

Beim Erwachsenen ist Auf- und Abbau im Gleichgewicht. Ca. 20 % der Knochenmasse erneuert sich beim gesunden Erwachsenen jährlich. Pathologische Prozesse können das Gleichgewicht stören. Östrogenmangel der älteren Frau führt zu



■ Abb. 13.1 Topografische Anatomie Knochen



■ Abb. 13.2 Sonographie der Achillessehne. Blau umrandet die Achillessehne im Transversalschnitt, der rote Pfeil weist auf die Auflockerung der Sehnenstruktur als Zeichen der Partialruptur

■ Tab. 13.1 Untersuchungsprotokoll Sonographie muskuloskelettal

Patientenvorbereitung.	Keine
Schallkopf	7,5 MHz Linearschallkopf
Standardebenen	In der Regel zwei Ebenen
Besonderheiten	

nachlassender Blastenaktivität und damit zu vermindertem Aufbau (Osteoporose). Bei Kindern ist der Stoffwechsel die Epiphysenfuge als Ort des Längenwachstums im Stoffwechsel erhöht.

Unterarmfrakturen, z. B. bei pädiatrischen Patienten sehr gut detektiert werden können.

Ein typisches Untersuchungsprotokoll der muskuloskelettalen Sonographie ■ Tab. 13.1

13.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

13.2.1 Sonographie

Die Sonographie stellt eine einfache Möglichkeit zur ersten Diagnostik muskulärer Probleme dar. Zunehmend wird der Ultraschall auch in der Gelenkdiagnostik eingesetzt. So ist ein Gelenkerguss sonographisch leicht festzustellen und auch Bandstrukturen können zumindest im ersten Schritt sonographisch eingesehen werden (■ Abb. 13.2). Seltener wird der Ultraschall in der Frakturdiagnostik genutzt, obwohl insbesondere z. B. Sternumfrakturen oder

13.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Basis der skelettalen Diagnostik ist immer noch die konventionelle Röntgendiagnostik. Mit ihr lassen sich Frakturen nachweisen. Der Heilungsverlauf einer Fraktur wird beurteilt. Ebenso ist die konventionelle Diagnostik sehr gut geeignet, um Luxationen zu diagnostizieren.

Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet ist die Funktionsdiagnostik z. B. der Wirbelsäule.

Die typischen Einstell- und Aufnahmetechniken des breiten Gebietes der konventionellen Röntgendiagnostik würden den Rahmen dieses Lehrbuchs sprengen. Hier verweisen wir auf Standardliteratur,

■ **Tab. 13.2** Typische Einstelltechnik Myelographie

Patientenvorbereitung	Aufklärung, Oberkörper entkleiden lassen, Patientenhemd
Positionierung	Punktion des Spinalkanals in Kyphosestellung, bevorzugt zwischen LWK 3 und LWK 4
Bildfrequenz	Einzelbilder ap, seitlich, in Inklination, Reklination, Seitbeugung nach rechts und links, Schrägaufnahmen beider Seiten zum Freidrehen der Nervenwurzeln
Kontrastmittel	Ca. 15 ml iodhaltiges Kontrastmittel (z. B. Accupaque 240)
Aufnahmekriterien	Vollständige Erfassung des Dural-schlauchs der LWS

z. B. Lehrbuch der röntgendiagnostischen Einstelltechnik von Becht et al. (begründet Zimmer-Brossy) aus dem Springer-Verlag.

Beachten sollten Sie, dass es üblicherweise einen Hausstandard in jeder Abteilung gibt. Dieser regelt beispielsweise, welche zwei Ebenen bei einer Schulteraufnahme angefertigt werden. Auf jeden Fall immer zu beachten ist, dass auf jeder Aufnahme mindestens ein Gelenk abgebildet sein muss.

Berechtigung in der Weichteildiagnostik hat die konventionelle Röntgenaufnahme bei der Fremdkörperdetektion.

13.2.3 Durchleuchtung/Angiographie

In der Regel werden eher durch den Orthopäden oder Unfallchirurgen Durchleuchtungsuntersuchungen des Skelettsystems durchgeführt. Hierbei geht es vor allem um intraoperative Stellungskontrollen und Kontrolle von Osteosynthesematerialien. In Häusern mit einer großen Wirbelsäulen- oder Neurochirurgie werden Sie jedoch häufig noch auf die **Myelographie** und auch **Discographie** als Durchleuchtungsuntersuchungen treffen. Beide Untersuchungen haben ihre Berechtigung in der **Differentialdiagnostik von Rückenbeschwerden**. Die Discographie ist heutzutage vor allem ein Provokationstest. Nach Punktion der Bandscheibe über einen durchleuchtungsgesteuerten dorsolateralen Zugang werden 1–2 ml Kontrastmittel

in die Bandscheibe injiziert. Dabei wird der Patient befragt, ob die auftretenden Schmerzen bekannt sind und denen entsprechen, die ihn jetzt zum Arzt führten. In diesem Fall spricht der Radiologe von einer **positiven Discographie**, die betroffene Bandscheibe trägt zur Beschwerdesymptomatik des Patienten bei. Die Myelographie dient dazu, **spinale Einengungen** nachzuweisen. Im Vergleich zum MRT, das eine Einengung des Spinalkanals natürlich auch sehr gut zeigen kann, hat die Myelographie den Vorteil der Funktionsdiagnostik. Hiermit kann man also auch Spinalkanalstenosen, die z. B. nur bei Inklination der LWS auftreten, nachweisen.

Einstelltechniken zeigt ■ [Tab. 13.2](#).

13.2.4 Computertomographie (CT)

Die Computertomographie wird vor allem zur genauen Beurteilung komplexer oder konventionell fraglicher Frakturen herangezogen (■ [Abb. 13.3](#)). Im Bereich der Wirbelsäule dient die Computertomographie zur genauen Beurteilung der Wirbelkörperhinterkante, die für die Stabilität bei einer Wirbelkörperfraktur von zentraler Bedeutung ist. Die CT-Diagnostik von Bandscheibenerkrankungen stellt nur eine Ausnahme bei Patienten dar, die einer MRT-Untersuchung nicht zugänglich sind.

■ [Tab. 13.3](#) zeigt ein typisches Untersuchungsprotokoll der Wirbelsäule zur Frakturdiagnostik.

Die Computertomographie von Gelenken sollte, wenn möglich, in Neutral-Null-Stellung, also z. B. mit gestrecktem Ellenbogen erfolgen. Allerdings sind hier oft Grenzen durch Schmerzen oder auch Gipsverbände gesetzt.

■ [Tab. 13.4](#) zeigt ein typisches Untersuchungsprotokoll Gelenke/Knochen.

Im Rahmen der Frakturdiagnostik spielt die CT-Diagnostik beim knöchernen Becken eine wichtige Rolle, da im konventionellen Bild zahlreiche Frakturen des Beckens nicht detektiert werden können.

■ [Tab. 13.5](#) zeigt ein typisches Untersuchungsprotokoll knöchernes Becken

■ Besonderheiten

Bei Hüftendoprothesen oder anderen Osteosynthesen im Untersuchungsbereich kann die Bildqualität



■ **Abb. 13.3** Frakturachweis der Wirbelsäule im CT

■ **Tab. 13.3** Typisches Untersuchungsprotokoll CT Wirbelsäule zur Frakturdiagnostik

Patientenvorbereitung	Metallfremdkörper im Untersuchungsgebiet entfernen
Positionierung	Rückenlage, Knie unterpolstern
Scanbereich	In aller Regel ein gesamte LWS, BWS oder HWS insbesondere bei jüngeren Patienten jedoch ggf. auch Einschränkung auf den Frakturbereich (Cave: konventionell nicht detektierte Frakturen in Nachbarwirbelkörpern)
Röhrenspannung/-strom	80 kV–120 kV (Niedrigdosisprogramme), Dosismodulation
Kontrastmittel	Meist native
Reformationen	Axial, coronar und sagittal in Knochenfenstertechnik

■ **Tab. 13.4** Typisches Untersuchungsprotokoll CT Gelenke/Knochen

Patientenvorbereitung	Metallfremdkörper im Untersuchungsgebiet entfernen (Gips spielt keine Rolle)
Positionierung	Abhängig vom Untersuchungsgebiet. Es sollte immer angestrebt werden, den zu untersuchenden Körperabschnitt im Zentrum der Gantry zu lagern (Arm z. B. über Kopf für Untersuchungen von Hand oder Ellenbogen)
Scanbereich	Untersuchungsabhängig (vorher konventionelle Aufnahme ansehen!)
Röhrenspannung/-strom	80 kV (Niedrigdosisprogramme), Dosismodulation
Kontrastmittel	Zumeist native
Reformationen	Axial, coronar und sagittal in Knochenfenstertechnik Volume-Rendering-Rekonstruktionen (weicher Untersuchungskern)

■ **Tab. 13.5** Typisches Untersuchungsprotokoll CT knöchernes Becken zur Frakturdiagnostik

Patientenvorbereitung	Metallfremdkörper im Untersuchungsgebiet entfernen
Positionierung	Rückenlage
Scanbereich	Becken, ggf. bis proximaler Femur je nach Fragestellung
Röhrenspannung/-strom	80 kV–120 kV, Dosismodulation
Kontrastmittel	Zumeist nativ
Reformationen	Axial, coronar und sagittal in Knochenfenstertechnik ggf. Volume-Rendering-Rekonstruktionen (weicher Untersuchungskern)

Tab. 13.6 Typisches Untersuchungsprotokoll CT Plasmozytomstatus

Patientenvor- bereitung	Metallfremdkörper am gesamten Körper entfernen
Positionierung	Rückenlage, Arme verschränkt vor dem Körper, möglichst Unterarme etwas unterpolstert
Scanbereich	Schädeldach bis zum Fuß/Unterschenkel
Röhrenspan- nung/-strom	80 kV–120 kV, Dosismodulation, low-dose-Technik
Kontrastmittel	Nativ
Reformationen	Knochenfenstertechnik axial komplett, zusätzlich: Schädel coronar, Schultern coronar, Becken coronar, Wirbelsäule sagittal; je nach Befund ggf. Zusatzreformationen ggf. Lunge im Lungenfenster axial

durch eine Erhöhung der Röhrenspannung verbessert werden. Erkauft wird diese Bildqualität allerdings mit einer erheblichen Dosissteigerung: Bei unverändertem Röhrenstrom steigt die Dosis von 100 % bei 120 kV auf 140 % bei 140 kV!

Das **Plasmozytom** ist eine maligne Erkrankung des Knochenmarks, die zu multiplen Osteolysen im gesamten Skelett führen kann. Bis vor einigen Jahren wurde bei dieser Erkrankung eine ausführliche konventionelle Röntgendiagnostik, z. B. nach dem sog. Pariser Schema durchgeführt. Dies beinhaltete Röntgenaufnahmen der gesamten Wirbelsäule, des Beckens, der langen Röhrenknochen und des Schädels. Trotz dieser zahlreichen Aufnahmen sind eine Vielzahl der kleinen, oftmals nur 1–2 cm großen Osteolysen nicht zu entdecken gewesen. Erst die pathologische Fraktur hat häufig den Befund aufgedeckt. Daher ist die Primärdiagnostik des Plasmozytoms heute ein CT des gesamten Skelettstatus. Bei CT-Geräten, die keine ausreichende Scanlänge von etwa 2 m erlauben, sollte man von der Schädelkalotte so weit wie möglich nach kaudal untersuchen. Damit sollten zumindest in der Mehrzahl der Fälle Untersuchungen bis zum mittleren Unterschenkel möglich sein.

Tab. 13.6 zeigt ein typisches Untersuchungsprotokoll Plasmozytomstatus

Tab. 13.7 Typisches Untersuchungsprotokoll MRT Wirbelsäule

Patientenvor- bereitung	Sämtliches Metall, Scheckkarten, Uhr, Schmuck ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage
Spule	Wirbelsäulenspule, bei der HWS Head-Neck-Coil
Scanbereich	LWS, BWS, oder HWS, Kombinationsuntersuchungen
Sequenzen	Bei der BWS: Zählscout (sagittale Sequenz mit HWS zum Abzählen der Wirbelkörper) Sagittale T1w, sagittale oder coronare T2w, sagittale STIR, paraaxiale T2w über (ausgewählte) Bandscheibenfächer
Kontrastmittel	Bei Spondylodiszitis oder Wirbelkörpermetastasen (insbesondere bei spinalem Tumoreinbruch)

13.2.5 Kernspintomographie (MRT)

Die Kernspintomographie ist die Untersuchungsmethode der Wahl zur Beurteilung von Bandscheibenerkrankungen. Auch in der Detektion von Wirbelkörpermetastasen weist die Kernspintomographie die höchste Sensitivität auf, d. h. man kann am genauesten Metastasen nachweisen oder ausschließen. Nachteil im Vergleich zur Szintigraphie ist der begrenzte Untersuchungsabschnitt und die geringere Verfügbarkeit.

Tab. 13.7 zeigt ein typisches Untersuchungsprotokoll an der Wirbelsäule.

In der Diagnostik von Bandverletzungen und Gelenkschäden zeigt die MRT ebenfalls die genauesten Ergebnisse. Vorteil der MRT ist ebenfalls, dass ein Markraumödem nachgewiesen werden kann. Dies zeigt zum Beispiel nach einem Trauma die Beteiligung des Knochens, auch wenn keine Kortikalisunterbrechung im Sinne einer Fraktur besteht.

Tab. 13.8 zeigt ein typisches Untersuchungsprotokoll MR Knie.

Bei primären Knochentumoren wird weiterführend zur unerlässlichen konventionellen Röntgendiagnostik eine MRT-Untersuchung angefertigt. Lagerung und Spulenwahl ist dabei immer von der Lokalisation des Befundes abhängig. Bei Befun-

Tab. 13.8 Typisches Untersuchungsprotokoll MRT Knie

Patientenvorbereitung	Sämtliches Metall, Scheckkarten, Uhr, Schmuck ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage
Spule	Kniespule
Scanbereich	Knie, Zentrierung auf Kniegelenksspalt
Sequenzen	Sagittale T1w, sagittale PDw fs, coronare STIR, axiale T2w, ggf. parasagittale T2w anguliert an die Kreuzbänder ggf. 3D DESS zur Knorpeldarstellung
Kontrastmittel	In aller Regel nativ

den im Unterschenkel bietet sich oft die Kniespule an, eine gute Alternativen stellen entsprechende Flex-Spulen.

■ **Tab. 13.9** zeigt ein typisches Untersuchungsprotokoll eines Knochentumors.

Tab. 13.9 Typisches Untersuchungsprotokoll MRT primärer Knochentumor

Patientenvorbereitung	Sämtliches Metall, Scheckkarten, Uhr, Schmuck ablegen lassen
Positionierung	Je nach Lokalisation, bei Befunden der oberen Extremität Bauchlage und Streckung des Armes über den Kopf
Spule	Je nach Lokalisation
Scanbereich	Zentrierung auf den Befund (Abgleich mit konventioneller Diagnostik)
Sequenzen	Axiale T1w, axiale T2w, je nach Befund coronare oder sagittale T1w, STIR; nach Kontrastmittelgabe T1 FS in 2 Ebenen
Kontrastmittel	In aller Regel nativ

nimmt die nuklearmedizinische Knochendiagnostik einen hohen Stellenwert beim Staging und Nachsorge primärer Knochenmalignome und Metastasen ein.

13.3 Nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie

I. Offenhäuser

Die Skelettszintigraphie ist eine sensitive Methode zur Detektion von Umbauprozessen des Knochens. Sie wird unter anderem in Staging und Nachsorge maligner Tumorerkrankungen, die in den Knochen metastasieren, routinemäßig eingesetzt. Während in der Diagnostik ^{99m}Tc markierte Tracer verwendet werden, kommen in der Therapie der Knochen und Gelenke Betastrahler und neuerdings auch Alphastrahler zum Einsatz.

13.3.1 Untersuchungen des Knochens

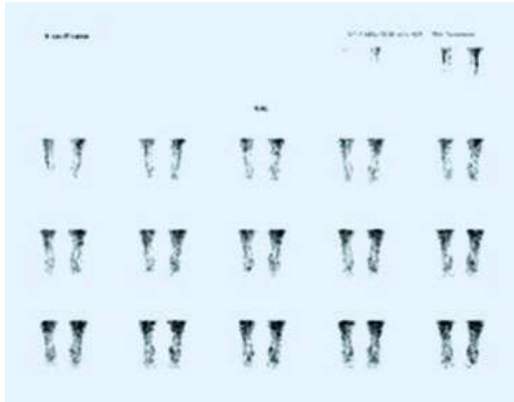
Skelettszintigraphie

Die morphologisch in der konventionellen Bildgebung und Schnittbildtechnik, wie CT und MRT, sichtbaren Veränderungen sind oft deutlich später auszumachen, als die nuklearmedizinisch sichtbaren Stoffwechselveränderungen des Knochens. Deshalb

■ Vorbereitung ■ Radiopharmakon

Zur Herstellung der ^{99m}Tc markierten Bisphosphonate wird das Generatoreluat mit einem industriegefertigten Kit, der den inaktiven Träger und ein reduzierendes Zinn II Salz in Stickstoff-Schutzgasatmosphäre und gefriergetrockneter Form enthält, verbunden. Um die Reduktion des reaktionsträgen $^{99m}\text{Tc O}^{4-}$ in eine reaktive Komponente zu gewährleisten, muss das Generatoreluat unter Luftabschluss in den Kit eingebracht werden. Ebenso wichtig für die Qualität der Markierung ist das Verhältnis des Zinn II Salzes zum aktiven ^{99m}Tc . Ist der Generator zu lange nicht eluiert worden, so blockieren nicht aktive und damit nicht sichtbare ^{99}Tc -Anteile den Träger, das ^{99m}Tc bleibt ungebunden. Bei Fehlmarkierungen stellen sich Schilddrüse, Speicheldrüse und Magen dar (► Leitlinie Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V.; SOP für Heißlabore in der Nuklearmedizin).

Die zu applizierende Aktivitätsmenge ist alters-, gewichts- und erkrankungsabhängig. Als Grenzwert wird vom Bundesamt für Strahlenschutz bei benignen Erkrankungen 500 MBq, bei malignen



■ **Abb. 13.4** ^{99m}Tc -HDP Perfusion 0.–3. Minute. (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Mottaghy, Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen)

700 MBq angegeben. Die Anpassung bei Kindern kann der EANM-Empfehlung entnommen werden.

Die markierten Biphosphonate werden über die Osteoblastentätigkeit oberflächlich in die Hydroxyapatit-Matrix des Knochens aufgenommen und zwar in Abhängigkeit von Dicke, Durchblutung und Knochenumbau.

■ ■ Patient

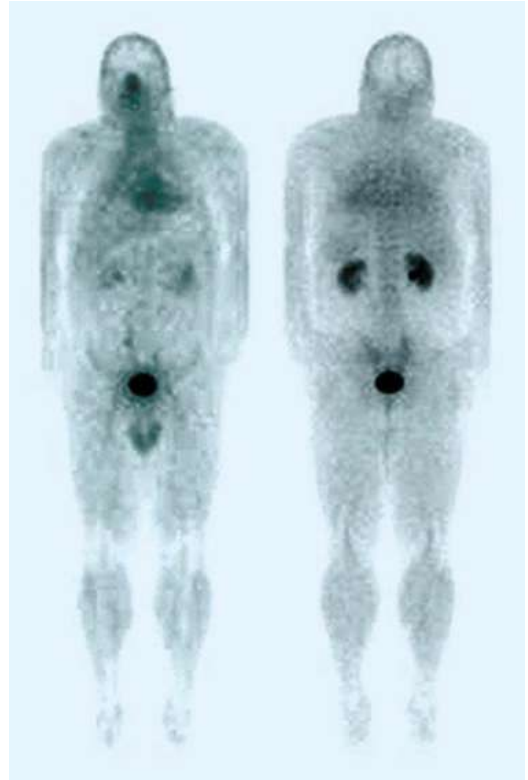
Da die nicht gebundene Aktivität über die Nieren ausgeschieden wird, sollte der Patient eine Stunde p. i. einen Liter Flüssigkeit trinken. Dieses Procedere senkt nicht nur die Strahlenbelastung, sondern trägt auch zur Kontrastverbesserung bei. Trinkt der Patient unmittelbar nach Applikation, wird die Aktivität frühzeitig ausgeschieden und kann nicht im ausreichenden Maße im Knochen adsorbiert werden.

Die Blase muss vor der Untersuchung entleert werden, da sonst die Beurteilung des knöchernen Beckens nur eingeschränkt möglich ist. Um Fehlinterpretationen vorzubeugen, muss die Injektionsstelle markiert bzw. gut erkennbar dokumentiert werden.

■ ■ Aufnahme

Die Aufnahme erfolgt in Rückenlage, die Arme des Patienten neben dem Körper liegend, die Beine symmetrisch nach innen rotiert.

Der Aufnahmezeitpunkt nach Injektion des Radiopharmakons ist von der Indikation abhängig.



■ **Abb. 13.5** ^{99m}Tc -HDP Bloodpool 3.–9. Minute. (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Mottaghy, Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen)

Während im Rahmen des Stagings und der Nachsorge lediglich der Knochenstoffwechsel dargestellt werden muss, erfolgt der Nachweis von akuten und chronischen Entzündungen in drei Phasen.

Alle Akquisitionen erfolgen mit einem Low Energy High Resolution Kollimator.

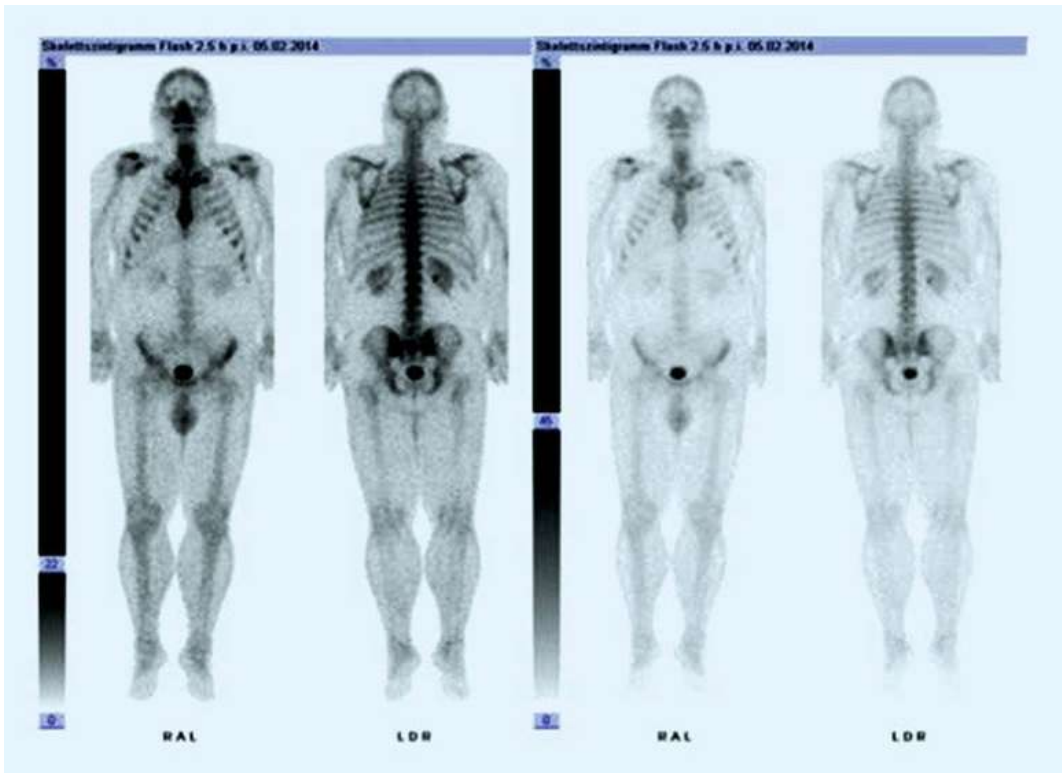
Perfusion, Bloodpool und Mineralisation

Perfusion in der 0.–3. Minute (■ **Abb. 13.4**)

- Start des Aufnahmesystems bei Injektion
- 20 Einzelbilder à 9 sec.
- Darstellung der Gewebedurchblutung
- Matrix: 128 × 128

Bloodpool in der 3.–9. Minute (■ **Abb. 13.5**)

- Darstellung des interstitiellen Weichteils, der Tracer verlässt die Gefäße



■ **Abb. 13.6** ^{99m}Tc -HDP Mineralisation 2.5 h p.i. (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Mottaghy, Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen)

- Ausdehnung des interstitiellen Raumes bei Entzündungen durch erhöhte Gefäßpermeabilität
- 1 bis 2 Aufnahmen à 180 sec.
- Matrix: 128×128
- Ganzkörperaufnahme von ventral und dorsal mit Scangeschwindigkeit 25 cm/min
- Matrix 256×1024
- Mineralisation ca. 3 Stunden p.i. (■ [Abb. 13.6](#))
- Darstellung des Knochenstoffwechsels
- Adsorption von ca. 40 % der injizierten Aktivität durch Osteoblasten in der Interzellularsubstanz des Knochens
- Ganzkörperaufnahme von ventral und dorsal/ Laufgeschwindigkeit 14 cm/min
- Matrix: 256×1024
- Ggf. Einzelaufnahmen 300 sec. oder 1 Millionen Counts

- Matrix 256×256
- Ggf. SPECT 2 Kopf-Kamera 90 Ansichten à 9 sec.
- Matrix 128×128
- Alternativ SPECT/CT

Die Darstellung der Perfusion und des Bloodpools kann lediglich von einem Skelettabschnitt, der der Größe des Detektors entspricht, erfolgen. Deshalb muss die Beschwerdestelle in der Indikationsstellung bekannt sein.

Die verwendete Doppellochkamera mit Ganzkörperzusatz ermöglicht die Darstellung des Gesamtskelettes in ventraler und dorsaler Sicht. Zusätzlich können seitliche Einzelaufnahmen – bei paarig angelegten Körperabschnitten im Seitenvergleich – oder überlagerungsfreie tomografische SPECT Akquisitionen angefertigt werden. Letztere

erleichtern insbesondere die Beurteilbarkeit der Wirbelsäule, der Schädelbasis und des Gesichtsschädels. Im SPECT/CT ist die sichere anatomische Zuordnung auffälliger Herde möglich.

Beurteilung der Skelettszintigraphie

Becken, WS und Ileosakralfugen reichern als Orte erhöhter Belastung physiologischerweise vermehrt an. Röhrenknochen nehmen die Aktivität stärker als spongiöse Knochen auf. Die Auswertung kann visuell qualitativ oder über Legen von Regions of interest (ROI) erfolgen, was den Seitenvergleich mit dem gesunden Skelettabschnitt sowie das Ansprechen einer Therapie (z. B. beim Osteosarkom) erlaubt.

■ Traumata

Der Frakturnachweis ist die Domäne der konventionellen Röntgendiagnostik. Unter besonderer Indikation ist dennoch ein Knochenszintigramm hilfreich. Dazu zählen okkulte Frakturen, unklare Beschwerden, Kindesmisshandlung, die Bestimmung des Frakturalters und der Nachweis von Ermüdungsfrakturen. Klassisches Beispiel: DD Scaphoidfraktur (auch bekannt als Navikularfraktur) bei typischen Beschwerden nach Trauma ohne erkennbarer Fraktur in X-Hand.

➤ **Erst 10 Tage nach Trauma ist die Darstellung der Stoffwechselaktivität sinnvoll, denn erst dann sind Reparaturvorgänge szintigrafisch nachweisbar.**

Während eine frische Fraktur in Bloodpool und Mineralisationsphase auf eine Mehrspeicherung zeigt, ist die Aktivitätsanreicherung alter Ereignisse lediglich in der Mineralisation nachweisbar.

Zu sichern ist der positive Befund durch eine Kontrolle nach vier Wochen. Die Aktivitätsanreicherung 3 h p.i. muss dann im Vergleich zur Erstuntersuchung weiter zunehmen.

■ Prothesenlockerung

Zur Beurteilung der Festigkeit einer Endoprothese und der sich damit ergebenden Notwendigkeit des Implantatwechsels kann die 3-Phasen-Skelettszintigraphie eingesetzt werden. Zementlose Prothesen stellen sich bis zu zwei Jahren postoperativ entlang

des Prothesenschaftes bandförmig aktiv dar, was mit der Knochenneubildung an der Prothese zusammenhängt.

Durch entsprechende Beweglichkeit und der damit verbundenen Traumatisierung, kann auch die Prothesenspitze aktiv sein. Zementierte Endoprothesen nehmen den Tracer bis zu einem Jahr postoperativ vermehrt auf, später weist dies auf eine Lockerung hin.

■ Osteonekrosen

Diese stellen sich in Perfusion und Bloodpool minderspeichernd dar, später als Mehrspeicherung bzw. normalisiert, je nach Fortschritt des Reparaturprozesses.

■ Osteomyelitis

Werden Keime über die Blutbahn ins Knochenmark transportiert, infizieren sie im weiteren Verlauf i. d. R. den Knochen. Ursache ist oft die Kontamination mit Bakterien nach offenen Knochenfrakturen oder Operationen. Dabei steht der *Staphylococcus aureus* auf der Liste der auslösenden Erreger an erster Stelle.

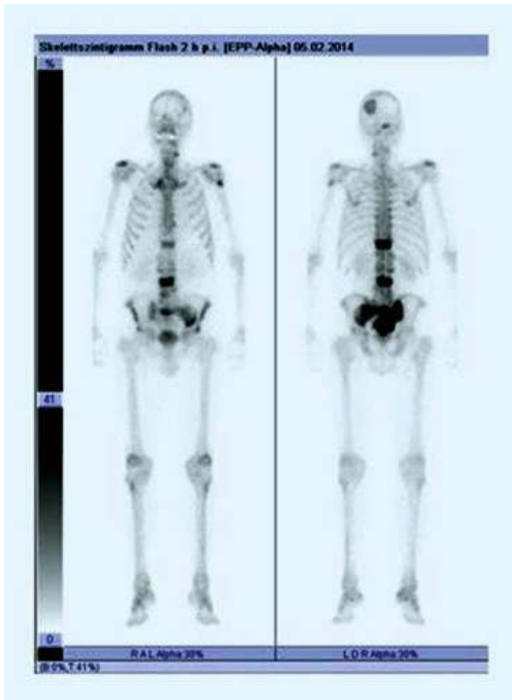
In der 3-Phasen-Skelettszintigraphie fällt die Osteomyelitis akut und chronisch durch erhöhte arterielle Perfusion, vermehrte Bloodpoolanreicherung und erhöhte Traceraufnahme in der Mineralisationsphase auf. Die Höhe der Aktivitätsaufnahme gibt Hinweise auf die entzündliche Aktivität des Prozesses.

■ Vitalitätsprüfung

Eine weitere Indikation der 3-Phasen-Skelettszintigraphie ist die Vitalitätsprüfung von Knochen- und Transplantaten. Stellt sich das Transplantat in allen drei Phasen minderaktiv dar oder fehlt die Aktivität sogar ganz, so muss von einer drohenden Nekrose ausgegangen werden.

■ Nachweis von Skelettmetastasen und primären Knochentumoren

Wegen ihrer hohen Sensitivität ist der Ausschluss oder Nachweis von Skelettmetastasen die häufigste Indikation zur Skelettszintigraphie (■ Abb. 13.7). So sind Knochenmetastasen z. B. beim Mammakarzinom ein halbes Jahr vor konventioneller radiologischer Diagnostik nachweisbar, jene eines Prost-



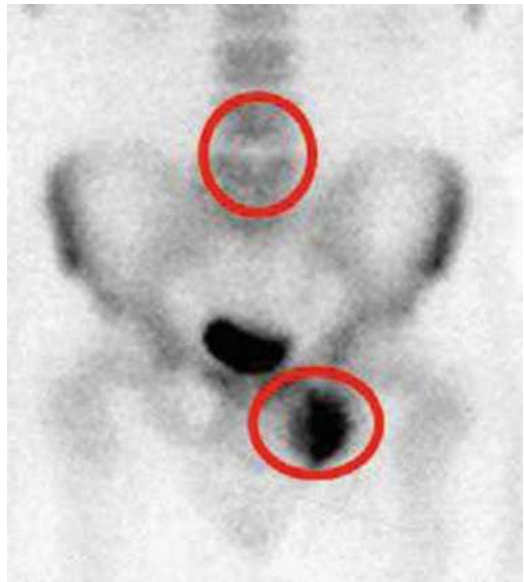
■ **Abb. 13.7** ^{99m}Tc -HDP Mineralisation 2.5 h p.i. mit Skelettmetastasen. (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Motaghy, Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen)

atkarzinoms sogar oft Jahre früher. Deshalb wird sie bei in den Knochen metastasierenden malignen Tumoren im Prästaging und in der Nachsorge eingesetzt.

Auch bei primären Knochentumoren (z. B. dem Osteosarkom) wird eine 3-Phasen-Skelettszintigraphie eingesetzt, da eine erhöhte Traceranreicherung aller 3 Phasen die Malignität eines Befundes unterstreicht. Sie kann unter Chemotherapie einen hilfreichen Hinweis auf deren Ansprechen oder Nichtansprechen geben.

Eine verminderte Tracerspeicherung findet man beim Plasmozytom. Dieses hemmt die Osteoblastenaktivität. Osteolytische Metastasen findet man ebenfalls beim Mamma-, Bronchial-, follikulärem Schilddrüsen- und Nierenzellkarzinom.

Herr Meier ist an einem Prostatakarzinom erkrankt und wird zur Skelettszintigraphie überwiesen. Das in ventraler Ansicht angefertigte Szintigramm lässt die untersuchende Berufsanfängerin stutzig werden. Ihr fällt eine Aktivitätsanreicherung im Bereich des Os ischium



■ **Abb. 13.8** ^{99m}Tc -HDP Mineralisation 2.5 h p.i. mit Artefakten

auf (Abb. 13.8). Als sie mit ihren Aufnahmen zum Facharzt für Nuklearmedizin geht, sieht dieser zudem eine Minderanreicherung im Bereich der Wirbelsäule. Er ordnet eine Einzelaufnahme aus ventraler und dorsaler Sicht und eine laterale Akquisition des Beckens nach Entfernung der Kleidungsstücke bis auf die Unterwäsche an und bestätigt Herrn Meier einen unauffälligen Knochenstoffwechsel.

❗ Bei radioaktiven Mehranreicherungen, besonders im Bereich des Beckens, muss an eine Kontamination der Haut bzw. der Kleidung gedacht werden. Ein Entfernen der Kleidungsstücke und eine Dekontamination der Haut vor Darstellung des fraglichen Bezirkes in der zweiten Ebene können hilfreich sein. Osteolytische Prozesse können durch Metallgegenstände wie Knöpfe, Gürtelschnallen und Schmuck vorgetäuscht werden.

Besonderheiten in der Pädiatrie

Bei einfühlsamer Aufklärung der Eltern kann i. d. R. eine gute Kooperation erreicht werden. Die Einverständniserklärung der Eltern muss vorliegen. Im Kindesalter speichern die Epiphysenfugen das applizierte Radiopharmakon vermehrt.

Der Umgang mit dem Kind

Zur Reduktion der Strahlenexposition sollte das Kind 1 h p. i. gut hydriert werden.

Um die Injektionsstelle unempfindlicher zu machen, kann diese 60 Minuten vor i. v.-Injektion mit einer Anästhesiecreme vorbereitet werden.

Vor den Aufnahmen sollte das Kind die Blase entleeren, die Windel muss gewechselt werden. In Ausnahmefällen kann zur Darstellung des knöchernen Beckens das Legen eines Blasenkatheters erforderlich sein. Die Aufnahmen sollten während der Schlafenszeit des Kindes angefertigt werden, um eine Sedierung möglichst zu vermeiden. Trotzdem muss die Anästhesie im Hintergrund bereit sein.

Wirbelsäule und Becken werden i. d. R. einer SPECT zugeführt. Hüftgelenk und kleine Skelettabschnitte werden unter Verwendung eines Pinehole Kollimators angefertigt. Notwendige Verlaufskontrollen werden immer in gleicher Technik bei gleicher Form, Lage und Größe der ROI angefertigt.

Entzündungsszintigraphie des Skelettes

■ Entzündung/Infektion

Während Entzündungen eine Reaktion auf krankhafte Prozesse (z. B. Arthritis, Tumore, Ischämien) zurückzuführen sind, spricht man von einer Infektion bei Eintritt von Mikroorganismen in den Körper des Patienten. Akute Entzündungen zeichnen sich durch erhöhte Gefäßpermeabilität und gesteigerten Austritt von Plasmaproteinen sowie vermehrtes Einwandern von Leukozyten in den floriden Entzündungsbereich aus. Auch Granulozyten sind an der Abwehr beteiligt, sodass die szintigrafische Darstellung einer akuten Entzündung sowohl mit radioaktiv markierten Anti-Granulozyten-Antikörpern als auch mit radioaktiv markierten Leukozytenpräparaten gelingt. Chronische Entzündungen werden im Wesentlichen durch Lymphozyten, Monozyten und Makrophagen abgewehrt, sodass andere unspezifische Tracer verwendet werden müssen.

Zum Nachweis einer bakteriellen Entzündung nach Implantation einer Gelenkprothese können radioaktiv markierte Anti-Granulozyten-Antikörper oder in vitro markierte autologe Leukozyten eingesetzt werden. Sie reichern sich in den Gra-

nulozyten und deren Vorstufen im blutbildenden Knochenmark an. Im Stammskelett sind sie, aufgrund der dort zu erwartenden physiologischen Anreicherungen, ungeeignet, während Entzündungen im peripheren Skelett ausgesprochen gut darstellbar sind.

^{111}In oder $^{99\text{m}}\text{Tc}$ markierte Leukozyten und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ markierte monoklonale Anti-Granulozyten-Antikörper dienen dem Nachweis einer granulozytären Entzündungsreaktion. Zur Abklärung chronischer Entzündungen, bei chronischen Fieberschüben und der Suche nach dem Fieber verursachenden Herdes, werden Ganzkörperszintigraphien mit unspezifischen Antikörpern durchgeführt.

Dabei werden neben der erhöhten Kapillarpermeabilität aller aufgeführten Radiopharmaka folgende Mechanismen ausgenutzt:

- $^{99\text{m}}\text{Tc}$ markiertes Nanokolloid wird nach Injektion als Fremdkörper erkannt und phagozytiert im mononukleären Phagozytosesystem (Knochenmark, Leber, Milz).
- $^{99\text{m}}\text{Tc}$ markiertes humanes Immunglobulin (HIG) wird vermehrt in Entzündungsherden zurückgehalten.
- Schließlich wird Glukose in aktiven Leukozyten und Makrophagen vermehrt aufgenommen, sodass ^{18}F FDG eingesetzt werden kann. Letzteres wird schwerpunktmäßig im Staging und unter Therapie sowie in der Nachsorge maligner Tumoren eingesetzt, aber auch die septische Lockerung einer Gelenkprothese stellt eine Indikation zum ^{18}F -FDG PET/CT dar.

➤ **Die Skelettszintigraphie kann als Drei-Phasen-Szintigramm zur Darstellung der Durchblutung, des Weichteils und des Knochenstoffwechsels durchgeführt werden. Wenn es um den Ausschluss einer Knochenmetastasierung geht, ist es ausreichend, die Mineralisation darzustellen. Gelenkentzündungen können mit unter sterilen Bedingungen in das Gelenk gebrachten Betastrahlern günstig beeinflusst werden. Durch die Applikation osteotroper Radiopharmaka sind osteoplastische Metastasen palliativ behandelbar.**

Tab. 13.10 Wertigkeit der diagnostischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	CT	MRT	Nuk	PET
Fraktur	N	P	W	W	W	N
Bandscheibenvorfall	N	N	N(*)	P	N	N
Bänder-/Muskelverletzungen	P	W	N	P	N	N
Metastasen	N	N	W	W	P	W
Plasmozytom	N	N	P	W	N	N
Primärer Knochentumor	N	P	W	P	W	W

N = nicht indiziert; P = Primärdiagnostik; W = Weiterführende Diagnostik, * = CT bei Kontraindikationen für ein MRT

Tab. 13.11 Typische Vorgehensweise Tumorembolisation

Vorbereitung allgemein	Schnittbilddiagnostik des Tumors, aktuelle Laborwerte (Blutbild, Gerinnung, Nierenretentionswerte, Schilddrüsenstatus)
Patientenvorbereitung	Nüchtern, Leisten rasiert, venöser Zugang
Positionierung	Rückenlage
Bildfrequenz	3–7,5 B/sec
Material	Schleuse mit Schleusenspülung, Führungskatheter und Mikrokatheter in Abhängigkeit von den anatomischen Begebenheiten mit entsprechenden Drähten Contour-Partikel, Coils, Flüssigembolisate (z. B. Onyx TM)
Durchführung	Superselektive Sondierung der tumorversorgenden Gefäße Embolisation bis zur Stase im Gefäß als Nachweis des Gefäßverschlusses

13.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

Tab. 13.10 zeigt den Einsatz der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.

13.5 Therapeutische Möglichkeiten

13.5.1 Radiologische Therapie

C. Vockelmann

Tumorembolisation

Ossäre Metastasen von hypervaskularisierten (stark mit Blutgefäßen versorgten) Tumoren führen bei einer operativen Therapie zu ausgedehnten Blutverlusten. Um diese Blutverluste zu verringern, werden solche Metastasen angiographisch mit Par-

tikeln und anderen Embolisationsmaterialien 1 bis 2 Tage präoperativ behandelt. Klassisches Beispiel sind hierfür insbesondere Metastasen von Nierenzellkarzinomen.

Vorgehensweise der Tumorembolisation allgemein zeigt Tab. 13.11.

Computertomographisch-gesteuerte Knochentumorbehandlung

Insbesondere schmerzhafte ossäre Metastasen, egal welcher Tumorentität, werden heutzutage interventionell radiologisch angegangen. Hierbei gibt es zwei Verfahren: eine Injektion von Knochenzement in lytische (Knochenmasse auflösende) Metastasen oder eine Thermoablation (Erhitzung/Verbrennung der Metastase durch Strom), die sich ebenfalls bei lytischen oder gemischten ossären Metastasen anbietet.

Behandlungsmethode der Wahl ist die Thermoablation inzwischen beim Osteoidosteom, einem

■ Tab. 13.12 Typische Vorgehensweise einer Tumorthermoablation

Vorbereitung allgemein	Schnittbilddiagnostik des Tumors, aktuelle Laborwerte (Blutbild, Gerinnung, Nierenretentionswerte, Schilddrüsenstatus)
Patientenvorbereitung	Nüchtern, venöser Zugang, Analgosedierung oder Intubationsnarkose
Positionierung	Rückenlage
Scanbereich	Tumorbereich
Material	Punktionskanüle zur ossären Punktion Thermoablationssonde und/oder Knochenzement
Durchführung	Ablation nach Herstellerprotokoll nach Lagekontrolle der Nadel, um sicherzustellen, dass kritische Gewebe (v. a. Nieren/Rückenmark) geschont werden. Knochenzement nach Herstellerangaben anmischen und möglichst zähflüssig vorsichtig injizieren (zur Schmerztherapie reicht sehr wenig Zement aus, es geht zumeist nicht um eine Stabilisierung)

Knochentumor, der bei Jugendlichen oder jungen Erwachsenen auftritt und klassischerweise als Symptom nächtliche Schmerzen aufweist, die sich auf die Einnahme von Acetylsalicylsäure (ASS, Aspirin®) hin bessern.

Vorgehensweise bei der Thermoablation Tumor zeigt ■ Tab. 13.12.

Die CT-gesteuerten Therapien von ossären Metastasen können sehr gut gemeinsam mit strahlentherapeutischen Therapien eingesetzt werden und ersetzen diese in aller Regel nicht. Vorteil der CT-gesteuerten Therapie ist der sehr rasche Rückgang der Schmerzsymptomatik.

Schmerztherapie

Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen sind einer der Hauptgründe für krankheitsbedingte Ausfälle im Arbeitsalltag. Wer kennt keine Rückenschmerzen?

Bei Erkrankungen der Bandscheiben mit einer Nervenwurzelreizung oder bei Erkrankungen der kleinen Wirbelgelenke, der Facettengelenke, kommen computertomographisch gesteuerte Schmerztherapien zum Einsatz. In den letzten Jahren ist es allerdings vor allem im ambulanten Bereich zu einem Rückgang solcher Interventionen gekommen, da die Krankenkassen und kassenärztlichen Vereinigungen vor einer Therapie eine Vorstellung bei einem Schmerztherapeuten fordern.

Die Vorgehensweise bei der Schmerztherapie der Wirbelsäule zeigt ■ Tab. 13.13.

13.5.2 Strahlentherapie

J. Thiele

Sarkome

Sarkome (griech: sarkoma sarx = Fleisch und -om Geschwulst) sind bösartige Tumore des Stütz- und Bewegungsapparates und treten im Vergleich zu den Karzinomen eher selten auf.

Man unterscheidet zwei Gruppen von Sarkomen: die Knochen- und Weichteilsarkome.

Weichteilsarkome

Weichteilsarkome sind seltene Tumore, die Häufigkeit der Erkrankungen liegt bei ca. 2/100.000 Einwohnern. Männer sind häufiger betroffen als Frauen. Der Altersgipfel ist auf alle Dekaden verteilt.

Risikofaktoren sind genetische Syndrome wie z. B. Neurofibromatosis v.- Recklinghausensyndrom oder Wernersyndrom, ionisierende Strahlung, chemische Substanzen wie Arsen und Vinylchloride und genetische Faktoren.

Über 50 % der Weichteilsarkome sind an den Extremitäten lokalisiert, 35 % viszeral/ retroperitoneal, eher selten treten sie am Hals und thorakal auf.

Die Prognosen sind abhängig vom Grading (niedriggradig oder hochgradig), von der Größe der Primärtumors und ob eine Metastasierung vorliegt.

Histologie nach WHO Beispiele:

- 20 % Fibrosarkome – entstehen aus Bindegewebszellen
- 20 % Liposarkome – entstehen aus Fettzellen

■ **Tab. 13.13** Typische Vorgehensweise einer Schmerztherapie an der Wirbelsäule

Vorbereitung allgemein	Klinische Untersuchung des Patienten mit Beurteilung der Schmerzursache, MRT der Wirbelsäule, aktuelle Laborwerte (Blutbild, Gerinnung, Nierenretentionswerte, Schilddrüsenstatus)
Patientenvorbereitung	Keine
Positionierung	Bauchlage
Scanbereich	Zu behandelndes Wirbelsäulensegment
Material	Feinnadel (z. B. 23G) Kochsalz-Kontrastmittelgemisch zur Lagekontrolle Lokalanästhetikum, ggf. Kortikosteroid (nach Hausstandard)
Durchführung	Vorführen der Nadel zum Zielsegment. Kontrolle der Nadelposition mit Kontrastmittel, Injektion des Medikamentes

- 20 % Rhabdomyosarkome – entstehen aus der feingeweblichen Querstreifung der Skelettmuskulatur
- Leiomyosarkom – entsteht aus der glatten Muskulatur

Die Stadieneinteilung erfolgt nach TNM Klassifikation.

Die Differenzierung erfolgt in niedrigmaligne G1/G2 und hochmaligne G3/G4.

Die Ausdehnung wird in a oberflächlich und b tief eingestuft.

Weichteilsarkome werden heutzutage multimodal therapiert, d. h. die Patienten bekommen meistens eine Operation und danach eine Strahlentherapie und/oder Chemotherapie.

Hierbei erreicht man eine Verbesserung der lokalen und systemischen Tumorkontrolle.

Bei der Operation ist es wichtig, dass es mikroskopisch freie Resektionsränder mit einem Sicherheitssaum von mindestens 2 cm gibt.

Strahlentherapie des Weichteilsarkoms

Eine präoperative Strahlentherapie erfolgt bei sehr großen Tumoren, die nicht oder nur schwer operabel sind.

Die postoperative Bestrahlung ist abhängig vom Grading und Resektionserfolg (R0, R1, R2)

Die Gesamtdosis liegt bei 50 Gy + Boostbehandlung zw. 6 und 20 Gy, Einzeldosis bei 2 Gy.

Der Boost wird meistens perkutan bestrahlt, einige Kliniken applizieren ihn jedoch während der Operation (IORT, intra operative radiotherapy), an-

dere Kliniken behandeln ihn mit einer Brachytherapie.

Auch die Partikeltherapie spielt bei einigen Indikationen eine bedeutende Rolle, Chordome, niedrigmaligne Chondrosarkome und viele Kindertumore gelten als Standardindikation für eine Protonen oder Schwerionenbehandlung.

Die Behandlung von pädiatrischen Tumoren erfolgt immer im Rahmen von Studienprotokollen (► Leitlinien: www.awmf.org, „Grundlagen der Therapie von Tumoren und malignen Systemerkrankungen bei Kindern und Jugendlichen“, „Weichteilsarkome“)

- **Das Zielvolumen umfasst das gesamte Operationsgebiet einschließlich der Narbe und Drainagen-Eintrittsstellen, damit das Rezidivrisiko an diesen Stellen vermindert wird. Wichtig ist auch das gesamte dazugehörige Muskelkompartiment einzuschließen**

■ Lagerung der Patienten

Da die meisten Tumore an den Extremitäten auftreten, müssen die Patienten meist in Vakuumkissen fixiert werden. Dies ermöglicht eine gute reproduzierbare Lagerung des Patienten. Die Therapieplanung erfolgt in 3D mit Planungs-CT, wichtig ist hier die Markierung der Operationsnarbe.

Nebenwirkungen sind relativ moderat, in erster Linie treten Hautreaktionen auf. Es kann aber auch zu chronischen Nebenwirkungen wie Fibrose und Lymphödemen kommen.

Knochensarkome

Auch die Knochensarkome sind eher seltene Tumore, die Erkrankungsrate liegt bei 3/100.000 Einwohnern. Sie machen ca. 1 % aller bösartigen Tumore im Erwachsenenalter aus, etwas höher ist die Häufigkeit bei Kindern, 5 % aller Kindertumore sind Knochensarkome.

Primäre Knochensarkome entstehen in Knochenabschnitten mit besonders großem Wachstum. Risikofaktoren können u. a. Morbus Paget oder eine chronische Osteomyelitis sein. Ebenfalls können ionisierende Strahlen nach einer Strahlentherapie oder andauernden diagnostischer Anwendungen ein Knochensarkom induzieren.

Die Prognose ist auch hier abhängig vom Grad (niedriggradig oder hochgradig)

■ Histologie

- 50 % Osteosarkome – das Osteosarkom im Volksmund bekannt unter „Knochenkrebs“ zeichnet sich durch ein aggressives Wachstum mit Zerstörung des umliegenden Knochens und gegebenenfalls Gelenks aus
- 25 % Chondrosarkom – die bösartigen Zellen des Chondrosarkomes bilden Knorpel und keine Knochensubstanz, dieser Tumor tritt häufig im Erwachsenenalter auf und wird meistens im Becken und Femur lokalisiert
- 15 % Ewing Sarkom
- malignes Chordom

Die Klassifikation erfolgt ebenfalls nach TNM.

Die Differenzierung wird nach niedriggradig G1/G2 und hochgradig G3/G4 vorgenommen.

Die Therapie ist auch hier abhängig von der Größe und Differenzierung des Tumors. Die meisten Tumore werden operiert, und je nach Indikation wird eine Chemotherapie appliziert.

Chondrosarkome sind nicht chemosensitiv, d. h. sie sprechen nicht auf Chemotherapie an.

Chondrosarkome und Chordome der Schädelbasis gelten als Standardindikation für eine Behandlung mit Protonen oder Schwerionen.

13.5.3 Nuklearmedizinische Therapie

I. Offenhäuser

Radiosynoviorthese (RSO)

Die RSO ist eine wirkungsvolle Methode zur lokalen Therapie chronischer Gelenkentzündungen. Die rezidivierende Entzündung der Gelenkschleimhaut (Synovialis) ist schmerzhaft und geht oft mit Gelenkergüssen einher. Ziel der RSO ist es, die Synovialis bindegewebig umzubauen. Dieses Ziel wird mit gutem Ergebnis durch Injektion eines Radioisotops, das unter Aussendung von β -Strahlung zerfällt, in den Gelenkraum erreicht (z. B. ^{90}Y , ^{186}Re , ^{169}Er). Die Wahl des Radiopharmakons ist abhängig von der Größe des Gelenkes. Je kleiner das Gelenk, desto geringer sollte die Reichweite des β -Strahlers sein. Die maximale/mittlere Reichweite beträgt bei ^{90}Y 11 mm/3.6 mm, bei ^{186}Re 3.7/1.2 mm, ^{169}Er 1.0 mm/0.3 mm. Die Radionuklide sind an Kolloide gebunden. Diese werden von der obersten Schicht der Synovialzellen als Fremdkörper erkannt und phagozytiert. Da Faktoren, wie Größe des Gelenkraumes, die Verteilung im Gelenk, die entzündliche Aktivität und die Absorption der radioaktiven Kolloide nicht vorausbestimmt werden können, wird die Radionuklidmenge nach empirisch ermittelten Schätzwerten appliziert, z. B. Kniegelenk 185 MBq ^{90}Y . (► auch Leitlinie Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin – Radiosynoviorthese).

Nach sorgfältiger Indikationsstellung durch einen Nuklearmediziner wird das Radiopharmakon nach durch Bildgebung sichergestellter anatomischer Kenntnis intraartikulär injiziert. Gleichzeitig kann die Injektion eines Cortisonpräparates zur Übergangstherapie erfolgen. Zur Qualitätssicherung muss durch szintigrafische Untersuchungen die regionale Verteilung des radioaktiven Arzneimittels aufgezeichnet werden (► Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin). Das behandelte Gelenk muss ruhig gestellt werden. Der Patient sollte thromboseprophylaktisch behandelt werden.

Palliative Therapie von Knochenmetastasen

Osteoplastische Metastasen eines Prostata-, Mamma- oder Bronchialkarzinoms können palliativ mit osteotropen Radiopharmaka behandelt

■ **Tab. 13.14** Venenkatheter-applizierte Radiopharmaka

Radiopharmakon	Maximale Reichweite	Mittlere Reichweite	Physikalische Halbwertszeit	Zu applizierende Aktivitätsmenge
⁸⁹ Sr-Strontiumchlorid	6.7 mm	2.4 mm	50.5 Tage	1.5–2.2 MBq /kgKG
¹⁵³ Sm-HEDP	3.4 mm	0.6 mm	1.9 Tage	37 MBq/kgKG
¹⁸⁶ Re-HEDP	4.7 mm	1.1 mm	3.7 Tage	18.5 MBq/kgKG
¹⁸⁸ Re-HEDP	11 mm	2.7 mm	0.7 Tage	1295 MBq
³² P	7.9 mm	3 mm	14.3 Tage	175–400 MBq
¹¹⁷ Sn-DTPA	7 mm	2.4 mm	13.6 Tage	5–10 MBq/kgKG
²²³ Ra-Chlorid	Wenige mm		11,4 Tage	50–100 kBq/kgKG

werden, wenn diese nicht auf andere verfügbare Therapien ansprechen. Ziel der palliativen Knochenschmerztherapie mit β -Strahlern kurzer Reichweite ist die Verbesserung der Lebensqualität des Patienten bzw. die Herabsetzung der Schmerzmedikation. Bei bestehender oder drohender Rückenmarkskompression durch Wirbelkörpermetastasen oder instabilen Frakturen, bestehender Knochenmarksdepression oder Niereninsuffizienz ist eine nuklearmedizinische Knochenschmerztherapie kontraindiziert. Die Indikation sollte interdisziplinär unter Beteiligung eines Nuklearmediziners, Strahlentherapeuten, Onkologen und Palliativmediziners getroffen werden. Etwa 2/3 der behandelten Patienten profitieren mit einer deutlichen Schmerzentlastung, 20–30 % sind nach der Behandlung schmerzfrei.

Voraussetzung ist u. a. das Vorliegen eines aktuellen Knochenszintigrammes. Risiken wie z. B. das Absinken der Leuko- oder Thrombozyten und der damit erhöhten Infektions- oder Blutungsgefahr müssen mit dem Patienten besprochen werden (► auch Leitlinie Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin – Radionuklidtherapie schmerzhafter Knochenmetastasen). ²²³Ra-Chlorid ist ein α -Strahler, der neuerdings in der Behandlung von Knochenmetastasen hormonresistenter Prostatakarzinome eingesetzt wird. Wegen seiner Ähnlichkeit zum Calcium wird ²²³Ra in osteoblastischen Knochenmetastasen über den zwecks Reparatur erhöhten Mineralbedarf vermehrt eingebaut. Wegen der kurzen Reichweite der α -Strahlung wird das umgebende Gewebe weitgehend geschont.

Die Applikation folgender Radiopharmaka erfolgt über einen Venenkatheter (■ Tab. 13.14).

Das jeweilige Radiopharmakon wird über 1 bis 2 Minuten injiziert, anschließend wird der Venenkatheter mit 0.9 %iger NaCl-Lösung gespült. Die applizierte Aktivitätsmenge und der Applikationszeitpunkt sind zu vermerken. Die ambulanten therapierten Patienten müssen zwei Stunden überwacht werden. Der Urin muss ca. 6 Stunden nach Applikation unter besonderer Berücksichtigung des notwendigen Strahlenschutzes gesammelt und nach Abklingen der Aktivität entsorgt werden.

Bei Radiopharmaka, die eine γ -Komponente enthalten, wird ein Ganzkörperszintigramm zur Dokumentation der Aktivitätsaufnahme 6 bis 24 h nach Applikation angefertigt.

Blutbildkontrollen sind bis zu 6 Wochen posttherapeutisch alle 1 bis 2 Wochen erforderlich.

13.6 Fallbeispiel

M. Kahl-Scholz

Beispiel 1

Kai ist 27 Jahre alt und hat sich bei einem Skiunfall das Knie verdreht. Er kann nicht mehr auftreten, sein Knie ist ganz dick und auf Druck und Drehbewegung reagiert der Patient mit einem schmerzverzerrten Gesicht.

1. Welche Verdachtsdiagnose liegt nahe?
2. Welche bildgebenden Verfahren bieten sich hierfür an?

Beispiel 2

Frau Kertesmeier ist 54 Jahre alt, mit der Erstdiagnose eines Mammakarzinoms links vor 12 Jahren. Nach Tumorexstirpation folgte eine adjuvante Radiatio. Ein Jahr später kam es zu einem lokalen Tumorreizidiv, das ebenfalls entfernt wurde. Es folgte eine adjuvante Hormontherapie. 1 weiteres Jahr später entdeckte man erneut einen Rezidivtumor, der zur Brustamputation (Ablatio mammae) führte, begleitet von einer adjuvanten Chemo- und Strahlentherapie. Frau Kertesmeier klagt seit ca. 3 Monaten über zunehmende Schmerzen im Rücken (oberer BWK-Bereich) und beginnenden Sensibilitätsstörungen in der rechten Hand und dem rechten Unterarm, vor allem ulnar.

- ❓ 1. Was ist Ihre Verdachtsdiagnose?
2. Was ist Ihre Differentialdiagnose?
3. Welche bildgebenden Verfahren schlagen Sie vor, um die Beschwerden abzuklären?

✓ Beispiel 1

1. Die Verdachtsdiagnose „Meniskusriss“ liegt hier nahe. Meist liegt ein sog. Korbhenkelriss vor.
2. Vor allem die Kernspintomographie (■ Tab. 13.7) bietet sich zur Diagnostik an. Ergänzend wird zumeist zum Ausschluss knöcherner Verletzungen akut eine Röntgenaufnahme des Kniegelenks angefertigt.

✓ Beispiel 2

1. Die Krankengeschichte legt nahe, dass es sich um eine Knochenmetastase handeln könnte.
2. Die Symptome können aber genauso für einen Bandscheibenvorfall sprechen.
3. Eine MRT wäre zur Diagnostik ideal, da sowohl Bandscheibenpathologien als auch Metastasen im Wirbelsäulenbereich gut abgeklärt werden können (► Abschn. 13.2.5). Sollte sich eine Metastase bestätigen, bietet sich zur weiteren Diagnostik eine Skelettszintigraphie an (► Abschn. 13.3.1).

Literatur

- Bamberg M, Molls M, Sack H (2009) Klinik, 2. Aufl. Radioonkologie, Bd. 2. W. Zuckschwerdt Verlag, München Wien New York, S 757–793
- Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e. V. Leitlinie Skelettszintigraphie
- Deutsche Gesellschaft für Rheumatologie: www.dgrh.de, 19.3.14
- Kuwert T, Grünwald F, Haberkorn U, Krause T (2008) Nuklearmedizin. Thieme Verlag, Stuttgart
- Lohr F, Wenz W (2007) Strahlentherapie kompakt S. 181–192, 2. Auflage, Urban und Fischer
- Sauer R (1998) Strahlentherapie und Onkologie für MTA-R S. 395–401, 3. Auflage, Urban und Schwarzenberg
- Schäffler A, Menche N (1999) Mensch, Körper, Krankheit. Urban & Fischer, 1999
- Schicha H, Schober O (2013) Nuklearmedizin: Basiswissen und klinische Anwendung. Verlag. Schattauer, Stuttgart

Herz und Blutgefäße

U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Vockelmann

14.1 Allgemeines – 428

14.1.1 Topographische Anatomie – 428

14.1.2 Funktion – 428

14.2 Radiologische Diagnostik – 428

14.2.1 Sonographie – 428

14.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik – 429

14.2.3 Durchleuchtung/Angiographie – 430

14.2.4 Computertomographie – 431

14.2.5 Kernspintomographie – 433

14.3 Nuklearmedizinische Diagnostik – 433

14.3.1 Herz-SPECT und -PET – 433

14.4 Wertigkeit – 437

14.5 Therapeutische Möglichkeiten – 437

14.5.1 Angiographie – 437

14.6 Fallbeispiele – 438

Literatur – 439

14.1 Allgemeines

M. Kahl-Scholz

14.1.1 Topographische Anatomie

Herz und Blutgefäße bilden zusammen das Herz-Kreislauf-System. Man unterscheidet einen großen Kreislauf (Körperkreislauf: linker Ventrikel – Aorta – Arterien – Arteriolen – Venolen – Venen – V. cava – rechter Vorhof) und einen kleinen Kreislauf (Lungenkreislauf: rechter Ventrikel – Lungenarterien – Lunge – Lungenvenen – linker Vorhof). Letzterer dient u. a. der Anreicherung des Blutes mit frischem Sauerstoff und der Abgabe von Kohlenstoffdioxid.

Das Herz hat die Form einer dreiseitigen Pyramide und wird in die Basis (Basis cordis) und die Spitze (Apex cordis) unterteilt. Im Inneren wird das Herz durch die Herzscheidewände (Septum interatriale und interventriculare sowie atrioventriculare) in zwei Vorhöfe (Atrium sinistrum und dextrum) und zwei Kammern (Ventriculus dextrum und sinisterum) unterteilt. Das Blut fließt über insgesamt vier Klappen (Trikuspidalklappe, Pulmonalklappe, Mitralklappe, Aortenklappe).

Die Koronararterien sind Gefäße, die das Herz wie ein Netz überziehen und den kräftigen Muskel mit Blut versorgen.

Arterien werden in solche vom muskulären Typ (mit drei klar voneinander abgrenzbaren Wandschichten) und vom elastischen Typ (Übergang von innerer zur mittleren Gefäßschicht fließend) unterschieden.

Venen weisen einen wesentlich schmaleren Wandaufbau auf und sind teilweise mit sog. Venenklappen ausgestattet, die den Blutrückfluss verhindern.

14.1.2 Funktion

Über das Blut im Herz-Kreislauf-System werden Nährstoffe und Atemgase in den Körper transportiert und Abfallprodukte aus dem Stoffwechsel entsorgt. Das Herz bildet dabei den „Motor“, der dazu dient, das Blut über die Gefäße als „Transportröhren“ zu pumpen. Sowohl Herz wie Gefäße

sind (neben anderen z. B. hormonproduzierenden Organen) an der Regulation eines ausreichend hohen Blutdruckes beteiligt, der nötig ist, um das Blut auch bis an die entlegensten Stellen des Körpers zu transportieren und zurück zum Herzen zu führen.

14.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

14.2.1 Sonographie

Auch in der Diagnostik von Herz und Gefäßen stellt die Sonographie den Grundbaustein der Diagnostik dar. Die Ultraschalluntersuchung des Herzens, oft als UKG für Ultraschall-Kardiographie abgekürzt, wird in Deutschland nahezu ausschließlich durch Kardiologen durchgeführt. Das gleiche gilt auch für das TEE, das trans(e)ösophageale Echokardiogramm, auch Schluckecho genannt.

In der Radiologie ist jedoch die Ultraschalldiagnostik von Arterien und Venen beheimatet. Diese wird als farbkodierte Duplexsonographie durchgeführt, um Flussgeschwindigkeiten bestimmen zu können. Über diese lassen sich dann Stenosegrade der Gefäße ableiten.

Ein typisches Untersuchungsprotokoll der Sonographie der A. carotis zeigt [Tab. 14.1](#).

Bei der Beurteilung der Venen kommt die Kompression der Gefäße als Beurteilungskriterium hinzu. Thrombusmaterial lässt sich nicht komprimieren. Eine Vene, die man mit dem Ultraschallkopf zusammendrücken kann, sodass das Lumen nicht mehr durchströmt ist, ist **nicht thrombosiert**.

Ein typisches Untersuchungsprotokoll der Sonographie der Beinvenen stellt [Tab. 14.2](#) dar.

➤ **Patienten mit Thrombosen der Oberschenkel- oder Beckenvenen haben strenge Bettruhe. Sobald also eine Thrombose festgestellt wurde, muss der Patient liegend transportiert werden.**

■ **Tab. 14.1** Untersuchungsprotokoll der A. carotis

Patientenvorbereitung	Hals frei machen lassen
Schallkopf	7,5 Mhz Linearschallkopf
Standardebenen	Parasagittale/-coronare Einstellung von ACC, ACI und ACE mit Dopplermessung
Besonderheiten	Einsatz der farbkodierten Duplexsonographie

■ **Tab. 14.2** Untersuchungsprotokoll der Beinvenen

Patientenvorbereitung	Hose/Rock ablegen lassen
Schallkopf	7,5 Mhz Linearschallkopf
Standardebenen	Überwiegend axiale Schichtführung; Dokumentation der V. femoralis com., der V. femoralis superior proximal und im Adduktorenkanal, der V. poplitea und der prox. Unterschenkelvenen mit und ohne Kompression
Besonderheiten	Einsatz der farbkodierten Duplexsonographie

■ **Tab. 14.3** Standardeinstelltechnik Röntgen-Thorax in 2 Ebenen

Patientenvorbereitung	Oberkörper frei machen lassen
Positionierung	Pa: Mit der Brust vor dem Stativ, Scapulae rausgedreht seitlich: mit der linken Seite an das Stativ gedreht
Aufnahmeparameter	125 kV
Fokus-Detektor-Abstand	180 cm (150–200 cm)
Belichtungsautomatik	Pa: Seitliches Messfeld seitlich: mittleres Messfeld
Streustrahlenraster	r12 (8)

■ **Abb. 14.1** Standardaufnahme des Thorax in 2 Ebenen

14.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Die konventionelle Röntgendiagnostik hat keine Bedeutung in der Diagnostik von Gefäßerkrankungen. Zur Beurteilung des Herzen und der Herzleistung ist der Röntgen-Thorax immer noch eine der Basisuntersuchungen, zu der dann zur Diagnostik von Herzerkrankungen weitere Untersuchungen mit Ultraschall und vor allem MRT hinzukommen.

Die Standardaufnahme des Thorax erfolgt im Stehen in 2 Ebenen (■ **Tab. 14.3**). Dazu sollte der Patient den Oberkörper frei machen. Zunächst erfolgt die Aufnahme im pa-Strahlengang. Hierzu stellt sich der Patient zentral vor das Stativ. Um die Scapulae aus dem Bild zu drehen, sollte der Patient die Handgriffe seitlich des Stativs von innen fassen. Damit wird einer Überlagerung von Lungenanteilen durch die Scapulae vermieden. Überlagerte Lungenanteile sind deutlich schlechter beurteilbar.

Die Einblendung muss so erfolgen, dass die gesamte Lunge vom Bildformat erfasst ist.

➤ **Sie sehen hier eine im klinischen Alltag in üblicher Weise eingebblendete Röntgenaufnahme des Thorax (■ **Abb. 14.1**, gelbe Linie). Perfekt wäre die rote Linie gewesen. Schätzen Sie doch mal prozentual, welcher zusätzlichen Strahlenbelastung der Patient ausgesetzt worden ist. (Die Lösung finden Sie am Ende des Kapitels)**

■ **Besonderheit**

Nach einer Pneumektomie, also der Entfernung eines Lungenflügels, sollten Sie das Messfeld auf der

■ **Tab. 14.4** Standardeinstelltechnik Beinvenenphlebographie

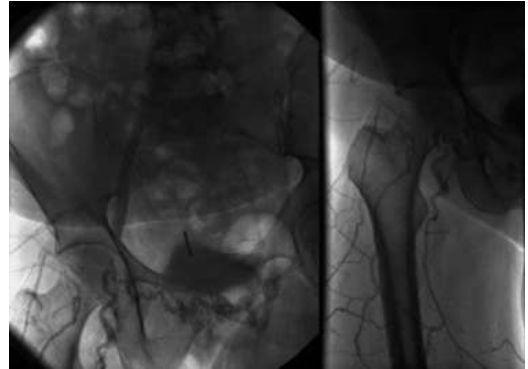
Patientenvorbereitung	Hose/Rock ablegen, Fuß freimachen
Positionierung	Rückenlage, gesunder Fuß mit Klotz unterpolstert, Durchleuchtungstisch auf etwa 60° gekippt
Bildfrequenz	Einzelbilder
Kontrastmittel	50–100 ml iodhaltiges Kontrastmittel, physiologische Kochsalzlösung (NaCl 0,9%) zum Nachspülen
Standardeinstellungen	Unterschenkel pa, Innen- und Außenrotation Knie und proximaler Unterschenkel pa Oberschenkel und Hüfte pa ipsilaterales Becken pa
Aufnahmekriterien, Besonderheiten	Überlappende Abbildung der Bein- und Beckenvenen

operierten Seite des Patienten abschalten, um eine erhöhte Strahlenexposition zu vermeiden und die verbliebende Lunge optimal zu belichten.

14.2.3 Durchleuchtung/Angiographie

Die Phlebographie ist als Basisdiagnostik bei der Frage einer Bein- oder Armvenenthrombose mittlerweile von der Sonographie abgelöst worden. Trotzdem gibt es immer wieder Fragestellungen, die nicht alleine mit der Sonographie beantwortet werden können.

Für eine Beinvenenphlebographie sollten Sie den Patienten bitten, Hose bzw. Rock sowie Socken abzulegen (■ Tab. 14.4). Dann sollten Sie den Patienten in Rückenlage auf dem Durchleuchtungstisch lagern. Schrauben Sie die Handgriffe seitlich an den Tisch, und unterpolstern Sie das nicht zu untersuchende Bein mit einem (Holz-)Klotz. Nach diesen Vorbereitungen bitten Sie den Patienten, sich mit dem gesunden Bein auf den Klotz zu stellen und mit den Händen festzuhalten, bevor Sie den Tisch auf etwa 60° aufrichten. In dieser Position punktiert der Arzt eine Fußrückenvene des zu untersuchen-



■ **Abb. 14.2** Frische Thrombose der V. femoralis superficialis und V. femoralis communis mit beginnender Kollateralisierung

den Beines, vorzugsweise eine Vene in Verlängerung des 1. Strahls.

➤ **Sollte die Punktion schwierig sein, kann es helfen, den Fuß anzuwärmen. Hierzu können Sie einen in heißem Wasser getränkten Waschlappen nehmen oder auch einen Einmalhandschuh mit heißem Wasser füllen und auf den Fuß legen. Achten Sie darauf, dass Sie den Patienten dabei nicht verbrennen!**

Die Darstellung einer frischen Thrombose der V. femoralis superficialis und V. femoralis communis zeigt ■ Abb. 14.2.

Die diagnostische Angiographie ist heutzutage zunehmend durch Sonographie und Schnittbilddiagnostik verdrängt worden. Trotzdem gilt die Angiographie immer noch als „Goldstandard“ und wird insbesondere in unklaren Fällen auch zu diagnostischen Zwecken durchgeführt.

Da eine Arterie punktiert wird, gibt es natürlich ein Blutungsrisiko. Daher müssen vor dem Eingriff die Gerinnungsparameter (Quick/INR, PTT, Thrombozyten) überprüft werden. Da Kontrastmittel verwendet wird, sollten wie bei jeder Kontrastmittelgabe auch die Nierenretentionsparameter (Kreatinin, GFR) bekannt sein.

➤ **Bei einer eingeschränkten Nierenfunktion oder einer Kontrastmittelunverträglichkeit kann die Angiographie der Becken- und**

■ **Tab. 14.5** Standardeinstellung einer diagnostischen Becken-Bein-Angiographie

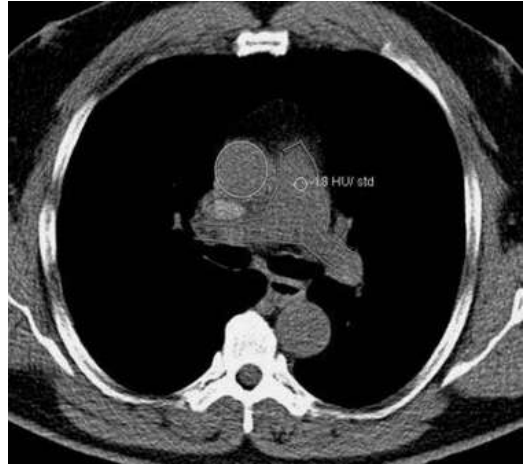
Patientenvorbereitung	Patienten entkleiden und ein Patientenhemd anziehen lassen
Patientenlagerung	Rückenlagerung
Bildfrequenz	2 Bilder/sec, im Unterschenkel auch 1 Bild/sec
Kontrastmittel	100–150 ml iodhaltiges Kontrastmittel, Hochdruck-Kontrastmittelspritze
Standardeinstellungen	Bauchaorta mit Nierenarterien pa AA. iliaca ap, RAO und LAO A. femoralis com. und A. femoralis sup. ap, ggf. RAO und LAO distale AFS und A. poplitea ap Unterschenkel bis Fuß ap
Aufnahmekriterien, Besonderheiten	Überlappende Abbildung des gesamten Untersuchungsabschnittes

Beingefäße auch mit CO₂ als Kontrastmittel durchgeführt werden.

Für die Untersuchung wird der Patient in der Angiographie in Rückenlage gelagert (■ Tab. 14.5). Eine diagnostische Angiographie dauert in aller Regel höchstens 30 min. Sollte jedoch auch eine Intervention geplant sein, achten Sie darauf, dass der Patient bequem liegt. Auch die Harnblase sollte der Patient möglichst vor der Untersuchung geleert haben.

Der Zugang für die Untersuchung erfolgt i. d. R. über die A. femoralis communis. Hier sollten Sie bei dem Patienten eine Rasur durchgeführt bzw. veranlassen haben. Es erfolgt dann ein steriles Abwaschen der Punktionsstelle, z. B. mit Braunol. Anschließend wird der Patient mit einem Loch Tuch steril abgedeckt.

- **Bevor Sie die Punktionsstelle steril waschen und abdecken, sollten Sie überprüfen, ob Sie auch einen Leistenpuls fühlen können. Im Zweifel ziehen Sie den Radiologen hinzu, um nicht nachträglich die andere Seite oder gar einen Zugang von transbrachial vorbereiten zu müssen.**



■ **Abb. 14.3** Axiales CT-Bild des Thorax unterhalb der Trachealbifurkation. Gelb: Aorta ascendens; Rot: Aorta descendens; Blau: V. cava superior; Grün: Truncus pulmonalis. (© Vockelmann)

Spätestens jetzt sollte Sie Ihr Radiologe unterstützen. Dieser wird eine lokale Betäubung in der Leiste setzen und anschließend in Seldinger-Technik einen Katheter oder eine Schleuse in die A. femoralis communis einwechseln. Zur diagnostischen Angiographie wird dann ein Pigtail-Katheter in der Bauchaorta platziert.

- **Wissen Sie, was pigtail heißt? Richtig: Schweineschwanz. Jetzt werden Sie diesen Katheter immer ganz leicht erkennen!**

14.2.4 Computertomographie

Mit der Computertomographie steht ein sehr gutes Verfahren zur Verfügung, nicht invasiv und schnell eine arterielle Gefäßdiagnostik, eingeschränkt auch eine venöse Gefäßdiagnostik durchzuführen (■ Abb. 14.3). Vorteil der Computertomographie ist im Vergleich zum MRT die einfacheren Untersuchungsprotokolle, die einem auch nachts um 3 Uhr im Dienst gut gelingen können. Arterielle Gefäßdiagnostik wird in der Computertomographie mit Bolustriggerung durchgeführt. Wichtig ist für eine optimale Untersuchung, dass Sie die Querschnittsanatomie so gut beherrschen, dass Sie z. B. eine ROI für die A. pulmonalis für ein CT zur Lungenem-

■ Tab. 14.6 Untersuchungsprotokoll CT Pulmonalisangiographie

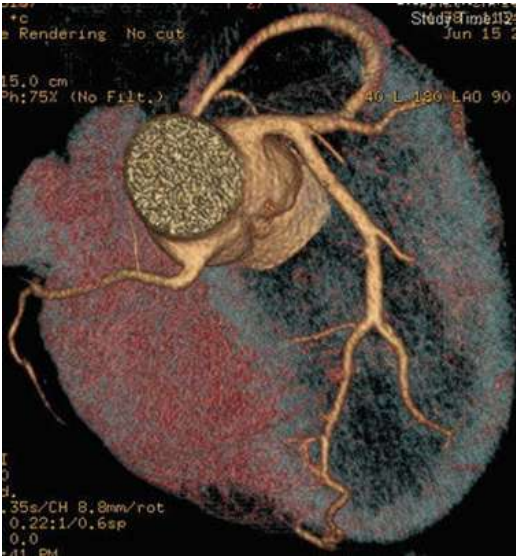
Patientenvorbereitung	Röntgendichte Fremdkörper am Oberkörper entfernen
Positionierung	Rückenlage
Scanbereich	Lungenspitzen bis Zwerchfell
Röhrenspannung/-strom	80–100 kV, Dosismodulation
Kontrastmittel	60–80 ml iodhaltiges Kontrastmittel
Reformationen	Axiales Weichteilfenster Axiales Lungenfenster Coronare MIP-Rekonstruktion im Weichteilfenster Coronare Rekonstruktion im Lungenfenster

■ Tab. 14.7 Untersuchungsprotokoll CT-Angiographie der Becken-Bein-Gefäße

Patientenvorbereitung	Röntgendichte Fremdkörper am Abdomen und den Beinen entfernen
Positionierung	Rückenlage, je nach Gerät Füße voran zur Gantry
Scanbereich	Etwa LWK 3 bis zum Fuß
Röhrenspannung/-strom	80–100 kV, Dosismodulation
Kontrastmittel	80–120 ml iodhaltiges Kontrastmittel
Reformationen	Axiales Weichteilfenster Coronare MIP-Rekonstruktion im Weichteilfenster Sagittale MIP-Rekonstruktion im Weichteilfenster

boliesuche im nativen axialen CT-Bild einzeichnen können. Eine CT-Angiographie der A. pulmonalis ist Methode der Wahl zur Detektion einer Lungenembolie.

Für eine gute arterielle Gefäßdarstellung ist es wichtig, dass das Kontrastmittel rasch einlaufen kann, um einen spitzen Kontrastmittelbolus für die Bildgebung nutzen zu können. Damit ist gemeint, dass wir nur für kurze Zeit möglichst viel Kontrastmittel im Untersuchungsabschnitt brauchen. Daher sollte für die CT-Angiographie möglichst eine grüne



■ Abb. 14.4 Volume Rendering Rekonstruktion eines Karo-CTs ohne pathologischen Befund

Veneverweilkanüle genutzt werden. Ein typisches Protokoll zeigt ■ Tab. 14.6.

Eine Untersuchung, die häufig durchgeführt wird, ist eine CT-Angiographie der Becken-Bein-Gefäße (■ Tab. 14.7). Nachteil der Computertomographie ist hierbei im Vergleich zur DSA oder MR-Angiographie, dass Kalkplaque die Beurteilung der Gefäße erschweren. Trotzdem hat die CT-Angiographie als nicht-invasives Verfahren ihre Berechtigung.

Ein neueres Untersuchungsgebiet ist die CT-Koronarangiographie (■ Abb. 14.4), die mit modernen CT-Geräten (64-Zeilen oder mehr) in guter Qualität durchgeführt werden kann. Die Strahlenbelastung ist unter optimalen Untersuchungs- und Gerätebedingungen (Stichwort: iterative Rekonstruktion) vergleichbar mit einer diagnostischen Koronarangiographie. Allerdings ist die Untersuchung artefaktanfällig. So kann eine Extrasystole, also ein zusätzlicher Herzschlag dazu führen, dass die Auswertung der Koronargefäße nicht im gesamten Untersuchungsverlauf möglich ist.

14.2.5 Kernspintomographie

Die Kernspintomographie bietet sich durch ihren hohen Weichteilkontrast und die fehlende Strahlenexposition zur Gefäßdiagnostik an. Auch bei der MR-Angiographie wird zumeist mit einer Bolustriggerung gearbeitet. Allerdings muss hierbei die eigentliche Untersuchung beim Kontrastmitteleinstrom manuell gestartet werden. Man kann also zumeist nicht in aller Ruhe wie in der Computertomographie die ROI einzeichnen, sondern muss während des Einströmens des Kontrastmittels bei der Kontrastierung der Zielgefäße die Untersuchung starten. Ein Standardprotokoll gibt [Tab. 14.8](#) wieder.

Im Rahmen der Herzdiagnostik kann die MRT Befunde nachweisen, die mit keiner anderen bildgebenden Methode zu belegen sind. So lässt sich bei einer Myokarditis, also einer Herzmuskelentzündung, ein intramurales Kontrastmittelenhancement im Herzmuskel nachweisen, das die Narbenbildung im Rahmen der Entzündung anzeigt. Die Herzmuskelbewegung lässt sich objektiver und reproduzierbarer als mit einer Ultraschalluntersuchung abbilden. Bei einer Stress-MRT-Untersuchung kann die Durchblutung des Herzens untersucht und eine Minderdurchblutung des Herzmuskels unter der Belastung gezeigt werden.

14.3 Nuklearmedizinische Diagnostik

U. Blum

14.3.1 Herz-SPECT und -PET

Die Myokardszintigraphie erfolgt in erster Linie bei Patienten mit dem Verdacht auf eine Verengung der Herzkrankgefäße (koronare Herzerkrankung, KHK) oder wenn eine Verengung bereits festgestellt wurde. Geeignete SPECT-Tracer sind ^{99m}Tc-Sestambi und ^{99m}Tc-Tetrofosmin ([Tab. 14.9](#)). Das früher eingesetzte ²⁰¹Thallium sollte aufgrund der deutlich höheren Strahlenbelastung nur noch in Ausnahmefällen verwendet werden.

In der PET wird überwiegend ¹⁸F-FDG (als Stoffwechselmarker) eingesetzt. Selten werden ¹⁵O-H₂O

Tab. 14.8 Standardprotokoll MR-Angiographie der Becken-Bein-Gefäße

Patientenvorbereitung	Hose/Rock ablegen, Metallteile, Scheckkarte, Schmuck etc. ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage
Spule	Becken-Bein-Spule
Scanbereich	3 Scanpositionen (Becken, Oberschenke, Beine)
Sequenzen	Untersuchung mit automatischer Tischverschiebung: Nativ coronar T1w über die drei Scanpositionen Mit Kontrastmittel T1w coronar über die drei Scanpositionen Anschließend Subtraktion der beiden Serien und Anfertigung von MIP-MPR
Kontrastmittel	15–20 ml

oder ¹³NH₃ als reine Perfusionsmarker verwendet, zudem können mit weiteren Markern der Fettstoffwechsel sowie die sympathische und parasympathische Innervation dargestellt werden.

Eine andere Möglichkeit der Schwächungskorrektur ist die Verwendung radioaktiver Transmissionsquellen. Durch den Einsatz einer Schwächungskorrektur wird die Untersuchung genauer, jedoch erhöht sich die Strahlenbelastung.

Üblicherweise erfolgt die Untersuchung in zwei Durchgängen, jeweils einmal nach **Belastung** und in **Ruhe**. Hierbei kommen sowohl Eintages-, als auch Zweitages-Protokolle zum Einsatz.

Die Belastung erfolgt entweder körperlich (Fahrradergometer, Laufband) oder medikamentös. Für die medikamentöse Belastung können gefäßerweiternde Mittel (z. B. Adenosin, Regadenoson) oder Katecholamin-Derivate (z. B. Dobutamin) eingesetzt werden.

Die mittels EKG getriggerte SPECT-Aufnahme wird als **gated SPECT** bezeichnet. Die gated SPECT erlaubt Aussagen über die Beweglichkeit der linken Herzkammer, hierbei werden folgende Parameter bestimmt:

- Enddiastolisches Volumen EDV [ml]
- Endsystolisches Volumen ESV [ml]

■ Tab. 14.9 Herz-SPECT mit ^{99m}Tc -MIBI oder -Tetrofosmin

Patientenvorbereitung	Nüchtern (mind. 4 h) Medikamente ggf. absetzen – Ergometrie: Betablocker, Vasodilatoren – Medikamentös: Theophyllin, Dipyridamol; kein Koffein, Tee, Schokolade (12–24 h vorher) Anamnese Venenverweilkatheter legen und fixieren Ergometer auf Patienten einstellen EKG anlegen Blutdruck und Puls messen Belastung nach dem Standard der Abteilung
Aktivität:	Eintagesprotokoll: – 250 + 750 MBq ^{99m}Tc -MIBI oder -Tetrofosmin Zweitagesprotokoll: – je 400 MBq ^{99m}Tc -MIBI oder -Tetrofosmin
Applikation	i. v.
Akquisition:	Aufnahmebeginn (15 min) 45–60 min p. i. Rückenlage, Arme über dem Kopf SPECT LEHR, 2- oder 3-Kopf, Kollimator eng einstellen 64 * 64 Matrix, Projektionen je nach Kamerasystem EKG-getriggert
Auswertung	SPECT-Rekonstruktion: gefilterte Rückprojektion oder iterative Rekonstruktion Reorientierung entlang der Herzachse Darstellung der Schnittbilder (■ Abb. 14.5a, b): – Kurzachse: Von der Herzspitze zur Basis – Horizontale Längsachse: Von unten nach oben – Vertikale Längsachse: Vom Septum nach außen EDV, ESV, LVEF, SSS, SRS Bulls-Eye-Darstellung
Besonderheiten:	Bei adipösen Patienten ggf. Anpassung der Dosis
Strahlenbelastung:	MIBI: 0,008 mSv/MBq Tetrofosmin: 0,007 mSv/MBq

- Schlagvolumen [ml]: $\text{EDV} - \text{ESV}$
- Ejektionsfraktion (LVEF) [%]: $(\text{Schlagvolumen} / \text{EDV}) * 100$

Außerdem sind Aussagen zur Wandbewegung und der Veränderung des Herzmuskels in den einzelnen Anteilen möglich.

Vor einem geplanten Eingriff an den Herzkranzgefäßen sollte eine Abschätzung des Nutzens erfolgen. Hierbei wird lebendes (vital) bzw. angeschlagenes (hibernierendes) Gewebe von narbigen Veränderungen unterschieden. Nur die Funktion von vitalen oder hibernierenden Arealen kann durch den Eingriff verbessert werden.

Die höchste Genauigkeit liefert hierbei die ^{18}F -FDG-PET. Eine Myokard-SPECT mit ^{99m}Tc -Markern sollte unter besonderen Ruhebedingungen (komplette Medikation des Patienten, zudem ggf. sublinguale Nitratgabe) erfolgen. Nur noch sehr selten wird hierbei ^{201}Tl verwendet, welches aufgrund der Wiederaufnahme in den Herzmuskel (die sog. Redistribution) eine Beurteilung der Vitalität 3–4 h p. i. (ggf. 24 h p. i.) ermöglicht.

Thallium-Protokolle starten wenige Minuten nach der Belastung, zudem erfolgt eine Spätaufnahme von 3–4 (ggf. 24) Stunden.

Ergometrische Belastung

Stufentest: Beginn mit 25 (50) Watt, Steigerung alle 1–2 Minuten. Abbruch bei Erreichen der Zielherzfrequenz oder entsprechend der Abbruchkriterien. Nach der Injektion sollte die Belastung noch 1–2 min aufrechterhalten werden.

Zielherzfrequenz: $0.85 * (220 - \text{Alter})$

■ Abbruchkriterien

■ Absolute Abbruchkriterien

- ST-Strecken Senkung > 3 mm
- ST-Hebung > 1 mm
- Blutdruckabfall > 10 mmHg mit Angina pectoris oder ST-Senkung
- Mäßige bis schwere Angina pectoris
- Schwere Atemnot
- Zyanose
- Ventrikuläre Tachykardie > 30 s
- Erschöpfung des Patienten
- Technische Probleme

■ Relative Abbruchkriterien

- Erhöhter Blutdruck ($RR_{\text{syst}} > 230\text{--}260$ mmHg, $RR_{\text{diast}} > 115$ mmHg)
- Blutdruckabfall > 10 mmHg ohne Angina pectoris oder ST-Senkung
- Polymorphe Extrasystolen, Paare (2 nachfolgende VES), Salven (> 3 nachfolgende VES)
- Supraventrikuläre Tachykardie
- Bradyarrhythmie
- Auftreten von Blockbildern (AV-Block, Schenkelblock)

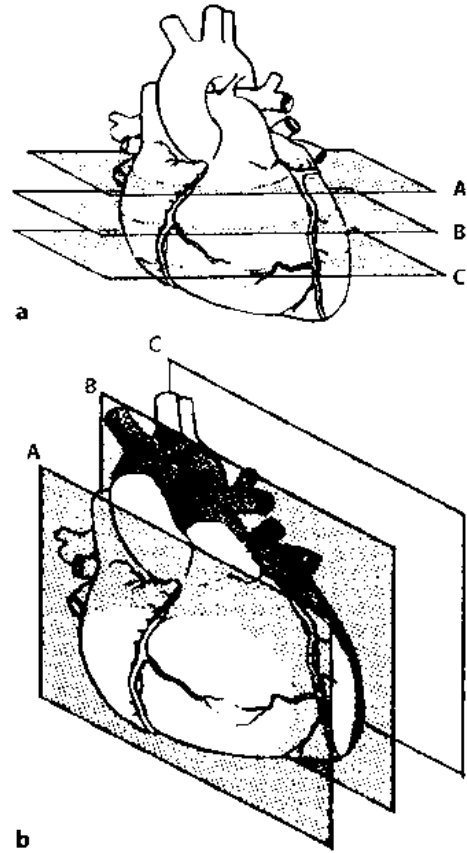
■ Kontraindikationen

■ Absolute Kontraindikationen

- Akutes Koronarsyndrom
- Instabile Angina pectoris
- Symptomatische Herzrhythmusstörungen
- Dekompensierte Herzinsuffizienz
- Akute Lungenembolie, Myokarditis, Perikarditis, Aortendissektion

■ Relative Kontraindikationen

- Hauptstammstenose
- Klappenerkrankungen
- Elektrolytstörungen
- Arterielle Hypertonie ($RR_{\text{syst}} > 200$ mmHg, $RR_{\text{diast}} > 110$ mmHg)

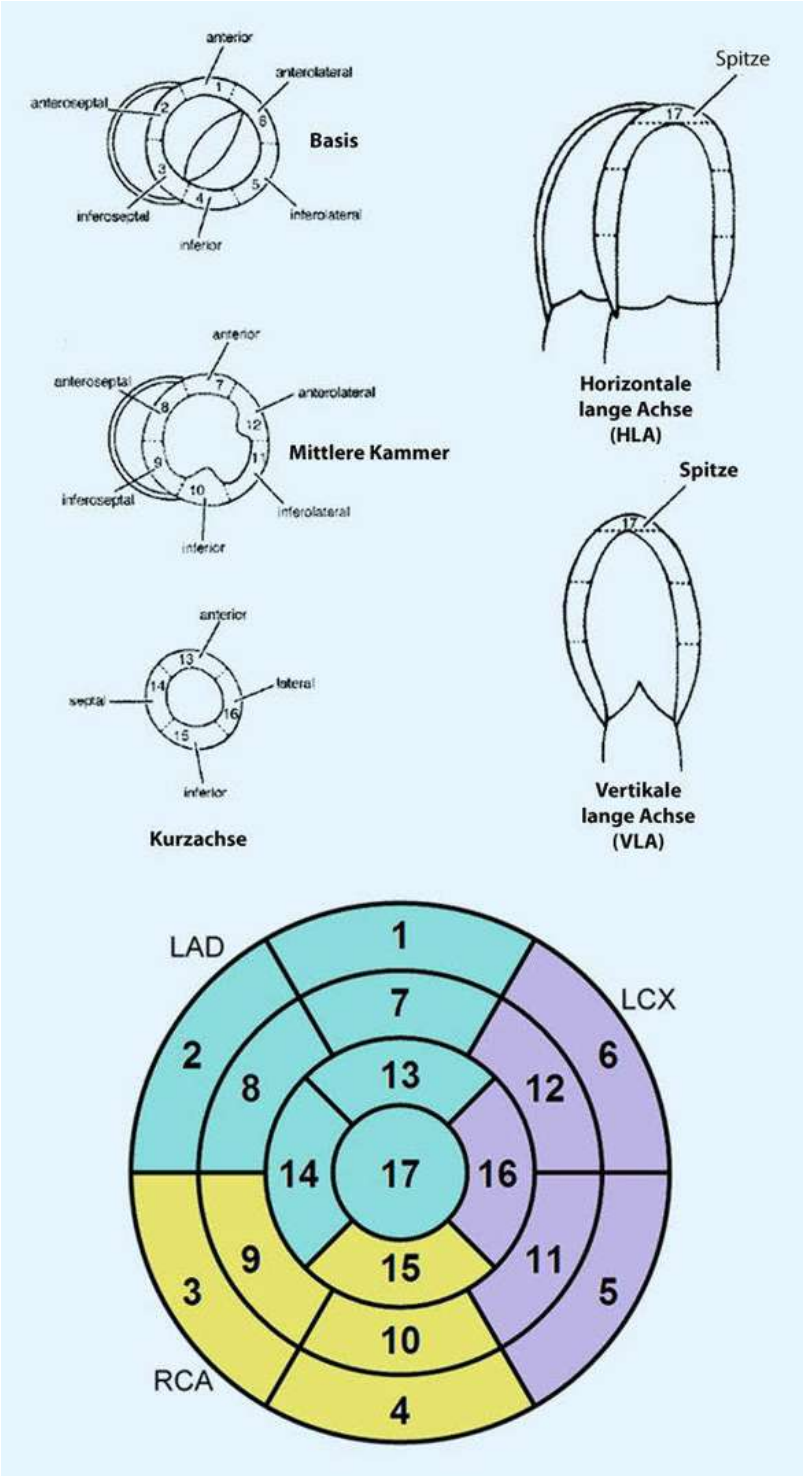


■ Abb. 14.5a,b Horizontale (a) und vertikale (b) Längsschneise

- Tachyarrhythmie, Bradyarrhythmie
- Abflussbahnobstruktion, z. B. bei hypertropher Kardiomyopathie
- Höhergradiger AV-Block
- Linksschenkelblock (nach Möglichkeit immer pharmakologische Belastung)
- Physische und/oder psychische Beeinträchtigungen
- Ventrikulärer Schrittmacherrhythmus

Pharmakologische Belastung

Adenosin: 140 µg/kg/min i. v. über Perfusor über (4–) 6 min, Injektion des Radiopharmakons nach (3–) 5 min; Adenosin noch mindestens 1 min danach weiter laufen lassen. Ggf. mit leichter ergometrischer Belastung kombinieren.



■ Abb. 14.6a,b Polartomogramm

■ **Tab. 14.10** Graduierung der Perfusionsstörung, modifiziert n. Leitlinie

Perfusion			
Score	Beschreibung	Aufnahme in % vom Maximum	Standardabweichung v. Normalkollektiv
0	Normal	≥ 70 %	< 1,5
1	Gering vermindert	50–69	1,51–2,1
2	Mäßig vermindert	30–49	2,11–4,0
3	Deutlich vermindert	10–29	4,1–7
4	Fehlend	< 10	> 7

■ Kontraindikationen

■ ■ Absolute Kontraindikationen

- Akutes Koronarsyndrom
- Mittel- bis hochgradige Ventilationsstörung
- Asthma bronchiale
- Theophyllinpflchtige COPD
- AV-Block II und III ohne Schrittmacher
- Sick-Sinus ohne Schrittmacher
- Niedriger Blutdruck ($RR_{syst} < 90$ mmHg)

■ ■ Relative Kontraindikationen

- Bradykardie (Frequenz < 40/min)
- Leichte COPD
- Frischer Hirninfarkt oder frische Minderdurchblutung

Regadenoson (Rapiscan®): Injektion von 5 ml Rapiscan (= 0,4 mg Regadenoson) über 10 s, nachfolgend 5 ml NaCl, nach 10–20 s Injektion des Radiopharmakons. Ggf. mit leichter Belastung kombinieren.

Dobutamin: Infusion über einen Perfusor in 3-Minuten-Intervallen. Beginn mit $5 \mu\text{g/kg/min}$, Steigerung auf 10, 20, 30, $40 \mu\text{g/kg/min}$ bis zum Erreichen der Zielherzfrequenz. Wird diese nicht erreicht, wird Atropin gegeben ($4 \times 0,25$ mg bis max. 1 mg i.v.). Injektion 2 Minuten vor Ende der Infusion, Abbruchkriterien s. Ergometrie.

Polartomogramme

In den Polartomogrammen werden die Kurzachsenschnitte des gesamten linksventrikulären Myokards auf einen Kreis abgebildet. Dieser Kreis wird in 17 (–20) Segmente unterteilt (■ [Abb. 14.6](#)).

Danach folgt eine semiquantitative Auswertung der einzelnen Segmente sowohl für die Belastungsuntersuchung als auch für die Ruheuntersuchung (■ [Tab. 14.10](#)).

Das Normalkollektiv sollte nach Möglichkeit selber erstellt werden.

Es werden der Summed Stress Score (SSS) und der Summed Rest Score (SRS) angegeben. Hieraus lässt sich die Differenz berechnen, der **Summed Difference Score (SDS)**.

Insbesondere anhand der SSS ist eine individuelle Risikobewertung für den jeweiligen Patienten möglich. Je höher der SSS ist, desto höher ist das Risiko für ein kardiales Ereignis.

14.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

■ [Tab. 14.11](#) zeigt den Einsatz der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.

14.5 Therapeutische Möglichkeiten

C. Vockelmann

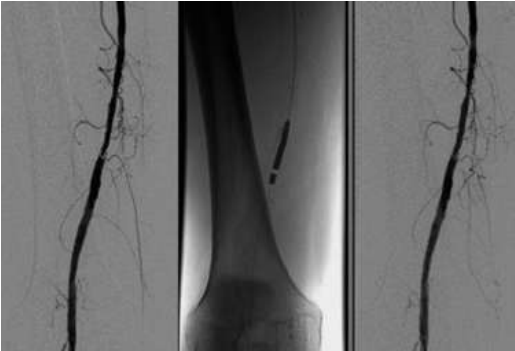
14.5.1 Angiographie

Mit der Angiographie steht ein ausgezeichnetes Verfahren zur Therapie von Gefäßerkrankungen zur Verfügung. Dabei geht es zumeist um gefäßerweiternde Interventionen. Bei Aneurysmata

■ Tab. 14.11 Wertigkeit der therapeutischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	Durchleuchtung/ Angiographie	CT	MRT	Nuk	PET
TVT	P	N	W	N	N	N	N
Lungenembolie	N	N	N	P	N	W	N
pAVK	P	N	W	W	W	N	N
KHK	N	N	P	P*	W	W	N

N = Nicht indiziert; P = Primärdiagnostik; W = Weiterführende Diagnostik
P* Das Cardio-CT kann als primäres Verfahren bei bestimmten Risikokonstellationen zum Ausschluss einer KHK eingesetzt werden. Ein weiteres Einsatzgebiet liegt im Rahmen der sog. Triple-Rule-Out-Diagnostik: Diese kommt bei Patienten zum Einsatz, die mit sehr starken akuten thorakalen Schmerzen in die Klinik kommen, bei denen der aufnehmende Arzt nicht unterscheiden kann, ob eine Aortendissektion, eine fulminante Lungenembolie oder ein Herzinfarkt vorliegt.



■ Abb. 14.7 Hochgradige Stenose der AFS distal, PTA mit einem 5 × 40 mm PTA-Ballon mit gutem postinterventionellem Ergebnis

oder Gefäßverletzungen werden aber auch gefäßverschließende Maßnahmen ergriffen. Auch zur Tumorbehandlung werden gefäßverschließende Interventionen durchgeführt. Diese werden im ► Abschn. 18.3 näher erläutert.

Sicherlich am häufigsten wird die Angiographie zur Behandlung der peripheren arteriellen Verschlusskrankheit, kurz pAVK, eingesetzt. Die Vorbereitungen entsprechen denen der diagnostischen Angiographie. Je nach Lage der Stenose wird die Punktion eher in antegrader Technik erfolgen. Dies bedeutet, dass der Radiologe die Punktion auf der zu behandelnden Seite durchführt und den Katheter in Richtung des Fußes in das Gefäß schiebt. Je nach Befund wird dann mit einem Draht die Stenose oder auch ein Gefäßverschluss sondiert. Nachdem

durch eine Kontrastmittelgabe sichergestellt ist, dass der Katheter hinter dem Verschluss wieder im Gefäßlumen liegt, erfolgt eine Ballondilatation oder eine Stentimplantation (■ Abb. 14.7). Neben diesen Standardverfahren gibt es auch neuere Methoden wie eine Atherektomie. Hierbei handelt es sich um einen Katheter, der den Plaque von innen aus dem Gefäß herausschält und auffängt, damit das Material zusammen mit dem Katheter entfernt werden kann.

Kurz zu der Frage zurück: Wie viel mehr Strahlenbelastung war der Patient nun ausgesetzt? Die rote Linie entspricht einer Fläche von 1100 cm², die gelbe Linie umfasst eine Fläche von etwa 1500 cm². Für die Aufnahme wurde also etwa **ein Drittel mehr Dosis** (!) verwendet, als bei perfekter Einblendung notwendig gewesen wäre. Und so schlecht sieht die Aufnahme eigentlich gar nicht aus ...

14.6 Fallbeispiele

C. Vockelmann

Beispiel 1

Frau Terbrüggen ist eine ältere Dame, die gerne in der Stadt an den Schaufenstern entlangschlendert. Ihrer Enkelin fällt jedoch auf, dass die Oma inzwischen jedes Schaufenster betrachtet, auch wenn es ein Elektrogeschäft ist. Auf Nachfrage berichtet die Oma ihrer Enkelin, dass ihr immer noch ein paar Metern Gehstrecke die Waden schmerzen.

1. Welche Verdachtsdiagnose stellen Sie?
2. Welche Untersuchungen sollten durchgeführt werden?
3. Gibt es bildgebende Therapieverfahren?

Beispiel 2

Herr Funke ist etwas übergewichtig, hat einen Diabetes und einen hohen Blutdruck. Der Hausarzt hat im Belastungs-EKG Veränderungen festgestellt. Die bereits beim niedergelassenen Kardiologen ambulant durchgeführte Koronarangiographie hat mittelgradige Stenosen in der rechten Koronararterie ergeben. Bevor Herr Funke in das Krankenhaus zur Behandlung der Stenosen eingewiesen wird, möchte der Kardiologe gerne noch wissen, ob die Verengungen der rechten Koronararterie so ausgeprägt sind, dass eine Mangel-durchblutung im Myokard entsteht.

❓ Mit welchen Verfahren kann die Mangel-durchblutung nachgewiesen werden?

✓ Beispiel 1

Frau Terbrüggen leidet unter einer pAVK (periphere arterielle Verschlusskrankheit), der sog. Schaufensterkrankheit. Basisuntersuchung ist neben der klinischen Untersuchung mit Palpation der Pulse an den Beinen und Füßen eine Ultraschalluntersuchung mit einer Dopplersonographie. Im Anschluss sollte zur Therapieplanung eine MR- oder CT-Angiographie durchgeführt werden.

Wenn die Untersuchungen kurzstreckige Verschlüsse oder höhergradige Stenosen im Becken oder im Oberschenkel zeigen, können diese interventionell-angiographisch therapiert und aufgedilatiert oder gestentet werden.

✓ Beispiel 2

Eine belastungsabhängige Minderperfusion im Myokard wird meistens mit einer Myokardszintigraphie unter Belastung sichtbar. Seit einigen Jahren kann auch die MRT als Kardio-MRT mit Perfusionsbildgebung unter medikamentöser Belastung die Mangel-durchblutung nachweisen. Beide Verfahren sind auch in der Lage, myokardiale Narben nach bereits abgelaufenen Herzinfarkten zu zeigen.

Literatur

- AWMF online: www.awmf.de
- Arbeitsanweisungen Nuklearmedizin: AG-MTM, www.nuklearmedizin.de
- Bengel F et al (2012) Myokard-Perfusions-Szintigraphie. DGN-Handlungsempfehlung (S1-Leitlinie) Stand 04/2012, AWMF-Registernummer: 031-006. www.nuklearmedizin.de
- Bundesärztekammer, <http://www.bundesaerztekammer.de/page.asp?his=1.120.121.1042.5974>
- Cerqueira MD et al. (2002) Standardized Myocardial Segmentation and Nomenclature for Tomographic Imaging of the Heart: A Statement for Healthcare Professionals From the Cardiac Imaging Committee of the Council on Clinical Cardiology of the American Heart Association. *Circulation*. 2002; 105:539-542)
- Bundesamt für Strahlenschutz (2012) Diagnostische Referenzwerte für nuklearmedizinische Untersuchungen. www.bfs.de
- EANM Dosage Card: www.eanm.org
- Hermann HJ (2004) Nuklearmedizin, 5. Aufl. Urban & Fischer, München
- Kuwert T et al (2007) Nuklearmedizin, 4. Aufl. Thieme, www.thieme.de
- Leitlinien zur Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik – Qualitätskriterien röntgendiagnostischer Untersuchungen; Bundesärztekammer, Stand 23.11.2007
- Weber W. Einführung Nuklearmedizin Vorlesung, Radiologische Universitätsklinik Freiburg, Abteilung Nuklearmedizin, radblockSS09_1.pdf
- Zilles K, Tillmann BN (2010) Anatomie. Springer Medizinverlag, Berlin, Heidelberg, New York

Diagnostik und Therapie – Neurologie

U. Blum, D. Dohr, M. Kahl-Scholz, C. Marks, C. Vockelmann

15.1 Allgemeines – 442

15.1.1 Topographische Anatomie – 442

15.1.2 Funktion – 442

15.2 Radiologische Diagnostik – 442

15.2.1 Sonographie – 442

15.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik – 442

15.2.3 Durchleuchtung/Angiographie – 443

15.2.4 Computertomographie – 443

15.2.5 Kernspintomographie – 445

15.3 Nuklearmedizinische Diagnostik – 446

15.3.1 Gehirn – 446

15.3.2 Liquorraum – 451

15.4 Wertigkeit – 451

15.5 Therapeutische Möglichkeiten – 451

15.5.1 Radiologische Therapie – 451

15.5.2 Strahlentherapie bei Hirntumoren und -metastasen – 452

15.6 Fallbeispiele – 458

Literatur – 459

15.1 Allgemeines

M. Kahl-Scholz

15.1.1 Topographische Anatomie

Zu den anatomischen Strukturen des neurologischen Systems zählt das Gehirn mit seinen unterschiedlichen Anteilen, das Rückenmark sowie die Hirnnerven (Zentrales Nervensystem, ZNS) und die peripheren Ganglien und Nerven (Peripheres Nervensystem, PNS).

In der Bildgebung spielt vor allem die Darstellung des ZNS eine Rolle, daher wird sich hier auf die kurze Darstellung von Gehirn (Encephalon) und Rückenmark (Medulla spinalis) beschränkt.

Das Großhirn (Telencephalon) bildet den größten Teil des Gehirns und zeichnet sich strukturell durch die beiden Hälften (auch Hemisphären genannt), mehrere Furchen (Sulci) und Windungen (Gyri) aus. Weitere Anteile sind das Diencephalon (Zwischenhirn) mit dem Thalamus, Subthalamus, Hypothalamus, Hypophyse und Epiphyse sowie das Mittelhirn (Mesencephalum), Kleinhirn (Cerebellum), die Brücke (Pons) und das verlängerte Mark (Medulla oblongata), das in das Rückenmark übergeht. Die Grenze zwischen beiden letztgenannten Strukturen liegt etwa auf Höhe des Foramen magnum.

Das Gehirn wird durch zahlreiche Blutgefäße versorgt. Die vier Hauptarterien sind dabei die linke und rechte A. carotis interna sowie rechte und linke A. vertebralis. Die A. vertebralis bilden die A. basilaris, die wiederum im Schädelinneren den Circulus arteriosus cerebri speist (häufige Lokalisation von Aneurysmen etc.).

Gehirn und Rückenmark werden durch den sog. Liquor umspült, der durch den Plexus choroideus gebildet wird

Das Rückenmark ist ca. 45 cm lang und reicht bis zum 1./2.LWK. Es wird in die graue und weiße Substanz unterteilt, die unterschiedliche Nervenfasern führen. Vom Rückenmark gehen die Spinalnerven ab, die für die nervale Versorgung des Halses, Rumpfes und der Arme und Beine zuständig sind.

15.1.2 Funktion

Das Gehirn steuert alle wichtigen Funktionen, von der Motorik über die Sinnesempfindungen bis hin zu lebenswichtigen Prozessen wie Atmung, Herzschlag, Verdauung. Es ist ein kompliziertes System aus Neurotransmittern und -rezeptoren. Das Rückenmark stellt dabei sozusagen die Verbindung zwischen der zentralen Schaltstation „Gehirn“ und den anderen Körperanteilen wie Hals, Rumpf und Extremitäten dar.

15.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

15.2.1 Sonographie

In der neurologischen Diagnostik spielt die Sonographie bei Erwachsenen nur im Rahmen der Gefäßdiagnostik (► Kap. 14) eine Rolle. Das Gehirn ist von der Schädelkalotte abgeschirmt und entzieht sich einer sonographischen Untersuchung. Im Rahmen der Neonatalmedizin jedoch ist eine Sonographie des Neurocraniums durch die offenen Fontanellen, so nennt man die noch nicht geschlossenen größeren Lücken zwischen den Schädelknochen, sehr gut möglich. Hierdurch ist bei den kleinen Patienten eine nebenwirkungsfreie Untersuchung des Gehirns ohne wesentliche Vorbereitungen möglich.

15.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

In der Diagnostik von Neurocranium, Myelon und peripheren Nerven spielt die konventionelle Diagnostik keine Rolle. Im Rahmen der Umgebungsuntersuchung z. B. zum Nachweis einer Spinalkanalstenose, von degenerativen Wirbelsäulenveränderungen oder auch zur Tumorsuche hat die konventionelle Röntgendiagnostik ihren Stellenwert in der Abklärung neurologischer Krankheitsbilder.

■ **Tab. 15.1** Diagnostische Angiographie A. carotis

Patientenvorbereitung	Aufklärung, Patienten entkleiden und ein Patientenhemd anziehen lassen; Leiste (Puls tastbar?) zur Punktion rasiert
Positionierung	Rückenlage, steril abgedeckt, Punktionsstelle desinfiziert nach Hausstandard
Material	5000 IE Heparin i. A. Schleuse, Schleusenspülung, Diagnostik-Katheter (z. B. vertebralis), Diagnostik-Draht (z. B. Terumo-J-Draht[R])
Kontrastmittel	Pro Serie 6 ml iodhaltiges Kontrastmittel, Fluss: 8 ml/sec
Einstellungen	Ap und RAO/LAO (im allgemeinen ipsilateral)
Aufnahmekriterien	Karotisbifurkation vollständig aufgedreht und frei einsehbar

■ **Tab. 15.2** Untersuchungsprotokoll CT-Schädel

Patientenvorbereitung	Metall wie z. B. Hörgeräte, Schmuck etc. ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage in der Schädelschale, Kinn zur Brust nehmen lassen
Scanbereich	Schädelbasis bis Schädelkalotte
Röhrenspannung/-strom	120 kV, zumeist feste mAS geräteabhängig
Kontrastmittel	Nativ
Reformationen	–

15.2.3 Durchleuchtung/Angiographie

Auch diese beiden Modalitäten dienen nicht der Untersuchung des Nervensystems selbst, sondern der Auswirkungen von neurologischen Erkrankungen oder zur Ursachenforschung. So führt z. B. ein Hirnstamminfarkt oft zu Schluckstörungen, die dann mit einer Hochfrequenzkinematographie („Schluckstudie“) näher klassifiziert werden, um eine adäquate Therapie einleiten zu können. Eine Myelographie dient zur Beurteilung einer Spinalkanalstenose und neuroforaminalen Engen.

Angiographisch werden die arteriellen und venösen Gefäße von Hirn und Rückenmark untersucht (■ [Tab. 15.1](#)). Hierbei werden z. B. Gefäßmalformationen untersucht, die zu intrazerebralen Blutungen führen können. Gleichzeitig ist hier oft eine minimalinvasive Therapie möglich, die an hochspezialisierten Zentren durchgeführt werden können.

15.2.4 Computertomographie

Die Computertomographie ist insbesondere bei einer akuten Klinik die bildgebende Untersuchungs-



■ **Abb. 15.1** CT-Schädel bei 53-jährigen Patienten mit multipler Sklerose

methode der ersten Wahl. Der große Vorteil im Vergleich zum MRT ist die Schnelligkeit und hohe Verfügbarkeit der Untersuchung. Zudem sind akut erkrankte Patienten häufig unruhig, sodass eine MRT-Untersuchung nicht gut durchführbar ist.

Mit Abstand die häufigste CT-Untersuchung ist in aller Regel die native Computertomographie des Kopfes (■ [Tab. 15.2](#), ■ [Abb. 15.1](#)). Hierbei geht es um die Beurteilung des Neurocraniums. Die Untersuchung wird mit gekippter Gantry erstellt; die Schichten entlang der Schädelbasis anguliert. Hintergrund hierfür ist, dass die Augenlinsen nicht im Strahlengang liegen sollen. Die Augenlinsen sind sehr strahlensensibel, und um eine vorzeitige Kataraktbildung zu verhindern, sollten Sie immer genau darauf achten, Ihre Untersuchung gut zu planen. Neuere Geräte können auch mit gekippter Gantry

■ Tab. 15.3 Untersuchungsprotokoll CT-Lysepatient

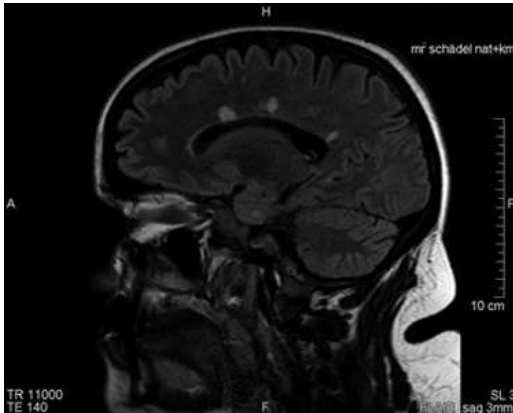
Patientenvorbereitung	Röntgendichte Fremdkörper an Hals und Kopf entfernen
Positionierung	Rückenlage, Kopf in die Kopfschale
Scanbereich	Teil 1: natives Schädel-CT (■ Tab. 15.2) Teil 2: Perfusions-CT → Schicht auf Höhe der Basalganglien Teil 3: CT-Angiographie supraaortal (Trachealbifurkation bis Schädelkalotte)
Röhrenspannung/-strom	Teil 1: 120 kV, feste mAs Teil 2: 80 kV, feste mAs (low-dose) Teil 3: 80–120 kV, Dosismodulation
Kontrastmittel	Teil 1: nativ Teil 2: 40–50 ml Kontrastmittel, 50 ml NaCl; Fluss: 5 ml/sec Teil 3: 60–80 ml Kontrastmittel, 50 ml NaCl; Fluss: 4–5 ml/sec
Reformationen	Teil 1: – Teil 2: Nachberechnung mit Perfusionsauswertung Teil 3: axiale 3 mm, coronar 3 mm MIP, sagittal 3 mm MIP

ein Spiral-CT anfertigen mit der Möglichkeit der multiplanaren Reformationen. Viele Geräte, die Sie in Ihrer Ausbildung und Ihrem Berufsleben bedienen werden, können das jedoch nicht. Daher werden hierfür noch sequentielle CT-Untersuchungen angefertigt.

Da das Neurocranium von der Schädelkalotte so gut geschützt ist, ist leider auch immer eine erhebliche Dosis notwendig, um das Gehirn ausreichend beurteilen zu können. Diese Tatsache erkennen Sie auch an den Dosisreferenzwerten: hier liegen die Referenzwerte vom Kopf und dem gesamten Abdomen nicht weit auseinander.

Der Schlaganfall, also die Durchblutungsstörung des Gehirns, ist ähnlich wie der Herzinfarkt eine Erkrankung, bei der Zeit eine erhebliche Rolle spielt. Die Symptome eines Schlaganfalls sind z. B. die Schwäche einer Körperseite oder auch nur des Armes, Sprachstörungen und Verwirrung. Häufig tritt zusätzlich ein hängender Mundwinkel auf der gleichen Seite des Körpers auf. Auch Sensibilitätsstörungen der gleichen Körperseite oder eine Sehstörung gehören zu diesem Krankheitsbild. Ähnlich wie beim Herzinfarkt kann man den Patienten helfen, wenn Sie früh genug in die Klinik kommen. Noch wichtiger ist allerdings, dass dann auch in der Klinik die Abläufe optimal sind. Dazu gehört vor allem eine umfassende CT-Diagnostik der Erkrankung, die maximal 45 Minuten dauern

sollte. Je schneller Sie allerdings mit der Untersuchung sind, desto wahrscheinlicher kann dem Patienten umfassend geholfen werden. Eine Therapie, die zumeist eine Lysetherapie, also eine starke Verdünnung des Blutes beinhaltet, kann zwar bis zu 4,5 Stunden nach Symptombeginn eingeleitet werden. Je eher die Therapie allerdings beginnt, umso mehr Nervenzellen können noch gerettet werden. Ein angekündigter „Lysekandidat“ sollte also dazu führen, dass Sie das CT freihalten und alles für die Untersuchung vorbereiten (■ Tab. 15.3). Zur Untersuchung gehören neben einer nativen CT des Schädels zum Ausschluss einer Blutung als Ursache für die Beschwerden eine CT-Angiographie der supraaortalen Gefäße mit intrakranieller Gefäßdiagnostik und oft auch eine CT-Perfusion. Die CT-Perfusion ist eine dynamische Untersuchung, bei der auf der gleichen Schicht (heute oft auch größere Anteile des Gehirns) über 1 Minute immer wieder Bilder aufgenommen werden, während Kontrastmittel durch den Körper fließt. Aus diesen Bildern kann man berechnen, wie stark die Durchblutung des Gehirns eingeschränkt ist. Mit den Ergebnissen der Untersuchung kann insbesondere in kritischen Fällen wie bei besonders alten Patienten besser entschieden werden, ob eine aggressive Therapie des Schlaganfalls sinnvoll ist oder nur unnötig risikoreich, ohne dass noch Gehirngewebe gerettet werden kann.



■ Abb. 15.2 MRT Schädel

15.2.5 Kernspintomographie

Für alle weiterführenden Abklärungen und auch die meisten planbaren Untersuchungen im neurologischen Bereich stellt die Kernspintomographie mit ihrem übertragenden Weichteilkontrast die Untersuchungsmethode der Wahl dar (■ Abb. 15.2). Dabei ist jedoch immer wichtig, welche Klinik (also welche Symptome) der Patient aufweist. Es gibt zwar einige Sequenzen, die Sie nahezu bei jeder Kernspintomographie des Schädels anfertigen. Einige jedoch werden Sie nur messen, wenn der zuweisende Arzt eine entsprechende Frage formuliert. Ein Beispiel ist die Abklärung einer Ischämie (■ Tab. 15.4).

Eine häufige Indikation insbesondere bei jüngeren Patienten für eine MRT ist der Verdacht auf eine chronisch-entzündliche ZNS-Erkrankung, eine Multiple Sklerose (MS) oder auch Encephalomyelitis disseminata (ED), ■ Tab. 15.5. Diese ist durch Entmarkungsherde in der weißen Substanz gekennzeichnet. Bei ausgeprägten Erkrankungen sind die Veränderungen als hahnenkammartiges Muster in der sagittalen Flair entlang des Balkens zu erkennen. Die Erkrankung kann auch das Myelon betreffen. Hier sind die Veränderungen überwiegend in axialen Bildern dorsolateral lokalisiert. Findet man Veränderungen in der Nativ-Untersuchung, stellt sich immer die Frage, ob es sich um aktiv-entzündliche Veränderungen handelt. Hierzu werden T1-gewichtete Sequenzen in aller Regel in 2 Ebenen nach Kontrastmittelgabe angefertigt.

■ Tab. 15.4 Untersuchungsprotokoll MRT Ischämie

Patientenvorbereitung	Sämtliches Metall, Scheckkarten, Schmuck etc. ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage
Spule	Kopfspule
Scanbereich	Gesamtes Neurocranium
Sequenzen	Axiale T2 Flair, axiale T1w, sagittale T2w, axiale Diffusionswichtung mit ADC-MAP, axiale T2*
Kontrastmittel	-

■ Tab. 15.5 Untersuchungsprotokoll Wirbelsäule bei MS/ED

Patientenvorbereitung	Sämtliches Metall, Scheckkarten, Schmuck etc. ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage, evtl. Knie unterpolstern
Spule	Wirbelsulenspule und Halsspule
Scanbereich	HWS, BWS und obere LWS mit Conus caudae
Kontrastmittel	Bei pathologischem Befund
Sequenzen	Sagittale T1w, sagittale T2w, axiale T2w, axiale T1w; Nach Kontrastmittelgabe: sagittale und axiale T1w

- **Kortison schließt innerhalb von 48 Stunden die Blut-Hirn-Schranke, durch die das Kontrastmittel treten muss. Eine Kontrastmittelgabe später als 48 Stunden nach Beginn einer Kortisontherapie macht daher keinen Sinn.**
- **Sollten Sie im Myelon eine Syrinx, also eine flssigkeitsisointense, zumeist längliche Läsion nachweisen können, muss in aller Regel bei der Erstdiagnose eine Kontrastmittelgabe erfolgen, um einen hierfür ursächlichen Tumor wie ein Ependymom auszuschließen.**

15.3 Nuklearmedizinische Diagnostik

U. Blum

15.3.1 Gehirn

Durchblutung, regionaler zerebraler Blutfluss (rCBF)

Der regionale zerebrale Blutfluss (rCBF, [Tab. 15.6](#)) kann mittels verschiedener Tracer dargestellt werden. Die Fragestellungen reichen von Fokusdarstellungen bei der Epilepsie über psychiatrische Erkrankungen, einer Aussage über die Perfusionsreserve des Gehirns bei vorangegangenen TIAs bis hin zur Hirntoddiagnostik.

Bei verschiedenen Fragestellungen sind verschiedene Hirnareale von besonderem Interesse, z. B. die Suche nach einem Fokus bei epileptischen Anfällen oder die Identifizierung des Sprach- oder Sehzentrums vor einer geplanten Operation.

Es stehen ^{99m}Tc -ECD (Ethylcysteinat-Dimer) und ^{99m}Tc -HMPAO (Hexamethylpropylen-aminooxim) zur Verfügung. Beide Substanzen sind fast gleichwertig.

Bei Fragen nach überlebendem Hirngewebe nach einem Hirninfarkt wird ECD eingesetzt, da es sich in den noch durchbluteten, jedoch abgestorbenen Gehirnzellen nicht anreichert. Eine weitere Domäne des ECD ist die Entzündungsdiagnostik. Zudem ist der Kontrast zwischen grauer und weißer Hirnsubstanz insbesondere im Temporallappen besser als bei HMPAO.

Andere Möglichkeiten der Bestimmung und Darstellung des rCBF liegen in der PET ([Tab. 15.7](#)).

Hierbei können ^{15}O markiertes Wasser (H_2^{15}O) oder ^{15}O -Butanol eingesetzt werden. Diese Produkte haben jedoch mit 2 Min eine sehr kurze Halbwertszeit, sodass ein Zyklotron in unmittelbarer Nähe verfügbar sein muss.

Da die rCBF mit dem regionalen Zuckerstoffwechsel verbunden ist, kann auch ^{18}F -FDG eingesetzt werden.

Normalbefunde sind abhängig vom Alter des Patienten. Normalerweise ist die Anreicherung in der grauen Substanz 2–3mal höher als in der weißen Substanz.

In der **Epilepsiediagnostik** wird das Radiopharmakon im Anfall gespritzt (unter EEG-Monitoring, nach Möglichkeit innerhalb von 10 s), die Aufnahme erfolgt dann in der Phase nach dem Anfall. Der Fokus zeigt sich im Anfall kräftiger als das umgebende Hirngewebe (hyperperfundiert), im anfallsfreien Intervall normalerweise abgeschwächt (hypoperfundiert).

Bei einer **Minderdurchblutung** des Gehirns im Rahmen einer TIA (transitorische ischämische Attacke) oder einer PRIND (prolongiert reversibles ischämisches neurologisches Defizit) zeigt sich üblicherweise kein auffälliger Befund in der Schnittbild-diagnostik. In der Perfusionsuntersuchung lässt sich bereits eine Minderung der Hirndurchblutung in dem betreffenden Hirnabschnitt nachweisen.

Wenn der Verdacht auf eine **Gefäßverengung** im Gehirn besteht, kann die Untersuchung unter zusätzlicher Applikation von Diamox (1000 mg über 5 min i. v.) erfolgen. Hierbei zeigt sich die sog. Perfusionsreserve des Gehirns. Durch das Diamox werden die Arteriolen weit gestellt, die Perfusion steigt daher im gesunden Zustand der Gefäße deutlich an. Wenn eine Gefäßverengung vorliegt, sind die Gefäße bereits maximal erweitert, sodass es in diesen Regionen nicht zu einer erhöhten Perfusion kommen kann. Die Untersuchung sollte frühestens 24 h nach einer Basisszintigraphie erfolgen.

Demenzerkrankungen sind durch Minderdurchblutungen in unterschiedlichen Regionen des Gehirns gekennzeichnet.

Demenzformen, Lokalisierungen im Cerebrum

Alzheimer Demenz:	Bitemporal und/oder biparietal
Lewy-Körperchen-Demenz:	Ähnlich Alzheimer, zusätzlich visueller Kortex
Fronto-temporale Demenz:	Frontotemporal
Vaskuläre Demenz:	Mehrere umschriebene Defekte

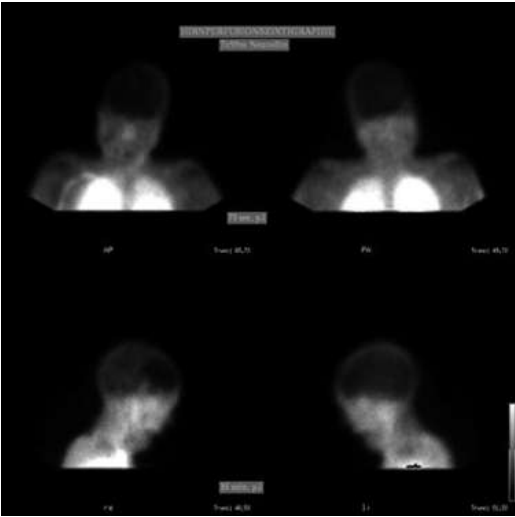
In der **Hirntoddiagnostik** ([Abb. 15.3](#)) wird der Patient direkt auf der Kamera gelagert und ge-

■ Tab. 15.6 rCBF-Untersuchung SPECT

Patientenvorbereitung	Anamnese. Blasenentleerung. Venenverweilkatheter legen und fixieren. Patient 30 min in einem abgedunkelten, ruhigen Raum ruhen lassen (ggf. Diamox nach 15 min). Injektion des Radiopharmakon über den Verweilkatheter. Patient erneut 15 min ruhen lassen. Sedierung (falls notwendig) erst nach der Injektion des Radiopharmakons
Aktivität	550 MBq ^{99m}Tc -ECD oder -HMPAO, min. 110 MBq
Applikation	Nach Ruhephase i. v.
Akquisition	Aufnahmebeginn 40 min p. i. (bis maximal 3,5 h p. i.) Rückenlage, Kopf fixiert SPECT (A. e. 3-Kopf-Kamera) LEHR (-FAN), Kollimator möglichst eng einstellen 128 * 128 Matrix, Projektionen je nach Kamerasystem Gesamtzählrate > 5 Millionen cts
Auswertung	SPECT-Rekonstruktion als gefilterte Rückprojektion Darstellung der Bilder Ggf. 3D-Quantifizierung, ROI-Analysen
Strahlenbelastung	ECD: 0,011 mSv/MBq → 6 mSv HMPAO: 0,0093 mSv/MBq → 5 mSv Bei Kindern ist die Strahlenbelastung/MBq höher: ECD 0,023 mSv/MBq, HMPAO 0,026 mSv/MBq

■ Tab. 15.7 rCBF-Untersuchung PET

Patientenvorbereitung	Nüchtern Anamnese, wichtig: nach Diabetes fragen Venenverweilkatheter legen und fixieren Patient vor der Injektion ruhen lassen (Dunkler, ruhiger Raum) Blutzucker messen (< 120 mg/dl) Injektion des Radiopharmakon über den Verweilkatheter Patient ruhen lassen (länger als bei ECD/HMPAO)
Aktivität	300–600 MBq ^{18}F -FDG Kinder 5–10 MBq/kg; min. 10 MBq
Applikation	In der Ruhephase i. v.
Akquisition	Aufnahmebeginn 30–60 min p. i. Rückenlage, Kopf fixiert Schwächungskorrektur
Auswertung	Gefilterte Rekonstruktion Darstellung der Bilder Ggf. ROI-Quantifizierung
Strahlenbelastung	Erwachsene: 0,027 mSv/MBq Kinder: 0,073 mSv/MBq



■ Abb. 15.3 Hirntoddiagnostik. (© Vockelmann)

spritzt. Es folgen die Erstellung einer dynamischen Sequenz, zudem statische Aufnahmen des Schädels, des Thorax (einschl. Schilddrüse und Magen) und ggf. einer SPECT.

Bei diesen Patienten ist die Blut-Hirn-Schranke funktionslos. Es zeigt sich überhaupt keine Anreicherung im Gehirn.

Die Markierung muss auf ihre Qualität geprüft werden. Diese Kontrolle sollte nach den Vorgaben des Kit-Herstellers erfolgen (z. B. Dünnschichtchromatographie).

Die Aufnahmen des Thorax dürfen keine größeren Anreicherungen in der Schilddrüse oder dem Magen zeigen. Auch diese Aufnahmen dienen als Qualitätskontrolle, sind jedoch als alleinige Qualitätskontrolle nicht ausreichend.

Neurodegenerative Erkrankungen

■ Rezeptorzintigraphie

Die Rezeptorzintigraphie wird in der Diagnostik des Parkinson-Syndroms eingesetzt. Insbesondere in frühen Erkrankungsstadien ist eine klinische Unterscheidung zu anderen Erkrankungen unter Umständen schwierig. Mittels der Rezeptorzintigraphie kann der idiopathische M. Parkinson (PD) von den atypischen Parkinson-Syndromen wie Multisystematrophie (MSA), progressive supranukleäre Blickparese (PSP) und cortikobasale Degeneration (CBD) unterschieden werden. Diese Unterschei-

■ Tab. 15.8 Dopamin-D₂-Rezeptordarstellung

Patientenvorbereitung	Anamnese Medikamente ggf. absetzen 1 g Perchlorat mind. 30 min vor der Untersuchung Blase entleeren vor der Untersuchung
Aktivität	185 MBq ¹²³ I-IBZM
Applikation	i. v.
Akquisition	2 h p. i. Ggf. Sedierung Rückenlage, Kopf fixiert SPECT (ggf. 3-Kopf-Kamera) LEHR (-FAN) oder ¹²³ I-dedizierter Kollimator 128 * 128 Matrix > 3 Millionen cts
Auswertung	SPECT-Rekonstruktion Schwächungskorrektur ROI (Striatum und frontaler Kortex)
Strahlenbelastung	Erwachsene: 0,034 mSv/MBq Kinder: 0,11 mSv/MBq

■ Tab. 15.9 Striatale Dopamin-Wiederaufnahme (DAT-Scan)

Patientenvorbereitung	Anamnese Medikamente ggf. absetzen 1 g Perchlorat mind. 30 min vor der Untersuchung Blase entleeren vor der Untersuchung
Aktivität	150-250 MBq ¹²³ I-FP-CIT
Applikation	i. v.
Akquisition	3-6 h p. i. Ggf. Sedierung Rückenlage, Kopf fixiert SPECT (ggf. 3-Kopf-Kamera) LEHR (-FAN) oder ¹²³ I-dedizierter Kollimator 128 * 128 Matrix > 3 Millionen cts
Auswertung	SPECT-Rekonstruktion Schwächungskorrektur ROI (Striatum und okzipitaler Kortex)
Strahlenbelastung	Erwachsene: 0,034 mSv/MBq Kinder: 0,11 mSv/MBq

■ **Tab. 15.10** Typische Befunde und Unterscheidungsmöglichkeiten. (Modifiziert nach Differenzialdiagnostik des neurodeg. Parkinson-Syndroms)

Erkrankung	FP-CIT	IBZM	rCBF
PD	Reduziert im Putamen und geringer im Ncl. caudatus, asymmetrisch	Normal, im Frühstadium z.T. erhöht	Erhöht im Putamen, Motor-kortex, Pons und Zerebellum Reduziert temporo-parieto-okzipital
MSA	Deutlich reduziert, symmetrisch	Reduziert	Reduziert im Striatum, Pons und Zerebellum, im Spätstadium kortikal
PSP	Deutlich reduziert im Putamen und Ncl. Caudatus, symmetrisch	Meistens reduziert	Reduziert im prämotorischen und präfrontalen Kortex, mesiofrontal Mittelhirn, Thalamus und Ncl. Caudatus
CBD	Deutlich reduziert im Putamen und Ncl. caudatus, asymmetrisch	Meistens reduziert (kontralateral zur Klinik)	Reduziert hoch frontoparietal, Motorkortex und Striatum, asymmetrisch
Essentieller Tremor, medikamentöser Parkinson	Normal	Normal	Normal
Vaskuläres Parkinson-Syndrom	Meistens normal, z.T. diffus reduziert (abhängig von der vaskulären Läsion)	Meistens normal, z.T. reduziert (abhängig von der vaskulären Läsion)	Uneinheitlich, z.T. diffus, z.T. fokale minderperfusion

PD = M. Parkinson; MSA = Multisystematrophie; PSB = progressive supranukleare Blickparese; CBD = cortikobasale Degeneration (CBD)

dung ist wichtig für die Behandlung der Erkrankung und der Prognose des Patienten.

Es kommen SPECT-Tracer zur Anwendung ^{123}I -Benzamid (IBZM) und ^{123}I -Ioflupan (FP-CIT), die in Deutschland kommerziell erhältlich sind (■ Tab. 15.8–15.10). Eine weitere Entscheidungsmöglichkeit liegt in der Bestimmung des rCBF mittels ^{18}F -FDG-PET, die eine genaue Trennung der Erkrankungen in einer Untersuchung leisten kann (Hellwig, Meyer).

PET-Tracer sind ^{18}F -DOPA und ^{18}F -Fallyprid.

Die Tracer unterscheiden sich in der Bindungsstelle am Rezeptorsystem.

Hirntumore

Hirneigene Tumore (Gliome) zeichnen sich durch eine Erhöhung der Aminosäuretransporter aus. Diese lassen sich mit radioaktiv markierten Aminosäuren darstellen (■ Tab. 15.11).

Es werden derzeit drei Tracer verwendet, ^{11}C -Methionin (MET), 3- ^{123}I -Iod- α -Methyl-L-Tyro-

sin (IMT) und ^{18}F -Ethyltyrosin (FET). Alle Tracer sind bisher in Deutschland nicht zugelassen.

Indikationen sind u. a. die Biopsieplanung, die Bestimmung der genauen Tumorausdehnung, ein Therapiemonitoring und die Rezidivdiagnostik (Unterscheidung Nekrose/Tumor).

Eine Aussage zum Malignitätsgrad ist nicht möglich. Die Unterscheidung zwischen Tumor und nicht bösartigen Veränderungen bzw. einer Radionekrose gelingt durch die Erstellung von Quotienten. Hierbei ist die Aufnahme im Tumorgewebe deutlich höher als in den anderen Geweben (je nach Tracer ca. 1,5- bis 2,2-fach erhöht), im Rahmen der Therapiekontrolle sollte der Quotient um > 10 % fallen.

■ Meningeome

Aufgrund der Somatostatinrezeptoren, die in vielen Meningeomen nachweisbar sind, lassen sich diese Veränderungen mit einer Somatostatinrezeptorzintigraphie (^{111}In -Oxin) nachweisen. Hier steht ins-

■ Tab. 15.11 Hirntumordiagnostik PET

Patientenvorbereitung	Nüchtern (mindestens 4 h) Bei IMT 1 g Perchlorat 30 min vor der Injektion Blase entleeren vor der Untersuchung
Aktivität	MET: 740 MBq (550-950 MBq) IMT: 185 MBq (100-550 MBq) FET: 200 MBq (185-400 MBq)
Applikation	i.v.
Akquisition	Bequeme Rückenlage Kopf ruhig halten, ggf. Lagerungshilfen IMT: – SPECT ab 15 min p. i., Dauer 30-45 min – LEHR, LEUHR – 128 * 128 Matrix – > 3 Millionen cts. MET-PET, FET-PET: – MET ab 15 min p. i., FET ab 20 min p. i. – Statisch 20 min FET-PET: – Dynamische Aufnahme möglich 0-50 min p. i. – z. B. 4-6 * 5 min
Besonderheiten	Schwächungskorrektur IMT: Chang oder SPECT-CT MET, FET: Transmission oder PET-CT, PET-MRT
Auswertung	SPECT: Gefilterte Rückprojektion oder iterative Rekonstruktion, Dicke = 1 Pixel, Low-Pass-Filter anwenden (z. B. Butterworth-Filter) PET: iterative Rekonstruktion, 3-D-Rekonstruktion mit 5-8 mm Schnitten transaxial, koronar und sagittal Quotientenauswertung Tumor/Hirn
Strahlenbelastung	IMT: 0,0073 mSv/MBq MET: 0,0052 mSv/MBq FET: 0,0165 mSv/MBq

■ Tab. 15.12 Liquorraumszintigraphie

Patientenvorbereitung	Keine
Aktivität	40 MBq ¹¹¹ In-DTPA
Applikation	Intrathekal, streng steril
Akquisition	Rückenlage Kopf fixiert Statisch: 4 h, 24 h und 48 h p. i. Ganzkörper: 4 h, 24 h und 48 h p. i. SPECT: 4 h, 24 h und 48 h p. i. MEGP 128 * 128 Matrix
Auswertung	Darstellung der Bilder ggf. Berechnung des Quotienten Tamponade/Blut
Strahlenbelastung	0,8 mSv

■ **Tab. 15.13** Wertigkeit der therapeutischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	Durchleuchtung/ Angiographie	CT	MRT	Nuk	PET
Akuter Schlaganfall	N	N	W	P	W	N	N
Demenzabklärung	N	N	N	P	W	W	N
Hirntoddiagnostik	P	N	W	N*	W	P	N

N = Nicht indiziert; P = Primärdiagnostik; W = Weiterführende Diagnostik

N* Natürlich wird jeder Patient, bei dem der Hirntod festgestellt wird, eine Computertomographie des Schädels erhalten. Mit dieser kann jedoch nicht der Hirntod diagnostiziert werden.

besondere die Differentialdiagnose zu einem Akustikusneurinom im Vordergrund.

15.3.2 Liquorraum

Die Liquorraumszintigraphie erlaubt Aussagen über die Verteilung, die Zirkulation, ggf. vorliegende Leckagen oder Fisteln. Zudem ist auch eine Aussage über die Funktion von vorhandenen Shuntsystemen möglich.

Die Liquorraumszintigraphie (■ Tab. 15.12) erfolgt nach steriler Punktion des Liquorraumes, üblicherweise der Lumbalregion. Nur sehr selten wird die Punktion subokzipital durchgeführt. Der Patient sollte nach der Punktion Bettruhe einhalten.

Wenn eine Leckage vermutet wird, ist eine Tamponade des Nasenraumes notwendig. Die Tamponaden müssen vor dem Einbringen in die Nase, sowie nach der Entfernung gewogen werden. Nach 24 h wird die Tamponade entfernt oder gewechselt, hierbei ist die Seitenangabe sehr wichtig. Die Tamponaden werden im Bohrloch gemessen. Zudem ist jeweils eine Blutabnahme zwingend erforderlich, da der Tracer auch ohne eine Fistel zu einem Teil in die Tamponaden gelangt. Nun erfolgt die Berechnung des Quotienten Tamponadenaktivität/Blutaktivität. Wenn dieser Quotient > 2 beträgt, liegt eine Fistel vor.

15.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

■ **Tab. 15.13** zeigt den Einsatz der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.

15.5 Therapeutische Möglichkeiten

15.5.1 Radiologische Therapie

C. Vockelmann

Angiographische Interventionen

Akute Gefäßverschlüsse der A. cerebri media können seit wenigen Jahren mithilfe interventioneller angiographischer Verfahren wieder eröffnet werden. Hierzu wird eine lange Schleuse oder ein Führungskatheter bis in die A. carotis communis der betroffenen Seite vorgeführt. Über diesen wird dann ein sog. Stentretreiver in das verschlossene Gefäß geführt. Der Stentretreiver ist im Prinzip ein Stent, der wieder zurückgezogen werden kann. Dieser wird im Verschluss freigesetzt. Hierdurch ist zunächst sehr rasch der Blutfluss in das Gehirn wieder hergestellt. Dann wird der Stent mit dem Thrombusmaterial, das sich idealerweise dann in den Maschen des Stents festgesetzt hat, aus dem Gefäß entfernt und in die Schleuse zurückgezogen. Eingesetzt wird diese Verfahren vor allem bei längeren Verschlüssen oder auch Verschlüssen der distalen A. carotis interna. Bei diesen längeren Verschlüssen hat eine intravenöse Lysetherapie eine deutlich geringere Erfolgsquote, sodass mit der an-

giographischen Rekanalisation des verschlossenen Gefäßes ein besseres Ergebnis für den Patienten erreicht werden kann.

15.5.2 Strahlentherapie bei Hirntumoren und -metastasen

D. Dohr, C. Marks

Allgemeine Prinzipien

■ Ursachen und Symptome

Leider sind die Ursachen eines Hirntumors nicht geklärt. Auch besteht wohl kein Zusammenhang zwischen dem Gebrauch von Mobiltelefonen und dem Auftreten von Gliomen. Die typischen Beschwerden, die zur Entdeckung eines Hirntumors führen, ergeben sich aus seinem verdrängenden Wachstum mit Kompression der gesunden Strukturen:

- Kopfschmerzen
- Epileptische Anfälle
- Nervenausfälle: Lähmungen, Aphasien (Sprachstörungen), Sehstörungen, Gleichgewichtstörungen, Gehöreinschränkung, Gefühlslosigkeit
- Persönlichkeitsveränderungen (z. B. Apathie)
- Hormondysregulation, v. a. beim Hypophysenadenom, z. B. Impotenz oder Akromegalie (Vergrößerung der Körperendglieder)
- Im späten Stadium Hirndruckzeichen: Erbrechen, Somnolenz, Koma

Therapiestrategie

Falls ein symptomatischer Tumor operativ behandelbar ist, erfolgt i. d. R. die neurochirurgische Entfernung und bei Restbefund die Bestrahlung mit oder ohne Chemotherapie. Die Ausnahme stellen manche Hirntumoren bei Kindern dar, die nur biopsiert werden, da sie erfolgreich und schonender konservativ therapierbar sind. Das Ziel ist immer die lokale Tumorkontrolle bei bestmöglicher Schonung benachbarter Risikostrukturen sowie der Erhalt oder die Verbesserung der neurologischen Funktionen.

RT-Technik

- Konformal
- IMRT, VMAT

- Stereotaxie
- Protonen, Schwerionen (Helium, Kohlenstoff)

Bei einigen Hirntumoren hat sich die Stereotaxie (z. B. bei 1–3 Hirnmetastasen) oder die Protonentherapie (z. B. bei den Chordomen, Chondrosarkomen) als überlegen gezeigt. Der Trend geht heutzutage dahin, dass man diese neuen Technologien verstärkt für die Bestrahlung am Kopf nutzt. Langzeitergebnisse sind abzuwarten.

RT-Vorbereitung

Gerade bei der Bestrahlung des Gehirns muss **höchste Präzision** walten. Radiosensible Strukturen liegen nur millimeterweit entfernt vom PTV, und Gewebeschäden haben Einschränkungen zur Folge, die sich in großem Maß auf die Lebensqualität des Patienten (z. B. Visus- bzw. Sehschärfenverlust, Gesichtsmuskellähmung) auswirken. Die Lagerung erfolgt mit Bestrahlungsmaske und evtl. Beißblock. Das Planungs-CT wird in dünnen Schichten (z. B. 2 mm) angefertigt. Ein Matching mit diagnostischen Aufnahmen (MRT, PET-CT) ist unabdingbar.

RT-Ausführung

Die Kontrolle der korrekten Feldeinstellung wird mittels IGRT vorgenommen. Als Leitstrukturen dienen hauptsächlich die Schädelknochen.

Nebenwirkungen

- **Die Bestrahlung von gesunden Hirnbestandteilen kann deren Funktion einschränken.**

Die Nebenwirkungen können unter Umständen nicht einer konkreten Hirnstruktur zugeordnet werden, z. B. Appetit- oder Schlafstörungen. Bei anderen Beeinträchtigungen weiß man heutzutage bereits relativ genau den Ort der Schädigung und die verantwortliche Dosis. Gelegentlich ist allerdings nicht klar, ob es sich bei einer Veränderung um eine radiogene Nebenwirkung handelt, oder ob das Dauer-Begleitödem bzw. die komprimierende Wirkung des Tumors dafür verantwortlich ist.

- Erhält der N. opticus bei einer Stereotaxie > 15 Gy, tritt eine Sehkraftbeeinträchtigung in bis zu 38 % auf. Bei einer Dosis zwischen 9 und

14 Gy beträgt das Risiko 7%. Bei Bestrahlung des Tractus opticus (Sehbahn) ist noch unklar, inwieweit Volumeneffekte eine Rolle spielen (je länger das betroffene Segment, desto ausgeprägter der Effekt).

- Bei Bestrahlung eines Akustikusneurinom (Vestibularis-Schwannoms) kann das Hörvermögen leiden. Ein eingeschränkter N. trigeminus kann die Gesichtssensibilität und den Lidschlussreflex herabsetzen. Ein gelähmter N. facialis kann eine Gesichtsasymmetrie und Probleme beim Augenschluss (Lagophthalmus) hervorrufen.
- Eine Hypophysenvorderlappeninsuffizienz (Hypopituitarismus) ist für Hormonausfälle (z. B. Zyklusstörungen, Schilddrüsenunterfunktion, Minderwuchs) verantwortlich.
- Der Hippocampus (ähnelt der Form nach dem Meeresungeheuer Hippokamp aus der griechischen Mythologie) ist wichtig für das Kurz- und Langzeitgedächtnis, die räumliche Orientierung, für Lernen, Aufmerksamkeit, Handlungsfunktion und Emotionen. Der Minderung dieser Hirnleistungen macht sich als „neurokognitiver Funktionsverlust“ bemerkbar und wird in der Maximalausprägung als Demenz bezeichnet. Verschiedene Tests (z. B. Mini-Mental-Status-Test, MMS, Wechsler Adult Intelligence Scale WAIS) sind zuverlässige Hilfsmittel für die Einschätzung. Es versteht sich von selbst, dass ein Verlust in der Neurokognition für die Lebensqualität sehr einschneidend ist. Deshalb wird neuerdings versucht, nicht nur bei Teilhirnbestrahlung, sondern auch in der Ganzhirnbestrahlung die Region des Hippocampus zu schonen
- Das Risiko nach Hirnbestrahlung einen Zweit-Tumor auszubilden, beträgt 1,2–1,4%

Komplikationen

Um Radionekrosen zu vermeiden, hält man gewisse absolute Dosen und Dosis-Volumen-Grenzen bei der Einzeldosis ein (z. B. maximal 10 Gy auf 10 ml Hirngewebe). Fatal wäre ein Gewebeschaden/-untergang insbesondere am Hirnstamm, dem ältesten und tieflegendsten Teil des menschlichen Gehirns, der verantwortlich ist für die lebenswichtigen Aufgaben Atmung und Regulation des Herzschlags.

Hirntumore bei Erwachsenen

Einteilung nach Histologie und Lokalisation mit Häufigkeitsangabe

Tumore des Hirnparenchyms

- Gliom 33,6%
- Ependymom 2,1%
- Medulloblastom 1,5%
- Hämangioblastom 0,8%
- ZNS Lymphom 2,8%

Tumore ausgehend von gehirnumgebenden und anhängenden Strukturen

- Meningeom 32,1%
- Hypophysenadenom 8,4%
- Kraniopharyngeom 0,7%
- Neurinom (Vestibularis) 4%
- Chordom/Dermoid 0,1%

Gliome

Glioblastom

Das Glioblastom ist der häufigste bösartige hirneigene Tumor, ausgehend vom Stützgewebe (Glia, weiße Substanz) und am häufigsten im Großhirn lokalisiert. Im Median ist der Patient bei Diagnose 64 Jahre alt. Der Tumor kann de novo (völlig neu, primär) entstehen oder sich aus einem Astrozytom (sekundär) entwickeln.

Er rezidiert innerhalb von Monaten, die mittlere Überlebenszeit beträgt 1–2 Jahre. Die Prognose verbessert sich, wenn der Patient jünger als 50 Jahre und in gutem Allgemeinzustand ist, und sich die neurologischen Ausfälle nach OP zurückgebildet haben. In der WHO Klassifikation ist dem Glioblastom der Differenzierungsgrad IV zugeordnet.

■ Therapie

- Sofortige Entlastung des Hirndrucks mit Dexamethason
- Möglichst vollständige operative Tumorentfernung
- Definitive Radiotherapie des Tumors bei Inoperabilität sowie immer postoperative Radiotherapie des Tumorbetts. Dosis jeweils 60 Gy (5×2 Gy/Woche) oder 40,05 Gy ($5 \times 2,67$ Gy/Woche)

- Chemotherapie mit Temozolomid, v. a. Patienten mit verändertem DNA-Reparaturenzym MGMT profitieren davon

Astrozytom

Das Astrozytom tritt im mittleren Lebensalter mit ca. 35 Jahren auf. Es stammt von den Astrozyten ab, die zum Stützgewebe (Glia) gehören und ist meist im Großhirn lokalisiert. Man teilt es nach Aggressivität/Krankheitsverlauf in 3 Gruppen, WHO Grad I–III. Der Tumor kann sich „entdifferenzieren“, d. h. ein Grad I verwandelt sich im Lauf der Zeit zu einem bösartigerem Tumor mit Grad II, III oder sogar IV (= Glioblastom). Das 5-Jahres-Überleben liegt bei 65 %, das 10-Jahres-Überleben bei 40 %.

■ Therapie

- Bei Symptomarmut nur Beobachtung, andernfalls Operation
- Definitive Radiotherapie des Tumors bei Inoperabilität oder postoperative RT des Tumors ab WHO Grad II. Dosis jeweils 54–60 Gy ($5 \times 1,8$ – $2,0$ Gy/Woche)
- Chemotherapie mit Temozolomid wird empfohlen, der definitive Wirkungsnachweis steht aus.

Oligodendrogliom

Der Tumor geht von den Oligodendrozyten aus, einem Zelltyp der Glia, und findet sich v. a. im Großhirn. Der Differenzierungsgrad nach WHO liegt bei II und III mit höherer Tendenz zur malignen Entartung als beim Astrozytom. Betroffen sind Erwachsene zwischen 35 und 50 Jahren. Das 5-Jahres-Überleben beträgt 38–83 % für WHO II- und 23–66 % für WHO III-Tumore.

■ Therapie

- Operative Tumorentfernung
- Definitive Radiotherapie des Tumors bei Inoperabilität oder postoperative RT des Tumors bei WHO III, Dosis jeweils 54–60 Gy ($5 \times 1,8$ – $2,0$ Gy/Woche)
- Chemotherapie mit Temozolomid

Schädelbasismeningeome

Meningeome sind benigne Tumore der Hirnhäute, am häufigsten an der Schädelbasis vorkommend. Nur in 15 % handelt es sich um atypische oder anaplastische Meningeome, die strahlentherapeutisch eine höhere Dosis von 60–70 Gy im CTV benötigen (s. a. EORTC-Studie 22042-26042). Klinisch verursachen sie häufig Hirnnervenausfälle durch Einwachsen in den Sinus cavernosus und den Canalis N. opticus. Wegen ihrer engen Nachbarschaft zu Risiko-Organen (Hirnstamm, Chiasma, Hirnnerven) sind sie oft inoperabel. Die Behandlung besteht dann in einer alleinigen Bestrahlung, sobald der Tumor Beschwerden verursacht. Aber auch die Radiotherapie ist nicht ohne Risiko, wenn gleich auf die Schonung der kritischen Strukturen mit Einhaltung der Toleranzdosis bzw. auf einen ausreichenden Sicherheitsabstand höchster Wert gelegt wird.

■ Therapie

- Operation
- Definitive Radiotherapie des Meningeoms bei Inoperabilität oder postoperative Radiotherapie des Restbefundes bei inkompletter Tumorentfernung. Das 5-Jahres-progressionsfreie Überleben beträgt nach subtotaler Operation 40–61 % und mit anschließender Radiotherapie 68–95 %.
- Mit der Bestrahlung kann bald postoperativ begonnen werden oder erst, wenn sich das Rezidiv abzeichnet (Salvage-RT). Die Ergebnisse scheinen gleichwertig zu sein.
- Bei konventioneller RT erhält das PTV eine Dosis von 52–63 Gy ($1,8$ – 2 Gy/Woche)
- In der Stereotaxie verabreicht man eine Dosis von 10–25 Gy in einer Sitzung oder bei kritischer Situation in 2–5 Fraktionen (nahe gelegene Risiko-Organen, hohes Tumolvolumen).
- Die Protonen/Schwerionenbehandlung wird mit 52–64 CGE in Normofraktionierung (ca. 5×2 CGE/Woche), seltener in Hypofraktionierung durchgeführt.

Akustikusneurinome (Vestibularisschwannome)

Das Akustikusneurinom ist ein gutartiger Tumor des Hör- und Gleichgewichtsnerv (N. vestibulo-

cochlearis), der im inneren Gehörgang gelegen ist. Je nach Tumorgöße kann bei der Therapie das Gehör zu 40–85 % erhalten werden, ebenso die Funktion der benachbarten Nerven, dem N. facialis, zuständig für Gesichtssymmetrie, Augenschluss (Lagophthalmus) und dem N. trigeminus zuständig für Gesichtssensibilität, Lidschlussreflex (Kornealreflex). Falls die komplette operative Tumorentfernung nicht möglich ist, kann die Radiotherapie eingesetzt werden mit dem Ziel, wenigstens die Progression zu verhindern (z. B. für den Hörerhalt) oder den Tumor zu verkleinern, damit sich die Symptome zurückbilden (Tinnitus, Schwindel, Gleichgewichtsstörung). Allerdings sind die möglichen Nebenwirkungen aller Therapien den Tumorsymptomen ähnlich: Hörverschlechterung oder -verlust, Schädigung des N. vestibularis mit Schwindel, des N. facialis und N. trigeminus (s. o.). Die lokale Kontrolle für Operation und Radiotherapie liegt bei > 90 %.

■ Therapie

- 1. Wahl: Operation
- 2. Option: Beobachten, vor allem bei kleinem Tumor, älteren Patienten und langsamem Wachstum zu favorisieren
- 3. Option Radiotherapie des Tumors: Die Gesamtdosis in konventioneller Technik liegt um 54 Gy (1,8–2 Gy/Woche). Bei kleinem Tumor gibt man stereotaktisch 12–15 Gy.

Hypophysenadenom

30 % der Hypophysenadenome sind nicht hormonproduzierend. Sie fallen durch Sehunschärfe, Doppelbilder oder Gesichtsfeldausfälle auf, ausgelöst durch den Druck auf die Sehnerven. Hormonstörungen entwickeln sich erst bei längerer Kompression der Hypophyse, die dann in ihrer Funktion beeinträchtigt ist.

70 % der Hypophysenadenome produzieren dagegen selbst Hormone: Prolaktin in 30 %, Wachstumshormon STH in 10–20 %, Adrenokortikotropin ACTH in 10 %. Dies führt zu mannigfaltigen endokrinologischen Störungen wie z. B. Galaktorrhoe (krankhaftem Milchfluss), Akromegalie (Vergrößerung von Körperteilen wie Fingern, Augenwulsten oder der Nase), Cushing-Syndrom (Überproduktion von Cortisol).

■ Therapie

- Operation transssphenoidal durch die Nase
- Das 10-Jahres-progressionsfreie Überleben bei inkompletter Operation beträgt 22 %, mit anschließender Radiotherapie dagegen 95 %
- Definitive Radiotherapie des Adenoms bei Inoperabilität oder postoperative Radiotherapie des Restbefundes bei unvollständiger Tumorentfernung
- Mit der Bestrahlung kann bald postoperativ begonnen werden oder erst, wenn sich das Rezidiv abzeichnet (Salvage-RT). Die Radiotherapie ist hochwirksam bei hormonaktiven Hypophysenadenomen, die Wirkung tritt aber erst nach Jahren ein.
- Die konventionelle Radiotherapie erfolgt mit einer Dosis von 45–50 Gy ($5 \times 1,8$ – $2,0$ Gy/Woche).
- Die Partikeltherapie bei hormonaktivem Hypophysenadenom wird in Berkeley mit Helium Ionen durchgeführt, mit einer Dosis zwischen 30–150 Gy in 4 Fraktionen, in Harvard mit Protonen, mit einer Dosis von 120–140 Gy. Der Hormonhaushalt normalisierte sich in 50–80 % innerhalb von 5 Jahren, es wurden aber auch bis 50 % endokrinologische Ausfälle beobachtet.
- Die Stereotaxie mit 1x oder 3 – 5×5 Gy bei Prolactinom und ACTH produzierenden Adenomen ergab eine Normalisierung des Hormonhaushalts in 10–83 % und bei STH produzierenden Adenomen eine Normalisierung des Hormonhaushalts in 10–50 %.
- Die Radiotherapie erzielt eine gute Tumorkontrolle, die endokrinen Funktionen und der Visus bleiben i. d. R. erhalten, die tumorbedingte Sehbeeinträchtigung bildet sich häufig wieder zurück. Nichtsdestotrotz muss bei der Planung dem N. opticus, dem Chiasma opticum und der Hypophyse als Risiko-Organen höchste Beachtung geschenkt werden, um eine radiogene Langzeit-Schädigung zu vermeiden.

Chordome, Chondrosarkome der Schädelbasis

Chordome stammen aus den Resten der Chorda dorsalis (Embryonalgewebe) und sind hauptsächlich an der Schädelbasis und dem Steißbein lokalisiert.

siert. Chondrosarkome sind bösartige Knochentumore und können an der Schädelbasis vorkommen. Insgesamt machen sie 0,2 % der Hirntumore und 6 % der Schädelbasistumore aus. Sie sind i. d. R. nicht sinnvoll operierbar, die Bestrahlung des Tumors stellt die wichtigste Therapieform dar. Dabei hat sich die Partikel-Radiotherapie gegenüber den Photonen als deutlich überlegen erwiesen.

■ Therapie

- Konventionelle RT: 48–66,6 Gy, 5-Jahres-lokale Tumorkontrolle 8–50 %
- Stereotaxie: 1×14 –16 Gy, 5-Jahres-lokale Tumorkontrolle 32–80 %
- Protonen, Schwerionen (Helium, Kohlenstoff): 60 CGE–83 CGE, 5-Jahres-lokale Tumorkontrolle 63–100 %

Kraniopharyngeome

Das Kraniopharyngeom (lat. Cranium, der Schädel und Pharynx, der Rachen) ist ein gutartiger Tumor, entstanden aus Resten von embryonalem Gewebe und lokalisiert im Bereich der Hypophyse (Hirnanhangsdrüse). Die Nähe zur Hypophyse und zum Hypothalamus bedingt Hormonausfallerscheinungen. Eine Beeinträchtigung des N. opticus kann zur Visusminderung/Blindheit führen. Der Druck auf das Mittelhirn verursacht möglicherweise eine Dysregulation des Schlafs und der Körpertemperatur oder eine psychische Veränderung mit Konzentrations- oder Merkfähigkeitsstörungen. Kraniopharyngeome treten bei Kindern mit Altersgipfel zwischen 5–10 Jahren und bei Erwachsenen mit Altersgipfel zwischen 40–60 Jahren auf.

■ Therapie

- Operation transsphenoidal durch die Nase. Auf vollständige Tumorentfernung wird verzichtet, wenn abzusehen ist, dass dadurch die Komplikationsrate, z. B. dauerhafter Diabetes insipidus (vermehrte Harnausscheidung und starkes Durstgefühl) und Persönlichkeitsstörungen deutlich ansteigt.
- Definitive Radiotherapie des Tumors bei Inoperabilität oder bei Resttumor postoperative RT des Restbefundes, 54 Gy ($5 \times 1,8$ Gy). Mit der Bestrahlung kann sofort postoperativ begonnen werden oder erst, wenn sich das

Rezidiv abzeichnet (Salvage-RT). Operation und Bestrahlung erzielen eine 10-Jahres-Heilungsrate von 70–83 %.

- Stereotaxie und Partikeltherapie, Langzeit-Ergebnisse sind abzuwarten.
- Bei vielen Patienten ist eine lebenslange Hormonsubstitution nötig.

Hirntumore im Kindesalter

ZNS-Tumore machen einen Anteil von 17,1 % der kindlichen Tumore aus. Am häufigsten sind das Medulloblastom und das niedriggradige Gliom (Astrozytom des Kleinhirns), gefolgt vom Ependymom und Keimzelltumor (Germinom).

Die malignen Erkrankungen im Kindesalter werden häufig nur innerhalb von Studien behandelt. Protokolle zur Behandlung von kindlichen Hirntumoren (z. B. HIT 2000, HIT-Rez, HIT-GBM u. ä.) werden von der Gesellschaft für Pädiatrische Onkologie und Hämatologie (GPOH) erarbeitet. Die einzelnen Therapiebausteine bestehen aus Operation, Chemo- und Radiotherapie.

Allerdings verzichtet man auf die Bestrahlung bei Kindern unter 3 Jahren, da die frühe neurologische Entwicklung in diesem Zeitraum noch nicht abgeschlossen ist und eine hohe Gefahr für Intelligenzdefekte besteht.

Große Erfahrungen bestehen mit der Photonen-therapie, neuerdings werden ebenfalls die Stereotaxie und die Partikeltherapie, z. B. für das niedriggradige Gliom eingesetzt.

Zielvolumenkonzepte in der Radiotherapie

Das Zielvolumen für die Bestrahlung wird abhängig vom Ausbreitungsverhalten der jeweiligen Tumorart gewählt.

Liquorraum

Der Liquor umspült das Gehirn und das Rückenmark. Untersuchungen beim Medulloblastom haben gezeigt, dass zum Zeitpunkt der Diagnose zu 25–40 % Tumorzellen im Liquor schwimmen, ebenso besteht bei Keimzelltumoren ein höheres Risiko. In diesen Fällen wird deswegen der gesamte Liquorraum bestrahlt, also neben dem Ganzhirn auch der Spinalkanal, die zusammen als „Neuroachse“ bezeichnet werden.

Ganzhirn

Bei Leukämien wird aufgrund der diffusen Zellverteilung das gesamte Gehirn bestrahlt.

Tumorregion

Die lokale Bestrahlung der erweiterten Tumorregion ist ausreichend beim Kraniopharyngeom, Ependymom und niedriggradigem Gliom ohne Liquoranschluss. Sie erfolgt zusätzlich als Dosiserhöhung nach Bestrahlung der Neuroachse, z. B. beim Medulloblastom und Keimzelltumor mit Liquoraussaat.

Hirnmetastasen

Hirnmetastasen sind 10 x so häufig wie primäre Hirntumore. Die mediane Überlebenszeit beträgt ohne Therapie ca. 1 Monat, mit Dexamethason-Behandlung 1–2 Monate und nach Ganzhirn-Bestrahlung 3–6 Monate. Mit den neueren, individuellen Therapieansätzen hat sich das Überleben jedoch deutlich verbessert. Die häufigsten Primärtumore bei Hirnmetastasen sind das **Bronchialkarzinom** (50 %), das **Mammakarzinom** (20 %) und das **Melanom** (10 %). Gute Prognosefaktoren sind ein stabiler Allgemeinzustand, junges Alter und keine oder wenig Tumoraktivität außerhalb des Gehirns. Außerdem wirken sich die Art des Primärtumors (das Kolonkarzinom ist günstiger als das Bronchialkarzinom), die Anzahl, Größe und Lokalisation der Hirnmetastasen sowie das Intervall zwischen Erstdiagnose und Hirnmetastasierung auf den Krankheitsverlauf aus.

Das Therapieziel ist die lokale Tumorkontrolle mit Erhalt/Verbesserung der neurologischen Funktion und die positive Beeinflussung des Gesamtüberlebens.

Therapie bei multiplen Hirnmetastasen

Bei multiplen Hirnmetastasen wird das gesamte Gehirn bestrahlt (engl. WBRT, whole brain radiotherapy), neuerdings mit Hippocampus-Schonung.

Die üblichen Fraktionierungen mit 10×3 Gy, 5×4 Gy oder 20×2 Gy sind vergleichbar hinsichtlich Überleben, lokaler Kontrolle und Akut-Toxizität. Das kürzere Schema 5×4 Gy wird eher bei ungünstigen Prognosefaktoren eingesetzt (reduzierter AZ, multiple Metastasen, seitens der Gesamtsituation Lebenserwartung von wenigen Monaten), da

zwar bei einer Einzeldosis > 3 Gy die Spät-Toxizität etwas höher liegt, aber es in diesem Fall keine Auswirkungen mehr hätte.

Therapie bei 1–3 Hirnmetastasen

Je weniger Hirnmetastasen vorliegen, desto günstiger ist die Prognose. Bei 1–3 zerebralen Absiedlungen wird deshalb eine intensive Therapie mit dem Ziel einer lang anhaltenden Palliation vorgenommen.

Therapie

- Operation, Ganzhirnbestrahlung (zunehmend mit Hippocampus-Aussparung) und stereotaktische Therapie der einzelnen Metastasen werden individuell entweder solo oder in Kombination eingesetzt.
- Bis 3 cm große, oberflächliche Metastasen können chirurgisch entfernt werden. Aber nur die komplette Resektion aller Metastasen verbessert das Überleben.
- Die Stereotaxie ist günstig für tiefer gelegene, bis 3 cm große Metastasen, die mit hohen Einzeldosis, z. B. 1×15 – 24 Gy bestrahlt werden. Bei größeren Metastasen oder Metastasen in Hirnstammnähe steigt das Komplikationsrisiko.

Vergleichende Studien

- Stereotaxie vs. Operation: Es ergibt sich kein Unterschied im Überleben, die lokale Kontrolle ist bei Stereotaxie höher.
- Stereotaxie vs. WBRT: Die Stereotaxie erzielt eine höhere lokale Kontrolle und ein längeres Überleben, da wohl die höhere Dosis im makroskopischen Tumoreal mehr bösartige Zellen vernichtet.
- Bei WBRT + Stereotaxie vs. WBRT und auch bei WBRT + Stereotaxie vs. Stereotaxie ist zwar die Kombination bezüglich intrazerebraler Metastasen-Kontrolle überlegen, jedoch sind die neurokognitiven Defizite höher.
- Mit einer Operation, gefolgt von einer Ganzhirnbestrahlung, bilden sich die neurologischen Defizite häufiger zurück, die lokale Tumorkontrolle und das Überleben sind besser im Vergleich zur alleinigen WBRT.
- Weitere Varianten sind: Operation + WBRT oder OP + WBRT + Boost oder WBRT + Stereotaxie oder WBRT + SIB (simultan integriertem Boost)

15.6 Fallbeispiele

C. Vockelmann

Beispiel 1

Herr Simon ist ein eigentlich kerngesunder Mann Mitte 50. Dann passiert es plötzlich: Bei der Arbeit fällt ihm der Stift aus der rechten Hand. Außerdem spricht er ganz komisch. Die Kollegen alarmieren sofort den Notarzt.

1. Welche Verdachtsdiagnose wird der Notarzt stellen?
2. Was sollte der Notarzt veranlassen?
3. Wie sollte der Ablauf im Krankenhaus sein?
4. Gibt es bildgebende Therapieverfahren?

Beispiel 2

Frau Thomas, eine ältere Dame Mitte 60, wird etwas vergesslich. Letztens hat sie die Herdplatte angelassen, was ihre Tochter glücklicherweise noch bemerkt hat. Und auch das Bügeleisen hatte sie in der Woche davor vergessen. Der Hausarzt vermutet eine Demenz und versucht einfühlsam mit Frau Thomas und ihrer Familie über die Verdachtsdiagnose zu sprechen.

1. Welche bildgebenden Untersuchungen können Sie durchführen?

Beispiel 1

Herr Simon hat vermutlich einen akuten Schlaganfall im Versorgungsgebiet der linken A. cerebri media. Das Krankenhaus sollte bereits während der Fahrt vom Notarzt in Kenntnis gesetzt werden. Die Radiologie sollte ebenso informiert werden, damit das CT frei ist, sobald der Patient im Krankenhaus eintrifft. Während Herr Simon in das CT gefahren wird, sollten kurz die Kontraindikationen für Kontrastmittel so gut wie möglich abgefragt werden. Dann werden Sie zunächst eine native CT Untersuchung des Kopfes anfertigen, um zunächst eine Blutung auszuschließen. Bereits jetzt könnte der Neurologe mit der intravenösen Lysetherapie zur Auflösung des Blutgerinnsels, das eine Arterie im Gehirn verstopft, beginnen. Als weitere Diagnostik sollten Sie umgehend ohne weitere Zeitverzögerung eine CT-Angiographie der intra-

und extrakraniellen hirnversorgenden Gefäße anfertigen. Hier zeigt sich bei Herrn Simon ein ausgedehnter thrombotischer Verschluss der A. cerebri media. Diese Information gibt der Radiologe gleich an seinen Kollegen Dr. Demirel in der Angiographie weiter. Dieser versetzt das Angioteam in Alarmbereitschaft, der sterile Tisch für die Thrombektomie wird vorbereitet, die Anästhesie zur Unterstützung bei dem Eingriff angefordert. Im CT führen Sie ergänzend eine CT-Perfusion durch. Mit dieser können Sie zeigen, dass das minderdurchblutete Hirngewebe noch zu retten ist. Sie schauen kurz auf die Uhr: der Patient ist seit 15 min in der Klinik. Jetzt packen alle mit an. Der Patient wird direkt in die Angiographie gebracht. Inzwischen sind auch erste Laborwerte fertig. Die Niere arbeitet gut, auch die Blutgerinnung ist normal, da Herr Simon keine Medikamente nimmt.

Dr. Demirel ist nach 30 min mit dem Thrombektomie-Katheter vor Ort in der rechten A. carotis interna. Es besteht weiterhin der Verschluss der A. cerebri media. Dr. Demirel kann den Stentriever rasch durch den Thrombus bringen und den Thrombus entfernen. Die Kontrolle zeigt wieder eine komplette Perfusion des Media-stromgebietes.

Dank der raschen Reaktion der Arbeitskollegen und der perfekten Abläufe in der gesamten medizinischen Rettungskette hatte Herr Simon Glück. Nach 1 Woche konnte er das Krankenhaus beschwerdefrei und ohne neurologische Defizite verlassen. Inzwischen hatte man noch festgestellt, dass das Blutgerinnsel aus dem Herzen kam und auf eine Herzrhythmusstörung zurückzuführen war, sodass Herr Simon jetzt blutverdünnende Medikamente nimmt.

Beispiel 2

Zur Demenzabklärung gehört in jedem Fall eine Schnittbilduntersuchung des Kopfes, also eine CT-oder MRT-Untersuchung des Schädels. Da Frau Thomas für eine Altersdemenz noch relativ jung ist und das MRT keinen Befund erbracht hat, wird Frau Thomas zur Nuklearmedizin überwiesen, wo eine PET-Untersuchung durchgeführt wird. Leider bestätigt sich, dass Frau Thomas an einer Alzheimer-Demenz erkrankt ist.

Literatur

- Arbeitsanweisungen Nuklearmedizin: AG-MTM, www.nuklearmedizin.de
- AWMF online: www.awmf.de
- Deltour I et al (2012) Mobile phone use and incidence of glioma in the Nordic countries 1979-2008: consistency check. *Epidemiology*, 23: 301-7
- Bundesamt für Strahlenschutz (2012) Diagnostische Referenzwerte für nuklearmedizinische Untersuchungen. www.bfs.de
- Dorn F, Liebig T (2013) Mechanische Thrombektomie beim thrombembolischen Mediaverschluss. *Radiologie Up2date* 13(04):309–319. doi:10.1055/s-0033-1344754
- EANM Dosage Card: www.eanm.org
- Förster S et al (2012) FDG-PET in der Demenzdiagnostik. *Der Nuklearmediziner* 35(75):81
- Hellwig S et al (2012) [18 F]FDG-PET is superior to [123I]IBZM-SPECT for the differential diagnosis of parkinsonism. *Neurology* 79(13):1314–1322
- Internetseite der Deutschen Gesellschaft für Endokrinologie, www.endokrinologie.net
- Kocher M., „Refresherkurs Hirnmetastasen“ auf der Jahrestagung der DEGRO 2010 in Magdeburg
- Kortmann A.-D., „Refresherkurs Hirntumoren“ auf der Jahrestagung der DEGRO 2010 in Magdeburg, 2011 und 2012 in Wiesbaden
- Langen K-J et al (2013) PET- und SPECT-Untersuchungen von Patienten mit zerebralen Gliomen mittels radioaktiv markierter Aminosäuren. DGN-Handlungsempfehlung (S1-Leitlinie) Stand 07/2013, AWMF-Registernummer: 031-051. www.nuklearmedizin.de
- Meyer P.T. et al.: Differenzialdiagnostik des neurodegenerativen Parkinson-Syndroms mit nuklearmedizinischen Verfahren; *Der Nuklearmediziner* 2012; 35:109-123
- Kuwert (2007) Nuklearmedizin (4. Auflage). www.thieme.de
- Hermann H-J (2004) Nuklearmedizin, 5. Aufl. Urban & Fischer, München
- Rades D., „Refresherkurs Palliative Strahlentherapie“ auf der Jahrestagung der DEGRO 2011 in Wiesbaden
- Riedel C (2011) Krianielle CT-Perfusion: beim Schlaganfall und über den Schlaganfall hinaus CT perfusion scanning of the brain in stroke and beyond. *Radiologie Up2date* 11(2):151–162
- Zilles K, Tillmann BN (2010) Anatomie. Springer Medizinverlag, Berlin, Heidelberg, New York

Diagnostik und Therapie – Kopf/Hals

U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Marks, C. Vockelmann

16.1 Allgemeines – 462

16.1.1 Topographische Anatomie – 462

16.1.2 Funktion – 462

16.2 Radiologische Diagnostik – 462

16.2.1 Sonographie – 462

16.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik – 462

16.2.3 Durchleuchtung/Angiographie – 462

16.2.4 Computertomographie (CT) – 463

16.2.5 Kernspintomographie (MRT) – 464

16.3 Nuklearmedizinische Diagnostik – 464

16.3.1 Tränenwegsszintigraphie – 464

16.3.2 Speicheldrüsenszintigraphie – 465

16.3.3 HNO-Tumore – 465

16.4 Wertigkeit – 466

16.5 Strahlentherapeutische Möglichkeiten – 466

16.5.1 Kopf-/Halstumore – 466

16.5.2 Einzelne Tumorentitäten im Überblick – 468

16.6 Fallbeispiele – 469

Literatur – 469

16.1 Allgemeines

M. Kahl-Scholz

16.1.1 Topographische Anatomie

Wichtige anatomische Strukturen aus dem Bereich „Kopf/Hals“ sind vor allem die Nasennebenhöhlen, die Schilddrüse, Lymphknoten und Speicheldrüsen.

Die Nasennebenhöhlen sind die luftgefüllten Räume in den der Nasenhöhle naheliegenden Knochen. Sie entsprechen dem Leichtbauprinzip. Zu den Nebenhöhlen zählen die Kieferhöhle (Sinus maxillaris), Stirnhöhle (Sinus frontalis), Siebbeinzellen (Cellulae ethmoidales) und die Keilbeinhöhle (Sinus sphenoidales).

Zu den großen Speicheldrüsen zählt die Ohrspeicheldrüse (Glandula parotidea), die vor und hinter dem Ohr auf Unterkiefer und Warzenfortsatz liegt. Der Ausführungsgang (Ductus parotideus) mündet in der Mundhöhle gegenüber dem oberen zweiten Backenzahn. Weitere große speichelproduzierende Drüsen sind die Unterkieferspeicheldrüse (Glandula submandibularis) und Unterzungenspeicheldrüse (Glandula sublingualis).

Zu den kleinen Speicheldrüsen zählen die Lipendrüsen (Glandula labialis), Gaumendrüsen (Glandula palatinae), Wangendrüsen (Glandula buccales) und die Zungendrüsen (Glandula linguales).

16.1.2 Funktion

Die Speicheldrüsen haben eine vielfältige Funktion: Durch den produzierten Speichel wird die Speise bereits in der Mundhöhle angedaut, Erreger werden durch bestimmte Inhaltsstoffe abgetötet und die Schleimhaut wird feucht gehalten. Die Speicheldrüsen können sich, z. B. wenn die Ausführungsgänge durch Speichelsteine verstopft werden, entzünden

Die Nebenhöhlen sind ebenso wie andere Bestandteile des Schädels ein Teil des „Leichtbauprinzips“, das dem Schädelknochen weniger Gewicht gibt. Da die Nebenhöhlen mit Schleimhaut ausgekleidet sind, bieten sie ein feuchtwarmes Reservoir, in dem sich auch Keime wohlfühlen, die zu wiederkehrenden Entzündungen führen können.

16.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

16.2.1 Sonographie

Primäre Bildgebung zur Untersuchung der Halsweichteile mit Schilddrüse, Speicheldrüsen und Lymphknoten stellt die Sonographie dar. Zur Beurteilung der Durchblutung wird zusätzlich die Farbdoppler-Sonographie genutzt.

Ein typisches Untersuchungsprotokoll der Sonographie vom Hals zeigt [Tab. 16.1](#)

16.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Typische Indikation für eine Röntgendiagnostik im Kopfbereich ist auch heute noch die Röntgenaufnahme der Nasennebenhöhlen. In aller Regel wird diese nur noch im occipito-mentalen Strahlengang angefertigt. Die Untersuchung sollte am sitzenden Patienten durchgeführt werden, da eine akute Sinusitis zu Flüssigkeitsspiegeln führt, die im Liegen im Röntgenbild nicht nachzuweisen sind.

Typische Einstelltechniken gibt [Tab. 16.2](#) wieder.

Die konventionelle Röntgendiagnostik spielt in der Bildgebung des Halses eine untergeordnete Rolle. Eine der wenigen möglichen Indikationen ist die laterale Aufnahme der Halsweichteile zur Beurteilung von Verkalkungen und Spondylophyten der HWS, die zu einer Einengung des Ösophagus führen. Typische Einstelltechniken gibt [Tab. 16.3](#) wieder.

16.2.3 Durchleuchtung/Angiographie

Durchleuchtungsuntersuchungen des Halses können zur Beurteilung des Pharynx und Ösophagus, insbesondere auch des Schluckaktes durchgeführt werden. Seltene Indikationen sind Tränenwegsdarstellungen, hier gegebenenfalls auch mit der Möglichkeit zur interventionellen Therapie von Stenosen.

Einstelltechniken zeigt [Tab. 16.4](#).

Tab. 16.1 Untersuchungsprotokoll Sonographie Hals

Patientenvorbereitung	Keine
Schallkopf	7,5 MHz Linearschallkopf
Standardebenen	Schilddrüse transversal, jeder Schilddrüsenlappen longitudinal Hals-Gefäß-Nervenscheiden jeweils longitudinal Vergrößerte Lymphknoten jeweils in 2 Ebenen
Besonderheiten	Schilddrüsenvolumen (jeweils ein Lappen): Länge x Breite x Dicke x 0,5

Tab. 16.2 Typische Einstelltechnik Röntgen NNH

Patientenvorbereitung	Ketten etc. ablegen lassen, Piercing im Gesicht entfernen lassen
Positionierung	Exakt vor dem Rasterwandstativ sitzend, Mund weit geöffnet, Kinn flach vor das Stativ gedrückt
kV	70–85 kV
mA	Belichtungsautomatik
Belichtungskammer	Mittleres Messfeld
Aufnahmekriterien	Felsenbeine projizieren sich unterhalb des Bodens der Kieferhöhlen

16.2.4 Computertomographie (CT)

Bei der konventionellen Röntgendiagnostik kann oftmals nicht sicher zwischen verminderten Pneumatisation und einer entzündlichen Verschattung der Nasennebenhöhlen differenziert werden. Vor einer operativen Therapie einer Sinusitis möchte der HNO-Arzt zusätzlich oft gerne die knöcherne Anatomie der Nasennebenhöhlen beurteilen können, da diese sehr variabel ist. So gibt es Patienten, bei denen die A. carotis in der Schädelbasis elongiert verläuft und mit oder sogar ohne knöcherne Deckung weit in die Keilbeinhöhle reicht. Auch die Rhinobasis, also die knöcherne Lamelle zwischen Frontalhirn und Nase, kann unterschiedlich tief

Tab. 16.3 Typische Einstelltechnik Röntgen Hals seitlich

Patientenvorbereitung	Ketten etc. ablegen lassen
Positionierung	Exakt seitlich vor dem Rasterwandstativ
kV	65–75 kV
mA	Belichtungsautomatik
Belichtungskammer	Mittleres Messfeld
Aufnahmekriterien	Gute Belichtung der prävertebralen Weichteile. Hautgrenzen abgrenzbar

Tab. 16.4 Typische Einstelltechnik Schluckakt

Patientenvorbereitung	Ketten etc. ablegen lassen
Positionierung	Seitlich und ap
Bildfrequenz	7,5–30 Bilder/sec
Kontrastmittel	Iodhaltiges Kontrastmittel, ggf. auch angedickt mit Wackelpudding oder Keksen
Aufnahmekriterien	Lippen/Zahnreihe im Bild, Pharynx komplett im Bild, oberer Ösophagus erfasst

angelegt sein. Dies sind für den Operateur elementar wichtige Informationen. Aus diesem Grund wird die CT-Untersuchung der Nasennebenhöhlen relativ häufig durchgeführt. Da es hierbei um knöcherne Strukturen und Weichteilschwellungen geht, also Befunde, die einen hohen Kontrast aufweisen, reicht zur Diagnostik einer Sinusitis oder vor einer OP ein low-dose-CT der Nasennebenhöhlen.

Tab. 16.5 zeigt ein typisches Untersuchungsprotokoll CT NNH mit Frage einer Sinusitis.

Insbesondere im Rahmen von Staginguntersuchungen bei Tumorerkrankungen oder in der Akutdiagnostik spielt die Computertomographie eine überragende Rolle. Beurteilt werden können sämtliche Halsweichteile, zusätzlich die Halsgefäße und die knöchernen Strukturen.

Tab. 16.6 zeigt ein typisches Untersuchungsprotokoll am Hals.

■ Tab. 16.5 Untersuchungsprotokoll CT NNH

Patientenvorbereitung	Piercing etc. im Untersuchungsbereich ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage, Arme am Körper entlang
Scanbereich	Gesamte Nasennebenhöhlen, geplant am lateralen Scout
kV	80 kV, 30–50 mAS (low-dose-Protokoll)
Kontrastmittel	Native
Reformationen	Axial, coronar und sagittal in Knochenfenstertechnik, Schichtdicke 3 mm
Aufnahmekriterien	Sämtliche NNH mit den knöchernen Grenzen abgebildet

■ Tab. 16.6 Untersuchungsprotokoll CT Hals

Patientenvorbereitung	Ketten etc. ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage, Arme am Körper entlang
Scanbereich	Schädelbasis bis obere Thoraxapertur
kV	120, Dosismodulation
Kontrastmittel	80 ml, Flow 3 ml/sec, Delay 45 sec
Reformationen	Axial, coronar und sagittal in Weichteiltechnik, Schichtdicke 3–5 mm Axial und sagittal in Knochenfenstertechnik, Schichtdicke 3–5 mm
Aufnahmekriterien	Homogene Kontrastierung der Weichteile, Halsweichteile vollständig abgebildet.

■ **Besonderheiten**

- Frage nach Parotiskonglomeraten: natives CT low-dose über die Glandula parotis
- Kombination mit CT Thorax oder CT Thorax und CT Abdomen: Arme nach oben über den Kopf legen

■ Tab. 16.7 Untersuchungsprotokoll MRT Hals

Patientenvorbereitung	Sämtliche Metallteile, Geld, Uhr, Scheckkarten etc. ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage, Arme am Körper entlang
Spule	Head-Neck-Spule
Scanbereich	Schädelbasis bis obere Thoraxapertur
Sequenzen	Coronare STIR, coronare T1w, axiale T2w, axiale T1w
Ggf. Kontrastmittel	1-fache Standarddosis
Post KM Sequenzen	Coronare T1w fs, axiale T1w fs
Aufnahmekriterien	

16.2.5 Kernspintomographie (MRT)

Zur Diagnostik der Halsweichteile bietet sich die MRT durch den hohen Weichteilkontrast besonders an. Auch mit der MRT können sämtliche Halsweichteile, zusätzlich die Halsgefäße und die knöchernen Strukturen beurteilt werden. Allerdings ist es im Gegensatz zur Computertomographie noch notwendiger, die Sequenzparameter sowie Schichtrichtung und den Untersuchungsabschnitt an die Fragestellungen anzupassen.

■ Tab. 16.7 zeigt ein typisches Untersuchungsprotokoll am Hals.

■ **Besonderheiten**

- bei Fragestellungen der Speicheldrüsen ggf. parasagittale Sequenzen, die an den Speicheldrüsen anguliert sind

16.3 Nuklearmedizinische Diagnostik

U. Blum

16.3.1 Tränenwegsszintigraphie

Eine Darstellung der Abflussverhältnisse ist unkompliziert möglich, spielt jedoch in der klinischen Di-

Tab. 16.8 Nuklearmedizinische Aspekte der Tränenwegsszintigraphie

Patientenvorbereitung	Keine
Aktivität	Je 2 MBq ^{99m} Tc-Perthechnetat in 10 µl Kochsalzlösung
Applikation	Eintropfen in beide Augen (z. B. Pipette)
Akquisition	Sitzend, dynamische Akquisition über 60 min; a.e. Pinholekollimator, ansonsten LEHR mit Zoom, 64 * 64 Matrix
Auswertung	Wichtig ist der Seitenvergleich, ROI-Analyse
Besonderheiten	Ggf. Spülung der Augen mit Kochsalzlösung, ggf. Spätaufnahmen

Tab. 16.9 Nuklearmedizinische Aspekte der Speicheldrüsenszintigraphie

Patientenvorbereitung	Gute Hydratation vor Beginn
Aktivität	Sitzend oder liegend, Kopf gering rekliniert
Applikation	50-70 MBq ^{99m} Tc-Perthechnetat i. v.
Akquisition	Dynamische Sequenz über 30(-40) min, 30(-60) s/frame; 64 * 64 Matrix, LEHR-Kollimator
Besonderheiten	Nach 20 min orale Gabe von verdünntem Zitronensaft ohne Lagewechsel des Patienten
Auswertung	ROI-Technik

agnostik keine Rolle mehr. Die Untersuchung wird insbesondere bei Fragestellungen zu den Abflussverhältnissen der Tränenwege durchgeführt (z. B. bei anatomischen Besonderheiten, entzündlichen Veränderungen). Wichtige Aspekte zeigt [Tab. 16.8](#).

16.3.2 Speicheldrüsenszintigraphie

Verschiedene Erkrankungen oder äußere Einflüsse können die Speichelproduktion oder Freisetzung hemmen. Folge einer verminderten Speichelproduktion ist eine Mundtrockenheit, verbunden mit weiteren Beschwerden wie z. B. Schluckstörungen. Eine Abflussbehinderung führt zu einer unangenehmen Schwellung der betroffenen Speicheldrüse.

Hauptursachen der Mundtrockenheit sind Infektionen (z. B. Mumps), Autoimmunerkrankungen (z. B. Sicca-Syndrom), Medikamente (z. B. Anticholinergika, Diuretika, Psychopharmaka). Eine Mundtrockenheit kann auch als Nebenwirkung einer Strahlentherapie oder mehrfacher hochdosierter Radioiodtherapien auftreten. Zudem gibt es akute und chronische Entzündungen der Speicheldrüsen.

Speichelsteine entstehen überwiegend in der Unterkieferspeicheldrüse (2/3 der Fälle) bzw. deren Ausführungsgang. Ein Stein kann zu einer akuten Schwellung der nachgeschalteten Speicheldrüse führen.

Die Szintigraphie der Speicheldrüsen ([Tab. 16.9](#)) wird nur noch selten durchgeführt, da andere bildgebende Verfahren nicht nur die Abflussverhältnisse, sondern auch morphologische Veränderungen darstellen können. Sie wird aufgrund der nur geringen Invasivität insbesondere zur Verlaufskontrolle genutzt.

16.3.3 HNO-Tumore

Die Hauptrisikofaktoren für die Entwicklung bösartiger Erkrankungen im HNO-Bereich sind Rauchen oder der regelmäßige Genuss hochprozentigen Alkohols. In der Kombination von Rauchen und Trinken steigt das Risiko bis auf das 30-fache der Normalbevölkerung (LL Onkologie 5/14/25). Weitere Risikofaktoren können das HP-Virus sein, sowie eine schlechte Mundhygiene.

In den meisten Fällen handelt es sich um Plattenepithel-Karzinome (95 %). Bei größeren Tumoren (T3 und 4) mit Lymphknotenbefall finden sich nicht selten Zweittumore.

Normalerweise zeigen Plattenepithel-Karzinom eine gute FDG-Speicherung. In der Primärdiagnostik steigert die PET/CT die diagnostische Sensitivität und Spezifität bzgl. des Lymphknotenstatus. Höheren Stellenwert kommt der PET/CT bei der Rezidivdiagnostik zu, zudem kann die PET/CT zur

Tab. 16.10 Wertigkeit der therapeutischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	Durchleuchtung/ Angiographie	CT	MRT	Nuk	PET
Kopf-Hals-Tumor	N	N	N	P	W	N	W
Sinusitis	W	P	N	W	W	N	N
Schluckstörung	N	N	P*	N	W	N	N

N = Nicht indiziert; P = Primärdiagnostik; W = Weiterführende Diagnostik
P* Die Hochfrequenzkinematographie ist bei dedizierten Schluckstörungen das primäre bildgebende Verfahren.
Vorgesaltet sollte natürlich immer eine endoskopische Diagnostik werden.

Festlegung des Operationsausmaßes bzw. der Bestrahlungsfelder hilfreich sein.

Eine Sentinel-Lymphknoten(SLN)-Darstellung ist möglich. Die Sicherheit einer alleinigen SLN-Entfernung bei früh erkannten Tumoren ist bisher im Vergleich zur standardisierten elektiven Entfernung der Halslymphknoten nicht ausreichend erforscht und aktuell nur im Rahmen von Studien zulässig.

Eine Skelettszintigraphie ist nur in Einzelfällen indiziert.

16.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

Tab. 16.10 zeigt den Einsatz der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.

16.5 Strahlentherapeutische Möglichkeiten

C. Marks

16.5.1 Kopf-/Halstumore

Die Therapien der verschiedenen Lokalisationen und Histologien im Kopf-/Halsbereich lassen sich nicht verallgemeinern und müssen individuell betrachtet werden, da ihre Entstehungsursachen und die Prognose stark variieren. Die Stadieneinteilung erfolgt für alle Tumorentitäten nach dem TNM-System.

Ursachen

Zu den Hauptursachen der Tumorentstehung von Kopf-/Halstumoren gehören Nikotinabusus und übermäßiger Alkoholkonsum. Überwiegend ältere Männer und Frauen jüngerer Alters erkranken an diesen Tumoren. Nikotin und Alkohol, aber auch die Infektion mit dem humanen Papilloma-Virus (HPV) spielen bei diesen Tumoren eine entscheidende Rolle für deren Entstehung. Vereinzelt kommen weitere Entstehungsursachen hinzu. Näheres dazu in den Abschnitten der einzelnen Tumoren ab.

Symptome

In Abhängigkeit der Lokalisation des Tumors können folgende Symptome auftreten:

Schluckbeschwerden, andauernde Heiserkeit, Kloßgefühl im Hals – im fortgeschrittenen Stadium kommen Lymphknotenschwellungen am Hals und Beschwerden durch Fernmetastasen dazu.

Bei allen Schwellungen im Halsbereich, Schluckbeschwerden oder Stimmbandproblemen, die länger als 3 Wochen bestehen, sollte zur Abklärung zwingend ein HNO-Arzt aufgesucht werden. Nur ein frühzeitig diagnostizierter und therapierter Tumor hat entsprechend gute Heilungschancen.

Strahlentherapie der Kopf-/Halstumore

Die Bestrahlung von HNO-Tumoren wird heutzutage fast ausschließlich mithilfe der IMRT (Intensitätsmodulierten Radiotherapie) durchgeführt. Eine weitere Besonderheit bei der Bestrahlung von Kopf-/Halstumoren ist die Tatsache, dass meist

beide Halsseiten bestrahlt werden, auch wenn nur eine Halsseite befallen ist (mit unterschiedlichen Gesamtdosen).

In Abhängigkeit von der Ausdehnung des Tumors besteht die Option einer Operation oder einer Radiotherapie bzw. Radiochemotherapie.

Die Radiotherapie kann in vielen Fällen, z. B. beim Larynxkarzinom, bei ausgedehntem Tumorbefall zum Organerhalt beitragen.

Eine Alternative zur Radiochemotherapie ist die Radiotherapie in Kombination mit monoklonalen Antikörpern (z. B. Cetuximab).

1. **Primäres Konzept:** In frühen Tumorstadien, bei kleinen Tumoren (T1/T2) ohne Lymphknotenbefall (N0) als alleinige OP oder alleinige Radiotherapie. Im Stadium T3/T4 und N+ als alleinige Radiochemotherapie mit einer Gesamtdosis von 70 Gy und Cisplatin.
2. **Adjuvantes Konzept:** Im fortgeschrittenen Stadium, bei großer Tumorausdehnung (T3/T4), Lymphknotenbefall (N+) und knappem Resektionsrand (R1), nach einer Operation als adjuvante Radiotherapie oder adjuvante Radiochemotherapie bei einer Gesamtdosis von 60–66 Gy auf die ehemalige Tumorregion und 50 Gy auf die adjuvanten Gebiete.

■ Vorbereitungen zur Bestrahlung

Vor Beginn einer Radiotherapie sollte sich der Patient frühzeitig einer kompletten Zahnsanierung unterziehen. Durch die Bestrahlung werden die Zähne und das Zahnfleisch in Mitleidenschaft gezogen – eine zahnärztliche Behandlung während der Bestrahlung sollte vermieden werden, da die Abheilung gestört bzw. vermindert wird. Dem Patienten wird bei Implantaten oder Metallfüllungen eine Zahnschiene angepasst. Durch das Auftreffen der Strahlung auf die Implantate/Metallfüllungen entsteht zusätzlich Streustrahlung, die die Mundschleimhaut belastet. Die Zahnschiene muss während der täglichen Strahlentherapiesitzung getragen werden und dient außerdem dazu, mithilfe von fluoridhaltigen Gels den Zahnschmelz zu härten und so widerstandsfähiger gegenüber der Strahlung zu machen. Auch durch die häufig mit einer Bestrahlung einhergehenden Mundtrockenheit werden die Zähne empfindlicher, da durch den verminderten Speichelfluss die Selbstreini-

gung und Fluoridierung der Zähne herabgesetzt wird.

Bei aggressiven Therapiekonzepten, bei denen mit hoher Wahrscheinlichkeit höhergradige Nebenwirkungen auftreten werden, empfiehlt sich eine PEG-Anlage (perkutan endoskopische Gastrostomie) zur enteralen Ernährung mithilfe von hochkalorischer Sondennahrung, um die Kalorienzufuhr während der Therapie zu sichern. Bei ggf. bestehenden Atemproblemen durch den Tumor muss vorab über eine Tracheotomie (Lufttröhrenschnitt) die Luftzufuhr gesichert werden, da unter der Therapie auftretende Schwellungen lebensbedrohlich werden können.

■ Lagerung zur Bestrahlung

Zur täglichen Fixierung und optimalen Lagerung des Patienten wird dem Patienten bei Bestrahlungen im HNO-Bereich zur CT-Bestrahlungsplanung eine Bestrahlungsmaske angefertigt. Abhängig vom geplanten Zielvolumen werden Kopf und Nacken fixiert, ggf. auch der Schulterbereich. Thermoplastischer Kunststoff wird dazu im Wasserbad erwärmt und weich gemacht, nach der Anformung härtet das Material innerhalb weniger Minuten aus.

Zur Distanzierung von Ober- und Unterkiefer und um bei Bedarf die Zunge in einer täglich gleichen Position zu fixieren, besteht die Möglichkeit, einen Distanzhalter anzufertigen. Für einen sog. „Aufbiss“ wird ein spezielles, individuell formbares Kunststoffmaterial verwendet, wie es auch für den Zahnabdruck beim Zahnarzt verwendet wird. Auch Beißringe, wie sie bei endoskopischen Untersuchungen zum Einsatz kommen, können eingesetzt werden.

Nebenwirkungen durch die Strahlentherapie

Die möglichen auftretenden Nebenwirkungen während oder nach einer Radiotherapie sind bedingt durch die Empfindlichkeit der Schleimhäute im Mund- bzw. Rachenraum und abhängig vom Bestrahlungsvolumen. Wird ein großer Bereich bestrahlt, steigen zwangsläufig die Wahrscheinlichkeit und Schwere der Nebenwirkungen.

Akute Nebenwirkungen durch die Radiotherapie sind Xerostomie (Mundtrockenheit), Erythem (Hautrötungen), Ageusie (Verlust des

Geschmacksempfindens) und Mukositis (Mundschleimhaut-entzündung).

Zu den chronischen Nebenwirkungen zählen: Xerostomie, dauerhafte Dunkelverfärbung der Haut, Fibrosen (Verhärtungen im Bindegewebe) und Lymphödem (verminderter Lymphabfluss im Gewebe).

16.5.2 Einzelne Tumorentitäten im Überblick

Nasopharynxkarzinom (Karzinom des Nasenrachenraums)

Das Nasopharynxkarzinom tritt überwiegend in Form eines PLECA (Plattenepithelkarzinom) oder lymphoepithelialen Karzinoms (Schmincke-Tumor) auf. Das Epstein-Barr-Virus wird für lymphoepitheliale Tumoren verantwortlich gemacht. Häufig kommt es zu einer frühzeitigen lymphogenen Metastasierung zervikal und supraklavikulär.

■ Therapie

Die primäre Radiotherapie des Primärtumors und des Lymphabflussgebietes wird häufig mit einer platinbasierten simultanen Chemotherapie kombiniert.

■ Dosis/Fraktionierung

Auf den makroskopischen Tumor 68–72 Gy mit $5 \times 2,0$ Gy pro Woche, auf den Lymphabfluss 50–60 Gy als IMRT.

Oropharynxkarzinom (Karzinom des Mundraumes)

Tumore des Oropharynx treten im Bereich des Gaumens, der Tonsillen (Gaumenmandeln), des Zungengrundes und der lateralen und hinteren Rachenwand sowie der Epiglottis (Kehle) auf und werden begünstigt durch eine HPV-Infektion oder die Kombination aus Nikotin und Alkohol. Oropharynx- und Hypopharynxkarzinome zählen zu den häufigsten Tumoren im HNO-Bereich.

Ausgehend von den Plattenepithelzellen neigt er zu lymphogener Metastasierung. Zu den Leitsymptomen zählen ein Kratzen im Hals, Kloßgefühl (Globusgefühl) und Schluckbeschwerden.

■ Therapie

Neben der chirurgischen Exzision und anschließender Radiotherapie stellt die simultane Radiochemotherapie mit Cisplatin, 5-FU oder MMC (Mitomycin) die Therapie der Wahl dar. Auch eine Gabe von Cetuximab (monoklonaler Antikörper) ist möglich.

■ Dosis/Fraktionierung

Auf den Primärtumor 70–72 Gy mit $5 \times 2,0$ Gy pro Woche als IMRT mit Chemotherapie.

Sind keine Lymphknoten befallen (N0) reicht beim Lymphabfluss eine Gesamtdosis von 50–54 Gy. Im fortgeschrittenen Stadium ohne simultane Chemotherapie kann eine akzeleriert hyperfraktionierte Radiotherapie mit $10 \times 1,2$ – $1,4$ Gy pro Woche durchgeführt werden.

Mundhöhlenkarzinom (Mundbodenkarzinom, Zungenkarzinom)

Das Mundhöhlenkarzinom wird zusätzlich zu Alkohol und Nikotin auch durch das Kauen von Tabak und mangelnder Mundhygiene begünstigt.

■ Therapie

Die operative Entfernung des Tumors wird meist einer Radiotherapie vorgezogen, da durch die Nähe zum Unterkiefer und die schwierige Zielvolumenerfassung (durch die Zungenbeweglichkeit) eine Operation und adjuvante Radiotherapie oft bessere Ergebnisse als bei einer alleinigen Bestrahlung erzielen.

➤ **Durch die Beweglichkeit der Zunge im Mund sollte für die Bestrahlung zusätzlich zur Maske ein Distanzhalter (Aufbiss) angepasst werden, um die Zunge im Unterkiefer fixieren zu können.**

■ Dosis/Fraktionierung

Adjuvant als Radiotherapie oder als platinbasierte Radiochemotherapie werden auf das ehemalige Tumorbett 60–66 Gy und des Lymphabflusses 54–60 Gy mit $5 \times 2,0$ Gy pro Woche als IMRT appliziert.

Hypopharynxkarzinom (Karzinom des unteren Rachenraumes)

Beendet sich der Tumor im unteren Rachenraum spricht man vom Hypopharynxkarzinom, der eben-

falls durch Alkohol und Nikotin begünstigt wird. Häufig kommt es zu einer Ausbreitung auf den benachbarten Larynx, was im Falle einer OP eine Laryngektomie (Entfernung des Kehlkopfes) zur Folge hat.

■ Therapie und Dosis/Fraktionierung

► Abschn. 16.3.2 Oropharynxkarzinom

Larynxkarzinom (Karzinom des Kehlkopfes)

Tumore im Bereich des Kehlkopfes sind aufgrund der Nähe zu den Stimmbändern und des möglichen Verlustes der Stimmfunktion schwierig zu therapieren. Die Einteilung erfolgt in glottische (am häufigsten), supraglottische und subglottische Karzinome. Dauerhafte Heiserkeit kann ein erster Anhalt für die Erkrankung sein.

■ Therapie

Operativ kann im Stadium T1/N0 laserchirurgisch der Tumor entfernt werden. Im fortgeschrittenen Stadium kann, alternativ zu einer Laryngektomie, eine primäre Radiotherapie oder Radiochemotherapie den Organerhalt ermöglichen.

■ Dosis/Fraktionierung

Auf den Primärtumor 56,25/63 Gy im Stadium T1 mit $5 \times 2,25$ Gy pro Woche, 70 Gy ab Stadium T2 als Radiochemotherapie.

Adjuvant bei T3/T4 Tumoren als Radiochemotherapie mit 60–66 Gy mit $5 \times 2,0$ Gy pro Woche auf die Tumorregion und Cisplatin, auf den Lymphabfluss 50–54 Gy.

lenen Lymphknoten am Hals. Die Biopsie ergibt ein PLECA des Larynx, der Patient wird an die Radioonkologie überwiesen.

? Welches weitere Vorgehen und welche Art von Behandlung wird der Strahlentherapeut dem Patienten vorschlagen?

✓ Der Radioonkologe wird den Patienten im Rahmen eines interdisziplinären Tumorboards vorstellen, um eine geeignete Therapie in Abhängigkeit des Befundes und in Absprache mit Fachärzten der HNO festzulegen. Auf Grund des ausgedehnten Befundes wird dem Patienten eine primäre kombinierte Radiochemotherapie empfohlen, um den Organerhalt, u. a. der Stimmbänder und des Kehlkopfes, zu ermöglichen.

? Was sollte der Strahlentherapeut anhand des Beschwerdebildes des Patienten vor Beginn einer Radiotherapie bedenken?

✓ Der Patienten sollte vorab eine PEG-Anlage erhalten, um auch während der Strahlentherapie die Ernährung zu gewährleisten, da durch die auftretenden Nebenwirkungen, wie Xerostomie und Mukositis, mit einer Verschlechterung der Ernährungslage zu rechnen ist. Auch sollte eine Tracheotomie in Betracht gezogen werden.

Literatur

- Bamberg M, Molls M, Sack H (2009) Klinik, 2. Aufl. Radioonkologie, Bd. 2. Zuckerschwerdt Verlag, München Wien New York
- Faller A (1999) Der Körper des Menschen: Einführung in Bau und Funktion, 13. Aufl. Thieme, Stuttgart New York
- Gaisser A, Pless M (2010) Tumore der Atemwege. In: Bachmann-Mettler I, Gaisser A, Kroner T, Margulies A (Hrsg) Onkologische Krankenpflege, 5. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg, S 724–727
- Gunderson L, Tepper J (2011) Clinical Radiation Oncology, 3. Aufl. Elsevier, München
- Herrmann HJ (2004) Nuklearmedizin, 5. Aufl. Urban und Fischer-Verlag, München
- Kuwert et al (2007) Nuklearmedizin, 4. Aufl. Thieme-Verlag, Stuttgart
- Leitlinienprogramm Onkologie, LL Mundhöhlen-Karzinom, AWMF 007-100 OL; www.leitlinienprogramm-onkologie.de, www.awmf.org

16.6 Fallbeispiele

C. Marks

Fall 1

Ein 60-jähriger LKW-Fahrer, der seit seiner Jugend starker Raucher ist, klagt seit etwa 2 Monaten über anhaltende Heiserkeit, leidet an einem Stridor (Pfeifen beim Atmen) und hat 8 kg abgenommen. Seine Frau schickt ihn zum HNO-Arzt, der bei einer Laryngoskopie einen deutlich sichtbaren Tumor feststellt und eine Biopsie entnimmt. Er tastet außerdem einen großen geschwol-

- Menche N (2003) Biologie Anatomie Physiologie, 5. Aufl. Urban & Fischer, München Jena
- Sauer R (2003) Strahlentherapie und Onkologie, 4. Aufl. Urban & Fischer, München Jena
- Schicha et al (2013) Nuklearmedizin, 7. Aufl. Schattauer-Verlag, Stuttgart
- Zilles K, Tillmann BN (2010) Anatomie. Springer Medizinverlag Heidelberg, Berlin, Heidelberg, New York

Diagnostik und Therapie – Respiratorisches System

J. Thiele, I. Offenhäusser, C. Vockelmann

17.1 Allgemeines – 472

17.1.1 Topographische Anatomie – 472

17.2 Radiologische Diagnostik – 472

17.2.1 Sonographie – 472

17.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik – 472

17.2.3 Durchleuchtung/Angiographie – 472

17.2.4 Computertomographie – 473

17.2.5 Kernspintomographie – 473

17.3 Nuklearmedizinische Diagnostik – 474

17.3.1 Voraussetzungen zur Diagnostik – 474

17.3.2 Lungenventilations/-perfusionsszintigraphie – 474

17.3.3 Bestimmung der postoperativen Lungenfunktion – 476

17.3.4 Rechts-Links-Shunt – 476

17.3.5 Pulmonale Hypertonie – 477

17.3.6 Mukoziliäre Clearance – 477

17.3.7 Lungen-PET – 478

17.4 Wertigkeit – 478

17.5 Therapeutische Möglichkeiten – 478

17.5.1 Radiologische Therapie – 478

17.5.2 Strahlentherapie – 479

17.6 Fallbeispiele – 481

Literatur – 482

17.1 Allgemeines

I. Offenhäusser

Die Lungenventilations-/perfusionsszintigraphie zum Nachweis akuter Lungenembolien stellt eine **Notfallindikation** in der nuklearmedizinischen Diagnostik dar. Als Embolie bezeichnet man den teilweisen oder vollständigen Verschluss eines Blutgefäßes durch ein Blutgerinnsel, sie ist für den Patienten lebensbedrohlich. Auch bei anderen Erkrankungen kann die Lungenszintigraphie wertvolle diagnostische Erkenntnisse liefern.

17.1.1 Topographische Anatomie

Die Lunge ist ein paarig angelegtes Organ. Sie besteht aus einem rechten und linken Lungenflügel (Pulmo dexter, Pulmo sinister), beide umgeben das Mediastinum. Jeder Lungenflügel wird in sog. Lungenlappen unterteilt, der rechte Lungenflügel teilt sich in drei, der linke in zwei Lappen auf. Die Lungenlappen verzweigen sich wiederum in Lungensegmente. Die Bezeichnung erfolgt hier entsprechend der Zuordnung zum versorgenden Bronchialast, der 10 Segmente rechts und 9 Segmente links versorgt, das 7. Segment fehlt hier (■ Abb. 17.1). Beide Lungenflügel liegen den Rippen an, an der Lungenbasis werden sie vom Zwerchfell begrenzt, während sie oben mit ihren Spitzen (Apex) die beiden Schlüsselbeine überragen. Hauptaufgabe der Lunge ist der Gasaustausch zwischen Organismus und Umwelt. Die Atemluft wandert über die Luftröhre (Trachea), die sich in der Bifurkation in die beiden Hauptbronchien teilt, weiter in die Segmentbronchien, in die Subsegmentbronchien, die Bronchiolen und schließlich in die Lungenbläschen (Alveolen), die weintraubenartig das Ende der Verästelung des Bronchialtraktes bilden.

17.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

17.2.1 Sonographie

Die Sonographie ist sehr gut geeignet, Pleuraergüsse, also Flüssigkeit im Pleuraspalt nachzuweisen. Bei größeren Ergussmengen ist auch eine sonographisch gesteuerte Punktion des Ergusses hervorragend möglich. In aller Regel erfolgt diese durch die Internisten, da sie Patienten mit relevanten Pleuraergüssen oftmals primär behandeln.

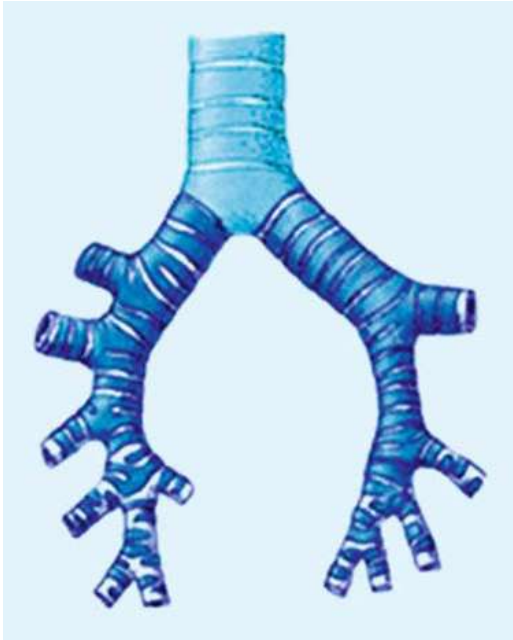
17.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Basisdiagnostik der Lunge und der Bronchien ist der Röntgen-Thorax (► Kap. 14). In Einzelfällen wird noch eine Tracheazielaufnahme angefertigt, um eine Tracheomalazie, also eine Einengung der Trachea z. B. durch eine Schilddrüsenvergrößerung, nachzuweisen.

➤ **Oft wird der Röntgen-Thorax mit der Frage nach einem Pneumothorax in Expiration geröntgt. Neuere Studien zeigen jedoch, dass es keinen signifikanten Unterschied in der Detektion eines Pneumothorax zwischen Aufnahmen in Inspiration und Expiration gibt.**

17.2.3 Durchleuchtung/Angiographie

Durchleuchtungsuntersuchungen des Thorax sind inzwischen relativ selten geworden. Man kann unter Durchleuchtung z. B. die Beweglichkeit des Zwerchfells beurteilen oder auch eine fragliche Verdichtung im Röntgen-Thorax weiter abklären. Oft wird jedoch dann als wesentlich sensitiveres Verfahren eine Computertomographie des Thorax angefertigt.



■ **Abb. 17.1** Topografische Anatomie der Lunge. Bronchialbaum

17.2.4 Computertomographie

Die Computertomographie ist zur Abklärung von Erkrankungen des Thorax mittlerweile nicht nur eine ergänzende Diagnostik zum Röntgen-Thorax (■ **Tab. 17.1**). Bei vielen Fragestellungen wird das CT der Lunge als primäre Diagnostik durchgeführt. Bei bestimmten Erkrankungen, z. B. einem Rektum-Karzinom, wird in vielen onkologischen Zentren primär eine CT der Lunge zum Ausschluss einer Metastasierung angefertigt. Vorteil der CT gegenüber der konventionellen Röntgenaufnahme ist die Möglichkeit, auch kleine Rundherde, die Metastasen entsprechen, entdecken zu können.

■ Besonderheit

Wenn nur das Lungenparenchym beurteilt werden soll, kann die Computertomographie der Lunge auch als low-dose-Untersuchung mit nur sehr geringer Strahlenbelastung und ohne Kontrastmittelgabe erfolgen. Typische Fragestellung hierfür ist z. B. die Suche nach Emphysebullae bei Patienten mit einem Spontanpneumothorax.

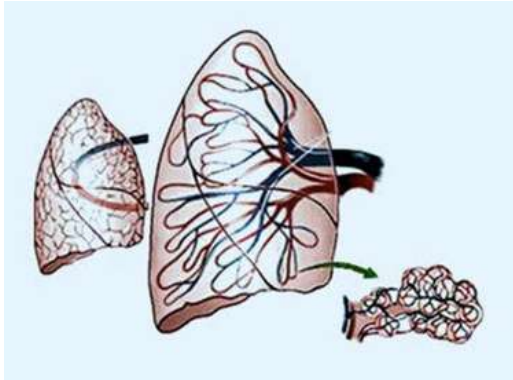
■ **Tab. 17.1** Untersuchungsprotokoll CT der Lunge

Patientenvorbereitung	Metallteile am Oberkörper entfernen
Positionierung	Rückenlage
Scanbereich	Lungenspitzen, sodass die Axillae erfasst werden bis ca. Mitte L1, sodass die Nebennieren erfasst werden
Röhrenspannung/-strom	120 kV, Dosismodulation
Kontrastmittel	60–80 ml
Reformationen	Weichteilfenster axial 3 mm, coronar 3 mm Lungenfenster axial 3 mm, coronar 3 mm MIP ggf. Knochenfenster BWS sagittal 3 mm

Auch in der Diagnostik von Parenchymerkrankungen der Lunge, wie der Lungenfibrose mit ihren unterschiedlichen Manifestationsformen, ist die Computertomographie Methode der ersten Wahl. Aus der Diagnostik dieser Erkrankungen gibt es den Begriff des „HR-CT“. HR steht hierbei für **high resolution**. Zu Zeiten von Einzelnen-Computertomographen wurden hierbei einzelne, sehr dünne Schichten mit einem aufhärtenden Algorithmus angefertigt, um feine Veränderungen im Lungenparenchym zu sehen. Mittlerweile wird eigentlich jedes Thorax-CT primär dünn mit einer Schichtdicke von 1 mm oder weniger akquiriert, zumeist jedoch nicht so dünn im PACS archiviert. Eigentlich machen Sie also ausschließlich HR-CT-Untersuchungen.

17.2.5 Kernspintomographie

In der Beurteilung des Lungenparenchyms hat sich die Kernspintomographie bisher noch nicht bewährt. Das liegt zum einem an der Detektion von kleinsten Veränderungen in einem atemabhängigen, und damit schwer ruhigzustellendem Organ. Dann sind kleine Verkalkungen für die Beurteilung von Veränderungen sehr wichtig. Diese sind in der Kernspintomographie wie auch die Luft signalfrei,



■ Abb. 17.2 Topografische Anatomie der Lunge

sodass diese Befunde der Kernspintomographie entgehen. Aus diesen Gründen ist die Kernspintomographie der Lunge heute keine übliche Diagnostik. Trotzdem ist die Lunge bei vielen Untersuchungen, wie z. B. einem Kardio-MRT oder einer Untersuchung des Oberbauches, zumindest partiell mit im Untersuchungsgebiet und sollte auch immer mit betrachtet werden, um nicht evtl. relevante Befunde zu übersehen.

17.3 Nuklearmedizinische Diagnostik

I. Offenhäusser

17.3.1 Voraussetzungen zur Diagnostik

Das venöse, kohlendioxidreiche Blut zirkuliert über den rechten Ventrikel, die Pulmonalarterie und weiter über die entsprechend der Lappen-, Segment- und Subsegmentanatomie verlaufenden Gefäße, die im Alveolarbereich in das Kapillarnetz münden (■ Abb. 17.2). In diesem Bereich sind Alveolen und Kapillaren nur durch eine dünne Schicht getrennt, sodass der Sauerstoff aus den Alveolen schnell in das Kapillarblut übertreten kann. Der zuführende Kapillarschenkel gibt das sauerstoffarme, kohlendioxidreiche Blut seinerseits in die Alveolen zurück, das Kohlendioxid wird abgeatmet. Der Gasaustausch erfolgt stets im Konzentrationsgefälle, also vom Ort hoher zum Ort niedriger Konzentration.



■ Abb. 17.3 Graphittiegel

17.3.2 Lungenventilations/-perfusionsszintigraphie

Während die Ventilation den Belüftungszustand der Lunge spiegelt, stellt die Perfusion die Durchblutung dar. Belüftung und Durchblutung sind gekoppelt. So führt eine schlechte Belüftung durch einen alveovaskulären Reflex, den Euler Liljestrand-Reflex, zur verminderten Durchblutung des entsprechenden Lungenabschnittes. Über diesen Mechanismus wird die Menge des sauerstoffangereicherten zirkulierenden Blutes im Organismus möglichst konstant gehalten. Die Kombination von Ventilation- und Perfusionsstudie ist ratsam, um frische Embolien von alten Ereignissen zu unterscheiden. Wird die Durchblutung langfristig unterbrochen, so nekrotisiert das hinter dem Thrombus liegende Gewebe, sodass auch die Ventilation Ausfälle zeigt. Im Gegensatz zum Embolienachweis mit einem Multidetektor-CT ist die Strahlenexposition, besonders die der weiblichen Brust, bei Szintigraphie geringer, und es wird kein iodhaltiges Kontrastmittel benötigt, welches bei Allergien gegen Iod, Hyperthyreose und Niereninsuffizienz nicht injiziert werden darf. Subsegmentale Embolien können der CT entgehen, sodass die erhöhte Sensitivität der Szintigraphie ein weiteres Plus darstellt.

Lungenventilationsszintigraphie

Die Lungenventilationsszintigraphie wird nach Inhalation von Gasen, Aerosolen oder verdampften Kohlepartikeln akquiriert. Wir arbeiten mit ultrafeinen ^{99m}Tc markierten Kohlepartikeln. Vorbereitend wird das Generatoreluat in einen vom Hersteller gelieferten Graphittiegel, der in den Technegasgenerator eingesetzt wird, eingebracht (■ Abb. 17.3, ■ Abb. 17.4) und in Argongasatmosphäre auf ca. 2500 Grad Celsius erhitzt. Es bilden sich nun kleine Ansammlungen von ^{99m}Tc markierten Kohlenstoffatomen. Die unmittelbar folgende Ventilation mit dem entstan-



■ **Abb. 17.4** Einsatz des Graphittiegels in die Schublade des Technegasgenerators

denen radioaktiv markierten Technetiumgas muss innerhalb von 10 Minuten abgeschlossen sein, da die Partikel zunehmend verklumpen.

Der Patient sollte über den Untersuchungsablauf gut informiert sein, bevor mit dem inaktiven System bei dicht anliegendem Mund und verschlossener Nase Atemübungen durchgeführt werden. Dieses Vorgehen sichert ab, dass die abgeatmete radioaktive Luft in dem dafür vorgesehenen Filtersystem hängen bleibt, und es nicht zur Kontamination des Personals und der unmittelbaren Umgebung kommt. Vor Inhalation erhält der Patient zwei Hübe Berodual zur Erweiterung der Bronchien. Er hustet ggf. und atmet tief ein und aus, um Schleimpfropfen zu lösen, die Lunge entfaltet sich. Die Zielaktivität übersteigt i. d. R. 10–20 MBq nicht, sodass die Ventilations- der Perfusionsstudie vorangestellt werden muss.

Um das Lösen von Thromben zu verhindern, muss der Patient mit Vorsicht aus dem Bett auf den Untersuchungstisch umgelagert werden. Er liegt auf dem Rücken. Die Arme sind durch Einsatz entsprechender Lagerungshilfen über dem Kopf bequem und stabil positioniert. Planare Szintigramme werden aus acht Sichten angefertigt: ventral (RVL); dorsal (LDR); links lateral; rechts lateral sowie rechts anterior oblique und links anterior oblique

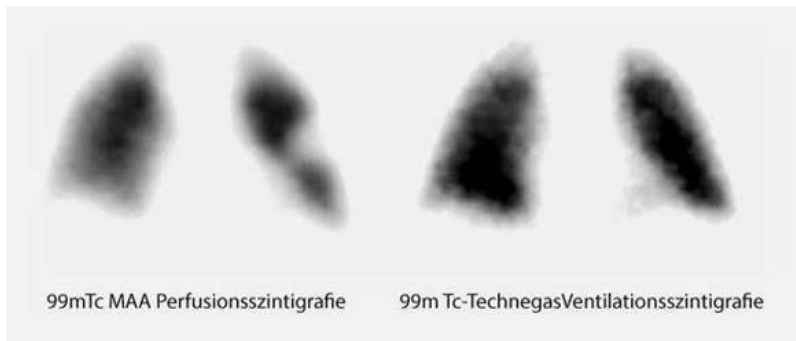
(RAO/LAO) und rechts posterior oblique und links posterior oblique (RPO/LPO). Zur Beurteilung komplexer Befunde hat sich die Anfertigung von SPECT-Aufnahmen (64 Ansichten à 24 sec./Matrix 128×128) bewährt. Ein SPEC/CT bietet die Möglichkeit, in Low Dose Technik die funktionelle mit der morphologischen Bildgebung zu koppeln.

Die Ventilation kann auch mit anderen Gasen durchgeführt werden, was aber mit umfangreichen logistischen Anforderungen verbunden ist. $^{133}\text{Xenon}$ erfordert spezielle bauliche Strahlenschutzmaßnahmen, während $^{81\text{m}}\text{Krypton}$, Tochternuklid des $^{81}\text{Rubidium}$, aufgrund der extrem kurzen HWZ die tägliche Beschaffung eines neuen Generatorsystems erfordert.

Lungenperfusionsszintigraphie

Im unmittelbaren Anschluss und in gleicher Position werden 150–200 MBq $^{99\text{m}}\text{Tc}$ markierte humane albumine Aggregate (MAA) gespritzt, die größer als die Lungenkapillaren sind und etwa jede 10.000te Kapillare blockieren. Die regionale Verteilung der Partikel entspricht der relativen Perfusion der Lunge. Liegt eine Einengung oder ein Verschluss einer Lungenarterie vor, so wird das nachfolgende Stromgebiet nur bedingt oder gar nicht erreicht, und es kommt zu einer Minderbelegung des entsprechenden Lungenabschnittes in typischer Keilform. Ein kommerziell gelieferter Kit, der die inaktiven Partikel enthält, wird nach Herstellervorschrift und unter Luftabschluss mit dem Generatoreluat verbunden. Vor Entnahme der benötigten Aktivitätsmenge von ca. 200 MBq $^{99\text{m}}\text{Tc}$ MAA muss das Kitfläschchen geschüttelt werden, da sich die Partikel im Glas unten absetzen und sich sonst nicht dosierungsgerecht (ca. 100.000 bis 200.000 Partikel) entnehmen lassen.

Die Aktivität wird vor Applikation erneut geschüttelt und dann langsam und über mehrere tiefe Atemzüge liegend i. v. injiziert. Der venöse Zugang darf keinen Filter enthalten. Auch muss das Aspirieren von Blut zur Lagekontrolle des Zugangs unterbleiben, da sich sonst Blutgerinnsel bilden, die verhältnismäßig hohe Aktivitäten in sich tragen und zur Bildverschlechterung führen. Die regionale Perfusion ist lageabhängig. Sitzt der Patient, sind die kaudalen Lungenabschnitte stärker perfundiert, was sich ggf. bei anderen Indikationen untersuchungstechnisch nutzen lässt. Die MAA Partikel werden



■ Abb. 17.5 Missmatch-Befund

intrapulmonal über Proteolyse mit einer HWZ von 2–3 Stunden abgebaut. Die Zählrate der Perfusionsaufnahme muss um den Faktor 5 höher sein als die der Ventilation, um eine sichere Überlagerung der Belüftungsstudie zu erreichen. Das Untersuchungsprotokoll entspricht zur Vergleichbarkeit beider Studien dem der Ventilation.

■ Auswertung

Ein Normalbefund zeigt eine homogene Aktivitätsverteilung in Ventilation und Perfusion in allen Lungenabschnitten.

Im sog. **Match-Befund** zeigt sich sowohl in Ventilation als auch in Perfusion eine Aktivitätsminderung bzw. ein Aktivitätsausfall an gleicher Stelle. Ein solches szintigrafisches Verteilungsmuster weist auf pulmonale Raumforderungen, Infekte, Pleuraergüsse, Folgen obstruktiver bzw. restriktiver Lungenerkrankungen oder alte Lungenembolien hin und wird durch den o.b. Euler-Liljestrand-Reflex verursacht.

Missmatch-Befunde zeichnen sich durch deutlich reduzierte oder aufgehobene Perfusion bei gleichzeitig intakter Ventilation aus (■ Abb. 17.5). Ein Missmatch-Befund manifestiert die Pathologie der frischen Lungenembolie. In seltenen Fällen zeigen auch andere Krankheitsbilder der Lunge Missmatch-Befunde. Um die Spezifität des Ergebnisses zu erhöhen, sollte eine aktuelle Röntgenaufnahme zu Untersuchungsbeginn vorliegen. Alternativ kann ein SPECT in Kombination mit einem Low Dose CT in der Diagnostik der akuten Lungenembolie eingesetzt werden.

❗ **Fällt ein Missmatch-Befund auf, so ist umgehend der behandelnde Arzt zu informieren!**

17.3.3 Bestimmung der postoperativen Lungenfunktion

Zur Vorhersage der postoperativen Lungenfunktion wird vor einer geplanten Pneumektomie oder einer Lobektomie eine Perfusionsszintigraphie angefertigt. Das Radiopharmakon wird sitzend gespritzt, um schwerkraftbedingte Perfusionsveränderungen zu berücksichtigen. Zunächst werden statische Aufnahmen in planarer Technik von ventral und dorsal akquiriert (■ Abb. 17.6). Anschließend wird über das Legen von ROIs die regionale Verteilung in Ober-, Mittel- und Unterlappen beider Seiten quantifiziert. Die prozentuale Aufnahme des zu entfernenden Lungenareals wird subtrahiert von der Gesamtfunktion und das Ergebnis mit dem präoperativen forcierten Lungenexpirationsvolumen (FEV) multipliziert. Ergibt sich dabei ein postoperatives FEV von unter 0,8 l, so muss die anstehende Operation kritisch hinterfragt werden.

17.3.4 Rechts-Links-Shunt

Auch beim Gesunden werden etwa 2 % des im Lungenkreislauf zirkulierenden Blutes dem Oxygenisierungsprozess entzogen. Verschiedene krankhafte Veränderungen oder Fehlbildungen können den am Lungenkreislauf vorbeifließenden Anteil des Blutes erhöhen, es kommt zur globalen Sauerstoffunterversorgung. Nach Applikation von ^{99m}Tc MAA-Partikeln kommt es im Falle eines pathologisch erhöhten Rechts-Links-Shunts zur Anreicherung in Organen, in denen die Partikelgröße den



■ **Abb. 17.6** ^{99m}Tc MAA Bronchialkarzinom. (Mit freundlicher Genehmigung von Prof. Mottaghy, Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen)

Kapillardurchmesser überschreitet (z.B. Gehirn, Leber und Nieren). Nach planarer Aufnahme der Lunge und der Nieren in anteriorer und posteriorer Sicht kann der prozentuale Shunt errechnet werden. Dabei wird ein renales Herz-Zeitvolumen von 25 % angenommen.

$$\text{Shunt (\%)} = \frac{\text{Nierenzählrate} \times 4}{\text{Nierenzählrate} \times 4 + \text{Lungenzählrate}}$$

Wird ^{99m}Tc MAA sitzend appliziert, so muss die Lungenbasis des Gesunden aufgrund der Gravitation eine höhere Aktivitätsanreicherung zeigen als die oberen Lungenabschnitte.

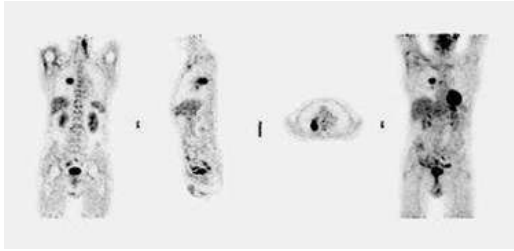
Bei pulmonaler Hypertonie zeigt sich keine Differenz in der Verteilung, bei hoch pathologischer Szintigraphie sind sogar die oberen Lungenabschnitte stärker perfundiert.

17.3.6 Mukoziliäre Clearance

17.3.5 Pulmonale Hypertonie

Bei Patienten mit chronisch wiederkehrenden Lungenembolien kann über eine Lungenventilations-perfusionsszintigraphie die pathologische Druckerhöhung im Lungenkreislauf nachgewiesen werden.

Die Funktion des bronchialen Flimmerepithels kann über eine Ventilationszintigraphie abgeklärt werden. Allerdings ist die Variabilität der Ergebnisse so hoch, dass diese nur in Spezialkliniken und Forschungszentren durchgeführt wird.



■ **Abb. 17.7** ^{18}F -FDG PET Bronchialkarzinom. (Mit freundlicher Genehmigung von Prof. Mottaghy, Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen)

17.3.7 Lungen-PET

Einen diagnostisch wertvollen Zugewinn bringt bei der Diagnostik unklarer solitärer Lungenbefunde die ^{18}F -FDG PET/(CT), ■ **Abb. 17.7**, vor allem dann, wenn der Allgemeinzustand des Patienten eine Biopsie nicht zulässt. Rundherde, die kleiner als 1 cm sind, können der Bildgebung entgehen, was an der in dem Falle mangelnden Ortsauflösung des Gerätes und der Atembewegung des Patienten während der Akquisition liegt. Tumoren unterschiedlicher Histologie zeigen ein differentes Speicherverhalten. Während das Plattenepithelkarzinom der Lunge eine hohe ^{18}F -FDG Aufnahme zeigt, wird der Tracer von Adenokarzinomen der Lunge sehr inkonstant aufgenommen. Bei kleinzelligen Bronchialkarzinomen kommt das Verfahren dann zum Einsatz, wenn die Lage des Primarius und die Lungenfunktion einen operativen Eingriff zulassen und in keinem bildgebenden Verfahren Fernmetastasen nachgewiesen wurden. Sind PET und CT-Befunde negativ, so kann auf eine Mediastinoskopie verzichtet werden. Stellt sich in einem der beiden Diagnostikverfahren ein mediastinaler Lymphknotenbefund dar, so bedarf er der histologischen Abklärung.

Frau Schmidt wird notfallmäßig mit Verdacht auf Lungenembolie in die Klinik für Nuklearmedizin überwiesen. Schülerin Sandra bereitet die Patientin unter Aufsicht vor, lagert sie und startet die SPECT-Akquisition. Sandra bemerkt bei der anschließenden Rekonstruktion des Datensatzes, dass sich oberhalb der Lunge eine weitere Aktivitätsanreicherung zeigt, die sie zunächst nicht einordnen kann. Nach kurzer Überlegung ist ihr klar, dass es sich bei dem dargestellten Organ



■ **Abb. 17.8** **Abb. 17.8** $^{99\text{m}}\text{Tc}$ MAA Fehlmarkierung

um die Schilddrüse handeln muss, die nur bei einer Fehlmarkierung sichtbar wird (■ **Abb. 17.8**). Kritische Fehler in diesem Zusammenhang sind z. B. vorzeitige Luftzufuhr durch Kintentlüftung, hoher Anteil an stabilem Tc, der die MAA-Partikel bindet, sodass viel freies $^{99\text{m}}\text{Tc}$ verbleibt und Ähnliches. Freies $^{99\text{m}}\text{Tc}$ reichert sich in Schilddrüse, Magen und Speicheldrüse an und führt zu unnötiger Strahlenbelastung dieser Organregionen. Sandra muss umgehend veranlassen, dass die der MTRA im Heisslabor den Kit vernichtet.

➤ **Die Lungen ventilations-/perfusionsszintigraphie nimmt im Rahmen der Lungenemboliediagnostik aufgrund ihrer Sensitivität einen hohen Stellenwert ein. Ein weiterer Schwerpunkt des Verfahrens ist die Abklärung der möglichen Operabilität eines malignen Lungentumors durch Quantifizierung der regionalen Lungenfunktion.**

17.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

■ **Tab. 17.2** zeigt den Einsatz der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.

17.5 Therapeutische Möglichkeiten

17.5.1 Radiologische Therapie

C. Vockelmann

Angiographie

Die Angiographie wird als therapeutisches Verfahren z. B. zur Entfernung eines abgerissenen Portkatheters oder eines ZVKs eingesetzt. Hierzu wird eine venöse Punktion in der V. femoralis durchgeführt. Dann wird mit einem Katheter die Pulmonalarterie son-

■ **Tab. 17.2** Wertigkeit der therapeutischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	Durchleuchtung/ Angiographie	CT	MRT	Nuk	PET
Pneumonie	W	P	N	W	N	N	N
Bronchialkarzinom	N	P	N	P	N	N	W
Lungenembolie	N	N	N	P	N	W	N
Lungenfibrose	N	P	N	P	N	N	N

N = Nicht indiziert; P = Primärdiagnostik; W = Weiterführende Diagnostik

diert, indem der Katheter über die V. cava inferior zum rechten Herzen vorgeführt wird. Vom rechten Ventrikel wird die Pulmonalarterie sondiert. Dann wird mit einem Snare-Loop, einer Lasso-ähnlichen Schlaufe, der verlorengegangene Katheter eingefangen und über die Schleuse in der V. femoralis entfernt.

Ein weiteres Einsatzgebiet der Angiographie ist die Behandlung von Hämoptysen. Dieser Begriff beschreibt einen Bluthusten, der z. B. durch pulmonale Blutungen aus den Bronchialarterien entsteht. Wenn ein solcher Zustand nicht anderweitig mittels Bronchoskopie zu behandeln ist, wird die Bronchialarterie der entsprechenden Seite sondiert. Anschließend wird ein Mikrokatheter in die Bronchialarterie vorgeführt und die Arterie mit kleinen Partikeln verschlossen. Das Verfahren ist durchführbar, ohne zu einer Nekrose der Lunge zu führen, da das Lungengewebe nicht nur über die Bronchialarterien versorgt wird, sondern auch noch über die Pulmonalarterien.

Computertomographie

Für die Behandlung von primären Bronchialkarzinomen oder einer pulmonalen Metastasierung kann in bestimmten Fällen eine Thermoablation in Betracht gezogen werden. Diese wird insbesondere in der Lunge computertomographisch-gesteuert durchgeführt. Thermoablation bedeutet letztlich eine Verkoagung von Gewebe. Hierzu wird eine Sonde in den Tumor geführt und dann Hitze appliziert. Um den Tumor exakt zu treffen und auch einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu erzielen, wird die Punktion CT-gesteuert durchgeführt. Da die Verkoagung sehr schmerzhaft ist – das Gewebe wird auf mind. 75 °C erhitzt, stellen Sie sich also vor,



■ **Abb. 17.9** Thermoablation mit schrittweisem Rückgang des Karzinoms und narbigen Schrumpfung

Sie würden auf eine heiße Herdplatte fassen – wird der Eingriff oft in Intubationsnarkose, zumindest aber in Analgosedierung durchgeführt. Indikationen für einen solchen Eingriff sind z. B. aus allgemeinen Gründen nicht-operable Patienten oder einzelne Metastasen bestimmter Tumore wie kolorektalen Karzinomen. Auch ein Lokalrezidiv eines Bronchialkarzinoms, z. B. nach einer Radiatio, ist oftmals durch eine Thermoablation behandelbar.

Die Verkoagung des Tumorgewebes führt zu einem Absterben der Zellen. Im Verlauf kommt es nach der Thermoablation zu einer narbigen Schrumpfung des Areals (■ **Abb. 17.9**).

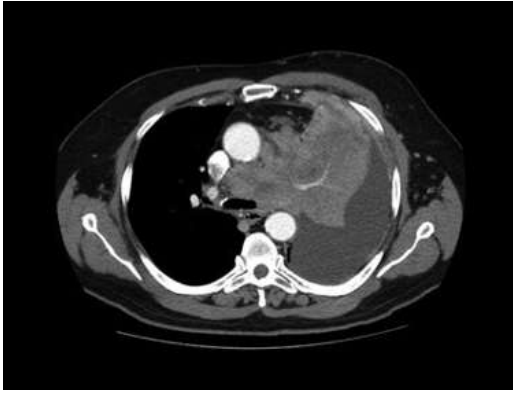
17.5.2 Strahlentherapie

J. Thiele

Bronchialkarzinom

Das Bronchialkarzinom ist geschlechtsbezogen jeweils der zweithäufigste Tumor nach Prostata- und Mammakarzinom, jedoch führende Krebstodesursache.

Männer erkranken häufiger als Frauen; die Häufigkeit der Erkrankung in Deutschland liegt bei Män-



■ Abb. 17.10 SLCS im CT

nern 88/100.000 und bei Frauen 23/100.000 Einwohner pro Jahr, jedoch ist die Tendenz bei den Frauen steigend. Der Altersgipfel liegt zwischen 60 und 65 Jahren.

Der größte Risikofaktor ist das Rauchen; das relative Risiko für leichte Raucher ist geringer als für schwere Raucher und richtet sich nach der Anzahl der Zigaretten pro Tag. Ebenfalls stellt ein früher Rauchbeginn ein höheres Risiko dar. Ca. 5–10 % der Bronchialkarzinome entstehen bei Nicht- und Passivrauchern.

Weitere Risikofaktoren sind chemische Noxen und eine hohe Asbest- und Radonbelastung, z. B. im Uranbergbau.

Symptome treten erst relativ spät auf, da das Tumorstadium lange symptomlos bleibt. Spätsymptome sind Bluthusten, Fieber, Atemnot, Thoraxschmerz und Gewichtsabnahme. Häufig sorgen Fernmetastasen für erste Symptome wie Kopfschmerzen, neurologische Ausfälle, Skelettschmerzen und vergrößerte periphere Lymphknoten.

■ Histologie

- Plattenepithelkarzinom 40 %
- kleinzelliges Bronchialkarzinom (SCLC) 20 %
- Adenokarzinom 30 %
- großzellig-anaplastisches Karzinom 10 %
- Metastasen 2–5 %

Fernmetastasen treten im Kopf, Leber, Knochen und Nebenniere auf.

Die Stadieneinteilung erfolgt nach TNM-Klassifikation.

Die Prognose ist abhängig vom Tumorstadium und Allgemeinzustand. Plattenepithelkarzinome haben die beste Prognose, die schlechtesten kleinzellige Bronchialkarzinome.

Therapie des nichtkleinzelligen Bronchialkarzinom (NSCLC)

Definition

NSCLS = engl. Non-Small Cell Lung Cancer

Die Therapie der Wahl ist nach Möglichkeit immer die primäre Operation, häufig gefolgt von einer anschließenden (adjuvanten) Chemotherapie.

Eine definitive Radiotherapie, meistens in Kombination mit einer Chemotherapie, erfolgt, wenn der Patient inoperabel oder mindestens das Tumorstadium IIIB erreicht ist. Postoperativ wird das Mediastinum inkl. der Tumorabsetzungsänder im Falle einer knappen, R1- oder R2-Resektion oder auch bei ausgedehntem Lymphknotenbefall (pN2/pN3) bestrahlt, wobei auch hier meistens die Therapie in Form einer Radio-Chemotherapie erfolgt.

Die Gesamtdosis für die definitive Radiochemotherapie beträgt 60–70 Gy, die für die adjuvante Therapie 50–60 Gy.

Therapie des kleinzelligen Bronchialkarzinom (SCLC)

Definition

SCLC = engl. Small Cell Lung Cancer

(■ Abb. 17.10)

Das kleinzellige Bronchialkarzinom wird standardmäßig mit 4–6 Zyklen Chemotherapie und anschließender Radiotherapie des Primärtumors und des angrenzenden Lymphabflussgebietes behandelt. In frühen Stadien kann alternativ nach der Chemotherapie eine Tumorsektion erfolgen.

Nach Abschluss der Chemotherapie und Ausschluss von Metastasen erfolgt eine prophylaktische Ganzhirnbestrahlung (engl. PCI: Prophylactic Cranial Irradiation), um die Rate von symptomatischen Hirnmetastasen zu verringern. Die Gesamtdosis für den Primärtumor und die befallenen Lymphknoten

beträgt 50–60 Gy, die für die Ganzhirnbestrahlung 30 Gy.

■ Bestrahlung des Patienten

Die Lagerung erfolgt in Rückenlage und mit den Armen über dem Kopf. Meistens werden die Patienten auf einen speziellen Board gelagert, um die Armposition täglich zu reproduzieren.

Das Planungs-CT erfolgt in 3D und umfasst die gesamte Lunge mit Sicherheitssaum nach kranial und kaudal.

Manche Patienten bekommen im Anschluss an die Thoraxbestrahlung eine prophylaktische Ganzhirnbestrahlung. Hier wird dem Patienten zusätzlich eine individuelle Kopfmaske angefertigt.

➤ **Beim Planungs-CT ist darauf achten, dass der Patient beim Umlagern von Thoraxbestrahlung zur Ganzhirnbestrahlung nicht aufstehen muss.**

Nebenwirkungen der Bestrahlung können u. a. Hautreizungen, Ösophagitis (Entzündung der Speiseröhre), Pneumonitis (Lungenentzündung) und Perikarditis (Herzbeutelentzündung) sein.

17.6 Fallbeispiele

C. Vockelmann

Fall 1

Herr Bunkert, ein 76-jähriger Mann, hat in letzter Zeit Bluthusten bemerkt. Seine Frau hat ihm schon seit 30 Jahren gesagt, er soll das Rauchen lassen. Allerdings ist er davon nie losgekommen. Jetzt hat er auch noch im letzten Monat an Gewicht verloren.

- ? 1. Welche Verdachtsdiagnose stellen Sie?
- 2. Welche Untersuchungen sollten durchgeführt werden?

✓ Fall 1

- 1. Aufgrund des langjährigen Nikotinabusus und der Gewichtsabnahme besteht der Verdacht auf ein Bronchialkarzinom.
- 2. Nach einem Röntgen-Thorax, bei dem sich ein Rundherd im rechten Lungenunterlappen findet, wird eine Computertomo-

graphie angefertigt. Hier bestätigt sich der Verdacht auf ein Bronchialkarzinom. CT-morphologisch finden sich keine mediastinalen Lymphknotenmetastasen. Die linke Nebenniere ist etwas verdickt. Der Radiologe gibt das Tumorstadium mit cT1bN0Mx an. Nebenbefundlich besteht ein ausgeprägtes bullöses Lungenemphysem.

- ? 3. Warum gibt der Radiologe als Tumorstadium Mx an?
- 4. Wie könnte es weitergehen mit Herrn Bunkert?

✓ Fall 1

- 3. Mx steht dafür, dass nicht erkennbar ist, ob sich Metastasen gebildet haben.
- 4. Der Radiologe empfiehlt eine Komplettierung des Stagings. Ihm geht es vor allem auch um die linke Nebenniere.

- ? 5. Welche Untersuchungen wird der behandelnde Onkologe veranlassen?

✓ Fall 1

- 5. Zunächst wird eine Bronchoskopie durchgeführt, der Tumor liegt jedoch zu weit peripher in der Lunge, um ihn bronchoskopisch zu punktieren. Zusätzlich werden eine FDG-PET-CT-Untersuchung und ein MRT des Neurocraniums durchgeführt. Das MRT ist erforderlich, da im FDG-PET durch den hohen Zuckerstoffwechsels des Gehirns zerebrale Metastasen nur unzureichend detektiert werden können. Zum sicheren Ausschluss zerebraler Metastasen wird die MRT Untersuchung mit Kontrastmittel durchgeführt, obwohl die nativen Bilder keine Auffälligkeiten zeigen.

Fall 1

Herr Bunkert hat Glück gehabt. Außer dem Tumor in der Lunge finden sich keine weiteren malignomverdächtigen Befunde. Eigentlich würde jetzt aufgrund des günstigen Tumorstadiums ohne Metastasierung primär eine Operation anstehen. Allerdings hat der Lungenfunktionstest ergeben, dass eine Operation aufgrund des ausgeprägten Emphysems nicht möglich ist.

6. Welche Möglichkeiten zur Sicherung der Diagnose bestehen?
7. Welche therapeutischen Möglichkeiten bestehen für Herrn Bunkert?

✓ Fall 2

6. Zur Sicherung der Diagnose und histologischen Bestimmung der genauen Tumorentität wird eine CT-gesteuerte Punktion durchgeführt. Hierbei besteht zwar aufgrund des ausgeprägten Emphysems ein deutlich höheres Risiko für einen Pneumothorax, der aber mit einer Drainage gut behandelbar ist.
7. Nach Sicherung der Diagnose wird der Patient in der Tumorkonferenz der Klinik vorgestellt. Die Konferenz, an der neben dem Onkologen auch der Strahlentherapeut, der Radiologe, der Pulmonologe, der Thoraxchirurg und der Pathologe teilnehmen, beschließt, dass sich der Patient einer Radio-Chemo-Therapie unterziehen sollte.

Fall 1

Herr Bunkert stimmt dem Vorgehen zu. Er übersteht die Therapie gut. Ein paar Nebenwirkungen treten auf (wie Kribbeln an den Extremitäten und auch Haarausfall). Die Blutwerte waren zwischenzeitlich auch verändert durch eine Blutarmut (Anämie). Komplikationen der Bestrahlung wie eine Dermatitis entwickelt er aber nicht. Jedoch fühlt er sich während der Behandlung und auch die erste Zeit danach recht schlapp. Das Rauchen hat er inzwischen auch aufgegeben. Die Nachsorge-Termine beim Onkologen und in der radiologischen Praxis nimmt er regelmäßig war. Nach zwei Jahren zeigt sich im CT Thorax eine Zunahme der Narbe im Bereich des Tumors. Der Radiologe äußert den Verdacht auf ein Rezidiv.

8. Welche weiteren diagnostischen Möglichkeiten bestehen?
9. Gibt es noch therapeutische Möglichkeiten für Herrn Bunkert?

✓ Fall 1

8. Zur Sicherung der Diagnose wird Herr Bunkert erneut zum PET-CT geschickt. Hier bestätigt sich der Verdacht des Radiologen.

Im Tumorgebiet zeigt sich eine vermehrte Glukoseutilisation als Zeichen eines vitalen Tumors.

Das PET-CT wird von der Nuklearmedizinern Frau Dr. Blümchen und der Radiologin Frau Dr. Vau gemeinsam befundet. Diese empfiehlt anhand der Größe des Rezidivs von 2,5 cm, eine Thermoablation in der Tumorkonferenz zu diskutieren.

9. Eine erneute Bestrahlung des Gebietes kommt nicht infrage. Eine alleinige Chemotherapie hat bei Herrn Bunkert nur sehr begrenzte Erfolgsaussichten. Daher stimmt die Konferenz der Thermoablation zu, die in der Klinik CT-gesteuert durchgeführt wird. Den Eingriff übersteht Herr Bunkert gut, auch wenn er einige Tage eine Pleuradrainage aufgrund eines Pneumothorax hat. Die weiteren CT-Kontrollen und Nachsorgeuntersuchungen beim Onkologen zeigen in den nächsten Monaten und Jahren kein erneutes Rezidiv.

Literatur

- Kuwert T, Grünwald F, Haberkorn U, Krause T (2008) Nuklearmedizin. Thieme Verlag, Stuttgart
- Lohr F, Wenz W (2007) Strahlentherapie kompakt, 2. Auflage, S31–46, Urban und Fischer
- Sauer R (1998) Strahlentherapie und Onkologie für MTA-R, 3. Aufl. Urban und Schwarzenberg, Stuttgart, S 326–332
- Schicha H, Schober O (2013) Nuklearmedizin: Basiswissen und klinische Anwendung. Schattauer, Stuttgart
- Thomsen L et al (2014) Value of Digital Radiography in Expiration in Detection of Pneumothorax. Rofo 186(3):267–273

Diagnostik und Therapie – Gastrointestinales System

U. Blum, D. Dohr, M. Kahl-Scholz, C. Vockelmann

- 18.1 Allgemeines – 484**
 - 18.1.1 Topographische Anatomie – 484
 - 18.1.2 Funktion – 484
- 18.2 Radiologische Diagnostik – 485**
 - 18.2.1 Sonographie – 485
 - 18.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik – 485
 - 18.2.3 Durchleuchtung/Angiographie – 486
 - 18.2.4 Computertomographie – 487
 - 18.2.5 Kernspintomographie – 488
- 18.3 Nuklearmedizinische Diagnostik – 490**
 - 18.3.1 Oesophagus – 490
 - 18.3.2 Magen – 491
 - 18.3.3 Leber – 491
 - 18.3.4 Darm – 494
 - 18.3.5 Pankreas – 496
 - 18.3.6 Resorptionstest – 497
- 18.4 Wertigkeit – 497**
- 18.5 Therapeutische Möglichkeiten – 497**
 - 18.5.1 Radiologische Therapie – 497
 - 18.5.2 Strahlentherapie – 498
- 18.6 Fallbeispiele – 504**
 - Literatur – 505**

18.1 Allgemeines

M. Kahl-Scholz

18.1.1 Topographische Anatomie

Zum gastrointestinalen System zählen die Speiseröhre (Ösophagus), der Magen (Gaster), Zwölffingerdarm (Duodenum), Dünndarm (Jejunum, Ileum), Dickdarm und Mastdarm. Ferner werden im Folgenden Leber, Bauchspeicheldrüse und Gallenblase kurz dargestellt.

Die Speiseröhre ist etwa 25 cm lang, zieht durch den Hiatus oesophagus des Zwerchfells vom Brust- in den Bauchraum und wird in einen Hals-, Brust und Bauchteil (Pars cervicalis, thoracica und abdominalis) gegliedert. Wie die meisten Hohlorgane besteht er (von innen nach außen) aus Schleimhaut, Muskelschicht und Bindegewebshülle.

Der Magen (Gaster) ähnelt einem gekrümmten Schlauch mit einer großen und kleinen Krümmung (Curvatura minor et major). Er hat eine Vorder- und Hinterwand (Paries anterior et posterior). Am Übergang zum Ösophagus befindet sich der Mageneingang (Cardia), gefolgt von der Magenkupe (Fundus gastricus), dem Magenkörper (Corpus gastricum) und dem Magenpförtner (Pars pylorica), der mit dem Magenpförtner als Verschluss zum Zwölffingerdarm (Duodenum) abschließt.

Das Duodenum zählt bereits zum Dünndarm, wird aber wegen seiner besonderen Funktion häufig davon abgesondert als eigenständiger Abschnitt im Magen-Darm-Trakt betrachtet. Das Duodenum beginnt hinter dem Pylorus mit einem oberen Teil (Pars superior), gefolgt von einem ansteigenden Abschnitt (Pars descendens), einem geradlinig verlaufenden Teil (Pars horizontales) und geht schließlich mit einem aufsteigenden Abschnitt (Pars ascendens) in die Flexura duodenojejunalis über.

Jejunum und Ileum sind die beiden anderen Anteile, die den Dünndarm ausmachen.

Der Übergang vom Dünn- zum Dickdarm ist durch die Papilla ilealis, auch Bauhin-Klappe genannt, gekennzeichnet. Der Dickdarm unterscheidet sich anatomisch u. a. vom Dünndarm durch Bandstreifen (Tänien), Haustren, Schleimhautfalten (Plicae semilunares coli), Fettanhängsel (Appendices epiplocae).

Der Mastdarm (Rectum) schließt an das Colon sigmoideum an. Mit dem Afterkanal (Canalis analis) endet der Magen-Darm-Trakt.

Die Leber (Hepar) liegt zum größten Teil im rechten Oberbauch direkt unter dem Diaphragma. Ihre vordere Fläche ist größtenteils vom Brustkorb bedeckt, nur im epigastrischen Bereich liegt sie direkt unter der Bauchwand und ist dort tastbar.

Sie hat eine Seite, die den Bauchorganen zugewandt ist (Facies visceralis) und Abdrücke der jeweiligen Nachbarorgane zeigt sowie eine Seite, die dem Zwerchfell anliegt (Facies diaphragmatica). Ebenso gliedert sie sich in den rechten und linken Leberlappen (Lobus hepatis dexter et sinister) sowie an der Facies visceralis zusätzlich in den Lobus caudatus und quadratus.

An der Facies visceralis sind mehrere Einkerbungen, Abdrücke der umliegenden Strukturen, Bänder, Gefäße, die Gallenblasengrube (Fossa vesicae biliaris) sowie die Leberpforte (Porta hepatis), die den gemeinsamen Gallengang (Ductus hepatis communis), die Leberarterie (A. hepatica propria) und die Pfortader (V. portae hepatis) enthält.

Die Bauchspeicheldrüse liegt der hinteren Bauchwand an (sekundär retroperitoneal). Der Kopf (Caput pancreatis) liegt dem Duodenum-„C“ an. Dem Körper (Corpus pancreatis) folgt der Schwanz (Cauda pancreatis), der am Milzhilus endet.

18.1.2 Funktion

Der Magen-Darm-Trakt dient in erster Linie der Verkleinerung des Speisebreis und der Aufnahme von Nährstoffen sowie der Ausscheidung von unnötigen Substanzen bzw. Abfallprodukten. Gerade die Leber ist aber auch existentiell wichtig für die Entgiftung und Produktion von z. B. Abwehrstoffen. Die Bauchspeicheldrüse produziert neben dem Insulin auch verdauungswirksame Substanzen.

■ **Tab. 18.1** Untersuchungsprotokoll Sonographie des Abdomens

Patientenvorbereitung	Bauch frei machen lassen
Schallkopf	3,5 MHz Sektorschallkopf, für gezielte Darmuntersuchungen zusätzlich 7,5 MHz Linear-schallkopf
Standardebenen	Lebervenenstern, Leberhilus, Gallenblase, Pankreas, Nieren mit Nebennierenloge, Milz, Aorta, Harnblase mit Uterus/Prostata Zusätzlich pathologische Befunde
Besonderheiten	Ggf. ergänzend Farbduplexsonographie

■ **Tab. 18.2** Untersuchungsprotokoll Röntgen-Abdomenübersicht

Patientenvorbereitung	Metall im Untersuchungsbereich entfernen
Positionierung	Rückenlage auf dem Buckytisch Linksseitenlage auf der Untersuchungsfläche vor dem Rasterwandgerät
Aufnahmeparameter	90–100 kV
Fokus-Detektor-Abstand	100 cm
Belichtungsautomatik	Mittleres Messfeld
Streustrahlenraster	r12

18.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

18.2.1 Sonographie

Die Sonographie (■ Tab. 18.1) stellt die erste bildgebende Modalität bei nahezu allen Erkrankungen des Gastrointestinaltraktes dar. Vorteil ist die rasche und breite Verfügbarkeit. Die Untersuchungen benötigen keine Vorbereitungen oder Laborparameter. Trotzdem sind zahlreiche Erkrankungen sicher diagnostizierbar. Normalerweise werden die parenchymatösen Oberbauchorgane ebenso untersucht wie die retroperitonealen großen intraabdominellen Gefäße, das kleine Becken mit seinen Organen und der Darm. Neben der B-Bild-Sonographie wird oftmals zusätzlich ergänzend eine Farbduplexsonographie durchgeführt, um Eindrücke über die Durchblutung zu gewinnen und Gefäße von anderen Gängen, wie z. B. den Gallengängen zu differenzieren.

18.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Auch die konventionelle Röntgendiagnostik ist immer noch ein elementarer Baustein in der Diagnostik abdomineller Erkrankungen. Die Fragestellung nach Ileus oder freier Luft lässt sich oftmals mit einer Röntgen-Abdomenübersicht in 2 Ebenen beantworten. Dabei handelt es sich ausnahmsweise nicht um 2 orthograd zueinander stehenden Ebenen, wie sonst eigentlich bei nahezu jeder Aufnahme in 2 Ebenen. Beim Abdomen erfolgt eine Ebene in Rückenlage, die zweite in Linksseitenlage (■ Tab. 18.2).

➤ **Für eine aussagekräftige Abdomenübersicht in Linksseitenlage muss der Patient mindestens 5 Minuten, besser 10 Minuten auf der linken Seite liegen. In dieser Zeit kann freie Luft nach oben steigen und dann lateral der Leber abgrenzbar sein. In der Linksseitenlage muss immer der rechte Zwerchfellrippenwinkel miterfasst werden, da sich hier die freie Luft sammelt.**

Da im Allgemeinen nicht das komplette Abdomen erfasst werden kann, sollte die Rückenlage im Ge-

■ Tab. 18.3 Untersuchungsprotokoll Ösophagusbreischluck

Patientenvorbereitung	Metall und röntgendichte Fremdkörper im Untersuchungsabschnitt ablegen lassen
Positionierung	Stehend vor dem in die Vertikale gekippten Durchleuchtungstisch
Bildfrequenz	Hals: 2-4 Bilder/sec Thorakaler Ösophagus: 2 Bilder/sec Magen/Duodenum: Einzelbilder
Kontrastmittel	60–100 ml iodhaltiges Kontrastmittel (z. B. Gastrolux)
Standardeinstellungen	Hals lateral und ap Thorakaler Ösophagus ap und RAO Magen/Duodenum ap, ggf. ergänzend Zielaufnahmen
Aufnahmekriterien, Besonderheiten	Überlappende Abbildung des gesamten Ösophagus; der Kontrastmittelübertritt in das Duodenum sollte dokumentiert werden.

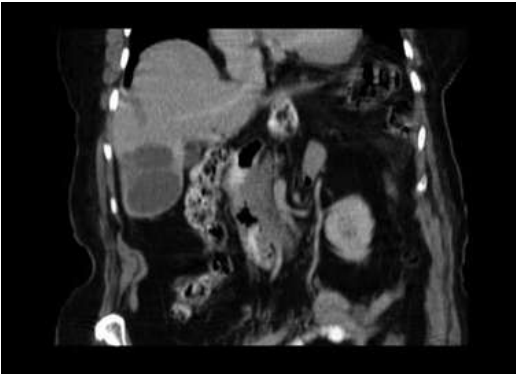
gensatz zur Linksseitenlage das Becken auf jeden Fall komplett erfassen, um z. B. Hernien erkennen zu können.

➤ **Insbesondere bei postoperativen Untersuchungen kann eine vor der Röntgenaufnahme nicht entfernte Klemme fälschlicherweise als intraabdomineller Fremdkörper (Corpus alienum) gewertet werden.**

In einigen Kliniken wird als Hausstandard statt einer Linksseitenlage eine Abdomenübersicht im Stehen geröntgt. Auch bei dieser Aufnahme ist eine ausreichende Wartezeit unerlässlich, damit sich freie Luft entsprechen verteilen kann.

Neben der bei akuten Erkrankungen eingesetzten Abdomenübersicht in 2 Ebenen wird zur Abklärung von Beschwerden mit Obstipation eine Kolontransitzeit radiologisch bestimmt. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze und Untersuchungsprotokolle. Allein die Unterscheidung zwischen einer pathologisch verlängerten Kolontransitzeit und einer normalen Kolontransitzeit gelingt mit einer einzigen Röntgenaufnahme: Hierzu muss der Patient am Tag 1 eine Kapsel mit 20 röntgendichten Markern zu sich nehmen. Am Tag 3 wird dann die Abdomenübersicht geröntgt und die verbliebenen Marker gezählt. Sind noch mehr als 8 Marker vorhanden, liegt eine verlängerte Transitzeit vor.

Insbesondere in Krankenhäusern mit einer Bauchchirurgie wird häufig eine sogenannte MDP angefordert. Damit ist eine Magen-Darm-Passage gemeint. Hierzu wird in aller Regel zunächst eine



■ Abb. 18.1 Angiosarkom der Leber im CT

Leeraufnahme im Liegen angefertigt. Im Anschluss hieran muss der Patient 100 ml iodhaltiges Kontrastmittel (z. B. Gastrolux [R]) trinken. Danach werden weitere Aufnahmen angefertigt. Die erste Aufnahme wird in aller Regel 30 Minuten nach der Kontrastmittelgabe angefertigt. Weitere Aufnahmen erfolgen jeweils im Abstand von 2 Stunden, wobei in aller Regel jede Aufnahme bereits vom Radiologen beurteilt und dann jeweils individuell der Zeitpunkt der nächsten Untersuchung festgelegt wird. Beendet ist die Untersuchung meist dann, wenn das Rektum erreicht ist.

18.2.3 Durchleuchtung/Angiographie

Schluckstörungen und Probleme des Ösophagus werden, in aller Regel nach einer Gastroskopie, mit einem Ösophagusbreischluck untersucht (■ Tab. 18.3). Dabei ist dieser Begriff historisch

■ **Tab. 18.4** Untersuchungsprotokoll CT Abdomen

Patientenvorbereitung	Röntgendichte Fremdkörper im Untersuchungsbereich entfernen Orale Kontrastierung, ggf. rektale Kontrastierung
Positionierung	Rückenlage
Scanbereich	Arteriell: Zwerchfelloberrand bis Leberunterrand Portalvenös: Zwerchfelloberrand bis Unterrand Os ischii
Röhrenspannung, -strom	120 kV, Dosismodulation
Kontrastmittel	120 ml jodhaltiges Kontrastmittel, ggf. gewichtsadaptiert Bolustracking Aorta
Reformationen	Axiales, coronares und sagittales Weichteilfenster aus arterieller und portalvenöser Spirale Sagittale Knochenrekonstruktion der Wirbelsäule

vom angedickten Barium geprägt. Heutzutage wird überwiegend kein Barium, sondern iodhaltiges Kontrastmittel eingesetzt. Insbesondere, wenn der Patient zu Aspirationen neigt oder an Ösophagus oder Darm operiert werden soll, ist Barium kontraindiziert, da hierdurch schwerwiegende Komplikationen ausgelöst werden können.

Auch die Aspiration von iodhaltigem Kontrastmittel kann zu Komplikationen führen. Gefürchtet ist hierbei vor allem ein Lungenödem. Daher sollten Sie, wenn der Patient aspiriert hat, die Untersuchung nicht fortsetzen. Zur Kontrolle wird in aller Regel eine Röntgenaufnahme der Lunge angefertigt.

Der Kolon-Kontrasteinlauf (Kolon-KE) wird heute eigentlich nur noch gezielt, z. B. bei V. a. Anastomoseninsuffizienzen eingesetzt. Dabei wird über ein in den Enddarm eingeführtes Darmrohr das Kolon gezielt im operierten Abschnitt untersucht. Insbesondere der Kolon-Doppelkontrast, bei dem zunächst Barium und im Anschluss Luft in das Kolon insuffliert werden, um einen Schleimhautbeschlag zu erreichen, ist von der Computertomographie mit der virtuellen Koloskopie abgelöst worden.

18.2.4 Computertomographie

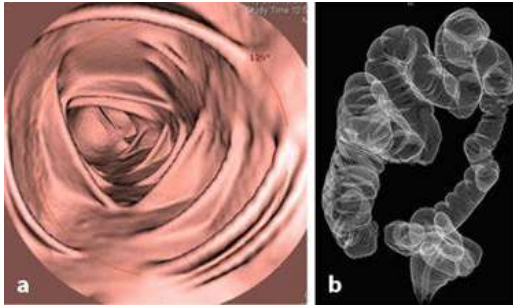
Weiterführende Diagnostik des Intestinaltraktes und der Abdominalorgane ist die Computertomographie (■ Abb. 18.1). Insbesondere zur Beurteilung der parenchymatösen Oberbauchorgane und Gefäße ist eine intravenöse Kontrastmittelgabe erforderlich. Als orales Kontrastmittel wird heutzutage zuneh-

mend negatives Kontrastmittel (Wasser, Mannitol, Sorbitol) eingesetzt. Vorteil hiervon ist die Beurteilung der Darmwände, die nicht durch positives Kontrastmittel überstrahlt werden. Insbesondere in der Detektion von Fisteln oder postoperativen Anastomoseinsuffizienzen hat positives Kontrastmittel jedoch auch heute noch einen wichtigen Stellenwert.

In aller Regel sind die Patienten für eine Computertomographie des Abdomen nüchtern und sollten über 1 bis 2 Stunden vor der Untersuchung das Kontrastmittel trinken (■ Tab. 18.4). Bei der Verdachtsdiagnose einer Divertikulitis oder Kolitis bietet sich die rektale Kontrastierung mit negativem Kontrastmittel an. Hierzu sollten die Patienten zumindest mithilfe eines Klistiers den Enddarm entleert haben. Die rektale Füllung erfolgt mit einem Darmrohr bzw. einem dünnen flexiblen Blasenkatheter. Eine gute Distension des Kolonrahmens gelingt durch eine Füllung mit bis zu 2 Litern Wasser und Gabe von Butylscopolamin intravenös.

Bei der Untersuchung der Pankreas hilft eine ausreichende orale Hydrierung mit 1 bis 2 Litern Wasser und einer Untersuchung in rechtsangehobener Seitenlage. Hierdurch wird das „duodenale C“ mit Wasser distendiert, der Pankreaskopf ist wesentlich besser abgrenzbar.

Insbesondere bei onkologischen Patienten werden i. d. R. multiphasische Programme gefahren. Das bedeutet, dass insbesondere die Leber arteriell untersucht wird sowie das gesamte Abdomen (portal-)venös. Dies dient dazu, Leberläsionen artdiagnostisch unterscheiden zu können. Insbesondere bei Leberhämangiomen hilft hierbei auch noch eine



■ **Abb. 18.2a,b** Virtuelle Coloskopie (VC). **a** 3D-Rekonstruktion Darmlumens und **b** Kolonrahmen. (© Vockelmann)

Spätspirale der Leber 3–5 min nach Kontrastmittelgabe. Aber was heißt jetzt eigentlich portalvenös, arteriell und spät?

Damit sind die verschiedenen Untersuchungszeitpunkte in der Kontrastmittelfase gemeint. Ein arterielles Timing gelingt am einfachsten mit einer Bolustriggerung. Portalvenös, also eine Kontrastierung der Portalvenen der Leber, liegt etwa 55 bis 70 sec nach Kontrastmittelgabe vor. Hier müssen Sie also eigentlich berechnen, wann dieser Zeitpunkt nach Ihrer arteriellen Spirale vorliegt. „Eigentlich“, weil das natürlich im Prinzip nur einmal beim Festlegen der Programme in Zusammenarbeit mit Ihrem Radiologen gemacht wird. Wir rechnen es trotzdem einmal durch:

Die arterielle Spirale startet in etwa 15–20 sec nach Start der Kontrastmittelgabe, abhängig von der Kreislaufzeit des Patienten und der Flussrate der Kontrastmittelinjektion. Der Scan über die Leber dauert ca. 10 sec. Um jetzt die portalvenöse Spirale 70 sec nach Kontrastmittelstart zu beginnen, brauchen wir also eine Pause nach der arteriellen Spirale von etwa 40 sec.

Zur virtuellen Koloskopie (■ **Abb. 18.2a,b**) ist eine rektale Luftinsufflation oder CO₂-Insufflation notwendig. Klassische Indikation ist eine inkomplette endoskopische Koloskopie. Zur Beurteilung des gesamten Kolons ist eine gute Füllung des Darms bis zum Zökopol (also bis zum Blinddarm am Übergang zum Dünndarm) notwendig. Die Gabe von Butylscopolamin erleichtert dieses Vorhaben. Die ausreichende Füllung des Kolons überprüfen Sie am Topogramm. Sollte der Zökopol noch nicht luftgefüllt abgrenzbar sein, muss noch Gas nachgegeben werden. Die Untersuchung erfolgt sowohl

in Rücken- als auch in Bauchlage, um durch Stuhl oder Flüssigkeitsreste „verdeckte“ Darmabschnitte zumindest in einer Lageposition auch gasgefüllt beurteilen zu können. Die Untersuchung wird an speziellen Workstations ausgewertet. Dabei wird neben einem virtuellen Doppelkontrast ein virtuell-endoskopischer Blick auf die Kolonschleimhaut ermöglicht. Mit dieser Technik sind Polypen ab einer Größe von etwa 5 mm sehr gut zu detektieren. Eine intravenöse Kontrastmittelgabe ist nicht unbedingt erforderlich; es reicht eine Niedrigdosisuntersuchung, da zwischen Luft und Kolon ein sehr hoher Kontrast besteht, der auch im Niedrigdosisbereich gut dargestellt werden kann.

18.2.5 Kernspintomographie

Die Kernspintomographie hat ihre besondere Stärke in der Abklärung möglicher Differentialdiagnosen. So eignet sich die MRT der Leber mit einem leberspezifischen Kontrastmittel (Primovist [R]) dazu, Lebermetastasen oder primäre Lebertumore sehr sensitiv und spezifisch nachzuweisen oder auch auszuschließen (■ **Tab. 18.5**). Nachteil im Vergleich zur Computertomographie ist, dass man nicht mit einer Untersuchung das gesamte Abdomen abdecken kann, ohne auf z. B. differenzierte Diagnostik von Leber und Nieren oder Nebennieren zu verzichten. Bevor Sie eine Kernspintomographie im Abdominalbereich durchführen, ist es also unerlässlich, die klinischen Angaben zum Patienten und dessen Anamnese zu erheben. Nur dann können Sie eine MRT-Untersuchung durchführen, die auch die Fragestellung beantwortet. Einige Beispiele sind:

- Leber-MRT Primovist
- MR Sellink
- MR Rektum

➤ **Primovist ist gallengängig. Daher sollten bis zur Kontrastierung der Gallengänge T1-gewichtete Sequenzen gemessen werden. Erst mit Kontrastierung der Gallengänge kann man sicher sein, dass die Hepatozyten das Kontrastmittel angereichert haben und so zwischen z. B. Metastasen und Lebergewebe differenziert werden kann.**

Tab. 18.5 Untersuchungsprotokoll Leber MRT zum Ausschluss von Metastasen

Patientenvorbereitung	Metallteile, Scheckkarte, Schmuck ablegen lassen, je nach Kleidung Patientenhemd anziehen lassen
Positionierung	Rückenlage
Spule	Body-Array
Scanbereich	Gesamte Leber
Sequenzen/Wichtungen	T1w in-/opp-phase axial, T2w coronar, T1w 3D nativ und als KM-Dynamik nach 20 sec, 50 sec, 120 sec nach KM-Gabe, T2w FS axial, T1w axial 5 min nach KM-Gabe, T1w cor, axial DWI (atemgetriggert), T1w axial 10 min nach KM-Gabe, ggf. MRCP thick slices, T1w axial 15 min nach KM-Gabe, ggf. T1w axial 20 min nach
Kontrastmittel	Primovist 0,1 ml/kg KG

Tab. 18.6 Untersuchungsprotokoll MRT Sellink

Patientenvorbereitung	Metallteile, Schmuck, Scheckkarten etc. ablegen lassen. Ggf. Patientenhemd anziehen lassen
Positionierung	Rückenlage
Spule	Body-Array
Scanbereich	Gesamter Dünndarm und Kolon
Sequenzen/Wichtungen	T2w FS coronar, T2w axial, T1w in-/opposed phase, T1w FS coronar, HASTE axial, nach Kontrastmittelgabe T1w FS coronar, axial und sagittal
Kontrastmittel	2l Sorbitol-/Mannitol-Lösung oral 0,5-1fache Dosis (0,1 ml/kgKG bei 0,05 mmol/ml)

Tab. 18.7 Untersuchungsprotokoll MRT Rektum bei Rektumkarzinom

Patientenvorbereitung	Metall, Schmuck, Scheckkarte etc. ablegen lassen. Hose und Unterhose ablegen lassen zur rektalen Füllung, Patientenhemd anbieten
Positionierung	Rückenlage
Spule	Body-Array-Spule
Scanbereich	Kleines Becken
Sequenzen/Wichtungen	T2w sagittal, T1w sagittal, T2w paraaxial auf den Tumor gekippt (Planung anhand der sagittalen Sequenzen), T1w paraaxial auf den Tumor gekippt
Kontrastmittel	Nur bei Rezidivdiagnostik hilfreich

Der MR-Sellink (■ Tab. 18.6) hat den konventionellen Sellink, auch Enteroklysma genannt, abgelöst. Die Untersuchung dient der Beurteilung des Dünndarms insbesondere bei chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen wie Morbus Crohn und Colitis ulcerosa. Beide Erkrankungen gehen mit Diarrhoen einher und betreffen vor allem jüngere Erwachsene. Da die Erkrankungen chronisch sind und daher im Laufe der Krankheitsgeschichte meh-

rere Untersuchungen erforderlich sind, bietet sich hier die MRT als Untersuchungsmodalität an. Beim konventionellen Sellink wurde über eine Sonde, die über die Nase bis in das Jejunum durchleuchtungs-gesteuert eingebracht wurde, Barium und Methylcellulose, ein negatives Kontrastmittel, eingebracht. Dann wurde unter Durchleuchtung der Dünndarm in Doppelkontrasttechnik beurteilt. Sie sehen, das Wort Durchleuchtung kommt oft vor. Die Unter-

■ Tab. 18.8 Vorgehen bei Speiseröhrenzintigraphie

Patientenvorbereitung	3 h nüchtern, bei Achalasie 12 h nüchtern
Aktivität	Je 10 MBq ^{99m} Tc-Zinnkolloid, ^{99m} Tc-Schwefelkolloid, ^{99m} Tc-MAA oder ^{99m} Tc-DTPA in 10 ml Wasser oder 5-10 g halbfester Nahrung
Applikation	3-6 Boli in 10 ml Wasser über einen Strohhalm 3-6 Boli in halbfester Nahrung
Akquisition	Sitzend oder liegend, dynamische Akquisition, 1-2 frames/sec, LEHR oder LEAP, mind. 64 * 64 Matrix
Auswertung	ROI-Analyse, condensed images, visuell
Normwerte	Nach 12 s sollten 91 % der Flüssigkeit und 85 % der halbfesten Nahrung im Magen angelangt sein (Tatsch)

suchung war nicht nur sehr unangenehm für die Patienten, sondern auch sehr strahlenintensiv. Für den MRT-Sellink wird heutzutage in aller Regel Mannitol- oder Sorbitol-Lösung verwendet, die der Patient über einen Zeitraum von 1 bis 2 Stunden vor der Untersuchung trinken muss. Hierbei sollte eine Menge von 2 Litern angestrebt werden, um eine ausreichende Distension des Dünndarms zu erreichen. Zur Abgrenzbarkeit von akut entzündlichen Veränderungen wird die Untersuchung kontrastmittelgestützt durchgeführt.

Eine weitere Standarduntersuchung im MRT des Gastrointestinaltraktes ist das MRT des Rektums bei Rektumkarzinom (■ Tab. 18.7). Hier wird zunehmend die Therapie vom MRT-Befund abhängig gemacht. Wichtig dabei ist die Beurteilung einer Tumordinvasion in die mesorektale Faszie, die das Fettgewebe um das Rektum umgibt.

Vor der Untersuchung des Rektums muss der Enddarm mit einem Klysma gereinigt werden, da für die Untersuchung eine rektale Kontrastmittelgabe erfolgt. Besonders geeignet hierfür ist Ultraschallgel (ca. 150–200 ml), da das vom Patienten wesentlich besser gehalten werden kann als Wasser.

Der Tumor lässt sich T1-gewichtet hypointens abgrenzen. Auch die Infiltration in die Umgebung stellt sich hypointens in T1 dar. Daher sollten diese Sequenzen nicht fettgesättigt akquiriert werden, da dadurch Fett und Tumor nicht mehr so gut voneinander differenziert werden können.

18.3 Nuklearmedizinische Diagnostik

U. Blum

18.3.1 Oesophagus

Die **Speiseröhrenzintigraphie** ist eine seltene Untersuchung. Die Endoskopie, radiologische Funktionsuntersuchungen mit Kontrastmitteln und andere Funktionsuntersuchungen (ph-Metrie, Oesophagusmanometrie) erlauben in den meisten Fällen eine sichere Diagnostik.

Bei Schluckbeschwerden, bei denen eine Engstelle anderweitig ausgeschlossen werden konnte, sowie bei verschiedenen Kollagenosen oder neuromuskulären Erkrankungen, kann die Szintigraphie weitere Informationen liefern.

Die Untersuchung erfolgt in jeweils 3–6 Schluckakten, sowohl mit radioaktiv markiertem Wasser, nachfolgend dann mit radioaktiv markierter, halbfester Nahrung (■ Tab. 18.8, es gibt keine Standardmahlzeit, häufig wird Babybrei, Rührei oder Hafer-schleim verwendet). Geschluckt wird jeweils mit einem Abstand von 30 s, Schluckakte dazwischen sollten vermieden werden.

Die Strahlenexposition liegt bei ca. 2 mSv pro Untersuchung.

■ **Tab. 18.9** Vorgehen bei der Magenszintigraphie

Patientenvorbereitung	Nüchtern, Nikotinkarenz, ggf. Tabletten aussetzen
Aktivität	In Abhängigkeit der Untersuchung Flüssig: 20–40 MBq ^{99m}Tc -DTPA, -MAA oder Nanokolloid Halbfest: 70 MBq ^{99m}Tc -Zinnkolloid in 400 ml Haferschleim Fest: 40–100 MBq ^{99m}Tc -DTPA, -MAA oder Nanokolloid in Testmahlzeit (gekochtes Ei, Rührei)
Applikation	Oral
Akquisition	Dynamische Sequenz über 60–90 min, 20 s/frame; 64 * 64 Matrix
Besonderheiten	Sollen sowohl flüssige als auch feste Phase in einer Untersuchung beurteilt werden, kann die feste Phase mit ^{111}In -DTPA markiert werden.
Auswertung	ROI-Technik

■ **Tab. 18.10** Vorgehen bei der Leberperfusionsszintigraphie

Patientenvorbereitung	Keine
Aktivität	400 MBq ^{99m}Tc -DTPA in 0.5 ml
Applikation	i. v., Bolusinjektion
Akquisition	Dynamische Sequenz, 200 Bilder/s, 128 * 128 Matrix
Besonderheiten	Zweigipfelter Verlauf. Die erste Phase zeigt die arterielle Phase, die zweite Phase die portal-venöse Phase
Auswertung	Erstellung einer Zeit-Aktivitätskurve

18.3.2 Magen

Magenfunktionsuntersuchung

Die meisten Erkrankungen des Magens werden mittels endoskopischen Untersuchungen entdeckt. Die Szintigraphie wird bei Patienten mit veränderter Magenpassage (z. B. verzögert im Rahmen eines Diabetes mellitus oder zu rascher Passage) nachgefragt.

Die Untersuchung erfolgt entweder mit radioaktiv markierter Flüssigkeit, halbfester oder fester Mahlzeit (■ Tab. 18.9). Die verschiedenen Techniken und Mahlzeiten sind bis dato nicht standardisiert. Daher variieren sowohl Testmahlzeiten, als auch die Normwerte der Magenentleerung stark.

Normal ist eine Halbwertszeit von ca. 30 min für Flüssigkeiten sowie von ca. 90–120 min für feste Mahlzeiten.

Magenkarzinom, Gastrointestinale Stromatumore (GIST)

Die ^{18}F -FDG-PET/CT zeigt im Rahmen des Stagings des Magenkarzinoms nur eine eingeschränkte Sensitivität. Insbesondere Lymphknotenmetastasen sind nur eingeschränkt beurteilbar.

Bei den GIST-Tumoren findet sich eine kräftige Anreicherung, hier wird die PET/CT insbesondere hinsichtlich eines Ansprechens der Tumore auf die Therapie genutzt.

18.3.3 Leber

Leberperfusionsszintigraphie (■ Tab. 18.10)

Ziel ist die Abschätzung des arteriportalen Durchblutungsverhältnisses.

Normal ist ein Anteil der arteriellen Durchblutung von 20–40 %.

Tab. 18.11 Vorgehen bei der Choleszintigraphie

Patientenvorbereitung	2–4 h nüchtern; 4 h vorher keine Opiate
Aktivität	50–200 MBq ^{99m} Tc-DISIDA oder -BRIDA, Kinder 2–7 MBq/kg Körpergewicht, Minimum 15–20 MBq
Applikation	i. v.
Akquisition	Sequenz 3 s/Bild über 1 min + 5 min/Bild über 90 min bei rein visueller Auswertung (Kuwert) Sequenz 3 s/Bild über 2 min + 15 s/Bild über 60 min bei quantitativer Auswertung (Kuwert) Einstrom: Sequenz 9 Bilder/Frame á 2–3 s (LL) Parenchymphase: statische Aufnahme in 4 Projektionen (Ventral, dorsal, rechts anterior oblique, ???) 500 kCts/Bild (LL) Sequenz: 2 min/Bild/frame von ventral über 60 min bzw. bis Aktivität in der Gallenblase oder im Dünndarm nachweisbar ist (LL) LEAP oder LEHR
Besonderheiten	Addition der 15 s Bilder zur 2 Minuten Bildern zur visuellen Beurteilung Spätaufnahmen je nach Fragestellung
Auswertung	Visuell und quantitativ

Tab. 18.12 Normbereiche. (Nach Kuwert)

Funktionsparameter	Normbereiche
„time to peak“	6–12 min.
Exkretionshalbwertszeit	10–20 min.
Hepatozelluläre Extraktionsfraktion	95–100 %
Erscheinung im Ductus choledochus	6–14 min.
Erscheinung in der Gallenblase	10–20 min.
Erscheinung im Dünndarm	12–28 min.

Hepatobiliäre Funktionsszintigraphie, Choleszintigraphie (Tab. 18.11)

Ziel ist eine Darstellung der Gallenproduktion und des Gallenausscheidungssystems einschließlich Darstellung der Gallenblase. Hauptfragestellungen sind die angeborenen Defekte des Gallengangs-systems (z. B. Atresie), bzw. erworbene Defekte (z. B. Leckage nach Operation), der Nachweis einer fokal nodulären Hyperplasie (zusammen mit einer Blut-poolszintigraphie) und andere Veränderungen des Gallengangs-systems. Es werden je nach Fragestellung verschiedene Protokolle angewendet, z. T. auch Spätaufnahmen nach 3–24 Stunden angefertigt.

Die Dosierung des Radiopharmazeutikums richtet sich nach dem Bilirubinwert des Patienten, je höher dieser ist, desto höher die applizierte Aktivität.

Je nach Fragestellung können verschiedene Maßnahmen sinnvoll sein:

- Langes Fasten, parenterale Ernährung, schwere Erkrankungen: Gabe von Ceruletid 30–60 min vor der Untersuchung
- Akute Cholezystitis, fehlende Gallenblasendarstellung nach 40–60 min: Gabe von Morphin, weitere Aufnahme über 30 min.
- Reizmahlzeit mittels fetter Speisen: Messung der Gallenblasenejektionsfraktion
- Stimulation mit Ceruletid: Nach maximaler Gallenblasenfüllung, weitere Aufnahme über 20–30 min zur Bestimmung der Gallenblasenejektionsfraktion.
- V. a. Gallengangsatresie: Phenobarbital über 3–5 Tage vor der Untersuchung zur Steigerung der biliären Ausscheidung.

Tab. 18.12 zeigt die Normwerte.

Leberblutpool-Szintigraphie (Tab. 18.13)

Die Blutpool-Szintigraphie kann zusammen mit der hepatobiliären Szintigraphie eine Unterscheidung bei verschiedenen Leberauffälligkeiten (Häm-angiom, fokal noduläre Hyperplasie, Metastasen, primäre Lebertumore) bieten.

Mögliche Differentialdiagnosen zeigt Tab. 18.14.

■ **Tab. 18.13** Vorgehen bei Leberblutpool-Szintigraphie

Patientenvorbereitung	30 min vor der Untersuchung Schilddrüsenblockade mit 400 mg Perchlorat
Aktivität	In-vivo-Markierung: 20 µg / kg KG Zinnpolyphosphat i. v., nach 30 min 400 MBq ^{99m} Tc-Per- technetat In-vivo/In-Vitro-Markierung: 20 µg / kg KG Zinnpolyphosphat i. v., nach 30 min 10 ml ve- nöses Blut in heparinisierter Spritze abnehmen. Inkubation des Vollblutes mit 550 MBq ^{99m} Tc-Per technetat über 20 min auf dem Schüttler, danach Reinjektion
Applikation	i. v.
Akquisition	Sequenz 1 s/Bild über 1 min von ventral (LL) Statische Aufnahmen ap, pa und rechts ventral mit jeweils 500-1000 kCts (LL) Spätaufnahme < 30 min p. i. in den gleichen Projektionen (LL) SPECT bei kleinen Herden (< 3 cm) (LL) LEHR
Auswertung	Visuell

■ **Tab. 18.14** Differentialdiagnostik von Raumforderungen der Leber (Schober, Nuklearmedizin 3. Auflage und Kuwert, Nuklearmedizin 4. Auflage)

	Perfusion	Hepatobiliäre Szintigraphie		Blutpoolszintigraphie	
		Uptake	Trapping	Filling-in	Blutpool
Hämangiom	Normal	-	-	Möglich	+ / +++
FNH	+ / +++	Normal	+ / +++	-	Normal
HCC/HCA	Variabel	Gering	Möglich	-	Variabel
Metastase	Variabel	-	-	-	Normal

Leberperfusion mit MAA, Berechnung eines Leber-Lungen-Shunts

(■ Tab. 18.15)

Bei bösartigen Erkrankungen der Leber (HCC, HCA, Metastasen) sind heute verschiedene nicht operative Therapieoptionen gegeben. Hierzu zählen die Chemotherapie (ggf. auch intrahepatisch als TACE), die Thermoablationen und die SIRT.

Insbesondere vor einer SIRT muss eine MAA-Untersuchung der Leber erfolgen, einschließlich der Berechnung eines Leber-Lungen-Shunts.

Die Auswertung erfolgt visuell, hierbei sollte insbesondere auf extrahepatische Nuklidanreicherungen geachtet werden. Bei nachweisbaren intra-abdominalen Anreicherungen ist ggf. eine Wiederholung der Angiographie mit Verschluss weiterer Kollateralgefäße (ggf. chirurgische Intervention) indiziert, zudem zwingend die Wiederholung der MAA-Leberuntersuchung.

Die Berechnung des Lungen-Shunts erfolgt quantitativ über folgende Formel:

$$\frac{\text{Counts}_{\text{Lunge}}}{\text{Counts}_{\text{Lunge}} + \text{Counts}_{\text{Leber}}} \times 100$$

$$= \text{Lungenshunt (\%)}$$

mit Angabe des Mittelwertes aus beiden Projektionen.

Lebertumore und PET/CT

- **Hepatozelluläres Karzinom (HCC):** Hepatozelluläre Karzinome zeigen ein unterschiedliches Verhalten bzgl. einer FDG-Speicherung. Bisher gibt es keine generelle Empfehlung für eine PET/CT.
- **Cholangiozelluläres Karzinom (CCC):** Cholangiozelluläre Karzinome zeigen in den meisten Fällen eine deutlichere Anreicherung als ein HCC. Fernmetastasen lassen sich relativ sicher

■ Tab. 18.15 Vorgehen bei SIRT

Patientenvorbereitung	30 min vor der Angiographie Schilddrüsenblockade mit 400 mg Perchlorat Zunächst Angiographie der Leber mit Verschluss vorhandener Kollateralgefäße, Katheter belassen
Aktivität	150 MBq ^{99m}Tc -MAA (< 1.000.000 Partikel)
Applikation	Intraarteriell über den liegenden Katheter in der Leber Ggf. Aufteilung der Aktivität nach Gefäßversorgung des Tumors
Akquisition	Statische Aufnahmen ap, pa des Abdomens oder Ganzkörperszintigraphie Statische Aufnahmen ap, pa des Thorax einschl. der Leber SPECT/(CT) des Abdomens LEHR
Auswertung	Visuell, quantitativ

■ Tab. 18.16 Vorgehen bei Szintigraphie mit ^{99m}Tc -markierten Erythrozyten

Patientenvorbereitung	30 min vor der Untersuchung Schilddrüsenblockade mit 400 mg Perchlorat
Aktivität	In-vitro-Markierung von Erythrozyten: – Ausreichende Menge Patientenblut abnehmen (heparinisiertes Röhrchen) – Markierung mit Zinnpolyphosphat nach Herstellerangabe – Inkubation über 30 min oder nach Herstellerangabe – 700 MBq ^{99m}Tc -Pertechnetat zugeben Auf Markierungsausbeute testen (> 85 %), dann – Reinjektion Die In-Vivo-Markierung oder die In-Vivo/In-Vitro-Markierung ist in Notfällen möglich, die Markierungsausbeute ist jedoch deutlich schlechter als bei der In-vitro-Markierung
Applikation:	i. v.
Akquisition	Dynamisch 1 min/Bild über 60 min von ventral (Kuwert) Danach statische Aufnahmen von ventral alle 15–30 min bis maximal 24 h p. i. Ab Blutungsnachweis dynamische Aufnahme über 30–60 min 128 * 128 Matrix
Auswertung	Visuell

darstellen, regionale Lymphknotenmetastasen dahingegen nur eingeschränkt.

■ **Metastasen:** Viele Primärtumore metastasieren in die Leber. Lediglich für Metastasen des Darmkrebses gibt es ausreichende Studien. Hier kommt der PET/CT insbesondere bei der Therapieplanung ein hoher Stellenwert zu. Eine einzelne Lebermetastase ist prinzipiell mittels operativer Resektion heilbar. Hier zeigte die PET/CT in den Studien meistens eine höhere Sensitivität als die CT oder MRT. Zudem können bisher unbekannte extrahepatische Metastasen aufgedeckt werden. Auch im Rezidivfall erlaubt die PET/CT aufgrund

der veränderten Anatomie der Leber eine genauere Diagnostik; zudem ist ein Therapiemonitoring bei Chemotherapie frühzeitig möglich.

18.3.4 Darm

Blutungsquellensuche

Intraabdominelle Blutungsquellen sind in endoskopisch erreichbaren Abschnitten gut nachweisbar und ggf. auch direkt therapierbar. Jedoch lässt sich ein großer Anteil des Dünndarmes endoskopisch nicht erreichen. Hier kann die Szintigraphie mit

■ **Tab. 18.17** Vorgehen bei Szintigraphie zum Nachweis eines Meckel-Divertikels

Patientenvorbereitung	Kein Irenat! Nüchtern 3-6 h
Aktivität	185 MBq ^{99m}Tc -Pertechnetat
Applikation	i. v.
Akquisition	Dynamisch 1 min/Bild über 30 min von ventral (Kuwert) Ggf. seitliche oder schräge Aufnahmen 128 * 128 Matrix
Auswertung	Visuell. Üblicherweise Darstellung ab der 10.–20. min p. i., zeitgleich mit der Magen-schleimhaut

■ **Tab. 18.18** Szintigraphie mit ^{111}In -Ctreotid

Patientenvorbereitung	Absetzen von Somatostatin-Analoga
Aktivität	111 MBq ^{111}In -Octreotid
Applikation	Langsam i. v.
Akquisition	Ganzkörperszintigraphie und SPECT 4 h und 24 h p. i. Ggf. statische Aufnahmen, Spätaufnahmen bis 48 h p. i. Mittelenergetischer Kollimator
Auswertung	Visuell, ggf. ROI-Technik
Besonderheiten	Abführende Maßnahmen zwischen den Untersuchungen Hohe Strahlenbelastung mit 12 mSv

^{99m}Tc -markierten Erythrozyten eine Blutung ab 0,05–1,0 ml/min nachweisen (■ [Tab. 18.16](#)).

Meckel-Divertikel

Bei einem Meckel-Divertikel handelt es sich um eine Fehlbildung des Dünndarmes, in bis zu 60 % der Fälle findet sich in einem Meckel-Divertikel versprengte Magenschleimhaut. In vielen Fällen kann ein Meckel-Divertikel klinisch unauffällig sein, es können sich jedoch auch Entzündungen ausbilden oder Blutungen auftreten. Üblicherweise ist das Meckel-Divertikel einer Endoskopie nicht zugänglich. Heute wird bei einem entsprechenden Verdacht oft auf einen szintigrafischen Nachweis verzichtet und sofort laparoskopisch operiert. ■ [Tab. 18.17](#) zeigt das szintigraphische Vorgehen.

Darm-Karzinome Dünndarmkarzinome

Dünndarmkarzinome sind seltene Tumore; hierbei handelt es sich häufig um neuroendokrine Tumore. Diese Tumore besitzen i. d. R. vermehrt Somatostatinrezeptoren, die der nuklearmedizinischen

Diagnostik und Therapie zugänglich sind. Hierbei kann entweder ^{111}In -Octreotid eingesetzt werden (■ [Tab. 18.18](#)) oder im PET/CT (PET/MRT) radioaktiv markiertes ^{68}Ga -Somatostatinanaloga (■ [Tab. 18.19](#)), meistens DOTA-TOC; seltener DOTA-NOC, oder DOTA-TATE. Eine ^{18}F -FDG-PET/CT ist nur bei schlecht differenzierten, schnell wachsenden Tumoren geeignet.

In Abhängigkeit der Befunde kann im Nachgang eine nuklearmedizinische Therapie mit radioaktiv markierten (^{90}Y trium oder ^{177}Lu tetium) Somatostatin-Analoga erfolgen.

Kolorektale Karzinome

Der Darmkrebs ist bei Männern und Frauen die zweithäufigste bösartige Erkrankung (Krebsregister 2002). Am häufigsten betroffen ist das Rektum, seltener Sigma und Coecum. Die Primärdiagnostik erfolgt i. d. R. endoskopisch.

Die weiteren Staging-Untersuchungen beinhalten die Sonographie (Leber und Lymphknotenstatus), die CT (Lunge, Lymphknoten, Leber) und die MRT (Lymphknoten, Leber).

■ Tab. 18.19 Szintigraphie mit ⁶⁸Ga-Somatostatinanaloga

Patientenvorbereitung	Absetzen von Somatostatin-Analoga, nicht nüchtern
Aktivität	100-150 MBq ⁶⁸ Ga-Somatostatin-Analoga
Applikation	i. v.
Akquisition	20–60 min p. i. 3–4 min/Bettposition
Auswertung	SUV-Bestimmung
Besonderheiten	Nur im Rahmen eines Heilversuches, da das Radiopharmakon nicht zur Diagnostik zugelassen ist Hohe physiologische Aktivität in Leber, Milz und Nieren Strahlenbelastung ca. 2-3mSv

■ Tab. 18.20 Vorgehen bei SeHCAT

Patientenvorbereitung	Nüchtern ggf. Medikamente absetzen
Aktivität	600 kBq ⁷⁵ Se-Homotaurocholsäure in Kapselform
Applikation	Oral
Messung	Ganzkörperzähler, alternativ mit unkollierter Gammakamera, Aufnahme von ventral, 60 cm Abstand 4-6 h und 7 d nach Aktivitätsgabe
Auswertung	Retentionsfraktion bestimmen (Counts Gallenblase * 100)/Counts Gesamtkörper (Count Gesamt 7 Tage * 100)/Counts Gesamt 4-6 h
Strahlenbelastung	Ca. 0,2 mSv

Die PET/CT besitzt eine 1a-Indikation in der Rezidivdiagnostik, sowie eine 1b-Indikation im Therapiemonitoring.

Einschränkungen bestehen bei Veränderungen, deren Durchmesser kleiner ist als das zweifache maximale Auflösungsvermögen des PET-Scanners (Partialvolumeneffekt). I. d. R. sind diese Läsionen mit einem Durchmesser kleiner 10 mm.

18.3.5 Pankreas

Die Pankreasdiagnostik ist eine Domäne der endoskopischen Sonographie. In unklaren Fällen kann die Nuklearmedizin als weiterführende Diagnostik eingesetzt werden.

Insbesondere kleine Pankreaskarzinome lassen sich in der FDG-PET/CT mit einer relativ hohen

Spezifität und Sensitivität nachweisen, auch bei der Diagnostik von Fernmetastasen und dem Therapiemonitoring ist die PET/CT sinnvoll.

Bei neuroendokrinen Pankreastumoren lassen sich Tumore ab 2 cm mit großer Sicherheit mit ¹¹¹In-Octreotid nachweisen. In der PET/CT stehen hier mit ⁶⁸Ga-markierte Somatostatin-Analoga zur Verfügung, hierbei zeigt sich eine noch höhere Sensitivität der Diagnostik. Wenn die neuroendokrinen Tumore eine Mehranreicherung zeigen, kann prinzipiell auch eine Therapie mit radioaktiv markierten (⁹⁰Yttrium oder ¹⁷⁷Lutetium) Somatostatin-Analoga erfolgen.

■ **Tab. 18.21** Wertigkeit der therapeutischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	Durchleuchtung/ Angiographie	CT	MRT	Nuk	PET
Kolon-Ca	N	N	N	P*	N	N	N
M. Crohn	P	N	N	N	P	N	N
Blutungsquellensuche bei GI-Blutung	N	N	W*	P	N	W	N
Lebermetastasen	P	N	N	P	W**	W***	W
Neuroendokrine Tumore/GIST	N	N	N	P	N	N	P
Choledocholithiasis	N	N	P****	N	W	N	N

N = Nicht indiziert; P = Primärdiagnostik; W = Weiterführende Diagnostik

P* Bei inkompletter Koloskopie kann mit einer virtuellen Koloskopie der gesamte Darm vor der notwendigen operativen Therapie beurteilt werden. Ein Zweitkarzinom würde eine erhebliche Änderung des operativen Vorgehens nach sich ziehen.

W* In therapeutischer Absicht bei CT-morphologisch nachgewiesener Blutung

W** Das Primovist-MRT ist das sensitivste Verfahren zum Ausschluss einer Leberfilialisierung

W*** Nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie im Rahmen einer SIRT-Behandlung (siehe Therapeutische Möglichkeiten)

P**** ERCP mit der Möglichkeit der Papillotomie und Steinextraktion

18.3.6 Resorptionstest

⁷⁵Selen-Homotaurocholsäure-Test (SeHCAT)

Der SeHCAT erlaubt eine Bestimmung der Gallensäureaufnahme (■ Tab. 18.20). Die Rückaufnahme der Gallensäure im unteren Dünndarmanteil (terminales Ileum) kann aus verschiedenen Ursachen gestört sein, z. B. im Rahmen eines M. Crohn (eine entzündliche Darmerkrankung), einer Laktosetoleranz, nach einer Operation oder einer Strahlentherapie. Die Patienten leiden an heftigen Durchfällen, z. T. ist die Fettaufnahme gestört.

Normal ist eine Ausscheidungshalbwertszeit von 2,5 Tagen.

Nach 6 Stunden sollten ca. 80 % der Aktivität in der Gallenblase sichtbar sein.

Nach 7 Tagen sollte die Aktivität noch > 10 % betragen.

Weitere Testverfahren

Der Schilling-Test ist nicht mehr aktuell (die nötigen Kapseln gibt es nicht mehr im Handel).

18.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

■ Tab. 18.21 zeigt den Einsatz der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.

18.5 Therapeutische Möglichkeiten

18.5.1 Radiologische Therapie

C. Vockelmann

CT-Thermoablation

Die Thermoablation, die Sie bereits im vorigen Kapitel zum respiratorischen System (► Kap. 17) kennengelernt haben, wurde vor Einsatz in der Lunge vor allem in der Leber als therapeutisches Verfahren genutzt. Bei einigen Erkrankungskonstellationen ist das Verfahren heutzutage sogar mittel der ersten Wahl, so z. B. bei der Behandlung eines hepatozellulären Karzinoms (HCC). Die Durchführung

ist letztlich genauso, wie bei der Thermoablation der Lungen. Allerdings muss bei der Planung und Durchführung der Ablation darauf geachtet werden, dass zentrale Gallengänge, Gallenblase und der Magen-Darm-Trakt ausreichend Abstand zum geplanten Ablationsareal aufweisen. Diese Strukturen sind sehr hitzeempfindlich. Als Komplikation drohen dann ein Galleleck, eine Cholecystitis oder eine Hohlorganperforation durch einen Hitzeschaden.

Angiographie

Auch angiographisch können Lebertumoren behandelt werden. Dieses Verfahren, eine sog. transarterielle Chemoembolisation oder TACE (► Abschn. 18.3.2), wird bei bestimmten Tumorentitäten wie Metastasen von kolorektalen Karzinomen und primären Lebertumoren eingesetzt, wenn eine Thermoablation aufgrund der Tumorausdehnung nicht möglich ist.

Zur Behandlung der Tumore werden die tumorversorgenden Gefäße in der Leber möglichst selektiv mit einem Mikrokatheter sondiert. Über diesen werden dann Partikel, die mit einem Chemotherapeutikum beladen sind, in den Tumor gegeben. Die Partikel führen zu einem Verschluss der Gefäße im Tumor. Das Chemotherapeutikum wirkt überwiegend lokal und gelangt nur in geringer Konzentration in den systemischen Blutkreislauf. Aus diesem Grund sind die Nebenwirkungen einer lokalen Chemotherapie in aller Regel sehr viel geringer, als bei einer systemischen Therapie. Besonders effektiv ist das Verfahren bei stark arteriell hypervaskularisierten Metastasen.

Eine Weiterentwicklung der TACE stellt die SIRT dar. SIRT bedeutet „Selektive interne Radiotherapie“. Daraus können Sie schon ableiten, dass dieses Verfahren kein rein radiologisches Verfahren ist. Bei der SIRT werden an Glas- oder Kunstharzmikrosphären gebundene β -Strahler statt eines Chemotherapeutikums in den Tumor gegeben. Diese haben eine mittlere Reichweite im Gewebe von 2,5–3,5 mm und zerstören die Tumorzellen. Bevor eine solche Therapie durchgeführt wird, muss allerdings mit einer Testinjektion mit MAA simuliert werden, welche Körperteile und Organe durch die geplante Therapie mitbetroffen werden würden. Die Verteilung der Strahlung wird dann mit einem sog. MAA-Scan überprüft. Eine zu große Strahlung in der Lunge oder im Magen-Darm-

Trakt führt zu nur sehr schwer beherrschbaren Komplikationen wie einer Strahlenpneumonitis oder einem Strahlenulkus. Die Behandlung erfolgt also immer zweistufig mit einer Testinjektion und nach Auswertung der Testinjektion in einer zweiten Sitzung mit der Injektion des β -Strahlers.

Da der β -Strahler ein offenes Nuklid darstellt, wird diese Therapie in einer Zusammenarbeit zwischen interventionell-tätigem Radiologen und einem Nuklearmediziner durchgeführt, der für die Handhabung des Nuklids verantwortlich ist.

18.5.2 Strahlentherapie

D. Dohr

Ösophaguskarzinom

Ursachen

Die Ursachen bei Speiseröhrenkrebs sind unterschiedlich, je nachdem, ob das Karzinom in der oberen oder unteren Hälfte des 40 cm langen Ösophagus lokalisiert ist. Der typische Patient eines höher gelegenen Tumors ist starker Raucher, trinkt regelmäßig hochprozentigen Alkohol, betreibt wenig Mundhygiene und hat eher Normal- bis Untergewicht. Patienten mit einem Karzinom nahe des Magens sind eher adipös, rauchen zwar häufig ebenfalls, als entscheidend für die Krebsentwicklung sieht man aber den ständigen und übermäßigen Kontakt der Schleimhaut mit der Salzsäure des Magens an (Refluxkrankheit).

Symptome

Hierzu zählen Schmerzen, Regurgitation (das Essen kommt unverdaut wieder hoch, also nicht im Sinne von Erbrochenem), Schluckbeschwerden bis Schluckunvermögen und Gewichtsverlust.

Diagnostik und Histologie

Eine Spiegelung (Ösophagoskopie) mit Biopsie sichert die Diagnose. Manchmal wird in dieser Untersuchung auch eine Sonographie vorgenommen (EUS, endoskopischer Ultraschall), um zu überprüfen, wie tief bzw. in welche Wandschichten der Tumor bereits hineingewachsen ist und ob Lymphknoten befallen sind. Im kranialen Ösophagus entwickelt sich das Plattenepithelkarzinom, im kauda-

len Abschnitt das Adenokarzinom. Zum Nachweis / Ausschluss einer Ausbreitung in Lymphknoten und andere Organe empfiehlt sich das FDG-PET-CT.

Radio-onkologische Therapiemöglichkeiten

Die Empfehlungen für die Behandlung des Karzinoms am ösophago-gastralen Übergang sind in den S3-Leitlinien für den Magen miteingeschlossen. Eine eigene S3-Leitlinie für das Ösophaguskarzinom ist in Bearbeitung und soll im Juni 2015 fertig gestellt sein.

Eine alleinige Bestrahlung ist längst nicht so wirksam wie die Kombination mit einer Chemotherapie. Selbst wenn man zum Ausgleich mit höherer Dosis bestrahlt (64 statt 50 Gy, Herskovic 1992 NEJM), ist die Kombinationsbehandlung in Tumorkontrolle und Überleben überlegen.

Eine anschließende Operation kommt nur in infrage, wenn die Tumorausdehnung begrenzt, der Patient körperlich in einem guten Zustand und die Lage des Karzinoms günstig ist. Das befallene Stück im Speiseröhrenschlauch wird herausgeschnitten und die Enden wieder zusammen genäht. Dadurch rutscht der Magen aus der Bauchhöhle über das Zwerchfell in die Brusthöhle (Magenhochzug). Wenn das Karzinom sehr nahe Richtung Kehlkopf liegt, ist diese Methode nicht möglich, und es bleibt bei einer definitiven Radiochemotherapie.

Die intrakavitäre Brachytherapie wird nicht als Standardmethode eingesetzt, nur innerhalb von Studien oder in hochspeziellen Einzelfällen.

RT-Technik und Risiko-Organ

Es wird konformal über mehrere Felder bestrahlt oder IMRT, VMAT, Tomotherapie angewandt. Risiko-Organ sind Lunge, Herz und Rückenmark.

Vorbereitung und Lagerung

Bei kleinen, im Planungs-CT nicht erkennbaren Tumoren, kann es von Vorteil sein, diese zur genauen Einstellung des Bestrahlungsfeldes vom Gastroenterologen mit einem kleinen Metallclip markieren zu lassen, vor allem für den Boost.

Die Lagerung erfolgt auf dem Rücken. Bei kranialer Tumorlokalisation wird eine Kopf-Hals-Maske angelegt, die günstigerweise die Schultern mit einschließt. Bei kaudaler Tumorlokalisation ist eine Maske nicht nötig, dafür werden die Arme

über den Kopf genommen, damit man frei ist bei der Wahl der Gantrywinkel.

Gesamtdosis und Fraktionierung

Die empfohlene Bestrahlungsdosis liegt zwischen 50 und 60 Gy bei einer Fraktionierung von 5×2 Gy / Woche oder 5×1.8 Gy / Woche.

Akute Nebenwirkungen

Die Entzündung der Speiseröhrenschleimhaut und bei hoher Tumorlokalisation auch der Rachen Schleimhaut verursacht Wund- und Schluckschmerzen, die sich unter zusätzlicher bakterieller oder viraler Infektion verstärken können. Die Gefahr besteht, dass die Nahrungsaufnahme eingeschränkt wird und der Patient an Körpergewicht verliert. Unterstützende (supportive) Maßnahmen schaffen Erleichterung.

Prognose

Im frühen Stadium liegt das 2-Jahres-Überleben bei 80 %, mit fortschreitender Erkrankung bei 50–30 %.

Magenkarzinom

Ursachen

Die Ursachen sind nicht vollständig geklärt. Als Risikofaktoren gelten erbliche Anlagen, Ernährung mit gepökelten, gegrillten und geräucherten Speisen, Gifte von Schimmelpilzen (Aflatoxine), die chronische Entzündung der Magenschleimhaut, Vorerkrankungen des Magens (Magenpolypen, perniziöse Anämie, Magenoperation wegen chronischem Magengeschwür, Morbus Ménétrier) und ein übermäßiger Nikotin- und Alkoholkonsum.

Symptome

Hierzu zählen Oberbauchschmerzen, Appetitlosigkeit, Völlegefühl, Erbrechen und Gewichtsverlust. Sie sind also eher unspezifisch. Häufig treten auch erst dann Symptome auf, wenn das Karzinom weiter fortgeschritten ist.

Diagnostik (außer Röntgen) und Histologie

Eine Spiegelung (Gastroskopie) mit Biopsie sichert die Diagnose. Zusätzliche Information kann eine im gleichen Untersuchungsgang durchgeführte Sonographie liefern (► Kap. 7). Die WHO teilt in 8 ver-

schiedene Gewebetypen ein, vorherrschend ist das Adenokarzinom.

Radio-onkologische Therapiemöglichkeiten

Die Indikation zur Radiotherapie wird zurückhaltend gestellt. Sie erfolgt postoperativ in Kombination mit einer Chemotherapie im Falle eines fortgeschrittenen Primärtumors (T3, T4), ausgedehnten LK-Befalls oder bei R1-Operation. Da die gesamte Magenregion eingeschlossen und die Atembeweglichkeit berücksichtigt werden muss, ergeben sich große Zielvolumina.

RT-Technik

Es wird konformal über mehrere Felder bestrahlt oder IMRT, VMAT, Tomotherapie angewandt. Risiko-Organ ist vor allem die linke Niere, außerdem Leber, Dünndarm und evtl. Herz.

Vorbereitung und Lagerung

Hilfreich für die Bestrahlungsplanung kann das Gespräch mit dem Operateur sein, der vielleicht die Hochrisikobereiche (R1-Region, Sitz befallener LK) mit Clips markiert hat.

Die Lagerung erfolgt auf dem Rücken mit den Armen über dem Kopf, damit man frei ist bei der Wahl der Gantrywinkel.

Gesamtdosis, Fraktionierung

Die empfohlene Bestrahlungsdosis liegt zwischen 45 und 50.4 Gy, Fraktionierung 5×1.8 Gy / Woche.

Akute Nebenwirkungen

Die Patienten können während der Behandlung unter Unwohlsein, Appetitlosigkeit, Übelkeit, Völlegefühl, Aufstoßen, Erbrechen leiden. Da bereits durch die Magenoperation die Nahrungsaufnahme erschwert ist, besteht ein hohes Risiko für eine Kachexie (starke Abmagerung). Meist sind die Beschwerden nur medikamentös und mit Unterstützung einer Ernährungsberatung zu lindern.

Prognose

Die 5-Jahres-Überlebensrate liegt bei 20–30 %.

Heptozelluläres Karzinom (HCC)

Ursachen

Ursächlich können Leberzirrhose, vor allem auf dem Boden einer Hämochromatose (Eisenspeicherkrankheit), Hepatitis B und C, Alkohol, Gifte von Schimmelpilzen (Aflatoxine), Diabetes, Übergewicht, Einnahme von bestimmten Sexualhormonen, z.B. Anabolika, Mangel an einem körpereigenem Enzym, dem alpha-1-Antitrypsin sowie berufliche Belastung mit chemischen Substanzen wie Lösungsmitteln oder Pflanzenschutzmitteln sein.

Symptome

Hierzu zählen Druckschmerz im rechten oder mittleren Oberbauch, Übelkeit, Appetitlosigkeit, Schwächegefühl, Gewichtsabnahme, Cholestase (Stau der Gallenflüssigkeit) und Ikterus (Gelbsucht).

Diagnostik (außer Röntgen)

Die sonographisch oder CT-gestützte Leberbiopsie erfolgt zur histologischen Sicherung der Diagnose.

Radio-onkologische Therapiemöglichkeiten

Mittels Stereotaxie oder Protonenbestrahlung kann der Lebertumor mit der benötigten hohen Dosis bestrahlt werden unter gleichzeitiger Schonung des gesunden Lebergewebes. Die Methode wird z.Zt. in Studien geprüft als alleinige Behandlung oder in Kombination mit einer über die Leberarterie verabreichten Chemotherapie, die Zellen abtötet und zusätzlich Stoffe enthält für die Verstopfung kleiner Leberarterien (TACE, transarterielle Chemoembolisation).

Vorbereitung und Lagerung

Zur optimalen Zielgenauigkeit der Bestrahlung werden ein oder mehrere Metallclips in die Nähe des Lebertumors über lange Nadeln platziert.

Die Lagerung / Fixierung des Patienten bzw. die Cyberknife-Technik werden unter beschrieben.

Gesamtdosis und Fraktionierung

Die Gesamtdosis zwischen 30–90 Gy wird hypofraktioniert in 3–5 Sitzungen mit Einzeldosen bis zu 20 Gy appliziert.

Akute Nebenwirkungen

Unwohlsein, Appetitlosigkeit, Übelkeit und Völlegefühl sind für kurze Zeit möglich, jedoch selten, da der Patient bereits vor und nach der Behandlung ausreichend prophylaktisch medikamentös versorgt ist.

Prognose

Die 5-Jahres-Überlebensrate bei den bisher eingesetzten Verfahren Leberteilentfernung, Lebertransplantation, Radiofrequenzablation (Erzeugung einer Hitzeekrose mittels Hochfrequenzstrom, eine stabförmige Elektrode wird dazu in den Tumor geschoben), perkutane Alkoholinjektion und transarterielle Chemoembolisation liegt bei 5 %. Die Daten zur Stereotaxie / Protonenbestrahlung müssen abgewartet werden.

Gallenwegskarzinom

Das Gallenwegskarzinom ist ein sehr seltener Tumor, der sich erst spät mit ähnlichen Symptomen wie beim Pankreaskarzinom bemerkbar macht. Als Risikofaktor gilt vor allem die sklerosierende Cholangitis, eine entzündliche Erkrankung der Gallenwege. Die einzige Behandlung mit Heilungsaussicht ist die vollständige operative Tumorentfernung. Die 5-Jahres-Überlebensrate beträgt in diesem Fall zwischen 20 und 50 %. Wenn das Karzinom nur unvollständig entfernt werden konnte, wird eine Radiochemotherapie empfohlen, obwohl der Nutzen nicht eindeutig nachgewiesen ist. Die Dosis liegt im Bereich von 50.4 Gy, Fraktionierung 5×1.8 Gy / Woche.

Pankreaskarzinom

Ursachen

Verschiedene Faktoren erhöhen das Erkrankungsrisiko: Nikotin und Alkoholkonsum, Vorerkrankungen wie eine Magenoperation bei chronischem Geschwür, fleisch- und fettreiche Ernährung, familiäre Belastung für chronische Bauchspeicheldrüsenerkrankung und seltene Erbkrankheiten wie das Hippiel-Lindau-Syndrom, das Lynch-Syndrom, Peutz-Jeghers-Syndrom.

Symptome

Hierzu zählen (in den Rücken) ausstrahlende Schmerzen, Cholestase (Stau der Gallenflüssigkeit), die zum Ikterus führt (Gelbsucht), da der Tumor

den Teil des Gallengangs, der im Pankreas verläuft, abdrückt, weiterhin Müdigkeit, Unwohlsein und Gewichtsverlust.

Diagnostik (außer Röntgen) und Histologie

Die ERCP (endoskopisch retrograde Cholangiopankreatikographie zur Darstellung der Gallengänge) und die Endosonographie (EUS) mit Biopsie sichern häufig die Diagnose. Beide Geräte werden durch den Mund, über Magen und Dünndarm bis zum Pankreas eingeführt. Immer seltener wird die Gewebeprobe perkutan (von außen, mit Stich durch die Haut) gewonnen. Der Tumor ist am häufigsten im Pankreaskopf lokalisiert und vom Typ her ein Adenokarzinom.

Radio-onkologische Therapiemöglichkeiten

Ein eindeutiger Vorteil einer neoadjuvanten oder postoperativen Radiotherapie hat sich bisher nicht beweisen lassen, sodass das Standardverfahren momentan in der Operation und der postoperativen Chemotherapie besteht. Jedoch ist ein chirurgischer Eingriff nur bei 10–15 % der Tumore möglich, da die Diagnose meist sehr spät gestellt wird.

Bei Inoperabilität kann eine Radiochemotherapie erfolgen. Allerdings wird meistens der alleinigen Chemotherapie der Vorzug gegeben, da die Aussichten nicht sehr erfolgversprechend sind und die Behandlung eher als Palliation anzusehen ist. Die Monotherapie ist für den Patienten mit weniger Aufwand und einem geringeren Nebenwirkungsspektrum verbunden.

RT-Technik und Risiko-Organ

Es wird konformal über mehrere Felder bestrahlt oder IMRT, VMAT, Tomotherapie angewandt. Risiko-Organ sind Leber, Nieren, Rückenmark und Dünndarmschlingen.

Vorbereitung und Lagerung

Eine spezielle Vorbereitung ist nicht nötig.

Die Lagerung erfolgt auf dem Rücken mit den Armen über dem Kopf, damit man frei ist bei der Wahl der Gantrywinkel.

Gesamtdosis und Fraktionierung

Die empfohlene Bestrahlungsdosis liegt bei 50.4 Gy, Fraktionierung 5×1.8 Gy / Woche.

Akute Nebenwirkungen

Die Patienten können während der Behandlung unter Unwohlsein, Appetitlosigkeit, Übelkeit, Völlegefühl, Aufstoßen, Erbrechen leiden mit Verstärkung der tumorbedingten Kachexie (starke Abmagerung). Meist sind die Beschwerden nur medikamentös und mit Unterstützung einer Ernährungsberatung zu lindern.

Prognose

Die 5-Jahres-Überlebensrate bei operablem Pankreaskarzinom beträgt 3–25 %.

Rektumkarzinom

Ursachen

Die genauen Ursachen sind nicht bekannt, nur die begünstigenden Faktoren für die Entstehung eines Rektumkarzinoms (d.h. dadurch wird nicht zwangsläufig ein bösartiger Darmtumor ausgelöst). Ein erhöhtes Risiko haben Menschen, die sich fettreich und faserarm ernähren, sich wenig bewegen, Übergewicht haben und rauchen. Wenn gewisse Erkrankungen wie Kolitis ulcerosa mit langjähriger chronisch entzündlicher Darmschleimhaut, Darmpolypen, familiäre adenomatöse Polyposis, Gardner-Syndrom, Peutz-Jeghers-Syndrom, Lynch-Syndrom bestehen, tritt das Rektumkarzinom mit höherer Wahrscheinlichkeit auf. Ebenso bei familiärer Tumorbelastung, wenn also nahe Verwandte an Polypen oder an Krebs, insbesondere Darmkrebs in einem Alter unter 50 Jahren leiden.

Symptome

Hierzu zählen Blutbeimengungen im Stuhl, Veränderungen der Stuhlgewohnheiten, ständiger Wechsel von Verstopfung und Durchfall, unwillkürlicher Stuhlabgang zusammen mit Blähungen, Schmerzen.

Diagnostik (außer Röntgen) und Histologie

Die komplette Koloskopie führt man zum Ausschluss eines Zweitkarzinoms durch, die Rektoskopie mit starrem Instrument zur genauen Ausmessung der Höhenlokalisation. In der Endo-

sonographie betrachtet man, wie tief der Tumor in die Wandschichten des Rektums hineingewachsen ist, und man schätzt den Befall der Lymphknoten ein. Die Biopsie ist zur histologischen Diagnosestellung nötig, das Rektumkarzinom ist ein Adenokarzinom.

Radio-onkologische Therapiemöglichkeiten

Standardbehandlung ist die präoperative Radiochemotherapie zur Verkleinerung des Tumors (Downsizing) und zur Reduktion der Eindringtiefe in die Darmwand (Downstaging). Das Ziel ist in der anschließenden Operation kontinenserhaltend vorgehen zu können, d.h. auf die komplette Entnahme des Enddarms und die Anlage eines künstlichen Ausganges zu verzichten. Außerdem senkt die Kombinationsbehandlung das Rezidivrisiko deutlich, die Chance auf eine Heilung steigt.

Alternativ kann die Bestrahlung als Kurzzeitschema erfolgen, damit hat man jedoch weniger Erfahrungen. In den S3 Leitlinien zum kolorektalen Karzinom wird dieses Vorgehen als Möglichkeit aufgeführt, wenn die Tumorschrumpfung keinen Einfluss auf die Operationstechnik hätte (wenn z.B. sowieso die Funktion des Enddarms erhalten bliebe). Außerhalb von Studien wird dem Kurzzeitschema bisher nur bei Zeitnot der Vorrang gegeben, z.B. schnell wachsendes Karzinom und drohende Infiltration der Nachbarorgane oder bei speziellen persönlichen Umständen des Patienten.

Bei einer postoperativen Radiochemotherapie treten in stärkerem Maß akute Nebenwirkungen auf, und die Rezidivrate liegt höher, sodass dieses Vorgehen nur bei präoperativ falscher Einschätzung des Tumorstadiums gewählt wird.

RT-Technik und Risiko-Organen

Es wird konformal über mehrere Felder bestrahlt oder IMRT, VMAT, Tomotherapie angewandt. Risiko-Organen sind Harnblase, übrige Darmschlingen, Eierstöcke bzw. Hoden und Hüftgelenke.

Vorbereitung und Lagerung

Günstig wären eine konstante Lumenweite des Enddarms und eine konstante Harnblasenfüllung zur Bestrahlungsplanung und während des Zeitraums der täglichen Bestrahlungen im Hinblick auf

die Zielvolumengenaugigkeit. Die entsprechenden Maßnahmen dafür sind in aufgeführt. Man muss aber zugeben, dass sich der optimale Zustand selten realisieren lässt, denn die Harnblase und der Darm lassen sich nicht wie bei einer Maschine steuern.

Die Behandlung kann in Rückenlage oder in Bauchlage auf einem Lochbrett erfolgen. Für den Patienten ist die Rückenlage angenehmer. Allerdings schont man in Bauchlage mehr Dünndarmschlingen, sobald das Bestrahlungsfeld bis oberhalb der Harnblase reicht.

Gesamtdosis und Fraktionierung

Bei der präoperativen Bestrahlung beträgt die Dosierung 45 Gy mit 5×1.8 Gy / Woche.

Im Kurzzeitschema wird eine Dosis von 25 Gy, Fraktionierung 5×5 Gy / Woche angewandt.

Postoperativ werden 50.4 Gy mit zusätzlicher kleinvolumiger Dosiserhöhung (Boost) auf die ehemalige Tumorregion um weitere 5.4–9 Gy in gleicher Fraktionierung gegeben.

Akute Nebenwirkungen

Harnblasen- und Stuhlgangprobleme halten sich im Rahmen und werden mit supportiven Maßnahmen sehr gut behandelt. Vorbestehende hämorrhoidale Beschwerden können sich vorübergehend verschlimmern, sodass die Intensivierung der bisherigen Therapie über einen gewissen Zeitraum bis nach Abschluss der Strahlentherapie hinaus erforderlich ist. Auf die mögliche Einschränkung der Sexualfunktion wird in (► Kap. 9) und auf weitere Nebenwirkungen in und eingegangen.

Prognose

Die 5-Jahres-Überlebensrate beträgt bei R0-Operation für das Tumorstadium pT1 90 %, für pT2 70 % und für pT3 40 %.

Analkarzinom

Ursachen

Die Entstehung des Analkarzinoms wird durch die Infektion mit humanen Papillomaviren (HPV) begünstigt. Auch ein geschwächtes Immunsystem erhöht das Risiko an einem Analkarzinom zu erkranken. Betroffen sind z.B. AIDS-Erkrankte und Patienten nach Transplantation, bei denen das Immunsystem therapeutisch unterdrückt wird. Chro-

nische Entzündungen, Analverkehr und Rauchen werden ebenfalls zu den Risikofaktoren gezählt.

Symptome

Hierzu zählen Blutablagerungen auf dem Stuhl, Schmerzen beim Stuhlgang, Juckreiz im Analbereich, diese Symptome werden oft als Hämorrhoidalbeschwerden fehlinterpretiert. Weiterhin unkontrollierter Stuhlabgang bei Infiltration des Schließmuskels, Leistenschwellung bei Lymphknotenmetastase.

Diagnostik (außer Röntgen) und Histologie

Die Spiegelung des Enddarms (Prokto- und Rektoskopie) weist den Tumor nach. Die histologische Sicherung gelingt mittels Biopsie. Histologisch handelt es sich vorwiegend um ein Plattenepithelkarzinom. Zusätzliche Untersuchungen sind die Endosonographie und mancherorts ein PET-CT zum Nachweis / Ausschluss einer Metastasierung in Lymphknoten oder Organe.

Radio-onkologische Therapiemöglichkeiten

Mit der Radiochemotherapie gelingt in 75 % die komplette Tumorvernichtung, sodass eine Operation mit Anlage eines künstlichen Ausgangs nicht notwendig ist.

RT-Technik und Risiko-Organ

Zur Schonung des gesunden Gewebes wird der IMRT, VMAT und Tomotherapie der Vorzug gegenüber der konformalen Bestrahlung gegeben. An einigen Zentren erfolgt die kleinvolumige Dosiserhöhung mittels interstitieller Brachytherapie. Risiko-Organ.

Vorbereitung und Lagerung

Mancherorts wird der Anus markiert. Nur noch selten wird ein Darm- sowie Vaginalrohr eingelegt wegen folgendem Dilemma: Benutzt man die Rohre nur im Planungs-CT, hat man während der RT geänderte Lumenverhältnisse. Wird die Einlage in den täglichen Bestrahlungen wiederholt, ist das in der zweiten Behandlungshälfte sehr schmerzhaft für die Patienten, deren Intimschleimhaut hoch wund ist. Eine exakte Positionierung ist unter diesen Umstän-

den fraglich. In Zeiten von IGRT ist die korrekte Feldeinstellung auch ohne mechanische Hilfsmittel dank KV-set-up-Feldern und Cone-Beam-CT gesichert.

Die Lagerung erfolgt in Bauch- oder Rückenlage.

Gesamtdosis und Fraktionierung

Bei kleinem Tumor ohne Lymphknotenbefall sind 45–59 Gy ausreichend, bei großem Tumor oder Beteiligung der Lymphknoten appliziert man 55–59 Gy. Die übliche Fraktionierung ist 5×1.8 Gy / Woche.

Bei der Brachytherapie gibt es viele unterschiedliche Schemata.

Akute Nebenwirkungen

Neben den Beschwerden, die in ► Abschn. 18.3.6 beschrieben sind, entwickeln sich regelhaft flächige, z. T. tiefe Epitheliolysen, da im Bereich Anus, Damm, Vagina bzw. Skrotum eine Dosis bis knapp 60 Gy appliziert wird. Der Patient erleidet heftige Wundschmerzen und ist in seiner Ausscheidung (Wasserlösen und Stuhlgang) äußerst beeinträchtigt. Eine intensive pflegerische Betreuung ist unbedingt erforderlich.

Prognose

Die 5-Jahres-Überlebensrate beträgt 70–90 %.

18.6 Fallbeispiele

D. Dohr

Fall 1

Ein Patient mit einem oberen Ösophaguskarzinom erklärt Ihnen beim Anblick einer Maske, die Sie ihm zu Anschauungszwecken zeigen, dass er unter Klaustrophobie (Angst vor geschlossenen, engen Räumen) leide.

❓ Wie können Sie dem Patienten helfen?

- ✓ Nehmen Sie sich Zeit. Erklären Sie in Ruhe, dass die Maske die Atmung nicht beeinträchtigt, dass der Patient ständig von Ihnen überwacht wird und dass die Behandlung nur wenige

Minuten dauert. Unter Umständen hilft die Freilegung von Nase und Mund bei der Maskenanpassung. Manchmal ist jedoch trotz Geduld und Erklärungen ein Beruhigungsmittel nötig.

Fall 2

Ein Ingenieur in verantwortlicher Position hat langjährig in einem Betrieb gearbeitet. Deshalb wurde er auch mit Sonderaufgaben beauftragt, wie zum Beispiel der Personalbetreuung. Diese Tätigkeit befand er als sehr nervenaufreibend, vor allem wenn es darum ging, die Urlaubswünsche aller Kollegen gleichermaßen zu berücksichtigen. Zur Entspannung hätte er häufig zur Zigarette oder zu Schokolade gegriffen, wohl wissend, dass sich damit das saure Aufstoßen und die Magenschmerzen, die ihn seit langem plagten, verstärken würden. Seitdem er in Rente ist, treibt er regelmäßig leichten Ausdauersport und verzichtet auf Süßigkeiten, um sein Übergewicht los zu werden. Das Rauchen aufzugeben, ist ihm bisher noch nicht gelungen. Das einzige, das ihm Sorge bereitet, sind seine immer noch bestehenden Oberbauchschmerzen, die er zu seiner Berufszeit auf den Ärger in der Arbeit zurück führte und die er sich jetzt nicht erklären kann, denn er fühlt sich absolut entspannt.

❓ An welche möglichen Ursachen denken Sie? Was schlagen Sie dem Rentner vor?

- ✓ Die Schmerzen könnten von einem chronischen Magengeschwür oder sogar von einem tiefsitzenden Ösophaguskarzinom herrühren. Eine Abklärung sollte unbedingt erfolgen. In der Ösophagogastroskopie wird die Schleimhaut beurteilt und bei Vorliegen einer verdächtigen Veränderung eine Gewebeprobe zur Untersuchung beim Pathologen entnommen.

Fall 3

Geschockt von der Diagnose Rektumkarzinom beschließt eine Patientin die Änderung ihres Lifestyles. Sie geht täglich schwimmen – zum Ausdauertraining und zur Gewichtsabnahme. Außerdem stellt sie die Ernährung auf vegetarisch um und isst jeden Mittag einen großen Salat. Die Patientin erzählt Ihnen darüber beim Planungs-CT.

? Worauf machen Sie die Patientin aufmerksam?

- ✓ Auf Schwimmen sollte während der Zeit der Radiotherapie verzichtet werden, da die Hautmarkierungen verloren gehen, und die bestrahlte Haut zu sehr aufweicht. Außerdem besteht in öffentlichen Schwimmbädern die Gefahr einer Hautreizung durch das Chlor oder einer Pilz- oder bakteriellen Infektion.
- Eine Reduktion des Körpergewichts empfiehlt sich im Behandlungszeitraum nicht, weil sich mit Veränderung der Körperkontur auch die Zielvolumina verschieben. Es könnte sich eine ungenügende Dosis im Tumorbereich oder eine überhöhte Dosis im gesunden Nachbar-gewebe ergeben. Bei Bestrahlung im kleinen Becken könnte sich oberhalb einer Dosis von 20 Gy Durchfall entwickeln, der bereits mit einer gewissen vorübergehenden Umstellung beim Essen (Verzicht auf Salat, Fruchtsäfte, Sauerkraut, Bier) gut beeinflussbar ist.

Fall 4

Ihre 72 jährige Großtante wendet sich vertrauensvoll an Sie mit der Bitte, ob Sie ihr aus dem Krankenhaus Schmerzmittel mitbringen könnten. Seit einiger Zeit würde sie unter blutenden schmerzhaften Hämorrhoiden leiden. Zum Arzt oder ins Krankenhaus möchte sie unter gar keinen Umständen, da sie überzeugt ist, dass sie in ihrem Alter nicht mehr ernst genommen wird, als „Versuchskaninchen“ dient oder sogar einem unerfahrenem Operateur „ans Messer geliefert“ wird.

? Wie können Sie Ihrer Großtante die Angst nehmen?

- ✓ Die Beschwerden könnten tatsächlich von Hämorrhoiden stammen. Eine Proktoskopie und die Behandlung mit Zäpfchen und Salben schaffen in diesem Fall rasch Abhilfe. Sollte es sich um ein Analkarzinom handeln, wird die Radiochemotherapie auf der Grundlage gesicherter Ergebnisse und langjähriger Erfahrung durchgeführt. Voraussichtlich ergeben sich Wunddefekte, deshalb erfolgt eine intensive Betreuung mit genauer Anleitung zur Haut- und Intimpflege. Die Therapie-Erfolgsraten sind gut, eine Operation ist i. d. R. nicht nötig.

Literatur

Allgemein

- Arbeitsanweisungen Nuklearmedizin: AG-MTM, www.nuklearmedizin.de
- Bouchoucha M, Devroede G, Arhan P, Strom B, Weber J, Cugnenc PH et al (1992) What is the meaning of colorectal transit time measurement? *Diseases of the Colon and Rectum* 35(8):773–782
- Jakobs T, Paprottka P, Reiser MF (2011) Selektive interne Radiotherapie bei fortgeschrittenen Lebertumoren Selective internal radiation therapy of liver tumors. *Radiologie Update* 11(1):87–100
- Katschinski M et al. Oesophagusfunktionsszintigraphie: Indikation, Durchführung aus Auswertung, Empfehlungen des Arbeitskreise Neurogastroenterologie und Motilität Zentrum für Krebsregisterdaten (Hrsg) (2009/2010) Krebs in Deutschland 2009/2010, 9. Aufl. Robert Koch Institut, Berlin Krebsregister, u. a. www.rki.de
- Kuwert et al. Nuklearmedizin, 4. Aufl. Thieme-Verlag, Stuttgart
- Lauenstein TC, Altenbernd J, Wetter A (2013) Selektive interne Radiotherapie - ein Update. *Interventionelle Radiologie Scan* 01(02):143–162. doi:10.1055/s-0033-1344333
- Leitlinien der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik – Qualitätskriterien röntgendiagnostischer Untersuchungen; gemäß Beschluss des Vorstandes der Bundesärztekammer vom 23. November 2007
- Leitlinien Nuklearmedizin, www.nuklearmedizin.de
- Niessen C, Wiggermann P, Velandia C, Stroszczynski C, Pereira PL (2013) Transarterial Chemoembolization - Status Quo in Germany. *Rofo. Fortschritte Auf Dem Gebiet Der Röntgenstrahlen Und Der Bildgebenden Verfahren*, 185(11), 1089–1094. doi:10.1055/s-0033-1335529
- Schicha et al (2013) Nuklearmedizin, 7. Aufl. Schattauer-Verlag, Stuttgart
- Schmoll HJ et al (2006) Kompendium Internistische Onkologie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Shi W (2013) Meta-analysis of 18FDG PET-CT for nodal staging in patients with esophageal cancer. *Surg Oncol* 22(2):112–116 (Epub 2013 Mar 7) doi:10.1016/j.suronc.2013.02.003
- Ann Oncol. 2010 May;21 Suppl 5:v46-9. doi: 10.1093/annonc/mdq163
- Stahl M (2010) Esophageal cancer: Clinical Practice Guidelines for diagnosis, treatment and follow-up. *Ann Oncol* 21(S5):v46–v49. doi:10.1093/annonc/mdq163
- Pöttgen C, Stuschke M (2012) Radiotherapy versus surgery within multimodality protocols for esophageal cancer—a meta-analysis of the randomized trials. *Cancer Treat Rev* 38(6):599–604. doi:10.1016/j.ctrv.2011.10.005
- ### Magen
- Macdonald JS (2001) Chemoradiotherapy after surgery compared with surgery alone for adenocarcinoma of the stomach or gastroesophageal junction. *N Engl J Med* 345(10):725–730
- Bodda-Heggemann J (2009) Combined adjuvant radiochemotherapy with IMRT/XELOX improves outcome with low

renal toxicity in gastric cancer. *Biol Phys* 75(4):1187–1195.
doi:10.1016/j.ijrobp.2008.12.036

Internetseite der Chirurgie, Uniklinik Würzburg, Dr. med. A. Wierlemann: www.elarning-chirurgie.de

Leber

Aebersold D (2011) Externe Strahlentherapie beim hepatozellulären Karzinom. *Schweizer Zeitschrift für Onkologie* (2):12–15

Krishnan S (2008) Radiotherapy for hepatocellular carcinoma: an overview. *Ann Surg Oncol* 15:1015–1024

Parkin DM (2002) Global cancer statistics. *CA Cancer J Clin*, 55: 74–108

Gallenwegskarzinom

National comprehensive Cancer Network (NCCN) guidelines on evaluation and treatment of hepatobiliary malignancies, 13.03.2007

Pankreaskarzinom

Adler G (2007) S3 Leitlinie „Exokrines Pankreaskarzinom“. In: *Der Gastroenterologe*, Bd. 45. Georg Thieme, Stuttgart, S 487–523

Del Chiaro M (2013) European experts consensus statement on cystic tumours of the pancreas. *Dig Liver Dis* 45(9):703–711 (Epub 2013 Feb 14) doi:10.1016/j.dld.2013.01.010

Ghaneh P (2007) Biology and management of pancreatic cancer. *Gut* 56(8):1134–1152

Rektum

Schmiegel W et al (2008) S3 Leitlinie kolorektales Karzinom. In: *Der Gastroenterologe*, Bd. 46. Georg Thieme, Stuttgart, S 1–73

Sebag-Montefiore D (2009) preoperative radiotherapy versus selective postoperative chemoradiotherapy in patients with rectal cancer: a multicentre, randomised trial. *Lancet* 373:811–820

Internetseite der österreichischen Gesellschaft für Chirurgische Onkologie: www.aco-asso.at

Analkarzinom

Schmieder A (2010) Analkarzinom. In: *Taschenbuch Onkologie 2010: Interdisziplinäre Empfehlungen zur Therapie 2010/2011*. Zuckschwerdt Verlag, S 82–85

Grabenbauer GG (2013) RCT with 5-FU and mitomycin C with 28 fractions of 1.8 Gy external radiotherapy remains standard treatment of squamous-cell carcinoma of the anus]. *Strahlenther Onkol* 189(11):982–983. doi:10.1007/s00066-013-0448-5

Zilles K, Tillmann BN (2010) *Anatomie*. Springer Medizinverlag, Berlin, Heidelberg, New York

Diagnostik und Therapie – Urogenitales System

U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Marks, C. Vockelmann

- 19.1 Allgemeines – 508**
 - 19.1.1 Topographische Anatomie – 508
 - 19.1.2 Funktion – 508
- 19.2 Radiologische Diagnostik – 508**
 - 19.2.1 Sonographie – 508
 - 19.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik – 508
 - 19.2.3 Durchleuchtung/Angiographie – 509
 - 19.2.4 Computertomographie – 509
 - 19.2.5 Kernspintomographie – 510
- 19.3 Nuklearmedizinische Diagnostik – 510**
 - 19.3.1 Nierenzintigraphie – 510
 - 19.3.2 Hodenzintigraphie – 515
- 19.4 Wertigkeit – 515**
- 19.5 Therapeutische Möglichkeiten – 516**
 - 19.5.1 Radiologische Therapie – 516
 - 19.5.2 Strahlentherapie – 516
- 19.6 Fallbeispiele – 521**
 - Literatur – 521**

19.1 Allgemeines

M. Kahl-Scholz

19.1.1 Topographische Anatomie

Zum urogenitalen System zählen die Nieren, die Harnleiter, die Harnblase und die Harnröhre.

Die Nieren liegen im Retroperitonealraum ventral der 12. Rippe, wobei die rechte Niere durch die darüber liegende Leber weiter nach kaudal verschoben ist als die linke Niere. Die Nieren sind etwa 4 cm dick, 7 cm breit und 11 cm lang (wie die Milz). Sie zeigen einen seitlichen und mittleren Rand (Margo medialis et lateralis), eine Vorder- und Hinterfläche (Facies anterior et superior) und einen oberen und unteren Pol (Extremitas superior et inferior).

Die Niere wird in Mark (Medulla), Rinde (Cortex) und Nierenbecken (Pelvis renalis) unterteilt. Vom Nierenbecken aus führt der Harnleiter (Ureter) den Urin über einen Bauch- und einen Beckenteil (Pars abdominalis et pelvica) 30–50 cm zur Harnblase (Vesica urinaria). Die Harnblase ist das vorderste Organ im kleinen Becken. Sie liegt der Symphysis pubica an. Die Harnblase wird unterteilt in eine Spitze (Apex vesicae), einen Körper (Corpus vesicae), einen Blasengrund (Fundus vesicae) und einen Harnblasenhals (Collum vesicae), der in die Harnröhre (Urethra) übergeht. Die Urethra ist bei der Frau ca. 3–5 cm lang, beim Mann hingegen 25–30 cm.

Die Vorsteherdrüse (Prostata) ist etwa kastaniengroß, umschließt die Urethra und liegt vor der Harnblase. Sie wird unterteilt in eine Basis und ein kegelförmiges Ende (Basis et Apex prostatae). Ferner unterscheidet man den Isthmus prostatae sowie einen Lobus dexter, sinister et medius.

19.1.2 Funktion

In erster Linie dienen die Nieren als Ausscheidungsorgane der Bildung von Harn. Sie regulieren dadurch aber auch den Wasserhaushalt, das Säure-Basen-Gleichgewicht und den Salzhaushalt. Ferner produzieren sie das Hormon Erythropoetin und haben einen großen Einfluss auf die Regulation des Blutdrucks.

19.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

19.2.1 Sonographie

Wie schon im vorigen Kapitel beschrieben ist die Sonographie auch in der Diagnostik des urogenitalen Systems das am einfachsten verfügbare bildgebende Verfahren, das sowohl als Screeningmethode als auch zur Abklärung bei Beschwerden einsetzbar ist. Geachtet wird dabei vor allem auf Raumforderungen im Nierenparenchym und einer Aufweitung des Nierenbeckens als Hinweis auf einen Harnaufstau. Die Harnblase lässt sich im gefüllten Zustand ebenfalls sehr gut beurteilen. Zur Restharnbestimmung wird die Sonographie ebenfalls eingesetzt. Hierzu wird das Blasenvolumen nach Blasenentleerung sonographisch bestimmt.

Sowohl die männlichen als auch die weiblichen Geschlechtsorgane lassen sich sonographisch gut beurteilen. Hierzu wird nicht nur der transabdominelle Ultraschall eingesetzt. Mit Spezialschallköpfen lassen sich auch eine transvaginale oder transrektale Sonographie durchführen. Diese werden in Deutschland in aller Regel von Urologen oder Gynäkologen durchgeführt. In anderen Ländern, z. B. Frankreich, gehört auch dieses zum Untersuchungsspektrum von Radiologen.

19.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Die konventionelle Radiologie hat im Rahmen der urogenitalen Bildgebung keinen relevanten Stellenwert mehr. Das intravenöse Ausscheidungsurogramm ist in der Diagnostik von Nierensteinen vollständig von der Computertomographie abgelöst. Trotzdem sollte bei der Diagnostik des Abdomens auch in konventionellen Aufnahmen natürlich immer auf Verkalkungen im Verlauf der ableitenden Harnwege geachtet werden. Rundliche, etwas wolkig imponierende Verkalkungen im kleinen Becken bei älteren Frauen entsprechen in aller Regel verkalkten Uterusmyomen, einem gutartigen Knoten der Gebärmutter.

■ **Tab. 19.1** Untersuchungsprotokoll Zystographie

Patientenvorbereitung	Blasenkatheter legen lassen. Metall im Untersuchungsbereich entfernen
Positionierung	Rückenlage
Bildfrequenz	Einzelbilder
Kontrastmittel	100–200 ml, ggf. zusätzlich Kochsalz
Standardeinstellungen	ap, RAO, LAO, streng seitlich
Aufnahmekriterien, Besonderheiten	Durchleuchtungskontrolle während der Füllung, möglichst Prallfüllung anstreben zum Ausschluss einer Harnblasenverletzung

■ **Tab. 19.2** Untersuchungsprotokoll CT Abdomen zur Steinsuche

Patientenvorbereitung	Rückenlage, Metall im Untersuchungsgebiet entfernen
Positionierung	Rückenlage
Scanbereich	Nieren bis Harnblasenboden
Röhrenspannung, -strom	80–120 kV, low-dose-Protokoll mit Dosismodulation
Kontrastmittel	Nativ
Reformationen	Axiale in Weichteilfenstertechnik, coronar in Weichteilfenstertechnik

➤ **Die Frage nach Harnleitersteinen sollte mit einer Niedrig-Dosis-Computertomographie der ableitenden Harnwege abgeklärt werden.**

Aus strahlenhygienischen Gründen sollte bei den Kindern weitestgehend auf Seitenaufnahmen verzichtet werden. Auch die Aufnahme­frequenz und die Durchleuchtungszeit sollten auf ein Minimum reduziert werden.

19.2.3 Durchleuchtung/Angiographie

Auch die Indikationen für Durchleuchtungsuntersuchungen oder diagnostische Angiographien des Urogenitalsystems sind in den letzten Jahren sehr eingeschränkt worden. Eine typische Indikation ist die Zystographie (■ Tab. 19.1) zum Ausschluss einer Harnblasenverletzung nach operativen Eingriffen im kleinen Becken.

Eine ähnliche Untersuchung, nämlich ein Miktionszysturethrogramm (MCU), ist in der Pädiatrie eine typische Untersuchung. Hierbei wird ebenfalls die Harnblase prall mit Kontrastmittel gefüllt. Zusätzlich sollte dann eine Miktion der kleinen Patienten erfolgen. Indikation hierfür ist der Verdacht auf einen vesikoureteralen Reflux, der zu Nierenbeckenentzündungen führt. Dieser Reflux tritt vor allem bei hohem Druck in der Harnblase auf, dieser entsteht in erster Linie während der Miktion.

19.2.4 Computertomographie

Methode der Wahl ist die Computertomographie in der Detektion von Harnleitersteinen (■ Tab. 19.2). Diese sind in aller Regel kalkdicht und lassen sich so hervorragend in der Computertomographie auch nativ und in einer Niedrigdosistechnik nachweisen. Je nach CT-Gerät entspricht die notwendige Strahlendosis in etwa einer Röntgenuntersuchung des Abdomens in 2 Ebenen.

In der Diagnostik von Nierentumoren ist die Computertomographie gut einsetzbar. Dabei erfolgt die Diagnostik der Nieren meistens im Rahmen eines CT-Abdomens. Bei gezielter Frage nach einem Nierentumor sollte zur Beurteilung einer Kontrastmittelaufnahme ggf. eine Nativuntersuchung der Nieren angefertigt werden. Neben einer arteriellen Spirale erfolgt eine zweite Untersuchungsserie in

Tab. 19.3 Untersuchungsprotokoll MRT gynäkologische Becken

Patientenvorbereitung	Metall, Scheckkarte etc. ablegen lassen Untersuchung wenn möglich mit gefüllter Harnblase
Positionierung	Rückenlage
Spule	Body-Array
Scanbereich	Kleines Becken
Sequenzen/Wichtungen	T2w sagittal, T1w sagittal, paracoronar/paraaxial zweite Ebene auf den Tumor gekippt T1w und T2w, ggf. coronar STIR zur Detektion von Lymphknotenvergrößerungen T1w FS sagittal und T1w FS paracoronar/paraaxial zum Tumor
Kontrastmittel	1fache Dosis

der nephrographischen Kontrastmittelpphase etwa 100–150 sec nach der Kontrastmittelgabe. Bei Fragestellungen der harnableitenden Wege kann eine CT-Urographie ergänzt werden. Hierzu muss die Ausscheidung des Kontrastmittels in die Ureteren 7–10 Minuten nach Kontrastmittelgabe abgewartet werden. Hilfreich kann die niedrigdosierte Gabe von Furosemid, einem Diuretikum, sein.

In der Diagnostik der Genitalorgane im kleinen Becken spielt die Computertomographie erst in zweiter Linie eine Rolle. Auch hier erfolgt bei jeder aus anderem Grund angefertigten CT-Untersuchung eine Mitbeurteilung von Uterus oder Prostata. Bei sonographisch nachgewiesenen malignomverdächtigen Raumforderungen wird die CT zum Staging und Suche nach Fernmetastasen durchgeführt. Klassisch ist hier z. B. die Frage nach einer Peritonealkarzinose eines Ovarialkarzinoms.

eine hypointense Signalgebung in T2-gewichteten Aufnahmen ab. Daher ist für die Detektion eines Prostatakarzinoms, das im Gegensatz zur benignen Hyperplasie der Prostata in der Außendrüse der Prostata wächst, eine dünnschichtige T2-Bildgebung notwendig. Diese wird in aller Regel sowohl axial als auch coronar und sagittal durchgeführt. Verbessert wird die Bildgebung durch zusätzliche Verwendung einer Endorektalspule zur Body-Array.

Zusätzlich lässt sich das Prostatakarzinom mithilfe der Spektroskopie nachweisen. Hier nutzt man die Tatsache, dass das Prostatakarzinom mehr Cholin und weniger Citrat als gesundes Prostatagewebe aufweist. Eingesetzt wird diese Technik aber sicherlich nur bei einem Bruchteil der Patienten mit einem Prostatakarzinom. Bei der Mehrheit der Patienten reicht die urologisch-sonographische Diagnostik zur Therapieentscheidung.

19.2.5 Kernspintomographie

Die Kernspintomographie ermöglicht, im Gegensatz zur Computertomographie, auch ein Lokalstaging von Tumoren des inneren Genitale (■ Tab. 19.3).

Zur Abgrenzung von Endometrium- bzw. Uteruskarzinomen bieten sich sagittale Sequenzen an, hier lässt sich der Tumor nach Kontrastmittelgabe hypointens zum Myometrium abgrenzen. Beurteilt werden müssen die Infiltrationstiefe und insbesondere eine Infiltration in Nachbarorgane, da hierdurch das therapeutische Procedere beeinflusst werden kann.

Im Gegensatz zu den meisten anderen Tumoren, die T2-gewichtet hyperintens abgrenzbar sind, zeichnet sich das Prostatakarzinom durch

19.3 Nuklearmedizinische Diagnostik

U. Blum

19.3.1 Nierenszintigraphie

Die Nieren sind für die Produktion des Urins zuständig. Mit dem Urin werden verschiedene Substanzen ausgeschieden, die der Körper nicht mehr benötigt. Damit steuern die Nieren den Wasser- und Elektrolythaushalt. Andere Aufgaben liegen in der Steuerung des Blutdrucks über das Renin-Angiotensin-System sowie der Blutbildung über das Erythropoetin.

■ **Tab. 19.4** Untersuchungsprotokoll DTPA (modifiziert nach Arbeitsanweisung, S. Wieser)

Patientenvorbereitung	Kontrastmittelkarenz > 48 Stunden Gute Hydrierung (mindestens 10 ml/kg KG) oral oder i. v. Größe, Gewicht, Kreatinin (< 3–4 mg/dl), Medikamente Blase entleeren vor der Untersuchung Falls vorhanden oder nach Fragestellung: – Blasenkatheter ggf. abklemmen – Nierenfistel ggf. abklemmen
Aktivität	150 MBq ^{99m}Tc -DTPA, min. 20 MBq
Applikation	Streng i. v.
Akquisition	Rückenlage oder sitzend Dynamische Akquisition pa, z. B. 240 frames á 7.5 s LEHR (ggf. mit Zoom) 64 * 64 Matrix; besser 128 * 128 Matrix
Besonderheiten	2 Blutabnahmen ca. 90 und 180 min p. i., genaue Zeit notieren Berechnung der GFR
Strahlenbelastung	0.005 mSv/MBq

Die Nieren bestehen anatomisch aus der Nierenrinde und dem Nierenmark, zum ableitenden System gehört das Nierenbeckenkelchsystem mit dem angeschlossenen Harnleiter.

Die kleinste funktionelle Einheit der Nieren ist das Nephron. Es besteht aus einem Gefäßknäuel (= Glomerulum) mit einem zu- und ableitenden Gefäß sowie einem ableitenden Sammelrohr.

Nuklearmedizinische Untersuchungen können die Durchblutung der Nieren, die Lage, die Funktion, die Abflussverhältnisse sowie auftretende Veränderungen bei einer Nierenarterienstenose darstellen.

Hierbei werden verschiedene Stoffe verwendet, die an unterschiedlichen Stellen im Nierensystem ausgeschieden, z. T. rückresorbiert oder gestapelt werden.

DTPA (Diethylentriaminpentaessigsäure) wird hierbei direkt im Glomerulum ausgeschieden, MAG3 (Mercaptoacetyltriglycin) im dicken Anteil der Henle-Schleife Glomerulum-nahe. Gestapelt wird DMSA (Dimercaptobernsteinsäure) im weiteren Verlauf der Henle-Schleife kurz vor dem Übergang in das Sammelrohr.

Nierenperfusion DTPA (Diethylentriaminpentaessigsäure)

DTPA wird rein glomerulär filtriert. Damit erlaubt DTPA eine Perfusionsstudie sowie die Bestimmung der glomerulären Filtrationsrate (GFR)

■ **Tab. 19.5** Normwerte GFR. (Modifiziert nach Dtsch Arztebl Int 2009; 106(51-52):849-54)

Säuglinge und Kinder		
Frühgeburten	> 0,5 ml/min/kg	
Neugeborene	> 10 ml/min/m ²	
2.–8. Woche	16,3–44,6 ml/min/1,73 m ² KOF	
3.–12. Monat	> 70 ml/min/1,73 m ² KOF	
1–20 Jahre	> 80 ml/min/1,73 m ² KOF	
Erwachsene (ml/min/1,73 m ² KOF)		
Alter [Jahre]	Männer	Frauen
20–29	77–170	71–165
30–39	70–162	64–149
40–49	63–147	58–135
50–59	56–130	51–120
60–69	49–113	45–104
70–79	42–98	39–90
80–89	35–81	32–75

(■ **Tab. 19.4**). Die GFR ist ein Maß für die Nierenfunktion (■ **Tab. 19.5**). Indikationen für die Untersuchung sind der Verdacht auf eine eingeschränkte Nierenfunktion, ggf. vor einer Chemotherapie oder Strahlentherapie, sowie die chronische Niereninsuf-

Tab. 19.6 Nierenfunktionsuntersuchung mit und ohne Furosemidbelastung bei Kindern und Erwachsenen. (Mod. nach AWMF-Registriernummer 031-041)

Patientenvorbereitung	Kontrastmittelkarenz > 48 Stunden ¹²³ I-OIH: Perchlorat 60 min vor der Untersuchung Gute Hydrierung (mindestens 10 ml/kg KG) oral oder i. v. Größe, Gewicht, Kreatinin (< 3–4 mg/dl), Medikamente Blase entleeren vor der Untersuchung Falls vorhanden oder nach Fragestellung: – Blasenkatheter ggf. abklemmen – Nierenfistel ggf. abklemmen
Aktivität	100 MBq ^{99m} Tc-MAG3, mindestens 15 MBq 30–60 MBq ¹²³ I-OIH, mindestens 10 MBq < 18 Jahre s. EANM Dosage Card bzw. diagnostische Referenzwerte BFS (Literaturangabe)
Applikation	Streng i. v. Bolus
Akquisition	Rückenlage oder sitzend Dynamische Akquisition pa, selten ap/pa – Perfusion: sofort p. i., z. B. 60 frames á 1 s – anschließend Funktion: 115–150 frames á 10 s – ggf. statische Aufnahmen, Spätaufnahmen LEHR oder LEAP, ggf. mit Zoom 128 * 128 Matrix
Besonderheiten	Bewegungen des Patienten vermeiden Spritzenaktivität vor Injektion messen, Zeit notieren Injektionszeit notieren Spritzenaktivität nach Injektion messen, Zeit notieren 2 Blutabnahmen ca. 20 und 30 min (max. 50 min) p. i., genaue Zeit notieren; Counts im Bohrloch messen Bei Nierentransplantaten zwingend Aufnahme von ventral
Auswertung	ROI-Technik mit Zeit-Aktivitäts-Kurven Darstellung der Perfusion Bestimmung der Clearance (TER) Angabe der seitengetrenten Funktion Ggf. Output efficiency (OE) und normalised residual activity (NORA)
Strahlenbelastung	0.007 mSv/MBq = 0,7 mSv bei 100 MBq

fizienz. Die GFR ist abhängig vom Alter und Geschlecht der Patienten.

Nierenfunktion

Die Nierenfunktionsszintigraphie wird häufig eingesetzt (Tab. 19.6). Sie kann einfach – und mit geringer Strahlenbelastung – sichere Informationen zur Durchblutung, Lage der Nieren, ggf. vorliegenden Anomalien, der seitengetrenten Funktion und der Abflussverhältnisse geben. Auch die Darstellung eines evtl. vorliegenden Reflux (Rückfluss von Urin aus der Blase in den Harnleiter bzw. die Nieren) ist möglich. Aufgrund der geringen Strahlenbelastung

wird die Untersuchung auch relativ häufig bei Kindern und Jugendlichen durchgeführt.

Als Tracer sind ¹²³I-OIH (Ortho-Iodhippursäure) und ^{99m}Tc-MAG3 (Mercaptoacetyltriglycin) erhältlich. Aufgrund der besseren Verfügbarkeit hat sich in der klinischen Routine das ^{99m}Tc-MAG3 durchgesetzt.

Folgende ROI's werden benötigt:

- Nieren: Nicht zu klein um die Nierenkontur legen
- Untergrund: Je nach Computersoftware und Abteilung, rechteckig, elliptisch oder der Nierenaußenkontur angepasst

- ggf. Herz: Bei bestimmten Auswertungen erforderlich (Patlak-Rutland fitting und Berechnung der OE)

■ Interventionen

■ ■ Postmiktionsaufnahmen

Bei einem unvollständigen Abfluss aus dem Nierenbeckenkelchsystem oder dem Harnleiter sollten statische Aufnahmen nach entsprechender Blasenentleerung und einem Lagewechsel (mindestens 15 min in aufrechter Position) durchgeführt werden.

Diese können direkt nach der Blasenentleerung erfolgen, zudem jedoch nach Möglichkeit immer 50–60 min p. i. als statische Aufnahmen über 2 min.

■ ■ Untersuchung mit Furosemidbelastung

Wenn sich in der Basisuntersuchung eine Verzögerung des Harnabflusses zeigt, ist die zusätzliche Gabe von Furosemid möglich. Furosemid verhindert u. a. die Rückresorption des Wassers in der Niere, sodass der Urin nicht mehr konzentriert werden kann. Kontraindikationen sind eine bekannte Überempfindlichkeit gegen Furosemid und ein zu niedriger Blutdruck (klinisch relevant), eine relative Kontraindikation ist ein Nierenstein.

Es existieren unterschiedliche Protokolle, insbesondere was den Zeitpunkt der Injektion des Furosemids betrifft. Hierbei zeigt sich bisher kein Protokoll überlegen.

Die Untersuchung kann im Anschluss an eine Basisuntersuchung erfolgen oder bei bekannten Harnabfluss-Störungen direkt als Untersuchung mit Furosemidbelastung.

Dosierung:

- Säuglinge: 1 mg/kg KG i. v.
- 1 Jahr–18 Jahre: 0,5 mg/kg KG, maximal 20 mg i. v.
- Ab 18 Jahre: 0,5 mg/kg KG, maximal 40 mg i. v.

Zeitpunkt der Injektion:

- F+20: 20 min nach dem Radiopharmakon (z. B. nach Basisuntersuchung)
- F–15: 15 min vor dem Radiopharmakon
- F0 zeitgleich mit dem Radiopharmakon
- F+2 2 min nach dem Radiopharmakon

Die Untersuchung erfolgt ansonsten wie die Basisuntersuchung. Die Auswertung erfolgt in erster Linie visuell. Hierbei kann am ehesten zwischen „normal“ und „fehlend“ unterschieden werden. Alle dazwischen liegenden Befunde sollten nach der Leitlinie als Prozentangabe der maximalen Aktivität vor und nach Furosemidgabe, sowie den ggf. vorliegenden Postmiktionsaufnahmen, angegeben werden.

■ ■ Untersuchung nach ACE-Hemmer-Gabe (modifiziert Leitlinie renovaskuläre Hypertonie und Nuklearmedizin Kuwert et al. 4. Auflage)

Ein (untypischer) arterieller Bluthochdruck kann durch eine Nierenarterienverengung (= Stenose) bedingt sein. Hierbei kommt es über eine Aktivierung des Renin-Angiotensin-Systems zu einer Erhöhung des Blutdruckes. Die Therapie dieses Bluthochdruckes erfolgt durch die Beseitigung der Ursache, nämlich der Nierenarterienstenose. Diese Art des Bluthochdruckes ist jedoch selten.

Für die Untersuchung sollten folgende Medikamente nach Möglichkeit ausgesetzt werden:

- ACE-Hemmer in Abhängigkeit ihrer Halbwertszeit (3–7 Tage vorher)
- Diuretika: Einige Tage vor der Untersuchung
- Vorbereitung der Untersuchung (zusätzlich zum Untersuchungsprotokoll):
 - Zugang legen
 - Blutdruck messen
- Es gibt folgende Protokolle:
 - Ein-Tages-Protokoll:
 - Basisszintigraphie nach Protokoll, danach:
 - Gabe von 25 (–50) mg Captopril p. o. (alternativ 5 (–10) mg Enalapril)
 - Überwachung des Blutdruckes alle 10–15 min
 - Zeitgleiche Hydratation des Patienten
 - Erneute Szintigraphie 60 min nach Medikamentengabe (ggf. Aktivität erhöhen auf maximal 200 MBq)
 - Alternativ zur oralen Medikamentengabe kann auch Enalapril i. v. gegeben werden (40 µg/kg KG, maximal 2,5 mg), Szintigraphie 15 min später.

■ Tab. 19.7 Untersuchungsprotokoll DMSA

Patientenvorbereitung	Keine Kreatinin sollte bekannte sein Blase entleeren vor der Untersuchung
Aktivität	70 MBq ^{99m}Tc -DMSA, min. 15 MBq
Applikation	i. v.
Akquisition	Rückenlage Statische Akquisition 1–4 h p. i.: ap/pa: 600 s, 500 kcts Ggf. weitere Projektionen (LAO/RPO, LPO/RAO) LEHR (mit Zoom) 128 * 128 Matrix SPECT
Besonderheiten	Bei erhöhtem Kreatinin ggf. Dosis anpassen
Auswertung	Ermittlung der prozentualen Funktionsanteile als geometrisches Mittel Darstellung der SPECT
Strahlenbelastung	1,2 mSv

■ Tab. 19.8 Untersuchungsprotokoll Hodenzintigraphie

Patientenvorbereitung	Keine, Kinder ggf. fixieren/sedieren
Aktivität	200 MBq ^{99m}Tc -DTPA oder 340–720 MBq ^{99m}Tc -Pertechnetat
Applikation	i. v.
Akquisition	Rückenlage oder im Stehen Penis nach oben fixieren Oberschenkel und Blase ggf. abdecken Dynamische Akquisition – DTPA: 60 frames à 30 s – Pertechnetat: 1frame/s über 60 s, anschließend statische Bilder LEHR (mit Zoom), oder Pinhole-Kollimator 128 * 128 Matrix Ggf. Hodenmarkierung (statisches Bild)
Auswertung	Visuell
Strahlenbelastung	DTPA: 0.005 mSv/MBq = 1 mSv Pertechnetat: 0.012 mSv/MBq = 4–9 mSv

- Zwei-Tages-Protokoll:
 - Untersuchung nach Captopril bzw. Enalapril-Gabe.
 - Unauffälliger Befund: Keine weitere Untersuchung
 - Auffälliger Befund: Basisszintigraphie nach entsprechender Vorbereitung an einem anderen Tag

Im Rahmen des Ein-Tages-Protokolls erfolgt zuerst die Basisszintigraphie nach dem normalen Untersuchungsprotokoll. Anschließend wird dem Patienten 25–50 mg Captopril p. o. verabreicht. Es erfolgt eine Überwachung des Blutdruckes alle 10–15 min, da ein ACE-Hemmer den Blutdruck sehr stark absenken kann. Bei einem symptomatischen Blutdruckabfall sollte Flüssigkeit infundiert werden. Nach 60 min erfolgt eine erneute Nierens-

■ **Tab. 19.9** Wertigkeit der therapeutischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	Durchleuchtung/ Angiographie	CT	MRT	Nuk	PET
Harnleiterstein (Urolithiasis)	P*	N	N	P	N	N	N
Nierenfunktionsbestimmung	N	N	N	N	N	P	N
Nierentumor	P	N	N	W	W	N	N

N = Nicht indiziert; P = Primärdiagnostik; W = Weiterführende Diagnostik

P* Jeder Patient mit Flankenschmerzen als Hinweis auf eine Nierenkolik wird primär sonographisch untersucht. Der eigentliche Stein lässt sich sonographisch jedoch nur selten nachweisen.

zintigraphie, hier ggf. mit erhöhter Aktivität (bis 200 MBq).

Bei einem Zwei-Tages-Protokoll erfolgt zunächst die Untersuchung mit ACE-Hemmer-Gabe. Ein normales Ergebnis spricht gegen eine Renin-Angiotensin-wirksame Nierenarterienstenose, die Basisuntersuchung wäre dann hinfällig.

Folgende Parameter sollten bestimmt werden:

- Zeit bis zum Auftreten des Maximums
- Quotient aus Aktivität nach 20 min / Aktivität am Maximum (Norm < 0,3)

Es können folgende Veränderungen bei einer Nierenarterienstenose auftreten:

- Verschiebung des Maximums > 2 min bzw. > 40 % zur Basisuntersuchung
- Veränderung des 20 min/Maximum-Quotienten > 0,15
- Verminderung des relativen Uptakes > 10 %
- Veränderung der Zeitaktivitätskurve mit deutlich verzögertem oder nicht nachweisbarem Abfall über der betroffenen Niere
- Abnahme der errechneten GFR > 10 %

Statische Nierenzintigraphie (DMSA)

Die statische Nierenzintigraphie (■ Tab. 19.7) wird überwiegend bei Kindern durchgeführt. Hierbei steht nicht die Funktion an sich im Vordergrund, sondern die Untersuchung dient u. a. dem Nachweis von Nierengewebe sowie ggf. dem Nachweis von Veränderungen der Nieren. Hierbei lassen sich auch kleine Funktionsdefekte nachweisen, die z. B. nach wiederholten Nierenbeckenentzündungen auftreten können.

Auch bei deutlich eingeschränkter Nierenfunktion ist eine Bestimmung der prozentualen Seitenanteile möglich, hier z. B. vor einer geplanten operativen Maßnahme.

19.3.2 Hodenzintigraphie

Die Hodenzintigraphie (■ Tab. 19.8) wird zur einfachen Unterscheidung der Ursachen von akuten, nicht traumatisch bedingten Hodenschmerzen eingesetzt. Hierbei kann zwischen einer Verdrehung des Hodens (Hodentorsion) mit Unterbrechung der Blutzufuhr und daraus resultierender Minderperfusion und einer (Neben-) Hodenentzündung mit erhöhter Perfusion unterschieden werden. Die gerade erst aufgetretene Hodentorsion ist gut mit einer Gefäß-Sonographie zu erkennen, sodass die Szintigraphie insbesondere bei unklaren Befunden zum Einsatz kommt. Eine Hodentorsion muss sehr schnell operiert werden, da die Spermienproduktion sonst in dem betroffenen Hoden nach 6–12 Stunden unwiederbringlich verlorengeht.

19.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

■ Tab. 19.9 zeigt den Einsatz der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.

19.5 Therapeutische Möglichkeiten

19.5.1 Radiologische Therapie

C. Vockelmann

Ultraschall/Kernspintomographie

Zur Behandlung von Uterusmyomen gibt es neben der klassischen operativen Therapie mit einer Myomenukleation oder einer Hysterektomie als sehr neues Verfahren das sog. HIFU (englisch für hochintensivierter fokussierter Ultraschall). Hierbei wird durch den hochintensiven fokussierten Ultraschall das Zielgewebe innerhalb weniger Sekunden stark erhitzt (70–100 °C). Der Ultraschall kann dabei sehr exakt das Zielgebiet erreichen, umgebendes Gewebe wird geschont. Um das Zielgewebe zielgenau zu therapieren, erfolgt die Behandlung im MRT. Notwendig ist hierzu eine Aufrüstung eines normalen MRT mit dem Ultraschall inklusive der Steuerungseinheiten. Durch die sehr exakte Therapie mit Schonung der Umgebung gibt es auch Entwicklungen, das Verfahren in anderen Bereichen (Prostatakarzinom, Pankreaskarzinom und vieles mehr) einzusetzen. Die Entwicklung der nächsten Jahre wird zeigen, ob sich das Verfahren dauerhaft etablieren kann.

Angiographie

Auch angiographische Verfahren werden in der Behandlung von Uterusmyomen eingesetzt. Indikation ist hierfür zumeist die Ablehnung einer operativen Therapie. Für die Embolisation ist die Sondierung beider Aa. Iliacae internae notwendig. Über diese werden dann die Aa. uterinae sondiert und mit Partikeln embolisiert. Die Patientinnen zeigen nach dem Eingriff regelmäßig ein Postembolisierungssyndrom mit starken Schmerzen und oft auch Fieber, das eine stationäre Schmerztherapie erfordert.

19.5.2 Strahlentherapie

C. Marks

Zu den Urogenitaltumoren zählt man die Tumoren, die zum einen den Harnapparat betreffen und zum anderen den Geschlechtsapparat, sowohl bei Frauen als auch bei Männern. In diesem Kapitel werden

ausschließlich die Tumore des männlichen Geschlechtsapparates behandelt, die gynäkologischen Tumore werden im näher betrachtet.

Harnsystem

Harnblasenkarzinom

Die Stadieneinteilung erfolgt über das TNM-System. Überwiegend gehen Blasenkarzinome aus den Urothelzellen (Übergangsgewebe) hervor, aber auch aus Plattenepithel- und Adenozellen. Dabei wächst ein Großteil der Tumore zunächst oberflächlich (nicht-muskelinvasiv) und an den Seitenwänden der Blase, nur wenige wachsen in den Muskel ein (muskelinvasiv).

Ursachen

Zwei der Hauptursachen für das Harnblasenkarzinom sind Nikotinabusus und Kaffeekonsum. Auch chronische Harnwegsinfekte durch Entzündungen oder Blasensteine, übermäßiger Konsum von Süßstoffen und aromatische Amine (z. B. in Lösungsmitteln und Farbstoffen) können dafür verantwortlich sein.

Symptome

Ein erstes Anzeichen dafür können Hämaturie (Blut im Urin), Dysurie (Blasenentleerungsstörung), Harndrang, Beinödeme und im fortgeschrittenen Stadium Knochenschmerzen und Atemnot (durch Metastasen) sein.

Strahlentherapie des Harnblasenkarzinoms

Die Therapie ist stadienabhängig. Nicht-muskelinvasive Tumore werden standardmäßig organerhaltend reseziert. Bei muskel-invasiven Tumoren ist die komplette Entfernung der Blase die erste Option. Alternativ, ebenfalls zum Organerhalt, kann eine sog. TURB (Transurethrale Elektroresektion der Blase über die Harnröhre) zur Tumormassenreduktion durchgeführt werden, eine Radiochemotherapie erfolgt im Anschluss.

➤ **Durch die Radiotherapie kann das Risiko für ein Rezidiv minimiert werden; sie kann den Patienten darüber hinaus vor dem Verlust der Blase und deren Funktion bewahren und sichert somit die Lebensqualität.**

■ Dosis/Fraktionierung

Adjuvant als Radiochemotherapie zum Organerhalt auf die Blase 54–60 Gy mit $5 \times 1,8/2,0$ Gy pro Woche, dabei auf den iliakalen Lymphabfluss 50, als 4-Felder-Box oder IMRT.

■ Lagerung zur Bestrahlung

Die Lagerung erfolgt in Rückenlage, die Beine werden mit einer Standardlagerungshilfe unterpolstert, die Arme nimmt der Patient auf die Brust.

Prognose

Bei oberflächlich liegenden Tumoren bis zum Stadium T1 liegt die 5-Jahres-Überlebensrate bei 70 % (bei muskelinvasiven Tumoren ca. 50 %), wobei für letztere ein sehr hohes Risiko für ein Rezidiv ohne adjuvante Radiotherapie besteht.

Karzinome der männlichen Geschlechtsorgane

Prostatakarzinom (Karzinom des Drüsengewebes der Vorsteherdrüse)

Der zweit- bzw. dritthäufigste Tumor des Mannes ab dem 50. Lebensjahr entsteht zu über 80 % als Adenokarzinom in der peripheren Zone der Prostata. Dabei sind meistens mehrere Herde auf die ganze Prostata verstreut.

Diagnostisch können die rektale Untersuchung und Bestimmung des PSA-Wertes (Prostata-spezifisches Antigen im Blut, „Tumormarker“) Aufschluss geben über einen möglichen Tumor. Dabei ist zu beachten, dass der PSA-Wert auch bei einer gutartigen Vergrößerung der Prostata (Prostatahyperplasie) oder einer Entzündung (Prostatitis) erhöht sein kann. Durch eine transrektale Biopsie mittels Ultraschall können Zellproben gewonnen werden. Für die Stadieneinteilung des Prostatakarzinoms gibt es zahlreiche Einstufungsschemata, u. a. die des TNM-Systems, des Gleason-Score (Beurteilung feingeweblicher Proben aus der Prostata nach festgelegtem Schema) oder die Klassifizierung nach Risikogruppen, z. B. nach D'Amico:

Einteilung nach D'Amico

Low risk PSA von max. 10 ng/ml und Gleason 2–6 und bis Stadium 2b

Intermediate risk
High risk

Alles, was nicht low risk oder high risk ist
PSA > 20 ng/ml oder Stadium T3/T4 oder PSA 10–20 ng/ml und Gleason 8–10

Ursachen

Genaue Ursachen für die Entstehung sind nicht bekannt. Bei einer bereits bestehenden gutartigen Vergrößerung der Prostata (benigne Prostatahyperplasie) können im Laufe der Zeit Zellen entarten.

Symptome

Im Anfangsstadium meist symptomlos verlaufend, können andauernder Harndrang, häufiges Wasserlassen in nur kleinen Mengen (Pollakisurie) oder Blut im Urin (Hämaturie) ein Anzeichen für einen Tumor sein.

Strahlentherapie des Prostatakarzinoms

1. Primäre Radiotherapie

Bei **low risk** erfolgt nur eine Radiotherapie, eine alternative Behandlungsmöglichkeit ist eine OP. Bei **intermediate risk** wird eine Radiotherapie mit einer 6 monatigen HAT kombiniert. Bei **high risk** wird eine Radiotherapie durchgeführt, bei der ggf. der pelvine Lymphabfluss mitbestrahlt wird und zusätzlich über 2–3 Jahre eine HAT gegeben wird.

■ Dosis/Fraktionierung

Auf die Prostataloge > 72 Gy mit $5 \times 1,8/2,0$ Gy pro Woche als IMRT.

2. Adjuvante Radiotherapie

Die adjuvante Radiotherapie erfolgt nach Operation und bei bestehenden Risikofaktoren (R1, ab Stadium T3 oder messbarem PSA-Wert).

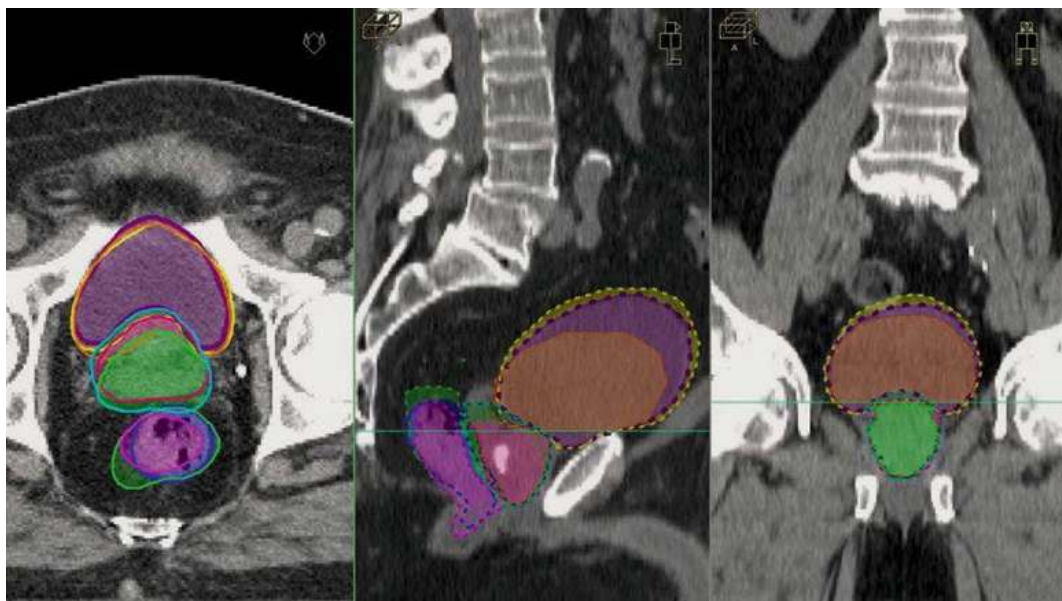
■ Dosis/Fraktionierung

Auf das ehemalige Tumorbett 60 Gy und bei biochemischem Rezidiv 66 Gy.

3. Biochemisches Rezidiv

Bei PSA-Anstieg (z. B. 3 Blutproben in Folge erhöht) wird eine Radiotherapie durchgeführt.

Durch den Einsatz der IMRT können heutzutage Blase und Rektum noch besser geschont werden, als mit einer 4-Felder-Box, da sie das Zielvolumen viel genauer umschließen können. Die Einführung von



■ Abb. 19.1 Bestrahlungsplanung zur Bestrahlung der Prostata

Cone Beam-CTs (Kegelstrahl-CTs), die es ermöglichen, unmittelbar vor der Bestrahlung ein CT der zu bestrahlenden Region anzufertigen, hat dazu geführt, dass die Zielgenauigkeit deutlich zugenommen hat. Mithilfe dieser Aufnahmen kann die/der MTRA, anders als auf den planaren EPID-Aufnahmen (Electronic Portal Imaging Device, Feldkontrollaufnahmen), die Blasen- bzw. Rektumfüllung kontrollieren, um ggf. darauf zu reagieren.

Weitere Optionen sind die tägliche Ultraschallkontrolle oder das Einbringen von sog. Goldmarkern, kleinen Goldpartikeln in die Prostata, zur Lagerungskontrolle.

Die primäre Prostata-Bestrahlung unter Dosisescalation beinhaltet zur Bestrahlungsplanung 3 CT-Aufnahmen an 3 aufeinanderfolgenden Tagen, um 3D-Datensätze mit drei verschiedenen Füllungszuständen von Blase und Rektum zu erhalten (■ Abb. 19.1). Mittels Matching werden die 3 Aufnahmen übereinandergelegt und anhand dieses Datensatzes die Planung der IMRT-Bestrahlung durchgeführt. Auf diese Weise kann die Organbeweglichkeit der Prostata, der Blase und des Rektums abgeschätzt und die Sicherheitssäume entsprechend gewählt werden. Am Bestrahlungsgerät wird mithilfe der IGRT (Image Guided Radiotherapy, bild-

gestützte Radiotherapie) die exakte Lagerung kontrolliert und bei Abweichungen angepasst.

Neue Konzepte im Rahmen von sog. Dosisescalationsstudien, bei denen immer höhere Dosen im Zielvolumen appliziert werden, sollen eine noch bessere lokale Kontrolle des Tumors erzielen. Dabei werden mittlere Dosen im Zielvolumen von über 80 Gy verabreicht.

Die **Hormontherapie** (HAT = hormonablativ Therapie) führt durch antiandrogene Medikamente („chemische Kastration“) dazu, dass die männlichen Geschlechtshormone in ihrer Wirkung unterdrückt werden. Dabei tritt durch die hormonelle Verschiebung eine „Verweiblichung“ auf, da die weiblichen Geschlechtshormone jetzt im Körper überwiegen, wobei es zum Wachstum der männlichen Brustdrüsen (Gynäkomastie) kommen kann. Um dieses Wachstum zu stoppen oder vor Therapiebeginn zu unterdrücken können die Brustdrüsen bis 12 Gy mithilfe von Elektronen bestrahlt werden, als 3×4 Gy oder 4×3 Gy-Konzept, wobei die Energie abhängig ist von der Dicke des Drüsenkörpers. Diese Bestrahlung kann vor, während oder nach der Prostata-Bestrahlung unter Langzeit-HAT (2–3 Jahre) durchgeführt werden.

Eine Therapie bei fortgeschrittener Erkrankung im palliativen Stadium kann mit HAT, z. B. GnRH-Analogen, Docetaxel (Chemotherapeutikum) oder neuen Medikamenten (z. B. Abiraterone) durchgeführt werden.

In den Stadien T1 und T2 besteht die Möglichkeit einer interstitiellen Brachytherapie, bei der dem Patienten Iod-125-Seeds (samenförmige kleine radioaktive Strahlenquellen) in die Prostata implantiert werden und dort verbleiben. Eine weitere Option ist die vorübergehende Brachytherapie mit Iridium-192, welches über Katheter in die Prostata eingebracht und nach der Behandlung entfernt wird.

■ Vorbereitungen zur Bestrahlung

Der Patient wird darüber aufgeklärt, während der Bestrahlungszeit auf blähende oder scharfe Speisen zu verzichten, um den Darm nicht zusätzlich zu reizen oder zu belasten. Er wird angewiesen zu jeder Bestrahlung mit gut gefüllter Blase zu seinem Bestrahlungstermin zu erscheinen und nach Möglichkeit vorab den Darm zu entleeren.

➤ **Durch die Nähe der Prostata zu Blasenhalz und Rektumvorderwand ist es extrem wichtig, dass der Patient zu jeder einzelnen Bestrahlung und auch zur CT-Planung eine möglichst gut gefüllte Blase hat und nach Möglichkeit vorab den Darm entleert. Nur so ist gewährleistet, dass sich die Blase nach oben und das Rektum sich nicht ins Bestrahlungsfeld schieben, um eine maximale Schonung zu erreichen.**

■ Lagerung zur Bestrahlung

Sie erfolgt i. d. R. in Rückenlage, die Arme nimmt der Patient auf die Brust, damit sie bei schräg einfallenden Feldern nicht im Bestrahlungsfeld liegen. Die Beine werden mit einer Standardlagerungshilfe unterpolstert.

Zur besseren Schonung von Anteilen des Dünndarmes kann die Bestrahlung auch in Bauchlage auf einer Lagerungshilfe mit einer Aussparung im Bereich des Abdomens erfolgen. Dadurch wird auch eine möglichst gleiche Position der Bauchorgane gewährleistet.

Nebenwirkungen durch die Strahlentherapie

Zu den häufigsten Nebenwirkungen durch die Strahlentherapie zählen:

Diarrhoe (wässrige Durchfälle), Dysurie (Probleme beim Wasserlassen), Cystitis (Blasenentzündung), Proktitis (Mastdarmentzündung), Harndrang, Urethrastrikturen, Impotenz und Inkontinenz.

Durch die HAT können Nebenwirkungen auftreten wie: Sexualdysfunktion, Hitzewallungen, Gewichtszunahme und eine Verminderung der Knochendichte.

Prognose

Die 5-Jahres-Überlebensrate liegt bei 80 % im kurativen Stadium. Auch in einer palliativen Situation können durch eine Hormon- oder Chemotherapie mehrere Jahre gewonnen werden.

Hodentumore (Seminom, Nicht-Seminom)

Das Seminom ist ein Keimzelltumor und macht 90 % der malignen Hodentumore aus. Nicht-Seminome können aus Embryonalzellen hervorgehen, aber auch Mischformen darstellen. Nur 1 % aller bösartigen Tumore des Mannes sind Tumore des Hoden und treten bei Männern jüngeren Alters zwischen 25 und 40 Jahren auf.

Ursachen

Ursachen für das Seminom sind weitgehend unbekannt, ein Risikofaktor stellt das fehlerhafte Absinken des Hodens ins Skrotum dar (Maldescendus testis), bei dem der Hoden im Bauchraum verbleibt oder eine Testikuläre intraepitheliale Neoplasie (TIN, maligne Vorstufe).

Symptome

Eine schmerzlose und verhärtete Hodenvergrößerung ist ein erstes Symptom, im späteren Verlauf können Schmerzen durch Fernmetastasen auftreten.

Strahlentherapie des Hodenkarzinoms

Zunächst Semikastration (Entfernung des betroffenen Hodens), ggf. beider Hoden (Orchiektomie), wobei vor der OP u. a. der Tumormarker β -HCG (beta-humanes Choriongonadotropin, ein embryonales Protein) im Blut bestimmt wird, welches von

Nicht-Seminomen produziert wird. Beim Seminom kann stadienabhängig anschließend abgewartet werden (watchful waiting), eine Chemotherapie (Carboplatin) verabreicht oder bestrahlt werden.

Klassische Seminome zählen zu den strahlensensibelsten Tumoren und werden adjuvant bestrahlt.

Patienten mit Nicht-Seminomen werden operiert (ggf. mit anschließender Chemotherapie) und nicht bestrahlt.

■ Dosis/Fraktionierung

Beim Seminom im Stadium 1 (lokal begrenzter Befall) adjuvante Radiotherapie 20 Gy auf die paraaortalen Lymphknoten mit $5 \times 2,0$ Gy pro Woche.

Im Stadium 2 (retroperitoneale LK-Metastasen): 30 Gy bei kleinen Metastasen (bis 2 cm, Stadium 2A), 36 Gy bei größeren Metastasen (bis 5 cm, Stadium 2B) mit $5 \times 2,0$ Gy pro Woche als sog. „Hockystick“ auf die paraaortalen und pelvinen Lymphknoten.

Im Stadium 3 (andere befallene Lymphknotenstationen, Fernmetastasen M+) erhält der Patient eine Chemotherapie.

■ Vorbereitungen zur Bestrahlung

Vor jeglicher Therapie sollte bei Patienten mit bestehendem Kinderwunsch eine Kryokonservierung (das „Einfrieren“) der Spermien durchgeführt werden.

■ Lagerung zur Bestrahlung

Sie erfolgt in Rückenlage, die Arme werden seitlich neben dem Körper aber auch über dem Kopf in einer Schale gelagert werden. Die Beine werden mit einer Standardlagerungshilfe unterpolstert. Bei Verwendung einer Hodenkapsel wird eine Knierolle unter die Knie gelegt.

➤ **Ist nur ein Hoden operativ entfernt worden und wird der Patient an den paraaortalen und pelvinen Lymphknoten bestrahlt („Hockystick“), empfiehlt sich während der Bestrahlung dem Patienten eine Hodenkapsel zum Erhalt der Fertilität des verbliebenen Hodens anzulegen. Dies kann der Patient nach kurzer Einweisung täglich selbst vor der Lagerung durch die/den MTRA bewerkstelligen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Hodenkapsel mit**

dem kranialen Anteil nicht im Bestrahlungsfeld liegt, um ungewollte Abschwächung zu vermeiden.

Nebenwirkungen durch die Strahlentherapie

Bei der Bestrahlung der paraaortalen Lymphknoten können Anteile des Magens mit im Bestrahlungsfeld liegen. Während der Therapie kann es zu Übelkeit kommen, die i. d. R. medikamentös behandelt werden kann.

Prognose

Die Heilungschancen liegen sowohl beim Seminom als auch beim Nicht-Seminom mit 95 % sehr hoch. Patienten mit dieser Tumorerkrankung haben bei den Erwachsenen die besten Chancen auf Heilung unter den malignen Tumoren.

Peniskarzinom

Das Peniskarzinom zählt zu den am seltensten vorkommenden Tumoren und wird von Plattenepithel- oder Basalzellen gebildet.

Ursachen

Die Häufigkeit nimmt mit steigendem Alter zu. Bei Männern, die kurz nach der Geburt beschnitten wurden, findet sich dieser Tumor nahezu nicht, was darauf schließen lässt, dass eine mangelnde Genitalhygiene die Entstehung begünstigen kann.

Strahlentherapie des Peniskarzinoms

Als Optionen stehen die organerhaltende Operation, die Penektomie (operative Entfernung des Penis), die Brachytherapie oder eine perkutane Radiotherapie zur Wahl.

Bei einer Radiotherapie besteht die Gefahr einer Stenose des Harnleiters und Nekrosen des Gewebes, führt aber zu besseren kosmetischen Ergebnissen und trägt zum Erhalt des Penis bei. Tumore, die die Lymphknoten befallen haben, sind meist schnellwachsend und hochaggressiv. In diesen Fällen ist eine Radiochemotherapie die Therapie der Wahl.

■ Dosis/Fraktionierung

Primäre Radiotherapie auf den Primärtumor 60 Gy mit $5 \times 1,8/2,0$ Gy pro Woche.

Adjuvant mit 50–56 Gy, häufig in Kombination mit einer Chemotherapie.

Bei befallenen Lymphknoten beträgt die Gesamtdosis 50 Gy auf die Leisten, zusätzlich weitere 10 Gy als Boost auf einzelne befallene Lymphknoten.

■ Lagerung zur Bestrahlung

Sie erfolgt in Rückenlage, die Arme werden seitlich neben dem Körper gelagert. Die Beine werden mit einer Standardlagerungshilfe unterpolstert.

Nebenwirkungen durch die Strahlentherapie

Zu den akuten Nebenwirkungen gehören Erytheme und Entzündungen von Harnröhre und Darmabschnitten, die sich zwangsläufig im Bestrahlungsfeld befinden. Im weiteren Verlauf kann es zur Bildung von Fisteln und Strikturen kommen, sowie zu Nekrosen.

Prognose

Rechtzeitig erkannt und behandelt liegt beim Peniskarzinom, ohne befallene Lymphknoten, die 5-Jahres-Überlebensrate bei 80–90 %, sind bereits Lymphknoten befallen nur noch bei 40–50 %.

19.6 Fallbeispiele

C. Marks, C. Vockelmann

Fall 1

Die zuständige MTRA für die Bestrahlungsplanung im CT ruft einen neuen Patienten im Wartebereich auf, der an der Prostata bestrahlt werden soll. Von den Strahlentherapeuten wurde eine IMRT der Prostata mit 74 Gy verordnet. Der Patient bittet die MTRA bei der Begrüßung, ob er vorher noch schnell auf die Toilette gehen könnte, um seine Blase zu entleeren.

? Was müssen Sie als MTRA in diesem Fall bedenken?

✓ Für die vorgesehene Bestrahlung der Prostata mit 74 Gy ist unbedingt zu beachten, dass der Patient zu jedem Termin, auch zum Planungs-CT, eine gut gefüllte Blase und ein möglichst leeres Rektum hat, um die Strahlenbelastung für Blasenhalshals und Rektumvorderwand so gering wie möglich zu halten. Darum sollten Sie

den Patienten erst nach dem CT auf die Toilette schicken, außer, er kann vorab das Rektum entleeren. Ist die Blase nicht ausreichend voll, sollten Sie dem Patienten am besten stilles Wasser zu trinken geben, um nach entsprechender Wartezeit mit der CT-Planung zu beginnen.

Fall 2

Kevin, 21 Jahre, hat heftigste Schmerzen in der linken Flanke, die in die Leiste ausstrahlen. Er krümmt sich und fühlt sich sterbenselend.

Der aufnehmende Arzt vermutet einen Harnleiterstein. Die Sonographie zeigt einen leichten Harnstau.

? Welche Untersuchung führen Sie durch? Was beachten Sie aus strahlenhygienischen Gründen?

✓ Untersuchungsverfahren der Wahl ist ein low-dose-CT der ableitenden Harnwege. Das bedeutet, dass Sie den Scanbereich von den Nieren bis zum Blasenboden planen. Vor der Untersuchung geben Sie Kevin eine Hodenkapitel. Damit Sie wirklich nicht zu viel scannen, haben Sie während des Scans den Finger auf der Stop-Taste und beenden die Untersuchung, sobald sie den Blasenboden erreicht haben.

Literatur

- AG-MTM. Arbeitsanweisungen Nuklearmedizin Nierendiagnostik. www.nuklearmedizin.de
- Bamberg M, Molls M, Sack H (2009) Klinik, 2. Aufl. Radioonkologie, Bd. 2. Zuckerscherdt Verlag, München Wien New York
- Bundesamt für Strahlenschutz (2012) DGN-Handlungsempfehlung (S1-Leitlinie) Nierenfunktionsuntersuchung mit und ohne Diagnostische Referenzwerte für nuklearmedizinische Untersuchungen. www.bfs.de
- EANM Dosage Card: www.eanm.org
- Furosemidbelastung bei Kindern und Erwachsenen, Stand 4/2013 (AWMF-Registriernummer 031-041): www.nuklearmedizin.de; www.awmf.de
- Faller A (1999) Der Körper des Menschen: Einführung in Bau und Funktion, 13. Aufl. Thieme, Stuttgart New York
- Gunderson L, Tepper J (2011) Clinical Radiation Oncology, 3. Aufl. Elsevier, München
- Jaeger P (2010) Urologische Malignome. In: Bachmann-Mettler I, Gaiser A, Kroner T, Margulies A (Hrsg) Onkologische Krankenpflege, 5. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg, S 764–771

Leitlinien der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung in der Röntgendiagnostik – Qualitätskriterien röntgendiagnostischer Untersuchungen, gemäß Beschluss des Vorstandes der Bundesärztekammer vom 23. November 2007

Leitlinie für die Diagnostik einer renovaskulären Hypertonie, H.-J. Otto: Leitlinie in Anlehnung an Taylor AT Jr., et al. Procedure Guideline for Diagnosis of Renovascular Hypertension. J Nucl Med 1998; 39: 1297-302. www.nuklearmedizin.de

Menche N (2003) Biologie Anatomie Physiologie, 5. Aufl. Urban & Fischer, München Jena

Mueller-Lisse UG, Scherr M (2003) 1H-MR-Spektroskopie der Prostata: Ein Überblick. Der Radiologe 43(6):481–488

Nuklearmedizin 4. Auflage, Herausgeber Torsten Kuwert et al., Thieme: www.thieme.de Sauer R (2003) Strahlentherapie und Onkologie. 4. Auflage Urban & Fischer, München Jena

Stroszczynski C, Degenhart C. Uterusmyomembolisation und fokussierter Ultraschall: Stand 2013. Bildgeführte Methoden zur Therapie des symptomatischen Uterus myomatosis. Der Gynäkologe 2014/1; publiziert am: 1.1.2014 0:00; Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2014) DOI: 10.1007/s00129-013-3200-4

Thüroff S, Chaussy Quelle C (2008) HIFU in der Urologie. Der Urologe. 47(4): S. 431–440 doi:10.1007/s00120-008-1658-9

Zilles K, Tillmann BN (2010) Anatomie. Springer Medizinverlag, Berlin, Heidelberg, New York

Diagnostik und Therapie – Gynäkologie

U. Blum, M. Kahl-Scholz, C. Marks, J. Thiele, C. Vockelmann

20.1 Allgemeines – 524

20.1.1 Topographische Anatomie – 524

20.1.2 Funktion – 524

20.2 Radiologische Diagnostik – 524

20.2.1 Sonographie – 524

20.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik – 524

20.2.3 Computertomographie – 527

20.2.4 Kernspintomographie – 527

20.3 Nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie – 528

20.3.1 Mammakarzinom – 528

20.3.2 Vulvakarzinom – 529

20.3.3 SLN-Diagnostik bei anderen gynäkologischen Tumoren – 530

20.3.4 Ovarialkarzinome – 530

20.4 Wertigkeit – 530

20.5 Therapeutische Möglichkeiten – 530

20.5.1 Radiologische Therapie – 530

20.5.2 Strahlentherapie – 532

20.6 Fallbeispiele – 536

Literatur – 537

20.1 Allgemeines

M. Kahl-Scholz

20.1.1 Topographische Anatomie

Neben der Brustdrüse zählen zu den weiblichen Geschlechtsorganen die Eierstöcke, Gebärmutter, Scheide und die Schamlippen.

Die Brustdrüse besteht hauptsächlich aus Fett- und Bindegewebe, der Haut mit dem Warzenvorhof (Areola mammarum) und der Brustwarze (Papilla mammaria). Ab der Pubertät nimmt das Gewebe bei Frauen zu.

Der Eierstock (Ovarium) ist etwa pflaumen- groß und liegt in der Seitenwand des Beckens in der Fossa ovaria. Von ihm geht der Eileiter (Tuba uterina) aus, der etwa 10–15 cm lang ist und in der Gebärmutter (Uterus) endet. Der Uterus ist birnenförmig und wird in den Körper (Corpus uteri) und den Gebärmutterhals (Cervix uteri) unterteilt. Letzterer geht in die Scheide (Vagina) über, die ca. 10 cm lang ist und zu den Schamlippen (Labia majora et minora pudendi) und dem Scheidenvorhof (Vestibulum vaginae) führt.

20.1.2 Funktion

Gesteuert durch hormonelle Einflüsse kann die weibliche Brustdrüse zur Milchproduktion angeregt werden. Die Eierstöcke geben monatlich ein oder mehrere Eier für die Befruchtung frei. Die Gebärmutter baut ihre Schleimhaut auf, um eine eventuelle Einnistung einer befruchteten Eizelle zu ermöglichen. Erfolgt dies nicht, wird die aufgebaute Schleimhaut als monatliche Regelblutung wieder ausgeschieden und der Prozess beginnt erneut – bis zu den Wechseljahren, in denen der Rhythmus immer mehr außer Kraft gesetzt wird.

20.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

20.2.1 Sonographie

Neben dem inneren Genitale (► Kap. 19) gehört die weibliche (und auch männliche) Brustdrüse zum Gebiet der Gynäkologie. In der Untersuchung der Mamma gehört die Sonographie neben der klinischen Untersuchung inklusive der Palpation der Brust zur Basisdiagnostik (■ Tab. 20.1). Die Sonographie der Brust erfordert einen **hochauflösenden Schallkopf (7,5 MHz)**. Es werden beide Brüste ausführlich untersucht, i. d. R. einmal komplett transversal und in der zweiten Richtung sagittal. Als zusätzlich Ebene, insbesondere bei vorhandenen Befunden, eignet sich eine Ausrichtung des Schallkopfes zur Mamille. In dieser Ausrichtung lassen sich Milchgänge in der Brust im Verlauf abgrenzen.

Bei Beschwerden insbesondere jüngerer Patientinnen (<30 Jahre) ist die Sonographie die wichtigste Untersuchungsmodalität. Anhand der dann vorliegenden Befunde wird über eine eventuelle weitergehende Diagnostik entschieden.

20.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Die **Mammographie** ist der Standard in der Diagnostik der Brust (■ Tab. 20.2) mit Ausnahme jüngerer Patientinnen. Als bisher einzige Röntgenuntersuchung wird die Mammographie auch als Screeningmethode in Deutschland eingesetzt. Zum Screening werden dabei alle Frauen zwischen 50 und 70 Jahren eingeladen. Bei dieser Bevölkerungsgruppe ist belegt, dass durch das Screening mittels Mammographie durch eine frühzeitige Diagnosestellung Leben gerettet werden kann. Das Mammographie-Screening darf nur durch zertifizierte Screening-Einheiten durchgeführt werden. Die Mammographien müssen dabei strengen Qualitätsanforderungen genügen. Die in einer Screening-Einheit tätigen MTRA müssen sich speziell weitergebildet haben und einen Zertifizierungskurs „Fachkraft für Mammadiagnostik“ absolviert haben. Es erfolgt eine Doppelbefundung durch 2 spezialisierte und

■ Tab. 20.1 Untersuchungsprotokoll Sonographie Mamma

Patientenvorbereitung	Oberkörper frei machen lassen, Arm der zu untersuchenden Seite über den Kopf nehmen lassen
Schallkopf	7,5 MHz Linearschallkopf
Standardebenen	Axial und sagittal, ggf. ergänzend Ausrichtung zur Mamille
Besonderheiten	Ggf. ergänzende Duplexsonographie oder Powerduplex

■ Tab. 20.2 Untersuchungsprotokoll Mammographie

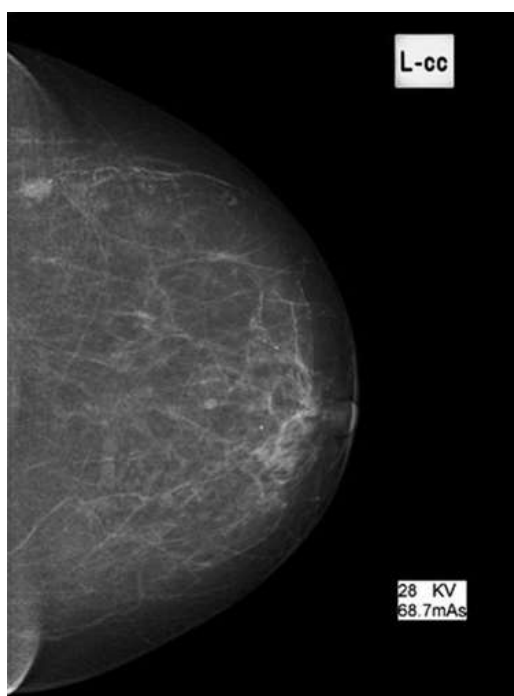
Patientenvorbereitung	Oberkörper entkleiden lassen
Positionierung	Stehend vor dem Untersuchungsgerät Brust mit der Hand „ausstreichen“, damit keine Hautfalten entstehen bei der Kompression
Aufnahmeparameter	25–35 kV
Fokus-Detektor-Abstand	≥ 60 cm
Belichtungsautomatik	Ja
Streustrahlenraster	Bewegtes Spezialraster (r4, r5)

zertifizierte Radiologen. Unstimmige Befunde werden durch einen dritten Radiologen und eine Konsensus-Konferenz beraten. Neben dem Screening sind typische Indikationen zur Durchführung einer sog. kurativen Mammographie ein suspekter Tastbefund oder Beschwerden.

➤ **Screening-Mammographien bei asymptomatischen Frauen dürfen nur durch zertifizierte Screening-Einheiten durchgeführt werden.**

Eine weitere Besonderheit der Mammographie ist die Verwendung der sehr weichen Röntgenstrahlung zwischen 25–30 kV. Auch die Kompression ist eine Besonderheit der Mammographie. Hierdurch wird zum einen eine Reduktion der Streustrahlen erreicht. Der zweite Effekt ist eine Homogenisierung der Dicke der Brust, die natürlich normalerweise brustwandnah wesentlich dicker ist als im Bereich der Mamille.

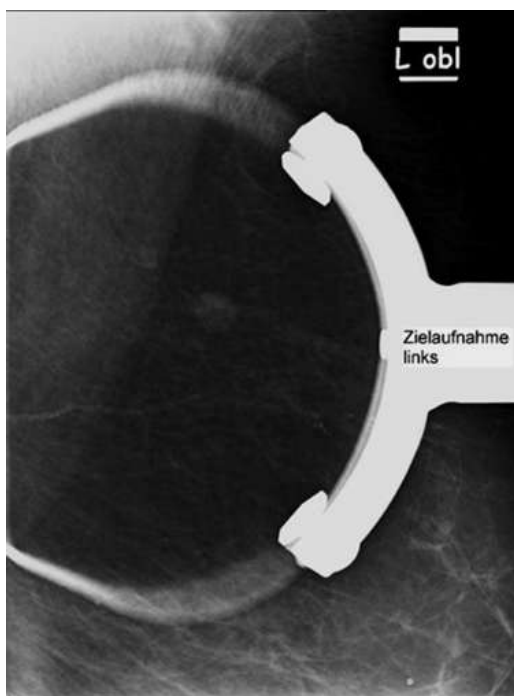
Noch viel wichtiger als bei allen anderen Aufnahmen ist die perfekte Einstelltechnik. Bei der Mammographie werden nicht zwei orthograd zueinander stehende Aufnahmen angefertigt, sondern eine Aufnahme im cranio-caudalen (cc) Strahlengang (■ Abb. 20.1), die zweite in einem mediolateral obliquen (mlo) Strahlengang (■ Abb. 20.2). Hierdurch werden der besonders oft auch von Karzinomen betroffene obere äußere Quadrant



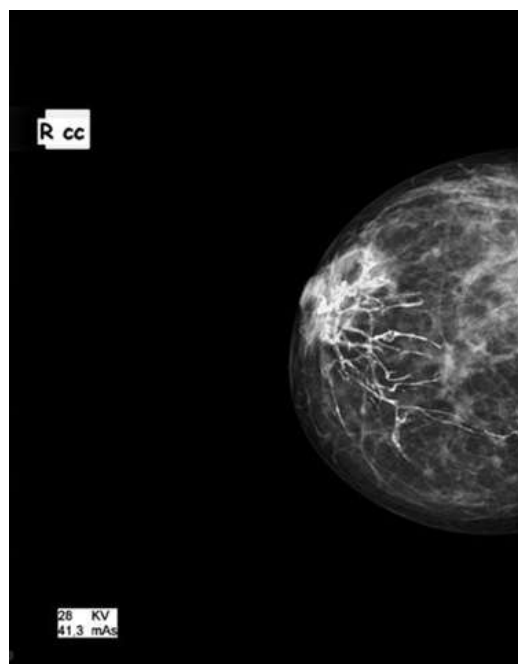
■ Abb. 20.1 CC-Projektion mit Herdbefund außen präpektoral



■ Abb. 20.2 MLO-Projektion mit Herdbefund oben



■ Abb. 20.3 Zielaufnahme mit Nachweis von kleinen Spikulae als Hinweis auf ein im Anschluss histologisch bestätigtes Mamma-Karzinom



■ Abb. 20.4 Galaktographie in CC-Projektion ohne Tumornachweis. (© Vockelmann)

der Brust sowie der axilläre Ausläufer bestmöglich erfasst. ■ Abb. 20.3 zeigt einen pathologischen Befund.

Als weitere diagnostische Möglichkeit steht die **Galaktographie** zur Verfügung (■ Abb. 20.4). Mit Einzug der MR-Mammographie ist dieses Verfahren in den Hintergrund gerückt. Bei blutiger Galaktorrhoe und sonst unauffälliger Bildgebung gibt es aber immer noch Indikationen für dieses Verfahren. Die Aufnahme selbst entspricht der der „normalen“ Mammographie. Vorher allerdings sondiert der Radiologe mit einer dünnen Kanüle, z. B. der Plastikkanüle einer blauen Viggo, den Milchgang und spritzt Kontrastmittel hinein. Ziel ist es, Kontrastmittelaussparungen in den Milchgängen zu finden, die auf ein Papillom hinweisen. **Papillome** sind grundsätzlich gutartige Tumore, die jedoch ein gewisses Entartungspotential aufweisen und daher in den meisten Fällen operiert werden.

■ **Tab. 20.3** Untersuchungsprotokoll MRT-Mammographie

Patientenvorbereitung	Oberkörper frei machen lassen, Patientenhemd verkehrt herum anziehen lassen; Metall, Schmuck etc. ablegen lassen
Positionierung	Bauchlage
Spule	Mamma-Spule
Scanbereich	Beide Mammæ mit axillären Ausläufern
Sequenzen/Wichtungen	T2w FS axial, T1w nativ und als Kontrastmitteldynamik (1 native, 5 KM-Messungen, zeitliche Auflösung ca. 80–90 sec/Sequenz), coronare T1w FS nach Kontrastmittelgabe
Kontrastmittel	0,1 mmol/kg KG, Flow 3 ml/sec
Nachverarbeitung	Subtraktion der nativen Serie von der 2. Kontrastmittelserie, ggf. auch der übrigen Kontrastmittelserien MIP-MPR der Subtraktionsserien

20.2.3 Computertomographie

Die Computertomographie spielt in der Diagnostik der Brust keine Rolle. Ein neuartiges Verfahren, das letztlich auch auf mithilfe von Röntgenstrahlen akquirierten Bildern beruht, stellt die **digitale Tomosynthese** dar. Zur Bildgenerierung werden zunächst Aufnahmen aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen. Aus diesen wird durch einfache Rückprojektion (erinnern Sie sich: die Rückprojektion gab es auch schon bei der Bildberechnung im CT, ► Kap. 5) letztlich überlagerungsfreie Schichtaufnahmen der Brust berechnet. Derzeit wird das Verfahren nur von wenigen vor allem großen Kliniken eingesetzt. In der Routinediagnostik hat die Tomosynthese noch keinen Stellenwert. Vorteile bieten sich vor allem bei Mammæ mit sehr dichtem Drüsenparenchym, bei denen die Beurteilbarkeit aufgrund der zahlreichen Überlagerungen bei konventionellen Mammographien erheblich eingeschränkt ist.

20.2.4 Kernspintomographie

Die Kernspintomographie ist bereits seit mehreren Jahren ein etabliertes Verfahren in der Diagnostik bestimmter Brustveränderungen. Dabei wird nicht jeder auffällige Befund in der konventionellen Mammographie untersucht. Die Indikation für eine MRT-Untersuchung der Brust ist zum einen die junge Patientin mit sehr dichter Brust und einem hohen Erkrankungsrisiko. Das gesicherte lobuläre

Karzinom wird häufig in der Kernspintomographie untersucht, um Zweitbefunde auszuschließen. Klassische Indikation für die MRT ist die Differenzierung zwischen einer Narbe nach einer Brustoperation und einem Rezidiv eines Mammakarzinoms.

Die Untersuchung (■ Tab. 20.3) wird in einer speziellen Mammographiespule durchgeführt. Die Patientin liegt bei der Untersuchung auf der Brust, in der Spule sind zwei Aussparungen für die beiden Brüste. In diesen werden die Brüste fixiert, um Atemartefakte zu minimieren. Obligat ist bei der Untersuchung die Kontrastmittelgabe, um eine dynamische Untersuchung der Brust zu erreichen. Hintergrund ist, dass Mammakarzinome ein frühes Kontrastmittelenhancement 1–3 min. nach der Kontrastmittelgabe zeigen, in den späteren Sequenzen in aller Regel ein Auswaschen oder auch eine Plateau-Phase des Kontrastmittels zeigen. Gutartige Tumore hingegen reichern eher weniger stark Kontrastmittel an, dafür aber im Laufe der Untersuchung zunehmend.

➤ **Eine MRT-Untersuchung der Brust erfordert immer eine Kontrastmittelgabe.**

Wie wichtig eine gute Fixierung der Brust ist, sehen Sie in dem Fallbeispiel (■ Abb. 20.5). In der T2-Wichtung lässt sich das Karzinom hyperintens abgrenzen. Das zweite Bild zeigt Ihnen die Subtraktion (■ Abb. 20.6) – hier sind besonders deutlich immer an den Hautgrenzen sichtbar störende Bewegungsartefakte zu erkennen. Zentral und im



■ **Abb. 20.5** T2-gewichtete fettgesättigte axiale Sequenz mit hyperintens abgrenzbaren Tumor rechts. (© Vockelmann)



■ **Abb. 20.6** Subtraktion mit Kontrastmittelaufnehmendem Mamma-Karzinom rechts. (© Vockelmann)

inneren Quadranten lässt sich der kontrastmittelaufnehmende Tumor differenzieren.

20.3 Nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie

U. Blum

In der Gynäkologie werden nuklearmedizinische Untersuchungen überwiegend nach der Diagnose einer bösartigen Erkrankung benötigt.

Selten sind Fragen nach dem Abfluss der Nieren bei anatomischen Fehlbildungen oder nach operativen Eingriffen (ausgedehnte Operationen des Unterbauches, z. B. Uterusentfernung mit Entfernung der Ovarien und Lymphknotenentfernung). Auch die Bestimmung der seitengetrennten Nierenfunktion (s. Urogenitales System, ► Kapitel 19) kann im Rahmen einer Chemotherapie oder einer geplanten Bestrahlung des Bauchraumes sinnvoll sein.

20.3.1 Mammakarzinom

Der Brustkrebs ist die häufigste bösartige Erkrankung der Frau, ca. jede 10.–15. Frau erkrankt im Laufe ihres Lebens an Brustkrebs.

Wichtige Prognosefaktoren sind der Befall von Lymphknoten oder Fernmetastasen (Lunge, Leber und Skelett). Andere Faktoren sind die Invasivität, das histologische Grading und die Hormonrezeptoren.

Im Rahmen der präoperativen Diagnostik ist die **Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie** (SLS, ► Kap. 22) eine Standarduntersuchung in den Brustzentren. Hierbei wird zwischen einem Protokoll am Tag vor der Operation bzw. einem Protokoll am Operationstag unterschieden. Zudem gibt es verschiedene Techniken der Injektion (intradermal, subdermal, peritumorös, subareolär, periareolär). Bisher erscheint keine Injektionstechnik bzgl. der Darstellung von Achsellymphknoten überlegen zu sein. Im Rahmen der rein dermalen und aureolären Injektion können Sentinel-Lymphknoten außerhalb der Axilla (z. B. parasternal) ggf. nicht nachgewiesen werden. Diese Lymphknoten werden jedoch üblicherweise nicht operativ entfernt. Die höchste richtige Darstellung des SLN gelingt bei T1 und T2 Tumoren.

Bei ausgedehnten Tumorstadien erfolgt zunächst eine präoperative Chemotherapie. Hierbei wird der Sentinel-Lymphknoten ggf. vor der Chemotherapie markiert und entfernt. Nach einer Chemotherapie ist der Wächterlymphknoten pathologisch u. U. falsch negativ.

■ **Tab. 20.4** FIGO und UICC-Kriterien des Vulvakarzinom*

FIGO	UICC	Tumorausbreitung
0	T _{is}	Carcinoma in situ
I	T ₁ N ₀	Tumor auf Vulva bzw. Vulva und Damm beschränkt, < 2 cm, keine Lymphknotenmetastasen
IA	T _{1a}	Eindringtiefe ≤ 1 mm
IB	T _{1b}	Eindringtiefe > 1 mm
II	T ₂ N ₀	Tumor auf Vulva bzw. Vulva und Damm beschränkt, > 2 cm, keine Lymphknotenmetastasen
III	T ₃ T ₁₋₃ N ₁	Tumor jeglicher Größe mit Ausdehnung auf Urethra, Vagina, und Anus, bzw. mit Befall eines gleichseitigen Leistenlymphknotens
IV	T ₄	Mit Infiltration der Urethra in Blasennähe, der Blasen- oder Rektumschleimhaut, des Beckenknochens
IVA	T ₄ N ₀₋₂ M ₀ T ₁₋₃ N ₂ M ₀	Lokale Ausbreitung, N ₂ = beidseitiger Leistenlymphknotenbefall
IVB	T ₁₋₄ N ₀₋₂ M ₁	Fernmetastasen, einschl. Befall der Beckenlymphknoten

*Mod. nach AGO, Arbeitsgemeinschaft Gynäkologische Onkologie online, AWMF online

Meistens postoperativ erfolgt eine **Skelettszintigraphie** (► Kap. 13) als Staginguntersuchung.

Sollten sich disseminierter Skelettmetastasen finden, kann eine **palliative Schmerztherapie** z. B. mit Samarium durchgeführt werden.

Eine **PET/CT-Untersuchung** wird aktuell in der Primärdiagnostik nicht empfohlen. Jedoch zeigt sich ein Nutzen in der Diagnostik des Lokalrezidivs sowie mediastinaler oder parasternaler Lymphknotenmetastasen. Auch bei der Aufdeckung von Fernmetastasen erscheint die PET/CT den anderen Methoden z. T. überlegen; Ausnahmen sind kleine Lungenmetastasen (< 10 mm) oder Hirnmetastasen. Auch im Therapiemonitoring kommt der PET/CT eine Bedeutung zu.

20.3.2 Vulvakarzinom

Man unterscheidet Vulvakarzinome, die mit einer Infektion mit dem humanen Papillom-Virus (HPV) einhergehen, von denen ohne begleitende Infektion.

Die HPV-assoziierten Vulvakarzinome zeigen derzeit eine zunehmende Inzidenz bei jüngeren Patientinnen. Wirksamen Schutz vor diesem Vulva-Karzinom scheint die HPV-Impfung vor dem ersten sexuellen Kontakt zu bieten; diese Impfung ist seit 2006 möglich.

Die Stadieneinteilung erfolgt nach FIGO-Kriterien (Klassifikation anhand der intraoperativen Situation), bzw. UICC (klinische bzw. pathologische Einteilung, ■ Tab. 20.4).

Das Vulvakarzinom metastasiert frühzeitig in die Lymphknoten. Hierbei steigt die Wahrscheinlichkeit der Metastasierung mit der Eindringtiefe sowie der Primärtumorgroße.

Ist ein Vulvakarzinom (bioptisch) gesichert, kann präoperativ eine SLN-Diagnostik bei klinisch unauffälligem Lymphknotenstatus erfolgen. Hierbei werden 4 (-6) Aktivitätsdepots um den Primärtumor herum intrakutan gespritzt. Die Aufnahmen erfolgten dynamisch sowie statisch bis zu einer Stunde nach der Injektion. Die sich zuerst darstellenden Lymphknoten sollten auf der Haut angezeichnet werden. Der Abgleich erfolgt während der Operation mit der Gammasonde.

Eine weitere bildgebende Diagnostik ist nur bei speziellen Fragestellungen ab dem Stadium FIGO III notwendig.

■ Tab. 20.5 Wertigkeit der therapeutischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	Durchleuchtung/ Angiographie	CT	MRT	Nuk	PET
Primärdiagnostik Mammakarzinom	P	P	N	N	W	N	N
Vulvakarzinom	P*	N	N	W	W	W	W
Ovarialkarzinom	P	N	N	P	N	W	W

N = Nicht indiziert; P = Primärdiagnostik; W = Weiterführende Diagnostik
P* transvaginale Endosonographie

20.3.3 SLN-Diagnostik bei anderen gynäkologischen Tumoren

Neuere Studien zeigen, dass auch bei anderen gynäkologischen Tumoren (Zervix-Karzinom, Uterus-Karzinom) eine SLN-Darstellung hilfreich sein könnte. Weitere Studien müssen den Nutzen noch belegen.

20.3.4 Ovarialkarzinome

Viele Ovarialkarzinome werden aufgrund des zunächst symptomlosen Verlaufes bzw. der zunächst relativ unspezifischen Beschwerden (z. B. unklare Bauchschmerzen, Völlegefühl, Gewichtsverlust) erst spät erkannt.

Auch hier kann die FDG-PET/CT in der Primärdiagnostik, der Rezidivdiagnostik und im Therapiemonitoring eingesetzt werden.

20.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

■ Tab. 20.5 zeigt den Einsatz der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.

20.5 Therapeutische Möglichkeiten

20.5.1 Radiologische Therapie

C. Vockelmann

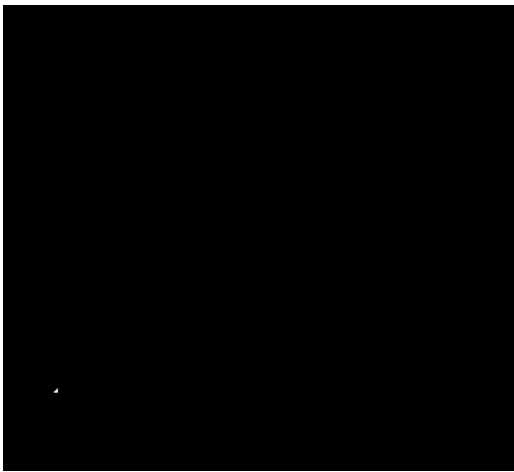
Stereotaktische Vakuumsaugbiopsie der Brust

Die Stereotaxie ist eigentlich eher ein diagnostisches als therapeutisches Verfahren. Es ersetzt heute in aller Regel die offene operative Mamma-Biopsie bei Herdbefunden, die nicht bereits sonographisch (in aller Regel durch den Gynäkologen) gestanzt werden konnte. Die Biopsie erfolgt mammographisch gesteuert. Die Patientin liegt dabei zumeist auf einem Untersuchungstisch, der für die zu untersuchende Brust ein Loch aufweist. Durch diese hängt die entsprechende Brust durch. Unter dem Gerät ist ein Mammographiegerät aufgebaut. Mit diesem werden zur Lokalisation der pathologischen Befunde von der zu biopsierenden Läsion, zumeist malignomsuspekter Mikrokalk, zwei Schrägaufnahmen aufgenommen. In diesen beiden Bildern wird der Kalk vom Radiologen markiert. Das hinterlegte Computerprogramm kann aus den beiden Markierungen dann die Tiefe der Läsion in der Brust und den Zugangsweg festlegen. Nach einer Lokalanästhesie und einer Stichinzision führt der Radiologe die Biopsie-Nadel, zumeist eine 11 G-Nadel, mit einem Trokar bis direkt vor die Läsion. ■ Abb. 20.7 zeigt vorbereitetes Vakuumsauggerät.

Nach einer erneuten Röntgenaufnahme zur Lagekontrolle wird die Biopsienadel freigesetzt (■ Abb. 20.8).



■ **Abb. 20.7** Vorbereitetes Gerät zur Vakuumsaugbiopsie mit 11G-Biopsienadel. (© Vockelmann)

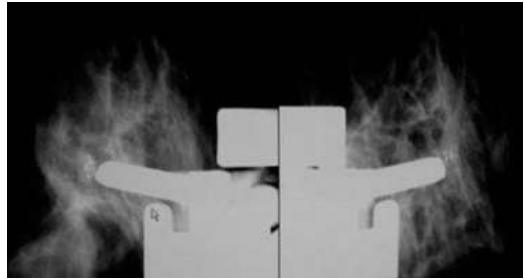


■ **Abb. 20.9** Entnommene Stanzbiopsate mit Mikrokalk in mehreren Proben. (© Vockelmann)

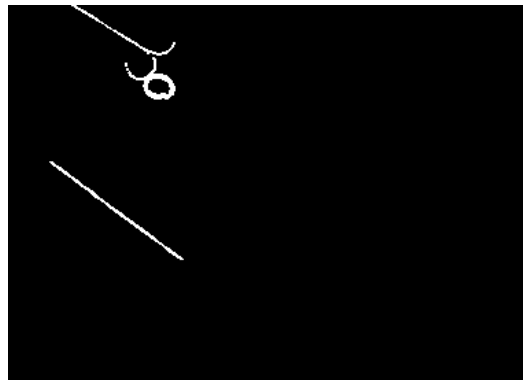
Dann werden mindestens 12 Proben entnommen. Dabei wird das Brustgewebe durch das Vakuum in den Biopsiekanal gesaugt und dann mit der Nadel rausgeschnitten. Für die nächste Probe wird die Nadel ein wenig gedreht, sodass letztlich rund um die Nadel Proben entnommen werden.

Dann wird die Nadel im Trokar etwas zurückgezogen und eine Kontrollaufnahme gemacht. Häufig lässt sich jetzt kein Mikrokalk mehr nachweisen. Dann sollte auf jeden Fall ein Clip durch den Trokar in den Entnahmebereich eingebracht werden. Sollte die Biopsie ein Malignom ergeben, muss eine Nachoperation erfolgen. Der Clip dient dazu, dann den richtigen Bereich operieren zu können.

Die mit der Vakuumsaugbiopsie gewonnen Proben werden zunächst in Mammographietechnik



■ **Abb. 20.8** Stereotaktische Kontrollaufnahmen mit Biopsienadel vor der zu biopsierenden Mikrokalkgruppe. (© Vockelmann)



■ **Abb. 20.10** Präparat nach OP mit Draht und Clip. (© Vockelmann)

geröntgt. Dies dient dazu, dem Pathologen die Proben mit Mikrokalk (■ **Abb. 20.9**) gesondert zu übermitteln, da hier eine besonders aufwendige Aufarbeitung erfolgen muss.

Wenn ein stereotaktisch biopsierter Bereich nachoperiert werden muss, wird der hinterlassene Clip mit einem Draht markiert (■ **Abb. 20.10**). Die Lokalisation für die Drahteinlage erfolgt dabei genauso wie bei der Stereotaxie. Der Draht dient dem Operateur dann als Leitschiene zum Operationsgebiet.

20.5.2 Strahlentherapie

C. Marks, J. Thiele

Zervixkarzinom

Epidemiologie, Risikofaktoren und Symptome

Das Zervixkarzinom ist der zweithäufigste gynäkologische Tumor nach dem Korpuskarzinom. Der Altersgipfel liegt bei ca. 50 Jahren, in Deutschland gibt es ca. 6500 Neuerkrankungen pro Jahr, aber auch bei jüngeren Frauen treten Zervixkarzinome immer häufiger auf, allerdings seit der Einführung der gynäkologischen Vorsorge mit Abstrichuntersuchung, ist die Inzidenz der Zervixkarzinome in Deutschland deutlich zurückgegangen. Die meisten Zervixkarzinome sind Plattenepithelkarzinome, nur ca. 10 % sind Adenokarzinome, die Klassifikation erfolgt nach der TNM-Klassifikation und nach FIGO (System zur Einteilung gynäkologischer Tumore).

Als Risikofaktoren gelten:

- Sexualverhalten, häufig wechselnder Sexualpartner
- Infektionen mit HPV 16, 18, 31, 33
- Rauchen
- niedriges soziales Umfeld
- Ernährungsfaktoren wie Vitamin A und C Mangel

Seit 2006 gibt es einen Impfstoff gegen die HPV-Viren (Humane Papillomaviren) 6, 11, 16 und 18 für Frauen zw. 16 und 26 Jahren, die bis zum Zeitpunkt der Impfung noch keinen Geschlechtsverkehr hatten.

Symptome sind postmenopausale Blutungen, häufige Zwischenblutungen, verlängerte Menstruation; je größer der Tumor jedoch ist, desto stärker können die klinischen Symptome wie Schmerzen im Becken, vaginaler Ausfluss, Stuhlprobleme oder auch Anämie sein. Allerdings werden die meisten Tumore sowie deren Vorstufe in Deutschland im Rahmen der gynäkologischen Vorsorge frühzeitig entdeckt.

Therapie

Das Therapiekonzept ist abhängig vom Tumorstadium, vom pelvinen und paraaortalen Lymphkno-

tenstatus und vom Resektionsrand. Zervixkarzinome in frühen Stadien werden meistens operiert, die Bestrahlung erfolgt bei positiven Lymphknotenbefall und einer bestimmten Tumorgroße.

Um das lokoregionäre Rezidivrisiko nach einer Operation zu vermindern, bekommen die Patientinnen eine Strahlentherapie. Zusätzlich wird meist eine Chemotherapie appliziert.

Indikationen für eine Bestrahlung sind:

- positiver Lymphknotenbefall
- Tumorgroße: über 4 cm
- ab FIGO III erfolgt eine primäre Radiochemotherapie i. d. R. als kombinierte Tele- und Brachytherapie
- Adenokarzinom
- R1/2, oder knapper tumorfreier Resektionsrand

■ Dosis und Fraktionierung

Perkutane Strahlentherapie Gesamtdosis 45–50,4 Gy, Einzeldosis 1,8–2 Gy/5 × wöchentlich.

Die Patientinnen werden bequem in Rückenlage mit einer Knie- und Fußfixierung gelagert, bekommen ein Planungs-CT; wichtig ist hier eine Vaginalmarkierung für die Therapieplanung, um die Vagina zu schonen. Die Bestrahlung erfolgt je nach Klinikstandard in 3D-konformaler Technik oder IMRT.

Die HDR Brachytherapie mit Ir-192 erfolgt, je nach Klinik, unterschiedlich mit GD 30–42,5 Gy/5–9 Gy pro Fraktion.

Die Brachytherapie erfolgt auch in Rückenlage. Viele Patientinnen bekommen zum Ausmessen des Applikators ein Planungs-CT und orthogonale Röntgenaufnahmen zur Lagekontrolle des Applikators.

■ Nebenwirkungen

Akute Nebenwirkungen sind vaginale und anale Schleimhautreaktionen, Durchfall, Mastdarmentzündung (Proktitis) und häufige Entleerung der Blase (Pollakisurie).

■ Prognosen

Die Prognosen und die 5-Jahre-Überlebensraten sind vom Stadium und von dem Lymphknotenbefall abhängig. Plattenepithelkarzinome haben eine bessere Prognose als Adenokarzinome.

Mammakarzinom

Epidemiologie, Risikofaktoren und Prävention

Das Mammakarzinom ist der häufigste bösartige Tumor und die zweithäufigste Krebstodesursache der Frau (10 % Frauen, 35 % Z. n. M. Hodgkin). Im Laufe ihres Lebens erkrankt fast jede zehnte Frau an Brustkrebs. Die Neuerkrankung in Deutschland liegt bei ca. 70.000 pro Jahr. Das mittlere Erkrankungsalter liegt bei ca. 64 Jahren und der Altersgipfel bei ca. 50 % der Frauen zwischen dem 50. und 70. Lebensjahr, ca. 20 % der Frauen erkrankt unter dem 50. Lebensjahr. Selten treten Mammakarzinome (ca. 0,5–1 %) bei Männern auf.

Die meisten Mammakarzinome treten sporadisch auf, nur ca. 20 % sind erblich familiär bedingte Erkrankungen. Weitere **Risikofaktoren** sind:

- frühe Menarche
- späte Menopause
- erhöhter Fettkonsum und mangelnde körperliche Aktivitäten
- Nullipara
- genetische Faktoren wie BRCA1/ BRCA2 oder Veränderungen des p53 Gen
- atypische Hyperplasie

Mit **präventiven Maßnahmen** wie:

- Aufklärung,
- regelmäßige Selbstuntersuchung,
- Screening,
- operative Prävention z. B. einfache Mastektomie bei Trägerinnen einer BRCA Mutation

kann man das Entstehen von Tumoren verhindern oder eine Früherkennung ermöglichen.

Symptome

Symptome sind häufig:

- tastbare Knoten in der Brust,
- Schmerzen, Druck, Spannungsgefühl und Verhärtungen der Brust,
- Orangenhaut, Entzündung, Einziehungen der Haut,
- Einziehung, Verlagerung, Formveränderungen der Mamille sowie Sekretion aus der Mamille,
- Allgemeinsymptome durch bereits existente Metastasen.

Therapie des Mammakarzinoms

Die Empfehlungen zur interdisziplinären Behandlung des Mammakarzinoms wurden aus der aktuellen S3 Leitlinie der deutschen Krebsgesellschaft des Jahres 2012 übernommen.

Es gibt unterschiedliche histologische Klassifikationen: Man unterscheidet zwischen invasiven und nicht-invasiven Karzinomen.

➤ **Duktale invasive Tumore treten bei 75 % und duktale Carcinoma in situ (DCIS „in situ“ = am Ort) bei 10–20 % der Patientinnen auf. Der Unterschied zwischen einem invasiven und nicht-invasiven Karzinom liegt in deren Wachstum. Karzinome die die Grenze des Milchganges noch nicht durchbrochen haben, bezeichnet man als nicht-invasiv. Hierzu zählt u. a. das DCIS. Wenn der Tumor allerdings eine Barriere durchbrochen hat, so spricht man von einem invasiven Karzinom.**

Die Stadieneinteilung erfolgt nach der TNM Klassifikation anhand histopathologischer Befunde, aber auch nach klinischen Angaben.

Mammakarzinome werden i. d. R. operiert. Man hat hier zwei verschiedene Vorgehensweisen, die Brusterhaltende Therapie (BET) oder die Mastektomie, wobei heute fast immer versucht wird, brusterhaltend zu operieren. Der Lymphknotenstatus wird anhand aller entfernten Lymphknoten histologisch erhoben.

Eine Mastektomie wird bei folgenden Indikationen durchgeführt:

- Wunsch der Patientin
- diffuse, ausgedehnte Kalzifikation
- Multizentrität (also das Auftreten mehrere Karzinomherde in unterschiedlichen Brustquadranten)
- inkomplette Entfernung des Tumors; eine brusterhaltende Nachresektion ist nicht mehr möglich
- inflammatorisches Mammakarzinom (meist sicht- und tastbare Veränderung durch Rötung der Brusthaut und Schwellung der Brust durch eine Tumorinfiltration in die Lymphbahn)
- voraussichtlich nicht zufriedenstellendes kosmetisches Ergebnis bei BET
- Kontraindikationen zur Nachbestrahlung

Jede Patientin, bei der eine Mastektomie geplant ist, muss über die Möglichkeit einer Brustrekonstruktion aufgeklärt werden.

Die Strahlentherapie ist bei brusterhaltender Therapie unverzichtbar. In der Regel bekommen die Patientinnen auch noch eine systemische neoadjuvante und/oder adjuvante Therapie (endokrine Therapie, Chemotherapie, Antikörpertherapie, Bisphosphonate).

■ Dosis und Fraktionierung

■ ■ Brusterhaltene Therapie

Die Dosis liegt bei ca. 50 Gy, $5 \times 1,8\text{--}2,0$ Gy/Woche, das Zielvolumen umfasst das gesamte Brustdrüsengewebe und die angrenzende Thoraxwand. Bei Niedrigrisikopatientinnen kann man alternativ auch hypofraktionierte Schemata anwenden, 40 Gy/ED 2,67 Gy.

Die Applikation erfolgt i. d. R. über zwei tangentielle Felder. Atemtriggierung bei der linksseitigen Mamma wird heute auch in vielen Kliniken eingesetzt, hier kann oft eine bessere Schonung des Herzens erreicht werden, um das Spätrisiko einer Herzschiädigung (z. B. Herzinfarkt) aufgrund der Bestrahlung zu minimieren.

Ein Boost kann bei invasiven Karzinomen die Rezidivrate in der Brust senken, d. h. bei einem DCIS erfolgt kein Boost. Die Boostdosis liegt bei (10)–16 Gy $5 \times 1,8\text{--}2,0$ Gy/Woche. Der Boost kann als Elektronen-Stehfeld, als Photonen-Stehfeld bzw. Tangente oder als Mixed-beam-Technik (Elektronen und Photonen) behandelt werden.

In Einzelfällen kann der Boost auch in einer intraoperativen Einzelbestrahlung (50 kV Röntgenstrahlen) appliziert werden, aber auch eine Brachytherapie, die sog. Multikathetertechnik, ist möglich.

■ ■ Mastektomie

Die postoperative Nachbestrahlung der Brustwand senkt das Risiko eines lokoregionalen Rezidivs, bei Patientinnen mit einem pT3/pT4 Stadium oder Lymphknotenbefall ist eine Nachbestrahlung erforderlich, ca. 50 Gy, $5 \times 1,8\text{--}2,0$ Gy/Woche, das Zielvolumen umschließt die Thoraxwand, einschließlich der Operationsnarbe mit Sicherheitssaum

■ ■ Bestrahlung des regionalen Lymphabflusses

Eine Strahlentherapie der Axilla wurde bisher nur bei einem vorhandenen Resttumor in der Axilla empfohlen, die der supra-/infraklavikulären Lymphabflusswege bei > 3 befallenen Lymphknoten. Aktuelle Daten zeigen jedoch, dass bereits bei deutlich weniger Risikofaktoren eine Strahlentherapie der Lymphabflusswege das Überleben der Patientinnen verbessern kann. Gesamtdosis ca. 50 Gy, $5 \times 1,8\text{--}2,0$ Gy/Woche, das Zielvolumen erfolgt isozentrisch über opponierende Stehfelder.

■ Lagerung zur Bestrahlung

Die Lagerung erfolgt in Rückenlage z. B. auf einem speziellen „Mammaboard“ und mit einer Kniepolsterung für die Beine. Die Arme werden über den Kopf genommen, bequem und reproduzierbar gelagert. Im Planungs-CT sollte die Narbe mit einer Drahtmarkierung markiert werden, damit sie komplett mit gescannt wird. Wichtig für die Planung der Boostbestrahlung sind Clip-Markierungen des Tumorbettes durch den Operateur.

Nebenwirkungen

Akute Nebenwirkungen treten eher geringgradig ausgeprägt auf. Häufig kommt es zu einer Rötung der Haut und Schwellung der bestrahlten Brust, seltener zu feuchten Epitheliolysen (Hautablösungen). Gelegentlich kann es zu einer Ösophagitis (Entzündung der Speiseröhre) im kranialen Speiseröhrenabschnitt, zu einer Pneumonitis (radiogen bedingte Lungenentzündung) des Lungensaums oder zu Herzrhythmusstörungen kommen. Späte Nebenwirkungen sind kardiale Toxizitäten bei linksseitiger Bestrahlung, Lymphödem des Arms bei Lymphabflussbestrahlung, sowie Fibrose der Brust.

Prognosen

Die Prognose ist u. a. abhängig vom axillären Lymphknotenstatus, der Tumorgöße und des Alters der Patientinnen. Haben die Patientinnen keinen Lymphknotenbefall und einen Tumor < 1 cm, liegt die 5-Jahre-Überlebensrate bei ca. 90 %. Aber auch der Hormon- und Her-2-neu Rezeptor muss bestimmt werden und kann sich positiv oder negativ auf die Prognose auswirken.

- **Her-2 Rezeptor ist ein Empfänger-molekül auf der Oberfläche von Körperzellen, z.B. befindet er sich an der Oberfläche normaler Zellen der Brustdrüse, aber auch an der Oberfläche von Zellen eines Mamma Karzinoms.**

Vaginalkarzinom (Karzinom der Scheide)

Das Vaginalkarzinom tritt meist nur bei Frauen im höheren Alter auf. Die Stadieneinteilung erfolgt über die FIGO-Klassifikation.

Ursachen

Ursachen für die Entstehung können Nikotinkonsum, häufig wechselnde Geschlechtspartner, mangelhafte Hygiene im Intimbereich oder eine Infektion mit Papillomaviren sein.

Strahlentherapie des Vaginalkarzinoms

Therapie: Kleine Tumore im Stadium T1 oder in-situ Tumore werden primär chirurgisch behandelt. Die primäre Strahlentherapie ist abhängig von Größe und Lokalisation des Tumors und kann zum Erhalt der Vagina und deren Funktion beitragen, was v.a. für junge Patientinnen ein entscheidender Faktor ist.

Als primäres Therapiekonzept kann eine perkutane Radiotherapie in Kombination mit einer Brachytherapie (Afterloading) durchgeführt werden.

Dosis/Fraktionierung: Primäre perkutane Radiotherapie des kleinen Beckens 40 Gy mit $5 \times 1,8$ Gy pro Woche als Becken-Box, bzw. 4 x pro Woche, wenn als Kombinationstherapie mit Afterloading, das nach einer Dosis von 20 Gy durch die perkutane Bestrahlung gestartet wird. Ausblockung der Mittelstrukturen während der perkutanen Bestrahlung bei Beginn des Afterloading, um ein Überschreiten der Toleranzdosen zu vermeiden.

Postoperativ als adjuvante Radiotherapie bei fortgeschrittenem Stadium 45–50 Gy mit $5 \times 1,8$ Gy pro Woche als 4-Felder-Box oder IMRT, Boost mit 10–15 Gy.

Patientinnen im fortgeschrittenen Stadium erhalten zusätzlich eine simultane Chemotherapie mit Cisplatin und 5-FU.

- **Eine Alternative im frühen Stadium stellt die Brachytherapie (Kurzstanztherapie) mittels Afterloading (Nachladeverfahren) dar, bei der über einen Vaginalzylinder eine Strahlenquelle (Iridium-192) eingebracht wird. Dabei kann die Dosis am Tumor auf 60–70 Gy erhöht werden, die Strahlenexposition für das umliegende Gewebe, v.a. Rektum und Blase reduziert sich auf ein Minimum.**

■ Vorbereitungen zur Bestrahlung

Die Patientin wird darüber aufgeklärt, während der Bestrahlungszeit auf blähende oder scharfe Speisen zu verzichten, um den Darm nicht zusätzlich zu reizen oder zu belasten. Sie wird angewiesen, zu jeder Bestrahlung mit gut gefüllter Blase zu ihrem Bestrahlungstermin zu erscheinen und nach Möglichkeit vorab den Darm zu entleeren.

■ Lagerung zur Bestrahlung

Die Lagerung erfolgt in Rückenlage, die Beine werden mit einer Standardunterlage unterpolstert, die Arme nimmt die Patientin auf die Brust.

Prognose

Frühzeitig entdeckt, sind die Heilungschancen gut. Die 5-Jahres-Überlebensrate liegt im Stadium FIGO 1 bei 70–80 %, im Stadium FIGO 2 bei 50–60 %.

Vulvakarzinom (Karzinom der Schamlippen)

Auch das Vulvakarzinom betrifft vorwiegend Frauen im höheren Alter. Die Stadieneinteilung erfolgt ebenfalls über die FIGO-Klassifikation.

Ursachen

Die Entstehungsursachen sind die gleichen wie beim Vaginalkarzinom.

Strahlentherapie des Vulvakarzinoms

Therapie: Die operative Entfernung des Tumors ist die Therapie der Wahl, wobei durch die radikale Entfernung der Schamlippen meist ein für die Patientin unbefriedigendes kosmetisches Ergebnis zurückbleibt. Die postoperative Radiotherapie ist v.a. bei Befall von Lymphknoten (ab mehr als 1 befallenen Lymphknoten, meist iliakal) angezeigt.

Dosis/Fraktionierung: Primäre Radiotherapie der Vulva und beider Leisten bis 50 Gy (bei N0) mit $5 \times 2,0$ Gy pro Woche, Boost des Primarius bis 60 Gy. Bei Lymphnotenbefall: zusätzlich zur Leiste Bestrahlung der Lymphknoten im Beckenbereich mit 45–50 Gy, ggf. Boost mit 10–20 Gy auf die befallenen Lymphknoten.

Postoperativ als adjuvante Radiotherapie auf den Primarius und ggf. der Leistenlymphknoten 50–60 Gy mit $5 \times 1,8$ Gy pro Woche.

Auf den Primärtumor bei R1-/R2-Resektion 60 Gy mit $5 \times 2,0$ Gy pro Woche als 4-Felder-Box oder als IMRT.

Die kombinierte Radiochemotherapie mit Cisplatin, Mitomycin oder 5-FU und 45–50 Gy, $5 \times 1,8$ Gy pro Woche, zur Tumorverkleinerung und anschließender operativen Resektion stellt im fortgeschrittenen Stadium eine Option dar.

Lagerung zur Bestrahlung: Die Lagerung erfolgt in Rückenlage, die Beine werden mit einer Knierolle unterpolstert und in Froschhaltung auseinander gespreizt, die Arme nimmt die Patientin auf die Brust.

Prognose

Ein frühzeitig entdecktes und behandeltes Karzinom der Vulva hat sehr gute Heilungschancen. Die 5-Jahres-Überlebensrate liegt im Stadium 1 ohne befallene Lymphknoten bei rund 78 %, im Stadium 2 bei knapp 59 %.

Ovarialkarzinom (Karzinom der Eierstöcke und Anhangsgebilde)

Das Ovarialkarzinom ist ein überwiegend von den Epithelzellen ausgehender Tumor, die jährliche Neuerkrankungsrate liegt bei 15 Frauen pro 100.000 Einwohner in Europa. Die Wahrscheinlichkeit daran zu erkranken steigt mit zunehmendem Alter.

Ursachen

Die Entstehung wird zusätzlich durch zahlreiche Faktoren begünstigt, wie: Mutation des BRCA1- oder BRCA2-Gens (Breast Cancer 1 bzw. 2, Brustkrebsgen, gehört zu den Tumorsuppressorgenen), äußere Einflüsse auf das Hormonsystem (keine oder späte Schwangerschaft, Unfruchtbarkeit, früh einsetzende Menarche, spät einsetzende Menopause),

aber auch Übergewicht und tierische Eiweiße und Fette. Dabei besteht ein dreifach erhöhtes Risiko, auch an Brustkrebs zu erkranken.

Symptome

Symptome treten erst in fortgeschrittenem Stadium auf und sind oft unspezifisch. Neben Völlegefühl, Druckschmerzen im Unterleib und Verdauungsschwerden können auch vaginale Blutungen auftreten. Größere Tumore können von außen tastbar sein.

Strahlentherapie des Ovarialkarzinoms

Therapie: Die komplette operative Resektion, ggf. mittels Hysterektomie und Adnexektomie (Entfernung der Gebärmutter und beider Eierstöcke) mit anschließender Chemotherapie sollte angestrebt werden.

Die strahlentherapeutische Behandlung erfolgt meist nur beim Rezidiv oder im palliativen Stadium zur Linderung von tumorbedingten Symptomen wie Schmerzen oder zur Behandlung von Lymphknotenmetastasen, aber auch bei Fernmetastasen im Gehirn.

Prognose

Die Überlebensrate ist stark abhängig vom Tumorstadium und der Histologie. Im Stadium 1, wenn der Tumor auf das Ovar begrenzt ist, liegt die 5-Jahres-Überlebensrate bei 85 %.

➤ Die frühzeitige Entdeckung des Ovarialkarzinoms im Rahmen der jährlichen gynäkologischen Früherkennung ist entscheidend für den Therapieerfolg. Mittels Ultraschall oder einer vaginalen Tastuntersuchung kann der Gynäkologe bei bestehendem Verdacht weitere Untersuchungen in die Wege leiten.

20.6 Fallbeispiele

C. Vockelmann

Fall 1

Frau Becker ist gerade 50 Jahre geworden. Jetzt ist ihr ein Brief ins Haus geflattert. Sie soll zum Mammographie-Screening kommen. Ein Termin ist in dem Brief

schon vorgeschlagen. Sie grübelt ein wenig und berät sich mit ihrem Mann. Frau Becker ist privat versichert und war schon öfter bei Dr. Leucht. Eigentlich würde sie lieber zu ihm gehen, als zu der Praxis, von der der Brief kommt.

- ❓ 1. Wird Dr. Leucht die Untersuchung als Screeningmammographie durchführen?
2. Wie erfolgt die Befundung von Screeningmammographien?

Fall 2

Frau Zucker hatte vor 2 Jahren ein Mammakarzinom. Die regelmäßigen Nachsorgen waren immer in Ordnung. Jetzt jedoch hat der Radiologe eine neue Verdichtung im Bereich der alten Operationsnarbe entdeckt.

- ❓ Mit welchen Verfahren oder Eingriffen sollte der Befund abgeklärt werden?

Fall 3

Frau Mai ist Anfang 50. Die Wechseljahre hat sie überstanden, dann jedoch fällt ihr eine vaginale Schmierblutung auf. Sie geht zum Frauenarzt, der eine transvaginale Sonographie durchführt. Er befürchtet ein Zervixkarzinom und entnimmt einen Abstrich, der den Verdacht bestätigt. Zur weiteren Diagnostik und Therapie weist er Frau Mai in die Klinik ein.

- ❓ 1. Welche weiteren diagnostischen Möglichkeiten bestehen?
2. Welche Therapieoptionen gibt es?

Fall 1

Screeningmammographien unterliegen sehr genauen Vorschriften. Asymptomatische Frauen im Rahmen eines Screenings dürfen nur von Screeningzentren untersucht werden. Die Mammographie wird im Rahmen des Screenings von 2 speziell geschulten Radiologen getrennt ausgewertet. Sollte die Beurteilung der beiden differieren, wird der Befund von einem dritten Radiologen bewertet und in einem Konsensusverfahren beurteilt.

✓ Fall 2

Zur Differenzierung zwischen einer Narbe und einem Rezidiv eignet sich als bildgebendes Verfahren die MR-Mammographie. Bei auch in der MR-Mammographie auffälligen Befunden erfolgt eine Vakuumsaugbiopsie oder Stanzbiopsie.

✓ Fall 3

Neben einer abdominalen Sonographie als Screeningmethode für abdominale Lymphknotenvergrößerungen kann eine MRT des kleinen Beckens zum Lokalstaging durchgeführt werden. Insbesondere bei größeren oder organüberschreitenden Tumoren werden neben der Sonographie auch eine CT-Untersuchung des Abdomens und zumindest eine Röntgenaufnahme der Lunge zum Staging durchgeführt. Je nach Lokalbefund wird postoperativ eine perkutane Bestrahlung mit einem Brachytherapie-Boost zur Vermeidung eines Lokalrezidivs durchgeführt.

Literatur

- Arbeitsanweisungen Nuklearmedizin: AG-MTM, www.nuklearmedizin.de
- Bamberg M, Molls M, Sack H (2009) Klinik, 2. Aufl. Radioonkologie, Bd. 2. W. Zuckschwerdt, München Wien New York, S 647–689
- EUROSCREEN working group (2012) Summary of the evidence of Breast cancer service screening outcomes in Europe and first estimate of the benefit and harm balance sheet. Journal of Medical Screening 19(S1)
- http://www.kvwl.de/arzt/kv_dienste/fortbildung/mammo/mammo_brosch_kbv.pdf
- Interdisziplinäre S3-Leitlinie für die Diagnostik, Therapie und Nachsorge des Mammakarzinoms, AWMF-Register-Nummer: 032 – 045OL Kurzversion 3.0, Juli 2011
- Krause et al (2007) Nuklearmedizinische Onkologie. ecomed Verlag, Hamburg
- Kuwert et al (2007) Nuklearmedizin, 4. Aufl. Thieme-Verlag, Stuttgart
- Leitlinie Vulva-Karzinom , www.awmf.org
- Lohr F, Wenz W (2007) Strahlentherapie kompakt, 2. Aufl. Urban und Fischer, München, S 1–23
- Sauer R (1998) Strahlentherapie und Onkologie für MTA-R, 3. Aufl. Urban und Schwarzenberg, Stuttgart, S. 338–345
- Schulz-Wendland R, Hermann KP, Uder M (2010) Digitale Tomosynthese der Brust. Radiologie up2date

10(3): S. 195–205 (ëVNR 2760512010047434284)

doi:10.1055/s-0030-1255574

Zilles K, Tillmann BN (2010) Anatomie. Springer Medizinverlag,
Berlin, Heidelberg, New York

Diagnostik und Therapie – Endokrinologisches System

D. Dohr, I. Offenhäusser, C. Marks, C. Vockelmann

21.1 Allgemeines – 540

21.1.1 Schilddrüse – 540

21.1.2 Nebenschilddrüsen – 540

21.1.3 Nebennieren – 540

21.2 Radiologische Diagnostik – 541

21.2.1 Sonographie – 541

21.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik – 541

21.2.3 Durchleuchtung/Angiographie – 542

21.2.4 Computertomographie – 542

21.2.5 Kernspintomographie – 543

21.3 Nuklearmedizinische Diagnostik – 544

21.3.1 Schilddrüse (Glandula thyroidea) – 544

21.3.2 Nebenschilddrüsen (Glandulae parathyroideae) – 548

21.3.3 Nebenniere (Glandula suprarenalis) – 548

21.4 Wertigkeit – 549

21.5 Therapeutische Möglichkeiten – 549

21.5.1 Strahlentherapie – 549

21.5.2 Nuklearmedizinische Therapie – 550

21.6 Fallbeispiele – 552

Literatur – 553

21.1 Allgemeines

I. Offenhäuser

21.1.1 Schilddrüse

Die in der Schilddrüse produzierten Hormone stimulieren den gesamten Stoffwechsel und beeinflussen damit viele wesentliche Funktionen fast aller Organe des menschlichen Körpers.

Einführung in die medizinische Fachsprache

Die Schilddrüse reagiert i. d. R. auf eine Iodmangelzufuhr zur Kompensation mit einer Vergrößerung (**Struma**). Auch genetische Faktoren und hormonelle Einflüsse können ihre Größe und Gewebsbeschaffenheit beeinflussen.

Nicht jede Schilddrüsenvergrößerung muss zu einer Funktionsstörung führen. Die ungestörte Stoffwechsellage bezeichnet man als **euthyreot**, den Zustand erhöhter Hormonproduktion als **Hyperthyreose**, den der erniedrigten Hormonproduktion als **Hypothyreose**.

Topographische Anatomie

Die Schilddrüse ist eine endokrine Drüse. Sie besteht aus zwei Lappen, die über den sog. Isthmus miteinander verbunden sind, und gleicht einem Schmetterling (■ Abb. 21.1). Jeder Lappen ist etwa 4 cm lang, 2 cm breit und 2 cm dick. Die Schilddrüse liegt vor und neben der Trachea, dicht unterhalb des Schildknorpels. In enger Nachbarschaft befinden sich die großen Halsgefäße, der Ösophagus, und hinter dem rechten und dem linken Schilddrüsenlappen der N. laryngeus recurrens, der die Stimmbänder innerviert. Die Schilddrüse geht aus dem Entoderm, dem inneren der drei Keimblätter, die während der Embryogenese entstehen, hervor und wandert über den Zungengrund in die prätracheale Lage. Auf diesem Weg kann es zur Versprengung von Schilddrüsenzellen kommen.

21.1.2 Nebenschilddrüsen

Die Nebenschilddrüsen regulieren zusammen mit Vitamin-D-Hormon und Kalzitinin den Kalzium- und

Phosphatstoffwechsel über die bedarfsabhängige Produktion des Parathormons.

Topografische Anatomie

Die an der Rückseite der Schilddrüse gelegenen Epithelkörperchen (Nebenschilddrüsen) sind etwa 5 mm lang, 3 mm breit und 2 mm tief.

Einführung in die medizinische Fachsprache

Die Hyperproduktion des Parathormons bezeichnet man als **Hyperparathyreoidismus**, der durch **Adenome** (ca. 80 %), **Hyperplasien** der Epithelkörperchen (ca. 15 %) und in seltenen Fällen durch **Karzinome** entsteht.

21.1.3 Nebennieren

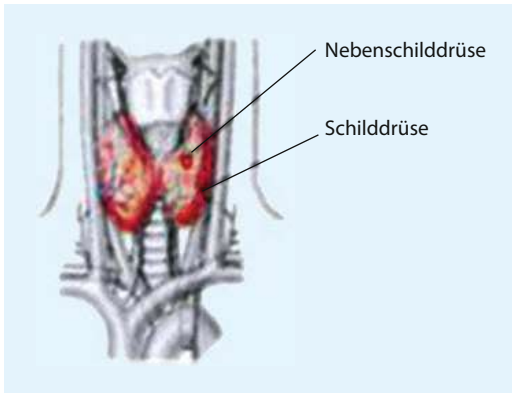
Bei Patienten mit endokrinologischen Krankheitsbildern kann eine gezielte Diagnostik der Nebenniere erforderlich sein.

Topografische Anatomie

Die paarig angelegten Nebennieren liegen den oberen Nierenpolen auf (■ Abb. 21.2). Die hufeisenförmigen 5 g schweren Organe bestehen aus dem Adrenalin und Noradrenalin bildenden Nebennierenmark und der im Weiteren beschriebenen Nebennierenrinde. In dieser werden histologisch drei Schichten unterschieden: die Zona glomerulosa (äußere Schicht, in der Mineralkortikoide, z. B. Aldosteron, gebildet werden), die mittlere, (Zona fasciculata, Bildungsort von Glukokortikoiden, z. B. Kortisol) und die innere Zona reticularis, (Ort der Produktion der Androgene). Die Symptomatik einer Erkrankung der Nebenniere hängt davon ab, in welcher Zone die hormonelle Aktivität gesteigert ist.

Einführung in die medizinische Fachsprache

Ursache einer Überfunktion der Zona glomerulosa (**primärer Hyperaldosteronismus** oder Conn-Syndrom) sind Adenome dieser Zone oder beidseitige Hyperplasien der Nebennieren. Der primäre **Hyperkortisolismus** (M. Cushing) wird ausgelöst durch ACTH-produzierende Adenome des Hypo-



■ Abb. 21.1 Topografische Anatomie SD/NSD

physenvorderlappens, Adenome bzw. beidseitige Hyperplasien der Zona fasciculata, ebenso wie durch eine eutopie ACTH Produktion des kleinzelligen Bronchialkarzinoms bzw. eines Thymoms. Eine Überfunktion der Zona reticularis führt zum primären **Hyperandrogenismus**. Auch hier können Adenome der Nebennierenrinde oder eine beidseitige Nebennierenrindenhyperplasie auslösend sein. Sie sind von angeborenen bzw. erworbenen Enzymdefekten in der Kortisolsynthese zu unterscheiden.

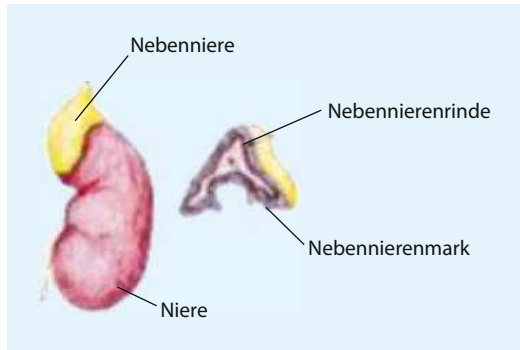
21.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

21.2.1 Sonographie

Sonographisch sind die Nebennieren und die Schilddrüse der Ultraschalldiagnostik zugänglich (■ Abb. 21.3). Bei der Abdomensonographie (► Kap. 18) werden die Nieren eingestellt. Dabei achtet man darauf, ob am Oberpol der Niere eine Raumforderung abgrenzbar ist. Normal große Nebennieren sind sonographisch perkutan in aller Regel nicht darstellbar.

Die Schilddrüse ist sonographisch hervorragend beurteilbar (Näheres s. auch ■ Tab. 16.1 Untersuchungsprotokoll Sonographie Hals). Hierbei geht es vor allem um Knoten. Zysten der Schilddrüse sind auch häufig, jedoch nicht hormonaktiv. Häufig wird die Sonographie ergänzend zu einer Schilddrüsen-



■ Abb. 21.2 Topographische Anatomie der Nebennieren



■ Abb. 21.3 Großer Strumaknoten rechts im B-Bild

szintigraphie in der Nuklearmedizin durchgeführt. Hierbei geht es um die Differenzierung kalter Knoten in der Szintigraphie, die entweder einer Zyste entsprechen können oder einem zumeist echoarmen Knoten. Diese kalten, nicht-zystischen Knoten sollten dann histologisch abgeklärt werden, da sich hierunter Schilddrüsenkarzinome verbergen können.

21.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Endokrinologische Erkrankungen haben in der konventionellen Röntgendiagnostik keinen Stellenwert. Manchmal ist jedoch eine Struma auch auf einem konventionellen Röntgenbild zu erkennen (■ Abb. 21.4). Und zwar dann, wenn die Schilddrüse deutlich vergrößert ist und in das obere Mediastinum eintaucht. Dann kommt es zu einer Trachealverlagerung zu einer Seite oder auch zu einer



Abb. 21.4 Nach rechts verlagerte Trachea (Pfeil) bei links retrosternal eintauchender Struma mit Verbreiterung des oberen Mediastinums. (© Vockelmann)

Kompression der Trachea, im schlimmsten Fall zu einer sog. Tracheomalazie. Bei dieser Erkrankung sind die Knorpelspangen der Trachea aufgeweicht, sodass die Trachea zusammenfallen kann. Hörbar wird das vor allem durch einen inspiratorischen Stridor.

21.2.3 Durchleuchtung/Angiographie

Bei bestimmten Erkrankungen der Nebennieren, z. B. dem Conn-Syndrom, ist es vor einer operativen Therapie bei einer Nebennierenvergrößerung erforderlich, seitengetrent Blut aus den Nebennierenvenen zu entnehmen. Hierdurch wird sichergestellt, dass die betroffene Nebenniere auch für die überschießende Produktion des Hormons Aldosteron verantwortlich ist.

Für die selektive Venenblutentnahme wird ein Diagnostik-Katheter über die V. femoralis in die V. cava vorgeführt. Die rechte Nebennierenvene mündet direkt in die V. cava, die linke mündet in die linke Nierenvene, über die dann die Nebennierenvene sondiert wird. Von beiden Seiten wird selektiv Blut entnommen, um in beiden Proben dann den Aldosteronspiegel zu bestimmen.

21.2.4 Computertomographie

Die Computertomographie kann sehr gut Nebennierenraumforderungen abgrenzen (■ Tab. 21.1). Auch die Beurteilung der Dignität gelingt in den meisten Fällen. Allerdings kann zur Hormonaktivität die Computertomographie genauso wie die Kernspintomographie keinen Beitrag leisten. Die Dignität kann durch Nachweis von Fett in einer Nebennierenraumforderung belegt werden. Dazu reicht im ersten Schritt eine native Untersuchung über die Nebennieren. Liegt hier die Dichte einer Nebennierenraumforderung bei weniger als 15 HU, liegt ein Adenom vor. Eine dynamische CT-Untersuchung mit Spiralen venös und nach 10 min kann durchgeführt werden, wenn die native Spirale eine Raumforderung mit einer größeren Dichte nachweist. Weist die Nebennierenraumforderung venös eine Dichte von weniger als 37 HU und wäscht das Kontrastmittel in der Spätaufnahme um mehr als 50 % aus, liegt ebenfalls ein Adenom vor. Bei einer anderen Konstellation kann zumindest ein maligner Tumor vorliegen. Da allerdings noduläre Raumforderungen in Nebennieren sehr häufig auch ohne klinische Relevanz vorkommen, werden alle Befunde mit einer Größe < 3 cm als Inzidentalom – also Zufallsbefund – bezeichnet, sofern bei dem Patienten keine maligne Grunderkrankung bekannt ist.

Die Schilddrüse als weiteres Organ des endokrinen Systems wird in der Computertomographie zwar oft mit abgebildet. Allerdings ist ebenso wie mit der Kernspintomographie nur eine Aussage über das Vorliegen von Knoten oder Zysten möglich. Ein Malignom lässt sich nur bei organüberschreitendem Tumorwachstum belegen. Das Kontrastmittelenhancement ist hierfür nicht wegweisend.

Allerdings sollten bei jedem MTRA und Radiologen die Alarmglocken klingeln, wenn es im CT um die Abklärung von Schilddrüsenraumforderungen geht. Eine Schilddrüsenüberfunktion insbesondere durch ein autonomes Adenom – also einen Knoten, der ohne hormonelle Steuerung Schilddrüsenhormon produziert – ist eine absolute Kontraindikation für eine Kontrastmittelgabe. Es droht eine letztlich lebensbedrohende thyreotoxische Krise nach einer Kontrastmittelgabe, da das Iod von dem autonomen Adenom aufgenommen und ungehemmt in Schilddrüsenhormone umgewandelt wird. Bei einer

■ **Tab. 21.1** Untersuchungsprotokoll CT Nebenniere

Patientenvorbereitung	Metallgegenstände am Oberkörper ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage, Arme über den Kopf lagern
Scanbereich	Beide Nebennieren vollständig
Röhrenspannung/-strom	120 kV/Dosismodulation
Kontrastmittel	Nur nach Rücksprache
Reformation	Axial, Weichteilfenster

■ **Tab. 21.2** Untersuchungsprotokoll MRT Nebenniere

Patientenvorbereitung	Metall, Scheckkarten, Schmuck ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage, Arme entlang des Körpers
Spule	Body-Array
Scanbereich	Oberbauch
Sequenzen/Wichtungen	T1 in- und opposed phase
Kontrastmittel	Nur nach Rücksprache

latenten Hyperthyreose ist bei entsprechender Indikationsstellung nach Gabe von Natriumperchlorat (Irenat-Tropfen [R]) eine Kontrastmittelgabe möglich. Hierdurch wird die Aufnahme von Iod in die Schilddrüse gehemmt. Achten Sie darauf, diese Information an den Zuweiser weiterzugeben, da die Therapie für mindestens 7 Tage fortgesetzt werden muss.

Neben der Schilddrüsenüberfunktion ist ein Schilddrüsenkarzinom die zweite ganz wichtige Kontraindikation für eine Gabe von iodhaltigem Kontrastmittel. Zum einen können dann verschiedene szintigraphische Untersuchungen zum Nachweis einer Metastasierung nicht mehr durchgeführt werden. Und eine Radioiodtherapie ist für die Dauer von 2 bis 3 Monaten nach einer Kontrastmittelgabe nicht möglich.

21.2.5 Kernspintomographie

Wie mit einer computertomographischen Untersuchung können auch mittels kernspintomographie Nebennierenraumforderungen sehr gut erfasst werden (■ [Tab. 21.2](#)). Vorteil der Nebenniere ist, dass sie im retroperitonealen Fettgewebe eingebettet und damit in nicht fettgesättigten Sequenzen sehr

gut abgrenzbar ist. Für die Frage nach einer Nebennierenraumforderung reicht eigentlich auch eine Sequenz. Die Frage nach dem Fettgehalt lässt sich gleich mit klären, wenn eine T1 in- und opposed phase Sequenz akquiriert wird. Zeigt die Nebennierenraumforderung hier einen signifikanten Signalabfall in der opposed-phase, ist der Beweis für Fett erbracht. Es liegt damit ein Adenom und keine Metastase vor. Zur Hormonaktivität kann aber die Kernspintomographie auch keinen Hinweis liefern. Häufiger wird eine MR-Untersuchung zur Abklärung einer Hypertonie durchgeführt. Dabei wird eine MR-Angiographie der Nierenarterien angefertigt. Es bietet sich hierbei immer an, eine axiale Planungssequenz über den Nebennieren mitzumessen. Dann hat man die potentiell im nächsten Schritt auftauchende Frage nach einer Nebennierenraumforderung gleich mitbeantwortet und muss den Patienten nicht erneut untersuchen.

In der Kernspintomographie lässt sich sehr gut ein weiteres Organ des endokrinologischen Systems untersuchen: die Hypophyse (■ [Tab. 21.3](#)). Hierbei lassen sich nicht nur Makroadenome, die auch im CT abgrenzbar wären, nachweisen, sondern auch Mikroadenome. Dazu ist allerdings eine Anpassung der Untersuchung an die Frage „Hypophysenade-

Tab. 21.3 Untersuchungsprotokoll MRT Hypophyse

Patientenvorbereitung	Metall, Scheckkarten, Schmuck ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage, Arme entlang des Körpers lagern
Spule	Kopfspule
Scanbereich	Schädel
Sequenzen/Wichtungen	Dünnschichtige Messungen (1,5 mm) T1w koronar nativ, T2w koronar nativ, dynamische T1w koronar (nativ, bis zu 5 KM-Messungen, Sequenzdauer 2–3 min) T1w sagittal nach Kontrastmittelgabe ggf. ergänzend T2w/Flair über das gesamte Neurocranium
Kontrastmittel	0,05 mmol/kg KG

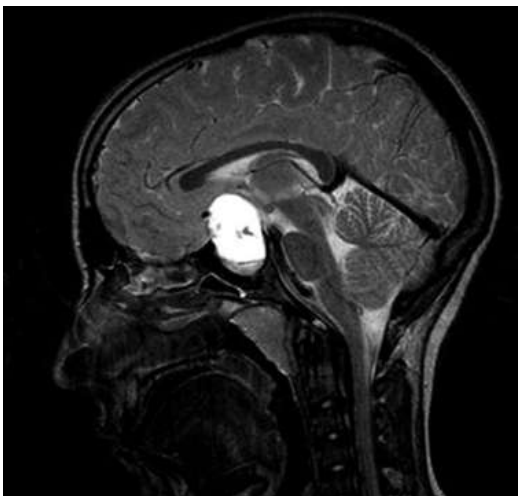


Abb. 21.5 Eingeblytetes Makroadenom der Hypophyse in einer sagittalen T2 TSE-Sequenz. Beachte den Spiegel am Boden der Raumforderung als relativen eindeutigen Hinweis auf die Einblutung. (© Vockelmann)

nom“ erforderlich, ein Routine-Schädel-MRT hilft nicht weiter.

Grundlage der Diagnostik von (hormonaktiven) Mikroadenomen ist die unterschiedliche Kontrastmittelaufnahme von Hypophysengewebe und Adenom. Die Hypophyse reichert Kontrastmittel rasch und stark an, Adenome verzögert. Also brauchen wir eine dynamische Messung über die Hypophyse. Hierbei haben sich am besten coronare Schichten bewährt. Da die Hypophyse so stark anreichert, sollte man die Untersuchung mit einer reduzierten Kontrastmitteldosis (50 %) messen.

Manche Befunde der Hypophyse sind allerdings auch nicht so schwierig zu entdecken (Abb. 21.5).

21.3 Nuklearmedizinische Diagnostik

1. Offenhäusser

21.3.1 Schilddrüse (Glandula thyroidea)

Voraussetzungen zu Diagnostik und Therapie

Histologisch besteht die Schilddrüse aus unterschiedlich großen Follikeln, die von den Follikel­epithelzellen, den sog. Thyreozyten umgeben sind und Kolloid enthalten. Zwischen den Follikeln befinden sich Blut- und Lymphgefäße sowie die Kalzit­onin produzierenden C-Zellen, die in den Knochenstoffwechsel eingreifen. Um die regelrechte Funktion zu gewährleisten, benötigt die Schilddrüse des Erwachsenen etwa 200 µg Iodid, das mit Nahrung und Trinkwasser aufgenommen wird. Es wird nahezu vollständig im Dünndarm resorbiert und über die in den Thyreozyten der Schilddrüse enthaltenen Natrium-Jodid-Symporter (NJS) aufgenommen. Dort wird das Iodid zu elementarem Iod oxidiert (Iodination) und in die Tyrosylreste des Thyreoglobulins (TG) eingebaut (Iodisation). Die Schilddrüsenperoxidase hat dabei Katalysatorfunktion. Durch Kopplung des Hormonvorläufers Monoiodtyrosin, der ein Iodatom enthält, mit dem Hormonvorläufer Diiodthyrosin, der zwei Iodatome enthält, entsteht das Hormon T3. Koppeln sich zwei Hormonvorläufer Diiodthyrosin, kommt es zur Bildung des Hormons T4. Auch hier katalysiert die Peroxidase. Die an TG

gekoppelten Hormone werden im Kolloid des Follikellumens gespeichert und bei Bedarf wieder von den Thyreozyten aufgenommen, vom Thyreoglobulin getrennt und ins Blut sezerniert. Die Menge des von der Schilddrüse sezernierten Hormons T4 (ca. 10 µg/d) ist um den Faktor 10 höher als die des stoffwechselaktiveren T3 (ca. 1 µg/d). Das im Blut zirkulierende T3 stammt zu hohen Anteilen aus der Umwandlung von T4 zu T3 durch Abspaltung eines Iodatoms, die vor allem in der Leber stattfindet. Der Hormontransport erfolgt in erster Linie über das Thyroxin-bindende Globulin (TBG) im Blut.

Die Regulation der Synthese und Ausschüttung der Schilddrüsen-Hormone unterliegt dem Hypophysenvorderlappen (HVL). Sinkt der Hormonspiegel im Blut, so gibt dieser das thyroidea-stimulierende Hormon (TSH), auch bekannt als Thyreotropin, ab, welches die Schilddrüse zu vermehrter Produktion anregt. Der HVL wiederum wird vom Hypothalamus über Sekretion des Thyreotropin-Releasing-Hormons (TRH) gesteuert. Hemmend wirkt ein erhöhter Hormonspiegel im Blut auf den HVL.

Untersuchungen der Schilddrüse

Um Aussagen über die Schilddrüsenfunktion treffen zu können, sind neben der Anamnese und dem körperlichen Untersuchungsbefund die Bestimmung der Schilddrüsenhormone T3/T4 bzw. fT3/fT4 und die des TSH-Wertes erforderlich. Bei Verdacht auf Autoimmunerkrankung kann die Bestimmung von Schilddrüsenantikörpern differentialdiagnostische Informationen geben. Dazu zählen die Antikörper gegen TSH-Rezeptoren (TRAK) gegen Schilddrüsenperoxidase (TPO-AK) und gegen Thyreoglobulin (TAK).

Die Bestimmung des Thyreoglobulins (Tg), das physiologischerweise im Inneren des Follikels gespeichert wird, ist unter anderem als Tumornachweis für das differenzierte, dem Schilddrüsen-gewebe ähnlichem Tumorgewebe von Bedeutung. Wird der Follikel z. B. durch ein Schilddrüsenkarzinom zerstört, so können größere Mengen des Tg in den Blutkreislauf gelangen. Das Calcitonin ist u. a. bei medullären Schilddrüsenkarzinomen tumor-anzeigend, da dieses dann vermehrt von dem von C-Zellen ausgehenden Tumor gebildet wird.

Schilddrüsen Sonographie

Die Beurteilung von Lage und Größe der Schilddrüse ermöglicht die Sonographie. Die gesunde Schilddrüse stellt sich im Echomuster gleichmäßig dicht dar, Umgebungsstrukturen wie z. B. Gefäße, Trachea und Lymphknoten lassen sich abgrenzen. Daher nimmt die Sonographie eine besondere Rolle in der Tumornachsorge ein. Sind Raumforderungen echoarm oder komplex und zudem unregelmäßig begrenzt, muss die Malignität über weitere Diagnostik ausgeschlossen werden.

Schilddrüsen Szintigraphie

Zur Beurteilung der Stoffwechsellage wird die Schilddrüse szintigraphisch dargestellt. Indikation zur Schilddrüsen szintigraphie sind knotige Strukturen, tastbar oder sonographisch dargestellt, der Nachweis von versprengtem Schilddrüsen-gewebe, der Nachweis der Nichtanlage der Schilddrüse, Abklärung einer Hyperthyreose, v. a. eine Schilddrüsenentzündung oder die Therapiekontrolle nach einer Radioiodtherapie.

■ Prinzip

^{99m}Tc Per technetat wird über den Natrium-Iodid-Symporter in den Thyreozyten aufgenommen, aber nicht verstoffwechselt. Iodisotope (¹³¹Natriumiodid und ¹²³Natriumiodid) werden aktiv ins Schilddrüsen-gewebe transportiert, an das Thyreoglobulin gebunden und in die Hormone T3/T4 eingebaut. Da Per technetat als Generatorprodukt jederzeit verfügbar ist und als reiner Gammastrahler mit seiner kurzen Halbwertszeit von 6 Stunden schneller ausgewaschen eine geringe Strahlenbelastung ergibt, wird es zur Routinediagnostik der Schilddrüse verwendet.

❗ **Eine Untersuchung mit iodhaltigen Kontrastmitteln (6–8 Wochen vor Diagnostik) sowie die Kontamination mit iodhaltigen Speisen stellen eine Kontraindikation der Schilddrüsen szintigraphie dar, weil andernfalls durch Absättigung das applizierte ^{99m}Tc nicht ins Schilddrüsen-gewebe transportiert werden kann. Eine unerwünschte medikamentöse TSH-Suppression des Patienten sollte vermieden werden.**



■ Abb. 21.6 Lagerung zur SD Szintigraphie

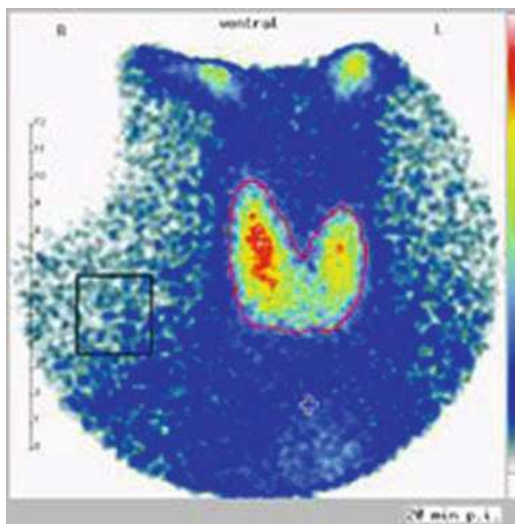
15–20 Minuten nach Applikation von 75 MBq ^{99m}Tc wird mit hochauflösendem Niederenergiekollimator das Stoffwechselverteilungsmuster über 7,5 Minuten aufgezeichnet. Der Patient wird dazu in Reklination des Halses gelagert (■ Abb. 21.6). Zur Lagebestimmung der Schilddrüse wird in gleicher Position mit einer radioaktiven Punktquelle das Jugulum markiert. Zur Bestimmung des Technetium-Thyroidalen UP-Takes (TcTU) werden um die Schilddrüse, in deren Untergrund und ggf. um fokale Mehranreicherungen sog. Regions of Interest (ROI's) gelegt (■ Abb. 21.7). Außerdem muss durch Messung der Spitze vor und nach der Applikation die Nettoimpulsrate der injizierten Aktivität bekannt sein, sodass der TcTU wie folgt errechnet werden kann:

$$\frac{\text{SD-Impulse} - \text{UG-Impulse}}{\text{Nettoimpulse der injizierten Aktivität}}$$

Die prozentuale Aufnahme der injizierten Aktivität liegt in Gebieten mit ausreichender Iodversorgung in Deutschland zwischen 0,5 und 2 %.

Bei Verdacht auf paravasale Injektion muss die Injektionsstelle gemessen und von der injizierten Aktivität abgezogen werden.

Außerhalb der Schilddrüsenregion gelegenes, sog. ektopes Gewebe ist leichter mit ^{123}I zu lokalisieren, da dieses im Organ und dem versprengtem Gewebe fixiert wird und die Überdeckung mit der Speicheldrüsenregion, wie bei ^{99m}Tc -Pertheneat, entfällt. Die Aufnahme kann frühestens 2 h p. i. erfolgen. ^{123}I ist als Zyklotronprodukt relativ teuer und wird deshalb nur bei spezieller, seltener Indikation verwendet.



■ Abb. 21.7 Lage der ROI's zur Ermittlung der gemessenen Impulsrate in SD und BG. (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Mottaghy, Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen)

Beurteilung der quantitativen Schilddrüssenszintigraphie

■ Normalbefund

Homogene Verteilung des Radiopharmakons in beiden Schilddrüsenlappen, der TcTU liegt im Normbereich. In den Speicheldrüsen stellt sich vermehrt Aktivität dar.

■ Pathologische Befunde

Bei Iodmangel ist der TcTU erhöht, ebenso beim Morbus Basedow, während bei der temporären Form einer Hashimoto-Thyreoiditis ein niedriger TcTU-Uptake zu erwarten ist.

Warme und heiße Knoten sind Bezirke vermehrter Anreicherung, deren Ursachen entweder dem Regelkreislauf unterliegende, sog. regulierbare Knoten oder diesem nicht unterliegende, sog. autonome Knoten sind. Kalte Knoten sind Bezirke verminderter Aktivitätsanreicherung. Sie entstehen nach Ablauf von Entzündungen, sind Folge vorausgegangener Operationen oder Radioiodtherapien oder weisen auf Schilddrüsenkarzinome oder Metastasen in der Schilddrüse hin.

Ektopes Gewebe kann retrosternal und entlang der Medianlinie vom Kehlkopf bis zum Zungenrund vorkommen.

Kaum zu glauben: noch zu Beginn meiner Ausbildung, die allerdings schon 35 Jahre zurückliegt, gehörte es keineswegs zur Routine, die Aufnahme der Aktivitätsverteilung in der Schilddrüse ohne zeitliche Verschiebung einzelner Bildabschnitte zu akquirieren. Eine computergestützte Datenauswertung und damit die Möglichkeit der quantifizierten Beurteilung waren in der Routinediagnostik noch nicht möglich. Der Schilddrüsenstoffwechsel wurde mit dem sog. Scanner aufgezeichnet (■ Abb. 21.8). Der bewegte Detektor war starr mit einem Schreibwerk und der notwendigen Elektronik gekoppelt. Er bewegte sich linear über den Patienten und rückte am Ende jeder Zeile senkrecht eine Zeile weiter. Die bildliche Darstellung erfolgte über ein mechanisches Schreibwerk mit Farbband, das mithilfe eines Stichels die Farbe gemäß der Impulsrate auf ein Papier übertrug. Da das Schreibwerk träge war, konnte es nicht alle Impulse verarbeiten, es kam sogar zur Blockade. 3–4 Striche pro mm waren das Optimum der Aufzeichnung. Das rasante Fortschreiten in Technik und Radiopharmazie hat unglaubliche Veränderungen nicht nur in die nuklearmedizinische Schilddrüsendiagnostik gebracht.

Weiterführende Untersuchung

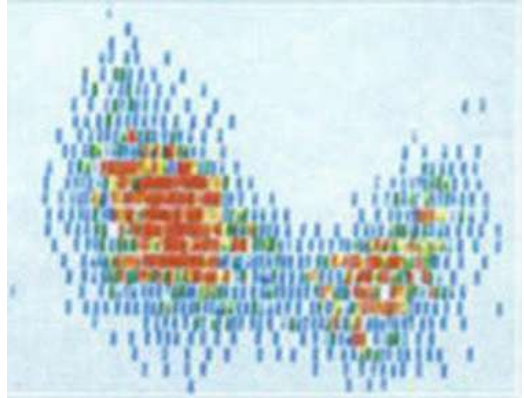
Um regulierbare Knoten von autonomen Adenomen zu unterscheiden, wird bei normalem TSH-Wert eine sog. Suppressionsszintigraphie durchgeführt.

Durch orale Gabe von Schilddrüsenhormonen wird die TSH-Produktion im Falle eines intakten Regelkreislaufes supprimiert, anschließend erneut eine Schilddrüsenszintigraphie unter Bedingung der Basisszintigraphie durchgeführt und der TcTU bestimmt.

Unterliegt der Knoten dem Regelkreislauf, so sinkt der TcTU auf ca. die Hälfte des Ausgangswertes.

Bei Hyperthyreose oder Vorliegen einer Autonomie des Knotens sind Basal- und Suppressions-TcTu gleich.

Kalte Knoten sind mit ca. zweiprozentiger Wahrscheinlichkeit maligne und bedürfen deshalb weiterer Abklärung. Maligne Tumoren und Metastasen haben i. d. R. eine deutlich erhöhte Zellteilung, ebenso sind sie mitochondrial aktiver als gesundes Gewebe. Mit ^{99m}Tc -MIBI (2 Methoxyisobutylisonitril) werden die Mitochondrien angesteuert. Das



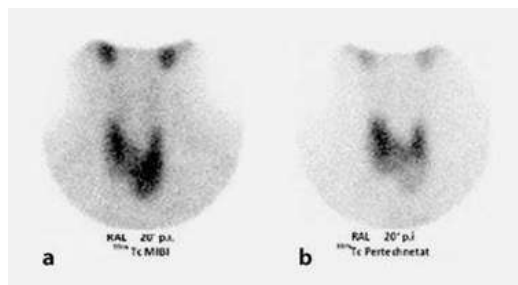
■ Abb. 21.8 Historische SD Szintigraphie

Szintigramm wird 20, 60 und 120 Minuten p. i. aufgenommen, die Aufnahmeparameter entsprechen der ^{99m}Tc Per technetat-Studie.

Durch Vergleich des ^{99m}Tc Per technetat- mit dem ^{99m}Tc MIBI-Szintigramm zu einem frühen und späten Aufnahmezeitpunkt lassen sich Schilddrüsenumoren und Metastasen nahezu selektiv darstellen. Speichert das tumorverdächtige Gewebe, so handelt es sich mit dreißig- bis fünfzigprozentiger Wahrscheinlichkeit um maligne Zellen (■ Abb. 21.9a, b), fehlt aber die Akkumulation, wie in der Per technetatszintigraphie, so ist der negative Vorhersagewert mit 99–100 % sehr hoch, und es kann auf weiterführende Diagnostik oder einen operativen Eingriff verzichtet werden.

Eine weitere Abklärung des verdächtigen Areals bietet die Feinnadelpunktion mit Zytologiegewinnung. Der Untersucher muss geübt sein, um eine hohe Treffsicherheit bei richtiger Punktionstechnik zu gewährleisten. Die Punktion erfolgt i. d. R. unter sonografischer Kontrolle (► Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e. V. Leitlinien, Verfahrensanleitung für die Schilddrüsenszintigraphie).

➤ **Die Schilddrüsenszintigraphie und der ermittelte ^{99m}Tc TU geben Auskunft über Stoffwechsel, Größe, Form und Lage der Schilddrüse. Bei Vorliegen heißer Knoten kann zur Differenzierung eines regulierbaren Knotens von einer Autonomie ein Suppressionsszintigramm angeschlossen werden. Kalte Knoten sind malignomverdächtig und werden auf**



▣ **Abb. 21.9a,b** Procedere SD Szintigraphie zur Selektion von SD Tumoren und Metastasen in der SD. (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Mottaghy, Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen)

ihre mitochondriale Aktivität getestet. Eine Feinnadelpunktion mit Zytologiegewinnung erfolgt bei Malignomverdacht unter sonografischer Kontrolle.

21.3.2 Nebenschilddrüsen (Glandulae parathyroideae)

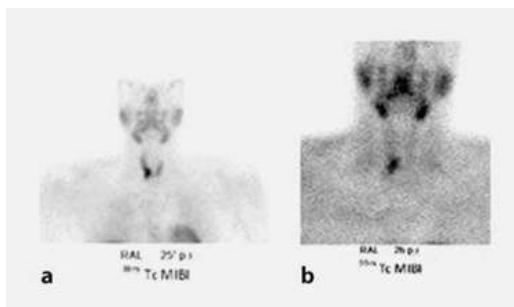
Untersuchungen der Nebenschilddrüse ^{99m}Tc -Per technetat / ^{99m}Tc MIBI-Szintigraphie

Adenome und Hyperplasien und die damit verbundenen Krankheitszeichen, aber auch dystop gelegenes Gewebe können über eine ^{99m}Tc -MIBI (Methoxy-isobutyl-isonitril) von Lymphknoten und Gefäßen unterschieden werden.

Über die mitochondrienreichen, oxyphilen Zellen der Nebenschilddrüsenadenome wird ^{99m}Tc -MIBI vermehrt aufgenommen und gespeichert, während das gesunde Gewebe die Aktivität schnell wieder abgibt.

Beurteilung der quantitativen Nebenschilddrüsenzintigraphie

Mittels Subtraktion der ^{99m}Tc -Per technetat- von der ^{99m}Tc MIBI-Szintigraphie kann bei Aufnahme beider Speichermuster in gleicher Position und Sitzung ein Nebenschilddrüsenadenom selektiert werden. Die zweite Möglichkeit besteht darin, das ^{99m}Tc MIBI- mit dem ^{99m}Tc -Per technetat-Szintigramm sowohl nach 15–20 als auch nach 120 Minuten zu vergleichen. Während der ^{99m}Tc MIBI Up-Take



▣ **Abb. 21.10a,b** NSD Szintigraphie zum Nachweis eines NSD Adenoms. (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Mottaghy, Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen)

im gesunden Schilddrüsengewebe schnell sinkt, bleibt dieser im Nebenschilddrüsenadenom erhöht (▣ **Abb. 21.10a, b**).

❗ **Besonders Adenome, die präoperativ über Sonographie, CT und MRT nicht ausreichend detektiert werden können, oder solche, die intraoperativ nicht gefunden werden konnten, werden der ^{99m}Tc MIBI-Szintigraphie zugeführt.**

Die Aufnahme in SPECT-Technik erhöht die Sensitivität des Verfahrens (► Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V. Leitlinien, Verfahrensanweisung für Nebenschilddrüsenzintigraphie).

21.3.3 Nebenniere (Glandula suprarenalis)

Untersuchungen der Nebenniere PET der Nebennierenrinde

In der PET-Bildgebung der Nebennierenrinde werden neuerdings C^{11} -Etomidat oder ^{123}J metomidate als Tracer verwendet und haben die mit einer hohen Strahlenbelastung verbundenen ^{131}J markierten Norcholesterol-ähnlichen Substanzen abgelöst. Grundlage der Anreicherung von C^{11} -Etomidat oder ^{123}J metomidate ist das enthaltene spezifische Targeting-Enzym (11 β -Hydroxylase), das an der Cortisol- und Aldosteron-Synthese beteiligt ist.

Szintigraphie des Nebennierenmarks

Das Nebennierenmark stammt von der Neuralleiste ab und enthält chromaffine bzw. Phäochromozellen (Produktionsstätte von Adrenalin/Noradrenalin).

Zum Nachweis der Katecholamin produzierenden Phäochromozytome wird ^{123}J oder ^{131}J markiertes MIBG verabreicht. Die Schilddrüse wird 4 Stunden vor Injektion blockiert, die Blockade sollte bis zum zweiten bzw. dritten Tag p.i. weitergeführt werden. Die Aufnahme sollte nach 4 und 24 Stunden (^{123}J -MIBG) bzw. nach 24 und 48 Stunden (^{131}J -MIBG) erfolgen. SPECT-CT und Iodganzkörperaufnahmen ergänzen die Diagnostik.

MIBG wird vermehrt durch Paragangliome und Phäochromozytome gespeichert. Ist die Speicherung höher als die des Leberparenchyms, so steigt die Wahrscheinlichkeit des Vorliegens eines Phäochromozytoms. Die MIBG-Szintigraphie mit ihrer hohen Spezifität und bei der Möglichkeit der SPECT-CT kombinierten morphologisch/molekularen Bildgebung trägt neben CT und MRT zur Lokalisation eines Phäochromozytoms bei. Auch können extraadrenale, beidseitige oder metastasierte Tumoren nachgewiesen werden. In der Pädiatrie wird MIBG als Tracer in der Neuroblastomdiagnostik eingesetzt.

^{11}C Noradrenalin und ^{11}C Hydroxyephedrin sind im Rahmen der PET-Diagnostik der MIBG-Szintigraphie vorzuziehen, wenn ein PET-Zentrum über ein Zyklotron verfügt.

^{131}J MIBG kann therapeutisch nach ausgeschöpfter operativer, strahlen- oder chemotherapeutischer Möglichkeiten im fortgeschrittenen Stadium maligner Phäochromozytome genutzt werden. In der PET Diagnostik wird bei gleicher Fragestellung ^{18}F DOPA eingesetzt.

Besonderheiten in der Pädiatrie

Die Schilddrüse von Kindern ist empfindlicher als die von Erwachsenen. Deshalb ist eine Schilddrüsenblockade wenigstens 15–30 Minuten vor ^{123}J MIBG/ ^{131}J MIBG-Injektion wichtig. Diese kann z. B. über Na-Perchlorat (Irenat), 1 Tropfen/kg KG bei mindestens 10 Tropfen und maximal 20 Tropfen erfolgen. Die Medikation sollte 3 Tage und auf 3–6 Einzeldosen verteilt gegeben werden. Ebenfalls zur Reduktion der Strahlenexposition sollte das Kind

gut hydriert werden. Um die Injektionsstelle unempfindlicher zu machen, kann diese 60 Minuten vor i. v. Injektion mit einer Anästhesiecreme vorbereitet werden.

Die bei Kindern verbreiteten Bronchodilatoren, die in der Therapie asthmatischer Erkrankungen eingesetzt werden, beeinflussen die MIBG-Aufnahme und Speicherung. Die Anästhesie sollte bei Kleinkindern zur ggf. notwendigen Sedierung informiert sein. Vor den Aufnahmen sollte das Kind die Blase entleeren, die Windel muss gewechselt werden.

Um eine Abflussstörung von einer vermehrten MIBG-Aufnahme zu differenzieren, kann ggf. Furosemid (Lasix) gegeben werden. Die Auswertung muss erfolgen, bevor das Kind die Abteilung verlässt, damit Zusatzaufnahmen ggf. veranlasst werden können (► Leitlinie DGN mIBG-Szintigraphie bei Kindern).

21.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

■ **Tab. 21.4** zeigt den Einsatz der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.

21.5 Therapeutische Möglichkeiten

21.5.1 Strahlentherapie

D. Dohr, C. Marks

Schilddrüsenkarzinom

Beim Schilddrüsenkarzinom wird die perkutane Strahlentherapie nur bei einer kleinen Gruppe von Hochrisikopatienten angewandt und zwar dann, wenn Operation und Radioiodtherapie keine vollständige Tumorzellvernichtung erzielen konnten, im Rezidiv-Fall oder in der palliativen Situation bei Skelettm metastasen mit Frakturgefahr, Hirnmetastasen sowie oberer Einflusstauung.

■ Tab. 21.4 Wertigkeit der therapeutischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	Durchleuchtung/ Angiographie	CT	MRT	Nuk	PET
Struma	P	N	N	N	N	P	N
Nebennierenraum- forderung	P	N	N	W	W	W	W
Hypophysenraum- forderung	N	N	N	N	P	N	N

N = Nicht indiziert; P = Primärdiagnostik; W = Weiterführende Diagnostik

21.5.2 Nuklearmedizinische Therapie

I. Offenhäuser

Radioiodtherapie

Iod wird über die Natriumiodidsymporter selektiv in Schilddrüse und schilddrüsengewebsähnlichen Tumoren und Metastasen gespeichert. Dieses Verhalten wird in der Radioiodtherapie genutzt. Das hier verwendete ^{131}I geht unter Aussendung vom Beta-Minus-Strahlung mit einer mittleren Reichweite von 0,5 mm sowie einer Gammakomponente (Energie 364 keV), die zur Bildgebung genutzt werden kann und einer Halbwertszeit von 8,04 Tagen in ^{131}Xe über. Als wichtigste benigne Indikationen zur Radioiodtherapie sind funktionelle Autonomien, der Morbus Basedow und euthyreote Strumen zu nennen. Eine entsprechende Indikation zur Therapie maligner Tumoren ist die noch bestehende funktionelle Ähnlichkeit zum Schilddrüsenewebe. Diese ist sowohl bei den papillären (ca. 70 % der malignen Schilddrüsentumoren) als auch bei follikulären (ca. 20 % der malignen Schilddrüsentumoren), den sog. differenzierten Schilddrüsenkarzinomen gegeben.

Undifferenzierte Malignome wie das medulläre oder das anaplastische Schilddrüsenkarzinom sind der Radioiodtherapie nicht zugänglich. Sie werden postoperativ extern strahlen- ggf. chemotherapiert.

Die bei Radioiodtherapie applizierte Dosis ist abhängig von der Art der Erkrankung. Die individuelle Ermittlung erfolgt im Rahmen des sog. Radioiodtestes. Vor Beginn muss auf eine ausrei-

chende Iodkarenz geachtet werden. Iodkontamination durch medizinische Iodquellen, Nahrungsergänzungsmittel, Zahnpasta oder Speisen von Fisch und Meeresfrüchten muss vermieden werden. Ggf. erfolgt die Therapie in euthyreoter Stoffwechselslage.

Nach Gabe einer geringen Radioiodmenge (1–5 MBq ^{131}I bzw. 5–10 MBq ^{123}I) wird die aufgenommene Aktivität zu verschiedenen Zeitpunkten mithilfe einer Messsonde, deren wesentliche Bestandteile ein 5 cm dicker NaJ Kristall und ein geeigneter Kollimator sind, bestimmt (z. B. nach 24, 48, 72 und 96 Stunden, bei M. Basedow 4–8 Stunden). Das zu behandelnde Volumen wird über sonographische und szintigraphische Bildgebung, bei Tumorrezidiven oder Metastasen mit CT- oder MRT-gestützter Volumetrie ermittelt. Die anschließende Dosisberechnung erfolgt über die sog. Marinelli Formel:

$$\text{Aktivität (MBq)} = \frac{\text{angestrebte Strahlungsdosis (Gy)} \times \text{Volumen des zu behandelnden Organs (ml)}}{K \times \frac{\text{maximale Aufnahme im Organ (\%, Uptake)} \times \text{effektive Halbwertszeit}}$$

Bei der Größe K handelt es sich um eine Konstante mit dem Wert 24,67.

Die effektive Halbwertszeit kann, da die individuellen Unterschiede nur gering sind, empirisch abgeschätzt (ca. 7–8 Tage, bei M. Basedow ca. 3 Tage) oder individuell bestimmt werden.

- ❗ **Die Radioiodtherapie sollte möglichst unmittelbar nach dem Radioiodtest durchgeführt werden, um vergleichbare Bedingungen der Radioiodkinetik zu haben.**

Wird eine therapeutische ^{131}I Kapsel verabreicht, so ist die Aufnahme in einer entsprechend ausgestatteten Station gemäß den nationalen Bestimmungen erforderlich. Eine Abklinganlage zum Sammeln der Ausscheidungen, die anfangs hoch radioaktiv sind, ist vorzuhalten.

- ❗ **Vor Radioiodtherapie maligner Schilddrüsenerkrankungen ist eine operative Entfernung der Schilddrüse und befallender Lymphknoten, nicht nur zur Histologiegewinnung zwingend erforderlich. Wenn die Schilddrüse erhalten bliebe, müsste die Dosis entsprechend des größeren Volumens deutlich höher gewählt werden, was mit einer erhöhten Nebenwirkungsrate einherginge.**

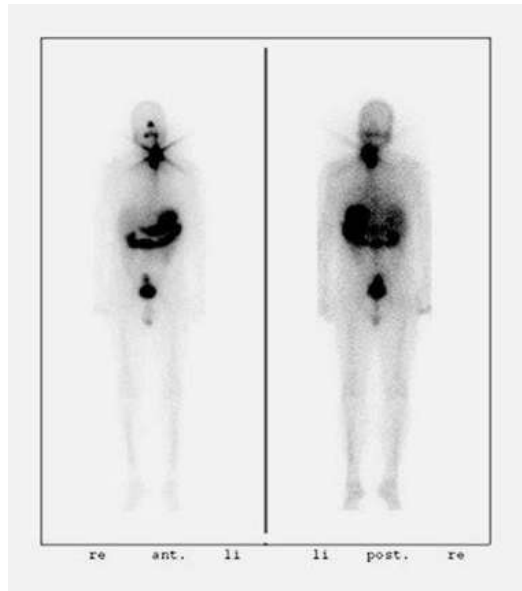
Die anschließende Radioiodtherapie wird auf das Schilddrüsenrestgewebe und eventuell vorliegende Metastasen ausgerichtet (▣ Abb. 21.11).

Der Patient wird entlassen, wenn die gemessene Aktivität im Abstand von 2 m 250 MBq nicht überschreitet (► Richtlinie im Strahlenschutz).

- **Die selektive Speicherung von ^{131}I in benignen und differenzierten malignen Tumoren und ihren Metastasen bietet die Möglichkeit einer eng auf den krankhaften Prozess bezogenen Therapie. Während die Radioiodtherapie im Anschluss an die operative Entfernung eines differenzierten Schilddrüsenkarzinoms durchgeführt wird, kann sie bei benignen Tumoren eine Alternative zur Operation darstellen.**

Akute und chronische Nebenwirkungen und ihre protektive Therapie (▣ Tab. 21.5)

Bei zunehmenden kumulativen Dosen über die Gesamtlebenszeit, nimmt das Risiko, an einer akuten myeloischen Leukämie zu erkranken, zu. Umstritten dagegen ist das Risiko der Zunahme anderer maligner Tumorerkrankungen als Folge einer



▣ **Abb. 21.11** Ganzkörperszintigraphie nach ^{131}I Therapie. (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Mottaghy, Klinik für Nuklearmedizin, Uniklinik RWTH Aachen)

hochdosierten Radioiodtherapie der Schilddrüse. Nach bereits 70-jähriger Therapieerfahrung im Bereich benigner Schilddrüsenerkrankungen konnte ein erhöhtes therapiebedingtes Krebsrisiko nicht nachgewiesen werden.

Nachsorge

Neben Anamnese, Hormonbestimmung (TSH/Tg) und Sonographie der Schilddrüsenloge und der Halsweichteile werden je nach Risikoprofil ^{131}I Ganzkörperszintigraphien 3 Monate, 1 Jahr und ggf. in 2 Jahresabständen nach endogener oder exogener rhTSH-Simulation durchgeführt. Weitere Untersuchungen können CT, Skelett- und MIBI-Szintigraphie sowie je nach molekularer Tumorentität ein FDG-PET, ein DOTATOC-PET bzw. eine Octreotidszintigraphie sein.

Die PET-Untersuchung ist vor allem dann indiziert, wenn die Iodspeicherung des Tumors oder seiner Metastasen im Verlauf verlorengegangen ist, dieser also schlecht differenziert oder entdifferenziert ist.

Die Prognose konsequent operierter und radioiodtherapierter differenzierter Schilddrüsen-

Tab. 21.5 Übersicht der Nebenwirkungen

Gastritis	Gabe von Antazida bzw. Protonenpumpenblockern
Sialadenitis	Wird diskutiert
Gonadenbelastung	Senkung durch Gabe von Diuretika und Laxanzien
intrazerebrale bzw. intravertebrale Metastasen zur Ödemprophylaxe	Kortikoide
Lungenfibrose	Einschränkung der Dosis bei pulmonalen Metastasen, besonders bei Kombination mit Chemotherapie
Knochenmarksdepression bei Behandlung ossärer Metastasen	Laufende Blutbildkontrolle

karzinome ist durchgehend gut, da diese Tumormorph durch die selektive Radionuklid-speicherung maligne Zellen isoliert bestrahlt werden können und das unter Schonung des gesunden Gewebes (► Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V. Leitlinien, Verfahrens-anweisung Radioiodtest, RJT benigne Schilddrüsenerkrankungen, differenzierte Schilddrüsenkarzinome, Ganzkörperszintigraphie ¹³¹J).

21.6 Fallbeispiele

C. Vockelmann

Fall 1

Herr Press, 35 Jahre, hat neuerdings hohen Blutdruck. Sein Hausarzt schickt ihn zur Abklärung und optimalen Therapieeinstellung ins Krankenhaus.

- ? Welche Untersuchungen werden durchgeführt?
- ✓ Zunächst eine Sonographie. Da hiermit jedoch Nebennierenraumforderungen nicht sicher ausgeschlossen werden können, wird zusätzlich ein MRT der Nebennieren und in der gleichen Untersuchung eine MR-Angiographie durchgeführt.

Fall 1

Die Nierenarterienstenose als Ursache der Hypertonie kann ausgeschlossen werden. Jedoch findet sich eine Raumforderung der linken Nebenniere, auch die rechte Nebenniere ist etwas vergrößert.

- ? Wie geht es mit der Diagnostik weiter? Welche Erkrankung könnte vorliegen?
- ✓ Es besteht der Verdacht auf ein Phäochromozytom. Nach Labor- und Urinuntersuchungen kann eine seitengetrennte Venenblutentnahme aus den Nebennierenvenen erfolgen. Bei Unklarheiten kann auch eine MIBG-Szintigraphie durchgeführt werden.

Fall 2

Frau Bradl, gebürtige und überzeugte Oberbayerin, hat in den letzten Jahren zunehmend eine Schwellung am Hals bemerkt. In ihrer Heimat nennt man das Kropf. Jetzt will sie das doch mal beim Arzt abklären lassen. Der besieht sich die Sache und schickt Frau Bradl weiter.

- ? Zu welchem Facharzt wird Frau Bradl geschickt? Und welche Untersuchungen führt dieser durch?
- ✓ Frau Bradl wird zum Nuklearmediziner geschickt. Dieser führt eine Szintigraphie und eine Sonographie der Schilddrüse durch. Der Befund lautet Struma multinodosa mit einem kalten Knoten.
- ? 1. Wird der Nuklearmediziner noch weitere Untersuchungen durchführen?
- 2. Frau Bradl lehnt eine Operation ab, fällt Ihnen eine Therapiemöglichkeit ein?
- ✓ 1. Der Nuklearmediziner punktiert den kalten Knoten sonographisch gesteuert. Es ergibt sich hier der Befund eines Schilddrüsenkarzinoms.
- 2. Dieses kann durch eine Radioiodtherapie behandelt werden, zu der Frau Bradl auf einer speziellen Nuklidstation für etwa 1 Woche stationär aufgenommen wird.

Literatur

- Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e. V. Leitlinie: Ganzkörperzintigraphie, Jod-131, differenziertes Schilddrüsenkarzinom/Radiojodtest, RJT benigne Schilddrüsenerkrankungen, RJT differenziertes Schilddrüsenkarzinom, Schilddrüsendiagnostik, Schilddrüsenszintigraphie
- Kuwert T, Grünwald F, Haberkorn U, Krause T (2008) Nuklearmedizin. Thieme Verlag, Stuttgart
- Huch R, Jürgens K (2011) Mensch Körper Krankheit. Urban & Fischer, 2011
- Schicha H, Schober O (2013) Nuklearmedizin: Basiswissen und klinische Anwendung. Verlag. Schattauer, Stuttgart

Diagnostik und Therapie – Lymphatisches System

M. Kahl-Scholz, I. Offenhäusser, J. Thiele, C. Vockelmann

22.1 Allgemeines – 556

22.1.1 Topographische Anatomie – 556

22.1.2 Funktion – 556

22.2 Radiologische Diagnostik – 556

22.2.1 Sonographie – 556

22.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik – 556

22.2.3 Durchleuchtung/Angiographie – 557

22.2.4 Computertomographie – 557

22.2.5 Kernspintomographie – 558

22.3 Nuklearmedizinische Diagnostik – 559

22.3.1 Einführung in die Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie – 559

22.3.2 Topographische Anatomie am Beispiel des Mammakarzinoms – 559

22.3.3 Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie am
Beispiel des Mammakarzinoms – 560

22.4 Wertigkeit – 565

22.5 Therapeutische Möglichkeiten – 565

22.5.1 Radiologische Therapieverfahren – 565

22.5.2 Strahlentherapie – 566

22.5.3 Radioimmuntherapie – 568

22.6 Fallbeispiele – 568

Literatur – 569

22.1 Allgemeines

M. Kahl-Scholz

22.1.1 Topographische Anatomie

Das Lymphsystem im menschlichen Körper setzt sich aus den lymphatischen Organen, den Lymphgefäßen und den Lymphknoten zusammen. Die Lymphknotenstationen dienen dabei als Filter und zu den Lymphorgane zählen z.B. Thymus, Milz, Mandeln sowie Appendix. Hier kann noch einmal nach primären lymphatischen Organen (Thymus, Knochenmark) und sekundären lymphatischen Organen (Lymphgefäße, -knoten, Mandeln, Milz, Peyer-Platten) unterschieden werden. Die Lymphe wird in das Venensystem drainiert.

22.1.2 Funktion

Das gesamte Lymphsystem ist Bestandteil des Immunsystems. Die primären lymphatischen Organe produzieren Immunzellen (B- und T-Lymphozyten), während sie in den sekundären lymphatischen Organen aufgenommen werden. Dort vermehren sie sich.

22.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

22.2.1 Sonographie

Auch in der Diagnostik lymphatischer Erkrankungen ist die Sonographie die Screening-Methode der ersten Wahl. Die Lymphknotenstationen zervikal entlang der Hals-Gefäß-Nervenscheiden, axillär und inguinal sind hervorragend mit einem hochauflösenden Schallkopf zu untersuchen (■ Tab. 22.1, ■ Abb. 22.1). Die abdominalen Lymphknoten paraaortal und die Milz lassen sich im Rahmen einer Abdomensonographie (► Kap. 18) untersuchen. Neben der Größe der Lymphknoten – Richtwert ist hier max. 1 cm als Orientierung – lässt sich auch die Blutversorgung des Lymphknotens beurteilen. Und auch eine Störung der Architektur, mit dem

normalen Fetthilus eines Lymphknotens als Hinweis auf eine Lymphknotenmetastase, lässt sich mit der hochauflösenden Sonographie – und ein bisschen Geduld – bereits bei nur geringen Veränderungen nachweisen. Durch diese Feindiagnostik ist der Ultraschall der Computertomographie und in den meisten Fällen auch der Kernspintomographie überlegen. Aus diesem Grund werden auch mediastinale Lymphknotenvergrößerungen, die im CT diagnostiziert worden sind, oftmals zunächst mittels Endosonographie beurteilt. Endosonographie bedeutet hierbei, dass der Gastroenterologe oder Internist einen Ultraschallkopf in die Speiseröhre einführt, vergleichbar mit einer Ösophago-Gastro-Duodenoskopie. Bei unklaren Fällen kann dann auch endoskopisch ultraschallgesteuert ein Lymphknoten mediastinal punktiert werden. Und nicht nur der Gastroenterologe hat diese Möglichkeit. Vielleicht kommt Ihnen mal die Abkürzung „EBUS“ unter. Hiermit ist die endobronchiale Ultraschalluntersuchung gemeint. Diese ist etwas aufwendiger als die Endosonographie durch den Ösophagus, weil Luft die Schallwellen (► Kap. 7) nicht leitet und daher im Bronchus erst ein Schallfenster geschaffen werden muss.

Neben dem Fetthilus ist das zweite sehr wichtige Unterscheidungskriterium zwischen normalem und suspektem Lymphknoten die Form. Ovaläre Lymphknoten sind eher benigne, runde Lymphknoten sind immer suspekt zu werten.

Für pathologische zu wertende Lymphknoten typisch ist der fehlende Fetthilus, im Ultraschall als zentral hyperechogene Zone nachweisbar (■ Abb. 22.1).

22.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Die konventionelle Röntgendiagnostik hat im Rahmen einer gezielten Untersuchung bei V. a. eine lymphatische Erkrankung keinen Stellenwert. Trotzdem können natürlich auch im Rahmen anderer Gründe oder klinischen Verdachtsdiagnosen lymphatische Erkrankungen und Lymphknotenvergrößerungen diagnostiziert werden. Die Sarkoidose oder auch Morbus Boeck (gesprochen buhk), eine granulomatöse Systemerkrankung,

■ **Tab. 22.1** Untersuchungsprotokoll Sonographie Lymphknoten

Patientenvorbereitung	Entsprechende Körperregionen frei machen lassen
Schallkopf	7,5 MHz Linearschallkopf
Standardebenen	Normale LK Längsebene, bei pathologischen Befunden 2. Ebenen
Besonderheiten	Farbduplexsonographie zur Beurteilung der Vaskularisation



■ **Abb. 22.1** Auf 2,8 cm vergrößerter Lymphknoten mit fehlendem Fetthilus bei gesicherter Lymphomerkkrankung

führt zu einer im konventionellen Röntgenbild der Lungen typischen Hilusverplumpung (■ **Abb. 22.2**), wobei man klassischerweise einen schmalen Saum Lunge zwischen Hilus und Herzschatten abgrenzen kann (im Gegensatz zu einem hilären Bronchialkarzinom).

22.2.3 Durchleuchtung/Angiographie

Durchleuchtung und Angiographie spielen in der Diagnostik und Therapie bei Erkrankungen des lymphatischen Systems keine Rolle.

22.2.4 Computertomographie

Die Computertomographie ist die Standardmethode zur Erfassung des Lymphknotenstatus bei V. a. Erkrankungen des lymphatischen Systems (■ **Tab. 22.2**, ■ **Abb. 22.3**). Dabei gehören zu einem Staging bei V. a. Lymphom nicht nur Thorax und Abdomen zum Untersuchungsbereich, auch die Halslymphknoten sollten mit untersucht werden. Dies dient dazu, eine objektive und im Verlauf vergleichbare Bildgebung zu haben. Im Rahmen der



■ **Abb. 22.2** Typische Hilusvergrößerung bei Sarkoidose

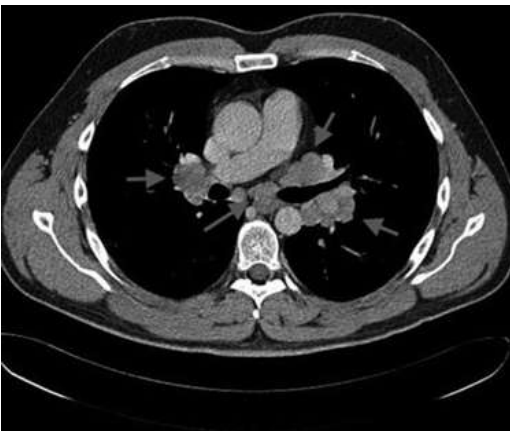
Therapie wird die Größe der Lymphknoten und auch der Milz zur Beurteilung eines Therapieerfolges beurteilt. Zusätzlich gelingt es besser als mit der Kernspintomographie und Sonographie, Organmanifestationen eines Lymphoms festzustellen. Neben Lymphknoten und Milz können letztlich alle Organe in die Erkrankung einbezogen werden.

Wie bei der Sonographie kann auch in der Computertomographie selbst bei relativ großen Lymphknoten in der Leiste der Fetthilus als fettisodense zentrale Zone im Lymphknoten nachgewiesen werden. Dies ist Zeichen für die Benignität des Lymphknotens. Ein fehlender Fetthilus ist Zeichen einer pathologischen Veränderung, z. B. eines Malignoms oder einer Entzündung. Auch die Form spielt in der Beurteilung des Lymphknotens wie in der Sonographie eine wichtige Rolle.

Ein weiterer Hinweis auf Malignität oder Benignität ergibt sich aus der Lokalisation des Lymphknotens. So finden sich mediastinal infrakarinal bei nahezu allen Patienten mehrere Lymphknoten. Diese sind per se nicht als suspekt zu werten. Finden sich

■ Tab. 22.2 Untersuchungsprotokoll Hals-Thorax-Abdomen CT

Patientenvorbereitung	Metall im Untersuchungsbereich ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage, Arme über den Kopf
Scanbereich	Arteriell: Oberbauch Venös: Schädelbasis bis Leisten
Röhrenstrom/-spannung	100–120 kV, Dosismodulation
Kontrastmittel	80–120 ml iodhaltiges Kontrastmittel, ggf. gewichtsadaptiert Bolustracking: Aorta descendens auf Zwerchfellebenen Interscandelay: 20–25 sec
Reformationen	Axiales, coronares und sagittales Weichteilfenster, ggf. zusätzlich nur Hals paracoronar Axiales Lungenfenster, coronare MIP-Rekonstruktion der Lunge



■ Abb. 22.3 CT-Bild mit mediastinalen und hilären Lymphknotenvergrößerungen bei Sarkoidose

diese Lymphknoten aber vor dem Aortenbogen, dann sollte zumindest eine Kontrolluntersuchung empfohlen werden; je nach weiteren Befunden ist auch eine weiterführende Diagnostik und Abklärung indiziert. Runde Lymphknoten mit relativ starkem Kontrastmittelenhancement in Nachbarschaft eines Kolonkarzinoms im perkolischen Fettgewebe sind ebenso suspekt auf eine Lymphknotenmetastasierung, selbst wenn die Größe der Lymphknoten unter 1 cm liegt. ■ Abb. 22.4 zeigt ein Magenkarzinom mit etlichen Lymphknotenmetastasen.

Die Kombination aus CT und PET bietet den Vorteil der Kombination aus morphologischer und biologischer Information, Details dazu finden sich im folgenden Unterkapitel.



■ Abb. 22.4 T4 Magenkarzinom mit ausgedehnten Lymphknotenmetastasen

22.2.5 Kernspintomographie

Die Kernspintomographie kann wie die Computertomographie die Größe von Lymphknoten und auch einen Fetthilus als diagnostisches Kriterium sehr gut nachweisen (■ Tab. 22.3, ■ Abb. 22.5). Nachteil ist der in aller Regel begrenzte Untersuchungsumfang. Bei umschriebenen Lymphknotenvergrößerungen zervikal bei jüngeren Patienten bietet sich die Kernspintomographie aber immer als weiterführende Diagnostik im Anschluss an die Sonographie an. Auch der lokale Lymphknotenstatus bei Rektum-

Tab. 22.3 Untersuchungsprotokoll MRT Hals zur Lymphknotendiagnostik

Patientenvorbereitung	Metallteile, Scheckkarten, Schmuck etc. ablegen lassen
Positionierung	Rückenlage
Spule	Kopf-Hals-Spule
Scanbereich	Schädelbasis bis obere Thoraxapertur
Sequenzen/Wichtungen	Coronar STIR, coronar T1w, axial T1w, axial oder sagittal T2w; bei Kontrastmittelgabe ggf. coronare und axiale T1FS
Kontrastmittel	Ggf. 0,1 mmol/kgKG

karzinom lässt sich kernspintomographisch sehr gut im Rahmen des Lokalstaging nachweisen.

Immer mal wieder in der Entwicklung sind spezifische Kontrastmittel, die eine Differenzierung zwischen malignen und benignen Lymphknotenvergrößerungen ermöglichen sollen. So gab es vor einiger Zeit Versuche mit winzigen Eisenpartikeln, ultrasmall superparamagnetic iron oxide (USPIO), die von maligne entarteten Lymphknoten weniger aufgenommen werden.

Im klinischen Alltag spielt diese Diagnostik zumindest heutzutage noch keine Rolle. Lymphknotendiagnostik erfolgt je nach Lokalisation und Befund anhand nativer Untersuchungen, bei nativ nicht eindeutigen Befunden kann eine Kontrastmittelgabe in der Differenzierung helfen.

22.3 Nuklearmedizinische Diagnostik

I. Offenhäusser

Mit der Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie werden vor einer geplanten Operation die relevanten Lymphknoten „Wächter“ einer Lymphbahn sichtbar gemacht.

22.3.1 Einführung in die Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie

Als Sentinel- oder Wächter-Lymphknoten (SLN) bezeichnet man die Lymphknoten, über die ein maligner Tumor drainiert wird. Sind diese frei von Tumorzellen, so kann eine lymphogene Metastasie-

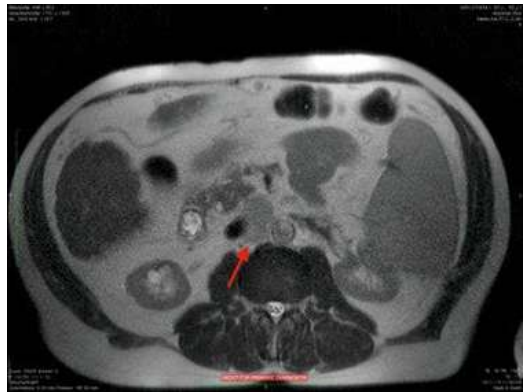
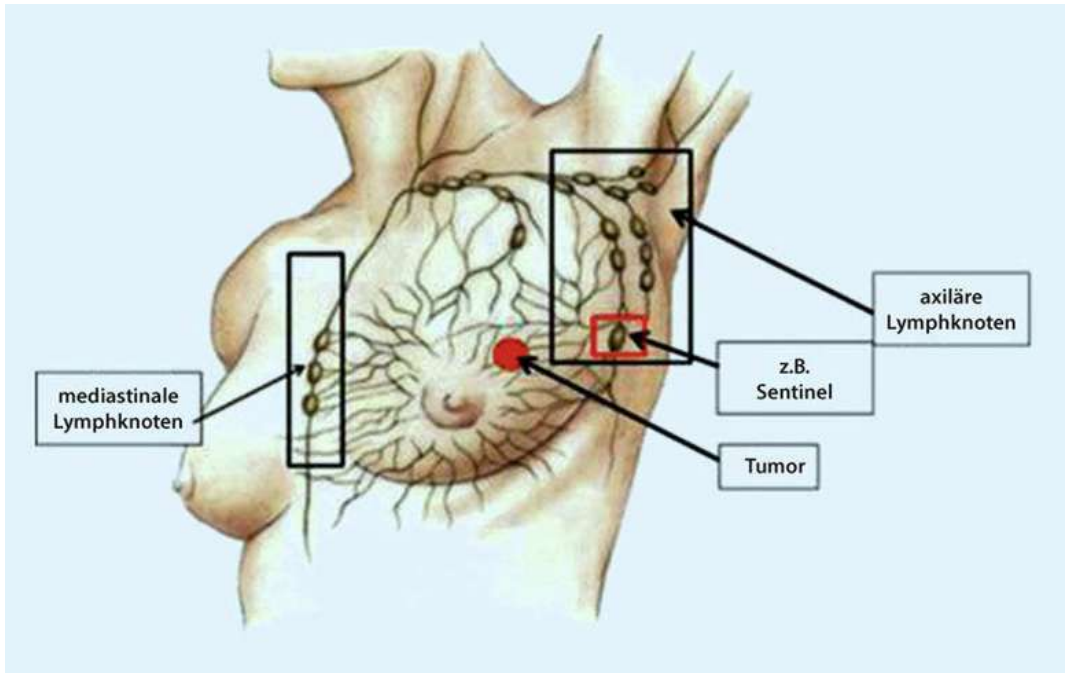


Abb. 22.5 Pathologisch vergrößerter Lymphknoten bei HCC. (© Vockelmann)

rung mit fast hundertprozentiger Sicherheit ausgeschlossen werden. Noch vor wenigen Jahren wurden alle axillären Lymphknoten der Tumor befallenen Seite prophylaktisch entfernt. Konsequenz dieser umfangreichen Dissektion war das gehäufte Auftreten des sog. Lymphödems ausgelöst durch einen Stau der Lymphe im Arm der betroffenen Seite. Ist der SLN nicht tumorbefallen, so kann heute auf die Ausräumung der Lymphknoten der Achselhöhle verzichtet werden. Die szintigrafische Darstellung des Wächter-Lymphknotens ist damit für das weitere therapeutische Vorgehen von besonderer Bedeutung.

22.3.2 Topographische Anatomie am Beispiel des Mammakarzinoms

Tumorzellen können sich aus dem Zellverband lösen und in die Lymphbahnen gelangen, sich dort unter ungünstigen Umständen ansiedeln, teilen



■ **Abb. 22.6** Topografische Anatomie Lymphsystem Mamma

und Tochtergeschwülste des ursprünglichen Tumors, sog. Metastasen, bilden. Zunächst sind i. d. R. Absiedlungen in den nahegelegenen, regionalen Lymphknoten auszumachen, die sich beim Mammakarzinom, je nach Lage des Tumors innerhalb der Brust, in der Axilla oder neben dem Sternum befinden (■ [Abb. 22.6](#)). Das aus dem regionalen Lymphabflussgebiet kommende Sammelgefäß kann die Tumorzellen in die nächsten sekundären, bzw. tertiären Lymphknoten transportieren. Im Venenwinkel (Ductus thoracicus) tritt das Lymphsystem in das venöse Blutssystem ein und so erreichen in fortgeschrittenen Stadien Tumorzellen die Blutbahn, der Tumor metastasiert nun hämatogen.

22.3.3 Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie am Beispiel des Mammakarzinoms

Zur Darstellung des SLN werden ^{99m}Tc markierte Kolloide mit einer Teilchengröße von ca. 20 nm bis 100 nm gespritzt (■ [Abb. 22.7](#)). Diese werden vom Lymphsystem als Fremdkörper erkannt und ab-

transportiert. Die applizierte Aktivitätsmenge muss so hoch sein, dass der Lymphknoten intraoperativ mit einer entsprechenden Messsonde gefunden werden kann.

Die Aufnahme an einer Großfeldkamera verläuft wie folgt:

- LEHR Kollimator
- Matrix 256×256
- Frühstatische Aufnahmen des Thorax und der ipsilateralen Axilla von ventral 300 sec.
- Spätstatische Aufnahmen des Thorax und der ipsilateralen Axilla von ventral und lateral über 300 sec.
- Die Aufnahmen werden i. d. R. unter Abschirmung der Injektionsstelle angefertigt, eine Akquisition sollte ohne dieselbe erfolgen.

Der Patient liegt auf dem Rücken, der Arm der zu untersuchenden Seite wird im 90-Grad-Winkel abgespreizt.

Unter dem Patienten liegt ein Flächenphantom, das dünn mit ^{57}Co belegt ist. Es wird so platziert, dass die Konturen der Axilla der betroffenen Seite sichtbar werden.

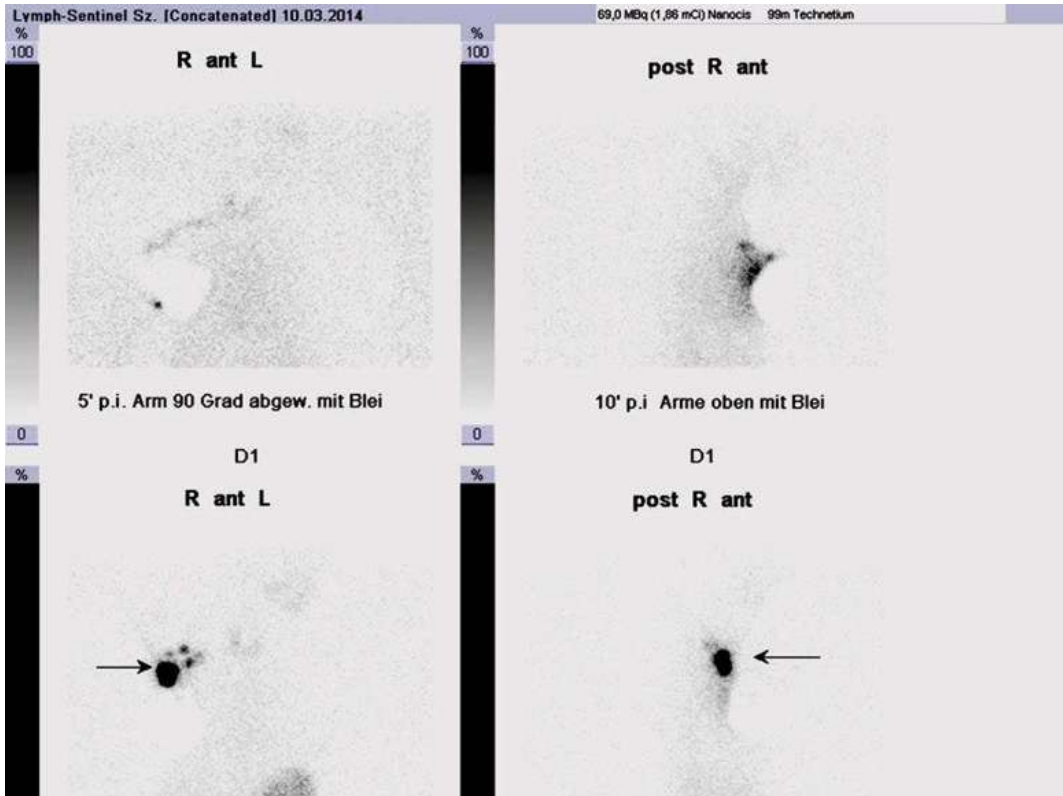


Abb. 22.7 ^{99m}Tc Nanocis SLN. (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Mottaghy, Klinik der Nuklearmedizin, Universitätsklinikum RTWH Aachen)

Ist zwei Stunden p.i. noch kein SLN darstellbar, sollte die Mamma 10 Minuten massiert und erwärmt werden. In den folgenden 10 Minuten wird der SLN dann sichtbar, andernfalls wird am nächsten Morgen unmittelbar vor der Operation eine Spätaufnahme akquiriert.

Der dargestellte Wächter-Lymphknoten wird später auf der Haut markiert und der schriftliche Kurzbefund dem Patienten mit auf den Weg in den OP gegeben.

Der Operateur sucht mit einer speziellen Gammasonde den SLN auf und entnimmt ihn.

Er wird umgehend einer histopathologischen Untersuchung unterzogen. Im Falle eines negativen Befundes besteht keine Notwendigkeit einer weiteren Lymphknotendisektion.

Folgende Fehler müssen vermieden werden:

- Inkorrekte Indikation
- Hautkontamination
- Fehlerhafte Injektion
- Überlagerung des SLN durch die Injektionsstelle
- Vorangegangene Operationen, Manipulationen, Therapien oder zusätzliche Erkrankungen
- Abdeckung tumornaher Lymphknoten durch Bleiabschirmung
- Vorschnelle Beendigung der Untersuchung
- Falsch negativer Befund bei vollständiger Metastasierung der Lymphknoten
- Unzureichende Befunderstellung

Weitere Einsatzmöglichkeit der Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie ist die Darstellung des Wächter-Lymphknotens bei malignem Melanom, Kopf-Hals-Tumoren, Peniskarzinomen, Vulvakarzinomen und anderen Tumoren. Hier kann

! Die Anreicherung des SLN dient lediglich der Ortung dieses Lymphknotens, sie sagt nichts über die Malignität aus!

zum leichten intraoperativen Auffinden des SLN die Darstellung anatomischer Nachbarstrukturen durch Fusion der SPECT mit CT- Querschnitten hilfreich sein.

Frau Müller, eine 67-jährige Patientin, kommt mit der Diagnose eines linksseitigen Mammakarzinoms von 2 cm Größe zur Wächter-Lymphknoten-Szintigraphie in die Klinik für Nuklearmedizin. Klinisch wurde mittels Palpation und Ultraschall ein Befall der regionalen Lymphknoten negativ beurteilt, eine Fernmetastasierung liegt nicht vor. Die Patientin ist bereits vor vielen Jahren an der rechten Brust bei gleicher Diagnose therapiert worden. Vor dem Aufklärungsgespräch ist Frau Müller verunsichert, denn sie kann sich genau daran erinnern, dass eine Wächter-Lymphknoten-Szintigraphie damals nicht durchgeführt wurde.

Warum war eine solche Untersuchung vor ihrer damaligen Operation unnötig, und heute wird ihr diese Lymphknotendarstellung dringend empfohlen? Soll sie ihr Einverständnis erteilen?

Erst zwischen 1993 und 1997 wurden die ersten Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphien bei Patienten, die an einem Mammakarzinom erkrankt waren, durchgeführt. Schon bald wurde klar, dass die axilläre Rezidivrate bei Patienten ohne Befall des Wächter-Lymphknotens und Erhalt der axillären Lymphknoten nicht höher war als die nach Entfernung selbiger, die früher standardmäßig durchgeführt wurde.

Frau Müller sollte ihr Einverständnis erteilen und sich damit den möglichen Erhalt der axillären Lymphknotengruppe sichern.

- **Durch die Detektion des SLN kann also das Operationsausmaß minimiert und die postoperative Morbidität verringert werden. Außerdem kann die histopathologische Aufarbeitung dieser relevanten Lymphknoten zielgerichtet erfolgen, die Therapieplanung und die Prognoseabschätzung verbessert und das Patientenüberleben gesteigert werden.**

PET in der Lymphomdiagnostik

Lymphome sind rasch wachsende Malignome. Sie haben i. d. R. einen erhöhten Energiebedarf und nehmen entsprechend gesteigert Glucose auf.

Zur Darstellung des Glucosestoffwechsels wird eine Glucose analoge Substanz, die Fluorodesoxyglu-

cose (FDG) verwendet. Diese wird durch Ersetzen eines Sauerstoffatoms in Glucose durch ^{18}F gewonnen. Dieses zerfällt über einen β^+ -Zerfall. Die beiden entstehenden Gammaquanten können von zwei gegenüberliegenden Detektoren in der Positronenemissionstomographie (PET) nachgewiesen, also sichtbar gemacht werden.

Zum Lymphomnachweis wird nun das ^{18}F -FDG PET gespritzt. Da ein Zusammenhang zwischen Mitose, Poliferationsrate, Tumoraggressivität und Nuklidanreicherung besteht, gibt die Intensität der Anreicherung Auskunft über das Stoffwechselerhalten des Malignoms (▣ Abb. 22.8).

Durchführung der PET (▣ Tab. 22.4)

Wenn kein aktuelles, diagnostisches CT vorliegt (nicht älter als 14 Tage), wird dieses in gleicher Sitzung akquiriert.

Indikation zur PET

Das ^{18}F -FDG PET ist sowohl im Primärstaging als auch im Restaging sensitiver als andere morphologisch diagnostische Verfahren.

In der Frühdiagnostik wird bei Lymphomen das ^{18}F -FDG PET zur Klärung der Ausbreitung eingesetzt – bei limitierter Ausbreitung kann eine kurze Chemotherapie bzw. eine Lokalbestrahlung ausreichen, während bei einer Tumorbeteiligung mehrerer Körperregionen eine längere, intensivere Behandlung folgen muss.

Bereits nach zwei Zyklen Chemotherapie kann das Therapieansprechen evaluiert werden, was dann ggf. zur Verminderung der Chemotherapiezyklen bei negativer oder verbesserter PET als auch zur Intensivierung bzw. Umstellung der Chemotherapieprotokolle bei unveränderter bzw. verschlechterter PET führen kann.

Am Ende einer intensiven Chemotherapie kann ein negatives PET zum Verzicht einer zusätzlichen Strahlentherapie und damit zur Reduktion der Toxizität führen. Der Verzicht ist nur deshalb möglich, weil in der PET das morphologisch nachweisbare Restgewebe in Fibrose und dem Resttumor sicher unterschieden werden kann.

Die ^{18}F -FDG PET kann eine Prognoseabschätzung ermöglichen. So liegt die Rezidivrate bei positivem posttherapeutischen FDG-PET zwischen 90 und 100 %, bei negativem Befund zwischen 0 und



■ **Abb. 22.8** ^{18}F -FDG PET/CT Lymphom. (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Mottaghy, Klinik der Nuklearmedizin, Universitätsklinikum RTWH Aachen)

■ Tab. 22.4 Durchführung einer PET

Vorbereitung	Anamnese, mindestens 4 h nüchtern, Telebrix oral, Blase entleeren, Metallteile entfernen, 1 h p.i. Start des PET
Lagerung	Rückenlage, Arme über den Kopf
Lagerungshilfe	Kopfschale, Keilkissen
Surviv	AP mit Atemkommando/Inspiration
Low Dose CT (120 kV 30 mAs)	Kein Atemkommando
Locator (120 kV 30 mAs)	
Tracker (120 kV 30 mAs)	Start CT bei 180 HU
Venöses CT (120 kV 200 mAs)	Rekonstruktion (Weichteil, Lunge, Knochen) Mit Atemkommando/Inspiration
PET	1,5 min pro Bettposition
Entsprechend Indikationsstellung ggf. Beine extra Low Dose CT (120 kV 30 mAs)/PET	1 min pro Bettposition
Entsprechend Indikationsstellung ggf. Head/Neck extra Surviv/Low Dose CT (120 kV 30 mAs)/PET	Arme neben dem Körper/fixiert 4 min pro Bettposition/ 3 Bettpositionen Hoch aufgelöste Rekonstruktion

17%. Bei positivem Befund kann entweder von einer ausbleibenden Remission oder vom Eintritt eines Rezidives ausgegangen werden.

Strahlentherapeutisch kann die ^{18}F -FDG PET zur exakten Zielvolumendefinition beitragen.

Besonderheiten in der Pädiatrie

Bei Kindern und Jugendlichen sind Lymphome die dritthäufigste Krebserkrankung.

Wegen der hohen Lebenserwartung dieser Patienten/-innen liegt der Schwerpunkt hier auf der Minimierung der therapiebedingten Spätfolgen, dazu zählen Sekundär malignome, kardiovaskuläre Ereignisse, Lungenfibrose sowie endokrinologische Veränderungen.

Die ^{18}F -FDG-PET wird prätherapeutisch und intratherapeutisch zur frühen Klärung des Behandlungserfolgs eingesetzt, sodass eine mögliche Abschwächung der Therapie diskutiert werden kann.

Der Umgang mit dem Kind

Der intravenöse Zugang sollte schon vor dem Eintreffen des Kindes gelegt sein, das minimiert den Stress. Eine warme Umgebung erhöht das Wohlbefinden

des Kindes und bewirkt die Reduktion des Tracers im braunen Fettgewebe, was zusätzlich medikamentös unterstützt werden kann. Diese Vorbereitung optimiert die spätere Befunderhebung. Die Aktivität wird gewichtsabhängig aufgezogen und liegt minimal bei 26 MBq im 2D-Modus und bei 14 MBq im 3D-Modus. Vor Beginn der Untersuchung muss die Blase entleert bzw. die Windel gewechselt werden. Wenn die PET/CT Untersuchung zur Bestrahlungsplanung genutzt wird, muss in Absprache mit dem Strahlentherapeuten eine entsprechende Lagerung erfolgen.

Der Umgang mit den Eltern

Der Ablauf der Untersuchung muss dem Kind und seinen Eltern ausführlich erläutert (Ruhezeit, Aufnahmezeit, Details des Untersuchungsablaufs, Notwendigkeit einer Sedierung oder Narkose, Vorliegen eines Diabetes mellitus, Gabe eines iodhaltigen Kontrastmittels) werden. Die Eltern müssen auf den dringend notwendigen Nahrungsvorzicht von vier bis sechs Stunden vor der Untersuchung hingewiesen werden. Süßgetränke, Kaugummis und Süßigkeiten bedürfen dabei besonderer Erwähnung. Bezieht man die Eltern ins

■ **Tab. 22.5** Wertigkeit der therapeutischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	Durchleuchtung/ Angiographie	CT	MRT	Nuk	PET
Lymphom	P	N	N	P	W	N	W
Sentinel-node						P	

N = Nicht indiziert; P = Primärdiagnostik; W = Weiterführende Diagnostik

Untersuchungsgeschehen mit ein, kooperieren die Kinder i. d. R. besser. Wird die Aufnahme in der normalen Schlafenszeit des Kindes akquiriert, so kann möglicherweise auf eine Sedierung verzichtet werden.

Mögliche Fehlerquellen

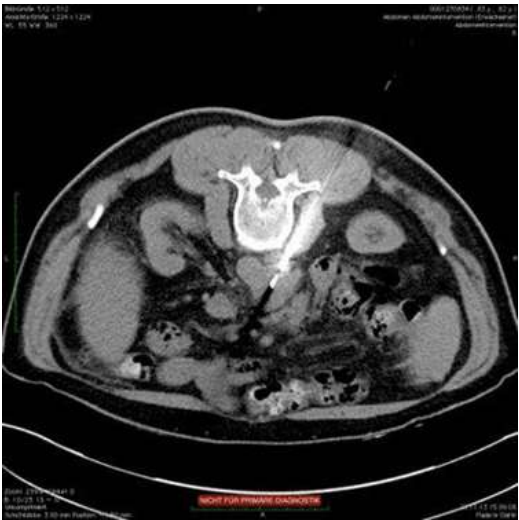
❗ Bei Gabe von Wachstumsfaktoren kann die ¹⁸F-FDG-Aufnahme in Knochenmark und Milz erhöht sein. Kommt es im Knochenmark nach Chemotherapie zu einer Zellvermehrung, ist die ¹⁸F-FDG-Aufnahme im Knochenmark ebenfalls erhöht.

Bei Kindern kommt es physiologischerweise zum erhöhten FDG-Uptake im Thymus der lymphoiden Gewebe des Nasen-Rachenraumes. Die Kaumusku- latur kann durch Schnullereinsatz oder nach dem Stillen vermehrt speichern, der Larynx nach Wei- nen oder Schreien.

22.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

■ **Tab. 22.5** zeigt den Einsatz der jeweiligen thera- peutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.



■ **Abb. 22.9** Biopsie des pathologischen Lymphknotens aor- tointerkaval (. **Abb. 22.5**) mit Sicherung der Metastase eines HCC. (© Vockelmann)

22.5 Therapeutische Möglichkeiten

22.5.1 Radiologische Therapieverfahren

C. Vockelmann

CT-gesteuerte Biopsie

Radiologische therapeutische Interventionen an Lymphknoten sind insbesondere in Form einer Thermoablation technisch gut durchführbar. Im Gesamtkontext der onkologischen Therapie macht eine solche Intervention aber nur in ausgewählten Einzelfällen eventuell Sinn. Häufig hingegen wird eine CT-gesteuerte Biopsie (■ **Abb. 22.9**) insbeson- dere der paraaortalen Lymphknotenvergrößerun- gen notwendig. Diese sind mittels Endosonographie

oft nicht erreichbar. Zusätzlich kann endosonographisch nur eine Feinnadelpunktion erfolgen. Das so gewonnene Gewebe reicht oft nicht, um eine pathologische Differentialdiagnostik des Lymphoms zu ermöglichen. Daher wird hier CT-gesteuert i. d. R. von lumbal aus eine Stanzbiopsie gewonnen. Häufig erfolgt dann hierbei ein koaxiales Vorgehen, um mehrere Proben gewinnen zu können. Wichtig ist eine ausreichende Materialgewinnung.

22.5.2 Strahlentherapie

J. Thiele

Maligne Lymphome sind bösartige Erkrankungen des lymphatischen Systems, wozu die Lymphknoten, Rachenmandeln, Milz und Knochenmark zählen. Die Erkrankung beruht auf einer malignen Transformation von lymphatischen Zellen unterschiedlicher Reifungs- und Differenzierungsstufen. Ein Teil der malignen Lymphome ist auf eine Störung des Immunsystems zurückzuführen.

Unterschieden wird zwischen dem **Hodgkin-Lymphom** und der Gruppe der **Non-Hodgkin-Lymphome** (NHL).

Morbus Hodgkin

Hodgkin-Lymphome sind seltene Tumore, die Häufigkeit der Erkrankungen pro Jahr liegt bei 3/100.000 Einwohnern. Der erste Altersgipfel liegt im 3. Lebensjahrzehnt, der zweite und kleinere Altersgipfel liegt zwischen dem 6. und 7. Lebensjahrzehnt. Männer sind häufiger betroffen als Frauen.

Risikofaktoren sind HIV und EBV Infektionen (Epstein-Barr Virus).

Symptome sind Lymphknotenvergrößerungen, üblicherweise supradiaphragmal und zervikal. Allgemeinsymptome (B-Symptomatik) sind Fieber, Nachtschweiß und Gewichtsverlust.

Hodgkin Lymphome entstehen in einem Lymphknoten oder lymphatischen Organ wie der Milz, dem Waldeyer Rachenring oder Thymus.

Die histologische Klassifikation erfolgt nach WHO/REAL.

REAL = Revised European American Lymphoma

Das Hodgkin Lymphom ist ein B-Zell Lymphom, selten ein T-Zell Lymphom; 99 % der Zellen sind Lymphozyten, Histiozyten, Fibroblasten, Plasmazellen und Eosinophile.

Die Häufigkeit der unterschiedlichen Subformen ist in etwa folgendermaßen verteilt:

- 70–80 % nodulär sklerosierend
- 25 % Mischtyp
- 1 % lymphozytenarm
- 2–3 % lymphozytenreich

Die Klassifikation nach der Ann-Arbor-Klassifikation richtet sich nach dem Befall der Lymphknotenregion, Stadium und Allgemeinsymptome.

Ann-Arbor ist eine amerikanische Stadt in Michigan, in der ein Komitee aus internationalen Experten tagte und sich auf diese Klassifikation von malignen Lymphomen einigte.

Substadien ergeben sich durch anhängen folgender Buchstaben:

- "A" – ohne Fieber, Nachtschweiß und Gewichtsverlust
- "B" – Fieber, Nachtschweiß oder Gewichtsverlust („B-Symptome")
- "E" – extranodale Manifestation (z. B. Leber)
- "S" – Milz (Spln)
- "E + S" – Lymphommanifestationen der Milz und extranodal

Die Prognosen sind stadienabhängig, die beste Prognose hat das nodulär sklerosierende Hodgkin Lymphom, die schlechteste das lymphozytenarme Hodgkin Lymphom.

Therapie des Hodgkin Lymphoms

Hodgkin Lymphome sind sehr chemo- und strahlentherapieempfindlich. Alle Patienten sollten im Rahmen von klinischen Studien behandelt werden; je nach Stadium gibt es verschiedene Behandlungsprotokolle.

Frühe Stadien werden mit einer kombinierten Chemo- und Strahlentherapie behandelt.

Je nach Lymphknotenstatus und Befall unterscheidet man bei der Einteilung des Bestrahlungsfeldes:

- **Involved-field (IF)** = Technik die nur die befallenen Lymphknoten einschließt

- **Extendend-field (EF)** = Technik, die befallene Lymphknoten Regionen mit benachbarten, klinisch nicht befallenen Regionen einschließt

Die Dosis beträgt je nach Studienprotokoll 20–36 Gy/ ED 1,6–2 Gy/ 5x wöchentlich in IF oder EF Technik.

Werden Patienten außerhalb von Studien bestrahlt, beträgt die Dosis 30–40 Gy/ ED 1,8–2 Gy/ 5x wöchentlich.

Nebenwirkungen

Sie richten sich nach der Lokalisation, die bestrahlt wird. Allgemein muss aber erwähnt werden, dass Patienten mit einem Hodgkin Lymphom, wie auch mit einem Non-Hodgkin-Lymphom sensibler reagieren, d. h., dass bereits nach wenigen Fraktionen Nebenwirkungen auftreten können.

Non-Hodgkin-Lymphome (NHL)

Non-Hodgkin-Lymphome sind maligne Entartungen des lymphatischen Systems, ausgehend von Lymphozyten. Die Neuerkrankungen liegen in Deutschland bei ca. 8000 pro Jahr. Bei Männern haben sich die Erkrankungen in den letzten 20–25 Jahren verdoppelt, bei Frauen gibt es eine Zunahme von 70 %. Das NHL ist die hämatologische Erkrankung mit der stärksten Zunahme. Das mediane Alter liegt bei 58 Jahren, jedoch bei hochmalignen NHL gibt es zwei Altersgipfel 0–20 Jahre und über 60 Jahre.

Risikofaktoren sind Immunsuppressionen, Viren (HIV und EBV) und virale Infekte, Umweltfaktoren wie ionisierende Strahlen und rheumatische Vorerkrankungen.

Bei den **Symptomen** gibt es grundsätzlich Gemeinsamkeiten zwischen NHL und Hodgkin-Lymphomen. Allgemeinsymptome sind Fieber, Nachtschweiß und Gewichtsverlust. Unterschiede sind:

- frühzeitiger Befall des Waldeyerschen Rachenrings,
- frühzeitiger Befall extranodaler Regionen wie Haut, Magen, ZNS, Knochenmark, Hoden und Mamma.

Die histologische Klassifikation erfolgt nach WHO/REAL (REAL = Revised European American Lym-

phoma). Man unterscheidet zwischen B-Zell und T-Zell Lymphomen

- B-Zell Lymphom ca 88 %
- T-Zell Lymphom ca. 12 %

Es gibt 3 hochmaligne Lymphome („high Grade“)

1. lymphoblastische maligne Lymphome
2. immunblastische maligne Lymphome
3. zentroblastische maligne Lymphome

und 5 niedrigmaligne Lymphome („low Grade“)

1. Plasmozytom
2. Immunozytom
3. zentrozytische maligne Lymphome
4. zentroblastische-zentrozytische maligne Lymphom
5. lymphozytisch maligne Lymphom = chronische lymphatische Leukämie (CLL)

Die Stadieneinteilung erfolgt nach Ann-Arbor, abhängig von der befallenen Lymphknotenregion, dem Stadium und der Allgemeinsymptome.

Substadien: siehe Hodgkin-Lymphom

Lymphatisches Ursprungsgebe: Lymphknoten, Milz, Thymus, Waldeyer Rachenring, Appendix Lymphknotenregion:

- Waldeyer Rachenring
- cervikal/ supraklavikulär
- infraklavikulär
- axillär
- mediastinal
- hilär
- paraaortal
- Milz
- mesenterial
- iliakal
- inguinal/ femoral

Die Prognose ist vom Alter des Patienten, Stadium, der Klassifikation und dem Lymphknotenstatus abhängig.

Therapie NHL

Generell werden die NHL durch Strahlentherapie und Chemotherapie behandelt. Die Chirurgie dient nur zur Diagnosesicherung und Verhinderung lebensbedrohlicher Komplikationen (Blutungen oder Frakturen).

Je nach Histologie und Stadium wird eine Gesamtdosis zwischen 24 Gy und 40 Gy gewählt, in Ausnahmefällen bis zu 55 Gy, in einer Fraktionierung von 1,6–2,0 Gy / 5x wöchentlich. Das Bestrahlungsvolumen beinhaltet heutzutage meist nur die betroffene Region mit einem Sicherheitssaum.

22.5.3 Radioimmuntherapie

I. Offenhäuser

Patienten, die auf eine Chemotherapie nicht ausreichend angesprochen haben, kann eine Radioimmuntherapie angeboten werden. Sie wird mit dem radioaktiv markierten CD20-Antikörper Ibritumomab Tiuxetan durchgeführt. Dieser wird an ^{90}Y trium gebunden. Yttrium ist ein reiner β^- -Strahler und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 64 Stunden zu ^{90}Zr conium. Die Strahlung wird kreisförmig abgegeben und hat eine Reichweite von 5,3 mm.

Eine kurative radioimmuntherapeutische Behandlung gelingt zu einem gewissen Prozentsatz bei Patienten mit follikulären Lymphomen der Stadien I und II.

22.6 Fallbeispiele

I. Offenhäuser, C. Vockelmann

Fall 1

Frau Müller, eine 67-jährige Patientin, kommt mit der Diagnose eines linksseitigen Mammakarzinoms von 2 cm Größe zur Wächter-Lymphknoten-Szintigraphie in die Klinik für Nuklearmedizin. Klinisch wurde mittels Palpation und Ultraschall ein Befall der regionalen Lymphknoten negativ beurteilt, eine Fernmetastasierung liegt nicht vor. Die Patientin ist bereits vor vielen Jahren an der rechten Brust bei gleicher Diagnose therapiert worden. Vor dem Aufklärungsgespräch ist Frau Müller verunsichert, denn sie kann sich genau daran erinnern, dass eine Wächter-Lymphknoten-Szintigraphie damals nicht durchgeführt wurde.

- ❓ Warum war eine solche Untersuchung vor ihrer damaligen Operation unnötig und heute wird

ihr diese Lymphknotendarstellung dringend empfohlen? Soll sie ihr Einverständnis erteilen?

Fall 2

Peter, 28 Jahre, hat seit einigen Wochen eine Schwellung am Hals. Sie tut nicht weh, deswegen hat er sich erst einmal nichts dabei gedacht. Nach 6 Wochen geht er doch mal zu seinem Hausarzt, da er auch das Gefühl hat, das die Schwellung zunimmt.

Dieser weist ihn umgehend in die Uniklinik ein.

- ❓ 1. Welche Verdachtsdiagnose haben Sie?
2. Welche Untersuchungen stehen Peter bevor?
3. Gibt es nuklearmedizinische oder strahlentherapeutische Therapieverfahren?

✓ Fall 1

Erst zwischen 1993 und 1997 wurden die ersten Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphien bei Patienten, die an einem Mammakarzinom erkrankt waren, durchgeführt. Schon bald wurde klar, dass die axilläre Rezidivrate bei Patienten ohne Befall des Wächter-Lymphknotens und Erhalt der axillären Lymphknoten nicht höher war als die nach Entfernung selbiger, die früher standardmäßig durchgeführt wurde.

Frau Müller sollte ihr Einverständnis erteilen und sich damit den möglichen Erhalt der axillären Lymphknotengruppe sichern.

✓ Fall 2

Peter hat vermutlich einen M. Hodgkin, also ein malignes Lymphom. Da der Ultraschall bereits ein typisches malignes Lymphom am Hals vermuten lässt, wird die Diagnose mit einer Stanzbiopsie rasch gesichert. Zur Komplettierung des Stagings wird in der Universität primär ein PET-CT angefertigt. Hier zeigen sich noch mediastinale Lymphome. Peter unterzieht sich einer kombinierten Radio-Chemo-Therapie im Rahmen einer Studie. Bereits nach wenigen Tagen geht die Schwellung am Hals zurück. Nach wenigen Wochen hat Peter die Therapie überstanden. Er muss jetzt regelmäßig zur Nachsorge, aber bisher ist kein Rezidiv aufgetreten.

Literatur

- Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e. V. Leitlinie SLN
Verfahrenstechnik
- DGN-Handlungsempfehlung 18 F-FDG PET/CT bei
Kindern mit onkologischen Erkrankungen
- Herold G et al (2009) Innere Medizin. Gerd Herold, Köln
- Kurch L, Sabri O, Kluge R, Pezzutto A, Scholz CW (2013) Der Nuk-
learmediziner Verlag. Thieme, 2.2013
- Kuwert T, Grünwald F, Haberkorn U, Krause T (2008) Nuklearme-
dizin. Thieme Verlag, Stuttgart
- Lohr F, Wenz W (2007) Strahlentherapie kompakt, 2. Aufl. Urban
und Fischer, München, S 223–254
- Sauer R (1998) Strahlentherapie und Onkologie für MTA-R, 3.
Aufl. Urban und Schwarzenberg, Stuttgart, S 402–420
- Schicha H, Schober O (2013) Nuklearmedizin: Basiswissen und
klinische Anwendung. Verlag. Schattauer, Stuttgart
- S3 Leitlinie „Diagnostik, Therapie und Nachsorge des Hodgkin
Lymphoms des erwachsenen Menschen“
- Zilles K, Tillmann BN (2010) Anatomie. Springer Medizinverlag,
Berlin, Heidelberg, New York

Diagnostik und Therapie – Haut und Hautanhangsgebilde

U. Blum, D. Dohr C. Vockelmann

- 23.1 Allgemeines – 572**
- 23.2 Radiologische Diagnostik – 572**
- 23.3 Nuklearmedizinische Diagnostik – 572**
 - 23.3.1 Malignes Melanom – 572
 - 23.3.2 Kutane Lymphome – 574
 - 23.3.3 Merkelzellkarzinom – 574
 - 23.3.4 Weichteilraumforderungen – 574
- 23.4 Wertigkeit – 574**
- 23.5 Therapeutische Möglichkeiten – 575**
 - 23.5.1 Strahlentherapie der Hauttumore – 575
- 23.6 Fallbeispiele – 576**
 - Literatur – 578**

23.1 Allgemeines

C. Vockelmann

Die Haut zählt mit einer Größe von bis zu 2 m² als das größte Organ des Menschen. Sie dient zur Abgrenzung nach Außen und schützt uns vor Umwelteinflüssen. Zu den Hautanhangsgebilden zählen vor allem Haare und Nägel. In einer weitergefassten Auslegung kann man das subkutane Fettgewebe zu den Hautanhangsgebilden zählen.

Der wesentlich häufigere Kontakt zu Erkrankungen von Haut und Hautanhangsgebilden ist die Umfelddiagnostik, also die Suche nach auslösenden Erkrankungen für Hautveränderungen. Z. B. sind viele Hauterkrankungen infektiös bedingt, andere treten als paraneoplastisches Syndrom bei einer bösartigen Tumorerkrankung auf.

Eine übliche Diagnostik in diesem Rahmen umfasst eine Sonographie des Abdomens, einen Röntgen-Thorax und häufig auch eine Röntgenuntersuchung der NNH und der Zähne.

Eine wichtige Erkrankung der Haut ist das maligne Melanom, also der schwarze Hautkrebs. Bei Patienten mit dieser Erkrankung werden häufig Staging-Untersuchungen gemacht, zu denen ein CT-Thorax und CT-Abdomen, MRT des Schädel und eine Skelettszintigraphie zählen.

23.2 Radiologische Diagnostik

C. Vockelmann

Neben der klinischen Untersuchung und Inspektion, die bei der Haut und den Hautanhangsgebilden die wichtigsten Untersuchungsverfahren sind, kann die **hochauflösende Sonographie** zur radiologischen Diagnostik eingesetzt werden. Dabei können hochfrequente Schallköpfe (> 10 MHz) mit einer hohen Auflösung Verwendung finden.

Bei den radiographischen Verfahren werden Haut und Hautanhangsgebilde meist nur „mitbeurteilt“. Wichtig sind die Beurteilung der Haut und die Detektion von Hautverdickungen, vor allem bei der Mammographie (► Kap. 20). Verdickungen von Kutis und Subkutis können auch in konventionel-

len Röntgenaufnahmen und CT-Aufnahmen erfasst werden (► Abb. 23.1).

In der **MRT** ist eine exzellente Beurteilung von Haut und Unterhautfettgewebe möglich (► Tab. 23.1). Bei gezielter Fragestellung nach kutanen oder subkutanen Veränderungen sollten **Oberflächenspulen mit einer hohen Auflösung** eingesetzt werden. Insbesondere bei tumorösen Veränderungen sind **fettgesättigte T1-Sequenzen nach intravenöser Kontrastmittelgabe** hilfreich. Hilfreich ist die Markierung einer Hautveränderung oder eines tastbaren Tumors, z. B. mit einer **Nitro-kapsel** (ein diagnostisches Verfahren, das häufig in der Kardiologie Verwendung findet), um die Veränderung im MRT-Bild lokalisieren zu können.

23.3 Nuklearmedizinische Diagnostik

U. Blum

Nuklearmedizinische Untersuchungen der Haut und der Hautanhangsgebilde werden überwiegend für die Suche nach verschiedenen Tumoren und dem Nachweis ggf. vorliegender Metastasen eingesetzt.

23.3.1 Malignes Melanom

Eine Wächterlymphknotenbiopsie (Sentinel-Lymph-Node-Biopsie, SLN-Biopsie) erfolgt (nach Leitlinie) ab einer Tumordicke von **1.0 mm**, wenn es keinen Hinweis auf eine Lymphknotenmetastasierung gibt. Bei entsprechenden Risikofaktoren (wie z. B. Ulzeration und/oder erhöhte Mitoserate und/oder Alter < 40 Jahre) wird auch bei dünneren Primärtumoren ab 0.75 mm eine SLN-Biopsie durchgeführt.

Die präoperative Darstellung des Wächterlymphknotens (Sentinel-Lymph-Node-Szintigrafie, SLN-Szintigrafie) kann mit radioaktiv markierten Nanokolloiden (^{99m}Tc-Nanokolloid) erfolgen. In 98 % d. F. kann der Wächterlymphknoten so schon präoperativ gefunden werden. Intraoperativ ist der Nachweis des Lymphknotens mittels einer geeigneten Gammasonde möglich.



■ **Abb. 23.1** Mammographie links craniocaudaler Strahlengang: Kutisverdickeung medial bei Brustwandnahe, klinisch exulziertem Mammakarzinom. (© Vockelmann)

Die nuklearmedizinische Ausbreitungsdiagnostik des malignen Melanoms ist abhängig vom **Stadium** (■ **Tab. 23.2**, Quelle AWMF online). Erst ab dem Stadium IIc, das wie ein Stadium III gewertet wird, sind weitergehende diagnostische Verfahren sinnvoll.

Eine besondere Stellung in der Ausbreitungs- und Rezidivdiagnostik kommt der ^{18}F -FDG-PET/CT (Positronenemissionstomografie derzeit überwiegend in Kombination mit einer CT) zu.

- **Für die PET/CT besteht eine 1a-Indikation, da es das beste Verfahren zum Nachweis von Metastasen (mit Ausnahme von Hirnmetastasen) ist (Xing et al. 2011).**

Hirnmetastasen lassen sich aufgrund des hohen normalen Zuckerstoffwechsels des Gehirns oft nicht darstellen, hier ist die Schädel-MRT der Goldstandard. Eine Detektion von Hirnmetastasen im

■ **Tab. 23.1** Untersuchungsprotokoll MRT Weichteile

Patientenvorbereitung	Metallteile, Scheckkarte, Schmuck ablegen lassen, je nach Kleidung Patientenhemd anziehen lassen
Positionierung	Je nach Untersuchungsregion Rückenlage
Spule	Je nach Befund Kniespule, Oberflächenspule, Flex-Spule
Scanbereich	Befundabhängig
Sequenzen/Wichtungen	Coronare STIR, axiale T1w, axiale T2w, coronare oder sagittale T1w; ggf. nach Kontrastmittelgabe axiale und sagittale oder coronare T1w FS
Kontrastmittel	0,1 ml/kg KG

FDG-PET/CT ist erst ab einer Größe von 10 mm möglich; Hirnmetastasen können sowohl Mehr- als auch Minderanreicherungen zeigen.

- **Die Kranial-MRT ist der Goldstandard zur Darstellung kleinerer Metastasen des Gehirns.**

Problematisch können zudem kleine Lungenmetastasen (< 10 mm) sein, die sich aufgrund der Atembewegungen während der PET-Akquisition dem metabolischen Nachweis mittels FDG entziehen können. Hier ist alternativ die diagnostische Thorax-CT (ggf. direkt im Rahmen des PET/CT) zu berücksichtigen.

Problematisch ist in Deutschland die Übernahme der Kosten einer ambulanten PET/CT-Untersuchung trotz der bestehenden 1a-Indikation durch die gesetzlichen Krankenkassen. Die Kostenübernahme erfolgt nur in Einzelfällen nach entsprechender Antragstellung oder im Rahmen sog. integrierter Versorgungsverträge.

- **Eine Knochenszintigraphie ist nur in Sonderfällen indiziert und gehört nicht mehr zu den Standarduntersuchungen im Staging eines malignen Melanoms.**

■ Tab. 23.2 Stadieneinteilung Malignes Melanom

Stadium	Primärtumor (pT)	Regionäre Lymphknotenmetastasen (N)	Fernmetastasen (M)
0	In situ	Keine	Keine
IA	Bis 1 mm, keine Ulzeration	Keine	Keine
IB	Bis 1 mm, mit Ulzeration oder Mitoserate/mm ² größer 1	Keine	Keine
	1.01–2.0 mm, keine Ulzeration	Keine	Keine
IIA	1.01–2.0 mm, mit Ulzeration	Keine	Keine
	2.01–4.0 mm, keine Ulzeration	Keine	Keine
IIB	2.01–4.0 mm, mit Ulzeration	Keine	Keine
	Größer 4.0 mm, keine Ulzeration	Keine	Keine
IIC	Größer 4.0 mm, mit Ulzeration	Keine	Keine
IIIA	Jede Tumordicke, keine Ulzeration	Mikroskopische Metastasen in bis zu 3 LK	Keine
IIIB	Jede Tumordicke, mit Ulzeration	Mikroskopische Metastasen in bis zu 3 LK	Keine
	Jede Tumordicke, keine Ulzeration	Bis zu 3 makroskopische LK-Metastasen	Keine
	Jede Tumordicke, keine Ulzeration	Keine, aber Satelliten- und/oder In-transit Metastasen	Keine
IIIC	Jede Tumordicke mit Ulzeration	Bis zu 3 makroskopische LK-Metastasen oder Satellit(en) oder In-Transit-Metastase(n) ohne regionäre LK-Metastasen	Keine
	Jede Tumordicke mit oder ohne Ulzeration	Bis zu 3 makroskopische LK-Metastasen oder Satellit(en) oder In-Transit-Metastase(n) mit regionäre LK-Metastasen	Keine
IV			Fernmetastasen

23.3.2 Kutane Lymphome

Kutane Lymphome lassen sich in B-Zell-Lymphome und T- bzw. NK-Lymphome unterscheiden. Die kutanen Lymphome haben unterschiedlich gute Prognosen. Insbesondere bei den T- bzw. NK-Lymphomen wird ggf. eine PET/CT empfohlen.

23.3.3 Merkelzellkarzinom

Je nach klinischem Stadium kann eine **SLN-Szintigrafie** erforderlich sein.

23.3.4 Weichteilraumforderungen

Je nach klinischem Verdacht können sowohl die **SLN-Szintigrafie** als auch die **PET/CT** sinnvoll sein.

23.4 Wertigkeit

C. Vockelmann

■ Tab. 23.3 zeigt den Einsatz der jeweiligen therapeutischen Möglichkeiten je nach Fragestellung.

■ Tab. 23.3 Wertigkeit der therapeutischen Verfahren

	Sonographie	Konventionell	CT	MRT	Nuk	PET
Melanom	W	N	W	W		
Weichteilraumforderung	P	N	N	W		

N = nicht indiziert; P = Primärdiagnostik, W = Weiterführende Diagnostik

23.5 Therapeutische Möglichkeiten

D. Dohr

Die Strahlentherapie der Haut beinhaltet im Wesentlichen, je nach Histologie und Tumorausdehnung, die Behandlung von Hauttumoren mit unterschiedlicher Prognose. In früheren Jahren hat man häufig auch gutartige Veränderungen der Haut bzw. Hautanhangsgebilde bestrahlt (z. B. Schweißdrüsenabszess, Panaritium). Die heutigen Möglichkeiten der Antibiotika-Therapie und der chirurgischen Interventionen haben jedoch die Radiotherapie dort fast vollständig ersetzt, sie kommt nur noch in speziellen, sprich in hartnäckigen Fällen zum Einsatz.

23.5.1 Strahlentherapie der Hauttumore

Gute bis sehr gute Prognose

- Basaliom (Basalzellkarzinom, weißer Hautkrebs), Spinaliom (Plattenepithelkarzinom), Keratoakanthom (epitheliale Pseudokanzerose), M. Bowen (Präkanzerose)

Diese Hauttumore treten im hohen Alter (> 70 Jahre) und/oder nach langjähriger Sonnenexposition auf. Meistens bestehen Alterskeratosen und maligne Hauttumoren nebeneinander. Der bösartige Tumor lässt sich durch stetiges Wachstum von den benignen Hautveränderungen unterscheiden. Beim Basaliom sieht man einen Randwall bzw. eine Einziehung in der Mitte der Hautveränderung, die nach geringster Manipulation blutet. Blutungen sind aber kein Unterscheidungsmerkmal: sie kommen zwar seltener, aber auch bei gutartigen Hautveränderungen, z. B. den Keratosen vor. Ohne Therapie wachsen das Basaliom und auch das Spinaliom

langsam in die Tiefe und Breite. Man spricht vom "Ulcus rodens", wenn das Malignom Knochen oder Knorpel infiltriert.

- Das Basaliom setzt nie, das Spinaliom häufig LK-Metastasen. Daher ist vor Bestrahlung eines Spinalioms die Abklärung der zugehörigen LK mittels Sonographie äußerst sinnvoll. Im Falle eines blanden Befundes ist die (prophylaktische) Radiotherapie nicht indiziert.

Therapie: Primäre oder postoperative Strahlentherapie nach unvollständiger Resektion

Dosis/Fraktionierung: In der Standard-Dosierung 70 Gy mit 5 × 2 Gy pro Woche

Daneben gibt es viele dosisäquivalente Fraktionierungs-Schemata (z. B. 49 Gy mit 1 × 7 Gy pro Woche oder 52 Gy mit 3 × 4 Gy pro Woche).

Gute Prognose

- Merkelzellkarzinom (= kutanes neuroendokrines Karzinom)

Ein seltener bösartiger Tumor (Häufigkeit 0.4/100.000 Einwohner, verglichen mit der Basaliomhäufigkeit in Deutschland von 100/100.000 Einwohner), ausgehend von der Merkelzelle, die die Tastempfindung weiterleitet. Das Merkelzell-Karzinom rezidiert sehr häufig (bis 50 %), bevorzugt in Form von LK-Metastasen.

Therapie: Adjuvante Radiotherapie nach vollständiger chirurgischer Exzision mit einem Sicherheitsabstand von 2 cm. Bei positivem Sentinel-LK folgen die radikale Lymphadenektomie sowie der Einschluss dieser LK-Region in das Bestrahlungsvolumen. Die primäre Strahlentherapie und die postoperative Strahlentherapie nach unvollständiger Tumorentfernung sind Notlösungen.

Dosis/Fraktionierung: 50 Gy mit 5 × 2 Gy pro Woche

■ Hautmetastase

- Symptomatische Bestrahlung mit dem Ziel, die Lebensqualität zu verbessern
- Bei Beschwerden, z. B. bei ungünstiger Lage der Metastase unter dem Träger, am Gürtel, bei Exulzeration, Blutung oder wenn Metastase als kosmetisch beeinträchtigend empfunden wird.

Therapie: Primäre Strahlentherapie. Die Metastase wird kleiner, flacher. Sehr oft verbleibt ein Restzustand, der aber nicht wieder anfängt zu wachsen.

Dosis/Fraktionierung: Diese wird je nach Histologie des Primärtumors, Lage und Größe der Metastase oder *Organs at risk* (OAR) in der Nachbarschaft gewählt.

Mässige Prognose

■ Melanom (schwarzer Hautkrebs)

Dieses Malignom ist nicht sehr strahlensensibel, am ehesten noch das Lentigo-maligna-Melanom (weitere Subtypen: superfiziell spreitend, nodulär, akral-lentiginös). Die Früherkennung und die in sano Exzision sind hier am wichtigsten.

Therapie: Versuch mit primärer Strahlentherapie bei Inoperabilität oder postoperativer Strahlentherapie nach unvollständiger Resektion eine lokale Tumorkontrolle zu erzielen. Falls mehr als 3 LK-Metastasen vorhanden sind, LK-Metastasen über 3 cm Durchmesser und/oder eine Tumordinfiltration über die LK-Kapsel hinaus vorliegen, sollte eine postoperative Strahlentherapie der LK-Region durchgeführt werden.

Dosis/Fraktionierung: 60 Gy mit 5×1.8 –2.5 Gy pro Woche

ten aufwies. Daher wurde eine weitere Abklärung des Befundes empfohlen.

- ❓ Welche Untersuchungen sollten durchgeführt werden? Welche Vorbereitungen für diese Untersuchung sind erforderlich?
- ✓ Eine MRT-Untersuchung mit Kontrastmittel ist sinnvoll. Bei gezielter Fragestellung nach kutanen oder subkutanen Veränderungen sollten Oberflächenspulen mit einer hohen Auflösung eingesetzt werden. Insbesondere bei tumorösen Veränderungen sind fettgesättigte T1-Sequenzen nach intravenöser Kontrastmittelgabe hilfreich. Kontraindikationen für eine MRT-Untersuchung müssen ausgeschlossen sein. Da möglicherweise Kontrastmittel verwendet wird, muss eine aktuelle GFR vorliegen.

Fall 1 (Fortführung)

Die veranlasste MRT-Untersuchung zeigte eine in allen Sequenzen fettisodense, subkutan gelegene Raumforderung ohne intratumorale Septen. Ein Kontrastmittelenhancement bestand nicht, sodass der Befund eines Lipoms erhoben wurde. Dieses wurde, da es den Patienten störte, lokal chirurgisch entfernt.

- ❓ Wissen Sie noch, was Kontrastmittelenhancement bedeutet?
- ✓ Unter Enhancement wird die Anreicherung eines KMs in den Organen oder Geweben verstanden. Es ist vom jeweiligen Organ oder der jeweiligen Gewebsstruktur abhängig und lässt teilweise auf eine bestimmte Struktur rückschließen.

23.6 Fallbeispiele

D. Dohr

Fall 1

Seit mehreren Wochen hatte der 63jährige Patient eine Schwellung an der rechten Flanke bemerkt. Die klinische Untersuchung zeigte einen verschieblichen, eher weich zu tastenden Prozess. Der Hausarzt hatte bereits eine Sonographie veranlasst, die eine fettisodense Raumforderung zeigte, die jedoch einige Sep-

Fall 2

Bereits seit vielen Jahren klagt eine 35jährige Frau über ein starkes Schwitzen an den Handflächen. Therapieversuche des Hautarztes haben der Patientin nicht geholfen. Als ultima ratio ist eine thorakale Sympathektomie vorgesehen. Einer operativen Therapie steht die Patientin sehr zurückhaltend gegenüber, über das Internet hat sie herausgefunden, dass eine Sympathikolyse, also die Zerstörung der Ganglien des sympathischen Grenzstrangs, auch minimal-invasiv CT-gesteuert möglich ist.

■ **Tab. 23.4** Scanprotokoll Sympathikolyse

Scanbereich	Algorhythmus	Rekonstruktionen
Zervikal: HWK 6–TH3; Lumbal: LWK 2–LWK 5	Standard	Axial 3 mm
Kontrollschichten während der Punktion	Standard	Axial 3 mm
Kontrollserien jeweils nach Injektion über den Punktionsbereich	Standard	Axial 3 mm , evtl. auch sagittal 3 mm

- ❓ Welche Vorbereitungen sind vor einer CT-Intervention erforderlich?

SOP: CT-gesteuerte Sympathikolyse (thorakal oder lumbal), ■ Tab. 23.4

Typische Indikationen:

- U. a. Hyperhidrosis, Durchblutungsstörungen, Raynaud-Syndrom, temporär bei (z. B. posttraumatische) Schmerzzuständen

Patientenvorbereitung:

- Anamnese (Unverträglichkeiten), Aufklärung mind. 24 h vor der Untersuchung
- Patienten soweit entkleiden lassen und ein OP-Hemd anziehen lassen

Material:

- Bei lumbaler Sympathikolyse i. v. Kontrastmittel zur Kontrastierung der Ureteren (z. B. 50 ml jodhaltigem Kontrastmittel i. v., 7 min vor Start der Untersuchung)
- Feinnadel in entsprechender Länge (z. B. 23 G, 15 cm)
- Spritzen (z. B. 5 ml, 2 ml, 5 ml Luer-Lock, 10 ml Luer-Lock)
- Kochsalz, Kontrastmittel, Lokalanästhetikum (z. B. Carbostesin oder Robivacain)
- Bei dauerhafter Ausschaltung 96 %iger Alkohol

Lagerung:

- Bauchlage

Extremität, das auch objektiv beim Vergleich von Hautfarbe und -temperatur vor und nach dem Eingriff nachvollziehbar ist.

- ✓ Die Patienten müssen aufgeklärt sein. Aktuelle Blutwerte zu Gerinnung und Nierenfunktion werden benötigt.

Fall 3

Ein 78-jähriger ehemaliger Bergbauer, der jetzt im Altersheim lebt, hat seit längerem einen kleinen "Pickel" am Nasenflügel, der gelegentlich blutet. Das Pflegepersonal behandelt mit Wundsalbe, bemerkt aber, dass der Befund größer und tiefer wird. Der Hausarzt überweist den Patienten zum Chirurgen zur Exzision. Die Biopsie ergibt ein Basaliom. Eine R0-Exzision des Tumors erscheint schwierig, außerdem würde wegen der Nähe zum inneren Augenwinkel möglicherweise der Lidschluss anschließend stark beeinträchtigt sein.

- ❓ Welche Art von Strahlentherapie kommt in Frage?
- ✓ Der Patient erhält eine perkutane Radiotherapie am Röntgentherapiegerät mit Photonen im kV-Bereich oder am Linearbeschleuniger mit Elektronen.
- ❓ Was muss man zur Vorbereitung bedenken?
- ✓ Art der Lagerung und Einschätzung, inwieweit der hochbetagte Mann eine Position, z. B. flache Rückenlage einnehmen kann oder/und eine Maske toleriert.

➤ Tipps und Tricks

Eine spezielle Überwachung ist nach dem Eingriff bei unkompliziertem Verlauf nicht erforderlich. Insbesondere bei Durchblutungsstörungen bemerken die Patienten direkt ein gesteigertes Wärmegefühl in der behandelten

- **Wünschenswert wäre die stabile Positionierung mit Maske, um die Reproduzierbarkeit der**

Einstellung zu gewährleisten. Die Lagerung mit den entsprechenden Hilfsmitteln wird gemäß der hausinternen SOP vorgenommen.

23

Literatur

- Leitlinienprogramm Onkologie, LL Melanom, AWMF 032-024
Stadler R et al (2012) S2k Kurzleitlinie Kutane Lymphome. www.ado-homepage.de
Xing Y et al (2011) Contemporary diagnostic imaging modalities for the staging and surveillance of melanoma patients: a meta-analysis. J Natl Cancer Inst 103(2):129–142

Qualitätsmanagement und Berufspraxis

Kapitel 24 Qualitätssicherung und Management – 581

T. Hartmann, Ch. Nowarra, C. Vockelmann

Kapitel 25 Im Beruf – 607

T. Hartmann, K. Kara, C. Vockelmann

Qualitätssicherung und Management

T. Hartmann, Ch. Nowarra, C. Vockelmann

24.1 Konstanzprüfung in der Radiologischen Diagnostik – 582

- 24.1.1 Allgemeine Rechtsvorschriften nach § 16 RöV – 582
- 24.1.2 Messmittel und Prüfkörper – 583
- 24.1.3 Kenngrößen – 583
- 24.1.4 Aufbewahrungsfristen – 584
- 24.1.5 MTRA-relevante Konstanzprüfungen – 585

24.2 Konstanzprüfung in der Strahlentherapie – 586

- 24.2.1 Überprüfung der bildgebenden Verfahren
zur Bestrahlungsplanung – 586
- 24.2.2 Überprüfung der mechanischen und geometrischen
Sicherheit von Bestrahlungsgeräten – 586
- 24.2.3 Überprüfung der Dosisverteilung innerhalb
des Bestrahlungsfeldes – 587
- 24.2.4 Konstanzprüfung am Simulator – 587
- 24.2.5 Tägliche Konstanzprüfung am Linearbeschleuniger – 587
- 24.2.6 Kontrolle des Bestrahlungsfeldes – 589
- 24.2.7 Weitere Konstanzprüfungen – 589

24.3 Konstanzprüfungen in der Nuklearmedizin – 589

- 24.3.1 Gammakamera – 590
- 24.3.2 Aktivimeter – 593
- 24.3.3 Sondenmessplätze – 594
- 24.3.4 Positronenemissionstomographen (PET) – 595

24.4 RIS/PACS inklusive Datenschutz – 596

24.5 Qualitätsmanagement – 598

- 24.5.1 Historische Entwicklung – 599
- 24.5.2 Qualitätsbegriffe im Gesundheitswesen – 600
- 24.5.3 Aufbau eines QM-Systems – 602

Literatur – 605

Katrin ist seit 24 Jahren MTRA und hat vor sieben Jahren eine Weiterbildung zur Qualitätsmanagementbeauftragten gemacht. Seitdem ist sie in ihrer Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin mitverantwortlich für das Qualitätsmanagement.

In zwei Wochen steht das jährliche externe Audit an, und Katrin überprüft im Vorfeld noch einmal, ob im vergangenen Jahr die notwendigen Dokumentationen ordnungsgemäß durchgeführt wurden.

In medizinischen Einrichtungen werden Qualitätsicherungsmaßnahmen großgeschrieben. Und gerade in den Bereichen, in denen ionisierende Strahlung am Menschen angewendet wird, existieren zusätzliche Vorschriften, um die Patientensicherheit jederzeit zu gewährleisten.

Darüber hinaus sind auch Kliniken Wirtschaftsunternehmen, die sich in Konkurrenz zu anderen Anbietern befinden. Man sollte also nicht nur so gut sein wie es das Gesetz fordert, sondern muss sich ständig verbessern, um konkurrenzfähig zu bleiben. Auch die Erarbeitung bzw. Umsetzung von Verbesserungsvorschlägen gehört in Katrins Aufgabengebiet.

Hinzu kommen die allgegenwärtigen Diskussionen über den Datenschutz. Die Anwendung digitaler Systeme macht die Arbeit nicht in allen Bereichen einfacher! Die Diskussionen um die NSA-Affäre, Facebook und Co. verdeutlichen, wie wichtig es ist, die sensiblen Patientendaten vor unerwünschten Zugriffen zu schützen.

Katrin hat also noch jede Menge zu tun ...

Da ionisierende Strahlung auch gesundheitsschädigende Wirkungen haben kann, muss sichergestellt werden, dass der Patient nur so viel Strahlung abbekommt wie unbedingt notwendig ist (ALARA – Prinzip des Strahlenschutzes). Das Ziel ist die Minimierung stochastischer Strahlenwirkungen auf ein verträgliches Maß.

Um dies zu gewährleisten müssen viele Aspekte ineinandergreifen. Neben der verantwortungsvollen Anwendung durch Radiologen und MTRA (z. B. Indikationsstellung, Strahlenschutzunterweisungen, Geräteeinweisung) gehört dazu, dass sich die Geräte auf dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik befinden.

Wie bei einem Auto können sich technische „Gebrauchsspuren“ ergeben. Ein Auto muss daher regelmäßig zur Durchsicht bzw. der Hauptuntersu-

chung (TÜV). Dazu gehört ebenfalls in regelmäßigen Abständen die Abgasuntersuchung. In der Radiologie spricht man nicht vom TÜV, sondern von den sog. Konstanzprüfungen.

24.1 Konstanzprüfung in der Radiologischen Diagnostik

T. Hartmann

Konstanzprüfungen (zur Sicherstellung der konstanten Qualität) sind bei Röntgeneinrichtungen in der Röntgenverordnung gesetzlich vorgeschrieben (§ 16, RöV).

➤ **Bei allen Konstanzprüfungen ist zu beachten, dass der Messaufbau immer gleich sein muss.**

Das betrifft:

- verwendete Messmittel,
- Abstände,
- Belichtungswerte.

24.1.1 Allgemeine Rechtsvorschriften nach § 16 RöV

Das Bundesamt für Strahlenschutz veröffentlicht diagnostische Referenzwerte für die Untersuchungen von Menschen. Alle Vorgaben für die technische Konstanzprüfung sind in der DIN 6868 zu finden, jeweils ein Teil für einen speziellen Bereich, z. B. die Prüfung von Durchleuchtungsgeräten (6868-4) oder Mammographiegeräten (6868-7).

Nicht alle Konstanzprüfungen nach DIN werden von MTRA durchgeführt oder sind Bestandteil der Ausbildung. Manche Prüfungen dürfen nur von Herstellern oder Technikern durchgeführt werden.

Hier werden die Normen benannt, die einen direkten Bezug zum Aufgabenfeld der MTRA haben.

Die Festlegung, welche Konstanzprüfungen in der jeweiligen Einrichtung von wem durchgeführt werden (MTRA, Wartungstechniker, externer Dienstleister, Medizinphysikexperte) liegt im Verantwortungsbereich der Strahlenschutzverantwortlichen.

Grundsätzlich gilt, dass bei jeder Röntgeneinrichtung zur Untersuchung am Menschen vor der

Inbetriebnahme eine Abnahmeprüfung durch den Hersteller zu erfolgen hat. Im Rahmen dieser Prüfung werden die Referenzwerte festgelegt, die dann für die kontinuierlichen Prüfungen die Bezugswerte sind. Wesentlich ist, dass die „erforderliche Bildqualität mit möglichst geringer Strahlenexposition erreicht wird.“ (§ 16,2 RöV).

Werden an der Anlage später bauliche Veränderungen vorgenommen, muss eine neue Abnahmeprüfung erfolgen.

- **Bei jeder Abnahmeprüfung wird ein Messmittel (Prüfkörper und Dosismessgerät etc.) festgelegt. In der Folgezeit darf nur dieses für das zu prüfende Gerät verwendet werden. In der Praxis verwendet man i. d. R. einen „Messkoffer“ in dem alle Messmittel vorhanden sind. Mit diesen Messgeräten muss auch die Abnahmeprüfung erfolgt sein. Muss man später Messmittel aus einem anderen Koffer benutzen, ist ein Abgleich der Referenzwerte notwendig.**

Die Häufigkeit der regelmäßigen Konstanzprüfungen ist abhängig von der Beanspruchung des jeweiligen Gerätes, muss jedoch mindestens monatlich erfolgen. Mögliche Abweichungen von diesen Fristen können nur durch die zuständige Behörde genehmigt werden.

24.1.2 Messmittel und Prüfkörper

Je nach der zu ermittelnden Kenngröße der Bildqualität, werden verschiedene Messmittel und Prüfkörper eingesetzt. I. d. R. befinden sich diese in einem Prüfkoffer.

■ Patientenäquivalentfilter

Dieser besteht aus einer 25 mm dicken Aluminiumplatte, deren Schwächungswert für Röntgenstrahlung als Referenzwert dient. In diesen Filter ist eine Ionisationsmesskammer eingebaut.

■ Dosismessgerät

An diesem Gerät kann die im Patientenäquivalentfilter gemessene Dosis bzw. Dosisleistung und die Aufnahmezeit abgelesen werden.

■ Prüfkörper

Es gibt für jede Geräteart einen eigenen Prüfkörper (Bucky, Durchleuchtung, Mammographie). Gemeinsam haben alle, dass sie aus PMMA (Polymethylmethacrylat) bestehen und verschiedene Metalle (z. B. Kupfer, Blei) darin eingegossen sind. Diese besitzen eine spezielle Dicke und Anordnung, um bildrelevante Kenngrößen zu überprüfen. Die Prüfkörper simulieren das Streuverhalten eines Patientenkörpers.

Unterschiede weisen die Prüfkörper bei den eingegossenen Filtern auf, da diese an die Leistung und Anforderungen der Geräte angepasst sind. So sind die Anforderungen an das Auflösungsvermögen eines Mammographiegerätes viel höher als an eine Durchleuchtungseinrichtung. Dementsprechend müssen Messelemente dafür feiner sein.

■ Abstandshalter mit Trägerplatten

Wie der Name schon sagt, dient der Abstandshalter der Einhaltung genormter Abstände zwischen Patientenäquivalent- und Prüfkörper. Schließlich kann man sich mit einem Maßband auch vermessen. Darüber hinaus erhält der Messaufbau dadurch Stabilität.

Die Einhaltung der Abstände ist wichtig, um eine Vergleichbarkeit zu wahren. Durch die Divergenz der Strahlung kann es, in Abhängigkeit vom Abstand, zu unterschiedlichen geometrischen Unschärfen kommen.

24.1.3 Kenngrößen

Bei allen Röntgenaufnahmegegeräten sind Kenngrößen zu überprüfen, welche ausschlaggebend für die Bildqualität sind. Je nach Gerät müssen diese mit unterschiedlichen Messmitteln getestet werden.

■ Dosis bzw. Dosisleistung

Diese wird mithilfe des Patientenäquivalentfilters ermittelt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Strahleneintrittsseite (angegeben auf dem Filter) beachtet wird. Die vorgegebenen Belichtungswerte (kV, mA, s) sind dem jeweiligen Formblatt zu entnehmen.

Aus der gemessenen Dosis können Rückschlüsse auf die exakte „Lieferung“ der eingestellten Spannung und Stromstärke gezogen werden.

■ Dosisindikator

Der vom Gerät angezeigte Dosisindikator wird ebenfalls mit den vorgegebenen Referenzwerten verglichen.

■ Linienpaar – Auflösungsvermögen

Zur Bestimmung der Bildauflösung (kleinster erkennbarer Abstand zwischen zwei Objekten) ist in den Prüfkörper ein Blei-Strichraster eingegossen. Bei der Abnahmeprüfung wird die Liniengruppe, die man gerade noch erkennen kann (höchste Auflösung), als Bezugswert festgelegt.

Wenn man also nicht die vorgeschriebenen Linienpaare erkennen kann, muss ein Fehler am Bildempfängersystem vorliegen.

➤ **Die Beurteilung der Auflösung ist abhängig von der optischen Wahrnehmung des Betrachters. Daher sollte bei Unstimmigkeiten zunächst eine Abstimmung zwischen verschiedenen Prüfern stattfinden.**

■ Bildkontrast

In einem Röntgenbild wird der Kontrast durch die Wahrnehmungsfähigkeit unterschiedlicher Graustufen bestimmt. Diese Graustufen sind wiederum von zwei Aspekten abhängig:

1. von der Dichte und Dicke des durchstrahlten Gewebes/Objektes,
2. von der Strahlungsenergie der Röntgenröhre.

Ziel der Konstanzprüfung ist es, einen möglichen Fehler sicher einer einzigen Ursache zuordnen zu können.

Wie gelingt das, wenn zwei Aspekte für den Bildkontrast verantwortlich sind?

Die Dichte bzw. Dicke kann man bei der Konstanzprüfung als Fehlerquelle ausschließen. Dafür hat man den definierten Prüfkörper, in dem verschiedene Filter (7–15 je nach Gerät) in Form einer Dynamikterre eingegossen sind. Diese Dynamikterre ist auf dem Bild anhand unterschiedlicher Graustufen erkennbar. Ist die Strahlungsenergie nicht konstant, können die Graustufen nicht unterschieden werden.

Warum werden jetzt unterschiedliche Prüfkörper für die verschiedenen Geräte benötigt?

Um ein dickes bzw. dichtes Objekt zu durchdringen, ist eine höhere Spannung bzw. Strahlungsenergie nötig. Für ein Objekt mit einer geringen Dichte verhält sich das entgegengesetzt.

Im Umkehrschluss muss also ein Prüfkörper für ein Gerät mit einer hohen Strahlungsenergie (Durchleuchtung) auch eine höhere Dicke bzw. Dichte aufweisen als z. B. ein Prüfkörper für die Mammographie.

■ Begrenzung des Nutzstrahlenfeldes

Bei der Einstellung der Aufnahmen wird grundsätzlich ein Lichtvisier verwendet, welches das Strahlenfeld auf dem Patientenkörper simuliert.

Bei der Überprüfung des Nutzstrahlenfeldes wird kontrolliert, ob Lichtfeld und Strahlenfeld übereinstimmen.

➤ **Ist das Lichtfeld kleiner als das Strahlenfeld, bekommt der Patient unnötige Strahlung ab. Ist das Strahlenfeld kleiner als das Lichtfeld können relevante Bereiche im Bild „abgeschnitten“ sein.**

■ Prüfung auf Artefakte

Im Rahmen der Betrachtung der Prüfaufnahme wird visuell kontrolliert, ob Artefakte vorliegen, welche den Gesamteindruck des Bildes stören.

24.1.4 Aufbewahrungsfristen

Zu jeder einzelnen Konstanzprüfung existiert ein gesondertes Formblatt, in dem Ablauf, Messmittel, Referenzwerte und gemessene Ist-Werte dokumentiert werden müssen.

Die Dokumentation der Referenzwerte der Abnahmeprüfung muss für die Dauer des Gerätebetriebes, mindestens jedoch bis zwei Jahre nach der nächsten vollständigen Abnahmeprüfung aufbewahrt werden.

Die Aufzeichnungen der regelmäßigen Konstanzprüfungen müssen zwei Jahre archiviert werden.

Auch bei den Aufbewahrungsfristen kann die zuständige Behörde die Fristen verändern.

24.1.5 MTRA-relevante Konstanzprüfungen

■ DIN 6868-3: Konstanzprüfung bei Direktradiographie

In diesem Normteil wird die Qualität von **Bucky-tisch** und **Rasterwandstativ** entsprechend der vorgegebenen Kenngrößen kontrolliert.

Bei der Verwendung von **Speicherfolien** ist darauf zu achten, dass immer die gleiche Folien-Kassetten-Kombination verwendet wird.

■ DIN 6868-4: Konstanzprüfung an medizinischen Röntgeneinrichtungen zur Durchleuchtung

Seit 2007 gilt diese überarbeitete Norm für **konventionelle Durchleuchtungsgeräte** UND **Anlagen zur digitalen Subtraktionsangiographie**.

■ DIN 6868-7: Konstanzprüfung an Röntgeneinrichtungen für die Mammographie

Mammographiegeräte müssen **arbeitstäglich** vor dem Einsatz am Patienten überprüft werden. Mit einem speziellen Mammaprüfkörper werden die o. g. Kenngrößen überprüft.

Zusätzlich enthält der Prüfkörper eine spezielle Bohrung für digitale Anlagen, in welche verschiedene Prüfeinsätze eingebracht werden können, um eine Konstanzprüfung nach PAS 1054 durchführen zu können.

■ PAS 1054: Anforderungen und Prüfverfahren für digitale Mammographie-Einrichtungen

Diese Norm stellt eine Erweiterung der DIN 6868-7 dar, welche nach der Einführung des flächendeckenden Mamma-Screenings mit digitalen Anlagen als notwendig erachtet wurde. Sie beschreibt Abnahme- und Konstanzprüfungen in einem Werk und betrachte **alle Komponenten digitaler Anlagen**. Dazu gehören, neben der Überprüfung der Abbildungseigenschaften, auch die Kontrolle der technischen Voraussetzungen zur Befundung und des Zubehörs, z. B. Röntgenfilmdigitalisierungssysteme, digitale Archivierungssysteme oder rechnergestützte Rekonstruktionssysteme von 2D-Bildern (CAD-Systeme).

Für die tägliche Konstanzprüfung ist für die MTRA relevant, dass in einem Prüfkörper nach PAS 1054, zusätzliche Gewebestrukturen simuliert werden, die in einer Mamma vorkommen können. Das sind:

- Bindegewebsstrukturen,
- Fettgewebsstrukturen,
- Gefäßstrukturen in Längsausdehnung und Lumen,
- Zystische Strukturen,
- Mikrokalkstrukturen.

■ DIN V 6868-57: Abnahmeprüfung an Bildwiedergabegeräten

Diese Norm stellt eine sog. Vornorm dar und gilt für folgende Anwendungsbereiche:

- Computertomographie (CT)
- Magnetresonanztomographies (MR)
- Digitale Radiographie (DR)
- Durchleuchtung
- Digitale Subtraktionsangiographie (DSA)
- Sonographie (US)
- Nuklearmedizinische Untersuchungsverfahren (NM)
- Picture Archiving and Communication System (PACS)

Der Befunder muss **arbeitstäglich** eine Kontrolle der Bildwiedergabe vornehmen. Dieses Testbild wird i. d. R. beim Hochfahren des PC angezeigt. Die korrekte Wahrnehmung des Bildes muss im Anschluss durch den Befunder bestätigt werden. Das gilt auch für teleradiologische oder telemedizinische Befundmonitore, die ein Radiologe im heimischen Arbeitszimmer stehen hat.

Die Norm umfasst weitere, komplexe Überprüfungen von z. B. Bildhelligkeit, Bildschirmflimmern etc., welche bei der Abnahme der Monitore eine Rolle spielen.

■ DIN EN 61223-2-6: Konstanzprüfungen für die Computertomographie

Die Konstanzprüfungen an Computertomografen überprüfen zusätzliche Kenngrößen. Dazu gehören z. B. Tischposition, Schichtdicke, Positioniergenauigkeit und mittlere CT-Zahl.



■ Abb. 24.1 CT-Phantom

Dafür werden spezielle Prüfkörper / Phantome verwendet (■ Abb. 24.1), um die räumliche Bilddarstellung simulieren zu können.

24.2 Konstanzprüfung in der Strahlentherapie

T. Hartmann

In der Strahlentherapie liegen die meisten Konstanzprüfungen im Aufgabenbereich der Medizinphysikexperten. Auch hier liegt die Festlegung der Verantwortungsbereiche beim Strahlenschutzverantwortlichen.

Wie bei den Anlagen in der Radiologischen Diagnostik muss auch in der Strahlentherapie vor Inbetriebnahme eine Abnahmeprüfung erfolgen, deren Ergebnisse als Referenzwerte in der Folge einzuhalten sind.

Die zuständige Behörde hat zudem das Recht, Optimierungsvorschläge zur medizinischen Strahlenanwendung zu unterbreiten und deren Umsetzung einzufordern.

Geregelt wird die gesetzliche Pflicht zur Durchführung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in § 83 der Strahlenschutzverordnung. Auch hier gilt grundsätzlich das ALARA-Prinzip.

Aktuell existieren viele Empfehlungen und DIN-Vorschriften, welche die Patientensicherheit in der Tele- und Brachytherapie gewährleisten sollen.

24.2.1 Überprüfung der bildgebenden Verfahren zur Bestrahlungsplanung

Die Konstanzprüfungen dieser Verfahren, zu denen radiologische und nuklearmedizinische Verfahren zählen, sind in den jeweiligen Verordnungen (Röntgenverordnung und Richtlinie zum Strahlenschutz in der Medizin) geregelt.

24.2.2 Überprüfung der mechanischen und geometrischen Sicherheit von Bestrahlungsgeräten

■ Kennmerkmale

In der Strahlentherapie müssen mehr Kennmerkmale überprüft werden als in der Radiologischen Diagnostik. Dazu gehören:

- Anzeige der Größe und des Zentralstrahls des Strahlenfeldes
- Lage des Isozentrums
- Abstandsanzeigen
- Genauigkeit der Skala-Anzeige des Gantry-Winkels
- Stabilität des Patiententisches bei Bewegung und Belastung

■ Hierarchie der Konstanzprüfungen

Je nach Fehler- und Gefährdungsgrad werden von der zuständigen Behörde Zeiträume vorgegeben, in denen Konstanzprüfungen der Bestrahlungsgeometrie durchgeführt werden müssen, um die Zielgenauigkeit im Isozentrum zu gewährleisten.

Dabei kommt folgende zeitliche Hierarchie zur Anwendung (■ Tab. 24.1):

Tab. 24.1 Hierarchie der zeitlichen Prüfabfolge

Sehr oft	Übereinstimmungsbeobachtungen Einstellgenauigkeiten von raumfesten Lichtzeigern (z. B. Positionierungslaser) Einstellgenauigkeit des Lichtfeldes (z. B. Feldgröße in Abhängigkeit vom Abstand)
Häufig	Toleranzbeobachtungen Wanderung des Zentralstrahls bei Dre- hung des Tragarmes (z. B. Überprüfung der Gantrywinkel bei Rotationen) Wanderung des Zentralstrahles bei Drehung der Messblende (Kollimator- drehungen zur Feldeinstellung) Prüfung von Winkel- und Längenskalen
Selten	Längen- und Winkelmessungen, z. B. Abstände am Patiententisch

Tab. 24.2 Notwendige Konstanzprüfungen mit Simulator

Arbeitstäglich	Sicht-Prüfung der raumfesten Lichtzeiger zur Anzeige des Isozentrums
Wöchentlich	Lichtfeld-Prüfung von Feldgröße und Zentralstrahl
Monatlich	Durchleuchtungsprüfung von Feldgröße, Zentralstrahl, Isozen- trumslage Kontrolle der Abstandsanzeigen, Nullstellenanzeige aller Winkel- skalen und der linearen Skalen am Patiententisch
Halbjährlich	Prüfung von Feldgröße und Zen- tralstrahl, Lage und Durchmesser der Isozentrumskugel, Anzeige der Isozentrumslage
Jährlich	Messung der Nullstellung der Winkelskalen Stabilität des Patiententisches bei Bewegung und Belastung

24.2.3 Überprüfung der Dosisverteilung innerhalb des Bestrahlungsfeldes

Zur Gewährleistung der korrekten Patientenbe- strahlung ist die Homogenität der Dosisverteilung im Tumorgebiet die Grundvoraussetzung. Dafür müssen die folgenden Parameter überprüft werden:

- homogene Verteilung der Dosis innerhalb eines Bestrahlungsfeldes,
- Dosisleistung von Photonen- und Elektronen- strahlung,
- Konstanz der eingestrahlten Energie zur Si- cherstellung der Eindringtiefe,
- Funktion des automatischen Abschaltsystems mit Doppelmonitoring.

24.2.4 Konstanzprüfung am Simulator

Der Simulator ist eine Durchleuchtungseinheit mit zusätzlichen Bauteilen, um bestrahlungsrelevante Parameter sicher überprüfen zu können.

Für den reinen Durchleuchtungsbetrieb sind die Konstanzprüfungen nach der RöV und der DIN 6868-4 geregelt.

Zusätzlich müssen die in der folgenden Tabelle aufgeführten Konstanzprüfungen durchgeführt werden (Tab. 24.2).

24.2.5 Tägliche Konstanzprüfung am Linearbeschleuniger

Vor Beginn des Arbeitstages muss am Linear- beschleuniger, i. d. R. durch die MTRA, der sog. Quick- oder Morning-Check durchgeführt werden. Bevor dieser Test durchgeführt werden kann, muss der Beschleuniger bereits einen Warmup durch- laufen haben, der ca. 30 Minuten dauert (das Gas wird in der Ionisationskammer zunächst erwärmt, da sonst falsche Dosiswerte gemessen werden). Vielen Menschen geht es ähnlich – erst nach einer morgendlichen Anlaufphase kann die „wahre“ Lei- stungsfähigkeit entfaltet werden.

Allgemeine Sicherheitseinrichtungen

Zunächst erfolgt eine Kontrolle der allgemeinen Si- cherheitseinrichtungen an der Bedieneinheit:

- Funktionsfähigkeit aller Monitore
- Videoüberwachung und der Gegensprechan- lage des Bestrahlungsraumes
- Funktion des Tür des Bestrahlungsraumes
- Funktion des Patientenlagerungstisches (Tischhöhe, Sichtkontrolle der Seitenlaser)
- Rotation des Strahlerkopfes (wenn im Tages- programm vorgesehen)

■ Umgebungsparameter

Als nächstes werden Luftdruck und Temperatur im Bestrahlungsraum dokumentiert, da diese Parameter Einfluss auf das Abschaltverhalten der Ionisationsmesskammern im Strahlerkopf haben können und dementsprechend berücksichtigt werden müssen.

Hinter jedem Beschleuniger befindet sich ein Geräteraum. In diesem liegt ein Zählwerk, welches der Dokumentation der „Netto-Bestrahlungszeit“ und der Laufzeit eines Beschleunigers dient. Vergleichbar ist das mit der Kilometeranzeige eines Autos. Sie gibt einen Hinweis dafür, wie viel das Auto tatsächlich gefahren wurde und wann z. B. Verschleißteile ausgewechselt werden müssen. Unabhängig davon läuft ein Auto auch im Leerlauf, was ebenfalls zu Belastungen an Bauteilen führen kann. In einem Wagen wird diese Gesamtlaufzeit nicht dokumentiert, bei einem Linearbeschleuniger hingegen schon.

■ Dosismessungen

Im Anschluss wird, streng nach Protokoll, eine Messreihe durchgeführt.

Dafür wird wiederum ein PMMA-Prüfkörper (► Abschn. 24.1.2) aufgebaut, in welchen sechs Ionisationsmesskammern in unterschiedlichen Positionen eingebaut sind.

Als erstes wird das Lichtfeld kontrolliert: bei einer Geräteeinstellung eines Feldes von z. B. 10×10 cm, müssen die Feldränder mit denen auf dem Prüfkörper exakt übereinstimmen. Mit der Überprüfung von Abstand und Zentrierpunkt wird genauso verfahren.

Die unterschiedlich verwendeten Strahlungsenergien und -arten haben unterschiedliche Eindringtiefen. Man muss also die korrekte Eindringtiefe kontrollieren, z. B. kommt in einer bestimmten Tiefe genau 1 Gy an, wenn mit 1 Gy eingestrahlt wird. Aus diesem Grund werden Messungen in unterschiedlicher Tiefe durchgeführt. Für die hohen Energien mit einem Dosisverlauf weit in das Gewebe hinein, legt man dem Prüfkörper zusätzliche PMMA-Platten auf bzw. unter. Es müssen stets alle Photonenenergien und die für das Tagesprogramm benötigten Elektronenenergien (mindestens jedoch eine) überprüft werden. Insgesamt sind also je nach Gerät und Tagesprogramm zwischen drei und ca. zehn Messungen notwendig.

Parallel zu den Messungen erfolgt die Sichtkontrolle des Doppelmonitoring-Systems. Dabei müssen zwei voneinander unabhängige Ionisationskammern im Strahlerkopf möglichst exakt die gleichen Dosis-Werte im zeitlichen Verlauf messen und anzeigen. Bei Abweichungen wird (zur Gewährleistung der Patientensicherheit), der Strahl abgeschaltet.

■ Warnhinweise und Abschaltssysteme im Notfall

Auch die nachfolgend genannten Funktionen müssen **arbeitstäglich** vor Beginn des Bestrahlungsbetriebes durchgeführt werden.

Während des Betriebes muss der Bestrahlungsraum deutlich sichtbar als Sperrbereich gekennzeichnet sein. Dafür sind in der Nähe der Tür zum Bestrahlungsraum Warnhinweise angebracht, die **bei Betrieb des Beschleunigers** ein optisches (Leuchten) und akustisches (Hupen/Brummen) Signal abgeben müssen.

Sollte, aus welchen Gründen auch immer, jemand während der Bestrahlung die Tür zum Bestrahlungsraum öffnen, muss der Beschleuniger sofort automatisch die **Bestrahlung unterbrechen**.

Am **Schaltpult und am Patientenlagerungstisch** sind Notaus-Schalter angebracht, welche die Bestrahlung unterbrechen. Die Bestrahlung wird ebenfalls unterbrochen, wenn der **Strahlerkopf** auf einen Widerstand trifft (Berührungsschutz, besonders bei Rotationen).

An den Wänden des Bestrahlungsraumes befinden sich ebenfalls mehrere Notschalter. Werden diese betätigt wird die Stromversorgung unterbrochen und das gesamte Beschleunigersystem abgeschaltet. Diese werden **nicht** arbeitstäglich überprüft und dürfen **nur bei Personengefährdung** betätigt werden.

➤ **Es ist tatsächlich schon (vor längerer Zeit) vorgekommen, dass Personal im Bestrahlungsraum „vergessen“ bzw. übersehen wurde. Die Bestrahlungstür wurde geschlossen und Strahlung ausgelöst.**

Aus diesem Grund gibt es das „Last Man Out“-System: der Letzte, der den Bestrahlungsraum verlässt, ist dafür verantwortlich, dass sich kein weiteres Personal hinter ihm befindet. Um „Betriebsblindheit“ zu verhin-

dern muss er dafür zwei Knöpfe (in der Nähe des Lagerungstisches und im Labyrinth vor dem Ausgang) betätigen.

24.2.6 Kontrolle des Bestrahlungsfeldes

Der Bestrahlungszyklus eines Patienten geht oft über mehrere Wochen. In dieser Zeit haben Patienten zusätzliche Therapien wie z. B. eine Chemotherapie.

Aus mehreren Gründen (Tumorleiden, radiogene Schluckbeschwerden, stressbedingte Appetitlosigkeit, Übelkeit unter Chemotherapie) kann sich das Körpergewicht verändern und damit verzerren sich die angezeichneten Felder auf der Hautoberfläche. Außerdem können Markierungen verblassen oder sich beim Nachzeichnen der Felder Ungenauigkeiten ergeben (immer im Laserstrahl nachzeichnen, niemals frei Hand!). Eine regelmäßige Kontrolle des Bestrahlungsfeldes und Zielvolumens ist also unumgänglich.

Verifikationsaufnahmen werden immer bei der Ersteinstellung und regelmäßig im Therapieverlauf nach ärztlicher Anordnung angefertigt. Die Häufigkeit der Kontrollen ist unterschiedlich je nach Strahlentherapie-Technik und individuellen Patientencharakteristika.

24.2.7 Weitere Konstanzprüfungen

Neben den benannten Konstanzprüfungen am Linenarbeschleuniger, die routinemäßig von MTRA durchgeführt werden, gibt es auch an allen anderen Bestrahlungsgeräten, z. B. für die Brachytherapie oder die Röntgentherapie Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Diese werden in den meisten Fällen von den Medizinphysikexperten der jeweiligen Abteilungen durchgeführt.

In ihrem Bericht aus dem Jahr 2010 hat die Strahlenschutzkommission (SSK) festgestellt, dass die vorliegende Norm DIN 6853-5, in der die aktuellen Vorgaben zu Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Brachytherapie festgeschrieben sind, nicht mehr dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entspricht und dringend überarbeitet werden muss. Trotzdem hat sie derzeit natürlich noch Bestand als maßgebende Norm.

Dies ist insbesondere in der Entwicklung der Brachytherapie-Planung begründet. Hat man früher mittels klinischer Untersuchung und Ultraschall die Bestrahlungsdaten festgelegt, kommt heute wie bei der perkutanen Teletherapie das Planungs-CT zum Einsatz. Die Patientensicherheit, bezogen auf die Qualität der Strahlenquelle und Bestrahlungsgeometrie wird durch die Medizinphysikexperten gewährleistet.

In der Röntgentherapie liegen Kataloge mit den Qualitätssicherungsmaßnahmen aus.

In der Röntgentherapie sind Konstanzprüfungen nicht so häufig notwendig, da die moderne Hochspannungstechnik ein stabiles System gewährleistet. Mittels Plexiglasscheiben, in denen externe Ionisationskammern gelagert sind, wird für jede Röhrenspannung (z. B. 100, 125, 150 und 200 KV) die Dosis in einer bestimmten Tiefe ermittelt. Dieser Ist-Wert wird mit dem Soll-Wert aus einer Tabelle verglichen. Bei größeren Abweichungen muss selbstverständlich die Ursache erforscht werden.

24.3 Konstanzprüfungen in der Nuklearmedizin

T. Hartmann

Für den Bereich der Nuklearmedizin sind die Qualitätssicherungsmaßnahmen rechtsverbindlich im § 83 StrSchV, in der Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin (RIStrSch) und den DIN 6854 und DIN 6855 geregelt.

Neben der Kontrolle der Radiopharmaka (► [Abschn. 10.7](#)) müssen auch die Geräte regelmäßig kontrolliert werden. In diesem Kapitel sind die Konstanzprüfungen berücksichtigt, die durch MTRA durchgeführt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den arbeitstäglchen, wöchentlichen und ggf. monatlichen Konstanzprüfungen.

► **Ein Teil der Konstanzprüfungen, die in großen zeitlichen Abständen durchzuführen sind, werden in der beruflichen Praxis durch Wartungstechniker im Rahmen des Wartungsvertrages durchgeführt.**

Wie in den Bereichen der Radiologischen Diagnostik und der Strahlentherapie sind auch in der Nuklearmedizin Abnahmeprüfungen vor der Inbetriebnahme von Geräten notwendig.

Für die weitere Verwendung müssen, in regelmäßigen zeitlichen Abständen, ebenfalls Konstanzprüfungen mit einem immer gleichen Messaufbau durchgeführt werden.

24.3.1 Gammakamera

Bei den durchzuführenden Konstanzprüfungen an einer Gammakamera ist grundsätzlich zu unterscheiden, ob es sich um eine planare Kamera (z. B. Schilddrüsenkamera) oder eine tomografische Kamera mit SPECT-System handelt.

Darüber hinaus gibt es zwei „Vorgaben“, in denen die erforderlichen Prüfungen aufgelistet sind. Die „Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin“ hat verbindlichen, die DIN empfehlenden Charakter.

Die erforderlichen Konstanzprüfungen sind in der Tabelle aufgelistet.

Planare Gammakamera (■ Tab. 24.3)

Gammakamera mit SPECT-System (■ Tab. 24.4)

■ Untergrundzählrate/Nulleffekt

Bei dieser Überprüfung wird eine Messung ohne Nuklide durchgeführt. Dafür wird das am häufigsten verwendete Nuklid (i. d. R. ^{99m}Tc) ein- und sichergestellt, dass keine Kontaminationen vorliegen, sich Spritzen, ein Patient o. ä. in der Nähe befinden, welche die Untersuchungsergebnisse verfälschen könnten. Die Messung sollte mindestens drei Minuten dauern.

Bei Mehrkopfsystemen muss die Messung für jeden Messkopf separat erfolgen, wobei auf die immer gleiche Position der Messköpfe zu achten ist.

■ Energiepeak und Energiefenster

Diese Kontrolle muss für alle **arbeitstäglich** verwendeten Radionuklide durchgeführt werden. Die Messungen erfolgen immer mit dem Originalnuklid.

Kontrolliert wird die Lage des Photopeaks bezogen auf das ausgewählte Energiefenster.

Dafür wird eine kleine Probe (Punktquelle) des jeweiligen Nuklids unter den Kamerakopf gelegt, das vorgegebene Energiefenster eingestellt und geprüft, ob der Photopeak innerhalb dieses Bereiches aufläuft.

Die Messung erfolgt (in Abhängigkeit von den Herstellerangaben) mit oder ohne Kollimator in einem Abstand von 30 cm Luft ohne Streumedium (Patient o. ä.). Auch hier muss bei Mehrkopfsystemen jeder Detektor überprüft werden.

■ Ausbeute

Die Ausbeute stellt ein Maß für die Empfindlichkeit einer Gammakamera bezogen auf die zu messende Aktivität einer Flächen- oder Punktquelle dar. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis der Countrate (Anzahl der gemessenen Impulse) zur vorhandenen Aktivität.

$$\text{Ausbeute} = \frac{\text{Impulszeit}}{\text{Messzeit} \times \text{Aktivität}}$$

Die Ausbeute hängt in erster Linie vom **Kollimator** und der **Fensterbreite der Gammakamera** ab. Auch die Dicke des Kristalls und der Abstand des Kamerakopfes zur Aktivitätsquelle beeinflusst die Ausbeute.

Um Fehler zu vermeiden ist darauf zu achten, dass folgende Parameter bei jeder Konstanzprüfung eingehalten werden:

- Art der Spritze/ des Phantoms
- Aktivitätsmenge und -volumen
- Lage der Spritze unter der Kamera (liegend oder aufrecht in Spritzenhalter) bzw. Flächenphantom
- Abstand zwischen Kamerakopf und Aktivitätsquelle

Es kann festgelegt sein, dass die Ausbeute nur monatlich zu überprüfen ist.

■ Inhomogenität

Bei dieser Konstanzprüfung wird getestet, ob die Kamera die auftreffende Strahlung an jeder Stelle des Detektors gleichmäßig misst oder ob Defekte vorliegen. Z. B. können Photomultiplier einen Spannungsdrift haben, ganz ausfallen oder der Kristall beschädigt sein. Zu unterscheiden ist die Messung der **Systemhomogenität** (obligat für SPECT-Kamera) und der **inhärenten Inhomogenität** (planare Kamera).

■ Tab. 24.3 Konstanzprüfung der planaren Gammakamera

Häufigkeit der Konstanzprüfung	Art der Prüfung nach Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin	Art der Prüfung nach DIN
Arbeitstäglich	Ordnungsgemäße Funktion	Untergrundzählrate, Energiefenster
Wöchentlich	Ausbeute, Inhomogenität	Inhomogenität
Monatlich		Ausbeute
Halbjährlich	Abbildungsbedingungen	Ortsauflösungen, Linearität. Dokumentationseinrichtung, Abbildungsmaßstab, Ganzkörpereinrichtung

■ Tab. 24.4 Konstanzprüfung der Gammakamera mit SPECT-System

Häufigkeit der Konstanzprüfung	Art der Prüfung nach Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin	Art der Prüfung nach DIN
Arbeitstäglich	Ordnungsgemäße Funktion	Untergrundzählrate, Energiefenster
Wöchentlich	Ausbeute, Inhomogenität	Inhomogenität
Monatlich		Ausbeute, Rotationszentrum
Halbjährlich	Abbildungsbedingungen, Rotationszentrum	Ortsauflösungen, Linearität. Dokumentationseinrichtung, Abbildungsmaßstab, Ganzkörpereinrichtung, tomographische Inhomogenität
Nach jeder Kippung des Messkopfes		Kippwinkel

Bei der Messung der **inhärenten Inhomogenität** ist zu beachten, dass mehr als 5000 Imp/cm² erforderlich sind, empfohlen wird eine Zählrate von 20.000 Imp/s. Um eine homogene Einstrahlung zu erreichen, sollte der Abstand zwischen einer **Punktquelle** und Kamerakopf mind. dem 5-fachen Kristalldurchmesser entsprechen (bei Großfeldkamas mehr als 3 m). Die Messung erfolgt **ohne Kollimator**.

Zur Überprüfung der **Systemhomogenität** werden ein **Flächenphantom** und ein **Kollimator** benötigt. Das Phantom besteht aus PMMA und simuliert die Streueigenschaften eines Patientenkörpers. Es muss mindestens 2 cm größer sein als das Messfeld der Gammakamera und eine Dicke von mindestens 8 cm aufweisen. Das Phantom wird mit ^{99m}Tc und Wasser befüllt. Dabei ist darauf zu achten, dass sich das Technetium gleichmäßig verteilt und keine Luftblasen vorliegen, da an diesen Stellen die Kamera nichts messen kann und ein Defekt vorge-täuscht würde.

Eine Überschreitung der Zählrate von 20.000 Imp/s sollte nicht erfolgen. Gleichzeitig ist eine Impulszahl von 10.000 Impulse pro Pixel zu gewährleisten.

Berechnet werden mithilfe der Software die integrale Inhomogenität für das Center Field of View (CFoV) sowie die differenzielle Inhomogenität für das Useful Field of View (UFoV). Die integrale Inhomogenität bezieht sich auf Sichtfeld der Kamera, die differenzielle auf die benachbarten Pixel.

Bestehen Abweichungen (innerhalb eines Referenzrahmens), wird aus den Werten eine Korrekturmatrize für die nachfolgenden Untersuchungen erstellt, die in den meisten Rechnern automatisch hinterlegt wird.

Hat die Kamera mehrere Messköpfe, so muss die Systemhomogenität für **jeden Messkopf** ermittelt werden.

Die Aktivitätsquelle / das Flächenphantom darf auch zur Überprüfung der Ausbeute verwendet werden.

$$\begin{aligned} \text{Inhomogenität} &= \\ \frac{\text{Imp. Maximalwert} - \text{Imp. Minimalwert}}{\text{Imp. Maximalwert} + \text{Imp. Minimalwert}} \\ &\times 100 = \% \end{aligned}$$

Bei einer Angabe in % wird das Ergebnis mit 100 multipliziert.

Die Aktivitätsquelle/das Flächenphantom darf auch zur Überprüfung der Ausbeute verwendet werden.

Ist in der Kamera ein **SPECT-System** integriert, muss monatlich noch das **Rotationszentrum** überprüft werden.

■ Rotationszentrum (Center of Rotation)

Diese Daten werden benötigt, um eine artefaktfreie Rekonstruktion der SPECT-Daten zu gewährleisten. Überprüft werden das elektronische und das mechanische Rotationszentrum. Damit wird gewährleistet, dass das tatsächliche Rotationszentrum (mechanisch) mit dem Rekonstruktionsalgorithmus des Rechners (elektronisch) übereinstimmt. Bestimmt wird die Abweichung (Offset) der beiden Zentren, woraus ebenfalls wieder ein Korrekturwert ermittelt wird.

Zur Überprüfung wird eine Linien- oder Punktquelle positioniert und Aufnahmen in mindestens 32 Projektionsrichtungen bei 360° angefertigt. Die Aktivitätsquelle darf nicht genau auf der Systemachse positioniert werden, sondern wird um ca. 5 cm verschoben. Die Impulsrate beträgt mindestens 10.000 pro Rotationswinkel.

Bei mehrköpfigen Kamerasystemen muss für jeden Kamerakopf ein vollständiger Datensatz ermittelt werden.

Auch hier gilt: es sind die Herstellerangaben, bezogen auf den Kollimator, die Abstände und Messzeiten, zu beachten.

■ Abbildungsmaßstab

Hier wird das Verhältnis von zwei Punktquellen im Szintigramm zu den zugehörigen Punktquellen im Objekt überprüft.

Für diese Konstanzprüfung benötigt man wieder das Flächenphantom, welches schon bei der Überprüfung der Inhomogenität zum Einsatz kam. Zusätzlich wird ein Transmissionsphantom verwendet, welches Streifen oder Löcher aufweist. Die Gammaquanten können diese durchdringen. Dadurch wird festgestellt, ob die Auflösung der Kamera den Anforderungen entspricht.

Das Transmissionsphantom wird zwischen Flächenphantom und Detektorkopf angebracht. Danach wird eine Aufnahme angefertigt, die ein Streifen- oder Lochmuster aufweist.

Aus dem Verhältnis zwischen dem Abstand der Punkte auf dem Bild und den tatsächlichen im Phantom wird der Abbildungs- oder Rastermaßstab errechnet.

■ Ortsauflösung / Linearität

Die Ortsauflösung ist der noch erkennbare Abstand zwischen zwei Bildpunkten und ein Maß für die Detailerkennbarkeit eines bildgebenden Systems.

Bei einer Gammakamera ist die Ortsauflösung abhängig von der Dicke der Kristalls, der Anzahl der Photomultiplier einschl. ihrer Ortungselektronik und der Kollimatorauflösung.

Der Messaufbau ist der gleiche wie bei der Überprüfung der Inhomogenität, allerdings wird zwischen Phantom und Detektor ein orthogonales Lochphantom (Transmissionsphantom) eingestellt. Das Phantom wird auf dem Detektor so zentriert, dass es das gesamte Sichtfeld der Kamera bedeckt ist.

An Kameras mit **SPECT-Systemen** halbjährlich müssen zusätzlich **Rastermaßstab, tomografische Inhomogenität und Kontrast** überprüft werden.

■ Rastermaßstab

Der Rastermaßstab dient der Überprüfung der Aufnahmematrix. Er ergibt sich aus dem Quotienten der Pixelanzahl, die dem Abstand von zwei Punktquellen in der Bildmatrix während der Aufnahme zugeordnet sind und dem tatsächlichen Abstand der Punktquellen in einer Objektebene, die parallel zur Aufnahmeebene verläuft.

Der Messaufbau ist analog zu dem Aufbau des Abbildungsmaßstabes.

■ Tomografische Inhomogenität

Durch Quantenrauschen (statistische Ungleichverteilung der Quanten auf der Bildebene) kann es zu Abweichungen der Pixelinhalte eines SPECT-Bildes vom Mittelwert kommen. Diese bezeichnet man als tomografische Inhomogenität.

Zur Überprüfung dieser Abweichung wird ein Volumenphantom mit einer radioaktiven Flüssigkeit gefüllt und Aufnahmen durchgeführt.

Auch hier sind wieder, entsprechend der Herstellerangaben, Messvorgaben zu beachten. Die Konstanzprüfung gilt immer nur für einen festgelegten Kollimator, Filter und Schwächungskorrekturen. Außerdem ist wieder die Position des Phantoms, Rotationswinkel, Abtastwinkel etc. zu beachten.

■ Kontrast

Der Kontrast wird ebenfalls mittels Volumenphantom überprüft, in welchem sich Kugeln ohne radioaktive Füllung mit unterschiedlichen Abmessungen befinden.

Überprüft wird auf dem Bild die Darstellung dieser Referenzkörper. Der Messaufbau ist der gleiche wie bei der Überprüfung der tomografischen Inhomogenität.

Zusätzlich werden **halbjährlich** die **Dokumentationseinrichtungen, der Ganzkörperzusatz und die Sicherheitseinrichtungen** überprüft.

■ Dokumentationseinrichtungen

Bei dieser Konstanzprüfung werden die **Verzeichnungsfreiheit** sowie die **Einstellungen der Farbskalen** der Bilddokumentationssysteme getestet.

Dafür werden Stufen- oder Keilphantome verwendet, welche mit radioaktiven Flüssigkeiten gefüllt sind. Eine Überprüfung kann aber auch mit rechnergenerierten Testbildern erfolgen.

Für Schwarz-Weiß-Bilder werden Testbilder mit 16 Graustufen verwendet, Farbbilder können mit Fernsehtestbildern überprüft.

Welches Verfahren zum Einsatz kommt, wird vom Hersteller festgelegt.

■ Ganzkörperzusatz

Bei einer Ganzkörperszintigraphie wird der Patientenkörper abgefahren, um ein Gesamtbild des Körpers zu erhalten. Im Rahmen der Konstanzprüfung werden, um das Abtasten des Körpers zu si-

mulieren, mehrere Punktquellen über den gesamten Scanbereich aufgenommen und die Aufnahme mit den Referenzbildern verglichen. Die Prüfung ist in beiden Bewegungsrichtungen (cranio-caudal und caudo-cranial) durchzuführen.

■ Sicherheitseinrichtungen

Hier werden die mechanischen Einrichtungen der Gammakamera überprüft. Dazu gehören die Funktionalität des Handschalters und der Schutzkontakte am Kamerakopf, um eine Gefährdung der Patienten während der Aufnahme auszuschließen.

Dazu zählt ebenfalls die Überprüfung der Befestigungsmechanismen der Kollimatoren. Diese bestehen aus Blei, und es kann zu schwerwiegenden Verletzungen kommen, wenn sie auf den Patienten fallen.

24.3.2 Aktivimeter

Bevor einem Patienten überhaupt Aktivität gespritzt wird, muss diese portioniert und sichergestellt werden, dass die richtige Aktivitätsmenge und das richtige Radiopharmakon markiert wurden.

Das wichtigste Messgerät im Heißen Labor ist dafür das Aktivimeter. Wie bei der Gammakamera sind auch hier verschiedene Konstanzprüfungen in unterschiedlichen zeitlichen Abständen durchzuführen (■ Tab. 24.5).

Für die Konstanzprüfungen ist ein Prüfstrahler zu verwenden, dessen Halbwertszeit größer als fünf Jahre ist, um eine Konstanz des Messergebnisses zu gewährleisten. In der Regel wird Cs-137 mit einer physikalischen HWZ von 30 Jahren verwendet.

■ Nulleffekt

Der Nulleffekt wird durch die Umgebungsstrahlung verursacht und ist die Anzeige des Messgerätes ohne ein Messobjekt. (Was misst das Gerät mit NULL Füllung?)

Bei dieser Messung soll eine Kontamination des Messgerätes ausgeschlossen werden, indem man einmal mit und einmal ohne Spritzenhalter misst. Gemessen wird der Nulleffekt in der ^{99m}Tc -Einstellung, da es das am häufigsten verwendete Nuklid ist.

■ **Tab. 24.5** Konstanzprüfungen beim Aktivimeter

Häufigkeit der Konstanzprüfung	Art der Prüfung nach Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin	Art der Prüfung nach DIN
Arbeitstäglich	Nulleffekt in einer Nuklidenstellung, Ausbeute in einer Nuklideinstellung	Nulleffekt in einer Nuklideinstellung, Ansprechvermögen in einer Nuklideinstellung
Halbjährlich	In allen genutzten Nuklideinstellungen: Nulleffekt, Ausbeute, Linearität	Ansprechvermögen in allen Nuklideinstellungen, Systemlinearität in einer Nuklideinstellung

■ **Tab. 24.6** Konstanzprüfung Bohrloch

Häufigkeit der Konstanzprüfung	Art der Prüfung nach Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin
Arbeitstäglich	Untergrundzählrate, Einstellung des Energiefensters
Wöchentlich	Ausbeute mit einem Prüfstrahler
Halbjährlich	Bohrlochfaktoren

■ **Ausbeute / Ansprechvermögen**

Hier wird überprüft, ob der bekannte Sollwert des Prüfstrahlers ^{137}Cs mit dem gemessenen Istwert übereinstimmt bzw. wie groß die Abweichung ist (+/- 5 % ist erlaubt). Die Messwerte werden mit den Referenzwerten verglichen und dokumentiert. Zu beachten ist, dass eine regelmäßige HWZ-Korrektur durchgeführt werden muss.

■ **Molybdändurchbruch**

Diese Prüfung gehört nicht zu den gerätebedingten Konstanzprüfungen, erfolgt jedoch am Aktivimeter.

Bei der Lieferung eines neuen Generators muss getestet werden, ob Beschädigungen vorliegen, durch die Molybdän in das Eluat gelangt sein könnte. ^{99}Mo ist ein β^- -Strahler mit einer HWZ von 66 Stunden. Eine Kontamination des Eluats mit ^{99}Mo ist aus Strahlenschutzgründen für den Patienten nicht zulässig.

Der neue Generator wird eluiert und dieses Ersteluat wird, zunächst ohne Bleiabschirmung, im Aktivimeter gemessen. Danach erfolgt eine Messung mit einer 4–6 mm dicken Bleiabschirmung, welche die Energie des ^{99m}Tc absorbiert. Bei der zweiten Messung darf nicht mehr als 0,04 % Aktivität der Erstmessung ermittelt werden. Erst im Anschluss wird das Eluat am Patienten verwendet.

■ **Linearität**

Bei dieser Konstanzprüfung erfolgt der Abgleich zwischen dem Sollwert und der gemessenen Aktivität im Aktivimeter.

Dafür wird eine Spritze mit ^{99m}Tc und einer vergleichsweise hohen Aktivitätsmenge (1000 MBq) im Aktivimeter zu unterschiedlichen Zeiten (z. B. alle 6 h) über 24–48 Stunden gemessen. Man erhält eine Messreihe über unterschiedliche Aktivitätsmengen. Berechnet werden die Quotienten aus den gemessenen und errechneten Werten. Eine Linearität liegt vor, wenn alle Werte zwischen 0,95 und 1,05 liegen.

24.3.3 Sondenmessplätze

Zu den Sondenmessplätzen gehört das Bohrloch, auf welches hier im Besonderen eingegangen wird (■ Tab. 24.6).

■ **Untergrundzählrate**

Die „Richtlinie Strahlenschutz“ verwendet den Begriff der Untergrundzählrate für den Nulleffekt.

Wie beim Aktivimeter dient diese Messung am Bohrloch ebenfalls der Überprüfung auf mögliche Kontaminationen.

■ **Tab. 24.7** Konstanzprüfung PET

Häufigkeit der Konstanzprüfung	Art der Prüfung nach Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin	Art der Prüfung nach DIN
Arbeitstäglich	Ordnungsgemäße Funktion	Relative Messstrahlenempfindlichkeit, Gültigkeit der Normalisierung
Halbjährlich	Kalibrierung, Abbildungseigenschaften	Bilddokumentation, ggf. transversale Auflösung und Abbildungsmaßstab
Nach Systemabgleich, Normalisierung		Kalibrierungsfaktor, Kreuzkalibrierung
Nach Herstellerangaben, mind. Jährlich		Mechanische Teile

Die Untergrundzählrate ist für jedes verwendete Nuklid zu bestimmen.

Verwendet man unterschiedliche Probenhalter sind die Messungen jeweils mit und ohne Halterung durchzuführen.

■ **Energiefenster**

Für jedes verwendete Nuklid wird das Energiefenster eingestellt und eine Messung durchgeführt. Bei der Interpretation der Daten muss eine erhöhte Untergrundstrahlung durch z. B. Nuklide in der Umgebung berücksichtigt werden.

Wie bei der Gammakamera muss auch am Bohrloch zusätzlich die Einstellung des Energiefensters überprüft werden.

■ **Ausbeute**

Diese Messung ist mit der Überprüfung der Ausbeute am Aktivimeter vergleichbar. Auch hier werden langlebige Radionuklide (Cs-137, Ba-133 oder J-129) verwendet und die gemessene Aktivität unter Berücksichtigung der HWZ mit den Referenzwerten abgeglichen.

24.3.4 Positronenemissionstomographen (PET)

Die angegebenen Konstanzprüfungen beziehen sich auf Hybridgeräte (PET-CT), wobei die Konstanzprüfungen für das CT entsprechend der RÖV durchzuführen sind (■ Tab. 24.7).

■ **Überprüfung der relativen Messstrahlenempfindlichkeit und der Gültigkeit der Normalisierung (ordnungsgemäße Funktion)**

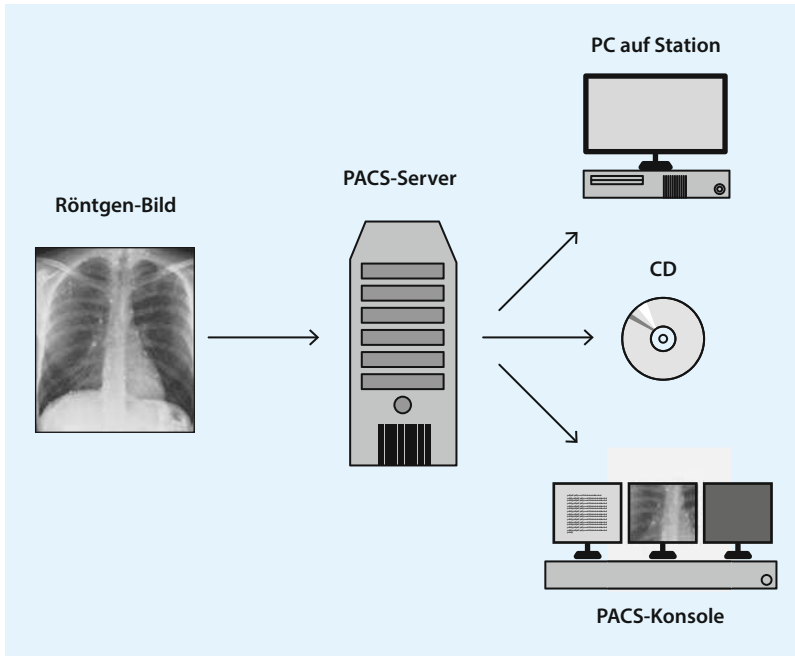
Bei dieser Konstanzprüfung wird die Koinzidenzempfindlichkeit der Detektoren überprüft. Gleichzeitig erfolgt ein Abgleich, ob die ermittelten Korrekturfaktoren (vergleichbar mit der Inhomogenitätsprüfung) noch zum aktuellen Gerätezustand passen.

➤ **Koinzidenz = das zeitliche und/oder räumliche Zusammentreffen von Ereignissen. Hier: gleichzeitiges Auftreffen von Gammaquanten, die im 180° Winkel auseinander geflogen sind.**

Für den Messaufbau wird ein Phantom benötigt, welches einen Positronenstrahler (z. B. ⁶⁸Ga) enthält.

Es wird eine Aufnahme gemacht und für jeden Detektorblock die Koinzidenzempfindlichkeit mit dem Durchschnittswert aller Detektorblöcke durch den Rechner verglichen. Zusätzlich erfolgt eine visuelle Beurteilung der Prüfaufnahme auf z. B. Streifenartefakte.

➤ **Bei mobilen PET-CT-Scannern ist der tägliche Aufwand der Konstanzprüfungen höher, da auch die mechanische Funktionalität überprüft werden muss (Veränderungen durch den Transport). Hier geben die Hersteller die erforderlichen Messungen und den Umfang an.**



■ Abb. 24.2 Archivierungsvorgänge

- Für jede Konstanzprüfung werden zulässige Abweichungen von den Normwerten festgelegt, welche nicht über- oder unterschritten werden dürfen.

Als Faustregel gilt:

1. In der Radiologischen Diagnostik +/- 30 %
2. In der Nuklearmedizin +/- 5–10 %
3. In der Strahlentherapie +/- 3 %

Für alle Konstanzprüfungen gilt: Bei nicht tolerablen Abweichungen von den Normwerten darf ein Gerät nicht für die Anwendung am Patienten freigegeben werden.

Eine Freigabe erfolgt erst nach Behebung bzw. Klärung der Abweichungen

gedruckte Bilder werden Sie möglicherweise in Ihrem gesamten Berufsleben nicht mehr in die Hand bekommen. Die Rede ist immer von **PACS** und **RIS**. Schauen wir uns die Sache mal näher an.

■ PACS

Die Abkürzung steht für „picture archiving and communication system“. Hiermit werden die Röntgenbilder also archiviert und im System verteilt. Wie bei Betriebssystemen – Sie kennen Windows, Apple und vielleicht auch Linux – gibt es nicht nur ein PACS. Viele verschiedene Hersteller haben Programme entwickelt, die die Röntgenbilder speichern und archivieren können und genauso aber auch anzeigen (■ Tab. 24.2).

Kern eines jeden PACS ist der Speicher, also im Prinzip die Festplatte, und die dazugehörigen Datenbanken. Man kann sich das so ähnlich wie in einer **riesigen Bibliothek** vorstellen: Irgendwo ist das passende **Buch** (= **Bild**). Die Datenbank, in der ich einfach den Namen suchen kann, verrät mir, wo es genau steht. In der Datenbank steht auch, ob schon jemand eine **Rezension** (= **Röntgenbefund**) geschrieben hat, wie **schwer das Buch** ist (= **Dosis**) und ob es ein **Paperback-Buch** (= **konventionelle Röntgenaufnahme**) oder ein **Hardcover**

24.4 RIS/PACS inklusive Datenschutz

C. Vockelmann

Wann haben Sie das letzte Photo mit einem analogen Photoapparat gemacht? Möglicherweise noch nie. Wir befinden uns mitten im digitalen Zeitalter. Zumindest in der Radiologie, Nuklearmedizin und Strahlentherapie arbeiten Sie und die Ärzte Ihrer Abteilung an Computern. Auf Röntgenfilmen aus-

■ Tab. 24.8 Typische Dateigrößen

Anzahl der Bilder		Bildmatrix		Dateigröße
DSA	9	1024 × 1024	18464 kB	= 18 MB
CT Schädel	32	512 × 512	16016 kB	= 16 MB
CT Abdomen	640	512 × 512	320320 kB	= 320 MB
MR Knie	49	256 × 256	6528 kB	= 6 MB

(= CT) ist. Wenn ich das Buch ganz genau ansehen will, gehe ich in den **Lesesaal** (= **PACS-Konsole mit Befundungsmonitor**). Dann kann ich mir auch das Impressum des Buches ansehen mit **allen Informationen zu Autor, Verlag etc.** (= **DICOM-Header**). Für den **schnellen Blick** kann ich es auch nur kurz aus dem Regal nehmen und aufschlagen (= **PACS-Viewer auf den Stationen**). Und wie in einer Bibliothek muss man sicherstellen, dass das Buch dauerhaft und sicher lesbar bleibt. Daher gibt es das Röntgenbild, oder um in unserem Beispiel zu bleiben, das Buch nicht nur einmal, sondern ein zweites Mal an einem anderen Ort. Dieser zweite Ort ist zumindest in einem **anderen Gebäudeteil**, damit z. B. bei Feuer nicht beide Bibliotheken (= **PACS-Server**) zerstört werden.

Wichtige Begrifflichkeiten

Fassen wir die Begriffe nochmal zusammen:

- PACS = Oberbegriff für den Speicher der Röntgenbilder mit entsprechender Software zum Betrachten der Aufnahmen
- PACS-Konsole = entsprechend leistungsfähiger Rechner, um PACS-Bilder anzeigen zu können
- DICOM-Header = Digital imaging and communications in medicine (DICOM), Zusatzinformationen, die mit dem eigentlichen Röntgenbild zusammen in einer Datei gespeichert und aus denen z. B. Patienteninformationen auszulesen sind.

■ ■ RIS

Hiermit ist das **Radiologieinformationssystem** gemeint. Auch hier versteckt sich wieder eine große Datenbank. Gespeichert werden hier alle Informationen zum Patienten, außer dem eigentlichen Röntgenbild. Sobald ein Patient Ihre Abteilung betritt und sich zu einer Untersuchung anmeldet, geben Sie die Daten des Patienten in das System ein. Damit gibt es zu diesem Patienten jetzt einen Datensatz. Sie erkennen sicherlich, wie wichtig es ist, diesen Schritt sorgfältig zu machen. Ab diesem Moment wird der Patient nämlich im System mit einer Nummer (**Patienten-ID**) versehen, die dann z. B. zum MRT mit einem entsprechenden Auftrag für eine MRT-Untersuchung weitergereicht. Fehler in den sog. Patientenstammdaten können in aller Regel nur von einem Administrator geändert werden. Und wenn Sie bei der Eingabe übersehen haben, dass Lieschen Müller nicht 1934 geboren ist, sondern 1935 und schon mal bei Ihnen war, stehen Ihnen die Voruntersuchungen nicht zur Verfügung, da sie Lieschen Müller von 1935 gehören.

- Die korrekte Eingabe aller Daten in das RIS ist wichtig, damit alle Patienteninformationen richtig zugeordnet sind und zudem die richtige Untersuchung am richtigen Patienten erfolgt!
- Übrigens: Der Begriff **KIS** wird Ihnen vielleicht auch schon mal untergekommen sein. Dieser steht für **Krankenhausinformationssystem** und ist das Pendant zum RIS.

Eine Röntgenabteilung einer Klinik mittlerer Größe produziert im Jahre 2014 Aufnahmen mit einem Speichervolumen von ca. 1–2 Terabyte (TB) = 1–2 Mio. Megabyte (■ Tab. 24.8).

Auch im RIS hinterlegt und in Datenbanken abgespeichert werden Informationen zu den durchgeführten Untersuchungen, Angaben zur Dosis, der Befund der Röntgenuntersuchung und die Angaben zur rechtfertigenden Indikation. Alle Informationen

und Angaben also, die zusätzlich zum eigentlichen Röntgenbild erhoben werden, werden im RIS dokumentiert und gespeichert.

■ Aufbewahrungsanforderung

Die Aufbewahrungsanforderungen sind im § 28 der Röntgenverordnung geregelt. Hier ist festgelegt, dass Röntgenaufnahmen und die dazugehörigen Aufzeichnungen wie rechtfertigende Indikation, Dosis und Befund mindestens 10 Jahre nach der letzten Untersuchung aufzubewahren sind. Für Röntgenbehandlungen in der Strahlentherapie gilt sogar eine Frist von 30 Jahren, ebenso für Röntgenuntersuchungen im Rahmen berufsgenossenschaftlicher Behandlungen. Hierunter fällt z. B. eine Röntgenuntersuchung im Rahmen eines Wegeunfalls, wenn der Patient auf dem Weg zur Arbeit gestürzt ist.

Aufbewahrungsfristen im Überblick

Röntgenaufnahmen + dazugehörige Aufzeichnungen:	10 Jahre
Röntgenbehandlungen in der Strahlentherapie:	30 Jahre
Röntgenuntersuchung BG-Behandlungen:	30 Jahre

■ Datengeheimnis

Das Datengeheimnis ist in Deutschland gesetzlich geregelt.

➤ Als MTRA gehören Sie zum schweigepflichtigen Personenkreis nach § 203 Strafgesetzbuch (StGB).

Sie sind damit an die ärztliche Schweigepflicht gebunden. Diese Schweigepflicht gilt gegenüber jedem. Das bedeutet, dass Sie jegliche Informationen zu einem Patienten nur mit dessen Einverständnis weitergeben dürfen.

! Das gilt auch gegenüber Angehörigen und Ehepartnern!

Ebenso geht die ärztliche Schweigepflicht i. d. R. mit einem Zeugnisverweigerungsrecht vor Gericht einher.

Auskunft gegeben werden darf jedoch, wenn das **Einverständnis des Patienten** vorliegt. Dies ist z. B. im Behandlungsvertrag zwischen Patient und Krankenhaus oder Arzt geregelt und ermöglicht die Datenweitergabe des Patienten zu Abrechnungszwecken. Daneben gibt es eine **konkludente Einwilligung**. Hiermit wird **die stillschweigende oder mutmaßliche Einwilligung** bezeichnet, wenn der Patient zum Beispiel bewusstlos ist.

Auch die Weitergabe der Informationen von einem Arzt zum anderen ist nicht ohne Einwilligung des Patienten erlaubt. Die Weitergabe des Röntgenbefundes an den zuweisenden Arzt bedarf ebenso der Zustimmung des Patienten, die daher i. d. R. im Behandlungsvertrag eingeholt wird.

Ausnahmen von der Schweigepflicht bestehen nur bei der Gefährdung höherwertiger Rechtsgüter. So sind Sie z. B. zur Auskunft verpflichtet, wenn Ihnen ein Patient einen Mord ankündigt. Ebenso sind verschiedene Infektionskrankheiten meldepflichtig, um eine Gefährdung der Bevölkerung zu vermeiden.

➤ Achten Sie darauf, keine Patientendaten offen herumliegen zu lassen, um eine versehentliche Datenweitergabe zu vermeiden.

Das gehört zu den drei Dingen, mit denen man den Datenschutz verletzen kann:

1. Jemandem erzählen
2. Jemanden zuhören lassen
3. Jemanden etwas sehen lassen

Um die Datenschutzanforderungen zu erfüllen, sind sowohl das PACS als auch das RIS mit einem Benutzerkennwort für jeden Mitarbeiter versehen. Dieses sollten Sie auf keinen Fall an andere weitergeben, da sie damit Informationen von Patienten an möglicherweise unbefugte Personen preisgeben. I. d. R. wird von den Systemen auch protokolliert, mit welchem Benutzerzugang auf welche Informationen zugegriffen wurde.

24.5 Qualitätsmanagement

Ch. Nowarra

Neben den bereits benannten Konstanzprüfungen und Maßnahmen für den Datenschutz existiert in

einer radiologischen Abteilung i. d. R. ein Qualitätsmanagementsystem. Im Fallbeispiel ist Katrin die Qualitätsmanagementbeauftragte (QMB) ihrer Abteilung und maßgeblich für die Gestaltung und Umsetzung von weiteren Qualitätsmaßnahmen und die Umsetzung eines Qualitätsmanagementsystems (QM-System) verantwortlich.

24.5.1 Historische Entwicklung

Über Qualität wurde schon bei den Philosophen diskutiert – kann sie doch etwas sehr subjektives sein. Der eine mag lieber Weißwein, ein anderer findet Rotwein qualitativ viel besser.

Auch im Mittelalter spielte Qualität eine große Rolle innerhalb der handwerklichen Zünfte. Die Zunftmitglieder definierten, was unter guter handwerklicher Arbeit zu verstehen ist. Dementsprechend bekam den Gesellenbrief nur der, der qualitativ gute Arbeit ablieferte.

Der Qualitätsbegriff gewann Anfang des 20. Jahrhunderts zur Zeit der Industrialisierung immer mehr an Bedeutung. Gerade in der industriellen Fertigung (z. B. der Autoindustrie) wurden, mit Einführung der Fließbandarbeit, einzelne Arbeitsschritte und Arbeitsebenen neu gestaltet und optimiert. Alles musste immer schneller und besser werden. Fehler sollten nach Möglichkeit nicht auftreten, da Nachbesserungen und Reparaturen mit Kosten und verärgerten Kunden einhergingen.

Anfangs führte man Endkontrollen von Bauteilen durch. Der Nachteil daran, war, dass man erst zum Schluss und nur stichprobenartig entscheiden konnte, ob man z. B. den Vergaser in ein Auto einbauen kann, ihn reparieren oder sogar wegwerfen muss.

Die Problematik der Endkontrolle verschärfte sich für die Munitionsherstellung im zweiten Weltkrieg. Bei einer Granate war eine Endkontrolle in der Fabrik nicht gerade zielführend. Also überlegten sich die Verantwortlichen, dass es sinnvoller sei, Fehler gar nicht erst entstehen zu lassen und lieber den Produktionsprozess zu überwachen und zu optimieren.

Aus der Produktqualität wurde die Prozessqualität.

Mitte der 1950er Jahre entwickelten Edward Demming und Joseph Juran die Grundlage für das QM – den PDCA-Zyklus.

PDCA-Zyklus

Der Zyklus definiert sich wie folgt:

P = Plan (planen): Es werden Ziele zur Qualitätsverbesserung definiert und damit verbundene Maßnahmen entwickelt.

D = Do (durchführen): Für die geplanten Maßnahmen werden Arbeitsverfahren (Standards) entwickelt, nach denen zukünftig gearbeitet werden soll.

C = Check (prüfen): Es findet eine Art „Probearbeiten“ statt, dabei wird überprüft, ob sich die ausgedachten Maßnahmen in der Praxis bewähren.

A = Act (verbessern): Hat sich die Maßnahme / der neue Standard bewährt, dann wird er dauerhaft in der Abteilung übernommen.

Die Darstellung in einem Zyklus macht deutlich, dass es keine „beste“ Qualität gibt, sondern die Überlegungen immer wieder von vorn beginnen. So, wie es auch immer wieder neue Untersuchungsverfahren oder Anforderungen an eine Radiologie gibt.

Aus diesem PDCA-Zyklus lassen sich alle anderen Arbeitsprozesse im Gesundheitswesen, u. a. der Pflegeprozess ableiten.

➤ Ein Praxisbeispiel für die Umsetzung des PDCA-Zyklus in einer Radiologie

In einer radiologischen Abteilung fehlen vor einer geplanten Angiographie immer wieder Voruntersuchungen. Das führt zu Verzögerungen bei den Untersuchungen, da z. B. ein Laborwert nachgemeldet werden muss oder ein Ultraschallbefund fehlt.

Es findet sich eine Gruppe von Mitarbeitern aus allen betroffenen Bereichen, um das Problem zu lösen.

P: Die Gruppe gibt sich das Ziel, dass es zukünftig keine Verzögerungen durch fehlende Vorbefunde mehr geben soll. Als Maßnahme entwickeln sie einen Laufzettel für die Pati-

enten, auf dem alle notwendigen Untersuchungen „abgehakt“ werden. Erst wenn alle Testergebnisse vorliegen, kann der Patient zur Angiographie erscheinen.

D: Der entwickelte Laufzettel wird versuchsweise bei ein paar Patienten über einen Zeitraum von zwei Wochen ausprobiert.

Können alle Kollegen damit etwas anfangen? Funktioniert der Plan?

C: Nach dem Ablauf der zwei Wochen trifft sich die Gruppe wieder und geht noch einmal alle wichtigen Dinge durch. Der Laufzettel hat sich bewährt und es kommt zu keinerlei Verzögerungen mehr.

A: Der Laufzettel wird dauerhaft in der Praxis eingesetzt. Das bedeutet auch, dass alle beteiligten Kollegen und Abteilungen informiert und ggf. Mitarbeiter geschult werden.

Heute ist das Qualitätsmanagement aus der Industrie und dem Gesundheitswesen nicht mehr wegzudenken. QM und sogenannte Qualitätssicherungsmaßnahmen wurden in den 80er Jahren im Rahmen der Finanzierungsprobleme des bundesdeutschen Gesundheitswesens von der Politik gefordert und gesetzlich verankert. So ist speziell für den Krankenhausbereich in den §§ 135–137 SGB V die Verpflichtung zur Einführung eines QM-Systems beschrieben. Mittlerweile werden Qualitätsberichte von Kliniken und Zertifikate (Nachweisurkunden für ein QM-System) auch als ein Entscheidungskriterium für Patienten und Zuweiser in der heutigen Krankenhaus- und Praxislandschaft herangezogen, denn der Gesundheitssektor ist längst keine konkurrenzfreie Zone mehr.

➤ **Maßgeblicher Nutzen eines QM-Systems:**

- **Klare Festlegung der Strukturen:** „Jeder weiß, was er wann und wie zu tun hat und wer im Zweifelsfall gefragt werden kann.“
- **Wettbewerbsvorteil:** „Tue Gutes und sprich darüber“

24.5.2 Qualitätsbegriffe im Gesundheitswesen

Wie bereits beschrieben ist der Begriff der Qualität eher subjektiv geprägt. Entsprechend existieren verschiedene Definitionen.

■ **Qualitätsdefinition**

Ursprünglich kommt der Begriff aus dem Lateinischen (qualitas) und bedeutet so viel wie Beschaffenheit / Eigenschaft oder Güte eines Produktes und ist im ursprünglichen Wortsinn werteneutral. In unserer Gesellschaft versteht man auch Dienstleistungen, z. B. einen Haarschnitt, das Essen in einem Restaurant oder eben das Anfertigen einer radiologischen Untersuchung als Produkt im Sinne des QM.

Im Gesundheitswesen wird der Qualitätsbegriff auch definiert als **Gesamtheit von Merkmalen einer medizinischen Einheit (Abteilung) bezüglich ihrer Fähigkeit und Eignung, bestimmten Erfordernissen gerecht zu werden**. Eine radiologische Abteilung hat z. B. den Erfordernissen guter, befundbarer Bilder bzw. der Befunde gerecht zu werden. Um diese anfertigen zu können, sind mehrere Voraussetzungen / Merkmale zu erfüllen. Man benötigt natürlich eine gerätetechnisch gut ausgestattete Abteilung, aber auch kompetentes Personal, welches die Bilder anfertigt (MTRA), befundet (Radiologe), Befunde versendet (Schreib- oder Bürokräfte) – und das Ganze unter hygienisch einwandfreien Bedingungen (Reinigungspersonal).

➤ **Qualität bedeutet also das Zusammenspiel unterschiedlichster Faktoren, die sich gegenseitig beeinflussen.**

Eine weitere Definition aus dem pflegerischen Bereich bringt den Kunden, in unserem Fall den Patienten, ins Spiel:

- » Qualität ist der Grad der Übereinstimmung zwischen den Zielen des Gesundheitswesens bzw. der Kunden und der wirklich geleisteten Pflege (Kirchner, 2004:63).

Wie bereits beschrieben wird in einer Radiologie nicht alles gemacht, was die Geräte können, sondern das, was der Patient braucht und was aus me-

dizinischer und finanzieller Sicht angemessen ist. Natürlich kann man bei der Fragestellung einer Meniskusklaision in der MRT statt vier Sequenzen auch acht fahren. Das ganze kostet aber nicht nur mehr und bringt keine zusätzlichen relevanten Informationen, der Patient ist auch unzufriedener weil die Untersuchung länger dauert und evtl. als unangenehm empfunden wird.

■ Einflussfaktoren für Qualitätsdefinitionen

Die Qualitätsdefinitionen unterliegen verschiedenen Einflussfaktoren und Veränderungen.

So haben sich z. B. die **individuellen Kunden- bzw. Patientenwünsche** verändert. Vor zwanzig Jahren haben sich Patienten eher auf die Meinung eines Arztes verlassen. Heute kommt der mündige, „internet-aufgeklärte“ Patient und möchte zusätzliche Informationen.

Es besteht die gesetzliche Forderung, stets nach dem **neuesten Stand von Wissenschaft und Technik** zu arbeiten sowie aktuelle Forschungsergebnisse in die Arbeit einfließen zu lassen. Nur, wenn die Wirksamkeit eines Verfahrens nachgewiesen ist, zahlen die Krankenkassen diese Leistung.

Auch die **subjektive Qualitätsbeurteilung** der Mitarbeiter einer Abteilung spielt eine Rolle. Dazu kann die Gestaltung der Warteflächen oder Untersuchungsräume gehören.

Die **Qualität soll überprüfbar, also messbar** sein. Dafür ist ein ständiger Soll-Ist-Abgleich der eigenen Ansprüche und Zielvorgaben notwendig.

Nicht zuletzt kommt es auf die **Wirtschaftlichkeit, Zweckmäßigkeit und Angemessenheit** des „Dienstleisters Radiologie“ an. Man kann viel machen, aber wenn es nicht finanzierbar ist, gibt es diese radiologische Abteilung bald nicht mehr ...

■ Kundendefinition

Die Qualitätsdefinitionen geben schon einen Überblick, wer im Gesundheitswesen als **Kunde** bezeichnet werden kann.

Zum einen der **Patient**, der die medizinische Leistung erhält. Auf der anderen Seite aber auch die **Krankenkassen**, welche diese Leistungen bezahlen. Das genügt im Fall der Radiologie aber noch nicht. Auch der **Zuweiser**, der den Patienten überweist ist ein Kunde und von der Qualität der Untersuchung für seine weitere Tätigkeit abhängig.

Im Sinne des QM gelten darüber hinaus die **Mitarbeiter** als Kunden des Arbeitgebers, die selbst eine gewisse Arbeitsqualität benötigen, um gute Arbeit leisten zu können. Stichworte wie Mitarbeiterzufriedenheit, -qualifikationen und Motivation spielen im QM eine große Rolle.

■ Qualitätsdimensionen

Um die Vielzahl der beeinflussenden Faktoren in der Praxis „handhabbar“, planbar und überprüfbar zu machen, wurden von Avedis Donabedian bereits 1966 sog. Qualitätsdimensionen eingeführt.

Seitdem unterscheidet man zwischen Struktur-, Prozess- und Ergebnisqualität.

Die **Strukturqualität** betrifft alle **Rahmenbedingungen und Voraussetzungen**, unter denen die geforderten Leistungen erbracht werden, z. B. Anzahl und Qualifikationen/Weiterbildungen der Mitarbeiter, Anzahl und Ausstattung der Abteilung inkl. der notwendigen Rechnersysteme für die Datensicherung und Dokumentation, Hilfsmittel (z. B. Rollboard) etc.

Im Rahmen der **Prozessqualität** werden alle **Maßnahmen, Arbeitsabläufe** und Aktivitäten „rund um den Patienten“ beschrieben. Dazu gehören z. B. Einstelltechniken und SOPs, Arbeitsanweisungen, die Aufklärung und Anleitung zur Untersuchung usw.

Zum Schluss beschreibt die **Ergebnisqualität** die **quantitativen und qualitativen Leistungsergebnisse** einer Maßnahme / Untersuchung, die sich aus den strukturellen Rahmenbedingungen und den Prozessen ergeben. Sie dient insbesondere der **Evaluation** / Überprüfung der Untersuchungs- und Therapiequalität. Hierzu gehören z. B. die Anzahl von Fehlaufnahmen und -befunden, komplikationslose Interventionen in der Angiographie, der Grad der Kundenzufriedenheit oder die nosokomiale Infektionsrate. Um die erreichte Qualität messbar zu machen, werden Kennzahlen erhoben (bspw. Wartezeiten von Patienten, Anzahl und Art der Komplikationen in der Angiographie). Auf der Grundlage solcher Kennzahlen werden dann neue Qualitätsziele festgelegt, die man im nächsten Jahr erreichen möchte.

Definition

SOP = Standard Operation Procedures: Beschreibung von Untersuchungsabläufen, z. B. Einstelltechnik der Schulter incl. Indikationen, Patientenvorbereitung, Lagerung, Aufnahmeparameter, Aufnahmekriterien etc.

AAW = Arbeitsanweisung: nähere Beschreibung einzelner Arbeitsschritte, um eine SOP abarbeiten zu können, z. B. wie der sterile Tisch in der Angiographie zu decken ist

Prüfverfahren, für das die Anforderungen im jeweiligen QM-System vorgeschrieben sind.

24.5.3 Aufbau eines QM-Systems

Wie Eingangs beschrieben, war Katrin an der Einführung des QM-Systems in ihrer Abteilung beteiligt. Wie muss man sich so etwas vorstellen?

Vorüberlegungen

Zunächst muss von der Leitung eines Krankenhauses oder einer Praxis die Entscheidung getroffen werden, überhaupt ein QM-System einzuführen. Ein Grund dafür ist, neben den gesetzlichen Forderungen, der Marktvorteil gegenüber Konkurrenten, da Kunden / Patienten sich stets die beste Behandlung wünschen oder aussuchen. Abgesehen davon sollte jeder den Anspruch an sich selbst haben, die beste medizinische Versorgung anzubieten, welche nur auf der Grundlage guter organisatorischer Bedingungen gewährleistet werden kann.

■ Wahl des QM-Systems

Es gibt verschiedene QM-Modelle bzw. Zertifizierungsverfahren nach denen ein Qualitätsmanagement in einer Abteilung / Organisation eingeführt werden kann. Gesetzlich verpflichtend ist allerdings nur die Einführung eines QM-Systems und nicht das Erlangen eines Zertifikates.

- **Ein Zertifikat ist der Nachweis der erfolgreichen Umsetzung eines QM-Systems. Das Zertifikat erhält man nach einer Zertifizierung, also der Überprüfung des QM-Systems durch einen unparteiischen, externen Beobachter, den sog. Auditor (ISO) oder Visitor (KTQ). Eine Zertifizierung erfolgt nach einem festgelegten**

Das **KTQ-Zertifizierungsverfahren** (KTQ: Kooperation für Transparenz und Qualität im Gesundheitswesen) ist ein Zertifizierungsverfahren für Krankenhäuser, Rehabilitationskliniken und etwas abgewandelt für Praxen. Im Rahmen einer KTQ-Zertifizierung darf nur eine komplette Klinik oder Gesundheitseinrichtung, keine Teilbereiche, zertifiziert werden. Das stellt besonders große Häuser vor eine Herausforderung, zu denen viele kleine Abteilungen gehören. So müsste z. B. bei einer Klinik mit einer angeschlossenen MTRA-Schule auch diese mit zertifiziert werden. Frei nach dem Motto „Alle für einen und einer für alle“. Kann oder will sich eine Abteilung nicht beteiligen, kann auch die Radiologie kein Zertifikat erhalten.

Im Rahmen des Verfahrens werden alle Bereiche eines Krankenhauses anhand eines Fragenkataloges und Punktesystems bewertet. Zunächst hat sich eine Abteilung selbst zu bewerten, im Anschluss erfolgt eine Fremdbewertung durch Visitoren. Das Zertifikat wird ausgestellt, wenn eine Mindestpunktzahl aus dem Fragekatalog und den Bewertungen erreicht wird.

Das Zertifizierungsverfahren nach KTQ ist ein Verfahren, das innerhalb Deutschlands und nicht international angewandt wird.

Eine weitere Möglichkeit eines QM-Systems in einer Radiologie bietet die **ISO 9001:2008** (ISO: Internationale Organisation für Normierung). Dieses international bekannte und anerkannte System bietet für eine Radiologie den Vorteil, dass sich einzelne Abteilungen zertifizieren lassen können, unabhängig vom Gesamtunternehmen. Damit können Abteilungen mit einer ambulanten Ermächtigung (externe Zuweisungen werden durch die Krankenkassen finanziert) eigenständig ihr Qualitätsmanagement transparent machen und ggf. besser Kooperationen schließen.

Ein Zertifikat nach ISO wird nach der Prüfung, dem sog. Zertifizierungsaudit, von externen Auditoren erteilt. Sie begehen die einzelnen Bereiche einer Abteilung und überprüfen, ob die von der Abteilung festgelegten Arbeitsabläufe gesetzeskonform erfolgen und durchgeführt werden.

Die in der ISO vorgegebenen Normen regeln die Grundanforderungen an ein QM-System, die ein Unternehmen erfüllen muss, unabhängig von der Branche. Damit ist die ISO allgemeingültig. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel überwiegend auf dieses QM-System eingegangen.

Der Grundgedanke der ISO ist die stetige Qualitätsverbesserung eines Unternehmens.

Erfahrungsbericht von Katrin

Ich bin als **QMB** in unserer Abteilung Ansprechpartner für alle QM-Belange und in drei Monaten steht die dritte **Rezertifizierung** an. Bis dahin sind noch viele Termine zu koordinieren.

Ich weiß noch, wie alles vor ungefähr 10 Jahren begann. Als unser Chefarzt beschloss, in der Radiologischen Klinik ein QM-System einzuführen, war im gesamten Krankenhaus noch nicht an die Einführung eines QM-Systems für das gesamte Haus (nach KTQ) zu denken. So beschloss er, die Einführung eines QM-Systems nach der damals noch gültigen ISO 9001:2000 für seine Abteilung. Weil wir auch zahlreiche Patienten aus dem Ausland hatten, war von Anfang an klar, dass wir uns von externen Auditoren begutachten lassen wollten, um ein international anerkanntes **Zertifikat** zu erlangen. Wir waren der erste Bereich im Krankenhaus mit Zertifikat und mächtig stolz, schließlich hatten wir fast ein Jahr für die Vorbereitung gebraucht.

Zum Auftakt der „Operation QM“ gab es eine Fortbildung, die von unserem Chef geleitet wurde. Die gesamte Abteilung wurde darüber informiert, warum wir jetzt „plötzlich“ so viel Aufwand für die Einführung eines Qualitätsmanagements betreiben sollen. Anschließend wurden wir alle in das QM-System nach ISO 9001:2000 eingewiesen und in den notwendigen Dokumentationsstrukturen **geschult**. Das war richtig toll, weil wir alle auf dem gleichen Wissensstand waren und „eine gleiche Sprache“ gesprochen haben.

Das Ziel war, unsere festgelegten Standards und Arbeitsabläufe zu strukturieren und zu verbessern, um eine gute **Ergebnisqualität** zu erlangen, also mindestens die gesetzlichen Vorgaben für Qualitätssicherungsmaßnahmen zu erfüllen. Außerdem hatten wir das Gefühl, dass wir mit dem Erhalt eines

Zertifikats „besser“ sein würden als andere Bereiche. Denn wir hatten es dann auch schriftlich, dass wir gut arbeiteten. In den Einführungsprozess des QM-Systems wurden **alle** Mitarbeiter der Abteilung einbezogen. Damit wurde nicht nur jeder aktiv integriert, sondern die **Arbeitszufriedenheit** ist gestiegen, da jeder „gehört“ wurde, egal ob Radiologe, MTRA oder Schreibkraft.

Die Erlangung des Zertifikates war also unser großes **Projekt** in der Abteilung!

Als es nach den Einführungsveranstaltungen richtig losging, haben alle bei der Erarbeitung und dem Zusammentragen der notwendigen Dokumente mitgearbeitet. Es gab eine **QM-Gruppe (Lenkungsausschuss)** in der Abteilung, die sich aus unserem Chef und den verschiedenen Bereichsleitungen (Ärzte / MTRA / Administration / Systemadministration) gebildet hat. Ich war auch dabei, weil ich kurz zuvor meine QMB-Weiterbildung gemacht hatte. Wir haben uns regelmäßig, nach Möglichkeit wöchentlich, getroffen. Am Anfang wurde ein Plan erstellt, in dem wir notwendige Arbeitsschritte mit **Terminfristen** und **verantwortlichen Mitarbeitern** festgelegt haben. Unsere Gruppe hat **kontrolliert bzw. überwacht** (Anm.: das sind Begriffe aus der ISO), ob alles rechtzeitig fertig wurde. Schließlich wollten wir innerhalb eines Jahres unser QM-System soweit aufgebaut und eingeführt haben, dass wir zertifiziert werden können. Diese Überwachung diente nicht der Kontrolle der Kollegen, sondern war eine Hilfestellung, eine Art zusätzlicher Terminkalender und „Prioritätensetzer“ für unser Team. Mancher konnte sich auch auf uns beziehen und Hilfe einfordern, wenn jemand anders sagte „Das kann jetzt warten“. Wir haben unseren Kollegen den Rücken gestärkt.

Neben der QM-Gruppe wurden kleine **Arbeitsgruppen (QM-Zirkel)** gebildet. In ihnen waren wieder Angehörige aller Berufsgruppen unserer Abteilung, die Experten für bestimmte Arbeitsbereiche (z. B. CT, MRT) waren. Jede dieser Gruppen war für die **fristgerechten Arbeitsergebnisse** ihres Bereichs verantwortlich.

Es wurde eine **Bestandsaufnahme** des Aufbaus und des Ablaufs der einzelnen Bereiche durchgeführt und somit der **IST-Zustand** dokumentiert. Vorhandene Listen und Dokumente zusammenge-

tragen und Arbeitsschritte analysiert, also beschrieben, wie wir arbeiten. Dazu gehörte u. a. auch die Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben zur Hygiene oder dem Datenschutz, Arbeitsschutzmaßnahmen und Belehrungen oder die Durchführung von Konstanzprüfungen.

So wurden für alle Arbeitsplätze (konventionelles Röntgen, CT, MR, Angio und Nuklearmedizin) ziemlich schnell die **SOP's und AAW's** zusammengetragen und in einem ersten QM-Handbuch dokumentiert. Dafür mussten wir nicht alles neu „erfinden“. Am CT gab es schon ein sog. „Kochbuch“, in dem alle wichtigen Untersuchungen nachzuschlagen waren. Außerdem hatte fast jeder sein eigenes Heftchen, mit Notizen zu den verschiedenen Untersuchungen. Durch das Sammeln all dieser Informationen haben wir unsere Tricks ausgetauscht und viel voneinander gelernt.

Um unsere Arbeitsweise transparent zu machen, haben wir verschiedene Arbeitsschritte in **Prozessen** festgelegt. Im Sinne des QM sind die Patienten unsere Kunden, möchten freundlich und kompetent behandelt werden und eine zügige Untersuchung bzw. Therapie, mit entsprechender Befundmitteilung für ihren Zuweiser, durchlaufen. Der Weg, den der Patient bei uns „durchläuft“, wird als **Kernprozess** bezeichnet und zentral in unserem QM-System hinterlegt. Es war für uns alle gar nicht so einfach, eine Radiologie (und damit uns selbst) als Dienstleister zu begreifen, der dem Patienten „alles recht machen muss“ oder anders gesagt: für eine hohe **Kundenzufriedenheit** verantwortlich ist.

Während der Arbeit haben wir festgestellt, dass nicht alle Abläufe jedem Mitarbeiter bekannt waren. So fehlte z. B. an einigen Arbeitsplätzen der Hygieneplan, es war unklar welche Reinigung bei welchem Keim durchgeführt wurde oder wir fanden abgelaufene Medikamente und Material, das nicht mehr steril war. Zum Glück haben wir jetzt alles festgelegt und einheitliche Listen für Medikamenten- und Materialkontrollen. Wir haben nun unseren **SOLL-Zustand** erreicht.

Außerdem wurde ein sog. **Organigramm** erstellt. Aus diesem geht hervor, wer Ansprechpartner für welchen Bereich und wer wem weisungsbefugt ist.

Jetzt steht alles in unserem **QM-Handbuch**, das nicht mehr wegzudenken ist. Da in einer Radio-

logie ein Großteil der Arbeit an einem Computer stattfindet, haben wir uns dafür entschieden, das QM-Handbuch online im Intranet zu hinterlegen. Damit hat jeder Mitarbeiter an jedem Arbeitsplatz die Möglichkeit schnell und unkompliziert etwas nachzulesen.

➤ **Das QM-Handbuch ist eine Voraussetzung, um ein Zertifikat nach ISO zu erhalten.**

Es kann sowohl digital, als auch in Papierform vorliegen.

Das QM-Handbuch enthält alle Informationen, wie eine Abteilung aufgebaut ist und funktioniert. Dazu gehören, neben den Prozessbeschreibungen, Formularen, SOP und AAW, auch Angaben zu gesetzlichen Grundlagen, Zuständigkeiten, Mitarbeiterförderung usw.

Unsere neuen Kollegen waren erfreut, alles direkt nachschauen zu können und nicht wieder ein Heft mit Notizen in der Tasche zu haben. Außerdem war die Einarbeitungszeit kürzer als bei mir, als ich in der Abteilung angefangen habe.

Bevor nun die **externen Auditoren** das erste **Zertifizierungsaudit** bei uns durchgeführt konnten, haben wir mit der QM-Gruppe ein **internes Audit** durchgeführt. Bei einem internen Audit machen wir das gleiche wie die externen Auditoren: wir gehen an die Arbeitsplätze, überprüfen unsere Arbeitsschritte und kontrollieren, ob unsere Dokumentation im Handbuch mit unseren Beobachtungen übereinstimmt. Für uns war es eine Selbstkontrolle vor dem Zertifizierungsaudit.

Interne Audits werden regelmäßig und unabhängig von einem externen Audit durchgeführt. Gerade in einer Radiologie, in der häufig neue Untersuchungen oder Grenzwerte für den Strahlenschutz eingeführt werden, muss eine regelmäßige Überprüfung der Aktualität der eigenen Arbeit stattfinden.

Endlich konnte das Zertifizierungsaudit stattfinden – wir waren bereit (und aufgeregt).

Die Zusammenarbeit mit den beiden Auditoren der Zertifizierungsgesellschaft war sehr angenehm, da die Befragungen eher kollegialen Gesprächen auf Augenhöhe glichen. Am Ende des zweiten Tages, nachdem sie alle Bereiche besichtigt, Mitarbeiter befragt, die Dokumentation im Handbuch kontrolliert hatten, gab es ein Abschlussgespräch, an dem jeder

Kollege teilnehmen konnte. Die Auditoren haben uns das Gefühl gegeben, etwas Großes geleistet zu haben. Außerdem gaben sie uns Tipps und Anregungen für weitere Verbesserungen.

Am Ende haben sie uns das Ergebnis mitgeteilt: wir besitzen ein funktionierendes QM-System nach den Vorgaben der ISO 9001:2000 und dürfen für die nächsten drei Jahre das Zertifikat führen.

In den folgenden zwei Jahren würden Kontrollaudits stattfinden, die nicht ganz so umfangreich sein würden wie die Zertifizierungsaudits und im dritten Jahr würde sog. die erste Rezertifizierung stattfinden.

Wir waren alle mächtig stolz – der erste zertifizierte Bereich in unserer Klinik!

Aber: Nach dem Audit ist vor dem Audit!

Es reicht nicht, Neuerungen einzuführen und umzusetzen. Qualitätsmanagement „lebt“ davon, sich zu hinterfragen, wie es der PDCA-Zyklus vorsieht. Wir prüfen immer wieder, ob wir unsere Ergebnisqualität, also Leistungs- bzw. Untersuchungsqualität, steigern können. Die stetige Verbesserung ist der Grundgedanke im QM-System.

Dafür eignen sich z. B. Patienten- und Zuweiserbefragungen, die wir in den letzten Jahren mehrfach durchgeführt haben. Auch aus den internen Audits erarbeiten wir immer wieder jede Menge Verbesserungspotential.

Es hängt u. a. auch von den eigenen Ansprüchen ab, wie hoch der personelle Aufwand ist, mit dem QM betrieben wird. So gibt es mittlerweile nach 10 Jahren ein QM-Team von vier Personen, die sich neben der alltäglichen Arbeit mit dem QM-System befassen. Wir treffen uns regelmäßig und besprechen das weitere Vorgehen. Je nach Bereich und Handlungsbedarf werden weitere Kollegen hinzugezogen.

Jetzt werden wir schon zum dritten Mal rezertifiziert. Es ist immer wieder aufregend, wenn wir von externen Auditoren besucht werden. Jedes Mal fragen wir uns „Gibt es etwas was wir übersehen haben?“, „Wo sehen Außenstehende Verbesserungspotential?“, „Was für Tipps werden uns die Auditoren diesmal geben ...?“, „Haben wir alles klar kommuniziert?“.

Darüber hinaus wird die ISO regelmäßig überarbeitet, wodurch sich auch die Anforderungen an unser QM-System ändern können.

Trotz aller Aufregung möchte niemand mehr unser QM-System missen. Wir haben klare Strukturen, Standards und Verantwortlichkeiten. Der Aufwand hat sich gelohnt. Nach dem anfänglich sehr hohem Arbeitsaufwand im Rahmen der Einführung des QM-Systems, dient es inzwischen der Arbeitserleichterung und der effizienteren Gestaltung der Arbeitsabläufe. Jeder kennt die einzelnen Arbeitsschritte und die Organisation der Abteilung.

In Kürze

- Für MTRA spielen qualitätssichernde Maßnahmen eine große Rolle im Arbeitsalltag. Entsprechend ihrer Ausbildung sind MTRA dazu befähigt, Konstanzprüfungen und qualitätssichernde Maßnahmen in der Dosimetrie und dem Strahlenschutz durchzuführen.
- Neben der gesetzlichen Verpflichtung der Durchführung qualitätssichernder Maßnahmen an Geräten mit ionisierender Strahlung, muss in allen medizinischen Einrichtungen Qualitätsmanagement betrieben werden, um die Arbeit auf dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik gewährleisten zu können. Dafür existieren verschieden QM-Systeme und Möglichkeiten der Umsetzung.
- Zusätzlich spielen für MTRA-Maßnahmen, durch die Digitalisierung der Arbeitswelt und Einführung von RIS- und PACS-Systemen, zur Gewährleistung des Datenschutzes eine große Rolle. Auch hier haben Berufsangehörige entsprechende Maßnahmen umzusetzen.

Literatur

- Arbeitskreis „Qualitätssicherung in der Strahlentherapie der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik e. V. (1998): „Leitlinien in der Radioonkologie – Konstanzprüfungen an Therapiesimulatoren, Online 27.3.1
- Ertl-Wagner B, Steinbrucker S, Wagner BC (2009) Qualitätsmanagement und Zertifizierung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Fachhochschule Köln: „PAS 1054 – die wesentlichen Inhalte“, 28.3.14

- Gaede J. Fehlerquellen bei der Messung der Ausbeute, online 13.3.14
- Geworski E et al (2009) Empfehlungen zur Qualitätskontrolle in der Nuklearmedizin. Schattauer, Stuttgart New York
- Johannes H, Wölker T (2012) Arbeitshandbuch Qualitätsmanagement, 2. Aufl. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Kirchner H (2004) Qualitätsmanagement für stationäre Pflegeeinrichtungen
- Lipfert C (2008) Die neue DIN 6868-4. in MTA-Dialog 4. Jahrgang 9, Online 27.3.14
- Ohmstede A. Unterrichtsskript Nuklearmedizin, Zugriff 14.4.14
- Ringler R. Qualitätssicherung in der Nuklearmedizin, online, 08.04.2014
- Röntgenverordnung Stand 10/2011, Bundesamt für Strahlenschutz, Online 27.3.14
- Strahlenschutzkommission (2010) Physikalisch-technische Qualitätssicherung in der Strahlentherapie – Vorschläge zur Überprüfung des gesamten Behandlungssystems
- Strahlenschutzverordnung, Stand 2012 in Gesetze im Netz, Online 28.3.14
- Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin (2011), Online 25.4.14

Im Beruf

T. Hartmann, K. Kara, C. Vockelmann

25.1 Lebenslanges Lernen – 608

25.2 Karriereplanung und alternative Berufsfelder – 610

25.3 Wissenschaftliches Arbeiten – 612

25.3.1 Notwendigkeit und Definition – 613

25.3.2 Grundlagen der Evidenz-basierten Praxis – 614

25.3.3 Diagnostische Genauigkeitsstudien – 616

25.4 Arbeits- und Tarifrecht – 618

25.4.1 Arbeitsrecht – 618

25.4.2 Tarifrecht – 622

25.5 Extremsituationen – 624

25.5.1 Polytrauma – 624

25.5.2 Anaphylaktoide Reaktion – 624

25.5.3 CT-gesteuerte Punktion – 624

25.5.4 Krampfanfall während Stentangioplastie – 625

25.5.5 CT-gesteuerte virtuelle Autopsie/Post-mortem CT – 625

Literatur – 627

Karola ist jetzt 35 Jahre alt und seit 12 Jahren in einem mittelgroßen Krankenhaus in der Radiologie tätig. In den ersten beiden Berufsjahren war sie damit beschäftigt, sich in alle Bereiche einzuarbeiten und Berufserfahrung zu bekommen. Dabei hat sie festgestellt, dass sie besonders gern am CT arbeitet. Aber auch die anderen Bereiche mag sie und durch das Rotationssystem bleibt sie auch überall fit. Jeden Monat arbeitet sie an einem anderen Arbeitsplatz und bekommt so immer alle Veränderungen mit.

Zwischendurch war sie zwei Jahre in Elternzeit. Als sie vor zwei Jahren zurück in die Klinik kam hatte sie gestaunt, wie viel sich verändert hatte. Ein neuer MR-Tomograph war angeschafft worden, die Versorgung der Polytraumen hatte sich vom konventionellen Röntgen vollständig an das CT verlagert und in der Angiographie wurden nur noch Interventionen durchgeführt. Die gute alte Durchleuchtung schien nahezu „ausgestorben“ zu sein und in der Mammographie wurde mit einem Zusatztool für die Stereotaxie gearbeitet.

Heute wirkt sie nicht so ganz bei der Sache, da viele Gedanken in ihrem Kopf herumschwirren.

Schon wieder stehen Veränderungen an. Ein neuer Computertomograf soll aufgestellt werden und der Chefarzt möchte ein neuroradiologisches Zentrum aufbauen. Sie ist froh darüber, dass sie vor drei Wochen bei der CT-Fortbildung war, auch wenn sie nicht alles sofort verstanden hat. Da wurden verschiedene Studien vorgestellt, in denen untersucht worden war, welche Verfahren bei den verschiedensten Erkrankungen zu bevorzugen sind. Mal sehen, was davon den Weg in die alltägliche Praxis findet. Da gibt es ja ständig neue Ergebnisse und nicht jeder Studie darf man einfach so trauen.

Gestern Abend hat ihr Mann auch noch erzählt, dass er ein tolles Jobangebot aus einer Großstadt hat, und sie denken ernsthaft darüber nach, den Wohnort zu wechseln. Der Zeitpunkt ist günstig, bevor ihr Sohn in die Schule kommt.

Für Karola heißt das wieder Lernen und sich neu in ein Team einfinden. Vielleicht sollte sie jetzt ihren ursprünglichen Traum wahr machen und in die Wirtschaft gehen. Dort werden doch immer Applikationsspezialisten gesucht. Das wäre zwar eine Reisetätigkeit, aber ihr Mann wird überwiegend von zu Hause aus arbeiten können. Oder sie geht in den Schuldienst – das Anleiten der MTRA-Schüler hat ihr immer Spaß gemacht. Außerdem hätte sie dann keine Dienste mehr und

könnte in den Ferien Urlaub machen. Ob man dafür spezielle Fortbildungen braucht?

Bevor sie sich weiter in ihren Gedanken verlieren kann, ruft ihre Kollegin um Hilfe – bei dem Patienten auf dem CT-Tisch zeigt sich ein Kontrastmittelzwischenfall!

25.1 Lebenslanges Lernen

T. Hartmann

Lebenslanges Lernen spielt in der heutigen Gesellschaft eine zentrale Rolle in allen Berufen. Geprägt wurde der Begriff bereits 1962 in Dokumenten einer damaligen UNESCO-Konferenz. Dabei ging es damals weniger um den politischen Gedanken, sondern darum, Menschen das Lernen und damit die Selbstbestimmung über das gesamte Leben hinweg zu ermöglichen.

Im deutschsprachigen Raum ist man sich einig, dass eine Berufsausbildung nicht mehr genügt, um während des gesamten Berufslebens „fit for job“ zu bleiben. Besonders in den technischen Berufen ist das zu spüren. So werden in einer Radiologie alle paar Jahre neue Geräte angeschafft, neue Software aufgespielt und wissenschaftliche Erkenntnisse in die Berufspraxis umgesetzt.

Während Anfang der 2000er Jahre Röntgenfilme noch in vielen Kliniken zu finden waren, muss man dafür heute schon fast ins Museum gehen. In der MTRA-Ausbildung spielt die konventionelle Bildentwicklung keine Rolle mehr.

Der Wille zum Lernen entscheidet über die Karriereplanung und den Verdienst. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ist der Meinung, dass das lebenslange bzw. lebensbegleitende Lernen entscheidend ist für den Erfolg der Wirtschaft und die Zukunft der Gesellschaft und Bildung zu den wichtigsten Ressourcen einer Gesellschaft gehört.

In der modernen Definition des Lernens geht man nicht länger von **einer** Lebensphase des Lernens aus (Schule, Ausbildung), die mit dem Eintritt in das Berufsleben abgeschlossen ist. Lernen geschieht immer und überall – entweder formell (in Bildungseinrichtungen), non-formal (z. B. gesteuert am Arbeitsplatz während der Einarbeitung) oder informell (Erfahrungslernen „nebenbei“).

MTRA werden „gezwungen“ ständig zu lernen. Alle fünf Jahre müssen sie an den Aktualisierungskursen für die Fachkunde im Strahlenschutz teilnehmen, und die Veränderungen im Berufsfeld kann man auch nur bewältigen, wenn man immer bereit ist, Neues zu lernen.

Die Bereitschaft an Fort- und Weiterbildungen teilzunehmen dient aber nicht nur der Berufszufriedenheit durch Wissenserweiterung, sondern auch der Steigerung des eigenen Marktwertes.

Hinzu kommen Kongresse und Weiterbildungen. Arbeitgeber sind i. d. R. daran interessiert, dass sich ihre Mitarbeiter weiterbilden und genehmigen, je nach Bedarf der Abteilung, Bildungstage. Hinzu kommen politische Maßnahmen wie der Bildungsurlaub.

■ Weiterbildung

Weiterbildungsangebote dienen der Vertiefung oder Erweiterung von Fachwissen im Beruf, i. d. R. in Form von Seminaren oder Workshops. Müssen innerhalb einer Abteilung viele Mitarbeiter geschult werden (z. B. nach Einführung eines neuen Gerätes), kann man auch Inhouse-Schulungen veranstalten. In diesem Fall kommt der Dozent/Referent/Trainer in die Abteilung und schult direkt am Gerät.

Im ärztlichen Bereich wird der Ausbildungsabschnitt nach dem Studium bis zur Facharztprüfung als Weiterbildung bezeichnet. Man spricht in diesem Fall auch von Weiterbildungsassistenten. Die Facharztausbildung für Radiologen dauert fünf Jahre.

Im Anschluss besteht dann noch die Möglichkeit zusätzliche Qualifikationen, z. B. als Kinderradiologe oder Neuroradiologe zu erwerben. Auch diese gehören zum Themenkreis der Weiterbildungen.

■ Fortbildung

Fortbildungen dienen ebenfalls der Erweiterung beruflicher Qualifikationen und enden in den meisten Fällen mit einer Prüfung. Zu diesen Fortbildungen gehören z. B. Kurse für Leitende MTRA, Lehrbefähigungen usw.

Im beruflichen Alltag werden die Begriffe Fort- und Weiterbildungen fälschlicherweise meist synonym verwendet.

Da für die MTA-Berufe das Berufsbildungsgesetz (BBiG) nicht zuständig ist und Fortbildungen nicht staatlich anerkannt sind (wie z. B. die Ausbilderanerkennung im Handwerk), hat die synonyme Verwendung der Begrifflichkeiten nur wenig Auswirkung auf die Aufstiegschancen im Beruf. Wichtiger ist der Nachweis der Qualifikationen im Lebenslauf.

Ärzte sind „gezwungen“, sich jedes Jahr fortzubilden und müssen mittels Fortbildungspunkten bei der zuständigen Ärztekammer nachweisen, dass sie an entsprechenden Veranstaltungen teilgenommen haben.

Für MTRA besteht lediglich die gesetzliche Pflicht, alle fünf Jahre die Fachkunde im Strahlenschutz aufzufrischen.

■ Bildungsurlaub

Darunter versteht man den gesetzlichen Anspruch auf Weiterbildung während der Arbeitszeit, also ohne Gehaltseinbußen. Arbeitnehmer und Arbeitgeber teilen sich die Kosten, indem ein Arbeitnehmer die Kursgebühr und der Arbeitgeber den Lohnausgleich bezahlen.

In der Bundesrepublik ist Bildung Ländersache und so regeln die Bundesländer in eigenen Bildungsurlaubsgesetzen den Anspruch.

Bildungsurlaub muss sich nicht auf fachliche Inhalte beziehen, es können auch Sprachreisen o. ä. in Anspruch genommen werden. Was welches Bundesland anbietet oder anerkennt, muss individuell erfragt werden.

■ Studium

Das Thema der Akademisierung spielt seit einigen Jahren eine immer größere Rolle für die nichtärztlichen Gesundheitsfachberufe. In den meisten europäischen Ländern ist die MTRA-Ausbildung (dort: Radiographen, Radiologietechnologen o. ä.) an Fachhochschulen oder Universitäten angesiedelt. Dort erwerben die Studierenden den ersten akademischen Grad, den sog. „Bachelor of“ (Abschluss mit den Schwerpunkten in den Naturwissenschaften).

Die Bachelorabschlüsse wurden im gesamten europäischen Raum eingeführt, um die Studienabschlüsse vergleichbar zu machen. Auf diesen ersten akademischen Grad, der die allgemeine Berufsqua-

likation darstellt, kann man einen Master aufbauen und sogar promovieren.

Für einige Gesundheitsfachberufe gibt es, im Rahmen der sog. Modellklausel, die Möglichkeit der grundständigen Akademisierung. Damit sind die Auszubildenden gleichzeitig Studierende und absolvieren den theoretischen Teil der Ausbildung an einer Fachhochschule. Aktuell existieren diese Studiengänge für die Pflegeberufe, die Therapieberufe (Physio-, Ergotherapie, Logopädie) und die Hebammen.

Die medizinisch-technischen Berufe sind in der Modellklausel nicht berücksichtigt worden. Trotzdem etablieren sich zunehmend berufsbegleitende Studiengänge, die sich explizit an ausgebildete MTRA richten. Die Empfehlung, auch in den MTA-Berufen Studiengänge einzuführen, findet man in Gutachten und den Veröffentlichungen des Wissenschaftsrates. Es wird davon ausgegangen, dass man für bestimmte Aufgabenbereiche (Lehre, Forschung, Leitung) zukünftig eine akademische Ausbildung benötigt.

► **Der Dachverband der Technologen/innen und Analytiker/innen in der Medizin Deutschland e.V. (DVTA e.V.) proklamiert das Ziel der grundständigen Akademisierung für die MTA-Berufe bis zum Jahr 2023.**

Da es sich bei diesen um sog. Add-on Studiengänge handelt, und damit um Studierende, die bereits eine Berufsausbildung besitzen, sind sie i. d. R. gebührenpflichtig und werden meist an privaten Fachhochschulen angeboten.

Insgesamt gibt es in Deutschland mehr als 16.000 Studiengänge. Die inhaltliche Gestaltung der Studiengänge liegt ausschließlich im Verantwortungsbereich der Hochschulen, sodass sich die angebotenen Studiengänge erheblich voneinander unterscheiden können.

Bei der Auswahl eines Studienganges sollte man sich im Vorfeld die Inhalte genau anschauen und überlegen, in welche Richtung (technische Spezialisierung, Lehre, Leitung, Forschung) man sich weiterbilden möchte.

Übrigens kann man in vielen Bundesländern auch ohne Abitur studieren, wenn man eine Berufsausbildung und zwei bis drei Jahre Berufserfahrung

vorweisen kann. In welchen Bundesländern das möglich ist, erfährt man in den Hochschulgesetzen des jeweiligen Landes oder bei der Studienberatung der einzelnen Hochschulen.

In Kürze

- Die Bereitschaft sich (berufs-)lebenslang zu bilden und zu lernen ist elementar für alle MTRA, um den gesetzlichen Forderungen nach der Arbeit auf dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik gerecht werden zu können.
- Dabei spielen nicht nur informelle Bildungsmaßnahmen eine große Rolle. Eine bedeutende Rolle nimmt das Erfahrungslernen im Beruf ein.
- Die Unterstützung der Fort- und Weiterbildung innerhalb der Arbeitszeit ist sogar im Tarifvertrag für den öffentlichen Dienst (abhängig vom Bedarf des Mitarbeiters) vorgeschrieben.

25.2 Karriereplanung und alternative Berufsfelder

T. Hartmann

Gemeinhin wird der MTRA-Beruf als Sackgassenberuf bezeichnet, in dem aktuell kaum Aufstiegschancen bestehen. Betrachtet man das Angebot an staatlich anerkannten Fort- und Weiterbildungen oder gar eine akademische Laufbahn trifft das meist zu. Andererseits bestehen für MTRA auch Arbeitschancen in anderen Bereichen oder Aufstiegschancen im eigenen Beruf, von denen hier exemplarisch einige beleuchtet werden. Auch das Thema der akademischen Weiterbildung gewinnt zunehmend an Bedeutung.

■ Leitende MTRA

Stefanie ist 53 Jahre alt und leitende MTRA in der radiologischen Abteilung eines großen Unfallkrankenhauses.

Ursprünglich hatte sie nach der Schule eine Ausbildung zur medizinisch-kaufmännischen Assisten-

tin gemacht und in einer Ambulanz gearbeitet. Dort hat sie immer die „Röntgenmädel“ bei ihrer Arbeit beobachtet, das als spannend empfunden und die Ausbildung zur MTRA auch noch absolviert.

Nach fünf Jahren in einer Kinderradiologie wurde Stefanie in ihrer Abteilung zur leitenden Assistentin „berufen“ und hat diesen Posten dort sechs Jahre ausgefüllt. In dieser Zeit hat sie sich intensiv in den Bereich der MRT eingearbeitet, Vorträge auf Kongressen gehalten und einen Medizinphysikexperten bei der Erstellung seiner Diplomarbeit unterstützt, indem sie mit ihm gemeinsam Messreihen durchgeführt hat, um die Strahlenbelastung bei Kindern so gering wie möglich zu halten.

Irgendwann hat Stefanie beschlossen, den Wohnort zu wechseln und hat sich gleich gezielt auf den Leitungsposten in „ihrer“ jetzigen Klinik beworben. Nach fünf Jahren in dem neuen Job hat sie einen sog. Leitungskurs absolviert, der auf die zunehmenden Aufgaben für leitende MTA abgestimmt war. Dieser Qualifikation folgte 2012 die zur Qualitätsmanagementbeauftragten.

Parallel dazu hat sich Stefanie in den Aufbau und die Betreuung teleradiologisch angebundener Krankenhäuser eingearbeitet und teilt ihr Wissen nach wie vor auf Kongressen mit interessierten Kollegen/innen.

Aktuell unterstehen Stefanie ca. 40 MTRA. Sie trägt die Verantwortung für Dienstpläne, Urlaube, Neueinstellungen etc., betreut noch immer die teleradiologischen Außenhäuser, hat sich intensiv in die datentechnische Vernetzung zwischen den Krankenhäusern eingearbeitet und betreut das radiologische Informationssystem und das digitale Archiv. Sie bereitet ihre Abteilung auf die Einführung eines QM-Systems mit anschließender Zertifizierung vor und engagiert sich im Berufsverband, wenn dann noch Zeit ist.

■ Qualitätsmanagementbeauftragte/r

Petra ist seit 28 Jahren MTRA. Nach der Ausbildung hat sie sowohl in der Nuklearmedizin als auch in der radiologischen Diagnostik gearbeitet.

Als in der Klinik ein Qualitätsmanagementsystem eingeführt werden sollte, bot man ihr an, eine Fortbildung zur Qualitätsmanagementbeauftragten zu machen. Petra hat zugegriffen und den Lehrgang erfolgreich absolviert.

Jetzt ist sie für die Umsetzung des QM-Systems in ihrer Klinik mit verantwortlich, arbeitet auf Augenhöhe mit ihrem leitenden MTRA und den Ärzten, wird als Experte zu Arbeitsgruppen in der Klinik eingeladen und ist maßgeblich an der erfolgreichen Zertifizierung ihrer Abteilung beteiligt.

Um die ganzen Aufgaben zu bewältigen, ist sie nur noch selten an den Arbeitsplätzen in der Routine eingeteilt. Trotzdem leistete sie nach wie vor ihre Dienste und ist froh darüber, denn so behält sie den Überblick über alle Arbeitsplätze.

■ Diplom-Medizinpädagogik/Master of Education

Tina ist 38 Jahre alt und hat eine Ausbildung zur MTRA absolviert. Nach einigen Jahren in der Klinik hat sie sich entschlossen, an einer „Schule der besonderen Art“, an der auch MTRA ausgebildet werden, eine Stelle als Lehrkraft anzunehmen.

Die Fortbildung zum („kleinen“) Medizinpädagogen in 1000 Stunden hat Tina gar nicht in Erwägung gezogen, da in ihrem Bundesland diese Fortbildung nicht anerkannt ist. Außerdem wäre sie danach auf die MTRA-Ausbildung fixiert gewesen und hätte nicht in anderen Bereichen unterrichten können.

An der Schule, an der sie zu diesem Zeitpunkt arbeitete, durfte sie „nur“ den praktischen Unterricht übernehmen, für alles andere benötigte sie ein Studium. Dabei wollte sie doch nie studieren...

Letztendlich hat sich Tina doch für ein berufsbegleitendes Studium an einer Universität entschieden. Zu diesem Zeitpunkt wurde an der Universität noch der Studiengang Diplom-Medizinpädagogik angeboten, ein „Misch“studiengang mit medizinischen Inhalten, Pädagogik, Sozial- und Erziehungswissenschaften – elf Semester in 5,5 Jahren

Nach dem erfolgreichen Studium arbeitet sie nun an einer beruflichen Schule, an der verschiedene Gesundheitsfachberufe ausgebildet werden. Durch ihr Studium darf Tina in den verschiedensten Fachrichtungen, z. B. Anatomie, unterrichten. Praktische Prüfungen darf sie aber „nur“ bei den MTRA abnehmen, da dafür immer die Ausbildung in dem Grundberuf gefordert ist. Allerdings darf sie nach dem Gesundheits- und Krankenpflegegesetz von 2004 sogar den Arzt in der mündlichen Abschlussprüfung ersetzen.

Inzwischen leitet sie den Ausbildungsgang MTRA an einer großen Schule für Gesundheitsfachberufe, gibt zusätzlich Seminare für Lehrende in der MTA-Ausbildung sowie Praxisanleiter und kann sich keinen besseren Beruf vorstellen.

■ Applikationsspezialist

Claudia ist 36 Jahre alt und hat eine berufliche „Bastelbiographie“. MTRA ist sie auf dem zweiten Bildungsweg durch eine Umschulung geworden. Nach ihrer Ausbildung hat sie sich sofort bei einer Medizinfirma beworben, die neben CT und MRT auch Ultraschallgeräte vertreibt. Sie war selbst überrascht, dass man sie sofort für den Job angenommen hat, schließlich hatte sie keine Berufserfahrung vorzuweisen. Der Firma hat ihr Auftreten und ihre Sprachkenntnisse (Englisch und Spanisch) gefallen, den Rest könne man lernen.

Nach intensiven Schulungen in England, Brasilien und den USA und jeder Menge „Hausaufgaben“ ist sie in ihrem Job angekommen. Für Claudia bedeutet das, Gynäkologen in die Handhabung der speziellen Ultraschallgeräte einzuweisen, meist direkt an den Patientinnen in der klinischen Praxis. Die ungewohnte Reisetätigkeit gefällt ihr gut. Ist auch halb so schlimm, da sie für die Inhouse-Schulungen in den Krankenhäusern ein festes Einzugsgebiet hat und nur selten über mehrere Tage verreisen muss.

Für den Verkauf sind andere Kollegen zuständig, sie selbst betreut nur gelegentlich den Messestand auf Kongressen.

■ Arbeiten im Land der Queen

Stefan ist 28 und seit 6 Jahren MTRA. Nach der Ausbildung hat er zunächst in einer Klinik gearbeitet. Doch nach drei Jahren hat ihn das Fernweh gepackt und er wollte im Ausland arbeiten. Da er fließend Englisch spricht und ihm die Insel gut gefällt, probiert er sein Glück in Großbritannien.

Nach der Anerkennung seiner Ausbildung durch den National Health Service (NHS), der staatlichen Gesundheitsorganisation in Großbritannien, bekommt er eine Zulassung für zwei Jahre. Und auch die Arbeitsvermittlung funktioniert über den NHS. Stefan musste nur angeben, was er besonders gut kann und an welchen Geräten er bereits eingearbeitet ist, über welchen Zeitraum und in welcher Region er gern arbeiten möchte.

Über mehrere Monate tingelt er so durch Schottland, arbeitet in verschiedenen Kliniken und lernt viel über Land und Leute. In manchen Städten bleibt er drei Monate, in anderen nur sechs Wochen.

Als er das letzte Mal in Deutschland war, hat er seine Traumfrau kennengelernt und möchte nun seinen Lebensmittelpunkt wieder in die Heimat verlegen. Aber für ein paar Wochen „Urlaub“ im Jahr möchte er auch zukünftig weiter in Großbritannien arbeiten.

In Kürze

- Für MTRA bestehen zahlreiche Möglichkeiten, sich weiter zu qualifizieren. Neben den Fortbildungsangeboten im Beruf selbst können MTRA auch studieren, wobei die meisten Angebote bislang noch „aus dem Beruf hinaus“ führen. Aktuell gibt es Bestrebungen verschiedener Fachhochschulen, Studiengänge speziell für MTRA einzurichten.
- Informationen zu Qualifikationsmöglichkeiten erhält man z. B. über die Berufsverbände.
- Aktuell werden viele MTRA gesucht und man spricht bereits von einem Fachkräftemangel.
- Durch die hohe Nachfrage auf dem Arbeitsmarkt sind die Entwicklungs- und Karrieremöglichkeiten auch für Berufsanfänger gut.
- Die Berufsaussichten sind gesamt betrachtet positiv (■ Abb. 25.1).

25.3 Wissenschaftliches Arbeiten

T. Hartmann

Wissenschaftliches Arbeiten nimmt in den MTA-Berufen eine zunehmend wichtigere Rolle ein, da MTRA auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse agieren und nicht selten selbst als ausführende Untersucher an wissenschaftlichen Studien beteiligt sind.

Immer mehr medizinisches Fachwissen steht zur Verfügung und muss zum Nutzen der Patienten in den klinischen Alltag implementiert werden.



■ Abb. 25.1 Berufsaussichten MTRA. (Mit freundlicher Genehmigung des DVTA)

Aus diesem Grund sollten auch MTRA ein Grundverständnis für evidenz-basiertes Handeln haben, um ihre Tätigkeiten begründen und ggf. Kollegen/-innen beraten zu können.

25.3.1 Notwendigkeit und Definition

■ Wissenschaftswissen versus Alltagswissen

Alltagswissen macht einen Teil der Berufserfahrung aus. Kollegen haben Tricks und Tipps, die man als gut betrachtet und anwendet. Meist wird das nicht hinterfragt, Hauptsache es funktioniert. Nicht selten werden die „Entdeckungen“ zufällig gemacht und nicht auf der Grundlage einer gezielten Fragestellung oder einer Forschungsmethode. Die Weitergabe des Wissens erfolgt oft mündlich.

Wissenschaftliches Wissen bezeichnet man als strukturiertes und systematisches Wissen. Mit der Hilfe von anerkannten Forschungsmethoden werden gestellte Fragen beantwortet und i. d. R. in schriftlicher Form mit einer alltagsfernen Sprache

verbreitet. Die Forscher hinterfragen ihre Ergebnisse kritisch und sind dazu angehalten, mögliche Fehler oder Verzerrungen, die nicht immer vermeidbar sind, in ihre Betrachtungen einzubeziehen.

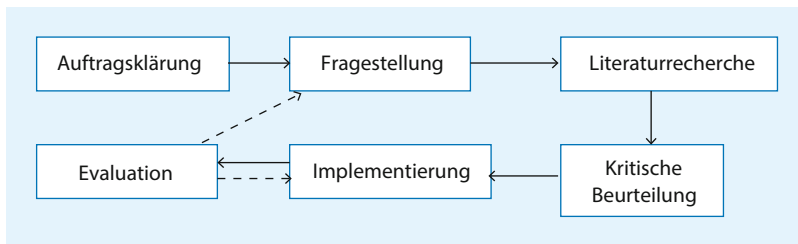
■ Evidenz-basierte Praxis (EbP)

Unter EbP versteht man die Anwendung von systematisch erworbenem Wissen im beruflichen Alltag. Evidence (engl.) bedeutet in diesem Zusammenhang intersubjektiv nachprüfbares Wissen.

Die derzeit besten wissenschaftlichen Belege sollen angewendet werden unter Einbeziehung von:

- Berufserfahrung,
- Vorstellungen der Patienten,
- vorhandenen Ressourcen (ökonomisch und ökologisch),
- moralisch-ethischen Überlegungen,
- externen Anreizen.

➤ Allgemein wird unterschieden zwischen **externer Evidenz** (Wissen aus medizinischen



■ **Abb. 25.2** Evidenz-basierter Prozess

Studien/Forschungsarbeiten) und interner Evidenz (bewährtes Erfahrungswissen).

Ziel ist es also nicht, „Schulbuchwissen“ abzuarbeiten, sondern alle beeinflussenden Aspekte zu betrachten und „lieb gewordene Selbstverständlichkeiten“ bei der Entscheidungsfindung zu hinterfragen.

Das betrifft nicht nur die Auswahl eines diagnostischen Verfahrens, sondern auch die Durchführung, z. B. die Frage, ob man durch eine bessere Aufklärung und Anleitung der Patienten zur Untersuchung die Ergebnisse verbessern kann.

■ Notwendigkeit

Das deutsche Gesundheitswesen steht aktuell vor vielen Herausforderungen. Die Gesellschaft altert, die Anzahl der Mehrfacherkrankten (Multimorbidität) nimmt zu, die Kosten für die gesundheitliche Versorgung steigen und täglich gibt es weltweit neue medizinische Erkenntnisse.

In Deutschland sind Krankenkassen und Leistungserbringer dazu verpflichtet, eine „bedarfsgerechte und gleichmäßige, dem allgemein anerkannten Stand der medizinischen Erkenntnisse“ entsprechende Versorgung zu gewährleisten (§ 70, SGB V). Darüber hinaus ist die zweckmäßige und ausreichende Versorgung zu sichern. Also nicht alles, was geht, wird bezahlt, sondern nur das, was der Patient wirklich braucht.

Evidenzbasierte Medizin hat vor diesem Hintergrund die Aufgabe, die Patientenversorgung zu verbessern und dabei die Nützlichkeit und die Zweckmäßigkeit medizinischer Verfahren zu berücksichtigen. Das gilt in erster Linie für therapeutische Verfahren, gewinnt aber auch in diagnostischen Bereichen zunehmend an Bedeutung.

Angehörige eines Gesundheitsfachberufes sind damit ebenfalls verpflichtet, nach dem neuesten

Stand von Wissenschaft und Technik zu arbeiten und aktuelle Erkenntnisse umzusetzen. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, müssen MTRA in der Lage sein, aktuelles Fachwissen zu finden und für ihren beruflichen Alltag zu bewerten. Darüber berufen sich in vielen Fortbildungsveranstaltungen die Dozenten auf medizinische Studien. Und wer möchte nicht verstehen, wovon „der da vorn“ redet?

25.3.2 Grundlagen der Evidenz-basierten Praxis

■ Evidenz-basierte Praxis als Prozess

Der Begriff des Prozesses ist bereits aus dem Qualitätsmanagement bekannt (► Kap. 24) und kann auch auf die evidenz-basierte Praxis angewendet werden.

Am Anfang steht ein Auftrag bzw. eine **Aufgabenstellung**, mit deren Hilfe man überhaupt einen Bedarf definiert. Im Rahmen der EbP gehört dazu, ein Problem zu identifizieren und die möglichen Verantwortlichkeiten und Interessen festzulegen. Nicht immer betrifft die Einführung einer neuen Untersuchungsmethode das Handlungsfeld der MTRA.

So eine Aufgabenstellung kann z. B. sein, Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenbelastung bei bestimmten Untersuchungen zu finden, ohne dass die diagnostische Qualität leidet.

In einem zweiten Schritt wird eine möglichst genaue **Fragestellung** definiert, z. B. um wie viel Prozent ist die Strahlenbelastung bei einer bestimmten Untersuchung reduzierbar, wenn man die Röhrenspannung von 120 kV auf 100 kV senkt?

Danach folgt eine **Literaturrecherche** in der Fachliteratur und medizinischen Datenbanken. Dafür werden Suchbegriffe benötigt, die aus der Fragestellung abgeleitet werden.

➤ **Die Wissenschaftssprache ist Englisch und so müssen auch die Suchbegriffe ins Englische übersetzt werden.**

Hat man die Literatur gefunden, muss diese **kritisch beurteilt** werden. Wie gut sind die Ergebnisse einer veröffentlichten Studie? Haben sich die Forscher die entsprechenden Methoden umgesetzt und sind auf mögliche Verzerrungen (Bias) eingegangen? Wie sind die Qualität und die diagnostische Güte der Studie?

Ist man mit den Ergebnissen zufrieden muss geklärt werden, ob und wie man die gefundenen Resultate in der eigenen Abteilung in den Alltag einfließen lassen, sie **implementieren** kann.

Und am Ende steht, nach einer hoffentlich erfolgreichen Einführung, die **Evaluation** (▣ Abb. 25.2). Hat sich die eingeführt Methode bei uns bewährt?

■ **Literaturrecherche**

Eine wissenschaftliche Recherche kann bei Google und Wikipedia beginnen. Allerdings sollte man sich dort nur einen ersten Überblick über sein Thema verschaffen, wissenschaftlich fundierte Ergebnisse kann man nicht erwarten.

In der Wissenschaft unterscheidet man zwischen Primär- und Sekundärliteratur.

Primärliteratur sind die ursprünglich verfassten Werke oder Studien einer Forschergruppe. Als **Sekundärliteratur** werden Veröffentlichungen bezeichnet, die sich mit den Ursprungsquellen befassen, z. B. Metaanalysen.

➤ **Eine Metaanalyse ist eine Übersichtsarbeit, in der mehrere Primärstudien nach vorher festgelegten Regeln miteinander verglichen werden. Da in vielen Ländern der Erde Studien zu ein und demselben Thema durchgeführt werden, hat sich diese Methode bewährt, um eine Einschätzung der „Glaubwürdigkeit“ der Einzelstudien zu erhalten.**
Die Gefahr besteht allerdings darin, dass Äpfel mit Birnen verglichen werden.

Zusätzlich gibt es noch sog. **Tertiärliteratur**, die sich wiederum auf die erstgenannten bezieht, z. B. in Enzyklopädien.

In wissenschaftlichen Arbeiten sind stets alle verwendeten Quellen anzugeben!

➤ **Zur Beurteilung von Internetquellen sollte man sich folgende Fragen stellen:**

1. **Ist der Autor benannt und kann sich als Experte (z. B. akademischer Titel) ausweisen? Ist eine Kontaktadresse angegeben?**
2. **Wer betreibt die Seite (Universität, Privatpersonen...)?**
3. **An wen richtet sich die Seite (Fachpublikum)? Erscheint Werbung?**
4. **Sind alle Quellen des Autors vollständig und richtig angegeben?**
5. **Ist der Text logisch gegliedert und liefert detaillierte Informationen?**
6. **Haben Grafiken einen Sinn oder sind sie „Lückenfüller“ und Dekoration?**
7. **Ist die Seite fehlerfrei (Orthographie) und enthält aktuelle Verlinkungen?**
8. **Wann wurde die Seite erstellt, wie aktuell sind die Updates?**

Um an medizinische Studien zu gelangen existieren Datenbanken, über die man auf die Artikel zugreifen kann. Allerdings sind diese häufig mit Kosten verbunden.

Die Betreiber von Datenbanken sind dazu angehalten, die Qualität der von ihnen veröffentlichten Studien zu überprüfen und so einen Missbrauch zu verhindern.

Geläufige Online-Datenbanken für medizinische Fachinhalte sind:

- Medline (am besten erreichbar über pubmed: ► www.pubmed.com)
- Cinahl (► www.cinahl.com)
- Cochrane (► www.cochrane.org)

Eine Anleitung für den Umgang mit diesen Datenbanken findet man ebenfalls online.

■ **Evidenzgrade**

Auch medizinische Veröffentlichungen können eine unterschiedliche Qualität besitzen. Aus diesem Grund wurde eine Skala mit Evidenzgraden eingeführt (▣ Tab. 25.1). Je höher der Evidenzgrad, umso höher ist die Glaubwürdigkeit einer Veröffentlichung.

Tab. 25.1 Klassifizierung der Evidenzgrade

Evidenzgrad	Beschreibung
Klasse Ia (höchste Aussagekraft)	Metaanalyse mehrerer randomisierter, kontrollierter Studien
Klasse Ib	Mind. eine randomisierte, kontrollierte Studie
Klasse II (a+b)	Mind. eine gut angelegte, aber nicht randomisierte oder quasi-experimentelle Studie
Klasse III	Gut angelegte, nicht-experimentelle Studien, z. B. Vergleichsstudien
Klasse IV (geringste Aussagekraft)	Expertenmeinungen, klinische Erfahrungen fachlicher Autoritäten

➤ Unter einer *randomisierten, kontrollierten Studie* (RCT für Randomised Controlled Trial) versteht man sog. Interventionsstudien mit einem festgelegten Studiendesign. *Kontrolliert* steht dafür, dass es zwei Gruppen (Kohorten) von Studienteilnehmern gibt. Die eine Gruppe bekommt eine Intervention (z. B. ein neues Medikament), die andere Kontrollgruppe nicht (diese bekommt z. B. ein Placebo). *Randomisiert* bedeutet, dass die Zugehörigkeit zu der einen oder anderen Gruppe zufällig (z. B. durch Losverfahren) erfolgte. Zusätzlich sind diese Studien meist verblindet oder doppel-verblindet. *Verblindet* bedeutet, dass die Teilnehmer der jeweiligen Gruppe nicht wissen, zu welcher Kohorte sie gehören. Ist eine Studie *doppelt-verblindet* weiß auch der durchführende Forscher nicht, welcher Teilnehmer sich in welcher Gruppe befindet. Diese Daten sind verschlüsselt dokumentiert, um Interpretationen durch Erwartungen an das Studienergebnis zu verhindern.

25.3.3 Diagnostische Genauigkeitsstudien

Diese Studienform dient dem Vergleich von diagnostischen Verfahren, z. B. für das Screening, zur Diagnosebestätigung bzw. -ausschluss oder zur Bewertung einer Krankheitsprognose.

Hierbei wird der aktuell beste verfügbare Test/ das beste Untersuchungsverfahren (Goldstandard) parallel zu einem neuen, zu untersuchenden Test-

verfahren (Index-Test) an der gleichen Patientengruppe durchgeführt.

Das kann z. B. der Vergleich zwischen einer herkömmlichen Koloskopie (Goldstandard) und einer CT-gestützten, virtuellen Koloskopie (Index-Test) zur Darmkrebsvorsorge sein.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in der sog. Vier-Felder-Tafel erfasst (▣ Abb. 25.3, 25.4):

Aus den ermittelten Zahlen innerhalb der Vier-Felder-Tafel lassen sich Werte errechnen, die eine qualitative Aussage über jeweiligen Test erlauben.

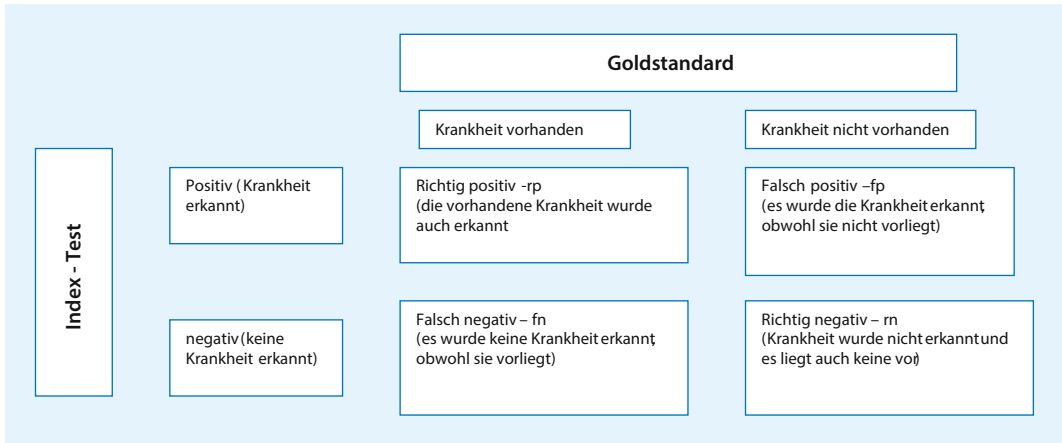
■ Diagnostische Sensitivität

Darunter versteht man die Anzahl an Personen mit einer Krankheit, die durch den Test auch als tatsächlich krank erkannt werden. Sie spielt besonders beim Screening eine große Rolle, da es wichtig ist, eine mögliche Erkrankung nicht zu übersehen. Sie errechnet sich aus dem Quotienten der richtig-positiv erkannten Personen durch alle Personen, die einen positiven Befund erhalten haben.

$$\text{Sensitivität} = \frac{rp}{rp+fn}$$

➤ *Screeningtests* sollen eine möglichst hohe Sensitivität aufweisen, da sie dazu dienen, in einer großen Bevölkerungsgruppe die Personen zu finden, die sich in einem Vor- oder Frühstadium einer Erkrankung befinden.

Der Test soll möglichst wenige falsch-negative Ergebnisse aufweisen. Das hat aber zur Folge, dass die Spezifität sinkt und mit mehr falsch-positiven Ergebnissen zu rechnen ist. Diese wiederum haben zusätzliche diagnos-



■ Abb. 25.3 Vier-Felder-Tafel

tische Maßnahmen zum sicheren Ausschluss einer Krankheit zur Folge.

■ Diagnostische Spezifität

Die diagnostische Spezifität macht eine Aussage darüber, ob die vom Test als gesund erkannten Personen auch tatsächlich gesund sind. Sie ist besonders wichtig, um Diagnosen zu bestätigen, da ein Test mit einer hohen Spezifität vor allem die Gesunden identifiziert. Die Spezifität errechnet sich aus den als richtig gesund erkannten Personen (richtig-negativ) und allen, die einen negativen Befund erhalten haben.

$$\text{Spezifität} = \frac{rn}{fp+rn}$$

➤ **Rein diagnostische Tests dienen der Diagnosebestätigung und der damit verbundenen Behandlung. Aus diesem Grund sollen solche Untersuchungsverfahren möglichst wenig falsch-positive Ergebnisse aufweisen, um eine Überbehandlung zu vermeiden. Diese Testverfahren benötigen also eine hohe Spezifität.**

■ Positiver prädiktiver Wert (PPV)

Diesen Wert bezeichnet man auch als positiven Vorhersagewert. Er macht eine Aussage darüber, wie sicher eine erkannte Erkrankung auch wirklich vorliegt, also über die Anzahl der Personen mit einem positiven Testergebnis (Befund), bei denen die Krankheit tatsächlich vorliegt.

Darüber kann die diagnostische Sicherheit, bezogen auf den Befund, bestimmt werden. Damit ist er ein Maß für die tatsächliche Notwendigkeit, eine Therapie o. ä. einzuleiten.

$$PPV = \frac{rp}{rp+fp}$$

■ Negativer prädiktiver Wert (NPV)

Auch dieser Wert, den man auch negativen Vorhersagewert nennt, macht eine Aussage über die diagnostische Sicherheit, allerdings für die gesunden Personen. Wie gesund darf man sich „fühlen“, wenn ein Testergebnis einen als tatsächlich gesund eingestuft hat. Er ergibt sich aus den Personen mit einem negativen Testergebnis.

$$NPV = \frac{rn}{fn+rn}$$

➤ **Vorhersagewerte hängen nicht nur von den Eigenschaften eines Tests, sondern ebenso von der Prävalenz (Erkrankungswahrscheinlichkeit) einer Bevölkerungsgruppe ab.**

■ Verzerrungen/Bias

Bei allen wissenschaftlichen Studien kann es zu statistischen Verzerrungen, sog. Bias kommen. Diese sind nicht immer vermeidbar. Eine gute Studie erkennt man auch daran, wie offen die Forscher mit diesen Bias umgehen und sie in der Interpretation ihrer Ergebnisse berücksichtigen.

Nachfolgend sind exemplarische Verzerrungen benannt:

■ ■ Spektrum-Bias

Waren die Testpersonen so ausgewählt, dass sie der späteren Zielgruppe für das Untersuchungsverfahren entsprechen? – Schließt man in einen Test z. B. nur Schwerkranke und Gesunde ein, wird man gute Ergebnisse erhalten, da die diagnostischen Unterschiede sehr groß sind.

■ ■ Verblindung

Wussten die Auswerter der Testergebnisse des Index-Testes im Vorfeld schon die Ergebnisse des Goldstandards (und umgekehrt)? Eine fehlende Verblindung kann dazu führen, dass man die gewünschten Ergebnisse „besser“ interpretiert.

■ ■ Stichprobengröße

Haben genügend Testpersonen teilgenommen, um eine statistische Aussage über die Ergebnisse machen zu können?

■ ■ Definition „gesund“ und „krank“

Wurde im Vorfeld genau definiert, ab wann man in einem Befund bzw. Testergebnis von einer Erkrankung spricht?

In Kürze

Die Güte und Anwendbarkeit diagnostischer Verfahren lässt sich aus folgenden Aspekten ablesen:

1. Technische Genauigkeit: Wie zuverlässig ist der Test?
2. Platzierung im klinischen Pfad: Passt der Test in die Abläufe meiner Abteilung / Klinik? Ergänzt oder ersetzt er vorhandene Untersuchungen?
3. Diagnostische Genauigkeit: Wie gut kann der Test eine Erkrankung ausschließen? Wie hoch sind die diagnostische Sensitivität und Spezifität?
4. Auswirkungen der Ergebnisse: Was haben die Patienten von dem Test? Wie wirkt sich das Ergebnis auf Mortalität, Morbidität und Lebensqualität aus?
5. Kosten-Nutzen-Verhältnis: Ist der neue Test preiswerter? Wie sind die Kosten pro gewonnenes Lebensjahr?

25.4 Arbeits- und Tarifrecht

T. Hartmann

Das Arbeitsrecht gilt als Sonderrecht und regelt das Arbeitsverhältnis im Rahmen der unselbstständigen Arbeit und damit das Rechtsverhältnis zwischen Arbeitnehmern und Arbeitgebern.

Man unterscheidet zwischen dem kollektiven Arbeitsrecht, zu welchem auch das Tarifrecht gehört, und dem individuellen Arbeitsrecht.

Für das Arbeitsrecht existiert kein einheitliches Gesetzeswerk; es setzt sich aus einer Vielzahl gesetzlicher Regelungen zusammen. Einige Rechtsätze sind „ungeschriebenes Recht“, also gar nicht schriftlich niedergelegt.

Diese können vor einem Arbeitsgericht trotzdem relevant sein, z. B. das sog. Gewohnheitsrecht. Ein Beispiel dafür kann die Zahlung eines „Weihnachtsgeldes“ sein, wenn es über einen längeren Zeitraum (mind. 3 Jahre) vorbehaltlos gezahlt wurde.

Allgemein unterscheidet das Arbeitsrecht zwischen Angestellten und Arbeitern. Als **Angestellte**, zu denen die Angehörigen der Gesundheitsfachberufe gehören, bezeichnet man die Arbeitnehmer, die überwiegend geistige Tätigkeiten verrichten. **Arbeiter** sind dementsprechend Arbeitnehmer, die überwiegend körperlich arbeiten.

In diesem Kapitel werden in Kurzform die wichtigsten arbeitsrechtlichen Grundsätze zusammengefasst.

25.4.1 Arbeitsrecht

Beginn eines Arbeitsverhältnisses

Im Allgemeinen kommt ein Arbeitsverhältnis nach einem Einstellungsverfahren durch einen Arbeitsvertrag zu Stande.

■ Einstellungsgespräch

In einem Einstellungsgespräch können sich beide Parteien (Arbeitnehmer und Arbeitgebervertreter) ein Bild voneinander machen, sich näher kennenlernen und offene Fragen klären. Allerdings darf der Arbeitgeber nicht alles fragen bzw. muss der Bewerber nicht alle Fragen beantworten und darf

in Einzelfällen sogar lügen, ohne dass daraus später ein Kündigungsgrund entsteht.

So ist die Frage nach einer Schwangerschaft unzulässig.

■ Arbeitsvertrag

Ein Arbeitsvertrag ist grundsätzlich an keine bestimmte Form gebunden, kann also auch mündlich bzw. stillschweigend getroffen werden. Allerdings ist für den Fall der Fälle die Schriftform zu empfehlen und z. T. auch vorgeschrieben (z. B. in Tarifverträgen). Liegt bei Arbeitsbeginn noch kein schriftlicher Vertrag vor, so muss der Arbeitgeber die wesentlichen Vertragsinhalte nach spätestens einem Monat dem Arbeitnehmer zukommen lassen.

Gesetzlich verlangte Mindestinhalte sind:

- Name und Anschrift beider Vertragsparteien
- Beginn des Arbeitsverhältnisses
- Dauer des Arbeitsverhältnisses
- Arbeitsort
- Beschreibung der Tätigkeiten des Arbeitnehmers (oder Berufsbezeichnung)
- Zusammensetzung und Höhe des Lohnes (Arbeitsentgelt)
- Vereinbarte Arbeitszeit (meist Wochenarbeitszeit)
- Dauer des jährlichen Erholungsurlaubes
- Kündigungsfristen
- Ggf. Hinweis auf geltende Tarifverträge, Betriebs- oder Dienstvereinbarungen

■ Unbefristetes Arbeitsverhältnis

In diesem Fall wird das Arbeitsverhältnis auf unbestimmte Zeit geschlossen und endet i. d. R. mit dem Eintritt in das Rentenalter. Im Rahmen des unbefristeten Arbeitsverhältnisses wird zu Beginn eine **Probezeit** vereinbart, die **längstens sechs Monate** beträgt. Innerhalb der Probezeit beträgt die beiderseitige Kündigungsfrist zwei Wochen.

■ Befristetes Arbeitsverhältnis

Dieses Arbeitsverhältnis wird auf bestimmte Zeit oder über einen bestimmten Zeitraum (so lange die Aufgabe andauert) geschlossen. Befristete Arbeitsverhältnisse müssen sachlich begründet sein, z. B. durch:

- vorübergehenden betrieblichen Bedarf (Saisonarbeit),

- Vertretung eines Mitarbeiters (Schwangerschaftsvertretung),
- Erleichterung des Übergangs in eine Anschlussbeschäftigung (nach Studium oder Ausbildung).

Ein befristetes Arbeitsverhältnis kann höchstens bis zu einer Länge von zwei Jahren geschlossen werden. Innerhalb dieser Frist kann die Dauer der Beschäftigung drei Mal verlängert werden. Daraus ergeben sich also maximal vier Befristungen.

Das Arbeitsverhältnis läuft automatisch (ohne Kündigung) zum Ende der Befristung ab.

Rechte und Pflichten

■ Arbeitgeberpflichten

Aus einem Vertragsverhältnis ergeben sich stets Rechten und Pflichten für beide Vertragspartner.

Für den Arbeitgeber bestehen diese Pflichten in der (pünktlichen) Zahlung des Entgeltes und der Fürsorgepflicht gegenüber dem Arbeitnehmer. Diese beinhaltet in erster Linie die Einhaltung von Schutzvorschriften (► Abschn. 1.5).

■ Arbeitgeberrechte

Zu den Rechten des Arbeitgebers gehört vor allem das Weisungsrecht. Diesen Weisungen muss der Arbeitnehmer nachkommen. Das Weisungsrecht ist auf die vertraglich festgeschriebenen Tätigkeiten eingeschränkt und die Weisungen müssen zumutbar sein. Darüber hinaus können sich Regelungen aus bestehenden Tarifverträgen ergeben.

➤ **Im öffentlichen Dienst kann einem Arbeitnehmer grundsätzlich jede Tätigkeit übertragen werden, die seiner Vergütungsgruppe entspricht, insbesondere dann, wenn die Tätigkeiten im Arbeitsvertrag nicht explizit geregelt sind. So kann ein Klinikbetreiber eine MTRA, die eigentlich für die Nuklearmedizin eingestellt wurde, in den Bereich des konventionellen Röntgens versetzen.**

■ Arbeitnehmerpflichten

Die arbeitsrechtlichen Pflichten eines Arbeitnehmers werden in Haupt- und Nebenpflichten unterteilt.

Die Hauptpflicht ist die Erbringung der Arbeitsleistung gemäß der im Arbeitsvertrag vereinbarten

Tätigkeiten. Dabei ist ebenfalls evtl. bestehendes Tarifrecht zu beachten. Dieses bezieht sich für die Gesundheitsfachberufe i. d. R. auf Arbeitszeiten, Überstunden, Bereitschaftsdienste o. ä.

Diese persönliche Leistungserbringung entfällt nur:

- in der Urlaubszeit,
- bei Krankheit,
- bei berechtigter Leistungsverweigerung, wenn man z. B. ärztliche Tätigkeiten verrichten soll,
- bei ausstehendem Lohn,
- wenn der Arbeitgeber nicht in der Lage ist die Arbeitsleistung in Anspruch zu nehmen, z. B. Schließung einer Praxis.

Zu den Nebenpflichten der Arbeitnehmer gehören u. a.:

- Gehorsamspflicht
- Unterlassung betriebsschädigender Handlungen
- Beachtung des Arbeitsschutzes
- Mitteilung einer Schwangerschaft
- pflegliche Behandlung der Arbeitsmittel / -geräte

- **Grundsätzlich kann ein Arbeitnehmer einer Nebentätigkeit nachgehen. Diese muss er jedoch beim Arbeitgeber anzeigen. Ein Arbeitgeber darf dem widersprechen, wenn durch die Nebentätigkeit die Arbeitskraft leidet (z. B. fehlende Einhaltung von Ruhezeiten) oder die Interessen des Arbeitgebers gefährdet sind (z. B. eine MTRA in der Strahlentherapie arbeitet nebenbei bei einem Anbieter alternativer Behandlungsmethoden und „Bestrahlungsgegner“).**

Beendigung eines Arbeitsverhältnisses

Es existieren unterschiedliche Methoden der Beendigung eines Arbeitsverhältnisses, z. B. Ende eines befristeten Arbeitsverhältnisses oder Tod des Arbeitnehmers. Nachfolgend werden weitere wichtige Formen benannt.

■ Aufhebungsvertrag

Darunter versteht man die Aufhebung des Arbeitsvertrages im beiderseitigen Einvernehmen. Beide

Seiten einigen sich (i. d. R. in Schriftform) auf einen bestimmten Zeitpunkt, ab dem das Arbeitsverhältnis nicht mehr gültig ist.

■ Erreichung des Rentenalters

Man muss nicht zwangsläufig ein Arbeitsverhältnis beenden, wenn das Renteneintrittsalter erreicht ist. Auch hier können sich, ebenso wie bei Regelungen zur Altersteilzeit o. ä., beide Vertragsparteien einigen.

- **Rechtswidrig ist die Festlegung der Beendigung des Arbeitsvertrages bei Schwangerschaft oder im Falle einer Eheschließung (Zölibatsklausel).**

■ Kündigung

Unter einer Kündigung versteht man eine einseitige, empfangs- aber nicht annahmebedürftige Willenserklärung. Sie wird in dem Moment wirksam, in dem sie zugegangen ist, vorausgesetzt, der Empfänger hat die Möglichkeit der Kenntnisnahme.

Heißt also, die „Gegenseite“ der Kündigung muss nicht damit einverstanden sein, und die Form der Zustellung (nicht per Mail oder SMS) spielt eine große Rolle.

Unterschieden wird außerdem zwischen einer Änderungs- und einer Beendigungskündigung.

■ ■ Änderungskündigung

Eine Änderungskündigung liegt dann vor, wenn sich das Aufgabenfeld des Arbeitnehmers ändert, er aber nicht entlassen werden soll. Der Arbeitnehmer bekommt veränderte Arbeitsbedingungen und ggf. eine andere Vergütung innerhalb einer Kündigungsfrist angeboten.

Nimmt er das Angebot an, so gelten die neuen Bedingungen nach Ablauf der Kündigungsfrist. Nimmt der Arbeitgeber die Änderungskündigung nicht an, endet das Arbeitsverhältnis nach Ablauf der Frist.

■ ■ Beendigungskündigung

Diese Kündigungsform ist von vornherein auf die Beendigung des gesamten Arbeitsverhältnisses ausgelegt. Sie ist als ordentliche (fristgerechte) und außerordentliche (fristlose) Kündigung möglich.

Für eine **fristlose Kündigung** müssen schwere Verletzungen der arbeitsvertraglichen Pflichten vorliegen. Dazu gehören:

- Strafbare Handlungen (Diebstahl, Betrug, Verstoß gegen das Betäubungsmittelgesetz)
- Begründeter Verdacht einer strafbaren Handlung
- Wiederholt unentschuldigte Verspätungen
- Wiederholte Störung des Betriebsfriedens (Streit mit den Kollegen)
- Trunkenheit am Arbeitsplatz
- Unberechtigte Arbeitsverweigerung

Die außerordentliche fristlose Kündigung aus einem wichtigen Grund muss innerhalb von zwei Wochen erfolgen.

Der fristlosen Kündigung geht i. d. R. eine **schriftliche Abmahnung** voraus. Diese dient der Warnung an den Arbeitnehmer, dass der Arbeitgeber die Pflichtverletzung nicht duldet und im Wiederholungsfall mit der Entlassung gerechnet werden muss.

Eine Abmahnung ist nur wirksam, wenn folgende Aspekte berücksichtigt wurden:

- Art, Zeit und Bezeichnung des Fehlverhaltens sind beschrieben.
- Es wird eindeutig und unmissverständlich dazu aufgefordert, das Fehlverhalten zukünftig zu unterlassen.
- Es besteht ein eindeutiger und unmissverständlicher Hinweis, dass im Wiederholungsfall des geringsten Fehlverhaltens eine Kündigung erfolgt.

➤ **In einer Klinik kann eine Abmahnung wegen Verstoßes gegen die Hygienevorschriften (z. B. Tragen eines Eheringes) erfolgen. Berücksichtigt die Abmahnung alle o. g. Aspekte, ist bei einem weiteren Verstoß eine fristlose Kündigung rechtskräftig.**

Im Gegensatz zur fristlosen Kündigung werden bei einer **ordentlichen Kündigung** Kündigungsfristen vorausgesetzt und eingehalten.

Eine Kündigungsfrist kann vier Wochen zum 15. oder zum Monatsende betragen (§ 622 BGB), es können aber auch längere oder kürzere Fristen vereinbart werden. Die Kündigungsfristen verlängern sich auch durch die Dauer des Beschäftigungs-

verhältnisses. So hat man nach einer 20-jährigen Betriebszugehörigkeit eine Kündigungsfrist von bis zu sieben Monaten.

Abweichende Regelungen können ebenso durch Tarifverträge möglich sein.

Im Kündigungsschutzgesetz sind Gründe benannt, durch die eine fristgerechte Kündigung in Betracht kommt.

Unter **personenbedingten Kündigungsgründen** versteht man solche, die in der Person des Arbeitnehmers begründet sind. Dazu kann auch Krankheit gehören, wenn durch sie die Arbeitsleistung nicht mehr erbracht werden kann. Krankheit schützt also nicht vor Kündigung, es werden aber rechtlich verschärfte Anforderungen an eine solche Kündigung gestellt.

Bei einer **verhaltensbedingten Kündigung** liegen ähnliche Gründe wie bei einer fristlosen Kündigung vor, allerdings sind die Vertragsverletzungen weniger schwer. Neben Bummlei oder Beleidigung eines Vorgesetzten können auch Brutalität gegenüber Patienten oder die Meldung des Arbeitgebers an das Amt für Arbeitsschutz (ohne Einhaltung des innerbetrieblichen Beschwerdeweges) zu einer Kündigung führen.

Betriebsbedingte Kündigungen setzen dringende betriebliche Erfordernisse voraus, durch die ein Arbeitsverhältnis nicht aufrechterhalten werden kann. Das kann z. B. bei einer Umstrukturierung des Betriebes oder Arbeitsmangel der Fall sein. Eine Kündigung aus Gründen der Kosten- und Personalreduktion auszusprechen ist hingegen nicht zulässig. Gleiches gilt für den Fall, dass z. B. die radiologische Abteilung aus Kostengründen in eine Tochtergesellschaft ausgegliedert werden soll. In diesem Fall darf dem angestammten Personal nicht gekündigt werden, um neue „billigere“ Mitarbeiter einzustellen.

➤ **Hält ein Arbeitnehmer eine Kündigung für nicht gerechtfertigt, kann er innerhalb von drei Wochen eine Kündigungsschutzklage vor dem Arbeitsgericht einreichen.**

Nach der Beendigung eines Arbeitsverhältnisses sind dem Arbeitnehmer seine **Arbeitspapiere** (Unterlagen, die er zu Beginn des Arbeitsverhältnisses abgegeben hat), die aktuelle **Lohnsteuerkarte** und der **Sozialversicherungsnachweis** zurückzugeben.

Außerdem hat der Arbeitgeber Anspruch auf ein Arbeitszeugnis. Dieses muss Art und Dauer der Beschäftigung sowie eine Einschätzung der Führung und Leistung beinhalten.

Zum einen muss das Arbeitszeugnis „wohlwollend“ formuliert sein, darf also den scheidenden Arbeitnehmer nicht am beruflichen Fortkommen hindern. Auf der anderen Seite ist der Arbeitgeber der Wahrheit verpflichtet, da ihm anderenfalls Schadensersatzforderungen drohen. Aus diesem Grund ist vermutlich die offiziell negierte „Zeugnissprache“ entstanden. Eine Kennzeichnung bestimmter Aspekte (z. B. durch Unterstreichungen o. ä.) ist unzulässig.

Inhalte, die nicht in einem Arbeitszeugnis aufgeführt sein dürfen...

Folgende Inhalte dürfen, außer auf Wunsch des Arbeitnehmers, in einem Arbeitszeugnis **nicht erwähnt** werden:

- Verdiensthöhe (kann indirekt eine Aussage über die erbrachte Leistung machen)
- Wohnort, Nebentätigkeit (erlaubt z. B. einen Rückschluss auf den sozialen Status)
- Religionszugehörigkeit, Familienstand, Parteizugehörigkeit, Betriebsrattätigkeit, Ehrenämter, Behinderung o. ä. (Diskriminierungsgefahr)
- Alkoholmissbrauch (wird als Erkrankung gewertet und darf nur erwähnt werden, wenn es zu Gefahren führt, z. B. bei Fernfahrern)
- Erkrankungen und Fehlzeiten
- Kündigungsgrund (wenn er vom Mitarbeiter verschuldet war)
- Abmahnungen, Vertragsbruch
- Vorstrafen und Verdacht auf Straftaten, außer wenn sie direkt mit dem Arbeitsverhältnis in Verbindung stehen, z. B. sexuelle Belästigung
- Vorübergehender Leistungsabfall durch persönliche Krisen.

➔ In Deutschland und der Schweiz haben Arbeitnehmer einen gesetzlichen Anspruch auf ein schriftliches Zeugnis. Dieses muss vom Arbeitnehmer ausdrücklich verlangt werden.

25.4.2 Tarifrecht

Das Tarifrecht ist Teil des kollektiven Arbeitsrechtes, welches u. a. das **Arbeitskampfrecht** regelt und sich mit den **Rechten der Sozial- und Betriebspartner** befasst.

Tarifverträge setzen Rechtsnormen und werden zwischen Arbeitgebern (Arbeitgeberverbände oder einzelne Arbeitgeber) und Arbeitnehmervertretern (Gewerkschaften oder Arbeitnehmerverbände) geschlossen.

Liegt ein Tarifvertrag vor, so gilt dieser unmittelbar; damit müssen die Inhalte nicht gesondert in einen Arbeitsvertrag aufgenommen werden. Die Vereinbarungen sind zwingend und es sind lediglich Abweichungen zugunsten des Arbeitnehmers erlaubt.

Tarifverträge enthalten Regelungen zu:

- Arbeitsentgelt,
- Arbeitszeiten,
- Urlaubsanspruch,
- Arbeitsbedingungen,
- Beginn und Kündigung von Arbeitsverhältnissen,
- Laufzeit des Vertrages.

Exemplarisch wird hier auf Aspekte des Tarifvertrages für den öffentlichen Dienst (TVöD) eingegangen, da viele MTRA in Kliniken des öffentlichen Dienstes arbeiten oder sich Arbeitgeber auf den TVöD beziehen („in Anlehnung an den TVöD“).

Der TVöD beinhaltet mehrere Tarifverträge für Beschäftigte in öffentlichen Einrichtungen des Bundes, der Länder und der Kommunen. Er ist seit 2005 in Kraft und hat den Bundesangestelltentarifvertrag (BAT) und parallel bestehende Verträge des Bundes und der Kommunen weitestgehend abgelöst.

Er gliedert sich in einen allgemeinen Teil, der Aussagen zu allen Bereichen des öffentlichen Dienstes macht (Arbeitsbedingungen, Arbeitszeit, Eingruppierung, Entgeltfortzahlungen etc.), und einen besonderen Teil, in dem spezielle Aussagen zu unterschiedlichen Branchen (z. B. Kliniken, Entsorgung, Flughäfen) gemacht werden.

■ Vergütung

Im TVöD gibt es fünfzehn Entgeltgruppen mit jeweils fünf bzw. sechs Stufen. In welche man einge-

stuft wird hängt von der Ausbildung und den zu leistenden Tätigkeiten ab.

Nichtakademische Berufe mit einer dreijährigen Ausbildungszeit sind in den Gruppen 5 bis 9 zu finden. Ab der Entgeltgruppe 10 beginnt der „akademische“ Bereich, z. B. mit einem Bachelorabschluss. Als MTRA kann man diese Gruppe erreichen, wenn man z. B. Zusatzaufgaben (Leitung, Lehre) übernimmt. Akademisch ausgebildete Kollegen mit einem Master- oder Diplomabschluss (z. B. Dipl. Medizinpädagogen) können bzw. müssen höher eingestuft werden, wenn sie auch die entsprechenden Aufgaben übernehmen.

➤ **Die Eingruppierung in eine bestimmte Entgeltgruppe hängt nicht nur von der Ausbildung, sondern auch den übertragenen Aufgaben ab.**

Die Stufen der Entgeltgruppen „belohnen“ die Jahre der Betriebszugehörigkeit. In der Stufe 1 verbleibt man ein Jahr, in der Stufe 2 zwei Jahre, in Stufe 3 drei Jahre usw.

Wechselt man also nach ein paar Jahren die Arbeitsstelle sollte man darauf achten, nicht nur die Entgeltgruppe, sondern auch die jeweilige Stufe „mitzunehmen“. Im Gegensatz zum alten BAT ist das im TVöD nicht mehr zwangsläufig vorgesehen. Allerdings haben die Kliniken genügend Handlungsspielraum für individuelle Gehaltsverhandlungen.

MTRA-Berufsanfänger werden häufig in der Entgeltgruppe 6, Stufe 1 eingruppiert und steigen nach dem Probejahr in die Entgeltgruppe 8, Stufe 1 auf.

➤ **Ein Berufsanfänger in einer kommunalen Klinik (Stand 2014/15) verdient somit im ersten halben Jahr ca. 2200 € brutto und danach ca. 2370 € brutto. Hinzu kommen ggf. Dienstzuschläge und Sonderzahlungen. Im Internet sind Gehaltsrechner für den jeweiligen Tarifvertrag zu finden**

Nach dem TVöD gibt es das alte „Weihnachtsgeld“ und „Urlaubsgeld“ nicht mehr. Diese Zahlungen wurden als „Jahressonderzahlung“ zusammengefasst und prozentual nach den Einkommensstufen

gestaffelt. MTRA erhalten 80 % des letzten Bruttolohnes.

Im unverschuldeten **Krankheitsfall** zahlt der Arbeitgeber den Lohn für sechs Wochen weiter. Im Anschluss daran wird Krankengeld durch die Krankenkassen gezahlt. Da dieses geringer ist, gewähren Arbeitgeber des öffentlichen Dienstes einen Zuschuss zum Ausgleich, der wiederum von der Dauer des Beschäftigungsverhältnisses abhängt.

Beschäftigte im öffentlichen Dienst haben ebenfalls Anspruch auf **vermögenswirksame Leistungen** (VWL) und eine **betriebliche Altersvorsorge**. Entsprechende Regelungen sind beim Arbeitgeber zu erfragen.

■ **Urlaubsanspruch**

Jeder Beschäftigte im öffentlichen Dienst hat Anspruch auf Erholungsurlaub bei voller Lohnfortzahlung. Für Arbeitnehmer bis zur Vollendung des 55. Lebensjahres sind das 29 Tage pro Jahr, danach 30 Tage bei einer 5-Tage-Woche.

Ebenso besteht der Anspruch mind. zwei Wochen Urlaub im Jahr zusammenhängend zu nehmen.

Es wird angestrebt, den Urlaub im jeweiligen Kalenderjahr zu nehmen. Gelingt das nicht, sollte der übertragene Resturlaub bis spätestens März des Folgejahres genommen werden.

Bei ständiger Arbeit in einem Wechselschichtsystem erhöht sich der Urlaubsanspruch um einen Tag.

Darüber hinaus können Arbeitnehmer unbezahlten Sonderurlaub beantragen.

Im TVöD sind auch noch Regelungen zur Gewährung von Arbeitsbefreiungen, z. B. bei Geburt eines Kindes, betriebsbedingtem Umzug, Bürgerpflichten (Feuerwehr o. ä.) enthalten.

In Kürze

- Das Arbeits- und Tarifrecht in Deutschland ist in vielen verschiedenen Gesetzen geregelt. Neben arbeitsrechtlichen Grundbestimmungen (Arbeitsschutz, Arbeitszeit, Mutterschutz etc.) existieren unterschiedliche Regelungen bei den jeweiligen Arbeitgebern.
- Vor Beginn eines Arbeitsverhältnisses sollte man sich über die tariflichen Besonderheiten des jeweiligen Arbeitgebers informieren.

- Einen guten Anhaltspunkt zum Vergleich der Arbeitsbedingungen und -rechte liefert der TVöD.

25.5 Extremsituationen

T. Hartmann, K. Kismet, C. Vockelmann

Im Berufsalltag trifft man oft auf Extremsituationen. Dies fängt für den einen damit an, dass der onkologische Patient ein Tracheostoma hat oder man beim „Aufdecken“ eines im Bett liegenden Patienten nur ein Bein entdeckt und für den anderen damit, dass kleine Babys an Krebs erkrankt sind oder blutüberströmte Patienten nach einem Verkehrsunfall eingeliefert werden. Die Extremsituationen sind für jeden Untersucher individuell anzusehen und können psychisch belasten. Jedoch ist es sehr wichtig, mental so gut es geht Abstand zu nehmen, um schnell und effektiv das Bestmögliche für die Patienten tun zu können. Hier gehen wir auf ein paar Beispiele ein:

25.5.1 Polytrauma

Die Definition eines Polytraumas ist die mehrfache, lebensgefährliche Verletzung durch einen Unfallhergang. Hier ist eine sehr gute interdisziplinäre Zusammenarbeit und Organisation essentiell für den Patienten. Die Verfahren und Protokolle unterscheiden sich je nach Klinik. Nachdem die Erstmaßnahmen im Schockraum erfolgen, werden die Patienten meist im CT untersucht. Es können sehr schnell knöcherne Verletzungen, Organ- und Gefäßverletzungen detektiert und beurteilt werden, um direkt die weiteren Maßnahmen einleiten zu können.

25.5.2 Anaphylaktoide Reaktion

Sie sind ein paar Jahre im Berufsalltag und haben mindestens 5000 CT-Untersuchungen mit Kontrastmittel durchgeführt. Ein paar Patienten haben nach

der Untersuchung höchstens über ein paar Flecken geklagt. Sie haben den Radiologen informiert, der dann gegen die allergische Reaktion H_1 -Blocker, H_2 -Blocker und Cortison gespritzt hat, das sie ihm aufgezogen haben. Dann kommt das nächste CT. Ein ambulanter Patient, bei dem Sie eine CT-Angiographie der Becken-Beingefäße angefertigt haben. Sie schicken ihn nach der Untersuchung ins Wartezimmer, der Radiologe will erst die Bilder auswerten und danach mit ihm sprechen. Ihre Kollegin holt den nächsten Patienten aus dem Wartezimmer ins CT. Dabei sieht sie zufällig, dass Ihr Patient relativ blass ist. Sie ruft den Radiologen, der ins Wartezimmer kommt. Der Patient ist schon kaltschweißig und zeigt rote Pusteln und Dyspnoe. Der Radiologe erkennt: hier liegt eine allergische Reaktion vor und schickt sie los, um die entsprechenden Medikamente aufzuziehen. Irgendwie ist aber nichts vorbereitet, irgendjemand hat die Notfallschale mit den Medikamenten nicht aufgefüllt. Sie müssen erst alles suchen. Und nervös sind Sie auch noch. Es dauert gute 3 min, bis sie alles haben. Der Patient hat sich allerdings zwischendurch schon verschlechtert und der Radiologe hat den Anästhesisten von der Intensivstation gerufen. Er spritzt jetzt schnell die Medikamente gegen die anaphylaktoide Reaktion und fordert Sie auf, noch eine Ampulle eines H_1 - und H_2 -Blockers aufzuziehen. Sie laufen schnell, trotzdem wirken die Medikamente nicht schnell genug. Der Patient muss intubiert werden.

Glücklicherweise hat die Behandlung geholfen. Am nächsten Tag sehen Sie den Patienten bereits wieder vor dem Krankenhaus.

25.5.3 CT-gesteuerte Punktion

Herr Müller hat einen Lungenrundherd. Dieser soll im CT punktiert werden. Routinemäßig spulen der Radiologe und Sie ihr Programm ab. Die Nadel ist platziert und eine Probe gewonnen. Allerdings war der Patient relativ unruhig, sodass der Zugangsweg schwierig war. Sie stellen fest: Es hat sich ein Pleuraerguß gebildet. Auch dem Radiologen fällt das auf, und bei der nächsten Kontrolle ist es schon deutlich mehr und leicht hyperdens: Vermutlich ist eine Interkostalarterie verletzt. Statt freundlicher Erklärungen lässt Ihr Radiologe nur

knapp von sich hören: Bitte KM anschließen und eine Angio im Aortenprogramm über den Bereich fahren. Das CT zeigt den Befund – es blutet aus der Interkostalarterie, der Patient bekommt einen Hämatothorax (■ Abb. 25.4). Sie sollen den Patienten kurz überwachen, während der Radiologe den Chirurgen ruft. Glücklicherweise ist der Patient stabil, bis der Chirurg ihn in den OP übernimmt.

25.5.4 Krampfanfall während Stentangioplastie

Ein Patient weist eine hochgradige Restenose der Halsschlagader, der A. carotis auf. Wie nahezu jeden Tag in der Angiographie soll auch bei diesem Patienten eine Stentangioplastie durchgeführt werden. Alles läuft wie immer. Der Draht ist erfolgreich an der Stenose vorbeigeführt, die erste Dilatation verlief problemlos. Der Blutdruck ist während des gesamten Eingriffs eher hoch, bis zu Blutdruckwerten von etwa 180 mmHg systolisch. Aber der Patient sagt, das wäre immer so. Dann wird der Stent freigesetzt, angiographisch ist die Stenose vollständig beseitigt. In dem Moment fängt der Patient an zu krampfen. Der Radiologe verlangt nach Rivotril zur Behandlung des Krampfanfalls und weist Sie in knappen Ton an, dem CT Bescheid zu geben. Die Kollegen dort beenden ihre aktuelle Untersuchung, während Sie in der Angiographie den Patienten ins Bett umlagern, um dann zum CT zu fahren. Die Befürchtungen bestätigen sich. Der Patient weist eine große ICB (intrazerebrale Blutung) auf. Die neurochirurgischen Kollegen werden hinzugerufen, jedoch erscheint eine operative Therapie nicht sinnvoll. In den nächsten Tagen sehen Sie den Patienten wiederholt auf der Intensivstation. Sein Zustand bessert sich allerdings nicht, er verstirbt ein paar Tage nach dem Eingriff, zu dem er gut gelaunt selber auf den Angiographietisch geklettert ist.

25.5.5 CT-gesteuerte virtuelle Autopsie/Post-mortem CT

Nicht in jeder Klinik kommt es vor, dass tote Menschen computertomographisch untersucht werden.



■ Abb. 25.4 CT-angiographischer Nachweis einer arteriellen Blutung aus der Interkostalarterie in den Pleuraspalt. (© Vockelmann)

Das Ziel der CT-gesteuerten virtuellen Autopsie ist der Vergleich dieser Methode mit der klassischen Autopsie und der eventuelle Austausch der Verfahren nach Erweiterung und Sicherstellung der äquivalenten Aussagekraft. Somit könnte durch eine minimal-invasive Intervention die Menschenwürde gesichert, die Angehörigen psychisch entlastet und mit minimalem Aufwand dasselbe Ergebnis erzielt werden.

Ein Post-mortem CT wird hauptsächlich bei plötzlich verstorbenen Patienten durchgeführt. Meist sind es in der Notaufnahme oder im OP Verstorbene oder aber auch Kinder, bei denen ein Missbrauchsverdacht besteht. Mit diesem Verfahren erzielt man die Detektion der tatsächlichen Todesursache und der Knochen- und Organverletzungen, um beispielsweise dem Operateur die Schuldzuweisung zu entziehen.

Der Unterschied zwischen den beiden Verfahren ist dieser:

- CT-gesteuerte virtuelle Autopsie
 - Einverständnis der Angehörigen
 - Aufwendige Vorbereitung
 - Aufwendige Durchführung
 - Gefäßdarstellung durch Spezialkontrastmittelinjektion
- Post-mortem CT
 - Keine Vorbereitung
 - Schnelle Durchführung
 - Keine Gefäßdarstellung, nur Knochen- und Organverletzungen

Mein Name ist Sabine, ich bin 39 Jahre alt und arbeite als MTRA in einer kinderradiologischen Abteilung. Die Arbeit mit den Kindern, auch wenn sie krank oder verletzt sind, macht mir sehr viel Spaß. Kinder sehen die Welt anders, bunter. Sie finden Erklärungen, warum die Welt so ist wie sie ist, die viel kreativer und vor allem einfacher sind als die der Erwachsenen.

Am liebsten nutze ich, wenn ich den kleinen Patienten erkläre, was gleich mit ihnen passieren wird, den Vergleich eines großen Photoapparates. Das klappt bei Vorschulkindern richtig gut. Und zur Belohnung nehme ich sie mit in unsere ehemalige Dunkelkammer, in der heute die Ausleseeinheit für die Speicherfolien steht – da können sie ihre Bilder gleich anschauen. Außerdem haben wir an einer Pinnwand eine Art „Röntgenquiz“ für Schulkinder angebracht. Das verkürzt den Kindern und den Eltern die Wartezeit.

Was mich in meinem Berufsalltag am meisten mitnimmt, sind misshandelte Kinder, die z. B. häuslicher Gewalt ausgesetzt sind und deswegen bei uns landen. Wir verwenden dafür den Begriff „Battered-Child-Syndrom“, was so viel wie „schlimm zugerichtetes Kind“ bedeutet. Wenn der Verdacht auf ein solches Syndrom besteht, warnen uns die Schwestern oder Ärzte aus der Notfallaufnahme meist telefonisch vor. Schließlich darf man sich im Beisein der Eltern nichts anmerken lassen. Die Äußerung eines unbegründeten Misshandlungsverdachts ist schlimm und kann Folgen haben! Erkennbar wird ein „Battered-Child-Syndrom“ dann, wenn z. B. der geschilderte Unfallhergang nicht zu dem Verletzungsmuster passt oder alte Frakturen im Röntgenbild erkennbar sind. Wir haben in solchen Fällen eine ganze Aufnahmereihe der Extremitäten, des Thorax und des Beckens anzufertigen.

Ich gehe mit solchen Kindern nicht anders um, als mit anderen Kindern auch, obwohl ich innerlich traurig und sehr wütend zugleich bin. Wer kann Kindern so etwas antun? Auffällig ist für mich in einem konkreten Fall, wenn die Eltern dabei sind, dass diese sich häufig überbesorgt und fürsorglich zeigen, die Kinder aber trotz ihrer Verletzungen stiller sind und weniger weinen als andere Kinder.

Manchmal, wenn es sich um größere Kinder handelt, befragen wir oder die Ärzte sie selbst nach dem Unfallhergang – möglichst ohne Anwesenheit der Eltern. Auch wenn es offensichtlich ist, dass die Verletzung nicht wie beschrieben von einem „zufälligen Treppensturz“ kommen kann, halten die Kinder häufig dicht und sagen kein Wort, das ein schlechtes Licht auf die Eltern werfen könnte.

Diese absolute Loyalität denen gegenüber, die diese Schmerzen zugefügt haben, macht mich sehr hilflos. Vor allem, wenn ich erkenne, dass ich nichts für die Kinder tun kann, außer meinen Job...

➤ Zum Schluss:

Denken Sie immer daran: auch wenn der Patient sich nicht mehr äußern kann oder reglos im Bett liegt, oftmals kann er Sie hören und verstehen!

In Kürze

- Auch wenn der MTRA-Beruf meist als „Sackgassenberuf“ bezeichnet wird, existieren viele Möglichkeiten, sich im Laufe seines Berufslebens weiterzuentwickeln, seine Talente zu entfalten und die verschiedensten Arbeitsbereiche kennen zu lernen.
- Maßgeblich dafür ist die persönliche Bereitschaft, sich immer wieder auf Neues einzustellen und dazulernen zu wollen. Abgesehen davon muss man in einem Beruf, der stark von den technischen Entwicklungen in der Medizin abhängig ist, ohnehin ständig neue Untersuchungs- und Therapieverfahren erlernen, um „up-to-date“ zu bleiben.
- Diese technischen Entwicklungen und die tägliche Zunahme des medizinischen Wissens machen es auch notwendig, sich als MTRA, im Sinne einer evidenzbasierten

Berufspraxis, mit wissenschaftlichen Studien und deren Interpretation auseinander zu setzen.

- Nicht zuletzt spielen im beruflichen Alltag arbeits- und tarifrechtliche Fragen eine wichtige Rolle. Ebenso die Auseinandersetzung mit möglichen Extremsituationen, auf die man sich nur schwer vorbereiten kann, die einem aber täglich begegnen können.
- Jeden Tag heißt es aufs Neue: „Es bleibt spannend!“

Literatur

- Behrens J, Langer G (2010) Evidence-based nursing, 2. Aufl. Huber-Verlag, Bern
- Blum K (2009) Weiterentwicklung der nicht-ärztlichen Heilberufe am Beispiel der Assistenzberufe im Gesundheitswesen, Forschungsgutachten des DKI e. V. im Auftrag des BMG
- BMBF: Lebenslanges Lernen sichert die Zukunftschancen, online, 15.4.14
- Kaap-Fröhlich S (2013) Notwendigkeit, Rahmenbedingungen und Definition evidence-basierten Handelns. Biomed Austria
- Michelsen S (2007) Arbeitszeugnis. MTA-Dialog 2007(2)
- Schneider A (2003) Staatsbürger-, Gesetzes- und Berufskunde für Fachberufe im Gesundheitswesen, 6. Aufl. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Schuetz GM, Tackmann R, Hamm B, Dewey M (2010) Qualität diagnostischer Genauigkeitsstudien in *Fortschr Röntgenstr*, Thiemeverlag, Onlineveröffentlichung 04.10.2010
- Tarifvertrag für den öffentlichen Dienst (TVöD), online 22.4.14 www.bildungsurlaub.de, online 15.4.14 www.dvta.de

Serviceteil

[Webquellen und hilfreiche Links](#)

[Glossar technischer und physikalischer Begriffe](#)

[Stichwortverzeichnis](#)

Webquellen und hilfreiche Links

Kapitel 1

Berechnung des Dosisflächenproduktes: ► <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/10463/10958/index.html?lang=de&download=NHZLpZig7t,In-p6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gp-JCHfYN2g2ym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19Xl2ldvoaCVZ>

- www.dvta.de
- www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/mta-aprv/gesamt.pdf
- www.mta-werden.de
- www.mta-r.de
- www.vmtb.de

Kapitel 2

Bundesamt für Strahlenschutz, ► www.bfs.de

- http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/strlschv_2001/gesamt.pdf
- http://www.leifiphysik.de/sites/default/files/m Medien/marie-petite-curie_radioaktiveinf_ges.jpg
- http://www.lung.mv-regierung.de/images/belastung_de.gif

Materialprüfungsamt NRW: ► www.mpanrw.eu, Februar 2

- <http://www.medicalradiation.com/wp-content/uploads/electromagnetic-spectrum.jpg?a17713>

Radonbelastung in Häusern: ► http://www.bfs.de/de/ion/radon/radon_in_haeusern.html/gebaeude_rn_landkreis.jpg

Kapitel 3–6

- www.bundesaerztekammer.de

Kapitel 8

- www.awmf.org/leitlinien/aktuelle-leitlinien.html
- www.ctisus.com

- www.dg-pharmakologie.de/
- <http://online.rote-liste.de>

Kapitel 9

- www.awmf.org

Bundesamt für Strahlenschutz: ► www.bfs.de

- www.bundesaerztekammer.de/: Richtlinien, Leitlinien und Empfehlungen

- <http://www.degro.org>

Deutsche Gesellschaft für Radioonkologie e. V.:

- www.degro.de

Deutsche Krebshilfe e. V.: ► <http://www.krebshilfe.de>

- www.ebm-netzwerk.de

Internetseite der Deutschen Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe: ► www.dggg.de Gesetze im Internet, Röntgenverordnung (RöV 1987):

- http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/r_v_1987/gesamt.pdf

Gesetze im Internet, Strahlenschutzverordnung (StrSchV 2001): ► http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/strlschv_2001/gesamt.pdf

<http://www.icru.org/home/uncategorised/history>

Internetseite des Deutschen Krebsforschungszentrum: ► www.krebsinformationsdienst.de

Internetseite der Deutschen Krebsgesellschaft: ► www.krebsgesellschaft.de

www.leitlinien.de

Pontax Schweiz AG: ► <http://www.pontax.ch/aktuelles.htm>

Internetseite des Eidgenössischen Bundesamt für Gesundheit: ► www.bag.admin.ch bzw. Merkblatt der Eidgenössischen Kommission für Impffragen, Bestell-Nr. 311.235.d

Kapitel 10

- www.bfs.de
- www.covidien.com
- www.nuklearmedizin.de

Kapitel 11

- ▶ <http://www.enzyklo.de>
- ▶ <http://definition-online.de>
- ▶ www.kinderps.uniklinikum-leipzig.de
- ▶ www.krankenhausthygiene.de
- ▶ <http://www.medizinische-fachangestellte.eu>
- ▶ www.rki.de

Kapitel 12

Patientenrechtegesetz: ▶ www.patienten-rechte-gesetz.de

Kapitel 13

- ▶ www.awmf.org
- ▶ www.dgrh.de

Kapitel 14

- ▶ www.awmf.de
- ▶ www.eanm.org
- ▶ www.nuklearmedizin.de

Kapitel 15

- ▶ www.awmf.de
- ▶ www.bfs.de
- ▶ www.eanm.org
- ▶ www.endokrinologie.net
- ▶ www.nuklearmedizin.de

Kapitel 16

- ▶ www.awmf.org
- ▶ www.leitlinienprogramm-onkologie.de

Kapitel 18

- ▶ www.aco-asso.at

- ▶ www.elarning-chirurgie.de
- ▶ www.nuklearmedizin.de
- ▶ www.rki.de

Kapitel 19

- ▶ www.awmf.de
- ▶ www.bfs.de
- ▶ www.eanm.org
- ▶ www.nuklearmedizin.de

Kapitel 20

- ▶ www.mammo-programm.de

Kapitel 23

- ▶ www.ado-homepage.de
- ▶ www.awmf.org
- ▶ www.leitlinienprogramm-onkologie.de

Kapitel 25

- ▶ www.bildungsurlaub.de
- ▶ www.cinahl.com
- ▶ www.cochrane.org
- ▶ www.diw-mta.de
- ▶ www.dvta.de
- ▶ www.mta-werden.de
- ▶ www.mta-r.de
- ▶ www.pubmed.com

Glossar technischer und physikalischer Begriffe

Absorption Ein Großteil der Schallwellen z. B. bei der Sonographie wird absorbiert, also in ein Medium vollständig aufgenommen (lat. absorptio = Aufsaugung).

Abstands-Quadrat-Gesetz Es besagt, dass mit einer Vergrößerung des Abstands (r) die Dosis/Intensität (I) im Quadrat abnimmt.

α -Zerfall Ein α -Teilchen, bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen, wird ausgesandt. Die frei werdende Energie bekommt das α -Teilchen als Bewegungsenergie (kinetische Energie) mit, deren Betrag bei jedem α -Teilchen gleich ist.

A-Mode Beim A-Mode handelt es sich um das älteste Verfahren bei der Sonographie. „A“ steht dabei für Amplitudenmodulation.

Anode Eine Anode ist eine Elektrode, die beispielsweise aus einem Vakuum freie Elektronen aufnimmt. Die Anode ist die Gegenelektrode zur Kathode. Zwischen diesen Elektroden wandern Ionen oder freie Elektronen. Die Kationen wandern zur Kathode und die Anionen zur Anode.

Äquivalentdosis Sie beschreibt die vom Körper aufgenommene Energiedosis multipliziert mit einem Bewertungsfaktor.

Äquivalentdosisleistung Äquivalentdosisleistung beschreibt die pro Zeiteinheit aufgenommene Äquivalentdosis.

Artefakt Artefakte sind Bildstörungen, die die Befundung negativ beeinflussen und auch unmöglich machen können.

Belichtungspunkte Wenn man am Röntgengenerator die Spannung (kV) oder die Ladungsmenge (mAs) für eine Röntgenaufnahme einstellen will, muss diese Einstellung nur in bestimmten Stufen erfolgen kann. Diese einzelnen Stufen werden Belichtungspunkte genannt. Die Werte dieser Stufen sind von der Röntgenröhre abhängig und können sich von Röntgenanlage zu Röntgenanlage unterscheiden.

Bequerel Ein Becquerel ist die Stoffmenge, in der sich 1 Zerfall pro Sekunde ereignet.

β^- -Zerfall Bei Atomkernen mit hohem Neutronenüberschuss wandelt sich ein Neutron in ein Proton, ein Elektron (Teilchen) und ein Antineutrino um. Die frei werdende kinetische Energie wird auf das β^- -Teilchen und das Antineutrino verteilt. Das β^- -Teilchen kann also Energiewerte zwischen 0 und Maximalenergie haben. Es entsteht eine kontinuierliche Energieverteilung, ein sog. Energiespektrum.

β^+ -Zerfall Bei Atomkernen mit Protonenüberschuss wandelt sich ein Proton in ein Neutron, ein Positron (β^+ -Teilchen) und

ein Neutrino um. Die frei werdende kinetische Energie wird auf das β^+ -Teilchen und das Neutrino ungleich verteilt, es entsteht ein kontinuierliches Spektrum. Das Positron hat als Antiteilchen nur eine kurze Lebensdauer und vereinigt sich innerhalb von Mikrosekunden mit einem freien Elektron der Umgebung. In Kernnähe wird die Masse beider Teilchen in zwei Photonen umgewandelt, die in einem Winkel von 180° und mit einer Energie von 511 keV je Quant auseinanderfliegen (Vernichtungsstrahlung). Der β^+ -Zerfall kann sich also nur ereignen, wenn die Energiedifferenz zwischen Mutter und Tochter 1022 keV beträgt.

Bildverstärker (BV) Der Bildverstärker wird in der Durchleuchtung eingesetzt und besteht aus einem evakuierten, also luftleeren Glas- oder Metallkolben. Die leicht gewölbte Eintrittsfläche der Röntgenstrahlen ist mit einem Leuchtstoff (Cäsiumjodid) beschichtet. Diese Schicht erzeugt beim Auftreffen der Strahlung ein Lumineszenzbild. Direkt auf diese Leuchtschicht ist eine Photokathode aufgebracht, die entsprechend des Lumineszenzbildes Elektronen aussendet, das sog. „Elektronenbild“.

Blendensystem Die Blendensysteme bestehen aus Blei und unterscheiden sich in ihrer Form und Funktion. Am Fokus befinden sich Blenden zur Einstellung des Fächerstrahls. Dies erlaubt die Kontrolle der auf den Patienten fallenden Dosis. Feste Blenden sorgen für das Nichtüberschreiten der maximal erlaubten Fächerbreite. Hinter dem Patienten, vor dem Detektorsystem, sind flexible Blenden vorhanden. Diese dienen der Schichtdickeregulierung. Auch die Streustrahlung wird reguliert. Die Streustrahlenabsorption erfolgt durch kleine Bleilamellen zwischen den kleinen Detektorelementen.

Blending Image Addition beider Bilder eines DS-CT. Ein „Mischbild“ oder „Mischenergiebild“ entsteht, welches einem 120 kV-Bild äquivalent ist.

B-Mode Der B-Mode (englisch brightness) ist das am häufigsten genutzte Verfahren in der Sonographie. Im 2D-Bild werden die verschiedenen Bildpunkte, je nach Stärke des reflektierten Signals, mit unterschiedlich hellen Graupunkten erfasst.

Brachytherapie Bei der Brachytherapie beträgt der Abstand der Strahlenquelle zum Körper weniger als 10 cm (brachy = kurz, über kurze Strecken).

Buckytisch Der Tisch, auf dem der Patient während der radiologischen Untersuchung (CT, konventionelles Röntgen) liegt, wird Buckytisch genannt. Die Besonderheit dieses Tisches ist, dass die Tischplatte in alle Richtungen verschoben werden kann.

CE-Angiographie Kontrastangehobene (aus dem Englischen: contrast enhanced) MR-Angiographie. Hierbei werden eine

native Sequenz und eine Kontrastmittelunterstützte Sequenz akquiriert, die voneinander subtrahiert werden.

Charakteristische Röntgenstrahlung Sie entsteht zusätzlich zur Röntgenbremsstrahlung und ist ein sog. Linienspektrum, welches sich ausschließlich nach dem Anodenmaterial richtet. Es ist also für dieses charakteristisch.

Chemische Reinheit In den Monographien über radioaktive Arzneimittel sind die Anforderungen an die chemische Reinheit durch Spezifizierung von Grenzwerten für die chemischen Verunreinigungen festgelegt.

Comptoneffekt Beim sog. Comptoneffekt gibt das Photon nur einen Teil seiner Energie an das Hüllenelektron einer äußeren Schale ab und wird mit seiner Restenergie in veränderter Richtung gestreut. Sekundärelektronen niedriger Energie werden in Seitrichtung emittiert, solche höherer stärker in Vorwärtsrichtung.

Detektor Die primäre Aufgabe eines Detektors besteht darin, die durch ein Objekt geschwächte Röntgenstrahlung zu registrieren bzw. zu messen (also die Strahlung, die durch den Patienten durchgedrungen ist), und muss sich demnach hinter dem durchstrahlten Objekt befinden.

Diffraction Diffraction (Beugung) beschreibt die Ablenkung von Wellen an einem Hindernis, die zur Entstehung neuer Wellen am Hindernis und deren Interferenz (Überlagerung) führt.

Digitale Subtraktionsangiographie (DSA) Die digitale Subtraktionsangiographie, kurz DSA, beschreibt das Verfahren, das zur Nachverarbeitung von Angiographiebildern eingesetzt wird. Hierbei wird ein natives Bild von dem Kontrastangehobenen Bild subtrahiert, sodass nur das Kontrastmittel als Bildinformation verbleibt.

Doppelkontrast Unter Doppelkontrast versteht man die Durchführung einer Durchleuchtung mit einem positiven KM (z.B. Barium) und einem negativen KM (z.B. Cellulose, Wasser, CO₂).

Dopplersonographie 1842 beschrieb der Physiker Christian Johann Doppler den nach ihm benannten Doppler-Effekt. Wenn sich Schallquelle und Reflektor aufeinander zubewegen, werden die Schallwellen gebündelt und erreichen den Empfänger mit einer höheren Frequenz. Die Dopplersonographie wird genutzt, um Flussgeschwindigkeiten zu bestimmen.

Dosimeter Dosimeter sind Messgeräte zur Messung der Strahlendosis im Rahmen des Strahlenschutzes.

Dosisflächenprodukt (DFP) DFP ist das Produkt aus Dosis und Fläche. Es wird bei allen Röntgenuntersuchungen am Rasterwandgerät oder auf dem Buckytisch sowie bei Durchleuchtungsuntersuchungen und in der Angiographie erfasst.

Dosislängenprodukt (DLP) Das Dosislängenprodukt (DLP) ist das Äquivalent des Dosisflächenproduktes für die Computertomographie. Das Produkt wird gebildet aus der Dosis in einer Schicht, dem gewichteten CTDI (Computed Tomography Dose Index) und der Anzahl der Schichten.

Dosismodulation Dosismodulation bedeutet die Anpassung von kV und mAs an das durchstrahlte Objekt. Beispielsweise benötigt man bei einem CT-Abdomen für den Oberbauch weniger Dosis als für die Beckenpartie, sodass hier eine Hochregulierung der Parameter erforderlich ist.

Dosis-Quanten-Effektivität Ein Wert für die Dosisempfindlichkeit einer Röntgenanlage ist die Dosis-Quanten-Effektivität. Je größer der DQE-Wert, desto weniger Strahlung wird benötigt, um auch feine Strukturen darzustellen.

Dosis-Wirkungs-Beziehung Durch die Dosis-Wirkungs-Beziehung wird beschrieben, wie viel von einem Arzneimittel nötig ist, um eine Wirkung zu erzielen. Aber auch: Verstärkt sich die Wirkung durch eine höhere Dosis?

Drehgehäusestrahler Für den CT wurde ein neuer Röntgenstrahler gebaut, der sog. Drehgehäusestrahler. Hier rotiert nicht nur die Anode, sondern das gesamte Gehäuse, und somit auch die Kathode. Dadurch, dass die Anode die Außenwand des Gehäuses bildet, findet eine direkte Kühlung statt. Demnach verlängert und verbessert sich die Fähigkeit der Röhrenleistung.

Dual-Source-CT (DS-CT) Beim DS-CT sind in der Gantry zwei Röhren im 90°-Winkel mit zwei dazugehörigen, gegenüberliegenden Detektoren vorhanden. Beide Röhren arbeiten parallel, jedoch mit unterschiedlichen Energien.

Echoplanare Sequenz Bei der echoplanaren-Sequenz (Epi) wird bei der MRT nach einem Anregungspuls der Frequenzkodiergradient entsprechend der Matrixgröße positiv und negativ geschaltet, während der Phasenkodiergradient niedrig positiv mitgeschaltet ist. Man kann mit der echoplanaren Sequenz Diffusionsstörungen sichtbar machen.

Echozeit (TE) Die Echozeit (TE) spielt bei der MRT eine Rolle und ist definiert als die Zeit zwischen Anregung und maximalem Signalempfangs.

Effektive Dosis Die effektive Dosis berücksichtigt die Empfindlichkeit der einzelnen Organe. Ermittelt wird die effektive Dosis über die Summe der mit den Gewebewichtungsfaktoren multiplizierten Organdosis.

Einfallsdosis Hiermit wird die Dosis in Gy beschrieben, die man „frei Luft“ ohne Streukörper misst.

Elektroneneinfang Der zum β^+ -Zerfall konkurrierende Zerfallsprozess ist der sog. Elektronen-Einfang. Ist die Zerfalls-

nergie bei Protonenüberschuss kleiner als 1022 keV, so tritt ausschließlich dieser auf.

Energiedosis Mit Energiedosis wird die absorbierte Strahlenergie in Bezug auf die bestrahlte Masse beschrieben. Einheit: Gy

Enhancement Unter Enhancement wird die Anreicherung eines KMs in den Organen oder Geweben verstanden. Es ist vom jeweiligen Organ oder der jeweiligen Gewebsstruktur abhängig und lässt teilweise auf eine bestimmte Struktur rückschließen.

Faltungskern s. Kernel

Fensterung Aufgrund der begrenzten Wahrnehmung des menschlichen Auges wird mithilfe der Fensterung eine Eingrenzung der Grauwerte durchgeführt.

FLAIR-Sequenz Die FLAIR-Sequenz (Fluid Attenuated Inversion Recovery) unterdrückt bei einer im MRT T2-gewichteten Sequenz Liquor, sodass nur Ödeme oder andere Flüssigkeitsläsionen hell dargestellt werden.

Fotoabsorption Trifft Strahlung auf einen Körper, werden diese Strahlen teilweise absorbiert. Man bezeichnet diese Absorption als Fotoabsorption.

Fraktionierung Da Tumorzellen eine schlechte DNA-Reparaturfähigkeit haben, verteilt man die Strahlensamtdosis in der Strahlentherapie auf mehrere kleine Einzeldosen, man fraktioniert sie also.

Frequenzkodiergradient Um bei der MRT die aus der angeregten Schicht resultierenden Informationen räumlich zuzuordnen zu können, müssen zwei Gradienten-Schaltungen erzeugt werden. Eine davon ist der Frequenzkodiergradient, welcher während der Messung des Signals geschaltet wird.

Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) Funktionelle MR-Bildgebung des Gehirns, bei der der Sauerstoffverbrauch in aktivierten Gehirnregionen nachgewiesen werden kann. Dieses Verfahren wird insbesondere vor neurochirurgischen Eingriffen eingesetzt, um wichtige Hirnareale bei einer Operation nicht zu verletzen.

Gammakamera Die Gammakamera ist ein Detektorsystem, das ein dreidimensionales Aktivitätsverteilungsmuster im Patienten als zweidimensionales Bild (Szintigramm) wiedergibt.

Gantry Sie wird als das „Herz“ des Computertomographen bezeichnet, denn unter der Abdeckung befinden sich Röntgenröhre, Blendensystem, Detektorsystem, Kühlsystem sowie mechanische Elemente. In manchen Modellen befindet sich auch der Generator in der Gantry.

γ-Strahlung Siehe „Innere Konversion“

Generator Die wichtigste Aufgabe des Generators ist es, kontinuierlich die gewünschte Leistung zu gewähren. Es müssen z. B. im CT Spannungen von 80–140 kV erzeugt werden. Auch die Röhrenstromerzeugung (mAs) muss stabil und schnell erfolgen.

Gradationskurve Die Lichtempfindlichkeit eines Röntgenfilms ist auf einen bestimmten Bereich eingeschränkt. Nur in diesem Bereich reagiert der Film auf die Strahlung. Man spricht von der sog. Gradationskurve (oder auch S-Kurve) des Röntgenfilms.

Gradienten-Echo-Sequenz Die Gradienten-Echo-Sequenz ist bei der MRT von Bedeutung. Der Anregungspuls ist hierbei kleiner 90° ist und statt eines 180° Refokussierungspuls wird ein gegenpoliger Frequenzgradient (erst mit negativer, dann mit positiver Polarität) geschaltet. Die Gradienten-Echo-Sequenzen zeichnen sich durch ihre kurze Akquisitionszeit aus.

Gradientenspule Die Gradientenspule ist ein wichtiges Bauteil des MRT und besteht aus drei paarweise angelegten Spulenteilen, die in alle drei Raumrichtungen (x-, y- und z-Achse) geschaltet werden können. Dabei fließt ein starker Strom (bis zu 500 A) in sehr kurzer Zeit durch die Spule. Hierdurch gerät die Spule in Vibration, was die lauten Klopfgeräusche im Kernspintomographen verursacht. Durch das Überlagern eines weiteren Magnetfeldes, verursacht durch die Gradientenspule zum Hauptmagnetfeld, kann hierdurch eine leichte räumliche Veränderung der Larmorfrequenz erreicht werden – was für die Ortskodierung wichtig ist.

Heel-Effekt Durch die spezielle Verteilung der Röntgenstrahlung an der Anode (Herz'scher Dipol) und durch die Selbstabsorption an der Abschrägung der Anode kommt es dazu, dass es innerhalb des Feldes zu einer Intensitätsverteilung kommt. Dieses Phänomen nennt man den Heel-Effekt. Genutzt wird der Heel-Effekt bei der Mammographie.

Hounsfieldskala Bei computertomographischen Untersuchungen werden die Dichtewerte einzelner Strukturen und Objekte gemessen und zu einem Bild gerechnet. Die unterschiedlichen Dichtewerte werden in unterschiedlichen Graustufen dargestellt. Diese skalierten Werte werden nach dem „Vater“ des CT benannt, Hounsfieldunits (HU), und können auf einer Skala vergleichend abgelesen werden.

IGRT Vor der ersten Sitzung einer Strahlentherapie und in gewissen Abständen während der Behandlung wird überprüft und dokumentiert, dass tatsächlich exakt so bestrahlt wird, wie im berechneten Plan vorgegeben. Wenn diese Verifikationsaufnahme direkt vor der Bestrahlung erfolgt und nötige Korrekturen sofort vorgenommen werden, spricht man von IGRT (engl. image guided radiotherapy, bildgeführte Radiotherapie).

IMRT Die IMRT (Intensitätsmodulierte Radiotherapie) stellt ein weiterentwickeltes Verfahren der konformen Bestrahlung dar.

lung dar. Mit der IMRT ist es möglich, aus einer Vielzahl von verschiedenen Winkeln, bzw. über viele verschiedene Gantriespositionen die Dosis noch exakter auf den Patienten einzustrahlen.

Inkrement Über das Inkrement oder auch Tischvorschub legt der Untersucher fest, wie stark die Überlappung bei der Rekonstruktion, der einzelnen Schichten einer CT-Untersuchung sein soll.

Innere Konversion Nach Kernumwandlung verbleibt nicht selten eine Restenergie für kurze Zeit im Tochterkern. Man bezeichnet diesen Nuklidzustand als angeregt oder metastabil. Diese Restenergie kann über zwei miteinander konkurrierende Prozesse abgegeben werden. Die bei Abregung des Kerns frei werdende Energie kann aber auch als elektromagnetische Strahlung in Form von Gammaquanten gleicher bzw. unterschiedlicher Energie ausgesandt werden; diesen Vorgang bezeichnet man als innere Konversion oder Gammastrahlung.

Ionendosis Sie beschreibt die elektrische Ladung der Ionen gleichen Vorzeichens, die durch ionisierende Strahlung in einer bestimmten Masse entstehen. Einheit: C/kg

IR-Sequenz Bei einer Inversion-Recovery-(IR-)Sequenz wird bei der MRT vor dem 90° Anregungspuls ein 180° Inversionspuls eingestrahlt. Je nach Gewebeart, die man jetzt unterdrücken möchte, wird der 90° Anregungspuls erst eingeschaltet, sobald das Gewebe, welches kein Signal abgeben soll, im Nulldurchgang ist und somit kein bis nur wenig Signal abgibt. So kann durch Wahl der richtigen Inversions-Zeit (TI) z. B. Fett unterdrückt werden. Diese Sequenzen sind als STIR (Short TI Inversion Recovery) bzw. TIRM (Turbo Inversion Recovery Measurement) bekannt.

Isozentrum Das Isozentrum ist bei der Strahlentherapie der Punkt, der auf dem Zentralstrahl in 100 cm Abstand zum Target liegt und in dem sich die Achsen von Gantry, Kollimator und Tisch kreuzen.

Iterative Rekonstruktion Dieser Rechenprozess spielt eine wichtige Rolle in der modernen Computertomographie. Bislang waren die Bilder mit weniger Dosis mit zu viel Rauschen verbunden. Mit der iterativen Rekonstruktion wird das Rauschen „weggerechnet“, der Bildeindruck bleibt gleich. Im besten Fall wird je nach Untersuchungsregion und -objekt eine Dosisreduktion von 50–60 % erzielt.

Kathode Eine Kathode ist eine Elektrode, an der Elektronen einem System zugeführt werden. Die Kathode ist die Gegenelektrode zur Anode. Zwischen diesen Elektroden wandern Ionen oder freie Elektronen. Die Kationen wandern zur Kathode und die Anionen zur Anode.

Kernel Der unter Kernel (auch Faltungskern) bekannte Parameter ist ein Algorithmus und dient bei der Rekonstruktion

zur Hervorhebung bestimmter Strukturen. Mit einem scharfen Faltungskern werden die Kanten der knöchernen Strukturen und Lungenstrukturen im Lungenfenster betont, sodass diese genau abzugrenzen sind und beurteilt werden können.

Kollimator Der Kollimator sorgt in der Nuklearmedizin dafür, dass nur Gammaquanten einer bestimmten Flugrichtung durchgelassen werden und besteht aus vielen Bleisepten, die durch kleine Bohrungen voneinander getrennt sind. Generell dienen Kollimatoren, auch im CT, der Fokussierung von Strahlung und Abschirmung von Streustrahlung.

Konformale Bestrahlung Die klassische konformale Bestrahlungstechnik ist das Mehrfelder-Verfahren, bei dem die Felder optimal der Zielkontur angepasst werden.

Kontamination Hierunter versteht man eine (ungewollte) Verunreinigung der Umgebung (einschl. der Luft), von Gegenständen oder Personen mit radioaktiven Stoffen.

K-Strahlung Trifft ein Elektron auf ein Wolframatom, kann dort ein Elektron aus der K-Schale herausgeschlagen werden. Diese freie Stelle in der K-Schale wird dann durch ein freies Elektron oder ein Elektron aus einer äußeren Schale (L- oder M-Schale) wieder aufgefüllt. Da das Elektron auf der K-Schale weniger Bindungsenergie benötigt als auf der äußeren, wird diese Energie in Form von Energiequanten freigesetzt. Diese Strahlung nennt man K-Strahlung.

Längsmagnetisierung (M_z) Entlang des Magnetfeldes baut sich die sog. Längsmagnetisierung M_z auf. Während sich etwa 1.000.000 Protonen antiparallel ausrichten, richten sich etwa 1.000.007 Protonen parallel aus. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die antiparallele Ausrichtung mehr Energie benötigt. Der Überschuss von 7 Protonen, die sich parallel zum Magnetfeld ausgerichtet haben, trägt zur Bildgebung bei und entspricht der Längsmagnetisierung M_z . Je stärker das Magnetfeld, desto mehr Protonen richten sich parallel statt antiparallel aus und umso stärker ist die Längsmagnetisierung M_z .

Linearbeschleuniger Der Linearbeschleuniger besteht aus einem Röntgengerät, das mit einem Beschleunigungsrohr als zusätzlicher Vorrichtung die Strahlen mit höherer Energie ausstattet. Man nennt sie ultraharte Röntgenstrahlung oder auch hochenergetische Photonenstrahlung, mit der es möglich ist, tiefer gelegene Tumoren zu erreichen.

Lorentzkraft Der Grund für den „Krach“ bei der Kernspintomographie liegt genau hier begründet: In einer stromfließenden Leiter wirkt eine mechanische Kraft (die sog. Lorentzkraft), dabei verformen sich Gradientenspulen und knallen auf die umliegenden Bauteile.

Matrix Ein digitales Bild besteht aus vielen einzelnen Bildpunkten (Pixeln). Diese sind in Zeilen und Spalten angeordnet – diese Anordnung nennt man eine Pixelmatrix oder kurz Matrix.

M-Mode Mit dem M-Mode (von englisch motion) kann in der Sonographie das zeitliche Verhalten eines Gewebes abgebildet werden.

Modulations-Transfer-Funktion Sie bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, die Röntgenstrahlen so genau wie möglich wiederzugeben.

Negative Kontrastmittel Substanzen mit geringer Dichte als die darzustellende Umgebung bezeichnet man als negative Kontrastmittel (Gase, Wasser, Methylcellulose, Sorbitol).

Oberflächendosis Neben der Einfallsdosis ergibt die Rückstreuung aus dem bestrahlten Objekt, also z. B. dem Patienten, als gesamtes die Oberflächendosis.

Organdosis Die Organdosis steht für die von einem Organ oder Körperteil aufgenommene Energiedosis in Gy, multipliziert mit einem Strahlungswichtungsfaktor.

Organs at risk (OAR) Damit sind Organe und Gewebe gemeint, die nicht das Ziel einer Bestrahlung sind, aber zwangsläufig im Bestrahlungsvolumen liegen und darauf reagieren können.

Ortsauflösung Ein Messwert für die Fähigkeit der Detaildarstellung eines Aufnahmesystems ist die Ortsauflösung. Sie bezeichnet den kleinsten Abstand, der zwischen zwei Objekten gemessen werden kann. Die Maßeinheit für die Ortsauflösung ist Linienpaare pro mm (lp/mm) und wird als Nyquist-Grenzfrequenz bezeichnet.

Ortsdosis Hierbei wird an einem bestimmten Ort die Äquivalentdosis für Weichteilgewebe gemessen.

Paarbildungseffekt Bei hohen Photonenenergien ab 1022 keV kommt es zum sog. Paarbildungseffekt. Hier findet die Wechselwirkung nicht in der Hülle, sondern im starken elektrischen Feld des Atomkerns statt. In Kernnähe kann aus dem Photon ein Elektronen-Positronen-Paar, bestehend aus einem negativ geladenen Elektron und einem positiv geladenen Positron, entstehen. Der Atomkern bleibt dabei unverändert.

Parallele Akquisitionstechnik (PAK) Die parallele Akquisitionstechnik ist eine MRT-Technik zur Messzeitverkürzung. Hierbei wird mittels Mehrkanalspulen (Matrixspulen) nicht jede K-Raumzeile ausgelesen. Jeder Spulenkanal empfängt die in seiner Nähe befindlichen Signale.

Partikeltherapie Die Partikeltherapie, zu der Protonen und Schwerionen gehören, hat sich in den letzten Jahrzehnten weltweit in der Radioonkologie etabliert und dient der Tumorbildung.

Personendosis Gemessen an einer repräsentativen Stelle der Körperoberfläche stellt die Personendosis die Äquivalentdosis für Weichteilgewebe dar.

Pharmakodynamik Die Pharmakodynamik beschreibt, welche Wirkung ein Stoff an seinem Wirkort entfaltet.

Pharmakokinetik Die Pharmakokinetik gibt Aufschluss über die Umwandlungsprozesse, die ein Stoff im gesamten durchläuft.

Phasenkodiergradient Um bei der MRT die aus der angeregten Schicht resultierenden Informationen räumlich zuordnen zu können, müssen zwei Gradienten-Schaltungen erzeugt werden. Dazu zählt der Phasenkodiergradient, der genau zwischen Anregung und Messung des Signals geschaltet wird.

Phasenkontrastangiographie (PC-A) Die Phasenkontrastangiographie ist eine MRT-Technik, wie sie bei der Darstellung vom langsam fließenden Blut, wie z. B. bei der Sinusvene, zur Anwendung kommt. Außerdem wird diese Technik zur Darstellung von Flussgeschwindigkeiten genutzt, wie beispielsweise in der Bildgebung des Herzens.

Photoeffekt Trifft Photonenstrahlung auf Materie, so kann die gesamte Energie auf ein Elektron der Atomhülle übertragen werden (Photoabsorption). Das Hüllenelektron wird entweder auf eine Schale höherer Energie angehoben (Anregung) oder aus der Atomhülle herausgeschlagen (Ionisation). Letzteres ereignet sich dann, wenn die Energie des Photons die Bindungsenergie des Elektrons an den Kern übersteigt. Die vorhandene Restenergie gibt es dem durch Photoeffekt herausgelösten Elektron (Photoelektron) als kinetische Energie mit auf den Weg.

Der freie Platz der Atomhülle wird durch ein Elektron aus einer energetisch höheren Schale aufgefüllt, die frei werdende Energie in Form von charakteristischer Röntgenstrahlung abgegeben.

Physikalische Halbwertszeit Sie bezeichnet die Zeitspanne, in der die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Atome zerfallen ist.

Piezoeffekt In Sonographiegeräten werden die Wellen über den sog. reziproken piezoelektrischen Effekt an einem Quarzkristall erzeugt. Der Festkörper dient als Sender und Empfänger der Schallwellen. Der Piezoeffekt entsteht durch die Kontraktion und Elongation – also Stauchung und Ausdehnung – des Kristalls.

Pitchfaktor (p) Der Pitchfaktor bestimmt, ob eine Datenakquisition überlappend ($p < 1$), lückenlos ($p = 1$) oder mit Datenaussparung, sog. Gap, ($p > 1$) erfolgt und reguliert nach Wahl die Schnelligkeit des Tischvorschubs und somit auch die Untersuchungsdauer.

Pixel Mit Pixel werden die einzelnen Farbwerte einer digitalen Rastergrafik bezeichnet sowie die Flächenelemente, die zur Erfassung oder Darstellung eines Farbwerts nötig sind.

Pixelshift Bei der digitalen Subtraktionsangiographie (DSA) ist es für eine gute Subtraktion wichtig, dass sich das Maskenbild möglichst gut auf die Folgebilder „passt“, d. h., dass sich der Bildbereich nicht verändert und der Patient sich nicht bewegt. Sollte sich der Patient doch bewegt haben, kann die Maske noch entsprechend verschoben werden. Man bezeichnet diese Verschiebung auch als Pixelshift oder Pixelverschiebung.

Positive Kontrastmittel Substanzen mit höherer Dichte als die darzustellende Umgebung bezeichnet man als positive Kontrastmittel (Unterscheidung in wasserlöslich, wasserunlöslich und ölhaltig).

Post Processing Unter Post-Processing versteht man die Nachbearbeitung der erfassten Daten in 2D- und/oder 3D-Darstellungen.

Radioaktivität Die Eigenschaft der spontanen Kernumwandlung unter Aussendung von Strahlung wird als Radioaktivität bezeichnet. Die Einheit der Radioaktivität ist das Becquerel (Bq).

Radiochemische Reinheit Das in Prozent ausgedrückte Verhältnis der Radioaktivität des Radionuklids in der gewünschten chemischen Form, bezogen auf die Gesamtradioaktivität des Radionuklids im radioaktiven Arzneimittel, wird als radiochemische Reinheit bezeichnet.

Radioimmuntherapie Bei der Radioimmuntherapie werden Antikörper (hier CD20-Oberflächenantigen) radioaktiv markiert.

Radiosynoviorthese (RSO) Die RSO ist eine gezielte Behandlung einer chronischen Entzündung der Gelenkinnenhaut (Synovialitis). Üblicherweise wird das radioaktive Jod (^{131}I -NaI) in Kapselform eingenommen.

Reflexion Reflexion bedeutet, dass Einfallswinkel und Ausfallswinkel – z. B. bei den Schallwellen während der Sonographie – gleich sind.

Refraktion Durch die Refraktion (Brechung) werden die Schallwellen bei der Sonographie beim Eintritt in ein anderes Medium abgelenkt.

Repetitionszeit (TR) Die Repetitionszeit (TR , „T“ für time) ist die Zeit zwischen zwei Anregungsimpulsen bei der MRT. Die TR ist für den Kontrast besonders wichtig, denn je mehr Zeit zwischen den einzelnen Anregungspulsen verstreicht, desto mehr baut sich die Longitudinalmagnetisierung M_z wieder auf. Je mehr Spins wieder in der Longitudinalmagnetisierung M_z bei dem Anregungsimpuls zur Verfügung stehen, umso mehr Signal bekommt man.

Roadmapping Roadmapping ist ein Begriff der digitalen Subtraktionsangiographie: Da das Kontrastmittel mit der Injektion normal im Gefäß weiterfließt und durch das Blut verdünnt

wird, wird während der Serienaufnahme nur immer ein bestimmter Bereich der Gefäße sichtbar. Größere Gefäße können so nicht in ihrer gesamten Länge beurteilt werden. Beim Roadmapping werden mehrere Subtraktionsbilder aufsummiert. Das Verfahren ähnelt der Maximum-Intensitäts-Projektion der CT- oder MR-Untersuchungen und liefert eine komplette Darstellung des Gefäßes. So sind nicht nur der Hauptstamm des Gefäßes, sondern auch alle Nebenarme im Bild sichtbar.

Röhrenspannung Sie wird zwischen Kathode und Anode angelegt und bestimmt die Durchdringungsfähigkeit der Strahlung durch die Materie.

Röhrenstrom-Zeit-Produkt (mAs) Dieses ist wichtig für den Kontrast und für die Ortsauflösung. Je dicker das durchstrahlte Objekt, desto mehr mAs wird benötigt.

Röntgenbremsstrahlung Sie entsteht durch das Abbremsen der Elektronen am Kern, in den sie nicht eindringen können.

Röntgenstrahler Der Röntgenstrahler ist ein Vakuumgefäß mit einer Anode und Kathode zur Erzeugung von Röntgenstrahlen.

Scanzeit (s) Sie gibt die eigentliche Untersuchungszeit an. Sie ist bei der Computertomographie abhängig von der Scanstrecke, vom Pitch und der Rotationszeit. Je länger die Scanzeit, desto langsamer die Untersuchung und somit höher die Dosis. Im MRT wird mit Scanzeit die Messzeit der jeweiligen Sequenz bezeichnet.

Selektive interne Radiotherapie (SIRT) Mit der SIRT können inoperable primäre Lebertumore oder inoperable Metastasen anderer Tumore therapiert werden. Hierbei werden kleine – mit ^{90}Y markierte – Glas- oder Kunstharzpartikel intraarteriell in die Leber gespritzt.

Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) Dieses Verhältnis ist das Qualitätskriterium der CT-Bilder. Es ist messbar und sollte zwischen 12–15 HU liegen. Die Messung erfolgt im Randbereich des CT-Bildes, außerhalb des Objekts, praktisch in der Luft.

Single-Shot-Sequenzen Bei den Single-Shot-Sequenzen wird in der MRT nach einem Anregungspuls der gesamte K-Raum ausgelesen. Diese Sequenzen haben entsprechend kurze Akquisitionszeiten.

SPECT SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)-Kameras werden in der Nuklearmedizin eingesetzt und bestehen i. d. R. aus zwei bis drei Messköpfen, die an einem Ringsystem laufen. Zur Bestimmung der dreidimensionalen Abbildung der Nuklidverteilung in einem Objekt erfasst man mit einer Gammakamera zwei-dimensionale Bilddaten.

Spin Unter normalen Bedingungen rotieren die Protonen im Körper rein zufällig in eine Richtung. Diese Eigenschaft des Rotierens nennt man auch Spin.

Spin-Gitter-Relaxation s. T1-Relaxation

Spin-Spin-Relaxation s. T2-Relaxation

SPIR-Sequenz Im Gegensatz zur STIR-Sequenz wird bei einer SPIR-Sequenz bei der MRT nur ein frequenzselektiver Inversionspuls für Fett vor dem Anregungspuls geschaltet. Dadurch wird das Signal im Gegensatz zur STIR-Sequenz verbessert. Diese Art der Fettunterdrückung ist empfindlich für Magnetfeldinhomogenitäten.

Stereotaxie Der Begriff Stereotaxie leitet sich vom Griechischen ab, „Stereo“ bedeutet räumlich und „taxis“ ist die Anordnung. Eingesetzt wird diese Technik z. B. in der Radiotherapie, die hierbei räumlich gezielt und hoch präzise appliziert wird.

STIR-Sequenz Bei einer Inversion-Recovery-(IR-)Sequenz wird bei der MRT vor dem 90° Anregungspuls ein 180° Inversionspuls eingestrahlt (Abb. 6.25). Je nach Gewebeart, die man jetzt unterdrücken möchte, wird der 90° Anregungspuls erst eingeschaltet, sobald das Gewebe, welches kein Signal abgeben soll, im Nulldurchgang ist und somit kein bis nur wenig Signal abgibt. So kann durch Wahl der richtigen Inversions-Zeit (TI) z. B. Fett unterdrückt werden. Diese Sequenzen sind als STIR (Short TI Inversion Recovery) bzw. TIRM (Turbo Inversion Recovery Measurement) bekannt.

Streukörper Streukörper sind Phantome oder auch Patienten gemeint, die zu einer Streuung der Strahlung führen würden.

Streustrahlenraster Zur Filterung der Streustrahlung benutzt man Streustrahlenraster. Raster sind Platten, die abwechselnd aus Bleilamellen und durchlässigem Material bestehen. Durch diese Anordnung gelangen nur die Strahlen auf den Detektor, die senkrecht auf diese Platte treffen.

Synchrotron Das Synchrotron wird in der Protonentherapie eingesetzt, um Teilchen zu beschleunigen.

T1-Relaxation Die Longitudinalmagnetisierung M_z baut sich nach dem Einstrahlen des HF-Pulses langsam wieder auf, während die Transversalmagnetisierung M_{xy} abnimmt. Dabei geben die Protonen Energie an die Umgebung (dem sog. Gitter) ab, was sowohl als Spin-Gitter-Relaxation oder auch als T1-Relaxation bezeichnet wird.

T2-Relaxation Nach dem Einstrahlen des HF-Pulses sind die Protonen alle synchronisiert bzw. in Phase. Das Signal ist jetzt ganz stark. Jedoch dephasieren die Protonen ganz schnell wieder, weil die Protonen sich gegenseitig beeinflussen. Es werden kleine Magnetfelder erzeugt, die die Protonen unterschiedlich schnell präzedieren lassen. Dieser Vorgang wird auch als Spin-Spin-Relaxation oder T2-Relaxation bezeichnet.

Teletherapie Die Strahlung wird extern und über eine Distanz von über 80 cm auf den Körper appliziert (griech. „tele“: weit, über lange Strecken).

Tiefendosis Die Tiefendosis beschreibt die Dosis in einer bestimmten Körpertiefe, von der Einstrahloberfläche aus gemessen.

TIRM-Sequenz Bei einer Inversion-Recovery-(IR-)Sequenz wird bei der MRT vor dem 90° Anregungspuls ein 180° Inversionspuls eingestrahlt (Abb. 6.25). Je nach Gewebeart, die man jetzt unterdrücken möchte, wird der 90° Anregungspuls erst eingeschaltet, sobald das Gewebe, welches kein Signal abgeben soll, im Nulldurchgang ist und somit kein bis nur wenig Signal abgibt. So kann durch Wahl der richtigen Inversions-Zeit (TI) z. B. Fett unterdrückt werden. Diese Sequenzen sind als STIR (Short TI Inversion Recovery) bzw. TIRM (Turbo Inversion Recovery Measurement) bekannt.

TOF-Sequenz Die Time-of-Flight-Sequenz ist eine MT-A-Technik, die besonders ihre Anwendung in der Darstellung der intrakraniellen Gefäße findet. Die TOF-Sequenz nutzt den Inflow-Effekt. Dabei wird das stationäre Gewebe unterdrückt, indem die Anregungspulse schnell hintereinander geschaltet werden. Somit wird eine Längsmagnetisierung des stationären Gewebes verhindert.

Tomotherapie Bei der Tomotherapie wird eine Kombination aus Linearbeschleuniger und CT eingesetzt. Das Gerät besteht aus einem breiten Ring, auf dem sich der Linearbeschleuniger kreisförmig bewegt (genau wie die CT-Röntgenröhre in der Diagnostik) und Strahlen aussendet. Zusätzlich wird der Behandlungstisch kontinuierlich vorwärts durch den Ring geschoben. Im Ring ist gegenüber der Strahlenquelle ein CT-Detektor integriert. Die Behandlung erfolgt in intensitätsmodulierter Weise, d. h. der Strahl wird durch Schlitz- und Multileaf-Lamellen variiert.

Topogramm Der eigentliche Beginn einer jeden Untersuchung ist die Aufnahme eines Übersichtsbildes, dem Topogramm, auch Scout oder Surview genannt. Auf dieser Übersicht erfolgt die Eingrenzung des zu untersuchenden Bereichs.

Transversale Magnetisierung (M_{xy}) Um bei der MRT ein Signal im Körper messen zu können, muss ein Hochfrequenzimpuls in Resonanz gleich der Larmorbeziehung geschaltet werden, sonst reagieren die Protonen nicht. Außerdem muss der HF-Impuls lang genug sein, um die Protonen aus der Längsmagnetisierung M_z in die transversale Magnetisierung M_{xy} umklappen zu lassen. Wenn dann an der angeregten Stelle eine Empfangsspule aufliegt, kann dort ein „MR-Signal“ empfangen werden.

VMAT Die Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) ist eine Weiterentwicklung der IMRT-Technik: Die Anzahl der kleinen dosismodulierten Felder nimmt zu, die in vielen unterschiedlichen Gantry-Positionen bestrahlt werden. Dazu bleibt die Gantry nicht mehr auf den einzelnen Positionen stehen, sondern bewegt sich im Kreis oder Halbkreis. Die Bestrahlungsdauer verkürzt sich deutlich.

Voxel Ein Voxel entspricht einem Würfel und setzt sich zusammen aus Pixel $\times$ Schichtdicke.

z-Interpolation Dieses Messprinzip erfolgt durch eine Software im Hintergrund nach bzw. während einer Spiralakquisition und ermöglicht erst die lückenlose Datenerfassung.

z-sharp-Technologie Spring-Fokus, auch Flying Focal Spot oder double z sampling genannt, ist eine neuartige Technologie, die durch ein elektromagnetisches Feld die Elektronenbahn ablenkt. Dadurch entstehen zwei Brennflecke auf der Anode. Der Abstand beider Brennflecke beträgt die Hälfte der dünnsten angewählten Kollimation, sodass eine Versetzung, aber auch eine, um die Hälfte überlappende Akquisition erfolgt.

Zyklotron Das Zyklotron wird in der Protonentherapie eingesetzt, um Teilchen zu beschleunigen.

Stichwortverzeichnis

A

- Abmahnung, schriftliche 621
- Abstandshalter 287, 583
- Abstands-Quadrat-Gesetz 77
- Adenosin 214
- Akquisitionszeit 165
- Aktivimeter 291, 306
 - Qualitätskontrolle 291
- Akustikusneurinom 454
- ALARA-Prinzip 52
- Aliasing 170
- Alpha-Zerfall 33
- Analgetika 191
- Analkarzinom 503
- Anamnese 323, 402
 - Eigenanamnese 402
 - Familienanamnese 402
 - Fremdanamnese 402
 - Sozialanamnese 402
- Anatomie 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 366, 367, 369, 370, 372, 373, 375, 377, 378, 383, 384, 385, 386, 388, 390, 391, 395, 397, 399, 473
 - Arterienverlauf 399
 - Bandfugen 363
 - Bauchspeicheldrüse 390
 - Becken 377
 - Begriffe, grundlegende 357, 358, 359, 360
 - Betrachtungsweisen 361
 - Bewegungsbegriffe 356
 - Brustdrüse 367
 - Brustkorb 366
 - Dickdarm 385
 - Dünndarm 385
 - Extremität, obere 364
 - Extremität, untere 377
 - Fuß 383
 - Gallenblase 386
 - Gelenkarten 363
 - Geschlechtsorgane, männliche 391
 - Geschlechtsorgane, weibliche 391
 - Gewebearten 362
 - Hand 375
 - Herz 367
 - Hüftgelenk 377
 - Knie 378
 - Knochenaufbau 363
 - Knochenmark 363
 - Knochentypen 363
 - Lagebezeichnungen 355, 356
 - Leber 386
 - Leichtbauprinzip 363
 - Luftröhre 369
 - Lunge 369, 473
 - Magen 383
 - Mediastinum 367
 - Milz 388
 - Mundhöhle 395
 - Nasenhöhle 395
 - Nebennieren 390
 - Niere 390
 - Oberarm 372
 - Oberscheknel 377
 - Rachen 395
 - Richtungsbezeichnung 355, 356
 - Rumpf 364
 - Schädel 391
 - Schultergelenk 370
 - Schultergürtel 370
 - Speiseröhre 383
 - Sprunggelenk, oberes 383
 - Sprunggelenk, unteres 383
 - Thymus 367
 - Unterarm 373
 - Unterschenkel 378
 - Venenverlauf 399
 - Wachstumsfugen 363
 - Wirbelsäule 364
 - Zellaufbau 362
 - ZNS 397
 - Zwerchfell 370
 - Zwölffingerdarm 384
- Angio-CT 113
- Angiographie 437, 443, 451, 478, 479, 498, 542
 - A. carotis 443
 - bei Lebertumoren 498
 - Hämoptysen 479
 - interventionelle 451
 - kontrastmittelverstärkte 170
 - Nebenniere 542
 - Pulmonalarterie 478
- Angiographieanlage 109
 - biplanare 110
- Ankleiden, steriles 338
- Anode 68
- Anregung, frequenzselektive 164
- Antiemetika 191
- Antihistaminika 191
- Applikationsspezialist 612
- Äquivalentdosis 42
- Arbeiten, steriles 336
- Arbeiten, wissenschaftliches 612, 616, 617
 - Bias 617
 - Evidenzgrade 616
 - Negativer prädiktiver Werte (NPV) 617
 - Postiver prädiktiver Wert (PPV) 617
 - Sensitivität 616
 - Spezifität 617
- Arbeitgeberpflichten 619
- Arbeitgeberrechte 619
- Arbeitnehmerpflichten 619
- Arbeitnehmerschutz 19
- Arbeitsanweisung (AAW) 602
- Arbeitsrecht 618
- Arbeitsschutz 19
- Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) 19
- Arbeitsverhältnis 619
- Arbeitsvertrag 619
- Arbeitszeitgesetz 60
- Arbeitszeugnis 622
- Artefakte 584
 - Prüfung 584
- Arthrographie 194
- Arzneimittelgesetz (AMG) 60
- Astrozytom 454
- Ätiologie 323
- Atom
 - Aufbau 32
- Atommodell
 - nach Bohr 66
- Aufbewahrungsanforderung 598
- Aufbewahrungsfristen 584, 598
- Aufhärungsartefakt 139
- Aufhebungsvertrag 620
- Aufklärung, medizinische 216
- Aufzeichnungspflicht 59
- Ausbildungs- und Prüfungsverordnung (APrV) 13
- Ausgleichsfilter 81
- Ausscheidungsurogramm 508

B

- Bandscheibe 412
 - Diagnostik 412
- Bariumsulfat 197
- Basaliom 575, 577
- Battered-Child-Syndrom 626
- Becken-Bein-Angiographie 431
- Becquerel, Antoine-Henri 31
- Behandlungsvertrag 216
- Beinvenenphlebographie 430
- Belastung 435
 - ergometrische 435
 - pharmakologische 435

Stichwortverzeichnis

Belichtungsautomatik 74
 Belichtungspunktesysteme 75
 Benzodiazepine 191
 Berufsalltag 21
 Bestrahlungsplan 265
 Bestrahlungsplanung 226, 261
 Bestrahlungsschäden 54
 Bestrahlungsverordnung 262
 beta-Blocker 192
 Beta-Minus-Zerfall 34
 Beta-plus-Zerfall 34
 Betäubungsmittelgesetz (BtMG) 60
 Betreuung, psychoonkologische 268
 Bewegtraster 80
 Bewegungsartefakt 138, 166
 Bias 617
 Bildrauschen 80
 Bildungsurlaub 609
 Bildverarbeitung, digitale 91
 – Dynamik-Umfang 95
 – Farbtiefe 93
 – Fehlerkorrektur 93
 – Fensterung 96
 – Helligkeitsveränderung 94
 – Kantenanhebung 96
 – Kontrastverstärkung 94
 – Look-up-Tabelle (LUT) 93
 – Matrix 91
 – Raschreduktion 97
 – Shutter 93
 Bildverstärker (BV)
 – Aufbau 107
 Bit 93
 Bleiburg 287
 Blending Image 130
 Blurring 166
 Bohrlochmessplatz 289
 Bohr, Nils 66
 Brachytherapie 242
 Bremsstrahlung 67
 Brennfleck 70
 Bronchialkarzinom 479
 Bucky-Arbeitsplatz 81
 Buckytisch 81
 Buscopan 191, 212
 Butylscopolamin 191, 212

C

Carebolus-Technik 170
 C-Bögen 57
 Chelius, Paula 5
 Cholangiozelluläres Karzinom
 (CCC) 493
 Choleszintigraphie 492
 Chordome 455
 Clearance, mukoziliäre 477

Compliance 341
 Comptoneffekt 37, 67
 Computed Tomography Dose Index
 (CTDI) 43, 141
 Computertomograph
 – Aufbau 121
 – Gerätegenerationen 124
 Computertomographie (CT) 120, 412,
 413, 443, 473, 487, 543, 558, 577, 625
 – Abdomen 487
 – Artefakte 138
 – Auflösung, isotrope 130
 – Becken 413
 – Bildrekonstruktion 129
 – CT-Schädel 443
 – dynamische 125
 – Fensterung 130
 – Gelenke 413
 – Hals-Thorax-Abdomen 558
 – Knochen 413
 – Lunge 473
 – Nebenniere 543
 – Phantommesspunkte 142
 – Post-mortem 625
 – Post-Processing 134
 – Strahlenreduktion 141
 – Sympathikolyse 577
 – Untersuchungstechniken 124
 – Wirbelsäule 412
 Cone-Beam-CT 99, 233
 CT-gesteuerte Biopsie 565
 – Lymphknoten 565
 CT-Phantom 586
 Curie, Marie 31

D

Datengeheimnis 598
 DAT-Scan 448
 Deckenstativ 81
 Dekontamination 310
 Demenzformen 446
 Demming, Edward 599
 Desinfektion 329
 Detektor
 – Adaptive Array 126
 – Fixed Array 126
 Detektordosis 76
 Detektorsystem 123
 Diagnose 324
 Diagnosis related group (DRG) 318
 Diazepam 213
 Digitale Subtraktionsangiographie
 (DSA) 110
 – Maskenbild 111
 – Nativbild 111
 – Pixelshift 112

– Roadmapping 112
 – Subtraktionsbild 111
 Digitale Volumentomographie
 (DVT) 98, 113
 Digital imaging and communications in
 medicine (DICOM) 597
 Dipidolor 191, 214
 Diplom-Medizinpädagogik 611
 Discographie 412
 Dixon-Technik 164
 Dobutamin 192, 214
 Dopamin-D2-Rezeptordarstel-
 lung 448
 Doppelkontrast 194
 Dopplersonographie 178
 – farbkodierte 179
 Dosimeter
 – elektronisches 292
 Dosis 73
 – effektive 44
 Dosisflächenmessgerät 70
 Dosisflächenprodukt (DFP) 43
 Dosisindikator 81
 Dosislängenprodukt (DLP) 43
 Dosismessgerät 583
 Dosis-Quanten-Effektivität (DQE) 91
 Dosisvolumenhistogramm 265
 Dual-Röntgen-Absorptiometrie
 (DXA) 99
 Dual-Source-CT 130
 Dünndarmkarzinom 495
 Durchleuchtung 463, 486
 – Ösophagusbreischluck 486
 – Schuckakt 463
 Durchleuchtungsgerät
 – Aufbau 109
 – Untertisch 109
 Dynamic range. Siehe Dynamik-Um-
 fang
 Dynamik-Umfang 95
 Dynode 282

E

Echoplanare-Sequenz (Epi) 162
 Echozeit (TE) 154
 Echozuglänge (ETL) 161
 Effekt, reziprok piezoelektrischer 176
 Einengung, spinale 412
 Einfalldosis 42
 Einfaltungsartefakt 167
 Einstellungsgespräch 618
 Einwilligung 598
 – konkludente 598
 – mutmaßliche 598
 – stillschweigende 598

Electron Capture. *Siehe* Elektroneneinfang

Elektromagnet 156
 Elektronen 235
 Elektronenbändermodell 45
 Elektroneneinfang 34
 Elektronenoptik 106
 Elektronische Personendosimeter (EPD) 46
 Energiedosis 41
 Enhancement 193, 576
 Entzündungszintigraphie, skelettale 420
 EOS-Aufnahmegesetz 102
 Ergebnisqualität 601
 Evaluation 601, 615
 Evidenz 613
 – externe 613
 – interne 613
 Evidenzbasierte Medizin (EBM) 275
 Evidenz-basierte Praxis (EbP) 613
 Evidenzgrade 616

F

Faltungskern 129
 fan-beam 100
 Faraday'sche Käfig 157
 Fast-Spin-Echo-Sequenz 160
 Fatigue 270
 Festkörperdetektor 90, 123
 Fieber 323
 Field of view (FOV) 168
 Filmdosimeter 292
 Flächenphantom 302
 FLAIR-Sequenz 161
 Flussartefakte 166
 Flüssigszintillator 290
 Fokus-Film-Abstand 76
 Fokus-Haut-Abstand (FHA) 232
 Fokus-Objekt-Abstand 76
 Fokusraster 79
 Forciertes Lungenexpirationsvolumen (FEV) 476
 Fortbildung 609
 Fourier-Transformation 153
 Freier Induktionsabfall Signal (FID) 153
 Frequenzkodiergradient 152, 156
 Funktionsszintigraphie, hepatobiliäre 492
 Furosemid 192, 215

G

Gadolinium 200
 Galaktographie 526
 Gallenwegskarzinom 501
 Gammakamera 287, 293
 – Konstanzprüfung 301
 Gammasonde 289
 Gammaspektrum 298
 Gammastrahlung 36
 Gantry 121
 Ganzkörperspule 157
 Ganzkörperzähler 292
 Gasionisationsdetektor 290
 Gastrointestinale Stromatumore (GIST) 491
 Generator
 – Einphasen- 71
 – Zweiphasen- 71
 Generatorbedienoberfläche 73
 Gesetzliche Krankenversicherung (GKV) 317
 Gesundheitssystem
 – Organisation 317
 Gesundheitswesen
 – Gesundheit 322
 – Krankheit 322
 Gewebewichtungsfaktor 44
 Gewebesnekrose 207
 Gewichtsveränderung 324
 Gleitschatten-Filmdosimeter 47
 Glioblastom 453
 Glomeruläre Filtrationsrate (GFR) 204, 511
 Glucagon 190, 212
 Glykosaminoglykane 192
 Gonadenschutzschürze 84
 Gradienten-Echo-Sequenz 160, 163
 Gradientenfelder 158
 Grand-mal-Anfall 211
 GRAPPA-Technik 165

H

Halbfeldtechnik 236
 Halbleiter 282
 Halbwertszeit, physikalische 34
 Halbbeam 236
 Hämorrhoiden 505
 Händedesinfektion 331
 – chirurgische 333
 – hygienische 332
 Hand-Fuß-Monitor 293
 Harnblasenkarzinom 516
 HASTE 161
 Hauptmagnetfeld Bo 158

Heel-Effekt 70
 Heißlabor 286
 Heparin 192, 215
 Heparininduzierte Thrombozytopenie (HIT) 192
 Hepatozelluläres Karzinom (HCC) 493, 500
 Herz-SPECT 434
 Hirnmetastasen 457
 Hirntoddiagnostik 446
 Hirntumor 453, 456
 – im Erwachsenenalter 453
 – im Kindesalter 456
 Hirntumordiagnostik 450
 – PET 450
 Histogrammanalyse 93
 HNO-Tumore 465
 Hochdruckport 207
 Hochfrequenzfeld B1 159
 Hochintensivierter fokussierter Ultraschall (HIFU) 516
 Hodenkaspele 84
 Hodenszintigraphie 515
 Hodentumore 519
 Homogenitätsprüfung 293
 Homöostase 322
 Hormonablativ Therapie (HAT) 518
 Hounsfieldskala 134
 Hounsfield Units (HU) 120, 127
 Hygiene
 – Ankleiden, steriles 338
 – Arbeiten, steriles 336
 – Behandlungsfehler, grobe 19
 – Desinfektion 329
 – Grundregeln 330
 – Händedesinfektion 331
 – Händewaschung 335
 – Infektionen, nosokomiale 328
 – Infusionen 338
 – Injektionen 338
 – Schutzausrüstung 336
 – Schutzstufen 330
 – Sonographiegerät 333
 – Standards 330
 – Übertragungswege 328
 Hyperplasie 325
 Hyperthyreose 210
 Hypertonie, pulmonale 477
 Hypertrophie 325
 Hypopharynxkarzinom 468
 Hypophysenadenom 455

Image Guided Radiotherapy (IGRT) 225

Stichwortverzeichnis

- Impedanzsprung 176
 Impulshöhenanalyse 298
 Indikation 189
 – rechtfertigende 59, 228
 Individuelle Gesundheitsleistung (IGEL) 318
 Infektionen
 – Übertragungswege 328
 Infektionsschutzgesetz (IfSG) 18, 327
 Inhomogenität 301
 Inkorporation 48
 Inkrement 129
 Innere Konversion 36
 Inneres Milieu 322
 Intensitätsmodulierte Radiotherapie (IMRT) 239
 Inversion-Recovery-Sequenz (IR-Sequenz) 161
 Ionendosis 41
 Ionisation 40
 Ionisationskammer 41, 45, 290
 Iris-Blende 108
 Isodosen 237
- J**
- Juran, Joseph 599
- K**
- Kanzerogenese 326
 Kardio-CT 125
 Kartusche
 – Qualitätskontrolle 309
 Katecholamine 191, 192
 Kathode 68
 Kenngrößen 583, 584
 – Auflösungsvermögen 584
 – Bildkontrast 584
 – Dosis 583
 – Dosisindikator 584
 – Dosisleistung 583
 – Linienpaar 584
 Kernel 129
 Kern-Fluoreszenz 37
 Kernphotoeffekt 38
 Kernspintomographie 147
 Kertokanthom 575
 Kinder 419
 – Skelettszintigraphie 419
 Kinetic energy released in matter (Kerma) 41
 Knochenmetastasen 424
 – Therapie, palliative 424
 Knochensarkome 424
 – Strahlentherapie 424
- Kohlenstoffdioxid 194
 Koinzidenz 283, 595
 Kollimation 128
 – virtuelle 108
 Kollimator 232, 294
 – divergierender 297
 – konvergierender 297
 – Pinehole 297
 Konstanzprüfung 582, 583, 585, 586, 589, 590, 592, 593, 594, 595
 – Abbildungsmaßstab 592
 – Aktivimeter 593
 – Ansprechvermögen 594
 – Ausbeute 590, 594, 595
 – Bohrloch 594
 – Computertomographie 585
 – Direktradiographie 585
 – Dokumentationseinrichtungen 593
 – Durchleuchtung 585
 – Energiefenster 590, 595
 – Energiepeak 590
 – Gammakamera mit SPECT-System 590
 – Gammakamera, planare 590
 – Gankörperzusatz 593
 – Inhomogenität 590
 – Inhomogenität, tomografische 593
 – Kontrast 593
 – Linearität 592, 594
 – Mammographie 585
 – Molybdändurchbruch 594
 – Nuklearmedizin 589
 – Nulleffekt 590, 593
 – Orstauflösung 592
 – Positronenemissionstomograph (PET) 595
 – Radiologische Diagnostik 582
 – Rastermaßstab 592
 – Referenzwerte 583
 – Rotationszentrum 592
 – Scierheitseinrichtungen 593
 – Strahlentherapie 586
 – Untergrundzählrate 590, 594
 Kontamination 309
 Kontaminationsmessgeräte 292
 Kontaminationsmonitor 288
 Kontraindikation
 – absolute 190
 – relative 190
 Kontrastmittelinduzierte Nephropathie (CIN) 209
 Kontrastmittel (KM) 192
 – Anwendungen 199
 – Applikation 202
 – Aspekte, rechtliche 216
 – Enhancement 193
 – iodhaltige 194
 – ionische 196
 – Kontraindikationen 208
 – Menge bei CT-Untersuchung 205
 – MRT 200
 – Nebenwirkungen 209
 – negative 193
 – nichtionische 196
 – ölhaltige 198
 – positive 194
 – Schwangerschaft 212
 – Sonographie 202
 – Stillzeit 212
 – wasserunlösliche 198
 Konventionelle Röntgendiagnostik 429, 463, 485
 – Abdomen 485
 – Hals 463
 – Nasennebenhöhlen 463
 – Thorax in 2 Ebenen 429
 Konversionsfaktor 107
 Konvertergeneratoren 72
 Kooperation für Transparenz und Qualität (KTQ) 602
 Kortikosteroide 191
 Kraniopharyngeom 456
 Krankenhausinformationssystem (KIS) 597
 Krankheitsdisposition 323
 Krankheitslehre
 – Anamnese 323
 – Ätiologie 323
 – Pathogenese 323
 – Symptome 323
 Krankheitsursachen
 – äußere 324
 – innere 325
 – psychische 324
 – soziale 324
 K-Raum 152
 Kreatinin 204
 Kreislaufstillstand 210
 K-Strahlung 67
 Kündigung 620
 Kundt, Marie 5
- L**
- Lambert-Beersche Gesetz 35
 Lamorbeziehung 148
 Lamorfrequenz 149, 151
 Längsmagnetisierung (Mz) 149
 Larynxkarzinom 469
 Last-Image-Hold (LIH) 107
 Leberblutpool-Szintigraphie 492
 Leber-Lungen-Shunt 286, 493
 Lebermetastasen 494
 Leberperfusionsszintigraphie 491
 Leichtbauprinzip 363

Leistungsschwäche 324
 Lernen, lebenslanges 608
 Lette-Verein 6
 Lette, Wilhelm Adolph 4
 Lidocain 192, 215
 Linearbeschleuniger 224, 230
 – Bestrahlung, isozentrische 237
 – Bestrahlung, koplanare 237
 – Isozentrum 237
 Linearer Energietransfer (LET) 42, 50
 Linienartefakte 141
 Linienzahl, 79
 Liquorraumszintigraphie 450
 Look-up-Tabelle (LUT) 93
 Lorentzkraft 151
 Lumineszenzbild 106
 Lungenperfusionsszintigraphie 475
 Lungen-PET 478
 Lungenventilationsszintigraphie 474
 Lymphknotenmetastasen 558
 Lymphom 562, 564, 566, 574
 – bei Kindern 564
 – Hodgkin- 566
 – kutanes 574
 – Non-Hodgkin- 566
 Lysetherapie 444

M

Magenkarzinom 491, 499, 558
 Magic-Angel-Artefakt 166
 Magnetisierung
 – longitudinale 149
 – transversale 149
 Magnetresonanztomographie
 (MRT) 147, 414, 415, 473, 527, 543,
 544, 559, 573
 – Artefakte 165
 – Bildqualität 164
 – Gefahrenquellen 158
 – Gradientenspulen 151
 – Hypophyse 544
 – Knie 415
 – Kontrast 154
 – Lunge 473
 – Lymphknotendiagnostik Hals 559
 – Mammographie 527
 – Messzeit 160
 – Nebenniere 543
 – Schichtdicke 151
 – Schichtselektion 151
 – Sequenzen 159
 – Weichteilraumforderung 573
 – Wirbelsäule 414
 Magnetresonanztomograph (MRT)
 – Bedienungskonsole 157
 – Bildrechner 157
 – Geräteaufbau 155
 – Gradientenspule 156
 – Hauptmagnet 155
 – Hochfrequenzsystem 156
 Magnet, supraleitender 156
 Malignes Melanom 572, 574, 576
 – Stadieneinteilung 574
 Mammakarzinom 528, 533, 534, 537,
 560, 568, 573
 – Betrahlung Lymphabfluss 534
 – Mastektomie 534
 – Sentinel-Lymphknoten-Szintigra-
 phie 560
 – Therapie, brusterhaltene 534
 Mammographie 524, 536, 573
 – Screening 536
 Mannitol 194
 Maskenbild 111
 Master of Education 611
 Maximum Intensitiy Projection
 (MIP) 136, 169
 Meckel-Divertikel 495
 Medizinproduktegesetz (MPG) 20, 59
 Meningeom 449
 Merkelzellkarzinom 574, 575
 Messfeldüberschreitung 140
 Messkoffer 583
 Messmittel 583
 Messstellen, amtliche 49
 Meta-iodo-benzyl-guanidin-Thera-
 pie 285
 Metallartefakt 139
 Metamizol 191, 213
 Metastasierung 327
 Metformin 204
 Methicillin -resistenter Staphylococcus
 aureus (MRSA) 328
 Metoclopramid 191, 213
 Metoprolol 192, 213
 Mikrosphären 286
 Miktionszysturethrogramm
 (MCU) 509
 Minimum Intensitiy Projektion (Mi-
 nIP) 136
 Mismatch-Befund 476
 Modulations-Transfer-Funktion 90
 Morbus Bowen 575
 Morbus Hodgkin 566, 568
 – Therapie 566
 Moulagen 236
 MR-Angiographie 169, 552
 MTA-Beruf 6
 MTA-Gesetz 6, 8
 – Abschnitt II 9
 – Abschnitt III 10
 – Abschnitt IV 12
 – Abschnitt V 12
 – Abschnitt VI 12
 – Abschnitt I 8
 – Ausbildung 9
 – Ausbildungsdauer 9
 – Berufserlaubnis 8
 – Bußgeldvorschriften 12
 – Quereinstiegsregelung 10
 – Tätigkeiten, vorbehaltene 10
 – Übergangsvorschriften 12
 – Übersicht 12
 – Zuständigkeiten 12
 MTRA 609, 610, 611, 612
 – Applikationspezialist 612
 – Arbeiten, rückengerechtes 346
 – Behandlungsteam 320
 – Belastungen im Beruf 344
 – Berufsbild 4
 – Bildungsurlaub 609
 – Diplom-Medizinpädagogik 611
 – Fortbildung 609
 – Hautpflege im Beruf 345
 – im Ausland 612
 – Karriereplanung 610
 – leitende 610
 – Patientenversorgung 320
 – Qualitätsmanagementbeauftrag-
 te 611
 – Stressbewältigung im Beruf 346
 – Studium 609
 – Supervision 347
 – Teamarbeit 321
 – Team, interdisziplinäres 319
 – Weiterbildung 609
 MTRA-Ausbildung
 – Organisation 13
 – Prüfung, staatliche 14
 Multileaf-Kollimators (MLC) 225
 Multiplanare Reformation (MPR) 135
 Multiplanare Rekonstruktionen
 (MPR) 169
 Multiple Sklerose (MS) 443
 Multislice-CT 127
 Mundhöhlenkarzinom 468
 Mutterschutzgesetz (MuSchG) 60
 Myelographie 412
 – Einstelltechnik 412
 Myokardszintigraphie 433
 Myomenukleation 516

N

Nasopharynxkarzinom 468
 Natrium-Iodid-Kristall 296
 Natriumkanalblocker 192
 Nebenwirkungen (NW) 188

Stichwortverzeichnis

Negativer prädiktiver Wert (NPV) 617
 Nephrogene systemische Fibrose (NSF) 210
 Nierenarterienstenose 552
 Nierenfunktionsszintigraphie 512
 Nierenszintigraphie 510, 515
 – statische 515
 Non-Hodgkin-Lymphom (NHL) 567
 Novalgin® 191, 213
 Nuklearmedizin 435, 436, 447, 465, 476, 477, 491, 493, 528, 529, 572, 574
 – Abstandshalter 287
 – Arbeitsalltag 22
 – Belastung, ergometrische 435
 – Belastung, pharmakologische 435
 – Clearance, mukoziliäre 477
 – Dekontamination 310
 – Heißlabor 286, 287
 – HNO-Tumore 465
 – Hypertonie, pulmonale 477
 – Kontamination 309
 – Leberperfusion 493
 – Lungenfunktion, postoperative 476
 – Lymphom, kutanes 574
 – Magenkarzinom 491
 – Malignes Melanom 572
 – Mammakarzinom 528
 – Merkelzellkarzinom 574
 – Polartomogramm 436
 – rCBF-Untersuchung PET 447
 – rCBF-Untersuchung SPECT 447
 – Rechts-Links-Shunt 476
 – Schmerztherapie, palliative 285
 – Spritzenabschirmung 287
 – Strahlenschutz 286
 – Vulvakarzinom 529
 Nulleffektmessung 301
 Nutzstrahlenfeld 584
 – Begrenzung 584

O

Oberflächendosis 43
 Objekt-Film-Abstand 76
 Off-label-use 190
 Oligodendrogliom 454
 Organdosis 44
 Organs at risk (OAR) 257
 Oropharynxkarzinom 468
 Orthopantomographie 98
 Ortsauflösung 90, 165
 Ortsdosis 44
 Ösophagoskopie 498
 Ösophagusbreischluck 486
 Ösophaguskarzinom 498, 504
 Osteomyelitis 410

Oszillationsartefakt 168
 Ovarialkarzinom 530, 536
 Ovarienschutz 84

P

Paarbildung 38
 Pädiatrie 405, 406
 – Dichteverhältnisse 405
 – Proportionen 405
 – Strahlenschutz 406
 – Strahlensensibilität 406
 – Wachstum 405
 Pankreaskarzinom 501
 Panoramaschichtgerät 98
 Papier- oder Dünnschichtchromatografie
 – SOP 307
 Para-Atmung 288
 Parallaxenverschiebung 77
 Parallele Akquisitionstechnik (PAT) 165
 Parallellochkollimator 296
 Parallelraster 79
 Parasympholytika 190
 Paravasat 207
 Partialvolumeneffekt 139
 Partikeltherapie 243
 Paspertin 191, 213
 Pathogenese 323
 Patienten 403, 405
 – Aufklärung 216, 403
 – Betreuung bei Bestrahlung 226
 – Compliance 341
 – demenzkranke 342
 – Gruppen, besondere 342
 – in der Radioonkologie 267
 – Kinder 343, 405
 – Kommunikation 341
 – Lagerung 262
 – Umgang mit 340
 Patientenäquivalentfilter 583
 Patientenlagerung
 – Durchleuchtung 110
 Patientenrechtgesetz (PRG) 21
 PDCA-Zyklus 599
 Pencil Beam 100, 246
 Peniskarzinom 520
 Peptidhormone 190
 Peptid-Therapie 285
 Perchlorat 210
 Periphere arterielle Verschlusskrankheit (pAVK) 438
 Permanentmagnet 156
 Personal, strahlenexponiertes
 – Kategorien 58
 Personendosimetrie 229
 Personendosis 44
 Pharmakodynamik 187
 – Breite, therapeutische 188
 – Dosis-Wirkungs-Beziehung 187
 – Wirkprofil 187
 Pharmakokinetik 187
 – Aufnahme 187
 – Ausscheidung 187
 – Biotransformation 187
 – Freisetzung 187
 – Verteilung 187
 Phased-Array-Spulen 157
 Phasen
 – -kodierrichtung 152
 – -lage 152
 Phasenkodiergradient 152, 156, 160
 Phasenkontrastangiographie 169
 Phlebographie 430
 Photoabsorption 67
 Photoeffekt 36
 Photomultiplier (PMP) 282, 297
 Photonen 235
 Photon Starvation Artefakt 139
 Picture archiving and communication system (PACS) 596
 Piritramid 191, 214
 Pitchfaktor (p) 126
 Pixelmatrix 91
 Pixelshift 112
 Plasmozytom 414
 Poincaré, Henri 31
 Polartomogramm 436
 Polytrauma 624
 Portsystem 206
 Positiver prädiktiver Wert (PPV) 617
 Positronenemissionstomographie (PET) 562
 – Lymphome 562
 Post-Processing 134
 Private Krankenversicherung (PKV) 318
 Prognose 324
 Prostatahyperplasie 517
 Prostatakarzinom 517, 521
 Prostatitis 517
 Proton 148
 Prozessqualität 601
 Prüfkörper 583
 Prüfung, staatliche
 – Nichterscheinen 17
 – Notengebung 15
 – Teil, mündlicher 15
 – Teil, praktischer 16
 – Teil, schriftlicher 15
 Pulsationsartefakt 138
 Punktion, CT-gesteuerte 624

Q

Qualitätsanforderungen

- ärztliche 86, 116, 142
- aufnahmetechnische 86, 143
- Jugendliche 87
- Kinder 87

– Magnetresonanztomographie (MRT) 170

- Neugeborene 87
- Säuglinge 87

Qualitätsdefinition 600, 601

Qualitätsdimension 601

Qualitätskriterien, allgemeine

- Computertomographie (CT) 142
- Durchleuchtung 116
- Konventionelle Radiologie 86
- Nuklearmedizin 311
- Strahlentherapie 274

Qualitätsmanagement 599, 600, 603, 604, 605, 611

- Audit 604
- Beauftragte 611
- Handbuch 604
- Kernprozess 604
- Organigramm 604
- PDCA-Zyklus 599
- Rezertifizierung 605
- System 599
- Zertifikate 600
- Zirkel 603

Qualitätsmanagementbeauftragte (QMB) 599

R

Radioaktivität 32

Radiochirurgie 240

Radioimmuntherapie 285, 568

Radioiodtherapie 284, 550, 551, 552

- Nachsorge 551
- Nebenwirkungen 552
- Schilddrüse 550

Radioisotope 304

Radioisotopenreinheit 306

Radiologieinformationssystem (RIS) 597

Radioonkologie 258

Radiopharmaka 425

- Venenkatheter-applizierte 425

Radiopharmakon

- Markierung 305, 306
- Qualitätssicherung 305
- selbst hergestelltes 306

Radiosynoviorthese (RSO) 285, 424

Radiotherapie

- Boost-Bestrahlung 259
- in Serien 259
- multimodale 259

Rasterwandstativ 81

Reaktion, anaphylaktische 624

Reanimation 211

Rechts-Links-Shunt 476

Referenzwerte 583

- Abnahmeprüfung 583

- Prüfkörper 583

Regionaler zerebraler Blutfluss (rCBF) 446

Reinheit

- chemische 307
- radiochemische 307

Rekonstruktion, iterative 133

Rektumkarzinom 502, 504

Relative biologische Wirksamkeit (RBW) 42, 50

Relaxivität 200

Repetitionszeit (TR) 154

Resilienz 324

Rezeptorszintigraphie 448

Richtlinie für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention 18

Ringartefakt 140

Ringdosimeter 292

Roadmapping 112

Röhrenknochen 410

- Aufbau 410

Röhrenspannung (kV) 73, 127

Röhrenstrom 73

Röhrenstrom-Zeit-Produkt (mAs) 128

Röntgenbild

- Bewegungsunschärfe 78
- Bildrauschen 80
- Qualität 77
- Streustrahlenreduktion 79

Röntgenbremsstrahlung 39

Röntgendiagnostik, konventionel-
le 411

- skelettale 411

Röntgenfilm 87

Röntgengenerator 71

Röntengeräte

- mobile 57, 83

Röntgenpass 59

Röntgenplakette 57

Röntgenröhre

- Aufbau 68

Röntgenstrahlen 39

Röntgenstrahler

- Computertomographie 121

Röntgenstrahlung, charakteristi-
sche 40

Röntgentherapie 241

Röntgenträhler

- Durchleuchtung 108

Röntgenverordnung (RöV) 18, 56

Röntgen, Wilhelm Conrad 31

Rotationsangiographieanlage 114

Rotationszeit (ms) 128

Rückprojektion, gefilterte 132

S⁷⁵Selen-Homotaurocholsäure-Test
(SeHCAT) 497

Sarkoidose 557, 558

Sarkom 422

Scanzeit (s) 128

Scattering 245

Schachtverhältnis 79

Schädelbasismeningeome 454

Schädel-CT 125

Schichtselektionsgradient 153, 156

Schilddrüsenkarzinom 549, 550, 552

- Radioiodtherapie 550

Schilddrüsenzintigraphie 545, 546

- Befund, pathologischer 546

- Normalbefund 546

Schleifendiuretika 192

Schmerz 323

Schmerztherapie 423

- palliative 285

- Wirbelsäule 423

Schwindel 324

Sekundärelektronenvervielfacher
(SEV) 282

Selbstbestimmungsaufklärung 217

Seldinger-Technik 431

Selektive interne Radiotherapie
(SIRT) 285

SENSE-Technik 165

Sensitivität 616

Sentinel-Lymphknoten-Szintigraphie
(SLS) 528, 559, 568

Sequenz-CT 125

Sequenzen, fettunterdrückende 163

Shaldon-Katheter 206

Shared Surface Display (SSD) 138

Shutter 93

Signal-Rausch-Verhältnis 164, 171

Single Photon Emission Computed
Tomography (SPECT) 300Single Shot Fast Spin Echo Sequenz
(SSFSE) 161

Single-Shot-Sequenz 161

Skelett 410, 420

- Entzündungszintigraphie 420

Stichwortverzeichnis

- Skelettszintigraphie 415, 416, 417, 418, 419, 529
 - Aufnahmetechnik 416
 - beim Kind 419
 - Beurteilung 418
 - Bloodpool 416
 - Mineralisation 417
 - Osteomyelitis 418
 - Osteonekrosen 418
 - Perfusion 416
 - Prothesenlockerung 418
 - Radiopharmakon 415
 - Traumata 418
 - Tumore 418
- Slew Rate 156
- Sondenmessplatz 289
- Sonographie 411, 442, 472, 485, 525, 541, 556, 557, 572
 - Abdomen 485
 - A-Mode 178
 - B-Mode 178
 - der Haut 572
 - hochauflösende 572
 - Lymphknoten 556, 557
 - Mamma 525
 - M-Mode 178
 - Möglichkeiten, diagnostische 182
 - muskuloskelettale 411
 - Nebennieren 541
 - Neurocranium 442
 - Pleuraerguss 472
 - Schallköpfe 180
 - Schilddrüsen 541
- Sonographiegerät
 - Aufbau 180
- Sorbitol 193
- Speicheldrüsenszintigraphie 465
- Speicherfolie 88
- Speiseröhrensintigraphie 490
- Spezifische Absorptionrate (SAR) 159
- Spezifität 617
- Spin 148
- Spinaliom 575
- Spin-Echo-Sequenz 153
- Spin-Gitter-Relaxation 150
- Spin-Spin-Relaxation 151
- Spiral-CT 126
 - Parameter 126
- SPIR-Sequenzen 164
- Spoiling 163
- Spritzenabschirmung 287
- Stabdosimeter 41, 58
- Standard operating procedure (SOP) 275
- Standard operation Procedure (SOP) 602
- Status epilepticus 192, 212
- Stehraster 80
- Stereotaxie 240, 530
- Sterilgut
 - Lagerung 337
 - Umgang 337
 - Verpackung 337
- Sterilität 336
- STIR 161, 163
- Strahlensatz 76
- Strahlenschutz
 - 3-A-Regel 114
 - direkter 84
 - Durchleuchtung 113
 - Indikation, rechtfertigende 59
 - indirekter 86
 - Kurse 58
 - Röntgentechnik 115
 - Schwangere 59
- Strahlenschutzbereiche 57
 - Kontrollbereich 57
 - Sperrbereich 57
 - Strahlentherapie 228
 - Überwachungsbereich 58
- Strahlenschutzmaßnahmen 406
 - Konventionelle Radiologie 83
 - Nuklearmedizin 286
 - Pädiatrie 406
- Strahlenschutzmittel 85
- Strahlenschutzverordnung (StrSchV) 18, 56
- Strahlentherapie 422, 424, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 466, 468, 469, 479, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 516, 517, 519, 520, 532, 533, 535, 536, 549, 566, 567, 575, 576
 - 3D-CT-Planung. Siehe
 - Akustikneurinom 454
 - Alopezie 273
 - Analkarzinom 503
 - Arbeitsalltag 24
 - Astrozytom 454
 - atemgesteuerte 233
 - Basaliom 575
 - Bestrahlungsmarkierung 269
 - Bestrahlungsplanung 226, 261
 - Betrahlungsplan 265
 - Bronchialkarzinom 479
 - Chordome 455
 - Direkteinstellung 266
 - Dosisverteilung 234
 - Enteritis 274
 - Fatigue 270
 - Fraktionierung 260
 - Gallenwegskarzinom 501
 - Gegenfelder 238
 - Glioblastom 453
 - Halstumor 466
 - Hämorrhoiden 274
 - Harnblasenkarzinom 516
 - Hautveränderungen 273
 - Hepatozelluläres Karzinom (HCC) 500
 - Hirnmetastase 452, 457
 - Hirntumore 452
 - Hodentumore 519
 - Hypopharynxkarzinom 468
 - Hypophysenadenom 455
 - Keratokanthom 575
 - Knochensarkome 424
 - Kolitis 274
 - Kopftumore 466
 - Körperpflege 270
 - Kraniopharyngeom 456
 - Lagerung 262
 - Lagerungshilfen 263
 - Larynxkarzinom 469
 - Magenkarzinom 499
 - Malignes Melanom 576
 - Mammakarzinom 533
 - Mehrfeldtechnik 238
 - Merkelzellkarzinom 575
 - Morbus Bowen 575
 - Morbus Hodgkin 566
 - MTRA-Aufgaben 225
 - Mukositis 273
 - Mundhöhlenkarzinom 468
 - Nasopharynxkarzinom 468
 - Nebenwirkungen 272
 - Non-Hodgkin-Lymphom (NHL) 567
 - Notfallbergung 229
 - Notfallbestrahlung 266
 - Oligodendrogliom 454
 - Oropharynxkarzinom 468
 - Ösophaguskarzinom 498
 - Ovarialkarzinom 536
 - Pankreaskarzinom 501
 - Peniskarzinom 520
 - Proktitis 274
 - Prostatakarzinom 517
 - Rektumkarzinom 502
 - Risikoorgane 264
 - Scanning-Technik 246
 - Scattering 245
 - Schädelbasismeningeome 454
 - Schilddrüsenkarzinom 549
 - Spinaliom 575
 - Stehfeld 238
 - stereotaktische 240
 - Strahlenschutzbereiche 228
 - Strahlenschutz XE 227
 - Terminvergabe 269
 - Tumordosis 255
 - Tumorregression 254
 - Vaginalkarzinom 535

- Vulvakarzinom 535
- Weichteilsarkom 422
- Zellüberlebenskurve 256
- Zervixkarzinom 532
- Zielvolumen 264
- Strahlenwarnzeichen 58
- Strahlenwirkung 49
 - deterministische 52
 - stochastische 51
- Streustrahlenreduktion 79
 - Rastertypen 80
- Strom-Zeit-Produkt 74
- Strukturqualität 601
- Struma multinodosa 552
- Studie 616
 - doppelt-verblindet 616
 - Genauigkeitsstudie, diagnostische 616
 - randomisiert, kontrollierte 616
 - verblindet 616
- Studium 609
- Summed difference score (SDS) 437
- Supervision 347
- Suszeptibilitätsartefakte 166
- Sympathikolyse, CT-gesteuerte, 577
- Symptome 323
- Synchrotron 245
- Syndrom, anticholinerges 191
- Szintigraphie 494, 495, 512, 545, 548, 549, 551
 - bei neuroendokrinen Tumoren 495
 - der Schilddrüse bei Kindern 549
 - Ganzkörper 551
 - Meckel-Divertikel 495
 - Nebennierenmark 549
 - Nebenschilddrüsen 548
 - Nierenfunktion 512
 - Schilddrüse 545
 - Technetium-markierte Erythrozyten 494
- Szintillationsdetektor 289

T

- T1-Relaxation 150
- T2-Relaxation 151
- T2*-Zerfall 151
- Tandemoptik 107
- Tarifrecht 622
- Taschendoppler 180
- Technetium
 - Verlaufskurve 305
- Telekobalttherapie 224
- Teletherapie 242
- Terminologica anatomica 354
- Testbolus-Technik 170

- Therapie 324
- Thermoablation 422, 479, 497
 - Metastasen, ossäre 422
- Thermo-Lumineszenz-Detektoren (TLD) 47
- Thrombose 430
- Tiefenblende 71
- Tiefendosis 43
- Tiefendosiskurve 234
- Time of Flight (TOF) 169
- TIRM 161
- TNM-Klassifikation 251
- Tomosynthese, digitale 527
- Tomotherapie 240
- Tracheazielaufnahme 472
- Tränenwegsszintigraphie 465
- Transarterielle Chemoembolisation (TACE) 498
- Transformator
 - Aufbau 71
- Transversale Magnetisierung (MXY) 149
- Tumor 326
 - benigne 249, 327
 - Bestrahlung 254
 - bösartiger 247
 - Diagnostik, histo-pathologische 249
 - Entstehung 250
 - Grading 252
 - Klassifikation 251
 - maligne 249, 327
 - Regression 254
 - Risikofaktoren 250
 - Typen, maligne 248
 - Wachstum 248
- Tumorembolisation 421
 - Metastasen, ossäre 421
- Turbofaktor (TF) 161
- Turbo-Spin-Echo-Sequenz. siehe; siehe Fast-Spin-Echo-Sequenz

U

- Ultraschallwellen 176
 - Absorption 177
 - Beugung 177
 - Brechung 177
 - Diffraction 177
 - Geschwindigkeit 177
 - Reflexion 177
 - Refraktion 177
 - Streuung 177
- Unfallverhütungsvorschriften 18
- Union internationale contre le cancer (UICC) 252

- Untersuchung, klinische 402
- Untersuchungsprotokoll 411, 413, 414, 415, 429, 432, 443, 444, 445, 463, 464, 473, 485, 486, 487, 489, 509, 510, 511, 514, 525, 527, 543, 544, 557, 558, 559, 573
 - Angiographie A. carotis 443
 - CT Abdomen 487, 509
 - CT-Angiographie 432
 - CT Becken 413
 - CT Gelenke/Knochen 413
 - CT Hals 464
 - CT Hals-Thorax-Abdomen 558
 - CT Lunge 473
 - CT-Lysepateint 444
 - CT Nasennebenhöhlen 464
 - CT Nebenniere 543
 - CT Plasmozytomstatus 414
 - CT Pulmonalisangiographie 432
 - CT-Schädel 443
 - CT-Wirbelsäule 413
 - DTPA 511
 - Hodenszintigraphie 514
 - Mammographie 525
 - MRT Becken, kleines 510
 - MRT Hals 464, 559
 - MRT Hypophyse 544
 - MRT Ischämie 445
 - MRT Knie 415
 - MRT Knochentumor 415
 - MRT Leber 489
 - MRT Lymphknotendiagnostik Hals 559
 - MRT Mammographie 527
 - MRT Nebenniere 543
 - MRT Rektum 489
 - MRT Sellink 489
 - MRT Weichteile 573
 - MRT Wirbelsäule 414, 445
 - Ösophagusbreischluck 486
 - Röntgen Abdomen 485
 - Sonographie A. carotis 429
 - Sonographie Beinvenen 429
 - Sonographie Hals 463
 - Sonographie Knochen/Bänder/Muskeln 411
 - Sonographie Lymphknoten 557
 - Sonographie Mamma 525
 - Sonographie Abdomen 485
 - Zystographie 509
- Urlaubsanspruch 623

V

- Vaginalkarzinom [535](#)
- Vakuumsaugbiopsie, stereotaktische [530](#)
- Vergütung [622](#)
- Verschiebung, chemische [163](#), [168](#)
- Versorgung, integrierte [317](#)
- Verstärkungsfolie [88](#)
- Verzeichnung [79](#)
- Vesal, Andreas [361](#)
- Vignettierung [107](#)
- Virtuelle Koloskopie (VC) [194](#)
- Volume Rendering [137](#), [432](#)
- Volumetric modulated arc therapy (VMAT) [239](#)
- Voxel [120](#), [130](#), [152](#)
- Vulvakarzinom [529](#), [535](#)
 - Stadieneinteilung [529](#)

W

- Wasserstoffatom [148](#)
- Wechselwirkung [189](#)
- Weichteilsarkom [422](#)
 - Strahlentherapie [422](#)
- Weiterbildung [609](#)
- Wirkstoffgruppe [188](#)

X

- X-Strahlen [31](#)

Z

- Zelltod [254](#)
- Zellüberlebenskurve [256](#)
- Zellwachstum [325](#)
- Zellzyklus [50](#)
 - Strahlenempfindlichkeit [253](#)
- Zentraler Venenkatheter (ZVK) [206](#)
- Zentralprojektion [76](#)
- Zentralstrahl [76](#)
- Zervixkarzinom [532](#), [537](#)
- Zimmer-Brossy, Marianne [5](#)
- z-Interpolation [130](#)
- Zölibatsklausel [620](#)
- Zonographie [98](#)
- z-sharp-Technologie [128](#)
- Zyklotron [244](#)
- Zystographie [509](#)