

Springer

Berlin

Heidelberg

New York

Barcelona

Hongkong

London

Mailand

Paris

Singapur

Tokio

Dietmar Rötsch

Zuverlässigkeit von Rohrleitungssystemen

Fernwärme und Wasser

Mit 259 Abbildungen



Springer

Dr.-Ing. Dietmar Rötsch
Rehsener Straße 24
06844 Dessau

<http://www.rohrleitungssystem.de>

ISBN-13: 978-3-642-64308-8 e-ISBN-13: 978-3-642-60217-7

DOI: 10.1007/978-3-642-60217-7

Die deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Rötsch, Dietmar: Zuverlässigkeit von Rohrleitungssystemen: Fernwärme und Wasser / Dietmar Rötsch. - Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Singapur ; Tokio : Springer, 1999
(VDI-Buch)

ISBN-13: 978-3-642-64308-8

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1999

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.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Einbandgestaltung: Struve & Partner, Heidelberg
Satz: Reproduktionsfertige Vorlage des Autors

SPIN: 10680721

68/3020 – 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Mit diesem Buch wird – unter Nutzung der bekanntgewordenen Literatur und der Ergebnisse eigenständiger Untersuchungen – der Versuch unternommen, einige Grundlagen und Methoden zur Charakterisierung und Berechnung der Zuverlässigkeit von rohrleitungsgebundenen Versorgungssystemen, wie es die Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme sind, zu vermitteln. Steigende Größe, Komplexität und Betriebsalter dieser Systeme sowie die zum Teil hohen Anforderungen an deren Versorgungszuverlässigkeit rücken die Notwendigkeit zuverlässigkeitstechnischer Analysen immer mehr in den Vordergrund ingenieurmäßiger Betrachtungen. Um die Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit, da es sich bei diesen Systemen um reparable Systeme handelt, beurteilen zu können, reichen qualitative Überlegungen und verbale Beschreibungen nicht mehr aus.

Ziel des Buches ist die systematische Aufbereitung und Beschreibung der Methodik und der Verfahren zur ingenieurmäßigen Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen aus der Zuverlässigkeit seiner Elemente unter Berücksichtigung betrieblicher und technischer Randbedingungen. Es werden Berechnungsverfahren beschrieben, die sich in der Praxis als leistungsfähig erwiesen haben. Darunter werden solche Verfahren verstanden, die je nach Auswahl sowohl hinreichend genaue Ergebnisse liefern, und somit vertrauenswürdig sind, als auch in der Handhabung nicht zu aufwendig sind. Dabei geht es nicht um die Entwicklung neuer mathematischer Theorien, sondern vielmehr um die Anwendung bereits vorhandener mathematischer Modelle für die Praxis.

Grundsätzlich kann angemerkt werden, daß die in diesem Buch aufgestellten Lösungsansätze zur Berechnung der Zuverlässigkeit ebenso für andere rohrleitungsgebundene Versorgungssysteme, wie beispielsweise Gasversorgungssysteme, unter Berücksichtigung ihrer Spezifik Verwendung finden können.

Das vorliegende Buch, welches sinnbildlich in zwei Hauptteile gegliedert ist, behandelt zum einen den heutigen Stand der Technik, zum anderen aber auch die in den letzten Jahren zum Einsatz gekommene Anlagentechnik in den Versorgungssystemen. Während in den Kapiteln 2 und 3 erstmalig die gemeinsame Beschreibung der Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme erfolgt, werden in den sich anschließenden Kapiteln 4–8 die Vorgehensweise bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen solcher rohrleitungsgebundener Versorgungssysteme, die dazu notwendigen Verfahren und deren Anwendung beschrieben.

In das Buch sind zahlreiche Erfahrungen eingegangen, die ich während meiner praktischen Tätigkeit und durch die Zusammenarbeit mit Fachkollegen sammeln konnte. Gleichzeitig soll es ein Nachschlagewerk sein, das dem in der Praxis stehenden Fachkollegen Hinweise für die von ihm zu lösenden Aufgaben geben soll.

Dabei wurde Wert auf die Angabe weiterführender Literatur sowie auf zutreffende Normen und Regeln gelegt, ohne daß ein Anspruch auf Vollständigkeit gegeben sein kann.

Mit der erlernten Zuverlässigkeitstechnik soll der Leser in die Lage versetzt werden, selbst Zuverlässigkeitsaufgaben zu analysieren und praxisgerecht zu lösen. Es wird dabei durch die Bearbeitung vieler praktischer Beispiele aus beiden Versorgungssystemen in die Methodik eingeführt und bei der Problemlösung unterstützt. Des weiteren wird als Hilfestellung in diesem Buch ein eigens dafür entwickeltes Programm zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Versorgungssystemen vorgestellt und diskutiert.

Das Buch soll Ingenieure aus Industrie, Betreiber von Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen, Planer von Ingenieurbüros, Bauleiter, wissenschaftliche Institutionen, Behörden sowie Lehrer und Studenten an Bildungseinrichtungen ansprechen. Als Vorkenntnisse wird kein tiefergehendes mathematisches Wissen benötigt.

Besonderer Dank gilt meiner Frau für das liebevolle Verständnis und die Hilfe während dieser Zeit. Dem Springer-Verlag danke ich ebenfalls für die stets angenehme Zusammenarbeit.

Möge dieses Buch allen Benutzern bei der Berechnung der Zuverlässigkeit der zu betrachtenden Systeme ein hilfreicher Begleiter bei der Lösung sein.

Dessau, April 1999

D. Rötsch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Fernwärmeversorgungssysteme.....	5
2.1	Allgemeines und Besonderheiten.....	5
2.2	Aufbau und Struktur	11
2.2.1	Unterteilung	11
2.2.2	Wärmeerzeugung	12
2.2.2.1	Grundsätzliches	12
2.2.2.2	Gegendruck-/Entnahmekondensationsanlagen	13
2.2.2.3	Gasturbinenanlagen	16
2.2.2.4	Blockheizkraftwerke.....	22
2.2.2.5	Heizwerke.....	25
2.2.3	Druckhaltung.....	25
2.2.3.1	Grundlagen	25
2.2.3.2	Statische Systeme	33
2.2.3.3	Dynamische Systeme.....	38
2.2.3.4	Statisch-dynamische Systeme.....	41
2.2.3.5	Nachgeschaltete Systeme.....	44
2.2.4	Rohrleitungssysteme	45
2.2.4.1	Einteilungen.....	45
2.2.4.2	Verlegeverfahren Freileitung.....	52
2.2.4.3	Verlegeverfahren Kanal.....	67
2.2.4.4	Verlegeverfahren Mantelrohr	71
2.2.4.5	Übrige Verlegeverfahren	98
2.2.5	Armaturen	104
2.2.5.1	Allgemeines.....	104
2.2.5.2	Schieber.....	106
2.2.5.3	Ventile	108
2.2.5.4	Hähne.....	109
2.2.5.5	Klappen	110
2.2.5.6	Einsatzweise der Grundbauarten	113
2.2.5.7	Sonderarmaturen.....	114
2.2.6	Bauwerke	116
2.2.7	Druckerhöhungsstationen.....	118
2.2.8	Beimischstationen	119
2.2.9	Wärmeübertragerstationen	121

2.2.10	Hausanschlußstationen.....	124
2.2.11	Wärmespeicher.....	132
2.2.12	Meßtechnik.....	134
2.2.13	Schaltungsvarianten	135
2.3	Berechnungsgrundlagen.....	137
2.3.1	Einleitung.....	137
2.3.2	Temperatur.....	137
2.3.3	Druck.....	139
2.3.4	Masse-/Volumenstrom.....	140
2.3.5	Gleichzeitigkeitsfaktor.....	141
2.3.6	Geschwindigkeit und Druckverlust.....	142
2.3.7	Optimaler Durchmesser	153
2.3.8	Wärmeverluste und Isolierdicken.....	156
2.3.9	Statische Berechnung	164
2.3.10	Druckhaltung.....	166
2.4	Planung und Bau	174
2.4.1	Einleitung.....	174
2.4.2	Grundlagenermittlung	176
2.4.3	Vorplanung.....	176
2.4.4	Entwurfsplanung	181
2.4.5	Genehmigungsplanung.....	183
2.4.6	Ausführungsplanung.....	184
2.4.7	Vorbereitung der Vergabe.....	189
2.4.8	Mitwirkung bei der Vergabe	191
2.4.9	Bauüberwachung.....	191
2.4.10	Objektbetreuung und Dokumentation	192
2.5	Betrieb und Instandhaltung.....	192
3	Wasserversorgungssysteme.....	197
3.1	Allgemeines und Besonderheiten.....	197
3.2	Aufbau und Struktur	207
3.2.1	Unterteilung	207
3.2.2	Wassergewinnung	208
3.2.3	Wasseraufbereitung.....	210
3.2.4	Wasserspeicherung.....	214
3.2.5	Druckerhöhungs- und Druckminderstationen	220
3.2.6	Rohrleitungssysteme	223
3.2.6.1	Einteilungen.....	223
3.2.6.2	Verlegeverfahren Gußeisen	233
3.2.6.3	Verlegeverfahren Stahl	237
3.2.6.4	Verlegeverfahren Asbestzement.....	240
3.2.6.5	Verlegeverfahren Spann- und Stahlbeton.....	243
3.2.6.6	Verlegeverfahren Kunststoff	245
3.2.6.7	Zubehörteile.....	252
3.2.7	Armaturen	259

3.2.7.1	Allgemeines	259
3.2.7.2	Schieber	263
3.2.7.3	Ventile	265
3.2.7.4	Hähne.....	266
3.2.7.5	Klappen	267
3.2.7.6	Einsatzweise der Grundbauarten	271
3.2.7.7	Sonderarmaturen.....	272
3.2.8	Bauwerke und Schächte	278
3.2.9	Hausanschluß	280
3.2.10	Meßtechnik.....	280
3.3	Berechnungsgrundlagen.....	282
3.3.1	Einleitung	282
3.3.2	Temperatur	282
3.3.3	Druck und Druckhöhe	282
3.3.4	Volumenstrom.....	283
3.3.5	Gleichzeitigkeitsfaktor	284
3.3.6	Geschwindigkeit und Druckverlust.....	284
3.3.7	Optimaler Durchmesser	293
3.3.8	Auskühlzeiten.....	295
3.3.9	Statische Berechnung	295
3.3.10	Druckstoßberechnung	296
3.4	Planung und Bau.....	300
3.4.1	Einleitung	300
3.4.2	Grundlagenermittlung	301
3.4.3	Vorplanung.....	302
3.4.4	Entwurfsplanung	305
3.4.5	Genehmigungsplanung.....	305
3.4.6	Ausführungsplanung	306
3.4.7	Vorbereitung der Vergabe.....	313
3.4.8	Mitwirkung bei der Vergabe	314
3.4.9	Bauüberwachung.....	315
3.4.10	Objektbetreuung und Dokumentation	315
3.5	Betrieb und Instandhaltung	315
4	Zuverlässigkeit von Versorgungssystemen.....	327
5	Theoretische Grundlagen.....	331
5.1	Definitionen	331
5.2	Zuverlässigkeit des Elements technischer Systeme	338
5.2.1	Das Element im System	338
5.2.2	Zuverlässigkeitskenngrößen und deren Berechnung.....	340
5.2.2.1	Allgemeines.....	340
5.2.2.2	Wahrscheinlichkeits- und statistische Definitionen grundlegender Zuverlässigkeitskenngrößen	341

5.2.2.3	Definition der Momente	351
5.2.3	Zuverlässigkeitskenngrößen von verwendeten Verteilungen	353
5.2.3.1	Allgemeines	353
5.2.3.2	Exponential-Verteilung	354
5.2.3.3	Hyper-Exponential-Verteilung	356
5.2.3.4	ERLANG-Verteilung.....	356
5.2.3.5	Hyper-ERLANG-Verteilung	358
5.3	Zuverlässigkeit technischer Systeme	358
5.3.1	Erläuterung zum Systembegriff	358
5.3.2	Systemaufbereitung.....	359
5.3.3	Zuverlässigkeitslogische Grundstrukturen	361
5.3.3.1	Einleitung	361
5.3.3.2	Reduzible Zuverlässigkeitsstrukturen.....	362
5.3.3.3	Irreduzible Zuverlässigkeitsstrukturen	369
6	Modellauswahl und Modelldefinition.....	373
6.1	Allgemeines	373
6.2	Mathematische Modelle.....	374
6.3	Auswahl des mathematischen Modells	378
6.4	Schaffung von Modellbedingungen	380
6.4.1	Fernwärmeversorgungssysteme	380
6.4.2	Wasserversorgungssysteme.....	384
6.4.3	Gemeinsamkeiten beider Versorgungssysteme.....	385
6.5	MARKOWsches Modell.....	386
6.5.1	Theorie der MARKOWschen Modelle	386
6.5.1.1	Homogene MARKOWsche Modelle.....	386
6.5.1.2	Semi-MARKOWsche Modelle.....	395
6.5.2	Aufstellung der MARKOWschen Modellgruppen I und II..	400
6.6	Ergebnisse zur Modellauswahl	413
6.7	Algorithmus zur statistischen Aufbereitung des Datenmaterials	414
7	Praktische Anwendung.....	427
7.1	Handlungsschema	427
7.2	Statistiken.....	427
7.2.1	Allgemeines	427
7.2.2	Fernwärmeversorgungssysteme	431
7.2.3	Wasserversorgungssysteme.....	436
7.3	Anwendung der mathematischen Modelle.....	438
7.3.1	Aufbereitung der Daten.....	438
7.3.2	Gewinnung der Betriebs- und Ausfallraten	441
7.3.3	Ermittlung der Verfügbarkeit	449
7.3.4	Vergleich beider Modellgruppen	453

7.3.5	Abhängigkeitsuntersuchungen	454
7.3.5.1	Spezifische Verfügbarkeit	454
7.3.5.2	Einflußfaktoren Nenndurchmesserlänge und Ereignishäufigkeit.....	459
7.3.5.3	Einfluß bestimmter Elemente	460
7.3.5.4	Einfluß der Zeit.....	463
7.3.5.5	Einfluß der Summenereignisdauer	465
7.3.6	Vergleich der Ergebnisse und Auswertung	466
7.3.6.1	Vorbemerkungen	466
7.3.6.2	Fernwärmeversorgungssysteme.....	467
7.3.6.3	Wasserversorgungssysteme	487
8	Schwachstellenanalyse	495
8.1	Inhalt und Definition.....	495
8.2	Sinn der Schwachstellenanalyse	503
8.3	Vorgehensweise	507
Anhang		515
Literaturverzeichnis		535
Sachverzeichnis		547

1 Einleitung

Steigende Größe und Komplexität von rohrleitungsgebundenen Systemen, wie es die Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme sind, und die zum Teil hohen Anforderungen an deren Versorgungszuverlässigkeit rücken die Notwendigkeit zuverlässigkeitstechnischer Analysen immer mehr in den Vordergrund ingenieurmäßiger Betrachtungen. Um die Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit, da es sich bei diesen Systemen um reparable Systeme handelt, beurteilen zu können, reichen qualitative Überlegungen und verbale Beschreibungen nicht mehr aus. Deshalb werden auch für solche Versorgungssysteme immer häufiger quantitative Aussagen verlangt, die nur durch eine wahrscheinlichkeitstheoretisch unterstützte Zuverlässigkeitsanalyse erhalten werden. Die Zuverlässigkeitstechnik und somit Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie gewinnen daher immer mehr an Bedeutung.

In den vergangenen Jahrzehnten hat die Bedeutung der Zuverlässigkeitstechnik sprunghaft zugenommen, begründet durch den wachsenden technischen Fortschritt, das ständig steigende Anspruchsdenken sowie die Notwendigkeit, kostengünstigere und somit wirtschaftlichere Lösungen zu realisieren. Dadurch bedingt wurden in allen technischen Bereichen die Anforderungen und der Aufgabenumfang immer größer. Gleichzeitig werden die technischen Anlagen immer leistungsstärker, größer und komplexer ausgelegt. Rohrleitungsgebundene Versorgungssysteme bestehen aus sehr vielen einzelnen Elementen mit unterschiedlicher Abhängigkeit, wodurch sich das Stör- und Ausfallverhalten dieser Systeme sehr komplex gestaltet.

Während in der Vergangenheit bei der einfachen Technik eine hohe Zuverlässigkeit durch Einfachheit und hohe Materialreserven erzielt wurde, kann bei heutigen Systemen eine hohe Zuverlässigkeit unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte nur durch ein gutes Konzept, durch hohe Qualität der eingesetzten Elemente und durch eine wohldurchdachte Systemstruktur erreicht werden.

Mit diesem Buch wird – unter Nutzung der bekanntgewordenen Literatur und der Ergebnisse eigenständiger Untersuchungen – der Versuch unternommen, einige Grundlagen und Methoden zur Charakterisierung und Berechnung der Zuverlässigkeit solcher komplizierten technischen Systeme zu vermitteln.

Ziel des Buches ist die systematische Aufbereitung und Beschreibung der Methodik und der Verfahren zur ingenieurmäßigen Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen aus der Zuverlässigkeit seiner Elemente unter Berücksichtigung betrieblicher und technischer Randbedingungen. Es werden Berechnungsverfahren beschrieben, die sich in der Praxis als leistungsfähig erwiesen haben. Darunter werden solche Verfahren verstanden, die je nach Auswahl sowohl hinreichend genaue Ergebnisse liefern, als auch in der Handha-

bung nicht zu aufwendig sind. Dabei geht es nicht um die Entwicklung neuer mathematischer Theorien, sondern vielmehr um die Anwendung bereits vorhandener mathematischer Modelle für die Praxis.

Zusammenfassend ist feststellbar, daß systematische Zuverlässigkeitsanalysen rohrleitungsgebundener Versorgungssysteme einschließlich Zuverlässigkeitsbewertungen für Systemelemente außer in theoretischen Ansätzen und ersten Schritten zur Datenbasisgewinnung bislang nicht zu verzeichnen sind. Eigene Datenermittlungen liegen nur punktuell vor. Daraus begründet sich die Notwendigkeit modell- und datenbezogener Zuverlässigkeitsanalysen für derartige Systeme, hier speziell für Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme.

Wie die Praxis auch zeigt, macht es häufig Schwierigkeiten, daß ein Hersteller vom späteren Betreiber des Produktes aussagekräftige Daten aus der Betriebserfahrung (Stör-, Ausfall-, Instandhaltungs- und Reparaturdaten) erhält, um diese Erfahrung in ausreichendem Maße ins Produkt umzusetzen. Ausnahme bildet die Gewährleistungszeit und auch nur dann, wenn an dem gelieferten Produkt Fehler auftreten. Dies gestaltet sich insbesondere schwierig, da es sich in der Regel um erdverlegte Versorgungssysteme handelt. Das Gesamtziel kann hier nur getreu dem Motto lauten: wir sitzen alle im gleichen Boot. Ein Zurückhalten von Daten bringt niemandem etwas. Gleiches gilt auch für oberflächlich oder „geschönt“ geführte Ereignisstatistiken mit Daten über Störungen, Ausfälle und Schäden. Ein weiterer Fakt, der für eine Zuverlässigkeitsanalyse derartiger Systeme spricht, ist das zum Teil hohe Betriebsalter, vor allem bei Wasserversorgungssystemen.

Grundsätzlich kann angemerkt werden, daß die in diesem Buch aufgestellten Lösungsansätze zur Berechnung der Zuverlässigkeit ebenso für andere rohrleitungsgebundene Versorgungssysteme, wie beispielsweise Gasversorgungssysteme, unter Berücksichtigung ihrer Spezifik Verwendung finden können.

Das Buch teilt sich sinnbildlich in zwei Hauptteile auf (Abb. 1-1). Während in den Kap. 2 und 3 erstmalig die gemeinsame Beschreibung der Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme erfolgt, werden in den sich anschließenden Kap. 4–8 die Vorgehensweise bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen solcher rohrleitungsgebundener Versorgungssysteme, die dazu notwendigen Verfahren und deren Anwendung beschrieben. Der Leser, je nachdem, für welches Versorgungssystem er Interesse bekundet, erhält somit die Möglichkeit, sich gleich dem zweiten Hauptteil zuzuwenden. Weiterhin kann der Leser, trotz der vorhandenen Unterschiede beider Versorgungssysteme, einen direkten Vergleich durchführen, da die Berechnung der Zuverlässigkeit dieser Systeme analog ist.

Das Kap. 2 befaßt sich mit der Struktur und dem Aufbau, den Berechnungsgrundlagen, der Planung und dem Bau sowie dem Betrieb und der Instandhaltung von Fernwärmeversorgungssystemen, wobei der Schwerpunkt in der Beschreibung der einzelnen Anlagenteile liegt. Dabei erfolgt bei den einzelnen Erläuterungen eine prinzipielle Unterscheidung, soweit diese notwendig erscheint, zwischen den Wärmemedien Heizwasser und Dampf. In diesem Kapitel werden bereits vorliegende Erkenntnisse der Fernwärmeversorgung zusammengefaßt und einem zeitgemäßen Abgleich unterzogen mit dem Ziel, eine in sich geschlossene Beschreibung dieses Systems zu erhalten. Erläuterungen zu Anlagen der Wärmeerzeugung ergänzen das Kapitel.

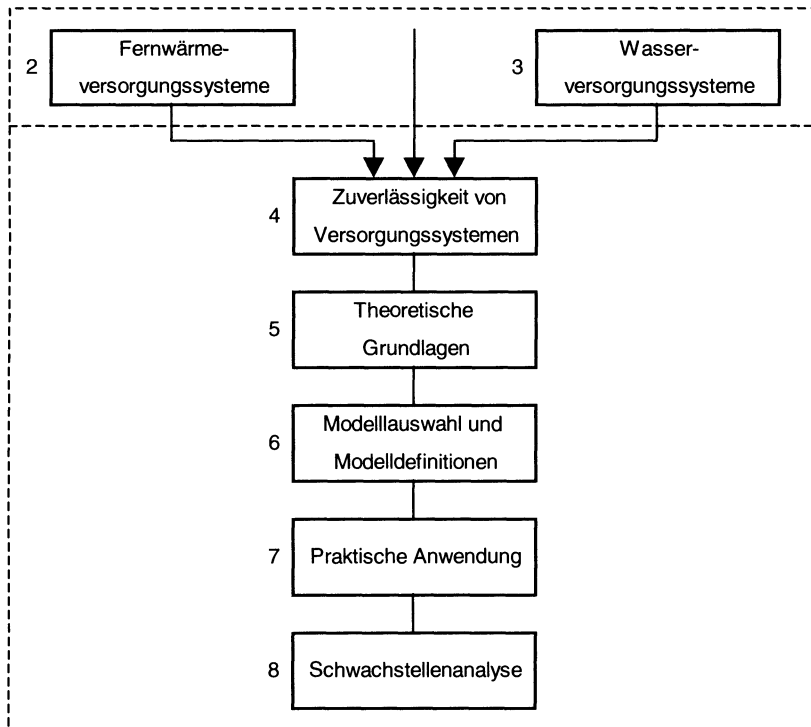


Abb. 1-1 Buchaufbau

Im Gegensatz zum Kap. 2 existiert eine größere Anzahl von allgemeiner und spezieller Literatur zu Wasserversorgungssystemen, so daß in Kap. 3 zwar analog zu Fernwärmeversorgungssystemen die Beschreibung erfolgt, jedoch in gestraffter Form, was letztendlich den Vergleich mit Anlagen der Fernwärmeversorgung ermöglichen soll. Hierbei wird insbesondere auf die Anlagen der Wasserverteilung eingegangen. Erläuterungen zu Anlagen der Wassergewinnung, Wasseraufbereitung, Wasserförderung und Wasserspeicherung ergänzen das Kapitel.

Der zweite Hauptteil des Buches beginnt mit allgemeinen Ausführungen zur Zuverlässigkeit von Versorgungssystemen in Kap. 4. Grundlagen für die Berechnung der Zuverlässigkeit sind in Kap. 5 enthalten. Ausgangspunkt bilden einerseits Definitionen der Begriffe Element und System anhand praktischer Beispiele beider Versorgungssysteme, andererseits die Zuverlässigkeitskenngrößen sowie die Beschreibung der zur Anwendung kommenden Exponential- und ERLANG-Verteilung. Des weiteren wird die Vorgehensweise bei der Berechnung der Zuverlässigkeit verschiedener Strukturen ebenfalls anhand von Beispielen erläutert. Mit den in Kap. 5 aufgezeigten Grundlagen für die Berechnung der Zuverlässigkeit erfolgt in Kap. 6 die Modellauswahl und Modelldefinition für die beiden Versorgungssysteme. Dabei werden Zweizustands- (BOOLEsches Modell) und Mehrzustandsmodelle (MARKOWsches Modell) mit ihren Vor- und Nachteilen

gegenübergestellt und entsprechend der Spezifik der beiden Versorgungssysteme ausgewählt sowie die Herangehensweise bei der Aufstellung und Lösung im einzelnen, zum Teil mit praktischen Beispielen, beschrieben. Abschluß des Kapitels bildet ein Algorithmus zur statistischen Aufbereitung des Datenmaterials zur Gewinnung der Betriebs- und Ausfallraten. In Kap. 7 wird mit Hilfe eines Handlungsschemas die Vorgehensweise bei der Berechnung der Zuverlässigkeit solcher Systeme aufgezeigt. Dazu werden die erforderlichen Datenerfassungsblätter für unplanmäßige Ereignisse (Störungen, Ausfälle, Schäden und Unregelmäßigkeiten) vorgestellt, welche die Basis für die Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärmeversorgungssystemen mit dem Programm ZVFW98[®] bilden. Des weiteren wird auf andere Erfassungsprogramme sowie auf entsprechende Anpassungen für die Berechnung der Zuverlässigkeit von Wasserversorgungssystemen eingegangen. Schwerpunkt dieses Kapitels ist die praktische Umsetzung der aufgestellten mathematischen Modelle anhand von ausführlichen Beispielen. Dabei werden neue Kenngrößen – beispielsweise spezifische Verfügbarkeit pro Leitungskilometer – gebildet und verschiedene Abhängigkeitsbetrachtungen diskutiert. Um zuverlässigkeitserhöhende Maßnahmen ableiten zu können, muß eine Schwachstellenanalyse des zu betrachtenden Systems erfolgen, welche in Kap. 8 beschrieben ist. Hierbei geht es einerseits um die Herangehensweise, andererseits um die Berechnung von Netzstrukturen hinsichtlich des zuverlässigkeitslogischen Aufbaus unter Verwendung der einzelnen Elementezuverlässigkeiten.

Im Anhang sind eine Reihe von praktischen Näherungsgleichungen, Maßtabellen von Rohren, Rauigkeitswerte für Rohrleitungen, Datenerfassungsblätter und ihre Spezifika sowie einzelne Betriebs- und Ausfallraten von Elementen für Fernwärmeversorgungssysteme enthalten. Am Ende des Buches findet der Leser ein umfangreiches Literaturverzeichnis.

Mit dem hier vorgestellten Programm und dessen Algorithmen wird für den Betreiber und Planer solcher Anlagen die Berechnung der Zuverlässigkeit dieser Systeme oder einzelner Elemente möglich, ohne ein tiefergehendes mathematisches Wissen besitzen zu müssen. Grundlage dazu bilden lediglich ordnungsgemäß geführte Ereignis- und Netzstatistiken. Dadurch bedingt wird es zum unentbehrlichen Hilfsmittel, insbesondere zum einen bei durchzuführenden Schwachstellenanalysen, zum anderen bei Entscheidungen von zuverlässigkeitserhöhenden Maßnahmen sowie deren Nachweis.

Begründet auf den Erkenntnissen dieses Buches sowie dem ständigen Entwicklungsprozeß unterliegt das Programm zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen einer laufenden Aktualisierung. Zudem ist es sehr schwierig, ein allgemeingültiges Programm zur Verfügung zu stellen, ohne dabei entsprechende Anpassungen an die jeweils vorliegenden Bedingungen des zu betrachtenden Versorgungssystems vorzunehmen.

Natürlich kann der Leser bei Interesse entsprechende Unterlagen und eine aktuelle Demoversion beim Autor anfordern. Gleichzeitig sei auf den hierfür eingerichteten Internetservice verwiesen, welcher das Ziel hat, aktuelle Daten und Fakten für den Betreiber und Planer zur Verfügung zu stellen.

2 Fernwärmeversorgungssysteme

2.1

Allgemeines und Besonderheiten

Fernwärme ist eine leitungsgebundene Energie zur Wärmeerzeugung von Abnehmern über Wärmemedien. Als Wärmemedien kommen Heizwasser¹ oder Dampf zum Einsatz. Die Wärme wird zentral in Heizkraftwerken oder Heizwerken erzeugt oder aus sonstigen Wärmequellen bezogen. Sie wird dem Abnehmer für Raumheizung, Wassererwärmung oder Produktionszwecke über Rohrleitungssysteme zugeführt.

Die Idee, Wärmemengen vom Ort ihrer Erzeugung über größere Entfernungen zu den Abnehmern zu transportieren, entstand in Deutschland gegen Ende des vorherigen Jahrhunderts. Vor allem waren es die Krankenanstalten, die sich bereits Ende des vorigen Jahrhunderts aus hygienischen Gründen zu einer Fernheizung bekannten. Später kamen öffentliche Gebäude und Einrichtungen hinzu. Als Beispiel kann die 1889 in Betrieb genommene 300 m lange Dampfleitung der Hamburgischen Elektrizitätswerke zur Beheizung des Hamburger Rathauses gezählt werden (Buch 1983). Einen hohen Bekanntheitsgrad besitzt auch das Beispiel aus Dresden, wo um 1900 ein Heizkraftwerk 11 Gebäude mit Dampf und 20 Gebäude mit Strom aus der Kraft-Wärme-Kopplung versorgte. Neben wirtschaftlichen Aspekten, lagen die Gründe vor allem in der Senkung der Schadstoffangriffe auf unersetzliche Kunstschatze (Munser 1980).

Die wirtschaftlichen Voraussetzungen verbesserten sich nach 1920 durch die Verteuerung der Brennstoffe. Während 1936 noch 80 % aller Erzeugerwerke mit Dampf als Wärmemedium betrieben wurden, waren es 1956 nur noch 65 % (Buch 1983). Das neue Wärmemedium hieß Heizwasser. Mit diesem Wärmemedium waren die Vorteile des kleineren Volumens und der damit schwächer dimensionierten Rohrleitungen, die verminderten Isolierstärken, da nur noch tiefere Temperaturen benötigt wurden, und die Senkung der Transportverluste verbunden. Im Gegensatz zu einem Dampfnetz ist der Heizwasserkreislauf geschlossen, so daß Sauerstoffeinbrüche und daher Korrosionen weitgehend vermieden werden. Weitere Vorteile eines Heizwassernetzes sind die Möglichkeiten der guten Regelfähigkeit in Anpassung an die Außentemperaturen, entweder über die Vorlauftemperatur oder/und den Volumenstrom.

¹ In verschiedenen Literaturquellen sind die Begriffe – Heizwasser und Heißwasser – gleichgesetzt. Dabei gilt der Begriff des Heizwassers als Synonym nicht nur für Heißwasser, sondern ebenfalls für Warmwasser.

Die Größe der Fernwärmesysteme kann von 1 MW bis über 4000 MW gehen, so daß auch Nahwärmesysteme unter dem Begriff Fernwärme fallen. Dabei wird unter Nahwärme die Umwandlung von Primärenergien in Wärme vor Ort, also in der Nähe der Abnehmer verstanden (Palic 1998).

Die Fernwärme wird in Heizkraftwerken in Kraft-Wärme-Kopplung und in Heizwerken erzeugt. Die eingesetzte Energie kann Kohle, Öl, Gas, Müll, industrielle Abwärme oder Sonstiges sein. Der Brennstoffeinsatz für 1996 lag für die Strom- und Wärmeerzeugung in Heizkraftwerken, einschließlich Fremdbezug bei 498428 TJ und in Heizwerken, einschließlich Fremdbezug bei 112990 TJ (Schmitz 1997b). Die einzelnen Energieanteile sind in Abb. 2.1-1 dargestellt.

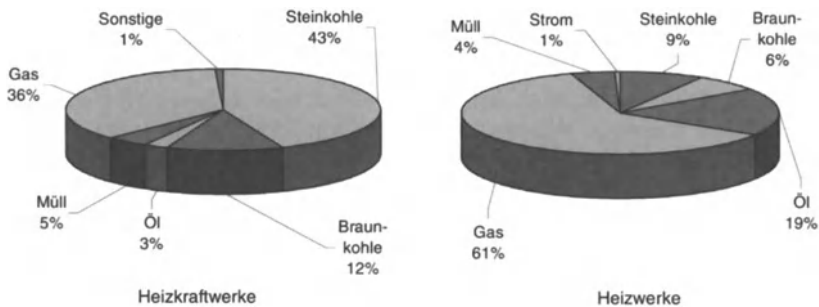


Abb. 2.1-1 Brennstoffeinsatz 1996 für Heizkraftwerke und Heizwerke

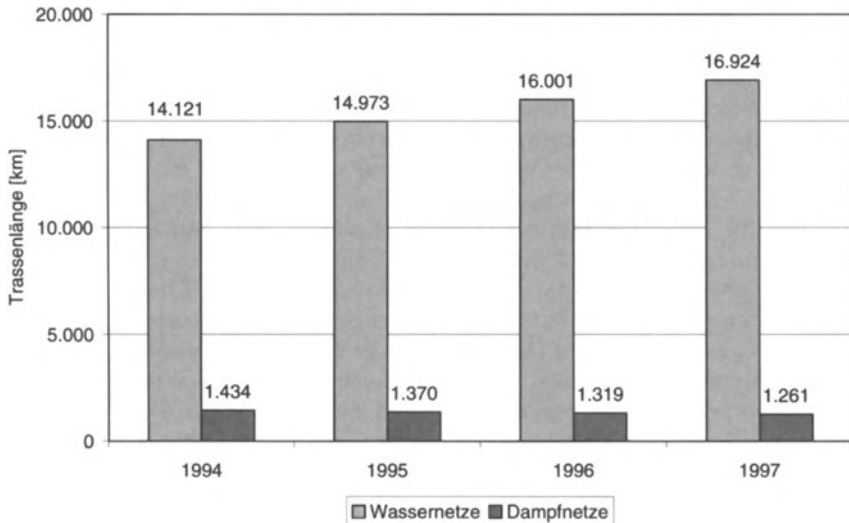


Abb. 2.1-2 Gegenüberstellung des derzeitigen Ausbaues von Heizwasser- und Dampfsystemen (Schmitz 1997b, 1998)

Bei den zum Einsatz kommenden Wärmemedien Heizwasser und Dampf ist tendenziell in Abb. 2.1-2 zu erkennen, daß Dampfsysteme zunehmend in der Fernwärmeversorgung an Bedeutung verlieren. Dies liegt insbesondere darin begründet, daß Heizwassersysteme wirtschaftlicher als Dampfsysteme zu betreiben sind. In der Regel werden Dampfsysteme nur für Produktionswärmelieferungen vorgehalten, aber es gibt auch noch eine Reihe von bestehenden Systemen.

Die Nutzung der Fernwärme erstreckt sich auf 3 Verwendungsarten: Raumheizung, Warmwasserbereitung und Prozeßwärme. Hauptnutzer der Raumwärme und Warmwasserbereitung ist der kommunale Bereich, insbesondere der Haushalt. Des weiteren gehören Kleinverbraucher, wie öffentliche Einrichtungen – Dienstgebäude, Schulen und Krankenhäuser – in diesen Bereich, sowie ferner kleinere Gewerbebetriebe. Prozeßwärme fällt in den meisten industriellen Betrieben an.

Die Raumwärme eines geschlossenen Verbrauchsgebietes ist abhängig von den klimatischen Verhältnissen, der Einwohnerzahl und dem Lebensstandard der Bevölkerung. Für Deutschland sind die klimatischen Bedingungen unverändert. Für die zur Deckung der Raumwärme aufzubringende Wärmemenge ist die Dauer der Heizperiode mit den ihr eigentümlichen Außentemperaturen ausschlaggebend. Die Warmwasserbereitung umfaßt die Bereitstellung von erwärmtem Trink- oder Betriebswasser und ist abhängig bei einem zu versorgenden Gebäude von der Wohnungs-, Raum-, Belegungs- und Zapfstellenzahl.

Prozeßwärme ist Wärme, die zur Durchführung technologischer Prozesse, vorwiegend industrieller Art, aufgewendet wird. Da einerseits zunehmend bei Heizwassersystemen das mittlere Vorlauftemperaturniveau sinkt und in Zukunft sinken wird, andererseits der Abnehmer meistens eine konstante Temperatur über das ganze Jahr benötigt, kann die Prozeßwärme überwiegend nur durch Dampf bereitgestellt werden. Dies trifft insbesondere in den Sommermonaten zu. Ein konstantes Vorlauftemperaturniveau auch in den Sommermonaten führt für das Versorgungsunternehmen zu erhöhten Kosten, welche auch nicht immer über den Wärmepreis abgegolten werden können.

Der Wärmebedarf selbst ist vom Wetter und somit von der Jahreszeit sowie von der Tageszeit und dem Wochentag abhängig. Das *Wetter* kennzeichnet den jeweiligen physikalischen Zustand und die Änderung des Zustandes der Atmosphäre an einem Ort zu einer bestimmten Zeit. Das Wetter selbst wird bestimmt durch das Verhalten und das Zusammenwirken der jeweils herrschenden meteorologischen Elemente, wie vor allem Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Luftbewegung, Sonnenstrahlung, Bewölkung, Niederschlag und Sicht (Kraft 1981).

Eine der wichtigsten Einflußgrößen auf den Wärmebedarf ist die Außenlufttemperatur, was u. a. darin begründet liegt, daß sie für jeden die am einfachsten fühlbare Größe ist. Zudem läßt sich diese Größe unkompliziert messen. Die gewonnenen Abhängigkeiten werden genutzt für Planungen des Wärmebedarfes und somit für die Erzeugereinsatzoptimierung im Zusammenhang mit Häufigkeitsverteilungen der Außenlufttemperatur über längere Zeiträume (Rötsch 1987). Die Prognose des Wärmebedarfes in Abhängigkeit nur von der Außenlufttemperatur führt mit herkömmlichen Verfahren zu keinem befriedigenden Ergebnis. Wesentlich bessere Ergebnisse werden bei Anwendung von neuronalen Netzen erzielt (Mathes 1998). Den funktionalen Zusammenhang zwischen Wärmebedarf und

Außenlufttemperatur eines Heizwassersystems zeigt Abb. 2.1-3. Dieser Zusammenhang wird wesentlich geprägt durch die entsprechende Fahrweise (gleitende bzw. konstante Vorlauftemperatur oder Massenstrom) des Fernwärmesystems.

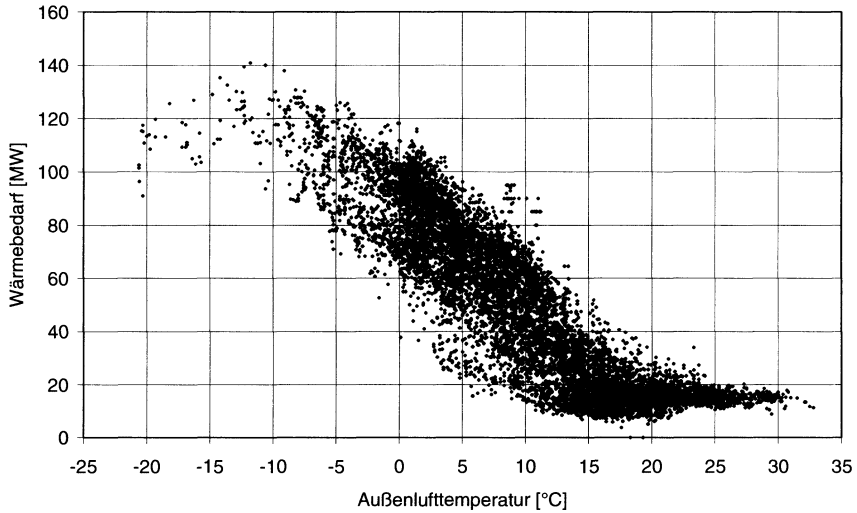


Abb. 2.1-3 Abhängigkeit zwischen Wärmebedarf und Lufttemperatur eines Heizwassersystems

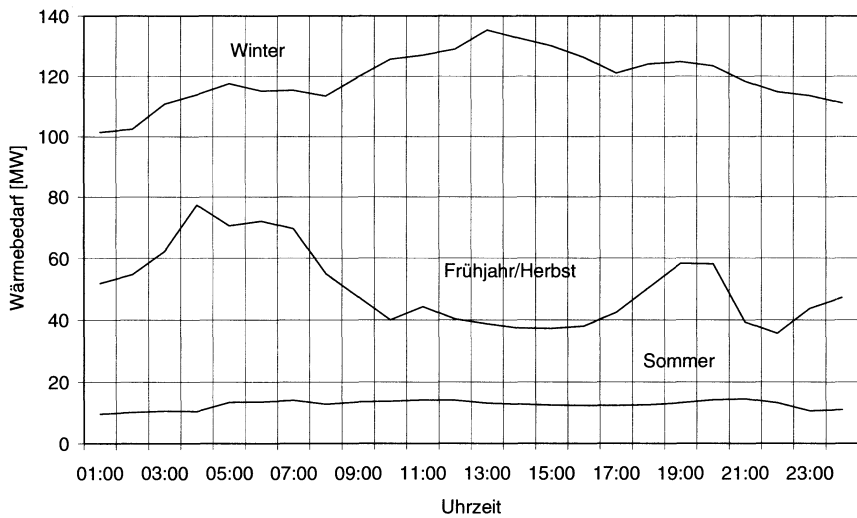


Abb. 2.1-4 Beispiel einer Tagesganglinie für Winter, Frühjahr/Herbst und Sommer

Neben dem Wetter beeinflusst die *Tageszeit* entscheidend den Wärmebedarf, der in Abb. 2.1-4 dargestellt ist. Markant sind dabei die Lastspitzen, welche verschieden je nach Jahreszeit auftreten. In den Wintermonaten tritt überwiegend nur eine Lastspitze auf. In manchen Fällen ist sogar fast ein konstanter Wärmebedarf zu verzeichnen, insbesondere bei tieferen Außenlufttemperaturen. In den Sommermonaten ist über den ganzen Tag fast nur ein konstanter Wärmebedarf zu beobachten, da der Anteil an der Raumheizung fehlt. Dagegen tritt in der sogenannten Übergangszeit, sprich Frühjahr und Herbst, eine Früh- und Abendspitze auf, verbunden mit einem sogenannten Wärmetal zu der Zeit, wo überwiegend die Lastspitze des Strombedarfes vorherrscht. Die einzelnen Wärmebedarfsspitzen und deren Ausbildung werden geprägt vor allem durch das Abnehmerverhalten und die Abnehmerart, d. h. ob anteilig mehr Abnehmer mit Raumheizung zu versorgen sind oder Abnehmer mit Wärme für Produktionszwecke.

Dieser Einfluß der Tageszeit spiegelt sich ebenfalls bei dem Wochentag wider (Abb. 2.1-5). Aus solchen Darstellungen ist die Struktur der Abnehmerart erkennbar, insbesondere wenn die Werktage mit dem Wochenende verglichen werden.

Die Abb. 2.1-6 zeigt die Darstellung einer ungeordneten Jahresganglinie, wo sich letztendlich die oben genannten Zusammenhänge aller Einflußfaktoren, wie Wetter, Tageszeit und Wochentag widerspiegeln. Dagegen stellt die geordnete Jahresganglinie, auch als Jahresdauerlinie bezeichnet, die für die Periode eines Jahres geltende Summenhäufigkeitsverteilung des Wärmeleistungsbedarfes eines Versorgungsgebietes dar. Sie wird benötigt für die Einsatzplanung vorhandener Anlagen bzw. für die Planung und Auslegung von neuen Erzeugeranlagen hinsichtlich ihrer Größe, der Einsatzart (Grund-, Mittel- und Spitzenlast) und somit ihrer Jahresbetriebsstundenzahl.

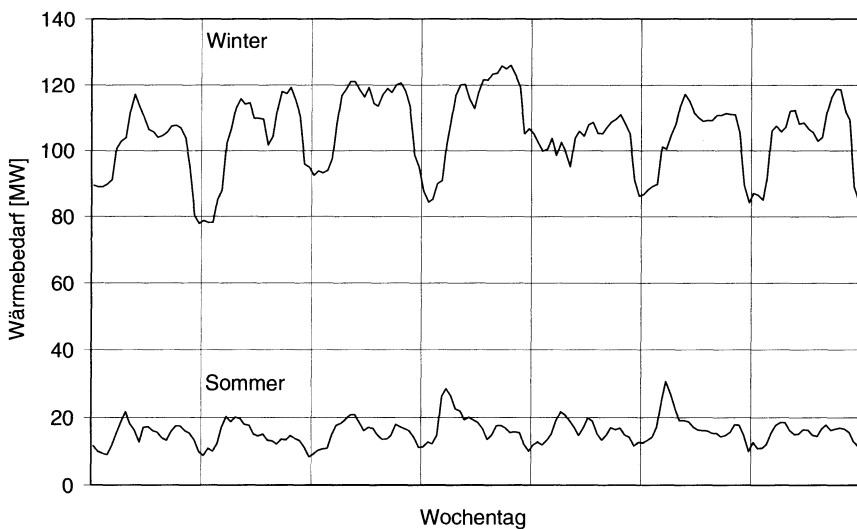


Abb. 2.1-5 Beispiel einer Wochenganglinie für Winter und Sommer

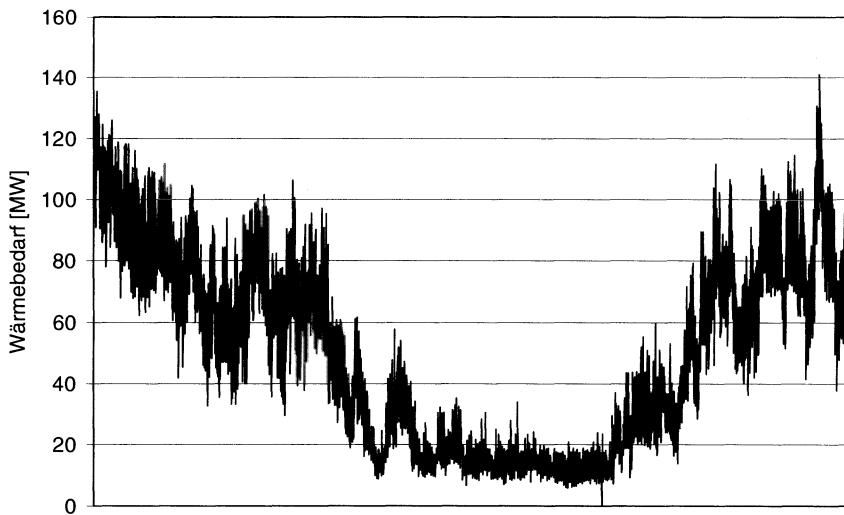


Abb. 2.1-6 Beispiel einer ungeordneten Jahresganglinie (Stundenwerte vom 01.01.–31.12.)

Für die Deckung des Wärmebedarfes kommen neben der Fernwärme auch andere Energieträger, vor allem aber Erdgas und Heizöl zum Einsatz. Fernwärme deckt etwa 10 % des Wärmemarktes (VDI 986 1992). Damit steht die Fernwärme als ein Konkurrenzprodukt anderen Energieträgern gegenüber. Fernwärme hat es aufgrund ihres hohen Investitionsbedarfes für Erzeugung, Verteilung und Übergabe nicht leicht, ihre Marktstellung zu behaupten und auszubauen. Wegen ihrer besonderen Kostenstruktur muß stets die Fernwärme ihre anlegbaren Netzinvestitionen immer am anlegbaren Preis der Konkurrenz und an den verfügbaren Wärmebereitstellungskosten orientieren. Ungeachtet des zeitweiligen Preisverfalles bei Erdgas und Heizöl haben in den meisten Fällen viele Fernwärmeversorgungsunternehmen trotzdem stets ein kontinuierliches Wachstum verzeichnen können.

Die zukünftiger Entwicklung der Fernwärmeversorgung ist sehr eng mit deren Wirtschaftlichkeit gekoppelt. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Fernwärme ist neben der Verteilung die Bereitstellung der Wärme. Unverzichtbar sind dabei die Kraft-Wärme gekoppelten Erzeugeranlagen. Diese selber können aber nur wirtschaftlich betrieben werden, wenn ein ausreichendes Mindestwärmepotential vorliegt.

Das ebenfalls oft viel zitierte Argument des Umweltschutzes spielt bei den Abnehmern eher eine untergeordnete Rolle, da bei einer umweltfreundlichen Beheizung, egal ob mit Fernwärme, Erdgas oder Heizöl dieses als selbstverständlich vorausgesetzt wird. Als viel wichtiger werden heute die Preiswürdigkeit und der Service angesehen, insbesondere bei der Gewinnung von neuen Abnehmern.

Neben all diesen genannten Faktoren wird die Entwicklung auf dem Markt mit Initiativen, wie sparsamer Umgang mit Energie, Kostensenkungsprogramme bei

Industrie und Gewerbe, Wärmedämmung von Gebäuden nach der Wärmeschutzverordnung geprägt, wobei davon aber alle Energieträger betroffen sind.

Somit sind letztendlich weitere Kostensenkungsprogramme insbesondere in Fernwärmenetzen erforderlich, um die Wettbewerbsfähigkeit der Fernwärme bei stagnierenden Energiepreisen für Erdgas und Heizöl zu sichern.

Im Vergleich mit Erdgas und Heizöl, bei denen wesentliche Kostenelemente durch Importpreise festgelegt sind, hat Fernwärme aufgrund ihrer eigenen Kostenstruktur im Grundsatz die besten Chancen, durch eigenes unternehmerisches Handeln die Gesamtkostensituation entscheidend zu beeinflussen. Gerade in einer Phase harten Wettbewerbes muß die Fernwärme in besonderem Maße ihre Vorteile deutlich machen. Diese sind:

- sichere und zuverlässige Versorgung in entsprechender Qualität (Temperatur und Druck) und Quantität (Menge),
- große Preisstabilität,
- Umweltfreundlichkeit und besonders
- der Komfort einer vollautomatischen Wärmeversorgung.

In diesem Kapitel werden der Ausbau und die Struktur der Komponenten eines Fernwärmesystems einschließlich seiner Erzeugeranlagen beschrieben. Dabei wird, soweit dies möglich erscheint, unterschieden in die beiden Wärmemedien Dampf und Heizwasser. Darauf aufbauend erfolgen grundlegende Ausführungen zu Berechnungsgrundlagen sowie Planung und Bau eines Fernwärmesystems. Der Abschnitt Betrieb und Instandhaltung wird vor allem unter dem Gesichtspunkt der Versorgungszuverlässigkeit aus betrachtet.

2.2 Aufbau und Struktur

2.2.1 Unterteilung

Das Fernwärmeversorgungssystem kann in verschiedene Anlagen unterteilt werden, wobei bei Dampfsystemen nicht alle aufgezählten Anlagen zum Einsatz kommen. Im einzelnen zählen dazu:

- Wärmeerzeugung,
- Druckhaltung,
- Rohrleitungssysteme,
- Armaturen,
- Bauwerke,
- Druckerhöhungsstationen,
- Beimischstationen,
- Wärmeübertragerstationen (WÜST),
- Hausanschlußstationen (HAST),
- Wärmespeicher sowie
- Meßtechnik.

Im folgenden werden diese Begriffe näher erläutert. Außer für den anschließenden Abschnitt Wärmeerzeugung wird bei den Erläuterungen der entsprechenden Anlagen – soweit nötig – prinzipiell zwischen Heizwasser und Dampf unterschieden.

2.2.2

Wärmeerzeugung

2.2.2.1

Grundsätzliches

Die Wärmeerzeugung in der Fernwärmeversorgung umfaßt ein komplexes Gebiet, allein gegeben durch die Tatsache der entsprechenden Variantenvielfalt des Fernwärmenetzes und seines Abnehmerverhaltens. Dazu existiert nur eine Handvoll von expliziter Literatur. Im folgenden wird eine kurze Übersicht über die Möglichkeiten der zum Einsatz kommenden Wärmeerzeugung dargestellt und diskutiert. Die Frage nach der Auslegung einer Wärmeerzeugungsanlage bleibt in dieser Abhandlung unberührt. Dazu sei auf entsprechende Literatur verwiesen.

Heizwasser und Dampf können auf verschiedene Weise erzeugt und bereitgestellt werden. Dominant dabei sind Anlagen auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung. Reine Heizwerke treten dagegen in ihrer Bedeutung aus Kostengründen immer mehr zurück und übernehmen die Funktion der Spitzendeckung und Reserve. Aus Abb. 2.2-1 ist der Anteil der Anlagen mit gegenüber ohne Kraft-Wärme-Kopplung in der Fernwärmeversorgung für 1997 ersichtlich (Schmitz 1998).

Die gleichzeitige Erzeugung von Heizwärme und Strom in einem Kraftwerk wird Kraft-Wärme-Kopplung genannt. Der energetische Vorteil dieses Prinzips liegt in der Reduzierung oder Vermeidung des Abwärmeverlustes durch reine Kondensation im klassischen Kraftwerksprozeß. Weitere Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber der separaten Heizwärmeerzeugung in Heizwerken sind:

- Einsparung von Brennstoff,
- Möglichkeit, beliebige Brennstoffe für Heizzwecke einzusetzen,
- geringere Umweltbelastung durch die Abwärme sowie
- Verminderung von Schadstoffemissionen aus Einzelfeuerungen.

Mit der Kraft-Wärme-Kopplung lassen sich damit auf den Energieinhalt des eingesetzten Brennstoffes bezogene Nutzungsgrade bis in die Größenordnung des Wirkungsgrades des Dampferzeugers erreichen. Die gleichzeitige Abnahme beider Energieformen sowie ein Temperaturniveau der Wärme von weniger als ca. 350 °C sind dafür Voraussetzung (Strauß 1992).

Die Entnahme von Dampf zur Heizwassererwärmung ist aber nicht ohne Rückwirkungen auf die Stromerzeugung möglich, d. h. bei gleicher Brennstoffwärmezufuhr geht die erzeugte elektrische Energie je Megawatt Wärme etwa um 0,15–0,20 MW zurück. Dennoch ist der Brennstoffverbrauch bei solchen Erzeugeranlagen geringer als bei getrennter Erzeugung der gleichen Mengen an Heizwärme und Strom. Diesem Verlust kann bei Heizwassererzeugung entgegen gewirkt werden durch mehrstufige Heizwassererwärmung sowie durch Absenken der Vorlauftemperatur.

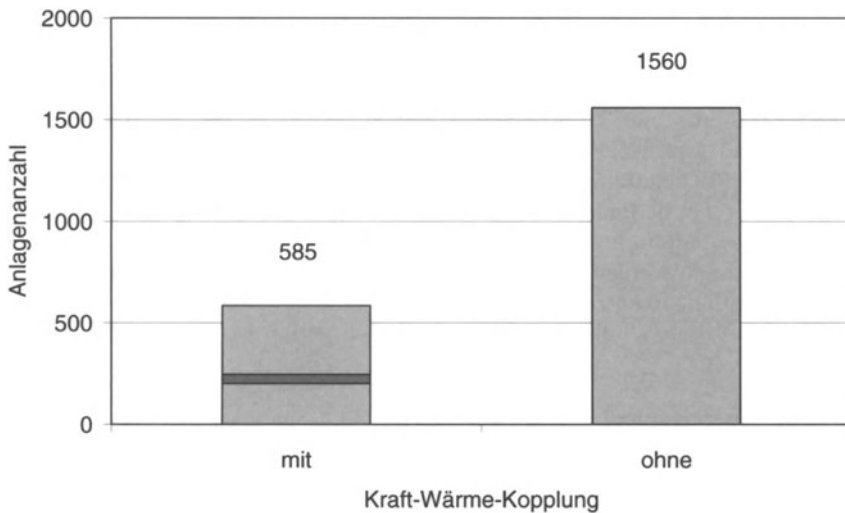


Abb. 2.2-1 Gegenüberstellung vorhandener Anlagen in der Fernwärmeversorgung 1997 mit und ohne Kraft-Wärme-Kopplung.

Säule Kraft-Wärme-Kopplung setzt sich wie folgt zusammen: Dampfturbinen einschließlich Gas- und Dampfturbinen (GuD)-Anlagen (203), Gasturbinen (43), Blockheizkraftwerke (339)

Kraft-Wärme-Anlagen können wie folgt unterschieden werden:

- Gegendruckanlagen (festes Verhältnis von Dampf- und Stromabgabe),
- Entnahmekondensationsanlagen (in Grenzen veränderbarer Auskopplung von Dampf zu Lasten der Stromerzeugung),
- Gasturbinenanlagen mit nachgeschalteten Abhitzekeesseln,
- Gas- und Dampfturbinen-Anlagen (GuD) sowie
- Blockheizkraftwerke auf motorischer oder Gasturbinenbasis.

Des weiteren zählen hierzu Absorptions- oder Adsorptionskälteanlagen (wenn die Heizenergie aus der bei Stromerzeugung anfallenden Abwärme gewonnen wird), Brüdenverdichteranlagen, Brennstoffzellen und andere Anlagensysteme. Auf diese Anlagen wird nicht weiter eingegangen, da ihre Wärmeerzeugungsleistung und somit deren Versorgungsmöglichkeiten sehr gering sind. Einsatzgebiete dieser Anlagen sind vor allem im Bereich der Heizung und Kühlung von einzelnen Gebäuden oder Gebäudekomplexen zu finden.

2.2.2.2

Gegendruck-/Entnahmekondensationsanlagen

In einem Kondensationskraftwerk wird die Abwärme aus dem Dampfkreislauf im Turbinenkondensator an Kühlwasser (oder Luft) übertragen. Dem Bestreben, diese Abwärme für die Fernwärme zu nutzen, steht das zu niedrige Temperaturniveau

von rund 25–35 °C entgegen. Um ein entsprechendes Temperaturniveau für den Einsatz als Heizwärme zu erreichen, muß der Druck, bei dem der Turbinendampf kondensiert, angehoben werden. Der einfachste Fall einer Kraft-Wärme-Kopplung ist in Abb. 2.2-2 dargestellt.

Der Abdampf einer Turbine kondensiert in einem Wärmetauscher (Heizkondensator) und gibt dabei seine Kondensationswärme an das Heizwasser ab, das sich von der Rücklauftemperatur auf die Vorlauftemperatur erwärmt.

Wird der typische Energiefluß zwischen Anlagen der konventionellen Stromerzeugung mit Dampfturbinen und Kraft-Wärme-Kopplung auf gleicher Anlagenbasis verglichen, so werden die rund 54 % Rückkühlverluste in Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung in nutzbare thermische Energie umgewandelt.

Falls das Temperaturniveau des Vorlaufes zu gering ist, kann zusätzlich noch

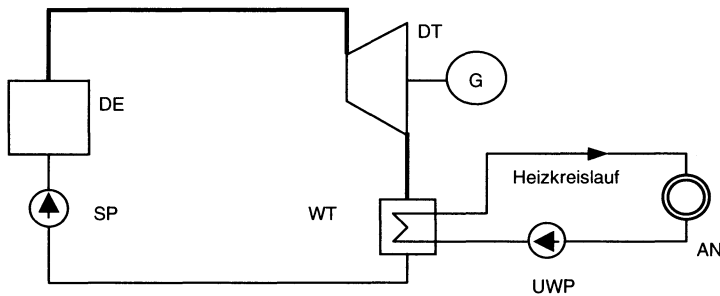


Abb. 2.2-2 Grundsaltung einer Kraft-Wärme-Kopplung

DE Dampferzeuger, DT Dampfturbine, SP Speisepumpe, WT Wärmetauscher, AN Abnehmer, UWP Umwälzpumpe

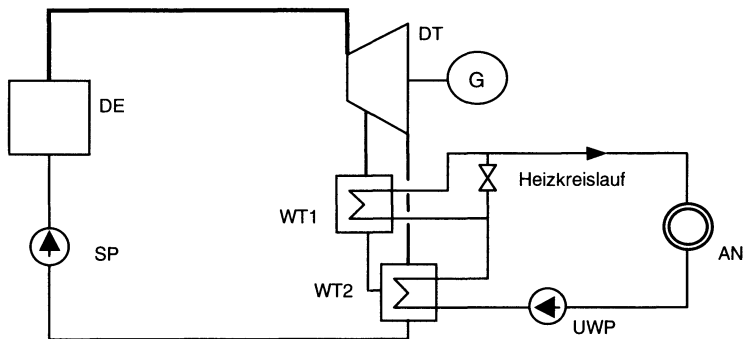


Abb. 2.2-3 Kraft-Wärme-Kopplung und zweistufiger Heizwassererwärmung

DE Dampferzeuger, DT Dampfturbine, SP Speisepumpe, WT1, WT2 Wärmetauscher, AN Abnehmer, UWP Umwälzpumpe

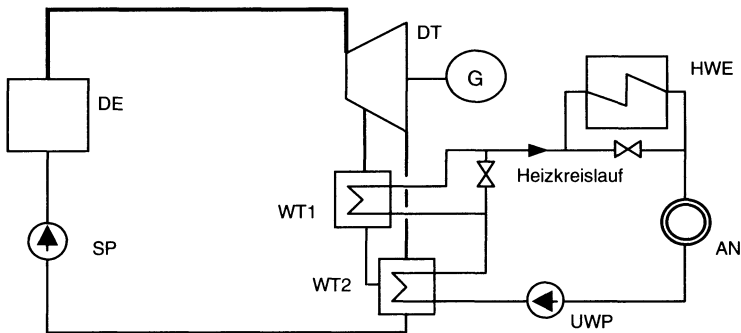


Abb. 2.2-4 Kraft-Wärme-Kopplung und zweistufiger Heizwassererwärmung sowie Spitzenlast-Heißwassererzeuger

DE Dampferzeuger, DT Dampfturbine, SP Speisepumpe, WT1, WT2 Wärmetauscher, AN Abnehmer, UWP Umwälzpumpe, HWE Heißwassererzeuger

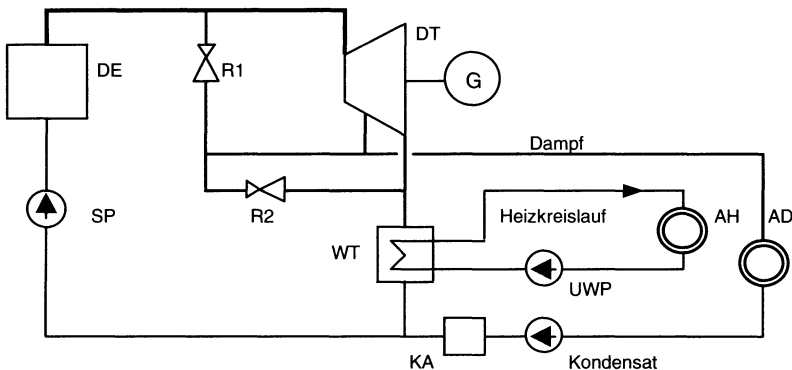


Abb. 2.2-5 Kraft-Wärme-Kopplung und Heizwassererwärmung sowie Dampfauskopplung
DE Dampferzeuger, DT Dampfturbine, SP Speisepumpe, WT Wärmetauscher, AH Heizwasserabnehmer, AD Dampfahnehmer, UWP Umwälzpumpe, R1, R2 Reduzierstationen, KA Kondensataufbereitung

Anzapfdampf bzw. Entnahmedampf² vor der letzten Turbinenstufe ausgekoppelt werden. Bei Bedarf ist gleichzeitig eine Umfahrung des Wärmetauschers WT1 möglich. Das dazu entsprechende Schaltungsbeispiel zeigt Abb. 2.2-3.

Trotzdem ist bei dieser Anlagenvariante das Temperaturniveau des Vorlaufes begrenzt. In einigen Versorgungsgebieten reicht dann diese Vorlauftemperatur,

² Die beiden Begriffe – Anzapf- und Entnahmedampf – werden hier wie folgt definiert:

Der Anzapfdampf ist eine unregelte Entnahme von Dampf aus der Dampfturbine, wobei der Anzapfdampf an der entsprechenden Turbinenstufe entnommen wird. Der Druck ist nicht konstant und schwankt entsprechend der Turbinenleistung und der entnommenen Anzapfmenge. Der Entnahmedampf ist eine geregelte Entnahme von Dampf aus der Dampfturbine.

insbesondere in der Winterperiode, nicht mehr aus, so daß über Spitzenlast-Heißwassererzeuger das entsprechende Temperaturniveau angehoben werden kann (s. Abb. 2.2-4). In der restlichen Jahreszeit können die Spitzenlast-Heißwassererzeuger umfahren werden.

Bei Dampfsystemen wird der dazu benötigte Dampf entweder über Anzapfungen oder Entnahmen aus den entsprechenden Stufen der Dampfturbine gewonnen. Beispiele für Druckparameter sind 20, 16, 11 oder 3,5 bar. Eine ausgeführte Schaltungsvariante ist in Abb. 2.2-5 abgebildet.

2.2.2.3

Gasturbinenanlagen

Die Gasturbinenanlagen haben seit langem ihre Zuverlässigkeit in der kommunalen sowie industriellen Stromerzeugung bewiesen. In Deutschland sind über 200 Gasturbinenanlagen mit einer elektrischen Gesamtleistung von mehr als 6500 MW installiert. Derzeit geht der Trend verstärkt in den Bereich der kleineren elektrischen Aggregateleistungen; von 10–1,5 MW, aber auch noch kleiner.

Das Rauchgas von der Gasturbine mit Temperaturen zwischen 450 °C und 600 °C wird als Abwärmepotential einem nachgeschalteten Abhitzekessel³ zur Produktion von Dampf oder Heizwasser zugeführt, dabei abgekühlt und anschließend über den Kamin abgeleitet. In Sonderfällen können die Rauchgase auch direkt in Produktionsprozesse (z. B. Trocknern) zum Einsatz kommen.

Wird der typische Energiefluß zwischen Anlagen der konventionellen Stromerzeugung mit Gasturbine und Kraft-Wärme-Kopplung auf gleicher Anlagenbasis verglichen, so werden 80 % der entstehenden Abwärme- und sonstigen Verluste in Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung auf 20 % vermindert und so als nutzbare thermische Energie zur Verfügung gestellt. Eine Grundschaltung einer Gasturbinenanlage in Form eines offenen Gasturbinenprozesses mit Heizwasser- bzw. Dampferzeugung zeigt Abb. 2.2-6.

Im Leistungsbereich der Gasturbinenanlagen wird unterschieden zwischen

- dem einfachen, offenen Gasturbinenprozeß mit und ohne Zusatzfeuerung im Abhitzekessel;
- dem Gas- und Dampfturbinenprozeß (GuD-Prozeß) mit und ohne Zusatzfeuerung im Abhitzekessel;
- der Gasturbine mit Dampfeinspritzung (Cheng Cycle).

Während die Gasturbine im Regelfall mit Erdgas oder Heizöl betrieben wird, können in der Zusatzfeuerung alle verfügbaren Brennstoffe (fest, flüssig, gasförmig) zur Anwendung kommen. In der Mehrzahl der derzeit realisierten Gasturbinenanlagen, welche mit einer Zusatzfeuerung für den Abhitzekessel betrieben werden, werden Erdgas und Heizöl bivalent eingesetzt. Bei den Gasturbinen verhält sich dies anders. Dort stehen dem wirtschaftlichen Einsatz die Anforderungen hinsichtlich der Reinheit der die Turbine durchströmenden Gase entgegen. Diese Forderungen können zur Zeit nur von den relativ teuren Brennstoffen Erdgas und Heizöl erfüllt werden.

³ In der Literatur wird auch des öfteren der Begriff Abwärme-Dampferzeuger verwendet.

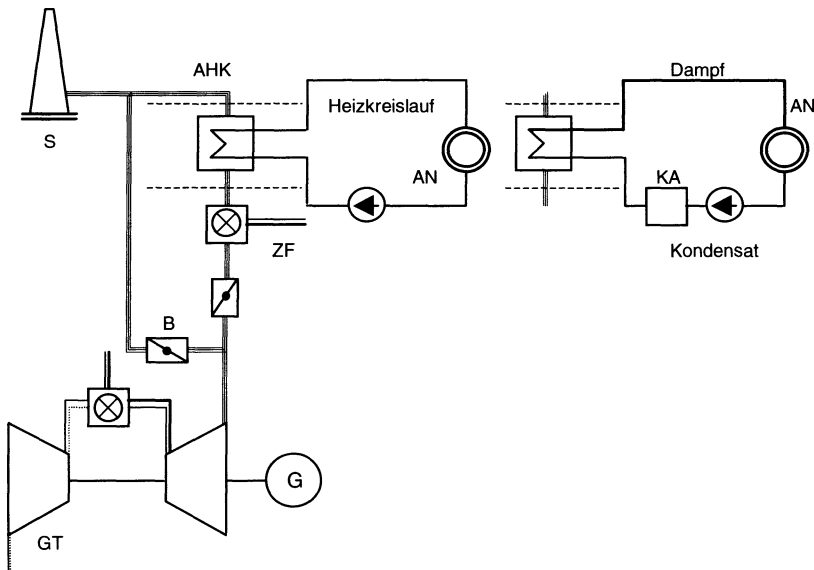


Abb. 2.2-6 Grundschialtung einer Gasturbinenanlage mit Heizwasser- bzw. Dampferzeugung
AHK Abhitzekeessel, *GT* Gasturbine, *S* Schormstein/Kamin, *B* Bypass, *ZF* Zusatzfeuerung,
AN Abnehmer, *KA* Kondensataufbereitung

Aufgrund der hohen Abgastemperaturen (500–600 °C) und der großen Abgas-mengen (z. B. steht bei einer elektrischen Leistung von 25 MW ein Abgasvolu-menstrom von ca. 300.000 m³/h gegenüber) sind Gasturbinen für die Heizwas-sererzeugung bis zu Vorlauftemperaturen über 200 °C und zur Dampferzeugung mit Dampfdrücken bis zu 80 bar geeignet. Sowohl bei der Dampferzeugung als auch bei der Heizwassererzeugung ist die Parallelschaltung mehrerer Anlagen üblich.

Zur Entkopplung der Erzeugung von elektrischem Strom und Wärme sowie für Anfahrvorgänge kann ein Notkamin bzw. ein Bypass um den Abhitzekeessel vorgesehen werden.

Die hauptsächlich angewandte Anlagenkonzeption ist der einfache, offene Gasturbinenprozeß mit nachgeschaltetem Abhitzekeßel. Die Auslegung des Abhitzekeßels erfolgt je nach Erfordernis für die Erzeugung von Heizwasser oder Dampf.

Ein besserer elektrischer Wirkungsgrad als beim einfachen Gasturbinenprozeß ist mit dem GuD-Prozeß zu erreichen. Der Kraftwerkswirkungsgrad bei konventionellen Anlagen von ca. 40–42 % kann mittels Einsatz von GuD-Anlagen erhöht werden. Bei reinem Gaseinsatz werden Wirkungsgrade für GuD-Anlagen von über 50 % angegeben. Wird das Abgas im Abhitzekeßel auf 100 °C abgekühlt, ergeben sich bei Heizkraftwerken mit Gasturbineinsatz Faktoren im Bereich von 40–60 %. Bei diesen Abgastemperaturen wird eine Brennstoffausnutzung (Gesamtwirkungsgrad des Heizkraftwerkes) von über 85 % erreicht.

Die elektrische Leistung des Dampfturbinenprozesses ist zunächst abhängig von der Abgasenergie der eingesetzten Gasturbine und der Konzeption des Dampfturbinenprozesses. In diesem Leistungsbereich sind Frischdampfdaten mit bis zu 80 bar und 520 °C gebräuchlich. Die Drücke für Prozeßdampfschienen sind sehr variabel.

Einen Auszug aus der Schaltungsvariantenvielfalt soll im folgenden anhand eines konkret ausgeführten Beispiels näher erläutert werden. Dieses Beispiel umfaßt sowohl die Heißwassererzeugung als auch die Möglichkeit Dampf mit den Druckparametern von 11 bar und 3,5 bar auszukoppeln. Die Brennstoffzufuhr ist trivalent, d. h. es kommen Braunkohle in den Kohle-Dampferzeugern, Erdgas und Heizöl im Spitzenlast-Dampferzeuger sowie im Spitzenlast in den Heißwassererzeugern und nur Erdgas in der Gasturbine in diesem Heizkraftwerk zum Einsatz. Der Abhitzekeessel wird mit einer Rauchgastemperatur von maximal 560 °C durchströmt. Dieser Abhitzekeessel besteht aus 3 Modulen, welche die in der Tabelle 2.2-1 entsprechenden Leistungsdaten aufweisen.

Neben diesem HD-Heißdampf aus dem Abhitzekeessel wird in 2 Kohle-Dampferzeugern eine weitere Heißdampfschiene mit den Parametern 46 bar und 430 °C bereitgestellt. Diese 3 Heißdampfschienen werden den beiden Gegen-druck-Dampfturbinen zugeführt. Das dazugehörige vereinfachte Wärmeschaltbild ist in Abb. 2.2-7 dargestellt.

Der Cheng-Prozeß, als eine weitere Variante, ist ein thermodynamischer Kreisprozeß, der den GuD-Prozeß in einem Aggregat zusammenfassend realisiert. Die Rauchgase der Gasturbine werden hierbei in einem nachgeschalteten Abhitzekeessel zur Dampferzeugung genutzt (Abb. 2.2-8). Normalerweise ist dieser Abhitzekeessel mit einer Zusatzfeuerung ausgerüstet. Der im Abhitzekeessel erzeugte Heißdampf wird ganz oder teilweise in die Gasturbine eingespeist und führt durch den höheren Massendurchsatz in der Gasturbine zu einer Leistungssteigerung (maximal bis zu 50 % gegenüber den Standardprozeß). Der Cheng-Prozeß ist somit im Prinzip mit dem GuD-Prozeß vergleichbar. Hauptvorteil sind die gegenüber dem GuD-Prozeß deutlich niedrigeren Investitionen; als Nachteil ist zu nennen, daß durch die speziellen Anforderungen nicht jede Gasturbine für diesen Prozeß geeignet ist. Ein Beispielkennfeld ist in (Schmitz u. Koch 1996) erläutert.

Auslegung und Konstruktion der Abhitzekeessel erfolgen entsprechend den geforderten Dampf- oder Heizwasserparametern (Druck, Temperatur, Massenstrom) sowie den Lasteinheiten von Gasturbinen und, wenn benötigt der Zusatzfeuerung. Hauptauslegungskriterium für den Abhitzekeessel ist der Rauchgasmassenstrom der Gasturbine. Auch bei voller Ausnutzung des Restsauerstoffgehaltes durch eine Zusatzfeuerung ändert sich der Rauchgasmassenstrom im Abhitzekeessel nur geringfügig. Der hohe Sauerstoffgehalt im Rauchgas der Gasturbine (bis zu 16 %) kann einer Zusatzfeuerung als Verbrennungsluft dienen, wodurch dann das hierfür notwendige Verbrennungsluftgebläse eingespart werden kann. Dies trifft nicht zu, wenn bei Ausfall der Gasturbine der Abhitzekeessel weiter betrieben werden soll.

Die Bauformen des Abhitzekeessels können verschieden sein. So werden im Leistungsbereich bis etwa 15 MW thermischer Kesselleistung und bei Dampfdrücken bis zu ca. 20 bar häufig Großwasserraumkessel als Abhitzekeessel eingesetzt. Dagegen eignen sich für alle übrigen Fälle Wasserrohrkessel. Letztere kön-

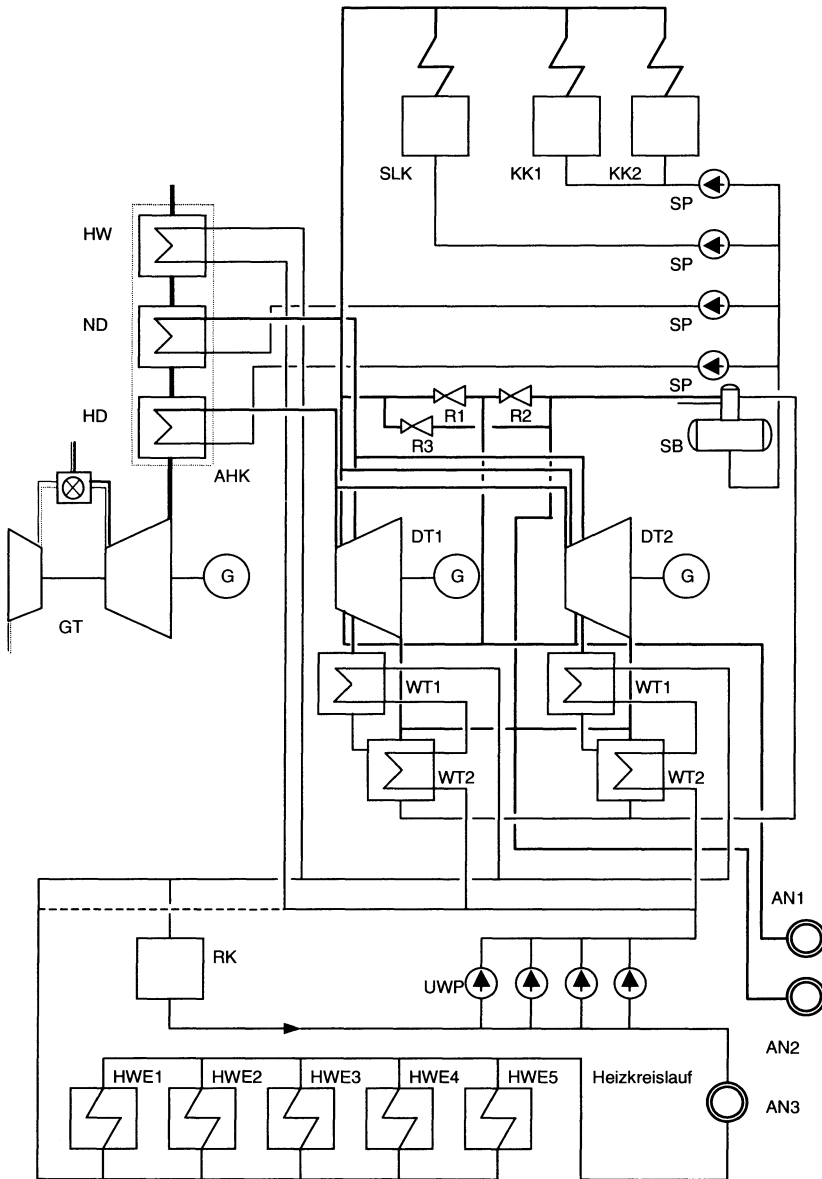
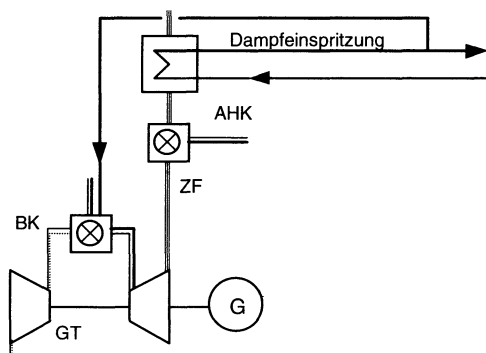


Abb. 2.2-7 GuD-Heizkraftwerk mit Heißwasser- und Dampfauskopplung

GT Gasturbine (Erdgas), AHK Abhitzekessel, HD Hochdruckteil (Modul 1), ND Niederdruckteil (Modul 2), HW Heißwassereco (Modul 3), KK1, KK2 Kohle-Dampferzeuger, SLK Spitzenlast-Dampferzeuger (Erdgas, Heizöl), DT1, DT2 Dampfturbine, SP Speisepumpe, SB Speisewasserbehälter, WT1, WT2 Wärmetauscher, UWP Umwälzpumpe, RK Rückkühler, HWE1-5 Spitzenlast-Heißwassererzeuger (Erdgas, Heizöl), R1 Reduzierstation 46/11 bar, R2 Reduzierstation 11/3,5 bar, R3 Reduzierstation 46/3,5 bar, AN1 Abnehmer Heißwasser, AN2 Abnehmer Dampf 3,5 bar, AN3 Abnehmer Dampf 11 bar

Tabelle 2.2-1 Leistungsdaten des Abhitzekessels aus Beispiel Abb. 2.2-7

Modul	Medium	Temperatur [°C]	Druck [bar]	Massenstrom [kg/s]
1	Hochdruck (HD)-Heißdampf	510	60	10,0
2	Niederdruck (ND)-Heißdampf	170	8	2,2
3	Heißwasser	120	20	29,4

**Abb. 2.2-8** Prinzipschema „Cheng-Prozeß“

AHK Abhitzekessel, GT Gasturbine, ZF Zusatzfeuerung

nen aus Platzgründen in Turmbauweise realisiert werden. Erwähnenswert ist auch die waagerechte Konstruktion des Abhitzekessels nach dem Vogt-System. Hierbei handelt es sich um einen waagerecht angeordneten Einzugsessel mit Naturumlauf, der aus einzelnen (ebenso wie in der Turmbauweise), werkseitig vorgefertigten Modulen zusammengesetzt wird. Der Vorteil der geringen Bauhöhe geht aber zu Lasten einer erheblichen Ausdehnung der Baulänge. Trotzdem bietet dieses System darüber hinaus den zusätzlichen Vorteil eines geringeren rauchgasseitigen Druckverlustes gegenüber vergleichbaren anderen Baukonstruktionen.

Die Gasturbinen lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen, zum einen in Industriegasturbinen, auch – Gasturbinen in Schwerbauweise – genannt, die gezielt für den Kraftwerksbetrieb entwickelt wurden, zum anderen in Gasturbinen in Leichtbauweise mit Flugzeugstrahlantrieben als Turbogasgeneratoren, deren Turbinenstufen für die Nutzleistung nachgeschaltet sind. Hinsichtlich der Anordnung des Verdichters und der Turbine werden Gasturbinen unterteilt in Einwellenaggregate – Verdichter und Turbine sind auf einer gemeinsamen Welle angeordnet – bzw. Zweiwellenaggregate – Verdichter und Turbine sind auf getrennten Wellen angeordnet; hierdurch sind unterschiedliche Drehzahlen für Turbine und Verdichter möglich (s. Abb. 2.2-9).

Die mit Gasturbinen erreichbaren Leistungen je Einheit sind erheblich kleiner als bei Dampfturbinen. So erreichen im 50-Hertz-Bereich die größten einwelligen Gasturbinen Leistungen um 235 MW.

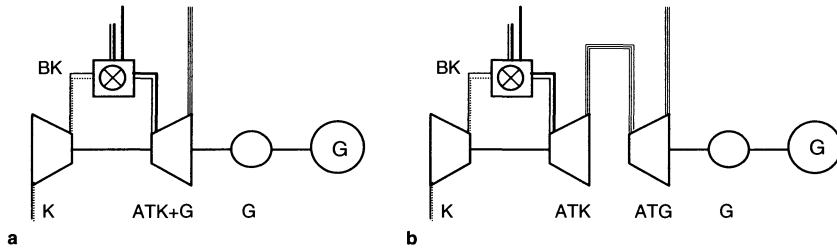


Abb. 2.2-9 Schematische Darstellung der Gasturbinenbauarten

a Einwellenaggregat, **b** Zweiwellenaggregat

K Kompressor, *BK* Brennkammer, *ATK+G* Arbeitsturbine für Kompressor- und Generatorbetrieb, *ATK* Arbeitsturbine für Kompressorbetrieb, *ATG* Arbeitsturbine für Generatorbetrieb, *G* Getriebe

Eine besondere Konstruktion stellt die Kombination einer Gasturbine und einer Dampfturbine auf einer gemeinsamen Welle dar. Spezielle sowie ausführliche Untersuchungen zum Einsatz von GuD-Anlagen in Einwellenausführung im unteren Leistungsbereich sind in (Esslinger 1996) zu finden.

Die klassische Form der GuD-Anlagen in Mehrwellenausführung ist längst Stand der Technik und findet in allen Bereichen der Industrie sowie in kommunalen Betrieben ein breites Anwendungsfeld. Das Leistungsspektrum beginnt bei einigen Megawatt und endet im Bereich der Großkraftwerke, wobei die meisten Anwendungsfälle jedoch im mittleren Leistungsbereich bei etwa 50–200 MW liegen.

GuD-Anlagen in Einwellenausführung gewinnen erst seit einigen Jahren an Bedeutung. Von 1972–1979 wurden nur sechs Einwellen-GuD-Anlagen errichtet; 1990–1996 waren dies schon immerhin 41 Anlagen (Esslinger 1996). Der Leistungsbereich dieser ausgeführten Anlagen liegt zwischen 40–400 MW.

Durch den Einsatz der neuen Generation von leistungsstarken Gasturbinen in Einwellen-GuD-Anlagen lassen sich in naher Zukunft Nettowirkungsgrade bis zu 60 % erreichen. Die derzeit größtmöglichen Einwellen-GuD-Anlagen liegen bei einer Blockleistung um die 360 MW mit einem Blockwirkungsgrad um 58 % bezogen auf den unteren Heizwert (Esslinger 1996). Die Einwellen-GuD-Anlage weist folgende Vorteile auf:

- es wird nur ein Generator benötigt,
- möglicher Einsatz von standardisierten Gas- und Dampfturbinen,
- Dampfturbine kann während des Betriebes separat abgeschaltet werden,
- beide Turbinen können separat gestartet werden,
- geringerer Platzbedarf gegenüber einer Mehrwellen-GuD-Anlage.

Einwellen-GuD-Anlagen erhalten erst durch den Einsatz von Überholkupplungen, in Form einer Synchronisierend-Selbst-Schaltenden-Kupplung (SSS-Kupplung), ihre technischen und wirtschaftlichen Vorzüge. Zusätzlich werden zu den SSS-Kupplungen noch Lastkupplungen eingesetzt, um die Komponenten (Gasturbine, Dampfturbine, Generator und SSS-Kupplung) miteinander zu koppeln.

2.2.2.4

Blockheizkraftwerke

Blockheizkraftwerke (BHKW) sind relativ kleine und deshalb dezentral, d. h. in unmittelbarer Nähe des Versorgungsobjektes einsetzbare Energieanlagen zur Erzeugung von Strom und Wärme. Zur Stromerzeugung dienen Synchron- bzw. Asynchron-Generatoren, die von Verbrennungsmotoren oder kleinen Gasturbinen angetrieben werden. Die Wärmeerzeugung resultiert aus der Nutzung der Kühlwasser- und Abgaswärme bei Verbrennungsmotoren sowie nur der Abgaswärme bei Gasturbinen. Im folgenden wird nur Bezug auf Motor-Module genommen, da die Gasturbinen bereits beschrieben wurden.

Wird der typische Energiefluß zwischen Anlagen der konventionellen Stromerzeugung mit Motorenanlagen und Kraft-Wärme-Kopplung auf gleicher Anlagen-

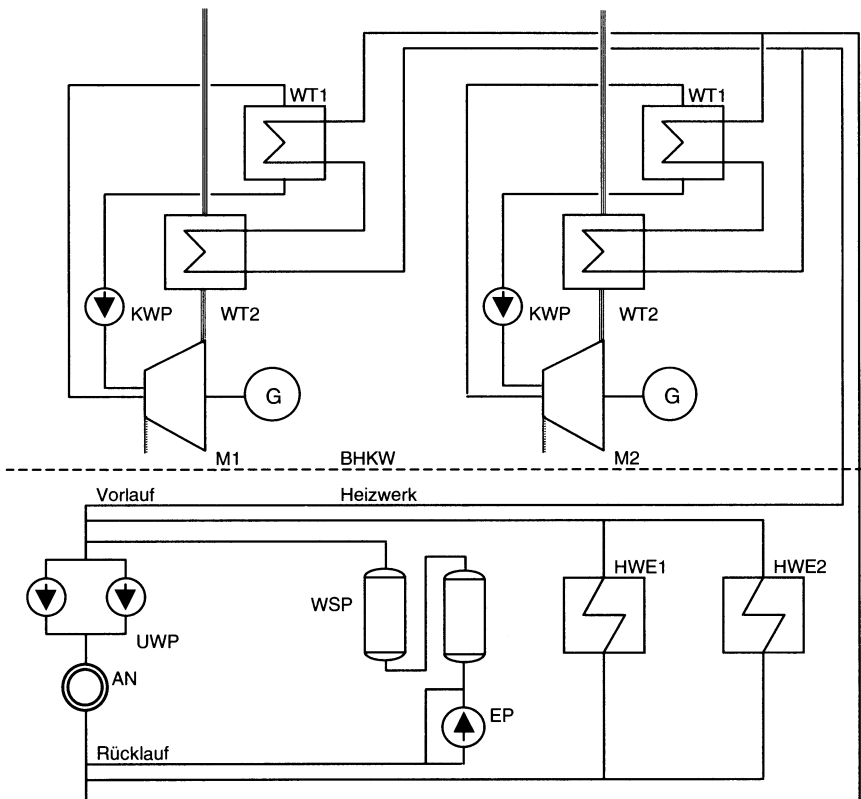


Abb. 2.2-10 Blockheizkraftwerk (BHKW) mit parallel eingebundenen Heißwassererzeugern M1,2 Motormodul, WT1 Wärmetauscher für Kühlwasser, WT2 Wärmetauscher für Abgas, KWP Kühlwasserpumpe, HWE1,2 Spitzenlast-Heißwassererzeuger, WSP Wärmespeicher, EP Entladepumpe, UWP Umwälzpumpe, AN Abnehmer

basis verglichen, so werden die rund 57 % Schmieröl-, Kühlwasser- und Abgasverluste in Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung auf 17 % vermindert und so als nutzbare thermische Energie zur Verfügung gestellt.

Das BHKW besteht in den meisten Fällen aus mehreren gleichen Modulen, Motor-Generator-Einheiten mit integrierten Wärmetauschern, deren Komponenten auf Großserienprodukten basieren und deshalb zu günstigen spezifischen Preisen führen. Der Aufbau und die Schaltung eines BHKW, bestehend aus mehreren Motor-Generator-Modulen und einem Spitzenlast-Heißwassererzeuger zeigt Abb. 2.2-10.

Mit dieser Anlagenkonfiguration können, bedingt durch die parallelgeschalteten Motormodule, Vorlauftemperaturen von maximal 90–95 °C abgefahren werden. Die Rücklauftemperaturen liegen in den meisten Fällen dabei um die 50–70 °C. Höhere Rücklauftemperaturen bis zu 90 °C und Vorlauftemperaturen von 110–130 °C sind mit heißgekühlten Aggregaten möglich. Hinsichtlich Investitionen, Wartungskosten und Lebensdauer sind derartige Lösungen jedoch gegenüber den Standardmodulen im Nachteil. Sofern die Rücklauftemperaturen niedrig gehalten werden können, ist die Erzielung einer höheren Vorlauftemperatur unter Umständen mit Einsatz einer Spitzenlast-Heißwasser-Anlage in Serienschaltung insgesamt günstiger.

Somit bestehen zwei Möglichkeiten von Betriebsfahrweisen:

1. Die Spitzenlast-Heißwassererzeuger-Anlage bleibt parallel eingebunden, wie in Abb. 2.2-10 dargestellt, wird aber mit einer höheren Vorlauftemperatur, als eine Art Vorlaufbeimischung, betrieben.
2. Die Spitzenlast-Heißwassererzeuger-Anlage wird seriell, d. h. in Reihe eingebunden, die dann die Regelung der abzufahrenden Vorlauftemperatur übernimmt. Das entsprechende Schaltbild zeigt Abb. 2.2-11.

Für Zeiten, wo keine ausreichende Wärmeabnahme bzw. niedrige Rücklauftemperatur sichergestellt werden kann (z. B. bei stromorientiertem Betrieb zu Wärmeschwachlastzeiten), ist es zweckmäßig, rücklaufseitig in einem Bypass einen Notkühler oder alternativ eine Wärmespeicheranlage vorzusehen.

Die Leistungsgrößen bei motorbetriebenen Modulen liegen zwischen 15 kW und 3 MW, die überwiegende Zahl der Module mit Motorantrieb liegt zur Zeit zwischen 50 kW und 2 MW. Der Leistungsschwerpunkt bei Gasturbinenanlagen befindet sich zwischen 2 MW und 10 MW (Schaefer et al. 1994).

Als Kraftstoff für BHKW besitzt heute Erdgas die weitaus größere Bedeutung (Gas-Ottomotor) gegenüber Dieselkraftstoff (Dieselmotor). Fast alle gasförmigen Brennstoffe können für den Betrieb von Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Dabei spielt die Methanzahl eine bedeutende Rolle. Bei Verwendung von aus Abfallstoffen gewonnenen gasförmigen Brennstoffen, wie Holzgas, Biogas, Klärgas und Deponiegas, werden oft Gas-Dieselmotoren eingesetzt.

Verbrennungsmotoren-BHKW haben deutlich bessere elektrische Wirkungsgrade als Gasturbinen-BHKW. Sie liegen in einem Bereich von 25 % bis über 30 % mit steigender Leistung.

Analog zu der vorbeschriebenen Verfahrensweise bei der Heißwassererzeugung kann die Abgasenergie der Motor-Module auch zur Dampfproduktion eingesetzt

werden. Aufgrund der hohen Abgastemperaturen von bis zu 600 °C sind Dampftemperaturen bis zu 300–450 °C bei entsprechendem Druckniveau durchaus möglich. Bei der Auslegung ist aber zu berücksichtigen, daß

- die Schmierölkühlung und die Abführung der Wärme aus dem Kühlwasser des Motors immer gewährleistet sein müssen, was gegebenenfalls nicht mit dem Kondensat des Dampfkreislaufes (zu hohe Temperatur), sondern nur mit Hilfe eines eigenen Niedertemperatur-Wärmenetzes erfolgen kann,
- die erforderlichen bzw. maximal zulässigen Temperaturen am Eintritt der Bauteile der Rauchgasreinigungsanlage gewährleistet werden müssen; höhere Dampftemperaturen sind hierdurch oft nicht möglich.

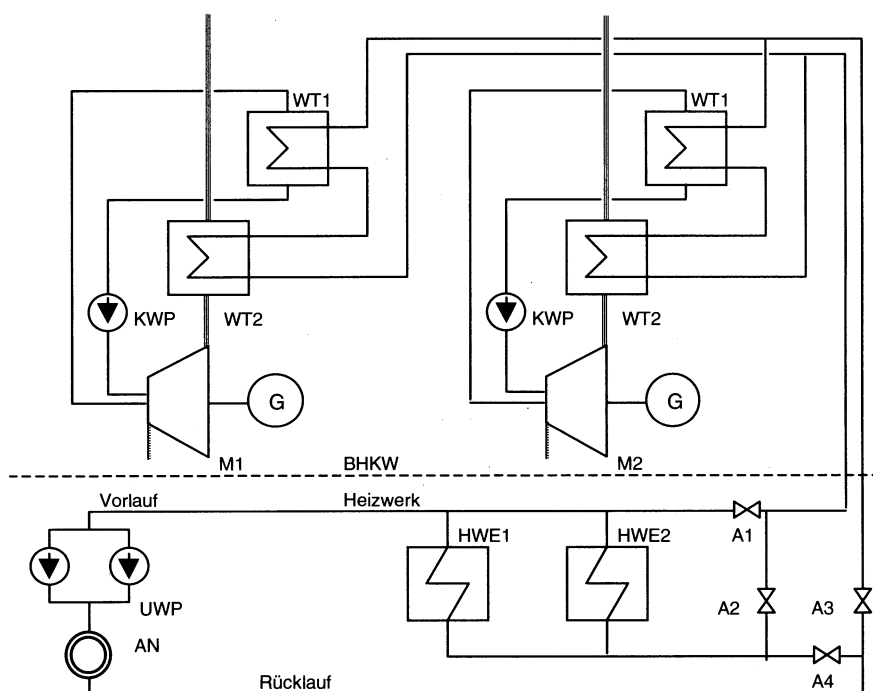


Abb. 2.2-11 Blockheizkraftwerk (BHKW) mit seriell eingebundenen Heißwassererzeugern *M1,2* Motormodul, *WT1* Wärmetauscher für Kühlwasser, *WT2* Wärmetauscher für Abgas, *KWP* Kühlwasserpumpe, *HWE1,2* Spitzenlast-Heißwassererzeuger, *UWP* Umwälzpumpe, *AN* Abnehmer, *A1,A2,A3,A4* Armaturen

Schaltungszustand	Armatur A1	Armatur A2	Armatur A3	Armatur A4
nur BHKW-Betrieb	auf	zu	auf	zu
nur HWE-Betrieb	zu	zu	zu	auf
BHKW- und HWE-Betrieb	zu	auf	auf	zu

Bei kleineren Aggregaten ist der mit der Dampferzeugung verbundene technische Aufwand in den meisten Fällen nicht wirtschaftlich. Es existieren aber durchaus Referenzanlagen bei Großmotoren mit einer elektrischen Leistung über 2 MW (Schmitz u. Koch 1996).

2.2.2.5 Heizwerke

Reine Heizwerkslösungen stellen keine wirtschaftliche Alternative gegenüber Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen dar. Trotzdem ist der Anteil verhältnismäßig hoch, was aus der Tabelle 2.2-2 als Anhaltswert ersichtlich wird.

Daraus wird deutlich, daß der Anlagenanteil mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gegenüber dem Anlagenanteil ohne KWK stärker wächst, was letztendlich in einer Vielzahl von neuerbauten Anlagen mit KWK begründet ist. Anteilig sind die Anlagen mit KWK im Zeitraum von 1992–1997 um etwa 8,6 % gestiegen, während bei den Anlagen ohne KWK nur ein Anteil von 6,6 % zu verzeichnen war. Viele Stadtwerke staffeln auch den Neubau von Wärmeerzeugungsanlagen, indem sie erst den Heizwerksteil und – bei entsprechender Bedarfsentwicklung – den Kraftanteil realisieren. Ein entsprechendes Anlagenschaltbild wurde bereits bei der Erläuterung der Blockheizkraftwerke dargestellt.

Der Brennstoffeinsatz ist bei Heizwerken vielschichtig, wobei in den meisten Anwendungsfällen Erdgas, Heizöl oder auch Braunkohle zur Anwendung kommt.

Tabelle 2.2-2 Anzahl für Anlagen mit und ohne Kraft-Wärme-Kopplung (Kröhner u. Ruppert 1994; Ruppert 1995, 1996; Schmitz 1997a, 1997b, 1998)

Jahr	mit KWK		ohne KWK		Anteil der Anlagen ohne KWK zu Gesamtanlagen [%]
	Anlagen	Anteil zum Vorjahr [%]	Anlagen	Anteil zum Vorjahr [%]	
1992	314		941		75,0
1993	354	11,7	1055	12,1	74,9
1994	416	17,5	1185	12,3	74,0
1995	479	15,1	1253	5,7	72,3
1996	528	10,2	1348	7,6	71,9
1997	585	10,8	1560	15,7	72,7

2.2.3 Druckhaltung

2.2.3.1 Grundlagen

Eine Druckhaltung ist nur im Heizwassersystem erforderlich. Die Druckhaltung hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Gewährleistung eines statischen Druckes im gesamten Fernwärmesystem, der bei jedem Betriebszustand an jeder Stelle des Systems mit Sicherheit über dem zur örtlichen Höchsttemperatur gehörenden Siededruck liegt, Entgasungen vermeidet und den zulässigen Betriebsdruck der einzelnen Anlagenteile nicht übersteigt. Der erforderliche Zulaufdruck an der Saugseite der Pumpen, auch als NPSH-Wert⁴ bezeichnet, darf dabei nicht unterschritten werden.
- Ausgleich der durch Druck- und Temperaturänderungen bedingten Volumenänderungen (Expansion und Kontraktion) des Heizwassers.
- Ausgleich der durch Undichtheit auftretenden Leckverluste.

Zur Vermeidung von Entgasung ist der Mindestbetriebsdruck für den stationären Betrieb so zu wählen, daß ein genügender Abstand zum Siededruck gewährleistet wird (Abb. 2.2-12). Der Siededruck des Wassers kann durch verschiedene Approximationsgleichungen beschrieben werden. In (Elsner et al. 1982) sind für den Siededruck und andere Stoffwerte des Wassers sehr genaue, auf internationale Empfehlungen zurückgehende, Gleichungsansätze vorgestellt (s. a. Wagner 1998). In (Glück 1985) werden zwei verschiedenen gültige Approximationsgleichungen zur Bestimmung des Siededruckes angegeben. Eine eigens entwickelte Approximationsgleichung für den gesamten Temperaturbereich einschließlich der Rücklauftemperaturen von $20\text{ °C} \leq t \leq 200\text{ °C}$ wurde durch den Verfasser zum Ansatz gebracht. Alle 3 Näherungsgleichungen sind im Anhang 1 zu finden.

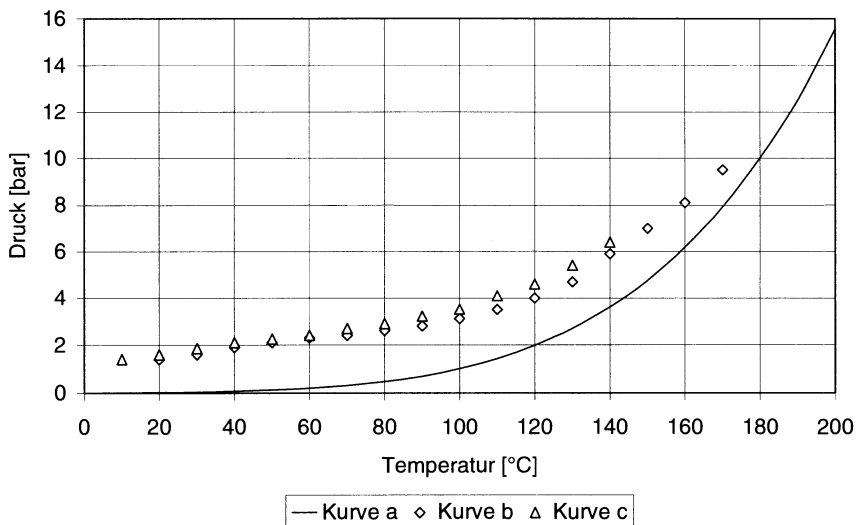


Abb. 2.2-12 Temperaturabhängigkeit des Druckes

a Siededruck, **b** Mindestdruck zur Vermeidung von Entgasung nach (Munser 1980), **c** Mindestdruck mit 0,5 bar pauschalen Sicherheitszuschlag als Richtwert des Entgasungsdruckes p_E für die Lösung von 10 mg Luftsauerstoff (20,96 Vol.-%) pro Liter Wasser nach (Wieland 1990)

⁴ NPSH steht für Net Positive Suction Head.

Des weiteren ist die Bedingung zu erfüllen, daß auch bei instationären Vorgängen der Druck über dem Siededruck liegt. Als Beispiel dafür zählt der Ausfall der Umwälzpumpen. Der auftretende Druckverlauf muß dann mit Sicherheit über dem zur maximalen Vorlauftemperatur gehörenden Siededruck liegen. Die Forderung, daß der den Betriebsbedingungen entsprechende zulässige Betriebsdruck der einzelnen Anlagenteile nicht überschritten werden darf, gilt ebenfalls für instationäre Vorgänge. Dies trifft insbesondere für den Rücklauf bei Pumpenausfall zu, wo kurzzeitig sehr viel höhere Drücke als im normalen Betriebszustand auftreten können.

Bevor die einzelnen Verfahren einer Druckhaltung vorgestellt werden, zunächst einige Ausführungen zu den statischen und dynamischen Druck- und Temperaturparametern. Um die oberen Betriebsgrenzwerte für das Fernwärmesystem festzulegen, ist vom Berechnungsdruck p_B und von der Berechnungstemperatur t_B auszugehen. Wegen eventuell ungenauer Erfassungen der Netz-Berechnungsdaten sowie möglicherweise veränderter Nutzung der Trassen sollten die maximal zulässigen Betriebswerte des Fernwärmesystems $p_{\max, \text{zul}}$ und $t_{\max, \text{zul}}$ sicherheitshalber um die Differenzwerte Δp_{Si} bzw. Δt_{Si} unter den Berechnungswerten der Anlagenteile liegen. Es gelten:

$$p_{\max, \text{zul}} = p_B - \Delta p_{Si} , \quad (2.1)$$

$$t_{\max, \text{zul}} = t_B - \Delta t_{Si} . \quad (2.2)$$

Die Wahl dieser Zuschläge ist frei, da es keine gesetzlichen Festlegungen gibt. Unter Beachtung der Regelungstoleranzen Δp_{Re} und Δt_{Re} können die normalen, maximalen Betriebsparameter – hier spezifiziert für den Vorlauf – wie folgt ermittelt werden:

$$p_{V, \max} = p_{\max, \text{zul}} - \Delta p_{Re} , \quad (2.3)$$

$$t_{V, \max} = t_{\max, \text{zul}} - \Delta t_{Re} . \quad (2.4)$$

Andererseits darf der Druck im Vorlauf einen unteren Grenzwert nicht unterschreiten, welcher sich aus dem Sättigungsdruck und der möglichen Regelungsabweichung, die sowohl positiv als auch negativ auftreten kann, berechnet zu

$$p_{V, \min} = p_S (t_{V, \max} + \Delta t_{Re}) + \Delta p_{Re} , \quad (2.5)$$

$$p_{V, \min} = p_S (t_{\max, \text{zul}} + \Delta p_{Re})^5 . \quad (2.6)$$

Für Fernwärmenetze, die im Niedertemperaturbereich betrieben werden, ist von einem Sättigungsdruck $t_{\max, \text{zul}} = 100^\circ\text{C}$, d. h. $p_S = 1$ bar, auszugehen.

⁵ In der nicht mehr gültigen TGL 190-259/05 wurde die Gl. (2.6) schärfer wie folgt definiert:

$$p_{V, \min} = p_S (t_{\max, \text{zul}}) + \Delta p_{Z2} . \quad (2.7)$$

Dieser Wert $\Delta p_{Z2} \geq 1,5$ bar ist ein Sicherheitsabstand gegen Überschreitung des Sättigungsdruckes im Vorlauf im statischen Umlaufbetrieb einschließlich der Regeltoleranz der Druckhaltung.

Entsprechend der eingesetzten Geräte, der Trägheit des Systems und weiterer spezifischer Bedingungen sind die regelungstechnischen Abweichungen zu wählen. Auch unter ungünstigsten Voraussetzungen sollten nach (Glück 1985)

$$\Delta p_{Si} + \Delta p_{Re} = 0,5 \text{ bar} \quad (2.8)$$

und

$$\Delta t_{Si} + \Delta t_{Re} = 5 \text{ K} \quad (2.9)$$

gewählt werden⁶. Der in Ansatz gebrachte Wert Δp_{Si} ist zu erhöhen, wenn die geforderte Schließdruckdifferenz eines auf p_B eingestellten Sicherheitsventils die Summe $\Delta p_{Si} + \Delta p_{Re}$ überschreitet. Nach Ansprechen des Sicherheitsventils darf dann unter Ausschöpfen der Regelungstoleranz Δp_{Re} der Druck in Fernwärmesystemen auf maximal $p_{V,max} + \Delta p_{Re}$ wieder ansteigen.

An der höchsten Stelle des Fernwärmesystems wird der minimal zulässige Ruhedruck angetragen, d. h. er erfüllt das Kriterium eines Grenzwertes. Der Ruhedruck garantiert kein Ausdampfen im Höhepunkt und wird bestimmt über

$$p_{Ru,min,zul} = p_S(t_{max,zul}) + \Delta p_{Re} \quad (2.10)$$

Der Ruhedruck $p_{Ru,min,zul}$ kann mit dem minimalen Vorlaufdruck zusammenfallen, wird aber in den meisten Fällen etwas darüber liegen. Es gibt aber auch Fernwärmesysteme, die ein Ausdampfen zulassen. Meistens fallen dann die besonderen Hochpunkte in stehenden Wärmespeicherbehältern zusammen.

Für die Festlegung der Grenzwerte im Rücklauf kann davon ausgegangen werden, daß die Temperatur in der Regel unter 100 °C liegt. Aus Gründen der Sicherheit hinsichtlich der erfaßten Größen und zur Vermeidung von Unterdruck wird der Absolutwert

$$p_{R,min,zul} = 1,5 \text{ bar} \quad (2.11)$$

festgelegt (Glück 1985). Unter Addition der Regelungstoleranz ergibt sich der normative, minimale Rücklaufdruck zu

$$p_{R,min} = 1,5 \text{ bar} + \Delta p_{Re} \quad (2.12)$$

Bei Fernwärmesystemen, welche mit Wärmespeicherung im Rücklauf arbeiten, liegt die Rücklauftemperatur meistens über 100 °C. In diesem Fall ist dann das $p_{R,min}$ analog nach Gl. (2.5) zu bestimmen mit

$$p_{R,min} = p_S(t_{R,max} + \Delta t_{Re}) + \Delta p_{Re} \quad (2.13)$$

Der maximale Rücklaufdruck darf theoretisch $p_{V,max}$ entsprechen. Der normative, minimale Rücklaufdruck $p_{R,min}$ kann aber im Gegensatz zu dem Absolutwert aus Gl. (2.11) auch noch anders bestimmt werden. Dabei wird davon ausgegangen,

⁶ Laut der alten TGL 190-259/05 galt für die Summe

$$\Delta p_{Si} + \Delta p_{Re} \geq \pm 0,5 \text{ bar} ,$$

wobei aber an jeder Stelle des Fernwärmesystems der Druck mindestens 0,5 bar unter dem maximalen Betriebsdruck liegen sollte. Damit ist laut Gl. (2.1) $\Delta p_{Si} = 0,5 \text{ bar}$ und stellt eine Minimalbedingung dar.

daß zur Verhinderung der Bildung von Zweiphasenzonen Gas/Wasser im stationären Betrieb des Fernwärmesystems der Rücklaufdruck den zur Rücklaufftemperatur gehörenden Entgasungsdruck p_E an keiner Stelle unterschreitet, d. h.

$$p_{R,min} = p_E + \Delta p_Z \quad (2.14)$$

mit $\Delta p_Z \geq 0,5$ bar. Einen Richtwert des Entgasungsdruckes p_E für die Lösung von 10 mg Luft pro Liter Wasser sowie den dazugehörigen Sicherheitszuschlag zeigen die Werte c der Abb. 2.2-12. Wichtig erscheint bei dieser Ermittlung des normativen, minimalen Rücklaufdruckes zusätzlich die Beachtung des minimalen Pumpenumlaufdruckes, welcher vom Kavitationsdruck abhängig ist und berechnet wird aus

$$p_{Pu} = p_{Ka} + \Delta p_Z \quad (2.15)$$

Ist der Pumpenzulaufdruck im ungünstigsten Fall größer als der ermittelte normative, minimale Rücklaufdruck nach Gl. (2.14), so tritt der Pumpenzulaufdruck an die Stelle des normativen, minimalen Rücklaufdruckes als einzuhaltende Restriktion im Fernwärmesystem.

Ebenfalls wichtig erscheint die Beachtung der maximal zulässigen Rücklaufftemperatur $t_{R,max,zul}$ für den Fall, wenn der Rücklauf gegenüber dem Vorlauf konstruktiv anders ausgelegt wurde, wie beispielsweise

- maximal zulässige Vorlaufftemperatur $t_{V,max,zul} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$,
- maximal zulässige Rücklaufftemperatur $t_{R,max,zul} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Einen Zusammenhang zwischen Berechnungsgrößen, Betriebsgrößen und Toleranzen ohne Beachtung des geodätischen Druckes p_H zeigt Abb. 2.2-13.

Der geodätische Druck wird ermittelt aus

$$p_H = \rho \cdot g \cdot (H_i - H_0) \quad (2.16)$$

- mit ρ - Dichte des Heizwassers [kg/m^3],
 H_i - Höhenkoordinate am Ende einer Teilstrecke [m],
 H_0 - Höhenkoordinate an der Einspeisestelle [m].

Die genaue Berechnung von p_H müßte mit der Vorlaufdicke ρ_V und Rücklaufdicke ρ_R erfolgen. Mit hinreichender Genauigkeit kann mit der mittleren Dichte

$$\rho_M = \frac{\rho_V + \rho_R}{2} \quad (2.17)$$

gerechnet werden. Für die Dichte wird in (Glück 1985) eine Näherungsgleichung (s. Anhang 1) angegeben.

Die sich während des Betriebes einstellenden Druck- und Temperaturparameter p_V und p_R sowie t_V sind im Normalfall nicht mit den Grenzwerten identisch, so daß zulässige Betriebsbereiche folgen:

$$p_{V,min} < p_V < p_{V,max}, \quad p_{R,min} < p_R < p_{V,max} \quad \text{sowie} \quad t_V < t_{V,max}.$$

Für den Fall der Rücklaufaufheizung ist dann noch zusätzlich

$$t_R < t_{R,max}$$

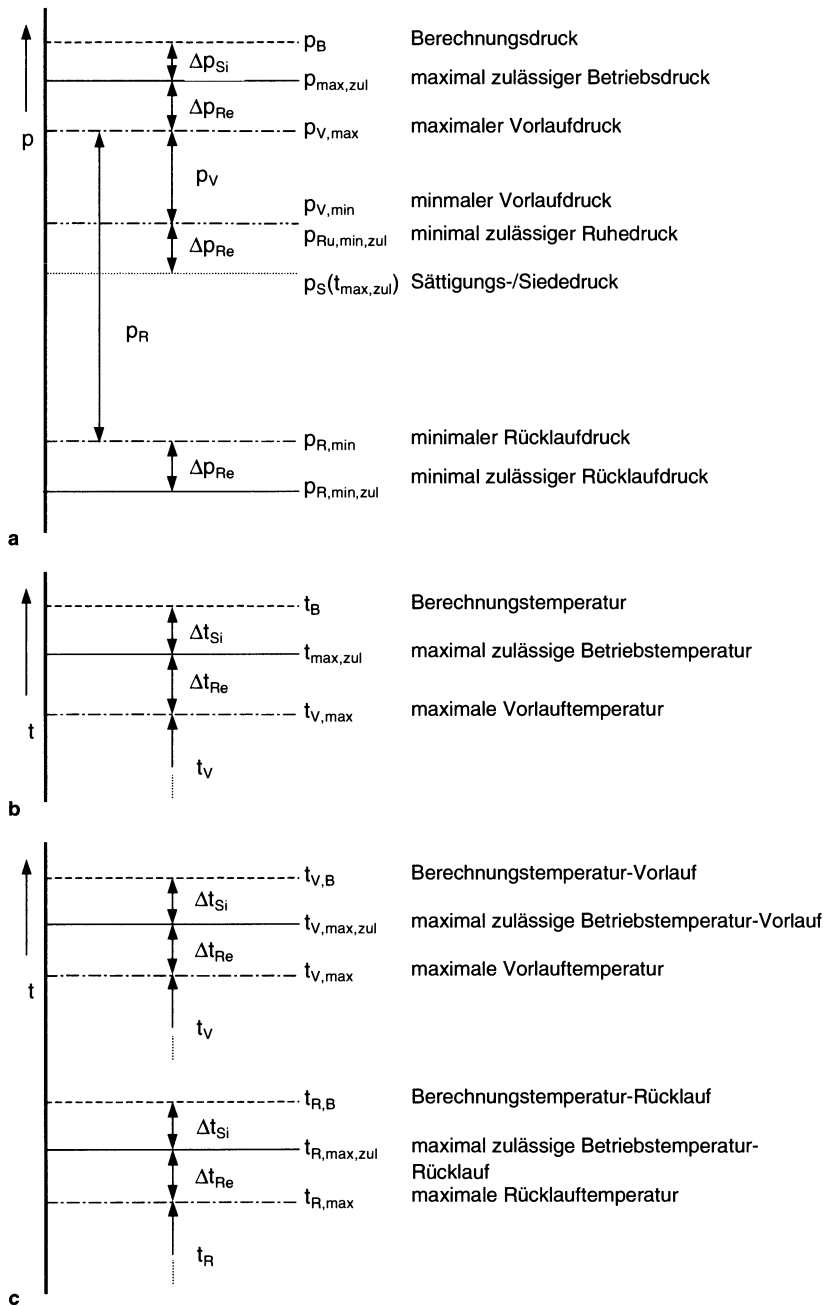


Abb. 2.2-13 Zusammenhang zwischen Berechnungsgrößen, Betriebsgrößen und Toleranzen

a Druck, **b** Temperatur bei gleicher konstruktiver Auslegung für Vorlauf und Rücklauf,

c Temperatur bei verschieden konstruktiver Auslegung für Vorlauf und Rücklauf

zu beachten. Die Werte $p_{V,\min}$ und $p_{V,\max}$ stellen gleichzeitig die Grenzwerte für die Druckhaltung dar. Die Art der Druckhaltung – statisch mit relativ großer, betriebsbedingter Schwankungsbreite oder dynamisch mit einem eng begrenzten Druckbereich – ist dabei zunächst gleichgültig. Der Ruhedruck p_{Ru} , welcher sich nach Ausfall der Umwälzpumpen einstellt, muß mindestens innerhalb dieser Grenzen $p_{V,\min}$, $p_{V,\max}$ liegen. In (Munser 1980) wird davon gesprochen, daß sich nach Ausfall der Umwälzpumpen für eine kurze Zeit, die in Sekunden etwa der ein- bis zweifachen Länge des Fernwärmesystems in Kilometern entspricht, der Mittel- druck p_M einstellt, ehe durch die Druckhaltung der Ruhedruck p_{Ru} erreicht wird.

Beispiel. Anhand des folgenden gewählten Beispieles soll dieser Sachverhalt noch einmal verdeutlicht werden. Der Berechnungsdruck für das Fernwärmesystem beträgt $p_B = 14$ bar. Für die Berechnungstemperatur gilt $t_B = 140^\circ\text{C}$ und für die normative, maximale Betriebstemperatur $t_{V,\max} = 130^\circ\text{C}$. Das installierte Sicherheitsventil führt bei voller Abblaseleistung zu einem Druckanstieg vor dem Ventilsitz, der dem 1,05-fachen Ansprechdruck p_A entspricht und schließt bei $0,9 p_A$. Es soll der praktisch mögliche Bereich für den Vorlaufdruck bestimmt werden.

Die Lösung ergibt sich wie folgt. Aus Gl. (2.5) wird der minimal erforderliche Vorlaufdruck berechnet mit

$$p_{V,\min} = p_S(130^\circ\text{C} + 5\text{ K}) + 0,3\text{ bar} = 3,13\text{ bar} + 0,3\text{ bar} = 3,43\text{ bar}.$$

Es handelt sich dabei um den Absolutdruck. Die Temperaturdifferenz beträgt nach den Gln. (2.2) und (2.4)

$$\Delta t_{Si} + \Delta t_{Re} = t_B - t_{V,\max} = (140^\circ\text{C} - 130^\circ\text{C}) = 10\text{ K}$$

und erfüllt somit die Mindestforderung von 5 K. Zur Ermittlung des maximalen Vorlaufdruckes von $p_{V,\max}$ wird Bezug auf die Abb. 2.2-13 genommen. Das Sicherheitsventil muß bei dem Berechnungsdruck p_B ansprechen. Unter Berücksichtigung, daß der Ansprechdruck als Überdruck angegeben wird, gilt somit

$$p_A = p_B = 14\text{ bar} = 13\text{ bar}_U.$$

Der Druck bei voller Öffnung des Ventils darf gemäß den Vorschriften bis zu 10 % über dem Berechnungsdruck p_B – gemessen in bar_U – liegen. Somit bereitet der angegebene Wert von 5 % keine Probleme, so daß der maximale Öffnungsdruck

$$p_{\text{Öffnen}} = 1,05 \cdot 13\text{ bar}_U = 13,65\text{ bar}_U = 14,65\text{ bar}$$

beträgt. Dagegen schließt das Sicherheitsventil bei

$$p_{\text{Schließen}} = 0,9 \cdot 13\text{ bar}_U = 11,7\text{ bar}_U = 12,7\text{ bar}.$$

Dieser Wert soll gleich oder größer dem maximalen Vorlaufdruck $p_{V,\max} \leq 12,7\text{ bar}$ sein. Die entsprechenden Ergebnisse können aus der Abb. 2.2-14 entnommen werden. Aus den berechneten Drücken folgen die Differenzen

$$\Delta p_{Si} + \Delta p_{Re} = p_B - p_{V,\max} = 14\text{ bar} - 12,7\text{ bar} = 1,3\text{ bar}.$$

Gegeben durch eine Regelungstoleranz von $\Delta p_{Re} = 0,3\text{ bar}$ ist damit der Sicherheitszuschlag $\Delta p_{Si} = 1\text{ bar}$ am Einbauort des Sicherheitsventiles zu wählen. Damit wird der Mindestwert aus Gl.(2.8) $\Delta p_{Si} + \Delta p_{Re} \geq 0,5\text{ bar}$ überschritten.

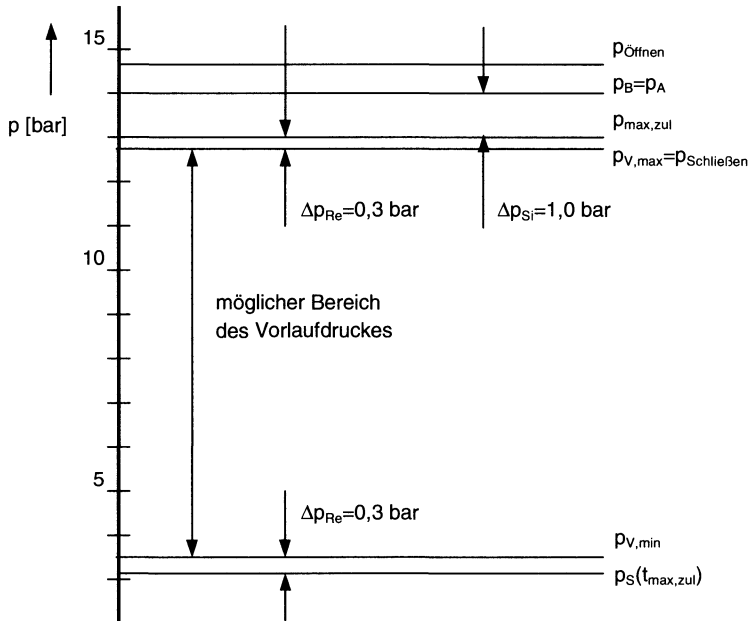


Abb. 2.2-14 Grafische Zusammenstellung der Ergebnisse des gewählten Beispiels

Grundsätzlich können Druckhaltanlagen in statische und dynamische Systeme eingeteilt werden. Entscheidend für die Gestaltung des Druckverlaufes des Fernwärmenetzes im Betriebs- und Ruhezustand ist bei statischen Systemen der Anschlußort der Druckhaltanlage und bei dynamischen Systemen Ort und Art der Ermittlung der Regelgröße. Dabei tauchen verschiedene Bezeichnungen auf:

- *Saugdruckhaltung* – hier ist die statische Druckhaltung auf der Saugseite der Umwälzpumpen eingebunden.
- *Enddruckhaltung* – hier erfolgt der Anschluß der statischen Druckhaltung auf der Druckseite der Umwälzpumpe.
- *Mitteldruckhaltung* – dabei wird der Mitteldruck, entweder gebildet zwischen
 - Saug- und Enddruck der Umwälzpumpen oder
 - Vor- und Rücklauf am Fernwärmenetzanfang oder am Fernwärmenetzende⁷.

⁷ Folgende Synonyme werden für die aufgezählten Bezeichnungen vielfach verwendet:

- Saugdruckhaltung identisch mit Rücklaufdruckhaltung
- Enddruckhaltung identisch mit Vorlaufdruckhaltung
- Mitteldruckhaltung identisch mit Zwischendruckhaltung

In (Glück 1985) wird bereits darauf verwiesen, daß die Begriffe – Vor- und Rücklauf – entsprechend der thermischen Beaufschlagung benutzt werden, hier aber aus hydraulischer Sicht der Einbauort der Umwälzpumpe entscheidend ist. Deshalb sollten die genannten Bezeichnungen verwendet werden.

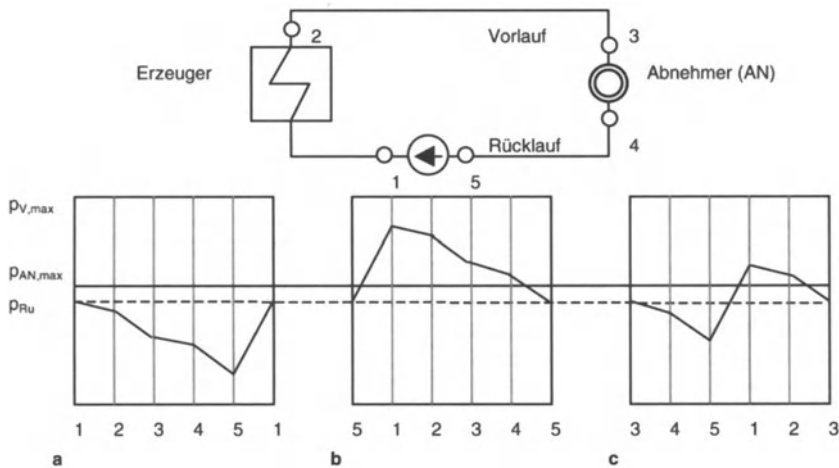


Abb. 2.2-15 Einbindung der Druckhaltung
a druckseitig, **b** saugseitig, **c** beim Abnehmer

Es wird von einem symmetrischen Mitteldruck gesprochen, wenn der Mitteldruck symmetrisch zwischen den genannten Druckparametern liegt, sonst von einem asymmetrischen Mitteldruck. Mitteldruckhaltungen kommen üblicherweise bei dynamischen Systemen zum Einsatz; in Sonderfällen ist aber auch eine Realisierung durch statische Druckhaltesysteme möglich.

Diese Sachverhalte sind in Abb. 2.2-15 anhand der Druckverläufe anschaulich dargestellt.

2.2.3.2 Statische Systeme

Die statischen Systeme haben ein direkt im Fernwärmenetz eingebundenes Ausdehnungsgefäß, das ein kompressibles Mediumpolster enthält. Zur Anwendung kommen dabei als Medium Inertgase oder Dampf. Der Ausgleichsmassenstrom wird in das Ausdehnungsgefäß abgespeist bzw. aus dem Gefäß in das Fernwärmenetz eingespeist. Somit werden die Volumenschwankungen durch Wasserstandsänderung in diesem Ausgleichsgefäß abgefangen. Die dadurch in gleichem Maße hervorgerufene Volumenänderung des kompressiblen Mediums hat stets eine Druckänderung zur Folge. Je nach den im Netz zugelassenen Druckschwankungen errechnet sich das Volumen des Ausdehnungsgefäßes. Zur Verringerung des Behältervolumens kann ein Teil des Wassers oder des kompressiblen Mediums aus dem Ausdehnungsgefäß entnommen und druckmäßig getrennt in einem separaten Behälter gespeichert werden. Leicht verfügbare Druckmedien – wie Luft oder Dampf – werden bei Druckerhöhungen abgelassen und bei Unterdruck erneut nachgespeist. Den statischen Systemen ist eigen, daß sie die gesamte Volumenänderung – in den letztgenannten Fällen zumindest einen großen Teil – im abgeschlossenen System kompensieren können.

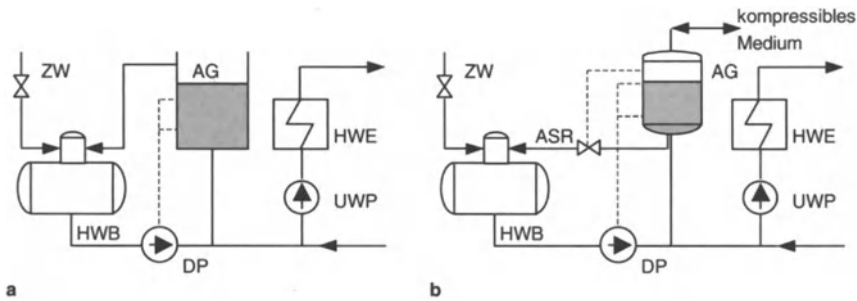


Abb. 2.2-16 Statische Druckhaltung auf der Saugseite der Umwälzpumpe

a mit offenem Ausdehnungsgefäß, **b** mit geschlossenem Ausdehnungsgefäß

HWE Heißwassererzeuger, UWP Umwälzpumpen, DP Druckhaltepumpe, ZW Zusatzwasser, AG Ausdehnungsgefäß, HWB Heizwasserbehälter mit Entgaser, ASR Abströmregler

Eine technische Einsatzgrenze hinsichtlich der Größe der Anlage kann nicht angegeben werden. Die Kosten bezüglich des Druckgefäßes können bei großen Fernwärmenetzen größer sein als bei einer dynamischen Druckhaltung. Häufig stehen jedoch andere Gesichtspunkte im Vordergrund, die von einer dynamischen Druckhaltung nicht oder nur unter erhöhtem Kostenaufwand zu realisieren sind, wie u. a. die Betriebssicherheit bei Ausfall der Stromversorgung und die Vorlaufdruckhaltung (diese wird unter Berücksichtigung eines Stromausfalles nur von statischen Druckhaltungen beherrscht).

Die statische Druckhaltung kann mit offenem oder geschlossenem Ausdehnungsgefäß realisiert werden (Abb. 2.2-16).

Statische Druckhaltungen mit offenem Ausdehnungsgefäß sind relativ selten anzutreffen, da sie nicht unerhebliche Nachteile aufweisen. Als einer der Hauptgründe dafür ist die Korrosion zu nennen. Der sich stets ändernde Wasserspiegel benetzt die Oberflächen und setzt sie dem Luftsauerstoff aus. Die Korrosionsrückstände sammeln sich auf dem Ausdehnungsgefäßboden, wo sie Anlaß zu elektrolitischen Korrosionen geben. Allein durch die Größe der Ausdehnungsgefäße scheidet meistens ein Schutz gegen diese Korrosion aus. Das Heizwasser, welches mit der Atmosphäre in Berührung kommt, nimmt um so mehr Luft auf, je kühler das Heizwasser im Ausdehnungsgefäß ist. Die aufgenommene Luft wird bei Erwärmung wieder abgegeben. Der Luftsauerstoff bewirkt aber z. T. heftige Korrosionen. Der Stickstoff wird ebenfalls ausgeschieden und führt zu zirkulationshemmenden Ablagerungen. Den unmittelbaren Zusammenhang der Löslichkeit von Luft und Heizwasser in Abhängigkeit von Druck und Temperatur gibt Abb. 2.2-17 wieder. Die Kurvenwerte stimmen nach Abzug von etwa 20 % auch für Stickstoff.

Mittels geschlossenem Ausdehnungsgefäß können als druckauflastendes kompressibles Medium Stickstoff oder Dampf bei direkter Berührung des Wassers verwendet werden. Luft sollte aus Gründen der Korrosionsgefahr vermieden oder nur in Ausnahmefällen kurzzeitig eingesetzt werden. Kommen Membrangefäße zum Einsatz, so ist die Beaufschlagung mit Stickstoff üblich, in Sonderfällen kann aber auch Luft verwendet werden. Nachfolgend einige Ausführungsvarianten.

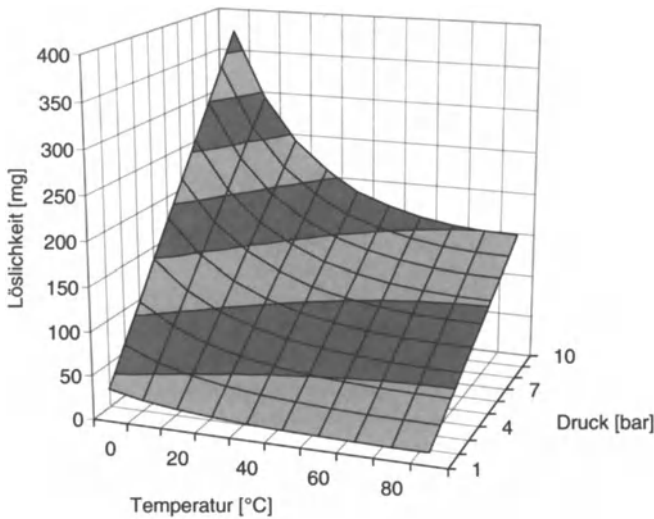


Abb. 2.2-17 Löslichkeit von Luft pro Liter Wasser in Abhängigkeit von Druck und Temperatur

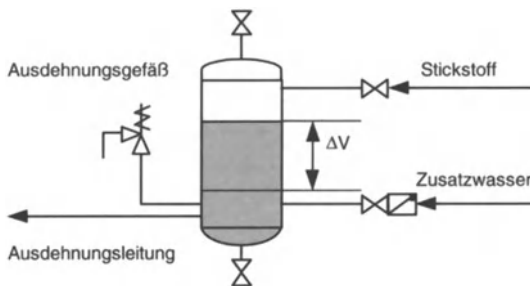


Abb. 2.2-18 Variante I: Druckhalteanlage mit inertgasbeaufschlagtem Ausdehnungsgefäß

Die *Variante I* und somit einfachste zeigt Abb. 2.2-18. Die maximal mögliche Volumenänderung ΔV wird im Druckbehälter kompensiert. Über eine Reduziereinrichtung wird bei Erreichen des Mindestdruckes Stickstoff nachgespeist. Die Absicherung gegen Überdruck gewährleistet ein wasserseitig angeordnetes Sicherheitsventil, unabhängig davon, ob die gasführende Zuleitung ebenfalls ein Sicherheitsventil besitzt. Mit Erreichen des Mindestwasserstandes im Ausdehnungsgefäß wird Zusatzwasser nachgespeist.

In der *Variante II* wurde die vorher beschriebene Schaltung durch einen drucklosen Speicher ergänzt (s. Abb. 2.2-19). Bei Erreichen des höchsten Wasserstandes S1 im Druckbehälter wird durch Öffnen des Magnetventils im drucklosen Behälter das Volumen bis zum Wasserstand S2 abgespeist. Beim minimalen Wasserstand S4 muß durch Schalten der Rückförderpumpe im Druckbehälter das Vo-

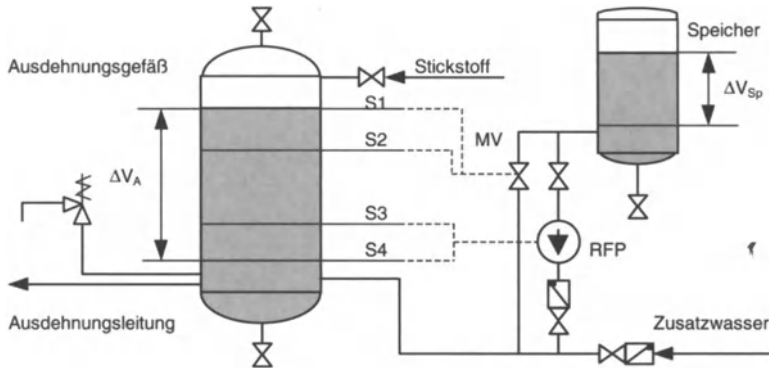


Abb. 2.2-19 Variante II: Druckhalteanlage mit inertgasbeaufschlagtem Ausdehnungsgefäß
RFP Rückförderpumpe, *MV* Magnetventil, *S1-4* Schaltkontakte

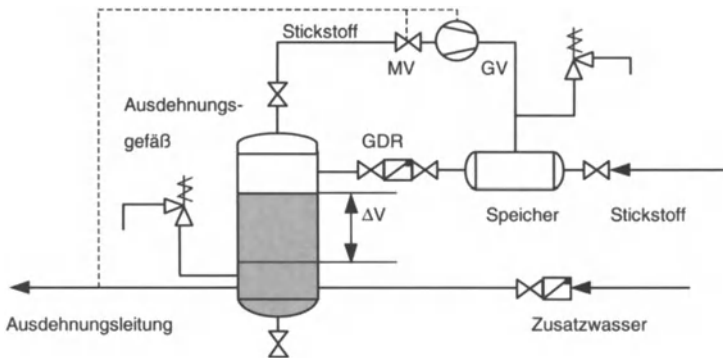


Abb. 2.2-20 Variante III: Druckhalteanlage mit inertgasbeaufschlagtem Ausdehnungsgefäß
GDR Gasdruckreduzierung, *GV* Gasverdichter, *MV* Magnetventil

lumen bis zum Wasserstand S3 zurückgespeist werden. Statt der Wasserstandsregelung kann auch eine Druckregelung eingesetzt werden. Das benötigte Zusatzwasser wird bei Erreichen des Mindestwasserstandes im Speicher entweder direkt in den Druckbehälter oder, wenn die Druckverhältnisse dies nicht gestatten, in den drucklosen Speicher eingeleitet. Bei Unterschreitung des niedrigsten Behälterdruckes erfolgt die Nachspeisung von Inertgas analog der vorher beschriebenen Variante.

Bei der *Variante III* wird mit einer variablen Gasmenge im Ausdehnungsgefäß gearbeitet (Abb. 2.2-20). Bei maximalem Druck wird über eine Grenzwertregelung das Magnetventil geöffnet und der gleichzeitig anlaufende Gasverdichter komprimiert das Inertgas auf einen höheren Druck, um es bei kleinerem Volumen im gasdichten Speicher zu speichern. Inertgas wird solange entnommen, bis die untere Druckgrenze erreicht ist, welche geringfügig über dem minimal zulässigen Druck liegt. Bei minimalem Druck wird automatisch Inertgas aus dem Speicher

über die Gasdruckreduzierung in das Ausdehnungsgefäß gespeist. Wichtig dabei ist, daß der untere Druckgrenzwert und der minimale Druck nicht gleich sein dürfen, da es sonst zum Überströmen und zu gleichzeitiger Rückverdichtung kommen würde. Der Vorteil dieser Variante liegt vor allem darin, daß bei Stromausfall und Netzkontraktion die Nachspeisung ohne Hilfsenergie erfolgen kann.

Es besteht auch die Möglichkeit, die *Variante II* mit der *Variante III* zu kombinieren, soll aber hier nicht weiter ausgeführt werden.

In der *Variante IV* (Abb. 2.2-21) wird als kompressibles Medium Dampf eingesetzt. Der Druck des zur Verfügung stehenden Dampfes wird mittels einer Druckreduzierung auf den Mindestdruck, der im Ausdehnungsgefäß herrschen soll, reduziert. Durch diese automatische Dampf nachspeisung werden die laufende Dampfkondensation und die Volumenkontraktion des Anlagenwassers kompensiert. Da diese beiden Einflüsse zeitlich sehr unterschiedlich sind, schwankt dementsprechend der Dampfzuspeisestrom. Bei der Dimensionierung der Anlage ist besonderes darauf zu achten, daß sowohl die maximale als auch die minimale Belastung realisiert werden können. Nicht selten wird der Fall gewählt, im Bypass ein Regelventil für die Mindestlast zusätzlich zu installieren.

Überwiegt die Volumenexpansion des Anlagenwassers der Volumenabnahme des kondensierenden Dampfes, so muß die Dampfmenge durch das Sicherheitsventil SiV_D bei Erreichen des maximal zulässigen Druckes im Ausdehnungsgefäß abgeblasen werden, was einen durchaus üblichen Betriebsfall darstellt. Es ist aber auch denkbar, anstelle des Sicherheitsventils einen Überströmregler einzusetzen. Ein Sicherheitsventil SiV_A auf dem Ausdehnungsgefäß ist nach den gültigen Vorschriften anzuordnen. Der Ansprechdruck des Sicherheitsventils SiV_A sollte etwa 10 % über dem des Sicherheitsventiles SiV_D liegen. Bei Erreichen des minimalen Wasserstandes wird Zusatzwasser nachgespeist. Die vorgestellte Schaltung muß modifiziert werden, wenn der Dampfdruck kleiner als der maximal zulässige Druck im Ausdehnungsgefäß ist. In diesem Fall sollte in der Dampfzuführungsleitung zusätzlich ein Rückschlagventil eingebaut werden. Ebenso ist es möglich, die Druckreduzierung entfallen zu lassen, wenn der Dampfdruck gleich dem minimalen Druck im Ausdehnungsgefäß entspricht.

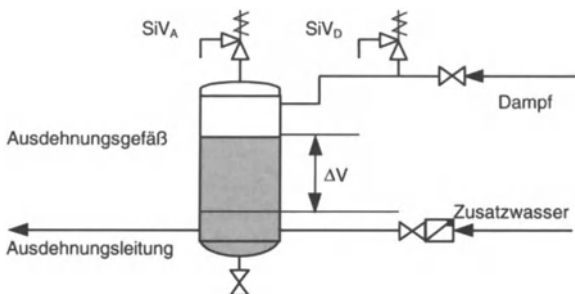


Abb. 2.2-21 Variante IV: Druckhalteanlage mit dampfbeaufschlagtem Ausdehnungsgefäß
 SiV_A Sicherheitsventil Ausdehnungsgefäß, SiV_D Sicherheitsventil Dampfzuführung

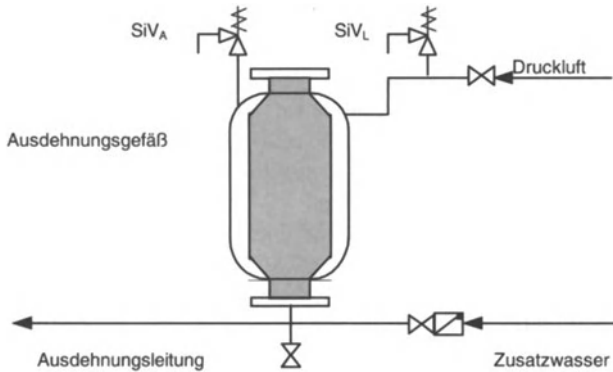


Abb. 2.2-22 Variante V: Druckhalteanlage mit luftbeaufschlagtem Membran-Ausdehnungsgefäß. SiV_A Sicherheitsventil Ausdehnungsgefäß, SiV_L Sicherheitsventil Luftzuführung

In der *Variante V* ist bei Auflastung von Druckluft die Schaltung völlig identisch mit der *Variante IV* (Abb. 2.2-22). Da eine Volumenverringerung des Auflastmediums durch Kondensation entfällt, muß bei gleichbleibendem Druck im Ausdehnungsgefäß das entnommene Wasservolumen sofort durch nachströmende Luft ausgefüllt werden und umgekehrt. Dadurch spricht das Sicherheitsventil SiV_L häufiger an.

2.2.3.3

Dynamische Systeme

Die dynamischen Systeme zeichnen sich durch kontinuierliche Zuspense- und Abspeiseströme aus, deren Größen so geregelt werden, daß ein bestimmter Druck im Fernwärmenetz garantiert ist. Diese Einrichtungen werden auch oft als Druckdiktieranlagen bezeichnet. Diese Druckhalteanlagen laufen überwiegend ständig, jedoch strömt entsprechend einem vorgegebenen Druck ein mehr oder weniger großer Volumenstrom in die drucklosen oder nur unter einem geringen Druck stehenden Ausdehnungsgefäße zurück. Die für den Pumpenbetrieb notwendige Antriebsenergie muß ununterbrochen zur Verfügung stehen. Je nach geforderter Versorgungssicherheit werden mehrfache elektrische Netzeinspeisungen oder der zusätzliche Einbau von Notstromaggregaten vorgesehen. Die Kosten für den Pumpenantrieb, welcher auch drehzahl geregelt realisiert werden kann, sind dabei sehr gering.

Den weiteren Betrachtungen wird ein einfaches Prinzipschaltbild vorangestellt (Abb. 2.2-23). In der Analogiestrecke fließt ein kleiner Mengenstrom von der Druckseite zur Saugseite der Umwälzpumpe, der je nach Einregulierung der Drosselventile an der Druckmeßstelle einen symmetrischen oder asymmetrischen Mitteldruck p_M widerspiegelt. Über Abspeiseventil, Ausdehnungsgefäß, Druckhaltepumpe und Zuspenseventil fließt ständig ein Teilstrom. Dieser sollte möglichst klein sein, muß aber ebenfalls das Beherrschen des maximalen Zuspensestromes in das Fernwärmenetz gewährleisten. Liegt der gemessene Mitteldruck über dem

Soll-Wert, so wird die Abspeisung aus dem Fernwärmenetz erhöht und die Zusppeisung weiter geschlossen, was wiederum ein Absinken des Netzdruckes zur Folge hat. Ist der gemessene Mitteldruck zu niedrig, vollzieht sich der umgekehrte Vorgang.

Aufbauend auf dem vorgestellten Grundprinzip wurden viele spezielle Schaltungen entwickelt, welche im einzelnen hier nicht wiedergegeben werden können. Interessant dabei sind gewisse und somit grundlegende Gestaltungsmöglichkeiten der Zusppeise- und Abspeiseleitungen, welche kurz erläutert werden sollen.

In Abb. 2.2-23 wird die Regelgröße nach hydraulischer Mittelwertbildung in der Analogiestrecke abgebildet. Diese Variante wird auch mit dem Namen GÖPFERT in Verbindung gebracht. Nach (Glück 1985) sollten durch die Analogiestrecke etwa 0,3 % der umgewälzten Wassermenge fließen. Die Mittelwertbildung kann aber auch elektrisch nach Messung der einzelnen Drücke p_V und p_R vorgenommen werden.

Verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten sind in Abb. 2.2-24 abgebildet. Gegenüber dem Prinzipschaltbild (Abb. 2.2-23) wurde in Abb. 2.2-24a das Zusppeiseventil weggelassen. Demzufolge fördert die Druckhaltepumpe unregelt ins Fernwärmenetz, wobei der Förderstrom nur vom Differenzdruck ($p_{AG} - p_{Zu}$) abhängig ist. Das Abspeiseventil arbeitet dabei in einem großen Lastbereich.

In Abb. 2.2-24b – ebenfalls von GÖPFERT – ist die Zusppeisung druckseitig und die Abspeisung saugseitig der Umwälzpumpe eingebunden. Der Vorteil gegenüber Abb. 2.2-24a liegt im günstigeren Betriebsverhalten für die Druckhaltepumpen begründet. Die Förderdrücke schwanken je nach Betriebszustand, wobei sich der größte Unterschied zwischen den Betriebspunkten bei maximaler Umwälzmenge ($p_{V,max}$; $p_{R,min}$) und dem Ruhezustand ergibt. Weitere Gegenüberstellungen der beiden Fälle bei ausgewählten Betriebszuständen sind in (Glück 1985) beschrieben.

In den Abb. 2.2-24c und 2.2-24d sind die Zusppeise- und Abspeiseleitungen zusammengefaßt. Der wesentliche Hauptvorteil dieser Gestaltungen besteht darin, daß zwischen Fernwärmenetz und Ausgleichgefäß nur die Ausgleichsvolumenströme fließen. Der nicht zum Volumenausgleich benötigte Förderstrom der Druckhaltepumpe strömt sofort über das Abspeiseventil in das Ausdehnungsgefäß

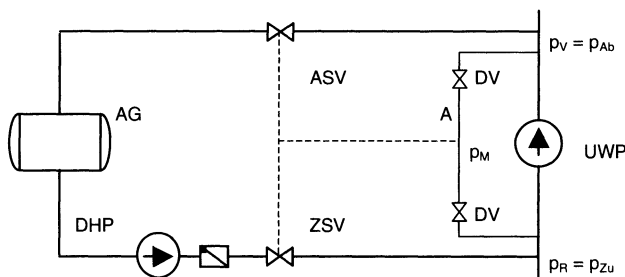


Abb. 2.2-23 Prinzipschaltbild eines dynamischen Druckhaltesystems
 AG Ausdehnungsgefäß, UWP Umwälzpumpe, DHP Druckhaltepumpe, ASV Absperrventil,
 ZSV Zusppeiseventil, A Analogiestrecke, DV Drosselventil

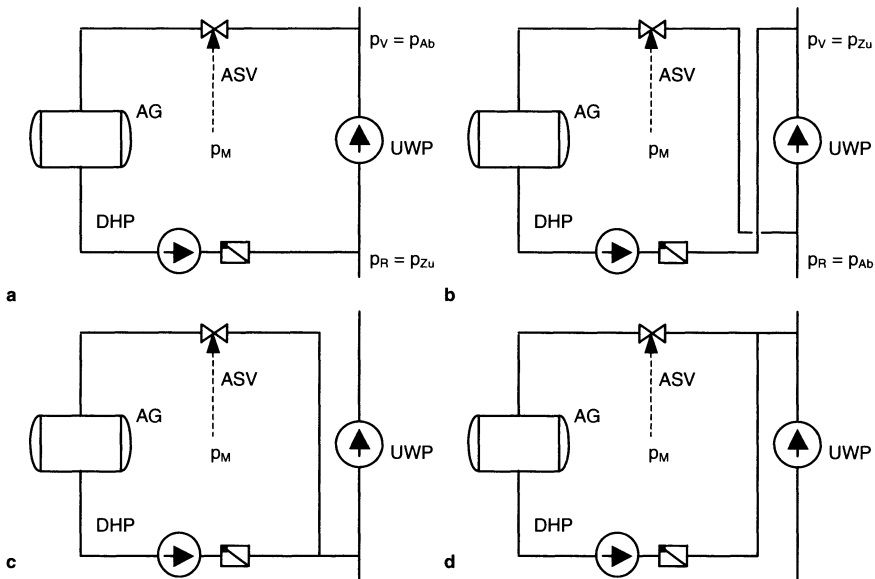


Abb. 2.2-24 Anbindungen dynamischer Druckhalteanlagen nach (Glück 1985)

AG Ausdehnungsgefäß, UWP Umwälzpumpe, DHP Druckhaltepumpe, ASV Abspeiseventil

zurück. Dies ist für solche Fälle vorteilhaft, wenn das Ausdehnungsgefäß nicht beheizt ist und dadurch nur ein Mindestmaß an sauerstoffangereichertem Wasser – als Folge mangelhafter Abdeckung der Wasseroberfläche im Ausdehnungsgefäß – ins Fernwärmenetz gelangt. Um eine Sauerstoffanreicherung weitestgehend auszuschließen kann das Ausdehnungsgefäß mit einem Entgaser betrieben werden. Der aufgeheizte Zuspäisevolumenstrom vermischt sich unmittelbar an der Einbindestelle. Letztendlich sind alle dargestellten Ausführungsvarianten variabel verknüpfbar und somit an jedes Fernwärmenetz anpaßbar.

Interessant sind auch Lösungen der dynamischen Druckhaltung, die ohne Druckhaltepumpen auskommen. Dazu zählen die EBERT- und GÖPFERT-Schaltungen. Bei der EBERT-Schaltung wird der Druck an einer repräsentativen Stelle in der Nähe der Abnehmer gemessen. Bei Abweichungen vom gewünschten Mitteldruck werden zwei miteinander gekoppelte Ventile geregelt. Durch diesen Kurzschluß strömt ein Teil der Gesamtumwälzmenge (maximal 5 %). Da das Ausdehnungsgefäß mit einem geringen Druckpolster versehen ist, bleibt der Druck an der Saugseite der Umwälzpumpe annähernd konstant. Sinkt nun der gemessene Druck ab, so kann durch entsprechende Betätigung der Ventile eine größere Umwälzmenge ins Fernwärmenetz gefördert werden und umgekehrt (s. Abb. 2.2-25).

Bei der GÖPFERT-Schaltung wird durch eine Brückenschaltung am Netzausgang der Erzeugeranlage eine echte Mitteldruckbildung erreicht. Durch Einbau veränderlicher Drosselventile ist es möglich, einen beliebigen Ruhedruck zu erzeugen (s. Abb. 2.2-26). Die Schaltung kann ebenso wie die EBERT-Schaltung so modifiziert werden, daß die Druckhaltepumpe entbehrlich ist.

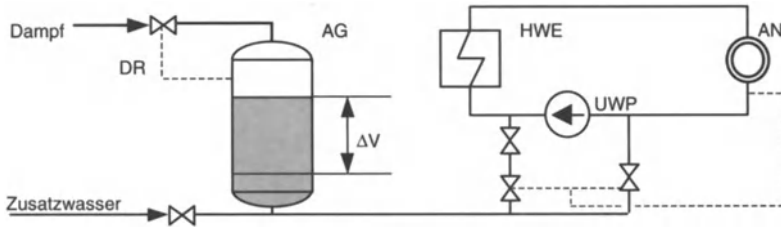


Abb. 2.2-25 EBERT-Schaltung

AG Ausdehnungsgefäß, UWP Umwälzpumpe, HWE Heißwassererzeuger, AN Abnehmer, DR Dampfdruckregler, PR Δp -Regler

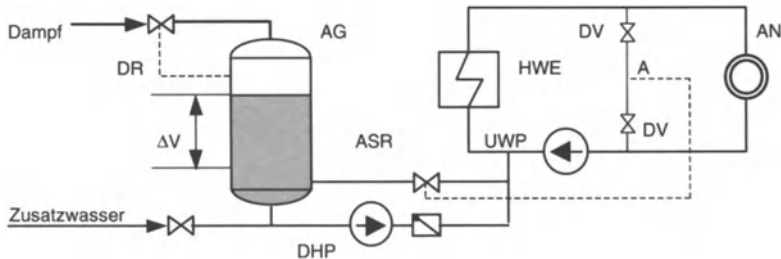


Abb. 2.2-26 GÖPFERT-Schaltung

AG Ausdehnungsgefäß, UWP Umwälzpumpe, HWE Heißwassererzeuger, AN Abnehmer, DR Dampfdruckregler, ASR Abströmregler, DHP Druckhaltepumpe, DV Drosselventil, A Analogiestrecke

Entsprechend ausgeführte Beispiele neuerer dynamischer Druckhalteanlagen für große Heizwassersysteme zeigt Abb. 2.2-27.

2.2.3.4

Statisch-dynamische Systeme

Die statisch-dynamischen Systeme stellen Kombinationen der vorgenannten Grundvarianten dar. Theoretisch können beispielsweise statische Systeme mit teilweiser Wasserabspeisung in drucklose Speicher durch laufende Vergrößerung dieses Anteils in dynamische Systeme überführt werden. Viele solcher Systeme wurden ausgeführt, um die Betriebskosten am Strombedarf der rein dynamischen Druckhalteanlagen zu senken. Letztendlich ist damit aber auch nur eine Saug- oder Enddruckhaltung realisierbar. Bei zahlreichen Fernwärmesystemen wird aber eine Mitteldruckhaltung gefordert, die mit den energetischen Vorteilen der statischen Druckhaltung verbunden ist. In (Glück 1985) werden Schaltungen vorgestellt, die die aufgeführten Restriktionen erfüllen. Dabei handelt es sich um Mitteldruckhalteanlagen entweder mit dampf- oder stickstoffbeaufschlagtem Ausdehnungsgefäß.

Das Prinzipschaltbild einer Mitteldruckhaltung mit dampfbeaufschlagtem Ausdehnungsgefäß zeigt Abb. 2.2-28a. Der Grundaufbau entspricht der sogenannten,

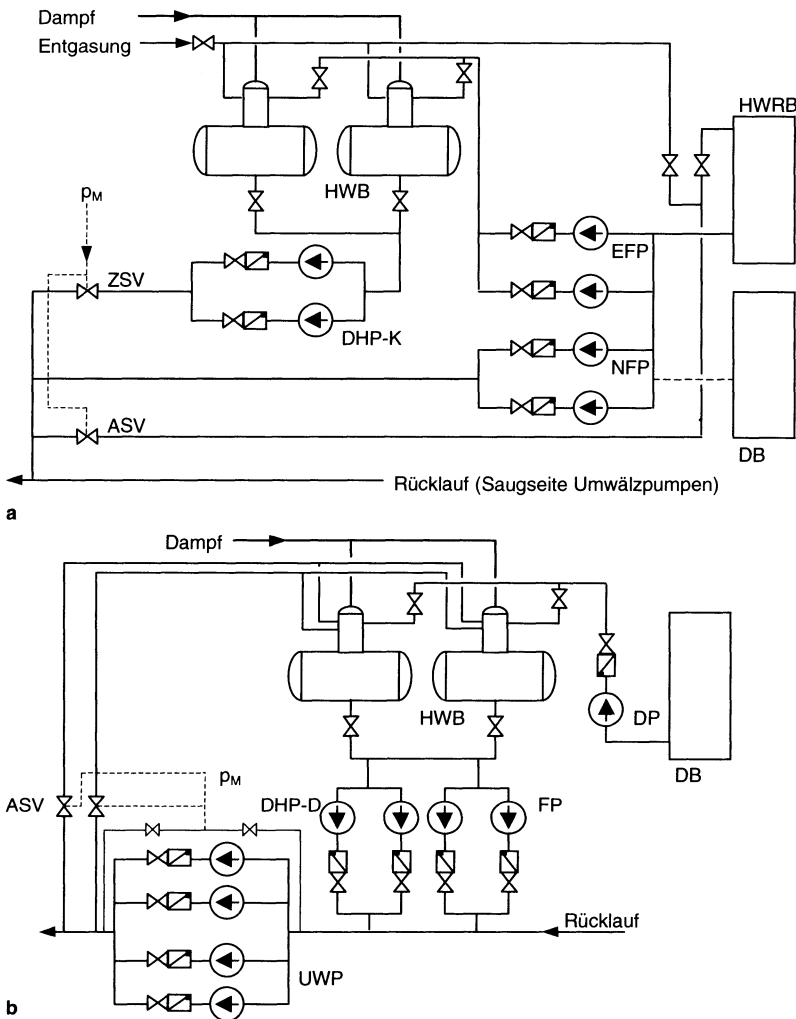


Abb. 2.2-27 Beispiele ausgeführter dynamischer Druckhaltungen

HWB Heißwasserbehälter, HWRB Heißwasserreservebehälter, DB Deionatbehälter, UWP Umwälzpumpe, DHP-K Druckhaltepumpe (konstant geregelt), DHP-D Druckhaltepumpe (drehzahlgeregelt), NFP Netznotfüllpumpe, FP Füllpumpe, EFP Entgaserfüllpumpe, DP Deionatpumpe, ASV Abspeiseventil, ZSV Zuspeseiventil

oben bereits vorgestellten, EBERT-Schaltung. Die benötigte und sichere Dampf-schiene ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Realisierung einer derartigen Druckhalteanlage. Der Druck des Polsterdampfes muß auf einen Wert einstellbar sein, der sowohl die Abspeisung aus dem Fernwärmenetz als auch die Zuspeseung in das stillstehende Fernwärmenetz gestattet. Wird diese Restriktion erfüllt, dann ist stets eine Volumenkompensation des Netzwassers bei Stromausfall gegeben.

Handelt es sich um reine Heizwassersysteme, d. h. die Bereitstellung des Heizwassers findet in einer Anlage ohne Dampferzeugung statt, kann eine Mitteldruckhaltung mit stickstoffbeaufschlagtem Ausdehnungsgefäß zur Anwendung kommen. Dem Argument, daß Dampfsysteme nicht als absolut ausfallsicher gelten, wie in (Glück 1985) genannt, kann der Verfasser nicht folgen. Ausfallsicherer sind auch Heizwassersysteme nicht.

In Abb. 2.2-28b ist die einfachste Schaltung dargestellt. Bei Expansion des Wassers steigt der Mitteldruck in der Analogiestrecke an. Dadurch wird ein Impuls an das Absperrventil gegeben und Wasser aus dem Fernwärmenetz strömt solange in den Pufferbehälter, bis der Soll-Wert des Mitteldruckes erreicht ist. Im Pufferbehälter wird das Inertgaspolster durch den Zufluß von der Abspeisung verdichtet. Ist ein definierter Maximaldruck im Pufferbehälter erreicht, wird das Wasser in das Ausdehnungsgefäß umgepumpt. Die Pumpe schaltet bei Erreichen des Minimaldruckes im Pufferbehälter ab. Bei Volumenkontraktion sinkt der in der Analogiestrecke abgebildete Mitteldruck. Dadurch öffnet das Zusperrventil so lange, bis genügend Wasser aus dem Ausdehnungsgefäß in das Fernwärmenetz geströmt ist und der Soll-Wert-Mitteldruck wieder hergestellt wurde. Das Ausdehnungsgefäß enthält ebenfalls ein Inertgaspolster, das einer großen Druckschwankung unterliegt. Dadurch ist das Ausdehnungsgefäß bedeutend kleiner als bei konventionellen statischen Druckhalteanlagen.

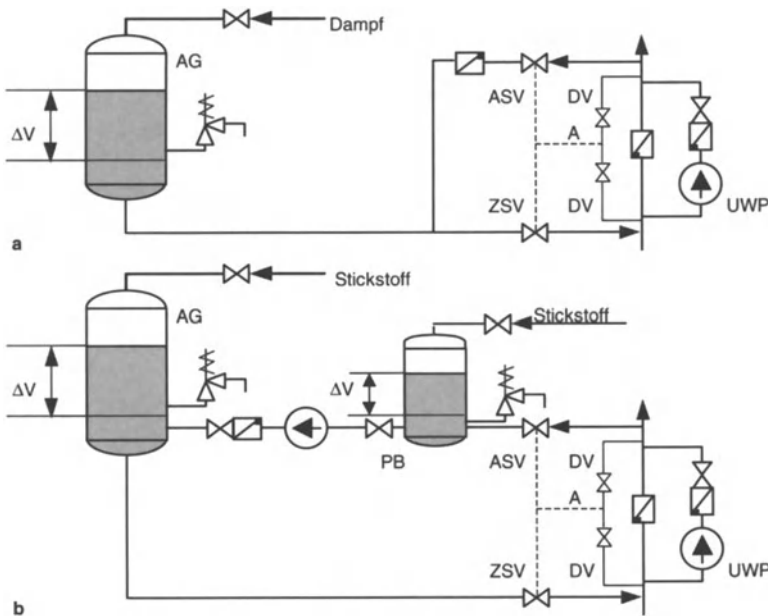


Abb. 2.2-28 Mitteldruckhaltung mit Ausdehnungsgefäß

a dampfbeaufschlagt, **b** stickstoffbeaufschlagt

AG Ausdehnungsgefäß, UWP Umwälzpumpe, ASV Abströmventil, ZSV Zusperrventil, PB Pufferbehälter, DV Drosselventil, A Analogiestrecke

Der Pufferbehälter ist notwendig, um die Schalthäufigkeit der nachfolgenden Pumpe in technisch möglichen Grenzen zu halten. Dabei ist zu beachten, daß der maximale Druck in diesem Pufferbehälter kleiner als die Summe aus Mitteldruck und dem halben Pumpendruck ist (Glück 1985).

Weitere Schaltungsvarianten sind in (Glück 1985) beschrieben und beruhen auf verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten. Mit der zuvor beschriebenen Schaltungsvariante und der *Variante III* der statischen Druckhaltungen (s. Abb. 2.2-20) kann beispielsweise der Pufferbehälter entfallen.

2.2.3.5

Nachgeschaltete Systeme

Sogenannte nachgeschaltete Druckhaltesysteme regeln den Druck in Sekundärnetzen durch Überspeisen und gegebenenfalls auch durch Rückspeisen aus dem Primärnetz. Auch hier gibt es eine Vielzahl von technischen Lösungsvorschlägen. Sie reichen von einer einfachen Überströmeinrichtung gemäß Abb. 2.2-29a bis zu re-

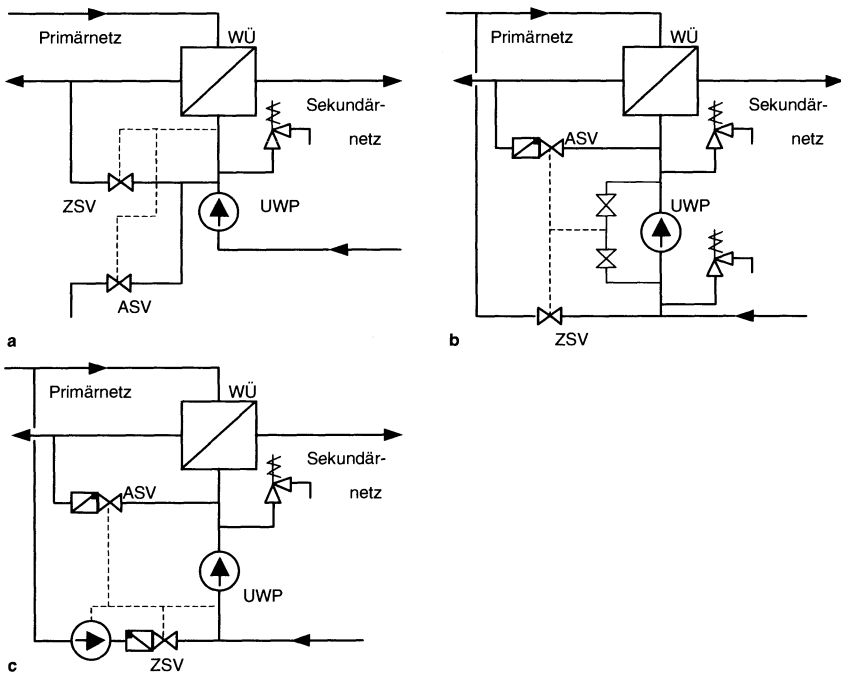


Abb. 2.2-29 Nachgeschaltetes Druckhaltesystem mit Zuspeisung nach (Glück 1985)

a aus dem Primärücklauf und ungenutzter Abseisung in Abhängigkeit vom Enddruck, **b** aus dem Primärvorlauf und Abspeisung in den Primärücklauf in Abhängigkeit vom Mitteldruck, **c** aus dem Primärvorlauf unter zusätzlicher Verwendung einer Pumpe und Abspeisung in den Primärücklauf in Abhängigkeit vom Saugdruck

WÜ Wärmeübertrager, UWP Umwälzpumpe, ASV Abströmventil, ZSV Zuspeiseventil

lativ komplizierten Zuspense- und Rückspeiseeinrichtungen entsprechend den Abb. 2.2-29b und 2.2-29c (Glück 1985).

Bei der in Abb. 2.2-29a dargestellten Variante wird der Ausdehnungsvolumenstrom abgelenkt, wodurch der Primärkreislauf keine Verunreinigungen erfährt. Diese Variante ist aber bei täglich auf- und abzuheizenden Sekundärsystemen wirtschaftlich nicht vertretbar. Dabei wird ein Druckgefälle zwischen dem Primärücklauf und der Sekundäreinspeisestelle vorausgesetzt, wobei der Primärücklauf der höhere Druck sein muß. Kann diese Restriktion nicht erfüllt werden, so können als weitere Varianten ein primärseitiger Anschluß bzw. eine saugseitige Anbindung Lösungsmöglichkeiten darstellen.

In Abb. 2.2-29b ist das Sekundärnetz druckmäßig über eine Zuspenseung aus dem Primärvorlauf und eine Rückspeisung in den Primärücklauf angekoppelt. Liegt dagegen der Druck im Sekundärnetz höher als im Primärnetz, dann ist der Einbau einer zusätzlichen Einspeisepumpe (Abb. 2.2-29c) notwendig.

Allen Schaltungen ist eigen, daß die zwischen den Systemen getauschten Wassermengen möglichst klein sein sollten. Aus diesem Grund sind dichtschießende Armaturen einzusetzen und die Ansprechdrücke der Zuspense- und Abspeiseeinrichtungen um technisch erforderliche Toleranzbereiche zu versetzen, so daß gleichzeitiges Zu- und Abspeisen nicht auftreten kann. Die Art der Impulsenahme und die Definition der Soll-Werte entsprechen den bisher vorgestellten Druckhaltesystemen. So können Saug- und Enddruckhaltungen, aber auch Mitteldruckhaltungen mit symmetrischen oder asymmetrischen Zwischendrücken – gebildet über hydraulische oder elektrische Analogiestrecken – realisiert werden.

2.2.4 Rohrleitungssysteme

2.2.4.1 Einteilungen

Unter dem Fernwärmenetz wird im allgemeinen das Verbindungsglied zwischen Erzeugeranlage und Abnehmer verstanden. Auf die Wahl der Netzgestaltung, des Rohrsystems, der Verlegeart und der eingebauten Komponenten (Zubehörteile) nehmen zahlreiche

- technische,
- wirtschaftliche,
- architektonische,
- territoriale,
- sicherheitstechnische

und viele andere Faktoren Einfluß. Die Größe des Fernwärmenetzes liegt ebenso meistens nicht von vornherein fest; sie ist in der Regel historisch entstanden. Das Fernwärmenetz besteht aus verschiedenen dimensionierten Fernwärmeleitungen. Die Fernwärmeleitungen sind Rohrleitungen zur Beförderung des Wärmemediums. Sie schließen den Feuchtigkeitsschutz sowie die Wärmedämmung des Mediumrohres ein. Somit ist das Mediumrohr die eigentliche Einrichtung zur

Beförderung des Wärmeträgers. Sie besteht vorwiegend aus Stahlrohren und dazu gehöriger verschiedenartigster Komponenten wie

- Rohrbögen,
- Formstücke,
- Rohrhalterungen,
- Kompensatoren,
- Armaturen,
- Entlüftungen und
- Entleerungen.

Im folgenden sollen die verschiedenen Rohrleitungssysteme einschließlich ihrer darin enthaltenen Komponenten nach

- den Gestaltungsmöglichkeiten des Netzaufbaues,
- der Netzform (Strahlen- und Maschennetz),
- der Definition des Begriffes Rohrsystem (Ein- und Mehrleiter-Systeme),
- den Verlegeverfahren,
- den zum Einsatz kommenden Komponenten u. a.

erläutert werden. Existieren Unterschiede hinsichtlich des Wärmemediums Heizwasser und Dampf, wird im einzelnen darauf hingewiesen.

Die grundlegenden Gestaltungsmöglichkeiten von Heizwasser- und Dampfsystemen zeigt Abb. 2.2-30. Die in Abb. 2.2-30a dargestellte Variante findet bei kleineren und mittleren Fernwärmesystemen Anwendung. Ohne eine quantitative Grenze zwischen klein, mittel und groß dabei ziehen zu können, existieren viele Heizwassersysteme mit Wärmeübertragerstationen (Abb. 2.2-30b), so daß eine Unterteilung zwischen Primär- und Sekundärsystemen vorgenommen werden kann. Die Vor- und Nachteile solcher Wärmeübertragerstationen werden in einem separaten Abschnitt beschrieben. Ausgeklammert werden vorerst ebenso die Hausanschlußstationen sowie die in manchen Fernwärmesystemen eingesetzten Druckerhöhungs- und Beimischstationen.

Analog dasselbe trifft für die Dampfsysteme (Abb. 2.2-30c und 2.2-30d) zu. Entweder der Dampf wird bis direkt zur Hausanschlußstation geführt, wo er das entsprechende Heizwasser für Heizzwecke erwärmt, oder bei größeren Dampfsystemen erfolgt dieser Wärmeaustausch Dampf/Heizwasser in Wärmeübertragerstationen. An diesen Wärmeübertragerstationen schließen sich meistens größere Sekundärnetze an. Die Leistungseinheiten können verschieden sein und durchaus über 50 MW betragen. Nicht selten werden in einer solchen Wärmeübertragerstation bei entsprechendem Bedarf Regeleinrichtungen für die Bereitstellung von Prozeßwärme mit integriert.

Ausgehend von diesen Erläuterungen werden die Rohrleitungssysteme, insbesondere Heizwassersysteme, unterteilt in

- Transitsystem,
- Primärsystem und
- Sekundär- bzw. Verteilersystem

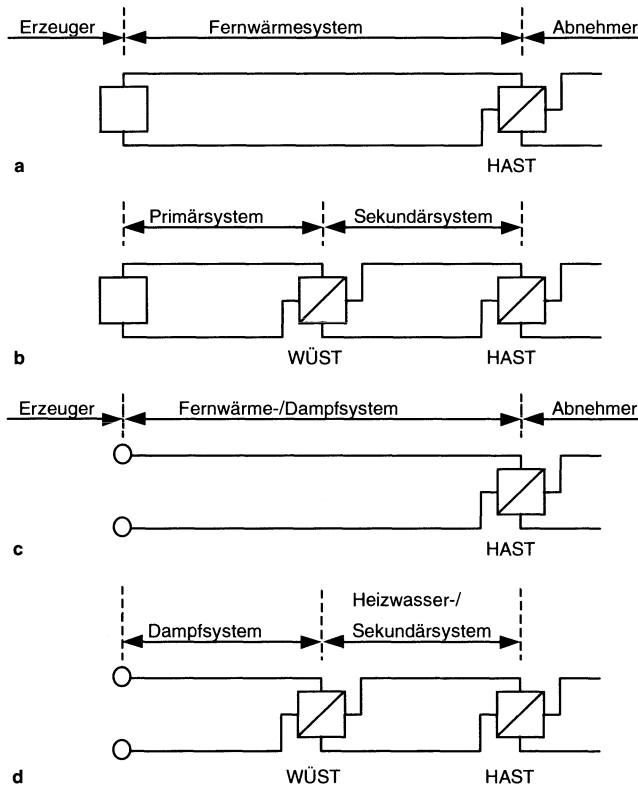


Abb. 2.2-30 Grundformen von Heizwasser- und Dampfsystemen

a Heizwassersystem ohne WÜST, **b** Heizwassersystem mit WÜST, **c** Dampfsystem ohne WÜST, **d** Dampfsystem mit WÜST

WÜST Wärmeübertragerstation, HAST Hausanschlußstation

soweit diese vorhanden sind. Während Primär- und Sekundärsysteme bereits beschrieben wurden, handelt es sich bei Transitsystemen um Rohrleitungssysteme, die über längere Entfernungen von einer größeren Erzeugungsanlage zum eigentlichen Fernwärmenetz geführt werden, unabhängig vom Wärmedium Heizwasser oder Dampf. In den in (AGFW 1993a) aufgeführten Begriffen wird das Transitsystem auch als Transportsystem⁸ definiert. Ausgeführte Transitsysteme sind in Tabelle 2.2-3 als Übersicht auszugsweise aus (Hammer 1996) wiedergegeben sowie einer Ergänzung unterzogen. Auf detaillierte Beschreibungen sei u. a. in (HEW 1988, Hrsg. 1987, Reichl 1996) verwiesen.

Mit Bezug auf die Verteilersysteme gehen die fachlichen Meinungen auseinander. Während einige Fernwärmeunternehmen Verteilersysteme gleich dem Sekundärsystem setzen, definieren andere Fernwärmeunternehmen Verteilersysteme als

⁸ ... sind Leitungen zur Übertragung von Wärme aus einer Erzeugungsanlage zu einem entfernt liegenden Einspeisepunkt eines Fernwärmenetzes.

nachgeschaltete z. T. inselbetriebene Systeme. Dies kann z. B. ein System sein, das sich nach einer größeren Hausanschlußstation bzw. unmittelbar an eine Wärmeübertragerstation in einem Gewerbegebiet anschließt.

Bezüglich (AGFW 1993a) können aber auch die Rohrleitungssysteme unterteilt werden nach

- Transportleitung,
- Hauptleitung,
- Versorgungsleitung und
- Hausanschlußleitung.

Die Transportleitung wurde bereits oben, die anderen Leitungen wie folgt definiert (AGFW 1993a, S. 200):

Eine *Hauptleitung* ist eine Leitung der oberen und mittleren Verteilung, von der im Normalfall keine Hausanschlußleitung abzweigt.

Eine *Versorgungsleitung* ist eine Leitung der unteren Verteilung, von der die Hausanschlußleitungen abzweigen.

Die *Hausanschlußleitung* ist eine Leitung, die die Versorgungsleitung mit der Hausstation verbindet.

Es ist aber durchaus möglich, ein vorhandenes Primärsystem in Haupt-, Versorgungs- und Hausanschlußleitungen zu unterteilen.

Unabhängig vom Medium werden hinsichtlich der *Netzform* zwei Grundtypen unterschieden, das Strahlennetz und das Maschennetz (s. Abb. 2.2-31). Bei einem Strahlennetz sind für dessen Struktur vor allem die Versorgungsschwerpunkte bestimmend, die räumlich weit voneinander entfernt liegen. Strahlennetze entwickeln sich in der Ausbaufolge großer Fernwärmesysteme. Dabei muß jederzeit

Tabelle 2.2-3 Auszug ausgeführter Transitsysteme in Europa

Land	Stadt	Nennndurchmesser	Länge
Deutschland	Weisweiler	DN 500	35 km
	Hamburg	DN 800/700	20 km
	Leipzig	DN 700	17 km
	Mannheim	DN 800/700	14 km
Norwegen	Oslo	DN 500	10 km
Tschechien	Prag	DN 1200	34 km
Schweden	Stockholm	DN 500	11 km
Niederlande	Tilburg	DN 600	20 km
	Amsterdam	DN 700	11 km
Italien	Turin ^a	–	34 km
Dänemark	Århus	–	100 km
	Århus	DN 1000	14 km
	Kopenhagen ^a	–	154 km
	Frederecia/Veigle/Kolding ^a	–	70 km
	Herning ^a	–	40 km
	Varde	DN 400	14 km
Rußland ^b	–	–	20 km

^a Angaben erfolgten auf Basis des Gesamtsystems.

^b Rußland mit mehreren Systemen von ca. 20 km Länge ohne genaue Ortsangaben.

beachtet werden, daß die Dimensionierung der Hauptleitungen mit dem entsprechenden Vorlauf erfolgt. In der Übersichtlichkeit und der Beherrschung der hydraulischen Bedingungen haben diese Netzstrukturen ihre Vorteile. In (AGFW 1993a) wird das Strahlennetz als ein Netz definiert, dessen Leitungen von einem Einspeisepunkt strahlenförmig ausgehen und nur von einer Seite gespeist werden. Die Praxis zeigt aber, daß es auch Strahlennetze gibt mit zwei oder mehreren Einspeisepunkten. In (Glück 1985) wird das Liniennetz als Sonderform des Strahlennetzes definiert. Dieses Liniennetz besteht aus nur einem Versorgungsstrang, wovon die Hausanschlußleitungen zu den Abnehmern abzweigen.

Maschennetze zeichnen sich infolge mehrfacher Versorgungsmöglichkeiten zwar durch eine höhere Versorgungszuverlässigkeit gegenüber Strahlennetzen aus, schlagen aber mit einem erhöhten Investitionsaufwand zu Buche. Diese Netzform kommt vor allem bei dichtbesiedelten Gebieten zum Einsatz. Meistens besitzen sie Mehrfacheinspeisungen.

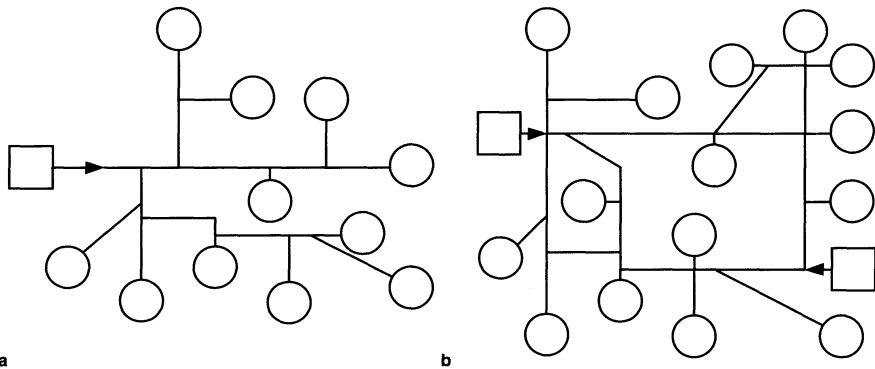


Abb. 2.2-31 Netzformen

a Strahlennetz mit einer Einspeisung, **b** Maschennetz mit 2 Einspeisungen

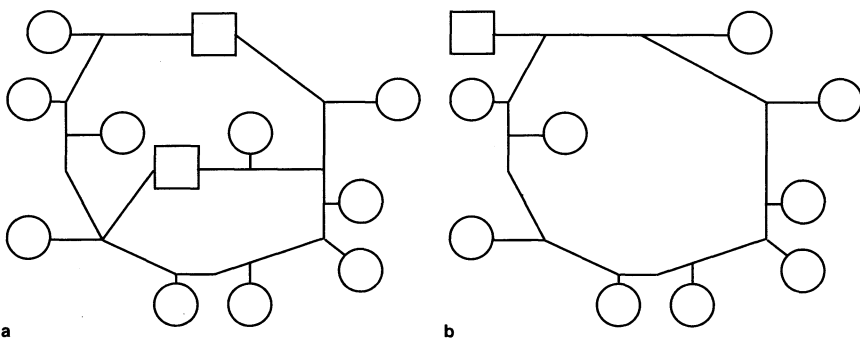


Abb. 2.2-32 Definition Maschennetz

a nach (Munser 1980), **b** nach (Glück 1985)

Interessant dagegen ist die Sonderform des Ringnetzes (s. Abb. 2.2-32), welches verschieden definiert wird. In (Munser 1980) stellt das Ringnetz die weitere Ausbaufolge von Strahlennetzen dar, während in (Glück 1985) darunter ein Versorgungssystem verstanden wird, welches nur aus einer Masche mit dazugehörigen Hausanschlußleitungen besteht. Aller guten Dinge sind drei. In (AGFW 1993a) wird das Ringnetz als ein Netz mit einer oder mehreren Ringleitungen definiert. Der Verfasser vertritt die Meinung, daß die Ringnetze aus Abb. 2.2-32 Maschennetze darstellen; dabei zeigt Abb. 2.2-32b die einfachste Form eines Maschennetzes.

In (Munser 1980) kann für Maschennetze der Vermaschungsgrad über eine Gleichung bestimmt werden

$$VG = \frac{z - (K - 1)}{K}, \quad (2.18)$$

mit K - Anzahl der Knoten (Zusammenführung zweier oder mehrerer Leitungen),
 z - Anzahl der Netzzweige (Verbindungen zwischen den Knoten).

Grundsätzlich wird bezüglich der Definition des Begriffes – Rohrsystem – die Anzahl der parallel geführten Rohrleitungen verstanden. Dabei wird in Literatur und Praxis häufig des weiteren unterschieden in:

- Einleiter-System,
- Zweileiter-System,
- Dreileiter-System,
- Vierleiter-System.

Das *Einleiter-System* nimmt eine Sonderstellung ein, da es nur da eingesetzt werden kann, wo gleichzeitig Wärmeenergie und Warmwasser benötigt werden.

Das *Zweileiter-System* ist die eigentliche und am meisten realisierte Standardform der Heizwassersysteme und besteht aus einer Vorlauf- und einer Rücklaufleitung. Bei Dampfsystemen teilt sich das System in eine Dampf- und eine Kondensatleitung auf.

Das *Dreileiter-System* findet heute kaum noch Verwendung. In realisierten Heizwassersystemen besteht es aus 2 Vorlauf- und einer gemeinsamen Rücklaufleitung. Die eine Vorlaufleitung wird mit gleitender Fahrweise für Heizzwecke betrieben. Die andere Vorlaufleitung wird dagegen mit konstanter Fahrweise für die Warmwasserbereitung genutzt. In der gemeinsam genutzten Rücklaufleitung fließt somit ein variabler Volumenstrom, bedingt durch die schwankende Entnahme an Warmwasser.

Um die Versorgungszuverlässigkeit bei unterdimensionierten Zweileiter-Systemen zu erhöhen, besteht in einzelnen Fällen auch die Möglichkeit, eine zweite parallelverlegte Vorlaufleitung zu installieren. Bei dieser Variante werden Investitionskosten gegenüber eines kompletten Austausches des unterdimensionierten Zweileiter-Systems gespart, abgesehen von dem dazu benötigten Stillstand und somit Nichtgewährleistung einer Versorgung der betroffenen Abnehmer. Da beide

⁹ In (Munser 1980) wird der Vermaschungsgrad mit V angegeben. Um Mißverständnissen hinsichtlich zur Größe Verfügbarkeit vorzubeugen, wird dafür das Formelzeichen VG verwendet.

Vorlaufleitungen gleichzeitig betrieben werden, handelt es sich somit um ein abstrahiertes Zweileiter-System.

Bei Dampfsystemen kommt das Dreileiter-System schon häufiger zur Anwendung. Meistens unterscheiden sich die beiden Dampfleitungen darin, daß eine als „Sommerleitung“ und eine als „Winterleitung“ betrieben wird.

Das im Heizwassersystem zum Einsatz kommende *Vierleiter-System* besteht aus 2 parallelverlegten Zweileiter-Systemen, wobei entweder ein Zweileiter-System gleitend zur Außentemperatur für Heizzwecke und das andere mit konstanter Temperatur für die Warmwasserbereitung oder als ein Versorgungssystem mit jeweils 2 parallelen Vorlauf- und Rücklaufleitungen betrieben wird. Letzteres weist bezüglich der möglichen Redundanz im Störfall eine höhere Versorgungszuverlässigkeit auf.

In den meisten Fällen werden Fernwärmeleitungen nach den Druckstufen PN 10, PN 16 und PN 25 realisiert. Bei kleinen Fernwärmesystemen kommt auch die Druckstufe PN 6 zur Anwendung. In Ausnahmefällen kann bei großen Fernwärmesystemen auch PN 40 zu einer wirtschaftlichen Lösung führen, insbesondere bei Transitsystemen.

Für die Wahl der Druckstufe sind der Betriebsdruck und die Betriebstemperatur entscheidend. Laut DIN 2401 gilt für den Temperaturbereich 20–120 °C zulässiger Betriebsdruck gleich Druckstufe, dagegen fällt der zulässige Betriebsdruck mit ansteigender Betriebstemperatur. In Abb. 2.2-33 wird dieser Zusammenhang verdeutlicht.

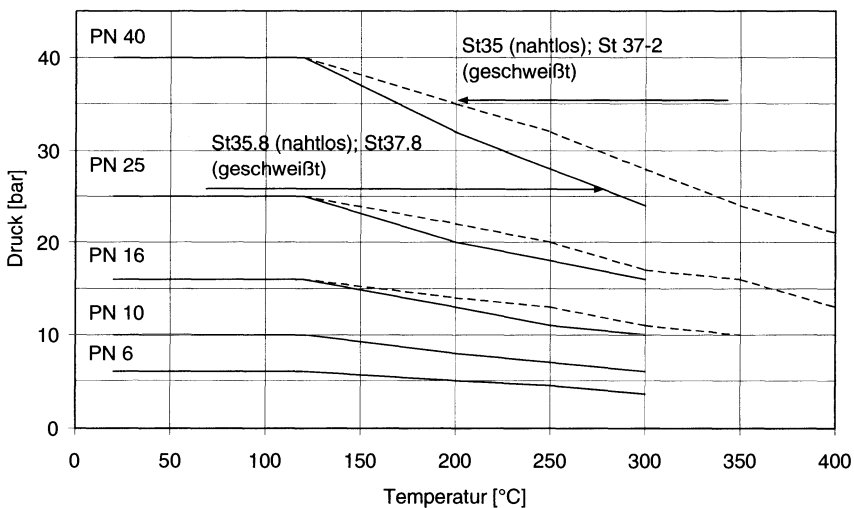


Abb. 2.2-33 Zulässige Betriebsdrücke in Abhängigkeit von der Temperatur

Anmerkung: Für PN 6, PN 10 und PN 16 jeweils ab 250 °C wurde diese Norm inzwischen zurückgezogen, jedoch sind diese Werte für die Praxis sehr gut brauchbar (Wagner 1991)

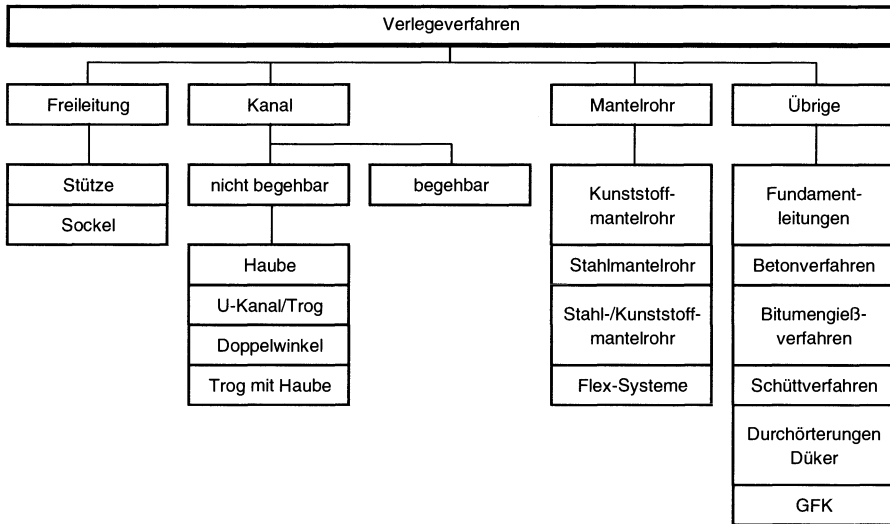


Abb. 2.2-34 Verlegeverfahren für Fernwärmesysteme

Bei Heizwasser- und Dampfsystemen kommen verschiedene Verlegeverfahren zur Anwendung, wobei für Dampfsysteme anhand der Auslegungstemperatur für einige Verlegeverfahren Einschränkungen oder sogar Nichtverwendung gelten. Eine Unterteilung der wichtigsten Verlegeverfahren zeigt Abb. 2.2-34.

Eine aktuelle Rohrnetzstatistik bezüglich der Verlegeverfahren, welche zum Einsatz gekommen sind, ist derzeit nicht existent. Die letzte Rohrnetzstatistik wurde im Rahmen der AGFW für das Jahr 1991 erhoben (AGFW 1993b). Dabei wurde nur der Bereich der alten Bundesländer betrachtet, weshalb die Statistik heute nicht mehr direkt vertretbar ist. Grundsätzlich kann aber gesagt werden, daß der Hauptschwerpunkt der Verlegeverfahren bei den Mantelrohrsystemen liegt.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Verlegeverfahren vorgestellt. Dabei erfolgt bei dem Verlegeverfahren Freileitung eine ausführliche Beschreibung

- der Rohrleitungen und deren Zubehörteile,
- des Dehnungsausgleiches,
- der Rohrhalterungen sowie
- der Wärmedämmungen,

während bei den anderen Verlegeverfahren nur noch spezifisch darauf aufgebaut wird.

2.2.4.2

Verlegeverfahren Freileitung

Ein wesentlicher Vorteil der Verlegung von Freileitungen besteht in den relativ niedrigen Investitionskosten und wird überall dort angewendet, wo es die territo-

riale Nutzung zuläßt. Dieses Verlegeverfahren verliert aber aus städteplanerischen und architektonischen Gesichtspunkten zunehmend an Bedeutung, obwohl sich bei Zusammenarbeit aller beteiligten Behörden, Architekten und Planer durchaus sinnvolle Lösungen gestalten lassen. Bezüglich einer Unterscheidung zwischen Stützen- und Sockelverlegung ist die Höhe zwischen Erdoberfläche und Unterkante Fernwärmeleitung ausschlaggebend. Bei einer Sockelverlegung liegt diese unter 1,80 m. Als stützende Bauteile für die Freileitungen kommen Stahlbetonsokkel, Stahl- oder Stahlbetonstützen sowie Ramm- oder Bohrpfähle aus Stahlbeton zum Einsatz.

Berühren die auf Stützen geführten Freileitungen den Verkehrsraum, sind die vorgeschriebenen Lichtraumprofile der Bahnen sowie sonstige Bestimmungen der betreffenden Verkehrsträger und der Straßenverwaltungen einzuhalten. Der Abstand der Stützen richtet sich nach der zulässigen Rohrlagerentfernung. Eine Vergrößerung des Stützenabstandes kann erreicht werden durch Längstraversen, Hängewerke oder Rohrbrücken. Freiverlegte Rohrleitungen in Gebäuden werden in den meisten Fällen durch eine hängende Lagerung realisiert.

Im Anschluß werden die folgenden Komponenten näher erläutert:

- Rohrleitungen und deren Zubehörteile,
- Dehnungsausgleicher,
- Rohrhalterungen sowie
- Wärmedämmungen.

Rohrleitungen. Als Rohrwerkstoffe kommen in den meisten Fällen nahtlose Stahlrohre nach DIN 1629 und DIN 17175 oder geschweißtes Stahlrohr nach DIN 1626 und DIN 17155 zum Einsatz, wie z. B. St37.0 oder St52.0. Ferner können nach (AGFW 1993a) bis DN 150 auch Stahlrohre nach DIN 2440, 2441 und 2442 verwendet werden.

Bei Dampfleitungen spielen der Einfluß der Betriebstemperatur und des Betriebsdruckes gegenüber den Heizwasserleitungen die wesentlichere Rolle. Der eingesetzte Rohrwerkstoff bei Kondensatleitungen ist verschieden und hängt in starkem Maße von der Kondensatqualität ab. Insbesondere offene Kondensatrückförderanlagen und die damit verbundene Sauerstoffkorrosion weisen für Kohlenstoff-Stahl nur Standzeiten von 7–10 Jahren auf (VDI 986 1992). Deshalb kommen neben den oben genannten Stahlwerkstoffen austenitische Stähle oder korrosionsbeständige Werkstoffe – wie GFK – zum Einsatz. Letzterer Werkstoff wird bei den übrigen Verlegeverfahren näher erläutert.

Im Anhang 2 befinden sich für nahtloses Stahlrohr nach DIN 2448 und für geschweißtes Stahlrohr nach DIN 2458 die entsprechenden Maßnormen. Anhang 3 zeigt dagegen eine Auflistung der Maßnormen nach der nicht mehr geltenden, aber in den neuen Bundesländern zur Anwendung gekommenen TGL. Dies ist insbesondere dort von Bedeutung, wo in vorhandenen Freileitungen Erweiterungen oder Rekonstruktionen geplant sind und somit Anpassungen vorgenommen werden müssen.

Obwohl Freileitungen nicht immer in das städtebauliche Bild passen und somit eher als störend empfunden werden, besitzen diese den großen Vorteil, immer einsehbar zu sein. Dadurch wird auch kein Leckwarnsystem benötigt. Auch halten

sich durch diese Zugänglichkeit Instandhaltungsmaßnahmen kostenmäßig in Grenzen.

Eine ausführliche Beschreibung der möglichen, zu verwendenden Rohrleitungskomponenten, wie u. a.

- Bögen unterschiedlicher Radien nach DIN 2605,
- Einschweißbögen nach DIN 2619,
- T-Stücke nach DIN 2615,
- Sattelstützen nach DIN 2618,
- konzentrische und exzentrische Reduzierungen nach DIN 2616,
- Flansche,
- Stutzen sowie
- Kappen nach DIN 2617

würde den Rahmen dieser Abhandlung sprengen. Dazu sei auf spezielle Literatur und Vorschriften, wie u. a. (DIN TB 15 1994; DIN TB 141 1996; Schmidt u. Lumpe 1988; Wossog et al. 1998) verwiesen.

Dehnungsausgleicher. Eine weitere wichtige Rohrleitungskomponente sind Dehnungsausgleicher, welche durch die Temperaturänderungen des Wärmemediums benötigt werden. Am zweckmäßigsten ist es, diese durch eine entsprechende Rohrleitungsführung zu kompensieren. Häufig nehmen die Schenkel von ebenen oder räumlichen Systemen (s. Abb. 2.2-35) die Längenänderung auf.

Die notwendige Ausladung von sogenannten U-Bögen ist bei kleineren Nenndurchmessern gering und läßt somit eine Verlegung ohne Kompensator meist zu. Bei großen Nenndurchmessern nehmen U-Bögen beachtliche Dimensionen ein und lassen sich dadurch nicht immer realisieren. In Abhängigkeit von der Trassenführung werden auch Dehnungsausgleicher als Z- oder L-Bogen bzw. L-Schenkel verwendet, so daß vorhandene natürliche Möglichkeiten genutzt werden können und sollten. Lassen sich diese Dehnungsausgleichsmöglichkeiten mit dem gewünschten Trassenverlauf in Einklang bringen, so ist dadurch die betriebssicherste und im allgemeinen auch wirtschaftlichste Aufnahme der Rohrleitungsausdehnung gegeben. Gleichzeitig sind diese Systeme wartungsfrei.

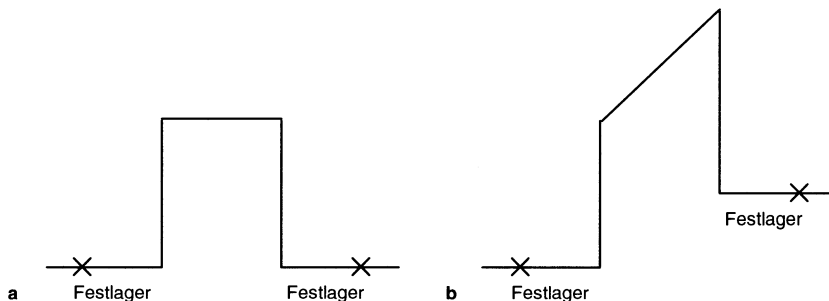


Abb. 2.2-35 Dehnungsausgleich
a ebenes System, **b** räumliches System

Bei einem U-Bogen wächst mit der Ausladung die Dehnungsaufnahme und sinkt die Verstellkraft. Mittels der eingebrachten Vorspannung vermindert sich die Festpunktkraft, während sie keinen Einfluß auf die Dehnungsaufnahme hat. Vorteilhaft ist auch, daß sich mehrere parallel verlegte Rohrleitungen ineinanderschachteln lassen. Ein U-Bogen muß nicht unbedingt in der Mitte zwischen den beiden Festpunkten gelegt werden. Ohne Beeinträchtigung seiner Dehnfähigkeit könnte er im Extremfall einseitig nahe an einem Festpunkt eingebaut werden. Dadurch erfährt lediglich der Scheitelpunkt eine geringe Verschiebung.

Die früher übliche Lyra-Form wird heute kaum noch verwendet, weil sie trotz höherer Dehnungsaufnahme keine nennenswerten Vorteile bietet.

Scheitert die Realisierung von Dehnungsausgleichen durch die entsprechende Rohrleitungsführung, ist der Einbau von Kompensatoren erforderlich. Darüber hinaus können auch wirtschaftliche Gesichtspunkte zur Verwendung von Kompensatoren führen.

Bei den Kompensatoren werden zwei Grundarten unterschieden, zum einen den Balgkompensator und zum anderen den Gleitkompensator, häufig auch als Stopfbuchsenkompensator bezeichnet. Die in den meisten Fällen eingesetzten Kompensatoren sind die Balgkompensatoren, deren Grundelement der gewellte Balg ist.

Je nach Bewegungsaufnahme des Kompensators unterscheidet man zwischen Axial-, Angular- und Lateralkompensator (s. Abb. 2.2-36 und Tabelle 2.2-4). Die Metallbälge sind dünnwandige Rohrkörper, die durch Eindrücken ringförmig verlaufender Wellen schlauchartige Biegsamkeit und axiales Federungsvermögen erhalten (s. Abb. 2.2-37).

Neben der Beweglichkeit ist von den Metallbälgen Druckfestigkeit gefordert. Beweglichkeit und Druckfestigkeit stellen gegenläufige Restriktionen dar, die jede für sich im Extremfall zu unterschiedlichen Wellenformen führen. Die lyraförmige Welle vereint dabei beide Restriktionen und läßt sich durch Änderung ihrer Geometrie den jeweiligen Anforderungen anpassen. Darüber hinaus kann die Lagenzahl erhöht werden, wobei es einwandige, mehrwandige und vielwandige Bälge gibt. Dabei bestehen mehrwandige Bälge aus 2–5 Lagen mit einer Wanddicke von ca. 0,7 mm, vielwandige Bälge dagegen aus gewickelten, maximal 0,3 mm dicken Blechen mit mehr als 10 Lagen (AGFW 1993a).

Der einwandige Balg ist in seinem Aufbau der einfachste und durch entsprechende Wanddicken sehr robust. Gegenüber mehrwandigen Kompensatoren kann er bei gleicher Druckbeständigkeit im Verhältnis zu seiner Baulänge nur entsprechend kleinere Dehnungen aufnehmen, wenn die gleiche Lebensdauer erwartet wird. Der wesentliche Vorteil eines vielwandigen Balges beruht darauf, daß die federnden Wellen des Balges als Zug- und Druckspannungen auftretenden Biegespannungen geringer sind als bei einem einwandigen Balg. Gleichzeitig wird der vielwandige Balg mit kleinerer Wellenhöhe hergestellt, was wiederum bei seiner Anwendung als Axialkompensator günstigere Festpunktbeanspruchung gegenüber einem Balg mit höheren Wellen bedeutet. Dabei ist aber zu beachten, daß mit abnehmender Steifigkeit des vielwandigen Balges zwar eine größere Dehnungsaufnahme bei gleicher Lastwechselzahl möglich ist – es erhöht sich jedoch auch die Gefahr der Instabilität.

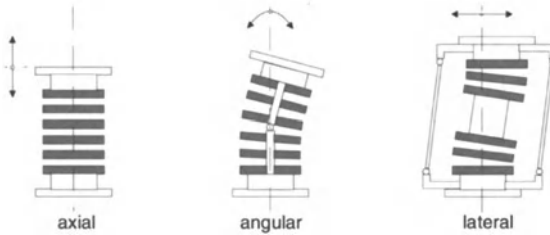


Abb. 2.2-36 Möglichkeiten der Bewegungsaufnahme eines Kompensators

Tabelle 2.2-4 Merkmale der verschiedenen Kompensatoren

axiale Kompensatoren	angulare Kompensatoren	laterale Kompensatoren
– einfache Konzeption – kleinere bis mittlere Bewegungsaufnahme – allseitige Bewegung möglich – keine Leitungsumlenkung erforderlich – große Axialkräfte bei höheren Drücken – starke Festpunkte und gute Führungen erforderlich	– schwierigste Konzeption – mittlere bis große Bewegung möglich – keine axiale Bewegung möglich – Leitungsumlenkung erforderlich – relativ geringe Festpunktbelastung – normale Führungen ausreichend	– relativ einfache Konzeption – kleine bis mittlere Bewegungsaufnahme – keine axiale Bewegung möglich – Leitungsumlenkung erforderlich – relativ geringe Festpunktbelastung – Restdehnung als Zusatzbelastung – normale Führungen ausreichend

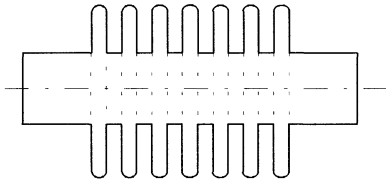


Abb. 2.2-37 Balgkompensator

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß Balgkompensatoren somit einer Beanspruchung durch Innendruck, aus den Längenänderungen der Rohrleitung resultierenden Längskräfte, und durch Biegemomente unterliegen.

Balgkompensatoren werden in Abhängigkeit des Verwendungszweckes mit verschiedenen Montageteilen angeboten:

- Leitrohr – innenliegendes Rohr, das den Balg vor dem direkten Kontakt mit dem Medium schützt und den Durchflußwiderstand verringert,
- Führungsrohr – Rohr auf der Innen- und Außenseite des Balges, das den Balg gegen seitliches Ausweichen (knicken) schützt,

- Schutzrohr – Rohr auf der Außenseite zum Schutz des Balges sowie gleichzeitig als Träger für die Wärmedämmung,
- Verstärkungsringe – Ringe in den Wellentälern der Bälge zur Erhöhung der Druckfestigkeit.

Das äußere Schutzrohr kann auch so ausgebildet werden, daß es innen vom Medium umspült ist und der Kompensator somit außenbelastet ist. Hierdurch wird der Nachteil der Instabilität des innendruckbelasteten Kompensators aufgehoben. Diese Lösung wird meistens nur bei sehr langen Kompensatoren und hohen Betriebsdrücken angewandt.

Der Balgkompensator kann vorgespannt eingebaut werden, was die Montage vereinfacht. Gleichzeitig ist es möglich, sogenannte Hubbegrenzungen zum Schutz gegen Überdehnung des Kompensators anzubringen. Die Kompensatoren werden mit Einschweißenden, losen oder festen Flanschen geliefert.

Neben den Axialkompensatoren kommen zum einen Rohrgelenke (Angular-Kompensatoren) und zum anderen Gelenk-Kompensatoren (Lateral-Kompensatoren) zum Einsatz. Mindestens 2 und höchstens 3 Rohrgelenke, durch Zwischenrohre verbunden, bilden ein statisch bestimmtes System. Zu den Rohrgelenkstücken zählen das einzelne Gelenkstück, 2 Gelenkstücke mit Zwischenrohr und das Kardan-Rohrgelenkstück. Im Gegensatz zum Axialkompensator führt das Element nur Winkelbewegungen aus. Die Druckreaktionskräfte durch den Innendruck werden durch die Gelenkanker aufgenommen.

Die mögliche Dehnungsaufnahme eines Gelenksystems ist bei gegebenem zulässigen Winkelaufschlag der Rohrgelenke vom Einbauzustand der einzelnen Rohrgelenke abhängig. Dabei verringern sich die Verstellkräfte mit steigender Größe der Dehnungsaufnahme. Bei langen Leitungen, zu denen ein Gelenksystem einen sehr elastischen Leitungsabschnitt darstellt, ist vor und hinter jedem Gelenksystem ein Führungslager vorzusehen.

Die Wirkungsweise der Gelenk-Kompensatoren in Form von Lateralkompensatoren beruht – wie die der Rohrgelenkstücke – auf Winkelbewegungen der Bälge. Die Dehnungsaufnahme ist abhängig von der Baulänge bzw. dem Balgmittenabstand und nimmt mit der jeweiligen Größe zu. Der Gelenk-Kompensator ist im Gegensatz zum Rohrgelenkstück eine selbständige Dehnungseinheit, die ein komplettes Zwei-Gelenksystem darstellt. Wegen ihrer geringen Ausladung werden sie vor allem dort eingesetzt, wo große Dehnungen auf engem Raum aufzunehmen sind.

In Abb. 2.2-38 sind verschiedene Einbaumöglichkeiten dargestellt, die dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Detaillierte Beschreibungen findet man bei den entsprechenden Herstellern von Kompensatoren.

Stopfbuchsen-Dehnungsausgleicher eignen sich für große Dehnungsaufnahmen in axialer Richtung. Sie bestehen aus einem feststehenden und einem verschiebbaren Teil, dem sogenannten Degenrohr. Beide Teile sind gegeneinander durch eine Stopfbuchse abgedichtet, die mit einer Stopfbuchsbrille nachgezogen werden kann (Wagner 1991a). Wichtig bei der Verwendung solcher Stopfbuchsen-Dehnungsausgleicher ist, daß die sich anschließende Rohrleitung genau fluchten muß – realisierbar über beidseitige Zwangsführungen. Eine geringe Verkantung kann zu Funktionsstörungen oder Undichtheiten führen. Damit sind diese Dehnungsaus-

gleicher nicht wartungsfrei. Die Stopfbuchsen-Dehnungsausgleicher werden in ausgezogenem Zustand ohne Vorspannung eingebaut.

Die Stopfbuchsen-Dehnungsausgleicher werden unterschieden nach dem nicht entlasteten und entlasteten Prinzip. Dabei bezieht sich die Bezeichnung – nicht entlastet – auf die Festpunktbelastung hinsichtlich Innendruck und sagt aus, daß der Kompensator keine Rohrleitungskräfte übertragen kann. Die Wirkungsweise eines entlasteten Stopfbuchsen-Dehnungsausgleichers ist identisch mit einem entlasteten Axialkompensator. Stopfbuchsen-Dehnungsausgleicher kommen heutzutage in Fernwärmenetzen nur noch relativ selten zum Einsatz.

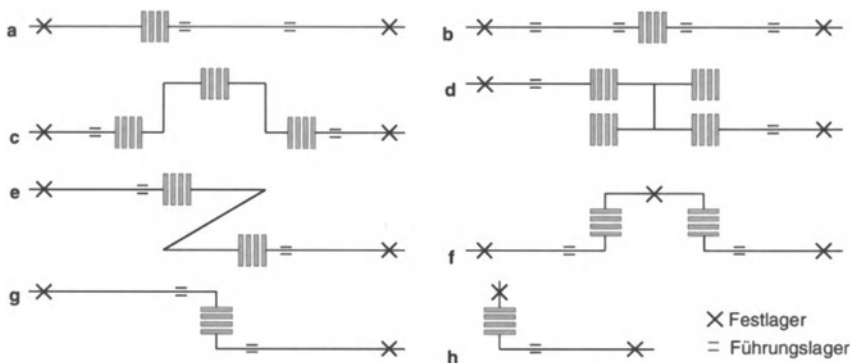


Abb. 2.2-38 Einbaumöglichkeiten von Kompensatoren

a asymmetrische Anordnung; Reibungskraft nur auf dem rechten Festlager, **b** symmetrische Anordnung; Reibungskraft gleichmäßig verteilt, **c** 3-Gelenk in U-Anordnung, **d** eckentlastende Kompensatoren, **e** 2-Gelenk-S-Anordnung, **f** U-Anordnung mit 2 Lateralkompensatoren, **g** Z-Anordnung mit Lateralkompensator, **h** L-Anordnung mit Lateralkompensatoren

Rohrhalterungen. Die Rohrleitung unterliegt einer temperaturabhängigen Wärmedehnung. Diese Temperaturschwankungen treten sowohl im laufenden Betrieb als auch bei In- und Außerbetriebnahmen auf. Deshalb muß sich die Rohrleitung bewegen können und somit funktionssicher gelagert sein. Bei Freileitungen werden fast ausschließlich Unterstützungskonstruktionen verwendet. Die Abb. 2.2-39 zeigt einen funktionellen Zusammenhang der Unterstützungsarten.

Unterstützungen an den Rohrleitungen sind an den Lagerstellen angeordnet und bestehen in den meisten Fällen aus Rohrhalterung, Halterungszubehör und Unterstützungskonstruktion. Dabei kann aber eine Lagerstelle selbst ohne diese Bestandteile gebildet werden, z. B. durch direktes Auflegen der Rohrleitung auf ein Fundament. Zunächst einige Ausführungen in den einzeln möglichen Bestandteilen einer Unterstützung.

Die *Lagerstelle* ist ein Punkt der Rohrleitung, an dem Belastungen aus der Rohrleitung über die Rohrhalterung in die Unterstützungskonstruktion eingeleitet werden. Die Auswahl des zu verwendenden Lagers erfolgt nach statischen und verfahrenstechnischen Gesichtspunkten. Der jeweilige Abstand der Lagerstellen ergibt sich aus der Stützweitenberechnung.

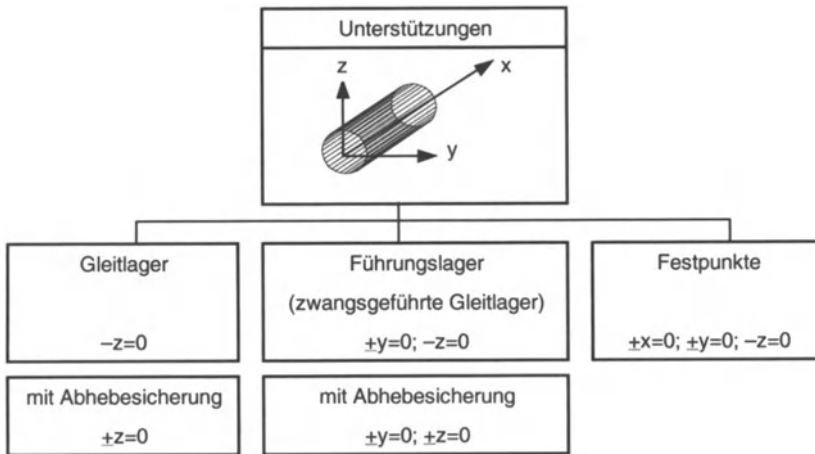


Abb. 2.2-39 Unterteilung der Unterstützungsarten

Die *Rohrhalterung* dagegen ist die Verbindung zwischen Rohrleitung und dem eventuell erforderlichen Halterungszubehör und dient zur Übertragung der Belastungen in die Unterstützungs konstruktion.

Das *Halterungszubehör* besteht aus Konstruktionsteilen, die in Verbindung mit der Rohrhalterung die geforderte Funktion einer Lagerstelle erfüllen. Dazu zählen u. a. Federlager, Konstanthänger oder entsprechende Gleitelemente für Gleitlager.

Die *Unterstützungs konstruktionen* übertragen die Beanspruchungen aus dem Rohrleitungssystem in den Baukörper bzw. in die Fundamente.

Zwischen 2 Festpunkten sind die Dehnungsbewegungen und die hieraus entstehenden Beanspruchungen der Rohrleitung in den zulässigen Grenzwerten zu halten. Die durch die Lager geführte Bewegung der Rohrleitung darf nicht behindert werden. Rohrhalterungen bei Freileitungen müssen in jedem Betriebszustand die statischen und dynamischen Lasten auf die Stützen bzw. Sockel übertragen können. Die Befestigung der Rohrhalterung an der Rohrleitung wird entweder unlösbar oder lösbar realisiert.

Laut (AGFW 1993a) liegen im allgemeinen für Rohrhalterungen derzeit keine eindeutig anwendbaren Regelwerke vor. Damit ist eine Vielfalt von Gestaltungsmöglichkeiten gegeben. Deshalb werden im Anschluß nur einige grundlegenden Ausführungen beschrieben, sonst sei auf spezielle Literatur wie u. a. (Schwaigerer 1986; Wossog et al. 1990; Wagner 1991a; Wossog et al. 1998) verwiesen.

Der Schwerpunkt der Rohrhalterungen sollte immer in der Wartungsfreiheit liegen. Es dürfen nur Werkstoffe verwendet werden, die auch bei den auftretenden Temperaturen alterungsbeständig sind. Bei Freileitungen gilt gleichzeitig die erweiterte Restriktion der Witterungsbeständigkeit.

Für Freileitungen werden als Lagerausführung Gleitlager mit Stahl/Stahl bzw. mit Stahl/PTFE¹⁰, Rollenlager oder Kugellager eingesetzt. Die Gleitlager werden

¹⁰ PTFE – Polytetrafluoräthylen.

vorzugsweise aus Normprofilen in Schweißkonstruktionen hergestellt. Als Unterlage dienen Profilstähle, meistens Stahlplatten, die auf der vorgesehenen Sockel- bzw. Stützenauflagefläche befestigt oder mit Überstand einbetoniert werden. Empfehlenswert ist es, entsprechend den Anforderungen alle Stahlteile mit einem dauerhaften Korrosionsschutz zu versehen.

Die Art der Rohrbefestigung des Lagers kann sowohl verschweißt als auch lösbar gestaltet werden (Abb. 2.2-40). Angeschweißte Halterungen haben den Vorzug größerer Betriebssicherheit. Bei lösbaren Rohrbefestigungen werden überwiegend Rohrschellen und Rundstahlbügel verwendet. Wegen der Gefahr des Verrutschens ist bei geschellten Rohrbefestigungen deren Sitz regelmäßig zu überprüfen, insbesondere in häufig temperaturwechselnden Rohrleitungen. Bei Heizwassersystemen hält sich dies in Grenzen, nicht aber bei Dampfsystemen. Dabei werden bei Nenndurchmessern größer DN 100 zwei Rohrschellen je Lager gesetzt. Bei kleineren Nenndurchmessern wird dagegen nur eine Rohrschelle benötigt, welche aber gegen Verrutschen zu sichern ist.

Beim Einbau angeschellter Lager sind die Lagenänderung und die Vorspannung der Rohrleitung zu beachten, da eine unsachgemäße Montage ein Herunterrutschen von der Auflagefläche zur Folge haben kann. Gleichzeitig sollten punkt- oder linienförmige Lasteintragungen, z. B. durch Rundstahlaulager, wegen der hohen Flächenpressung vermieden werden (s. Abb. 2.2-41).

Das Gleitlager kann entweder freibeweglich oder zwangsgeführt realisiert werden. Bei freibeweglichen Lagern sollten Konstruktionen mit möglichst kleinen Reibungskräften verwendet werden. Zur Anwendung dabei kommen Werkstoffpaarungen wie Edelstahl/PTFE oder Wälzlager. Kugelig gelagerte Gleitlager bewirken dagegen eine gleichmäßige Anpressung der Gleitflächen (AGFW 1993a).

Eine weitere Möglichkeit ist die Anwendung von Rollenlagern. Als besonders zweckmäßige Unterstützungselemente haben sich dabei Doppelzylinder erwiesen, welche aus einem Stahlgehäuse und zwei V-förmig angeordneten und drehbar gelagerten Zylinderrollen bestehen. Die Rollen gleiten auf einer geschliffenen, nichtrollenden Edelstahlachse, während die Lager durch PTFE-Scheiben geschützt sind. Das verbindende Element zwischen Rohrleitung und Rollenlager bildet der Isoliersattel mit Rohrschelle oder Rohrbügel bzw. eine anschweißbare Konstruktion (s. Abb. 2.2-42). Die Rollenlager werden für verschiedene Anwendungen serienmäßig angeboten und beinhalten Kombinationsmöglichkeiten, wie seitlich verschiebbar, mit und ohne Abhebesicherung sowie höhenverstellbar.

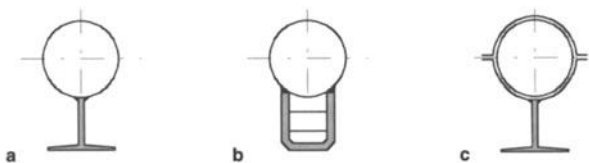


Abb. 2.2-40 Beispiele für Rohrunterstützungen

a verschweißt mit T-Eisen, **b** verschweißt mit U-Eisen, **c** Rohrschelle mit T-Eisen

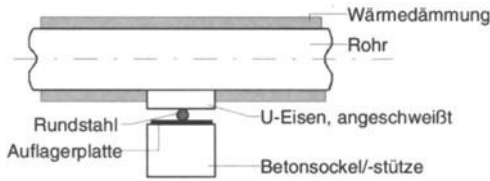


Abb. 2.2-41 Rundstahlaufleger (technisch veraltet)

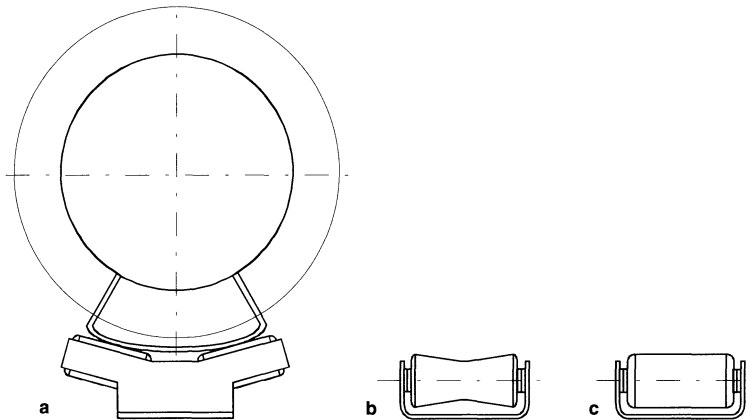


Abb. 2.2-42 Rollenlager

a Doppelzylinder mit Isoliersattel zum Anschweißen, **b** Doppelkegel, **c** Zylinder

Neben der Ausführung des Doppelzylinder-Rollenlagers gibt es weiterhin die des Doppelkegel- und Zylinder-Rollenlagers, entweder mit Rollenkörpern aus Stahl oder – bei begrenzter Auflagertemperatur – aus Polyamid.

Bei zwangsgeführten Lagern werden die zuvor beschriebenen Konstruktionen eingesetzt. Dabei muß jedoch beachtet werden, daß die Reibung aller Teile, d. h. auch der Führungen und der evtl. eingesetzten Abhebesicherungen, als Reaktionskraft am Festpunkt auftritt.

Mit Festpunkten werden Größe und Richtung der Wärmedehnbewegungen festgelegt. Sie sollten die aus dem Rohrleitungssystem kommenden Kräfte, hervorgerufen durch

- die Restriktionskräfte aus Lagerreibung,
- die Verstellkräfte der Kompensatoren,
- die Kräfte aus der elastischen Verformung des Rohres sowie
- die innendruckabhängigen Axialkräfte bei Verwendung von nichtentlasteten Axialkompensatoren

aufnehmen und das System am Festpunkt fixieren. Die Abstützung ist kraftschlüssig mit der Konsole verbunden, die ihrerseits die Kräfte an den Abstützsystemen, Sockel oder Stütze, weiterzuleiten hat. Um ein nachträgliches Verrutschen des

Rohres durch die Rohrschelle bzw. Rohrbügel zu verhindern ist es zweckmäßig, Nocken an das Rohr anzuschweißen. Eine starre Einspannung des Rohres ist zu vermeiden, da durch die Betriebstemperatur und geringen Rohrverformungen zusätzliche Spannungen auftreten.

Abschließend noch einige Bemerkungen zu Reibungskräften verschiedenartiger Werkstoffpaarungen. Bei Gleitreibungsverhalten ist der Reibungsbeiwert in der Ruhelage der Gleitflächen (Haftreibungsbeiwert) etwa doppelt so groß wie bei der Bewegung zwischen den Gleitflächen (Gleitreibungsbeiwert). Darauf begründet finden die Bewegungsvorgänge wegen des geringen Gleitwiderstandes, ausgelöst durch die Differenzkraft zwischen Ruhe- und Bewegungszustand, beschleunigt statt. Während des Zustandes der Temperaturänderung der Rohrleitung in der Gleitfläche aufgebaute Schubkräfte werden folglich in größeren Intervallen stoßweise abgebaut und zwar solange, bis jeweils die Schubkraft aus der Rohrleitung auf die Größe des Gleitreibungswiderstandes absinkt und damit der Gleichgewichtszustand die Bewegung beendet. Dieser Vorgang wird auch als Stick-slip-Effekt bezeichnet und kann sowohl in einzelnen Rohrleitungsabschnitten zu unterschiedlichen Zeitpunkten als auch fast gleichzeitig an allen Lagerstellen erfolgen. Diese Bewegungsvorgänge finden in Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes statt. Je kleiner der Reibungsbeiwert ist, um so kontinuierlicher erfolgen die Bewegungsvorgänge der Rohrleitung, d. h. desto kürzer sind die Zeitabstände der Gleit- und Stop-Phasen.

Bei Rollreibungsvorgängen ist der Reibungsbeiwert dagegen vom Bewegungs- bzw. Ruhezustand fast unabhängig. Deshalb erfolgen nahezu kontinuierliche Bewegungsvorgänge der Rohrleitung.

In Tabelle 2.2-5 sind Haftungsbeiwerte für gebräuchliche Gleit- und Rollenlager angegeben. Dabei gelten die kleineren Haftungsbeiwerte für unverschmutzte und ebene Reibflächen, die größeren Haftungsbeiwerte für stark verschmutzte bzw. korrodierte oder unter Last verformte Gleitflächen. Ebenso hat die Lebensdauer auf das Lager einen erheblichen Einfluß.

Für die Festlegung der zulässigen Lagerabstände bzw. Stützweiten einer Rohrleitung sind im wesentlichen drei Kriterien maßgebend:

Tabelle 2.2-5 Auswahl von Haftungs- und Gleitreibungsbeiwerten für Gleit- und Rollenlager

Werkstoffpaarung	Haftungsbeiwert	Gleitreibungsbeiwert
Stahl/Stahl	0,30–0,60	0,15–0,30
Stahl/Faserzement	0,60	
Stahl/Kupferschlacke (Formstein)	0,25–0,30	0,10–0,15
Stahl/Bronze	0,25–0,50	0,20–0,30
Stahl/Guß Eisen	0,20	
Edelstahl/PTFE	0,10–0,40	0,10–0,30
Kunststoff/Kunststoff	0,10	
Polyamid/Beton	0,60	
Polypropylen/Stahl oder Guß	0,60	
Stahlrollenlager und -kugellager	0,12–0,30	0,12–0,30
Rollenlager/Edelstahl	0,10–0,20	

Tabelle 2.2-6 Anhaltswerte von Stützweiten für Stahlrohrleitungen mit Normalwandstärke

DN	(AGFW 1993a)	Dampf bis 250 °C	(LENTJES 1993)		(Wagner 1991a)
	Wasser 100–150 °C		Wasser	Dampf	Wasser
20	1,5	1,7	–	–	1,4
25	1,7	2,0	1,9	2,0	1,8
32	2,0	2,4	2,3	2,5	2,2
40	2,3	2,6	–	–	2,4
50	2,9	3,2	2,9	3,1	3,1
65	3,8	4,1	3,1	3,5	3,3
80	4,1	4,6	3,5	3,6	4,2
100	4,4	4,9	4,0	4,5	4,5
125	5,1	5,5	4,5	5,2	5,1
150	5,7	6,0	5,8	5,9	5,8
200	7,0	7,6	6,1	7,4	7,2
250	7,6	8,6	6,6	8,4	7,8
300	8,7	9,4	7,4	9,6	8,6
350	9,0	10,2	7,8	10,2	9,3
400	9,8	11,0	8,4	11,2	10,2
500	11,1	12,8	9,6	13,2	12,0
600	–	–	10,4	14,6	–
700	–	–	9,0	14,1	–
800	–	–	10,0	15,5	–
900	–	–	11,0	17,2	–

- Einhaltung der zulässigen Biegebeanspruchung des Rohres,
- Vermeidung eines Gegengefälles infolge der Durchbiegung sowie
- Einhaltung der zulässigen Beanspruchung der Unterstützungselemente.

Die Stützweite ist somit abhängig vom Widerstandsmoment des zu unterstützen des Rohres, vom Gewicht des Mediums und des Prüfmediums, von der Wärmedämmung, vom Verlegegefälle und insbesondere beim Verlegeverfahren Freileitung von Schnee- und Windlast. Weiterhin können Schwingungsanfälligkeit und Belastbarkeit vorhandener Auflagestellen ferner die Stützweite bestimmen.

Die zulässige Durchbiegung wird nach dem Gefälle der Rohrleitung bemessen. Diese soll gerade so groß sein, das ein Gegengefälle vermieden wird und gilt besonders für Dampfleitungen zwecks Vermeidung von Kondensatschlägen. Bei Freileitungen ist auch der optische Eindruck mit zu berücksichtigen. Obwohl für Dampfleitungen, infolge des wesentlich geringeren Mediumgewichtes, etwas größere Stützweiten angegeben werden, erfolgt die Stützweitenwahl anhand von wasserführender Leitungen. Die Begründung liegt darin, daß größtenteils Dampfleitungen mit Wasser geprüft werden. Bei Außerbetriebnahmen oder Schwachlasten kann sich auch mehr Kondensat als Dampf in der Rohrleitung befinden.

In Tabelle 2.2-6 sind Anhaltswerte von Stützweiten für Wasser- und Dampfleitungen mit Wärmedämmung aufgelistet, s. auch u. a. (Schmidt u. Lumpe 1988; AGFW 1993a; LENTJES 1993; Wagner 1991a, 1996). Ausführliche Berechnungen von Stützweiten für Stahlrohrleitungen und Systemen ohne bzw. mit Wärmedämmung sind für verschiedene Lastfälle nach TRR 100 in (Wagner 1996; Wos-sog et al. 1998) enthalten.

Wärmedämmung. In den Fernwärmenetzen treten Wärmeverluste auf, die sich mit Hilfe der Wärmedämmung wesentlich verkleinern lassen. Die Auslegung der Wärmedämmung ist in erster Linie eine Optimierungsaufgabe, bei der das Maximum der Gesamtkosten bestimmt wird, indem die Einsparungen durch den Wärmeschutz den Kosten gegenübergestellt werden. Die Wärmedämmung in Fernwärmesystemen hat die Aufgabe von:

- Wärmeschutz,
- Berührungsschutz,
- Brandschutz,
- Schutz vor Kondensatanfall und
- Schutz vor Einfrierungen.

Zu den Verlusten in Fernwärmesystemen gibt es pauschalisierte Betrachtungen, bei denen die Verluste in bezug auf die eingespeiste Wärmemenge gesehen werden. Die Differenz zwischen eingespeister und verrechneter Wärmemenge gibt ebenfalls Aufschluß darüber. In vollständigen Berechnungen müßte zusätzlich auch die Pumpenenergie berücksichtigt werden, da die Umwälzenergie durch Strömungsverluste in Wärme umgesetzt wird. Über die Wärmeverluste, bezogen auf die eingespeiste Wärmemenge, gibt es statistische Untersuchungsergebnisse, die die Wärmeverluste von Fernwärmenetzen im Jahresmittel mit 10–15 % beziffern (AGFW 1993a). Die Wärmeverluste, bezogen auf die Einspeisung, sind starken jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen, begründet durch den benötigten Wärmebedarf beim Abnehmer. Bei Höchstlast in der Winterperiode liegen die relativen Verluste um die 3 %, während dagegen in der Sommerperiode, wenn das Fernwärmenetz allein zur Warmwasserbereitung warm gehalten werden muß, die Wärmeverluste im Bereich von 25 % und mehr liegen können.

Bei Heizwassersystemen wirkt eine gleitende Fahrweise der Vorlauftemperatur den Wärmeverlusten entgegen. Die Wärmeverluste von Leitungen sind vom jeweiligen Durchmesser abhängig. Leitungen kleinerer Nenndurchmesser weisen im Verhältnis zum Querschnitt eine größere Oberfläche auf als große. Anders formuliert: Je größer der Durchmesser einer Leitung wird, desto günstiger sind die Wärmeverluste bezogen auf die transportierte Wärme. Bei Dampfsystemen muß die Wärmedämmung so dimensioniert werden, daß der entstehende Kondensatanfall nicht zu groß wird.

Bei Heizwassersystemen können die Vorlauf- und die Rücklaufleitungen entsprechend ihres verschiedenen Temperaturniveaus unterschiedliche Dämmdicken erhalten.

Das Grundprinzip der Dämmstoffe besteht darauf, daß die darin enthaltene Luft einen schlechten Wärmeleiter darstellt. Diese Luft ist in zahlreichen, gleichmäßig in Dämmstoffe verteilten Hohlräumen enthalten. Außer der wärmeschutztechnischen Forderung nach einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit werden von guten Dämmstoffen folgende Eigenschaften verlangt:

- Temperaturbeständigkeit,
- niedrige Dichte,
- Druck- und Bruchfestigkeit,
- Unempfindlichkeit gegen kurzzeitige Durchfeuchtung und

- Feuerbeständigkeit bzw. schwere Entflammbarkeit.

Die *Wärmeleitfähigkeit* ist die wichtigste Materialkenngröße für Dämmstoffe und im wesentlichen von der Temperatur abhängig (Abb. 2.2-43).

Als Dämmstoffe für Fernwärmeleitungen kommen folgende Werkstoffe zur Anwendung:

- Mineraldämmstoffe als Schalen oder Matten,
- PUR-Hartschaum¹¹, vorwiegend werkseitig geschäumt und
- Sondermaterialien.

Zu den bereits oben genannten Eigenschaften des Dämmstoffes kommt bei Einsatz an Fernwärmeleitungen die der zu erreichenden Lebensdauer von 40–50 Jahren hinzu. Gleichzeitig darf er keine zerstörende Wirkung auf die Rohrleitung selber ausüben. Selbst nach vollständiger Durchnässung muß der Dämmstoff, unter Beibehaltung seines ursprünglichen Volumens und seiner Wärmeleitfähigkeit, wieder austrocknen sein. Laut (AGFW 1993a) reduziert sich erfahrungsgemäß der Wärmedurchgangswiderstand eines vollständig durchnässten Mineralfaserdämmstoffes nach Austrocknung auf etwa 90 % seines Ausgangswertes.

Dämmstoffe an Fernwärmeleitungen sind gegen den Zutritt von Wasser besonders gefährdet. Die Wasseraufnahme wird durch den kapillaren Wassertransport beeinflußt und sollte deshalb möglichst gering sein.

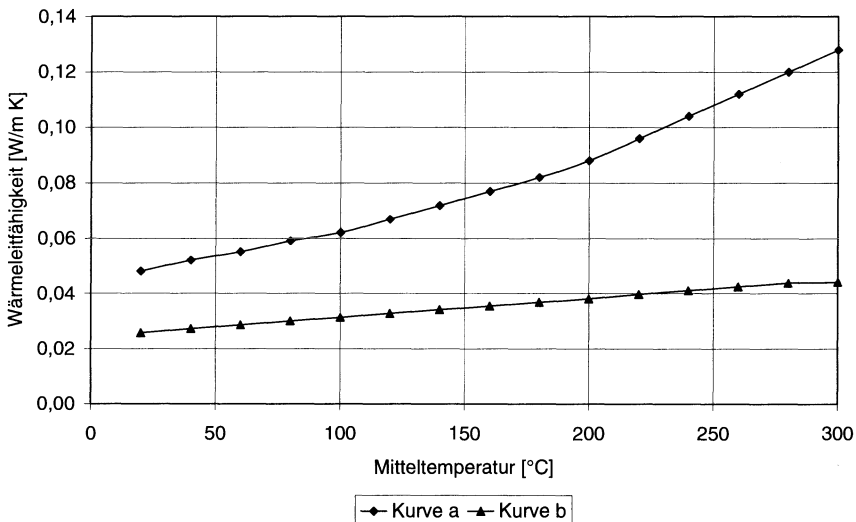


Abb. 2.2-43 Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffes in Abhängigkeit der Temperatur
a Mineralwolleplatten (ρ=110 kg/m³), **b** Luft

¹¹ PUR – Polyurethan.

Tabelle 2.2-7 Auswahl von Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen für Fernwärmeleitungen

Dämmstoff	Betriebswert der Wärmeleitfähigkeit [W/m K]
Mineralfaserdämmstoffe: – Schalen	0,040
– Matten	0,045
PUR-Schaumstoff-Schalen (nach Herstellerangaben)	0,030
PUR-Hartschaum: – Fabrikschaum, diffusionsdicht	0,030
Ortsschaum	0,035
Schaumglas	0,060

Die Diffusion von Wasserdampf wird durch die Partialdruckdifferenz des Wassers verursacht. Der Partialdruck selbst ist wiederum von der Temperatur abhängig. Dadurch bedingt besteht bei instationärem Betrieb die Möglichkeit des Tauwasserniederschlags. Solche Taupunktunterschreitungen innerhalb der Wärmedämmung sollten unter allen Umständen vermieden werden, da dadurch zusätzliche Wärmeverluste entstehen. Eine Zusammenstellung der gebräuchlichen Dämmstoffe und ihrer Wärmeleitfähigkeit zeigt Tabelle 2.2-7.

Die Anwendungsgrenztemperatur der einzelnen Dämmstoffe liegt unterschiedlich hoch und ist im einzelnen den Herstellerangaben zu entnehmen.

Wärmedämmungen werden nach den Vorschriften der DIN 18421, DIN 4140 und der VDI 2055 ausgeführt, in denen auf alle Details eingegangen wird. Im folgenden werden Wärmedämmungen aus Mineralfaserstoffen für Freileitungen behandelt.

Die Wärmedämmungen von Freileitungen erfordern Schutz gegen Wettereinflüsse und mechanische Belastungen. Die Ummantelung besteht überwiegend aus Blechmänteln. Da die Ummantelung der Rohrleitung schnelle Temperaturwechsel erfahren kann, besteht auf der Innenseite des Blechmantels die oben erläuterte Gefahr der Tauwasserbildung. Um eine Durchfeuchtung durch Kondensatbildung des Dämmstoffes zu verhindern, wird der Blechmantel mit Abstandshaltern etwa 15 mm ringförmig zur Belüftung und zur Abführung von Tauwasser montiert. Durch entsprechende Öffnungen an der Unterseite der Ummantelung wird der Luftaustausch sowie ein mögliches Abfließen des Tauwassers gefördert. Die Ummantelungen selbst werden aus feuerverzinktem Stahlblech, aus Aluminiumblech, aus kunststoffüberzogenen Blech oder als Hartmäntel hergestellt. Verzinkte Bleche müssen mit einer beidseitigen Zinkauflage von 275 g/m^2 der DIN 17162-1 entsprechen. Die Dicke der Stahlbleche ist dabei abhängig vom Umfang der Dämmung und liegt zwischen 0,75–1,0 mm. In (Wagner 1991a) werden in Abhängigkeit vom Isolationsdurchmesser folgende Blechdicken angegeben:

- bis 150 mm Durchmesser: Blechdicke 0,63 mm
- über 150–400 mm Durchmesser: Blechdicke 0,75 mm
- über 400–700 mm Durchmesser: Blechdicke 0,88 mm
- über 700 mm Durchmesser: Blechdicke 1,00 mm.

Bei Verwendung von Aluminiumblechen liegen die Dicken zwischen 1,0–1,5 mm. Beide Ausführungen sollten auch aus dem Grunde verwendet werden, daß hierbei eine geschlossene Oberfläche erreicht wird, die eine gute Steifigkeit besitzt.

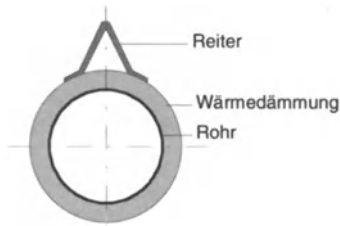


Abb. 2.2-44 Sockelleitung mit Reiter als Schutz vor Beulgefahr

Die Ummantelungen werden mittels Stützkonstruktionen mit metallischen oder keramischen Abstandshaltern nach DIN 4140 auf der Leitung zentriert.

Um die Beulgefahr, insbesondere bei Sockelleitungen, zu minimieren, werden auch Noppenfolien aus Kunststoff verwendet. Sie nutzen die Druckfestigkeit der Dämmschalen und stützen das Mantelblech über die Noppen flächig ab. Solche derartige Beulgefahr entsteht auch durch Einfluß Dritter (z. B. Balanciermöglichkeit). Dies kann verhindert werden durch den zusätzlichen Aufbau sogenannter Reiter (Abb. 2.2-44).

Die Längs- und Rundnähte der Ummantelung erhalten Sicken. Im Blechmantel werden Schiebestellen vorgesehen, welche die unterschiedliche Dehnung zwischen Rohrleitung und Ummantelung aufnehmen.

Abschließend sei darauf verwiesen, daß auch im Bedarfsfall werkseitig, vorisolierte Rohrleitungen für den Bau von Freileitungen zur Anwendung kommen, wobei die Anwendungstemperaturen begrenzt sind durch den Einsatz des Dämmstoffes (PUR-Hartschaum für kleiner 130 °C, PUR-Glasschaum für kleiner 160 °C).

2.2.4.3

Verlegeverfahren Kanal

Grundsätzlich haben sich beim Bau von Fernwärmenetzen seit vielen Jahren Kanäle in unterschiedlichsten Formen bewährt. Ihren Ursprung findet man insbesondere bei den Dampfsystemen. Die Kanäle übernehmen den mechanischen Schutz und tragen konstruktionsbedingt zum Feuchtigkeitsschutz der Rohrleitungen bei. Gleichzeitig werden dadurch günstige Bedingungen für die Wärmedämmung geschaffen sowie die Korrosion an Rohrleitung und Lager weitestgehend verhindert. Für Gebiete mit hohem Grundwasserstand müssen dann Kanalformen verwendet werden, die wasserdicht sind. Die Dichtungsfugen müssen dann so ausgebildet sein, daß keine Feuchtigkeit eindringen kann. Das dazu erforderliche und entscheidende Kriterium bildet die ordnungsgemäße Verlegung der Kanäle. Betonkanäle werden im allgemeinen über Schächte belüftet.

Im Anschluß werden folgende Schwerpunkte näher behandelt:

- Kanalformen,
- Rohrleitungen und deren Zubehörteile,
- Dehnungsausgleicher,

- Rohrhalterungen sowie
- Wärmedämmungen.

Kanalformen. Kanäle werden nicht begehrbar oder begehrbar und als sogenannte Sammelkanäle ausgeführt. Bei den *nicht begehrbaren Kanälen* sind bewährte und gebräuchliche Formen:

- der Haubenkanal,
- der U-Kanal bzw. Trog und
- die Sonderkonstruktionen.

Der *Haubenkanal* besteht aus einer Ort beton- oder Fertigbetonsohle und einer vorgefertigten Abdeckhaube. Dieser Kanal wird in DIN 18178 behandelt. Dabei wird unterschieden zwischen dem Kanal mit Halbkreishaube und dem mit Rechteckhaube (Abb. 2.2-45a und 2.2-45b). Entsprechende Maße sind auch in (AGFW 1993a) zu finden.

Aus der Form der Halbkreishaube ergibt sich ein günstiges statisches Tragsystem, bei dem die äußeren Kräfte größtenteils als Normalkräfte in den Baugrund abgeleitet werden. Dadurch kann die Haube geringer bewehrt werden, wobei diesem Kostenvorteil der Nachteil des größeren Raumbedarfs gegenüber steht. Des weiteren eignen sich diese Form von Haubenkanälen mit ihren konstruktivbedingten Fugen nicht für Böden, in denen Wasser ansteht.

In den neuen Bundesländern kamen Haubenkanalkonstruktionen zum Einsatz, die von der DIN 18178 abwichen. In der folgenden Tabelle 2.2-8 werden die entsprechenden Kanalprofile aufgezeigt.

Der *U-Kanal*, auch als Trogkanal bezeichnet, wird konstruktiv so ausgeführt, wie Abb. 2.2-45c zeigt. Das Kanalelement wird entweder vor Ort oder als Fertigbauteil aus Stahlbeton hergestellt, wobei die Abdeckung mittels Stahlbetonfertiglatten erfolgt. Hinsichtlich einer besseren Ableitung von Oberflächenwasser kann die Abdeckung ein geringes Quergefälle erhalten. U-Kanäle kommen insbesondere in Gebieten mit Grundwasser zur Anwendung, wobei einerseits die Seitenwände über den höchsten Grundwasserstand reichen sollten, andererseits bei dessen Bemessung die Auftriebskraft des Grundwassers zu berücksichtigen ist. Laut (AGFW 1993a) liegen aber die Kosten über denen der anderen Kanalformen.

Unter den *Sonderkonstruktionen* ist zum einen der Doppel-Winkel-Kanal, welcher aus einem Unterwinkel und einem Oberwinkel besteht, zum anderen die Kombination von Trog mit Haube zu nennen. Doppel-Winkel-Kanäle sind bis etwa DN 400 ausgeführt worden (Abb. 2.2-45d).

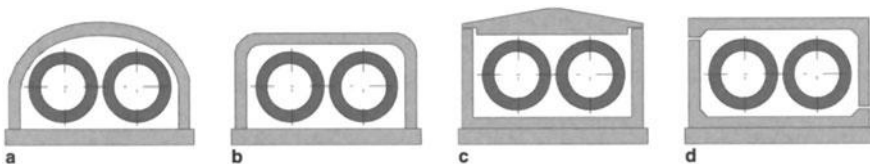


Abb. 2.2-45 Kanalformen

a Halbkreishaube, **b** Rechteckhaube, **c** U-Kanal, **d** Doppel-Winkel-Kanal

Tabelle 2.2-8 Zuordnung von Kanalprofilen und Rohrinnendurchmessern in den neuen Bundesländern nach (Munser 1980; Glück 1985)

Heizwasser mit erforderlicher Wärmedämmung			Dampfsystem			
Kanalprofil		Nenndurchmesser	Kanalprofil		Nenndurchmesser	
lichte Breite	lichte Höhe		lichte Breite	lichte Höhe	Dampf	Kondensat
[mm]	[mm]		[mm]	[mm]		
600	400	≤ 65	600	400	≤ 80	≤ 40
800	400	80/100	800	400	100	50
1000	500	150	800	500	150	65
1200	700	200/250	1000	700	200/250	65/80
1400	800	300	1400	800	300/350	100/150
1600	900	350/400	1400	1000	400/500	150
1800	1000	500	1600	1100	600	200
2000	1100	600	1800	1200	700	200
2400	1200	700	2000	1350	800	250

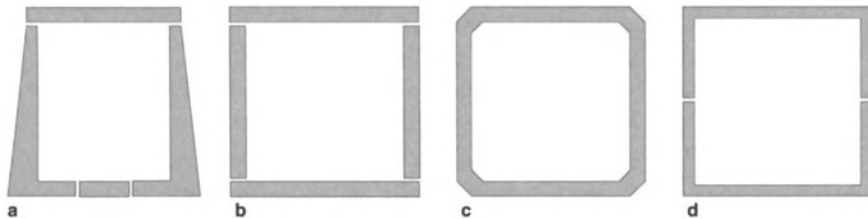


Abb. 2.2-46 Bauformen von Sammelkanälen (Munser 1980)
a L-Wände mit Boden- und Abdeckplatte, **b** Plattenkonstruktion, **c** geschlossener Rahmen, **d** Trog mit Haube

Begehbare Kanäle scheiden in den meisten Fällen wegen hoher Baukosten oder fehlenden Raumes in den öffentlichen Verkehrsraum aus. Trotzdem wurden einige solcher realisiert, insbesondere dann, wenn Rohrleitungen einer ständigen Überwachung unterzogen oder das Auswechseln der Rohrleitung ohne Freilegen bzw. Abdecken des Kanals ermöglicht werden sollte.

In bestimmten Anwendungsfällen wurde der begehbare Kanal in Form eines *Sammelkanals* ausgeführt, welcher neben den Heizrohrleitungen auch andere Versorgungsleitungen der Medien Wasser, Abwasser, Gas, Strom u. a. aufnahm. Die zur Ausführung gekommenen Bauformen zeigt Abb. 2.2-46. Die Abmaße (B × H) des Sammelkanals reichten von 1600 × 1800 mm bis zu 2400 × 2400 mm.

Rohrleitungen. Die im Verlegeverfahren Freileitung aufgezählten Rohrwerkstoffe sowie die zum Einsatz kommenden Rohrleitungszubehöerteile werden auch bei diesem Verlegeverfahren verwendet. Gewisse Einschränkungen bestehen dabei bei der Anwendung von Rohrleitungszubehöerteilen in nicht begehbaren Kanälen. Flanschverbindungen werden wegen der Unzugänglichkeit im Instandsetzungsfall nicht realisiert. Für alle anderen Rohrleitungszubehöerteile wird speziell verwiesen auf Abschn. 2.2.4.2.

Dehnungsausgleicher. Ebenso wie bei dem Verlegeverfahren Freileitung spielt bei diesem Verlegeverfahren die Wärmedehnung infolge Temperaturänderungen eine wichtige Rolle. Während bei begehbaren Kanälen und Sammelkanälen hinsichtlich der Beherrschung der Wärmedehnung vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten gegeben sind, wird dies bei nicht begehbaren Kanälen bereits problematischer. Bei entsprechender Ausladung des U-Bogen-Dehnungsausgleicher wird zusätzlich Raum bei der Trassenverlegung benötigt. Dem Nachteil der dadurch bedingt erhöhten Baukosten steht der Vorteil der Realisierung in einem nicht begehbaren Kanal gegenüber, gegeben durch die Wartungsfreiheit des Dehnungsausgleicher. Gleiches trifft auch für die Realisierung von Z- und L-Bögen zu, wobei diese Verwendung als Dehnungsausgleicher eher selten anzutreffen ist, es sei denn, daß andere Versorgungsleitungen im Trassenbereich dies erzwingen.

Bei großen Nenndurchmessern nehmen U-Bögen beachtliche Dimensionen ein und lassen sich dadurch im öffentlichen Verkehrsraum nicht oder nur erschwert realisieren. Bedingt durch diese Restriktion kommt es zum Einsatz der im Abschn. 2.2.4.2 bereits beschriebenen Kompensatoren. Da diese in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden müssen, ist es nicht sinnvoll, sie in nicht begehbare Kanäle zu verlegen. Somit macht sich ein begehbare Bauwerk erforderlich.

Ausnahmen bilden der Einsatz von erdverlegten Kompensatoren, die direkt in die Erde oder in diesem Anwendungsfall in den nicht begehbaren Kanal verlegt werden können. Diese Kompensatoren sind wartungsfrei und müssen somit nicht kontrolliert werden.

Rohrhalterungen. Überwiegend werden bei Rohrleitungen in Kanälen die gleichen Konstruktionen verwendet wie bei Freileitungen. Die Gleitlager werden ebenfalls aus Normprofilen in Schweißkonstruktionen hergestellt. Als Auflager dienen Profilstähle, die auf der Kanalsole befestigt oder mit Überstand einbetoniert werden. Nicht selten wird bei entsprechender Betonqualität auch die Betonsole als Gleitauflage verwendet. Wegen der Unzugänglichkeit nimmt der dauerhafte Korrosionsschutz aller Stahlteile eine besondere Bedeutung ein.

Neben dem herkömmlichen Einsatz von Gleitlagern mit Rohrschellen, Stahlrohrbügeln oder Konstruktionen zum direkten Anschweißen, haben sich auch Rohrhalterungen, deren Gleitschuh aus wärmebeständigem und abriebfestem Kunststoff besteht, wie z. B. glasfaserverstärkten Polyamid und Polypropylen, bewährt. Diese Werkstoffe haben günstige Gleiteigenschaften (s. Tabelle 2.2-5) und bewirken außerdem die elektrische Trennung des Rohres vom Auflager. In (AGFW 1993a) wurde als Anwendungsgebiet DN 20–150 angegeben.

Zwangsgeführte Gleitlager werden erforderlich in unmittelbarer Nähe von Axialkompensatoren sowie an kleinen Richtungsänderungen. Gleichzeitig dienen Zwangsführungen zur Begrenzung der Knicklängen. Neben den in (AGFW 1993a) gezeigten Ausführungen kommen auch die in Abb. 2.2-47 dargestellten zur Anwendung, wobei die Auflagerunterteile vielfältig befestigt werden können.

Neben Gleitlagern werden auch Festpunkte benötigt, die die Reaktionskräfte aus der Lagerreibung, die Verstellkräfte der Kompensatoren und die Kräfte aus der elastischen Verformung des Rohres aufnehmen.

Einfache Festpunktstrukturen dienen zur Aufnahme kleiner und mittlerer Kräfte. Dabei wird ein Sattelblech mit dem Mediumrohr verschweißt und der

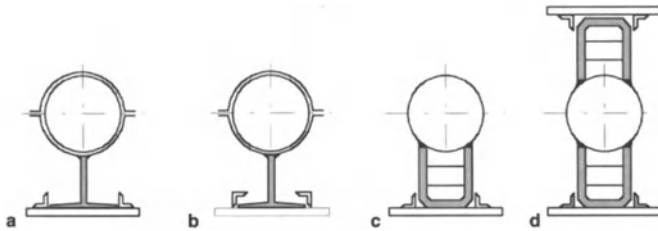


Abb. 2.2-47 Zwangsgeführte Gleitlager

a/c Gleitlager seitlich zwangsgeführt, **b/d** Gleitlager seitlich zwangsgeführt und gegen Abheben gesichert

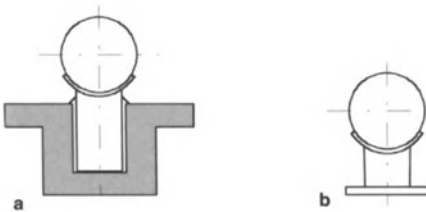


Abb. 2.2-48 Festpunkt in Rohrkonstruktion

a zum Einbetonieren, **b** zum Aufschweißen oder Verschrauben

Rohrstempel in einer Nennweite kleiner als das Mediumrohr ausgeführt. Die Dicke des Sattelbleches entspricht der Wanddicke des Mediumrohres (Abb. 2.2-48). Dagegen haben sich Konstruktionen aus Profilstahl bei größeren Kräften bewährt.

2.2.4.4

Verlegeverfahren Mantelrohr

2.2.4.4.1 Allgemeines. Die Mantelrohrverfahren lassen sich grundsätzlich unterteilen in

- Kunststoffmantelrohrsysteme,
- flexible Systeme,
- Stahlmantelrohrsysteme und
- Faserzementmantelrohrsysteme.

Letzteres Verlegeverfahren wird heute nicht mehr eingesetzt und soll somit nicht Gegenstand weiterer Erläuterungen sein. Im Bedarfsfall kann sich direkt an die AGFW gewendet werden.

Prinzipiell bestehen die Mantelrohrsysteme aus einem Mediumrohr, in den meisten Fällen aus Stahl, welches von einem Schutzrohr umgeben wird. Das Schutzrohr, bestehend bei Kunststoffmantelrohren aus Kunststoff bzw. bei Stahlmantelrohren aus Stahl mit Korrosionsschutz, verhindert als eine Art Feuchtigkeitsschutz die Korrosion des Mediumrohres und kann bei einigen Bauarten auch

Tragfunktionen gegenüber den Erdlasten übernehmen. Der Raum zwischen Medium- und Mantelrohr nimmt die Wärmedämmung auf.

Grundsätzlich kann gesagt werden, daß die ersten 3 genannten Mantelrohrsysteme unter den speziellen Gegebenheiten einer Verlegesituation eine kostengünstige Alternative zur Kanalverlegung darstellen, was sich in der laut Rohrnetzstatistik der AGFW bisher verlegten Verfahren widerspiegelt. Als Vorteile lassen sich niedrigere Tiefbaukosten durch einen geringeren Platzbedarf sowie eine kürzere Montagezeit nennen, gegeben durch die werkseitige Vorfertigung. Im folgendem werden die 3 Mantelrohrverfahren im einzelnen vorgestellt.

2.2.4.4.2 Kunststoffmantelrohrsysteme. Dieses Verlegeverfahren allumfassend zu beschreiben, würde den Rahmen dieses Buches sprengen. Dazu sei speziell auf die Abhandlungen (Randløv 1997) sowie (AGFW 1997a) verwiesen. Trotzdem einige grundsätzliche Bemerkungen.

Als Kunststoffmantelrohr werden im allgemeinen Rohrkonstruktionen bezeichnet, die aus einem Mediumrohr, einem Schutzrohr aus homogenem Kunststoff (PE-Polyethylen) und einer Wärmedämmung aus geschäumtem Kunststoff (PUR-Polyurethan) zusammengesetzt sind. Entsprechend der Betriebstemperatur und des Betriebsdruckes können bei dem Mediumrohr verschiedene Werkstoffe, wie

- Stahl,
- Stahl-weich,
- Edelstahl,
- Kupfer,
- Kunststoff u. a.

verwendet werden, wobei prinzipiell unterschieden wird in starre Kunststoffverbund-Mantelrohre, flexible Kunststoff-Mantelrohre und weitere Varianten, wie Gleitsysteme, Systeme mit innerem Freiraum oder Systeme mit anderen Wärmedämmmaterialien. Letztere befinden sich in einem Versuchsstadium und sind noch nicht verbreitet zum Einsatz gekommen. Zur Beschreibung der flexiblen Kunststoff-Mantelrohre wird auf Abschn. 2.2.4.4.3 verwiesen.

Bei dem starren Kunststoffverbund-Mantelrohr (KMR) sind das Stahl-Mediumrohr und das Mantelrohr über einen wärmedämmenden Hartschaum kraftschlüssig miteinander verbunden. An das KMR werden allgemeine Anforderungen gestellt. Neben den thermischen und mechanischen Belastungen aus dem Netzbetrieb sind auch weitere funktionelle Anforderungen nach (AGFW 1997a) zu erfüllen, wie

- Mindestlebensdauer ≥ 30 Jahre,
- Medientemperatur: Bei konstanter Fahrweise darf die Dauerbetriebstemperatur nur ≤ 120 °C betragen. Dagegen müssen bei gleitender Fahrweise in Abhängigkeit des Netzbetriebes Betriebstemperaturen bis zu 140 °C möglich sein; in bezug auf die zu erwartende Mindestlebensdauer darf eine äquivalente Dauerbetriebstemperatur von maximal 120 °C nicht überschritten werden,
- mechanische Anforderungen,
- Wasserdichtheit gegenüber Oberflächen- und Grundwasser,
- hohe Widerstandsfähigkeit gegen Temperatur- und UV-Strahlungseinflüsse während Lagerung und Einbau,

- gute Wärmedämmeigenschaften,
- Einbaumöglichkeit eines integrierten elektrischen Überwachungs- und Fehlerortungssystems,
- Erweiterungs- und Rückbaumöglichkeiten ohne Beeinträchtigung der Funktion des vorhandenen Rohrsystems.

Die Funktion des KMR ist in (AGFW 1997a) ausführlich beschrieben:

Das KMR kann im Erdreich bestimmte Verschiebungen erfahren, die durch die Erwärmung oder Abkühlung des Mediums verursacht werden. Dabei bewegen sich das Medium- und das Mantelrohr infolge des starren Verbundes stets als Einheit. Ein Teil der äußeren Kräfte, zum Beispiel aus Erd- und Verkehrslasten, trägt das Mantelrohr und der Rest wird von PUR-Hartschaumstoff auf das Mediumrohr übertragen und von diesem aufgenommen.

Im verfüllten Zustand wird die Längenänderung des KMR erschwert, da jede axiale Bewegung erhebliche Reibungskräfte zwischen Mantelrohr und Erdreich hervorruft. Von einem freiliegenden Rohrleitungsende aus betrachtet addieren sich die Reibungskräfte in Längsrichtung mit der Rohrleitung. Sie verringern die sich im Falle bei freier Bewegungsmöglichkeit ergebenden Rohrbewegungen und können bei langen Leitungsabschnitten so groß werden, daß die Bewegungen im mittleren Teil völlig unterdrückt werden. Dieser festliegende Rohrleitungsabschnitt wird Haftbereich genannt und bildet den sogenannten natürlichen Festpunkt NFP. Bei Rohren ohne Haftbereich und konstanter Überdeckung ist der Mittelpunkt der NFP.

Im Gleitbereich, also im Bereich, in dem eine Bewegung des Rohres stattfindet, ergeben sich Reibungskräfte, die sich mit zunehmender Rohrlänge addieren. Am natürlichen Festpunkt bildet sich ein Gleichgewicht zwischen der Reibungskraftsumme und der Axialkraft der vollständig behinderten Wärmedehnung. Als Folge der behinderten Bewegung treten im Stahlrohr Druckspannungen auf. Bei Rohrleitungen bis etwa DN 400 ist die sogenannte Kaltverlegung, d. h. eine Überschreitung der Streckgrenze um etwa 50 % zulässig. Beim Überschreiten dieser Durchmesser tritt laut (AGFW 1997a) – stress ratchating – auf. Darunter ist ein schrittweises Anwachsen der plastischen Dehnungen und frühzeitige Ermüdung zu verstehen. Damit sich also kein Haftbereich bildet, müssen die Leitungslängen zwischen den Kompensationsstellen entsprechend kurz gehalten werden. Die einzelnen Verlegemethoden und damit Beherrschung der auftretenden Spannungen werden im Unterabschnitt Dehnungsausgleich näher beschrieben.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf derartige Verbundrohre. Schwerpunkte bilden:

- Rohrleitungen und Zubehörteile einschließlich des Mantelrohres,
- Muffen,
- Dehnungsausgleich,
- Wärmedämmungen sowie
- Überwachungssysteme.

Rohrleitungen. Im unteren und mittleren Nennweitenbereich werden nahtlose und längstnahtgeschweißte Stahlrohre eingesetzt. Dagegen kommen bei größeren Nenndurchmessern auch spiralnahtgeschweißte Stahlrohre zur Anwendung. Die Standardlieferrängen der geraden KMR betragen nennweitenabhängig 6, 12 und 16 m. Die Verbindungen der einzelnen Mantelrohrängen und Zubehörteile wer-

den mit Muffen hergestellt, deren nähere Beschreibung im nächsten Unterabschnitt erfolgt. Den typischen Aufbau des KMR und einer Muffenverbindung zeigt Abb. 2.2-49.

Bei den allgemeinen Anforderungen an genormte Komponenten müssen diese den allgemeinen Werkstoffanforderungen nach DIN EN 253, 448, 488 und 489 entsprechen. Beim Einsatz von nicht genormten Komponenten müssen die Anforderungen an Werkstoffeigenschaften, Festigkeit und Haltbarkeit auf der Grundlage relevanter Normen nachgewiesen werden. Ist dies nicht ohne weiteres möglich, so muß auf andere Weise nachgewiesen werden, daß Eigenschaften und Netzauslegung während der genannten technischen Lebensdauer des Netzes die gegebenen Anforderungen erfüllen, d. h. nicht genormte Komponenten sollten gleichrangig mit genormten Komponenten behandelt werden.

Als Rohrwerkstoff wird in den meisten Fällen St37, aber auch St52 verwendet. Neben den Bezeichnungen der Stahlklassen nach DIN 1626 werden oft auch die von ISO 9330-1 angewendet. Dabei entsprechen TW 360 etwa St37.0 und TW 500 etwa St52.0. Die Stahlklasse TW 320 darf bei Nenndurchmessern über 100 mm nicht zur Anwendung kommen (AGFW 1997a).

Hinsichtlich der Wanddicke können folgende Aussagen gemacht werden. Die in DIN EN 253 genannten Wanddicken der verwendeten Stahlrohre basieren auf jahrelangen Erfahrungen und wägen Materialverbrauch gegen Preis ab. Die genormten Wanddicken sind mehr als ausreichend, um dem normalen Betriebsdruck zu widerstehen. Die temperaturbedingten Spannungen sind meistens unabhängig von der Wanddicke. Entscheidend dabei aber ist, daß der Einsatz einer erhöhten Wanddicke deshalb nicht die Spannungen mindert, sondern die axialen Kräfte und Verformungen in der Dehnungszone steigert. Ausnahmen bilden dabei große Rohrdurchmesser mit hohem Druck, großen Ovalisierungsspannungen, verursacht durch Erddruck und/oder Verkehrslast sowie Risiko der Instabilität durch Auftreten von Vakuum (Randløv 1997).

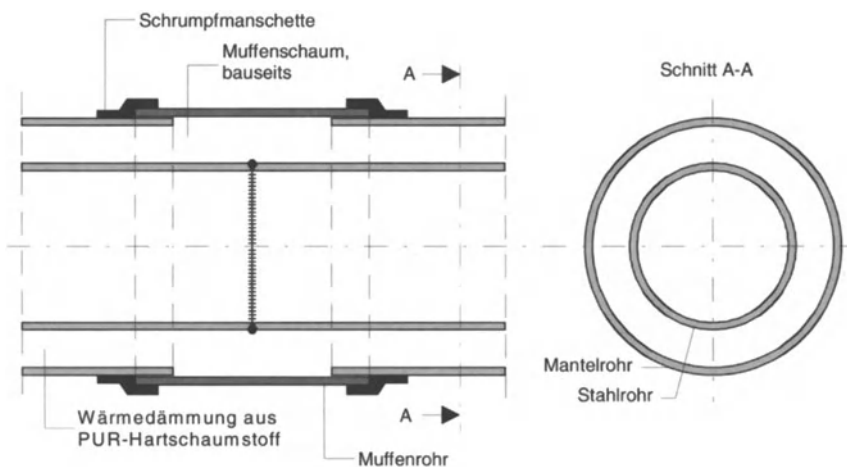


Abb. 2.2-49 Aufbau des KMR und einer Muffenverbindung

Tabelle 2.2-9 Maße für Stahlmedium- und Mantelrohre

Nenn- durchmesser	Mediumrohr Außen- durchmesser	Mindest-Nenn- wanddicke nach DIN EN 253	Standard- Nennwanddicke	Mantelrohr Außen- durchmesser
DN	d _a [mm]	t [mm]	t [mm]	D _A [mm]
20	26,9	2,0	3,2 (2,6)	75
25	33,7	2,3	3,2 (2,6)	90
32	42,4	2,6	3,2	110
40	48,3	2,6	3,2	110
50	60,3	2,9	3,2	125
65	76,1	2,9	3,2	140
80	88,9	3,2		160
100	114,3	3,6		200
125	139,7	3,6		225
150	168,3	4,0		250
200	219,1	4,5		315
250	273,0	5,0		400
300	323,0	5,6		450
350	355,6	5,6		500
400	406,4	6,3		560
450	457,0	6,3		630
500	508,0	6,3		710
600	610,0	7,1		800
700	711,0	7,1		900
800	813,0	8,0		1000
900	914,0	10,0		—
1000	1016,0	10,0		—
1200	1220,0	12,5		—

Die Tabelle 2.2-9 enthält die Maße für die Stahlmedium- und Mantelrohre in Abhängigkeit des Nenndurchmessers. Die Standard-Nennwanddicke muß den Festlegungen in DIN ISO 4200 entsprechen. Ab DN 700 ist aufgrund von erhöhten Umfangsspannungen und der durch Erddruck oder Verkehrslast verursachten Spannungen in manchen Fälle eine größere Wanddicke erforderlich.

Die Aufgabe des Mantelrohres ist es, das PUR-Hartschaumstoff-umhüllte Mediumrohr vor Grundwasser, Feuchtigkeit und mechanischer Beschädigung zu schützen. Das Mantelrohr muß den mechanischen Beanspruchungen beim Transport, der Lagerung und der Verlegung im Rohrgraben bei allen Verarbeitungstemperaturen sowie den im Netzbetrieb auftretenden thermischen und mechanischen Belastungen standhalten. Dazu zählt auch die hohe Widerstandsfähigkeit gegen Temperatur- und UV-Strahlungseinflüsse.

Bezüglich der Werkstoffeigenschaften sind die Anforderungen nach DIN EN 253 zu erfüllen. Dabei sind nur solche diskontinuierlich hergestellte Mantelrohre zu verwenden, deren Nenn-Außendurchmesser und Mindest-Wanddicke vor dem Verschäumen den Anforderungen der Tabelle 2.2-10 entspricht. Aufextrudierte bzw. aufgewickelte PE-Mantelrohre bei der kontinuierlichen Herstellung

Tabelle 2.2-10 Maße von Mantelrohren

Außen- durchmesser [mm]	diskontinuierlich hergestellt		kontinuierlich hergestellt
	Mindest-Wanddicke Rohre [mm]	Formstücke und Erdarmaturen [mm]	Mindest-Wanddicke Rohre [mm]
75	3,0	3,0	2,5
90	3,0	3,0	2,5
110	3,0	3,0	2,5
125	3,0	3,0	2,5
140	3,0	3,0	3,0
160	3,0	3,0	3,0
180	3,0	3,0	3,0
200	3,2	3,2	3,2
225		3,5	3,5
250		3,9	3,9
280		4,4	4,1
315		4,9	4,4
355		5,6	
400		6,3	5,0
450		7,0	5,4
500		7,8	5,8
560		8,8	6,2
630		9,8	6,7
710		11,1	7,3
800		12,5	8,0

von KMR müssen nach dem Verschäumen die Anforderung der Mindest-Wanddicke und den Grenzabweichungen nach (AGFW 1999a) erfüllen.

Es werden aber auch kontinuierliche Mantelrohre bis DN 250 mit Wanddicken, die der DIN EN 253 entsprechen, jedoch Minimum 2,5 mm, hergestellt und eingesetzt. Größere Nenndurchmesser werden mit Wanddicken hergestellt, die im Verhältnis zur DIN EN 253 reduziert sind.

Gegenüber den Verlegeverfahren Freileitung und Kanal kommen bei diesem Verlegeverfahren wesentlich weniger Zubehörteile zum Einsatz. Dazu zählen Verbund-Formstücke, wie u. a. Bögen, T-Stücke, Reduzierungen und Festpunkte. Sie bestehen ebenfalls aus einem Stahl-Mediumrohr, einer Wärmedämmung aus PUR-Hartschaumstoff und dem Mantelrohr. Für die Verbund-Formstücke gilt die Vorschrift nach DIN EN 448. Es sollten hauptsächlich nur werkseitig hergestellte Verbund-Formstücke eingesetzt werden, da durch Standardisierung und optimale Arbeitsbedingungen eine hohe Fertigungsgüte erreicht werden kann.

Bei bauseitig hergestellten Verbund-Formstücken wird eine gleichmäßig gute Qualität nicht erzielt. Um auf Baustellen z. B. Bögen auch außerhalb der vorgefertigten Winkel mit PE-Mantel versehen zu können, werden vorgefertigte PE-Segmentbögen zur Anpassung verwendet. Der dadurch entstehende Längsschnitt in dem PE-Mantel kann durch Extrusionsschweißen wieder geschlossen werden.

Die Fertigteilbögen werden in gleich- und ungleichschenkligen Abmessungen hergestellt. Dabei kommen als Stahl-Rohrbogen sowohl kalt- als auch warmverformte Bögen zur Anwendung, unter Beachtung der DIN 2605. Der Krümmungs-

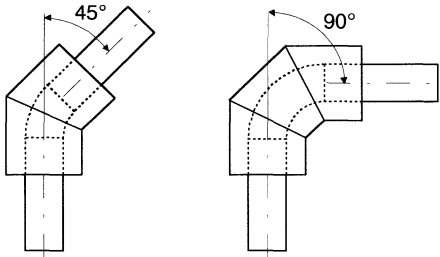


Abb. 2.2-50 Gleichschenklige Verbund-Rohrbögen mit 45° und 90°

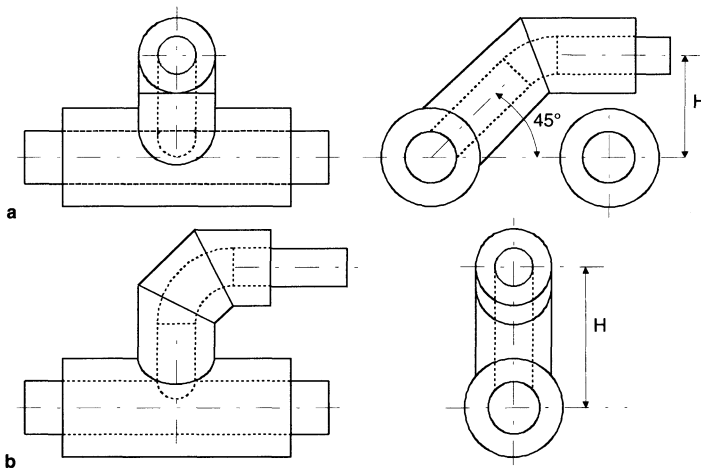


Abb. 2.2-51 T-Stücke

a mit abgewinkeltem 45 °-Abzweig, **b** mit parallelem Abzweig

radius muß mindestens $r = 1,5 d_a$ (Bauart 3) betragen. Weitere Anforderungen an die stumpfgeschweißten bzw. kaltverformten Bögen sind in (AGFW 1997a) zu finden. In manchen Fällen ist der Einsatz vom sogenannten Montagebogen mit beliebigem Bogenwinkel effektiver. In Abb. 2.2-50 sind gleichschenklige Verbund-Rohrbögen dargestellt.

Rohrabzweige von einer durchgehenden Leitung werden mittels T-Stücke realisiert. In den meisten Fällen sind die Durchmesserdimensionen der durchgehenden Leitung zur Abzweigleitung kleiner, selten gleich. Dabei kommen sowohl

- geschmiedete T-Stücke,
- T-Stücke mit Schweißsattel sowie
- geschweißte T-Stücke

zur Anwendung. Bei den geschmiedeten T-Stücken sind nur Formstücke nach DIN 2615 zu verwenden, welche durch Warmverformung hergestellt werden. Als

Schweißsattel wird ein stumpfgeschweißtes Formstück bezeichnet, wo ein entsprechender Sattelstutzen mit Abmessungen nach DIN 2618 in das Hauptrohr eingeschweißt wird. Geschweißte T-Stücke werden entweder durch Anschweißen eines Abzweiges an ein ausgehalstes Rohr oder durch Anschweißen des Abzweigs mit oder ohne Schweißsattel an das Hauptrohr hergestellt. Entsprechende T-Stücke mit abgewinkeltem 45° -Abzweig und parallelem Abzweig sind in Abb. 2.2-51 dargestellt.

Reduzierstücke gleichen unterschiedliche Durchmesserdimensionen der Stahl-Mediumrohre aus. Die Stahlreduzierstücke haben der ISO 3419 zu entsprechen und kommen als konzentrische bzw. exzentrische Ausführung zur Anwendung.

Festpunkte in KMR-Netzen sollten vermieden werden (AGFW 1997a). Dabei sind Festpunktkonstruktionen in Form eines Stahl-Mediumrohres mit einer oder mehreren aufgeschweißten Versteifungsrippen auszubilden und entsprechend der statischen Erfordernisse zur Abstützung der Axialkräfte auszuführen. An die Stahlplatte sind Rohrstücke wasserdicht anzuschweißen, welche mit dem Mantelrohr durch Schrumpfabdichtungen abzudichten sind. Die Festpunktkonstruktion ist dabei thermisch und elektrisch getrennt (Abb. 2.2-52).

Um Trassenführungen optimal gestalten zu können, werden in manchen Fällen Bogenrohre eingesetzt. Für Bogenrohre gibt es keine produktspezifischen Normen. Sie werden aus geraden Verbundrohren gebogen. Nenndurchmesser kleiner DN 100 sind zweckmäßigerweise mit Baustellenbiegevorrichtungen vor Ort zu biegen. Ein werkseitig hergestelltes Bogenrohr zeigt Abb. 2.2-53 mit Angabe der Mindestradien und -winkel bei 12 m Stangenlänge. Die Mindestradien gelten für Stahl-Mediumrohr mit Normalwanddicke unter Berücksichtigung

- der zulässigen Schaumpressung,
- der zulässigen Längenspannungen im Stahl sowie
- der aus Fertigungsgründen ungebogenen Rohrenden.

Zu den weiteren Zubehörteilen des Mantelrohres zählen Reduziermuffen, welche auch im Bereich von Durchmesseränderungen der Mediumrohre und somit auch der Mantelrohre zur Anwendung kommen. Diese sind als Mantelkonstruktionen hergestellt. Es können aber auch die beschriebenen Reduzierstücke verwendet werden. Gleichzeitig ist zu beachten, daß zur Aufnahme der Axialbewegungen Dehnpolster um die Reduziermuffe angeordnet werden müssen.

Für Übergänge in Schächten und Kellerräumen können Endabschottungen zum Einsatz kommen. Sie bestehen aus einem schrumpffähigen Material und werden wie eine Schrumpfabdichtung verarbeitet (s. Abb. 2.2-54). Dabei werden Endabschottungen sowohl in ungeteilter als auch geteilter Ausführung angeboten.

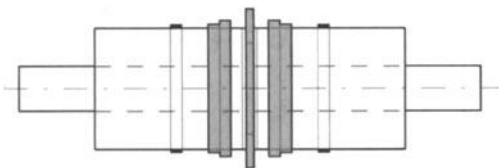


Abb. 2.2-52 Festpunktkonstruktion

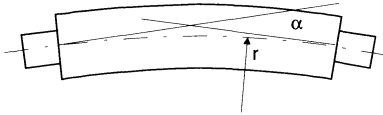


Abb. 2.2-53 Werkseitig hergestelltes Bogenrohr

DN	Mindestradius r [m]	Gradzahl α [°]	DN	Mindestradius r [m]	Gradzahl α [°]
100	30	23	350	58	12
125	32	22	400	62	11
150	36	19	450	68	10
200	41	17	500	73	9
250	46	15	600	84	8
300	52	13			

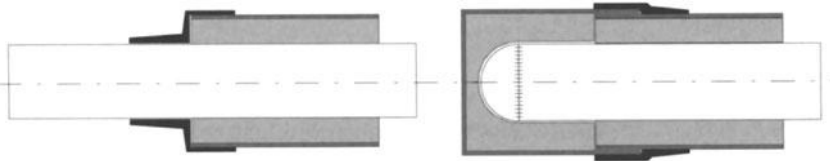


Abb. 2.2-54 Endabschottung bzw. Endmuffe mit Schrupfabdichtung

Wird in mehreren Bauabschnitten gebaut, so kann es erforderlich werden, momentan endende KMR-Leitungen mit Endmuffen zu schützen. Die Endkappe wird als Mantelrohrformstück ausgeführt, das mittels der üblichen Muffentechniken weiterverarbeitet wird (Abb. 2.2-54). Gleichzeitig ist zu beachten, daß kopfseitig Dehnpolster erforderlich werden, um somit die auftretenden Längenänderungen der Rohrleitung aufnehmen zu können.

Zu den Zubehörteilen gehören weiterhin auch Wanddurchführungen, welche in die Gebäudewand eingebaut werden. Sie haben zur Aufgabe, eine dauerhafte Abdichtung zwischen dem Mantelrohr und der Gebäudewand herzustellen. Gleichzeitig dürfen Bewegungen und Setzungen des Bauwerkes – aber auch der Fernwärmeleitung – nicht zu Funktionsbeeinträchtigungen führen. Dabei sollten starre Durchführungssysteme vermieden werden, da es meistens durch laterale Kräfte der Rohrleitung zu Undichtigkeiten an der Gebäudewand kommen kann. Je nach Art der Gebäudewand und deren Umgebungsbedingungen können aufgeschobene Dichtungsringe, elastische Gummibälge oder nachspannbare Dichtungssysteme verschiedener Hersteller eingesetzt werden (AGFW 1997a).

An dieser Stelle sei darauf verwiesen, daß die zu den Verbund-Mantelrohrsystemen dazugehörigen Einbauarmaturen speziell in dem gesonderten Abschn. Armaturen abgehandelt werden.

Muffen. Allgemein ist unter einer Rohrverbindung der Aufbau der Verbindung zwischen den angrenzenden Rohren und/oder Formstücken zu verstehen. Diese wird durch folgende Arbeitsgänge realisiert:

- Herstellen der Stahlmediumrohrverbindung,
- Montage des soweit vorhandenen Überwachungssystems,
- Abdichten des Muffenbereiches bzw. Verbinden der Mantelrohre und
- Dämmen des Muffenhohlraumes.

Von den Anforderungen her müssen Muffenverbindungen gegen das Eindringen von Feuchtigkeit von außen wasserdicht und gegen axiale Kräfte, die durch Bewegungen des Rohres im Erdreich hervorgerufen werden, sowie gegen äußere mechanische Beanspruchungen aus Erddruck und Verkehrslast widerstandsfähig sein. Sie sollten gleichartige Wärmedämmeigenschaften wie die KMR-Systembauteile aufweisen.

Muffenverbindungen können nach ihren konstruktiven Ausprägungen unterteilt werden in

- Überschiebmuffe,
- Einpaßmuffe,
- Schrumpfmuffe,
- Wickelmuffe und
- Schalenmuffe.

Die *Überschiebmuffe* besteht aus einem ungeteilten Muffenrohr vom Material PE-HD. Dabei ist der Innendurchmesser des Muffenrohres größer als der Außendurchmesser des Mantelrohres. Diese Differenz ist über den Rohrumfang durch geeignete Maßnahmen, z. B. extrudierte PE-Bänder, auszugleichen. Das Muffenrohr ist mittig mit ausreichendem Überstand zu fixieren. Die Abdichtung wird entweder durch eine Schrumpfabdichtung oder als PE-HD-Schweißung (extrusions- oder heizwendelgeschweißt) bzw. in Kombination ausgeführt.

Bei der Überschiebmuffe mit Schrumpfabdichtung, bezeichnet auch als Standardmuffe, wird zur Abdichtung am Übergang vom Muffen- zum Mantelrohr ein wärmeschrumpfendes Material eingesetzt (Abb. 2.2-55a). Diese Art der Muffenverbindung wird insbesondere bei kleineren Nenndurchmessern eingesetzt und ist nur bedingt kraftschlüssig. Bei der Überschiebmuffe mit extrusionsgeschweißter Kehlnaht (Abb. 2.2-55b) wird zur Fixierung und Zentrierung des Muffenrohres sowie zur Ausbildung einer einwandfreien Nahtwurzel ein zur Naht hin konkav gerundeter Profilring eingelegt. Bei der Überschiebmuffe mit eingelegten Heizgittern (Abb. 2.2-55c) wird das Heizleiterband erst am Schweißort in den Muffenstoß eingebracht und fixiert. Die Differenz zwischen Muffen- und Mantelrohr wird vor dem Schweißvorgang durch Warmformen angepaßt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die zum Schweißen notwendige Wärmeenergie durch Wärmeleitung von einem außen auf den Muffenrohrstoß aufgelegten und als Ringspannelement genutzten Heizband einzubringen. Dabei wird die vorhandene Differenz zwischen Muffen- und Mantelrohr beim Schweißvorgang im thermoplastischen Werkstoffzustand durch Anformen beseitigt.

Die *Einpaßmuffen* werden, da durchmessergleich, zwischen den Mantelrohren eingepaßt und bieten somit den auftretenden Axialkräften bei einer Verschiebung des KMR im Erdreich keinen Stirnwiderstand. Einpaßmuffen mit Mantelrohrschweißnaht sind kraftschlüssig (Abb. 2.2-55d).

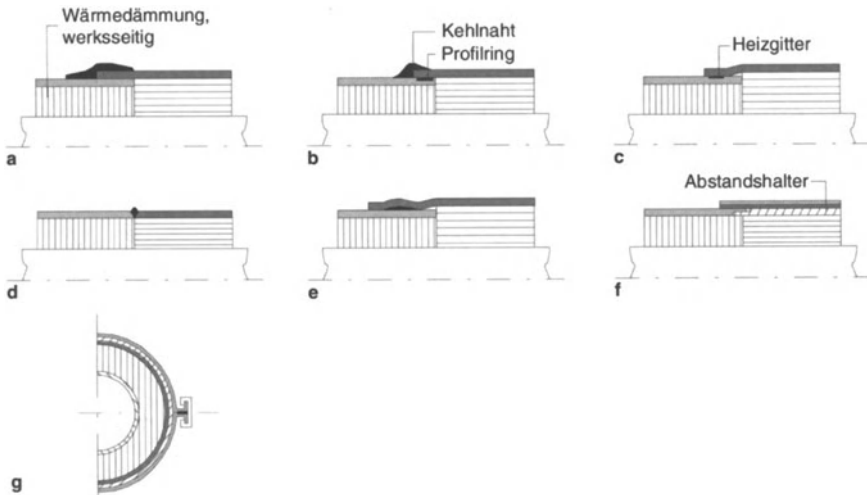


Abb. 2.2-55 Muffenarten

a Überschiebmuffe mit Schrumpfabdichtung, **b** Überschiebmuffe mit Kehlnahtschweißung, **c** Überschiebmuffe mit eingelegten Heizgittern, **d** Einpaßmuffe mit V-Naht, **e** Schrumpfmuffe, **f** Winkel- bzw. Bandmuffe mit eingeprägten elektrischen Heizleitern, **g** Stahlschalenmuffe

Das Muffenrohr wird längsgeschlitzt über das Mantelrohr gelegt, mit beidseitigen Sägeschnitten eingepaßt und die Stoßanschrägung vorgenommen. Danach erfolgt das Schweißen der Rundnähte und anschließend der Längsnaht.

Die aufgeweitete *Schrumpfmuffe* wird durch Temperatureinwirkung auf das Mantelrohr geschrumpft (Abb. 2.2-55e). Sie wird sowohl aus vernetztem als auch aus unvernetztem Material angeboten, während eine zusätzliche Abdichtung mittels eines eingelegten Dichtbandes möglich ist. Dabei sollten Schrumpfmuffen aus unvernetztem PE-HD zusätzlich mit einer Schrumpfmanschette abgedichtet werden. Es sind vernetzte Schrumpfmuffen wegen höherer Schrumpfspannung auf Dauer vorteilhafter. Schrumpfmuffen sind bedingt kraftschlüssig.

Bei der *Wickelmuffe* wird das Muffenrohr aus einem werkseitig mit Heizleitern versehenen Muffenrohr/-platte gebildet (Abb. 2.2-55f) und mit flächiger Schweißverbindung kraftschlüssig. Für die Längsnaht wird ein Stützelement eingebaut, das Muffenrohr/-platte um die beiden Mantelrohrenden gelegt und mit äußeren Spannringen befestigt. Die Spannringe dienen gleichzeitig bei der elektrischen Erwärmung zur Aufbringung der Preßkräfte, die zur Schweißung erforderlich sind. Die Umfangs- und Längsnahte werden im Überlappstoß geschweißt.

Eine weitere Muffenverbindung stellt die *Schalenmuffe* dar. Sie wird durchmesserabhängig aus zwei oder mehreren Stahlschalen zusammengesetzt. Die einzelnen Segmente werden mittels Schraub- oder Klemmverbindungen verspannt. Die Stahlschalenmuffen sind bedingt kraftschlüssig (Abb. 2.2-55g).

Abschließend noch einige Ausführungen zu Schrumpfabdichtungen. Schrumpfabdichtungen sind meist zweilagig aufgebaut. Während die äußere Lage ein molekular vernetztes, wärmeschrumpfendes Trägermaterial auf modifizierten Polye-

thylen ist, besteht die innere Lage aus einem wärmeaktiven Abdichtungsschmelzkleber. Für höher belastungsfähige Abdichtungen wird entsprechend ein harter/starrer Abdichtungsschmelzkleber verwendet. Der Schmelzkleber wird über außen eingebrachte Wärme verflüssigt. Die Schrumpfmateriale werden in folgenden Ausführungen angeboten:

- Schrumpfschlauch (geschlossen),
- Schrumpfmanschette,
- Schrumpfmuffe und
- Endabschottung.

Dehnungsausgleich. Für den Dehnungsausgleich werden zur Aufnahme thermisch bedingter Längenänderungen entsprechende Dehnungselemente benötigt. Ebenso besteht eine weitere Möglichkeit in der geplanten plastischen Verformung der Mediumrohrbauteile im Rahmen der unkompensierten Verlegung. Die Verlegemethoden für Verbundrohre lassen sich somit unterteilen nach:

- Kaltverlegung,
- Vorwärmung,
- spezielle Vorspannungsverfahren (z. B. Einwegkompensatoren) sowie
- Verwendung von Dehnungsbögen oder Kompensatoren.

Die einzelnen Verlegemethoden sind detailliert in (Randløv 1997) beschrieben. Die entsprechenden Vor- und Nachteile werden in der Tabelle 2.2-11 zusammengefaßt aufgezeigt.

Unter *Kaltverlegung* wird die Errichtung beliebig langer Trassenabschnitte ohne jegliche Kompensationsmaßnahme verstanden. Bei der Erstinbetriebnahme wird der Rohrwerkstoff durch Behinderung der thermischen Ausdehnung plastisch gestaucht. Durch dieses einmalige Überschreiten der Streckgrenze wird die Vorspannung der Rohrleitung erreicht. Bei allen weiteren Betriebsvorgängen bleibt der Rohrwerkstoff im elastischen Bereich.

Die am häufigsten praktizierte Verlegemethode ist die *Vorwärmung*. Als Wärmedium für die Vorwärmung kann Heizwasser, was aber durch seine große Wärmeträgheit nachteilig sein kann, oder Dampf zur Anwendung kommen. Gut bewährt hat sich auch die elektrothermische Vorspannung bei kleineren bis mittleren Nenndurchmessern. Die thermische Vorspannung mittels verschiedener Wärmedien ist in (AGFW 1997a) im Detail beschrieben.

Oftmals kann bei einer Verlegung im öffentlichen Verkehrsraum der Rohrgraben nicht so lange über größere Strecken geöffnet bleiben, so daß dann der *Vorspannung* mit Einmalkompensatoren der Vorzug zu geben ist. Die Trasse kann mit Ausnahme der Einmalkompensatoren sofort verfüllt werden. Die Inbetriebnahme der Leitung selbst kann zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Nach Erreichen der vorberechneten Relativverschiebungen werden die Einmalkompensatoren verschweißt. Im Betriebszustand können durch die tatsächlich auftretenden Reibungskräfte Axialspannungen auftreten, die im Extremfall die Größenordnung der Kaltverlegung erreichen.

Tabelle 2.2-11 Vor- und Nachteile der einzelnen Verlegemethoden

Verlegungsmethode	Vorteile	Nachteile
Kaltverlegung	– einfachste Verlegungsmethode – keine Vorwärmung erforderlich – keine Kosten für zusätzliche Dehnungsmöglichkeiten – lange Haftbereiche	– große Axialspannungen – große erstmalige Ausdehnung – keine Anwendung bei großen Nenndurchmessern mit hohen Temperaturen – Gefahrenpotential bei Parallel-aufgrabungen
Vorwärmung	– einfache Verlegung – Vorwärmung kann vor Verfüllen des Rohrgrabens stattfinden – Vermeidung der großen erstmaligen Ausdehnung wie bei Kaltverlegung – keine Kosten für zusätzliche Dehnungsmöglichkeiten – reduzierte Axialspannungen in den Haftbereichen – geeignet für größere Nenndurchmesser mit hohen Temperaturen	– Rohrgraben muß während der Vorwärmung offen bleiben
spezielle Vorspannungsverfahren	– einfache Verlegung – lange Haftbereiche – Verfüllen des Rohrgrabens bis auf Kompensatorstellen möglich – reduzierte Axialspannungen in den Haftbereichen	– zusätzliche Kosten für Kompensatoren
Dehnungsbögen und Kompensatoren	– reduzierte Axialspannungen – kurze bzw. keine Haftbereiche	– zusätzliche Kosten für L-, Z-, U-Bögen oder Kompensatoren – höhere Kosten für Bau, Wärmeverlust und Pumpstrom, verursacht durch die L-, Z- oder U-Bögen

Niedrige Axialspannungen werden ebenfalls bei Einsatz von *Dehnungsbögen* (L-, Z- oder U-Bogen) oder alternativ mit werkseitig gedämmten Kompensatoren erreicht. Um eine Überbelastung durch ungleichmäßige Reibung zu verhindern, sollten werkseitig gedämmte Kompensatoren immer mit Anschlägen verwendet werden. Durch den möglichen Einbau von Festpunktstrukturen wird sichergestellt, daß die Dehnung an den Kompensatoren gut definiert ist. Eine Verlegung mit Dehnungsbögen oder Kompensatoren ist mit oder ohne Anwendung von Vorwärmung bzw. Vorspannung möglich.

Tendenziell geht die Entwicklung der Verlegungsmethoden in Richtung Kaltverlegung. Die Vorwärmung wird vor allem dort angewendet, wo die anfänglichen Bewegungen oder Druckspannungen im Haftbereich begrenzt werden müssen.

Für größere Rohrleitungen in schwach befahrenem Verkehrsraum oder sogar offener Landschaft kann die Vorwärmung die geeignetste Verlegungsmethode darstellen. In innerstädtischen, meist sehr frequentierten Verkehrsräumen, wo gleichzeitig die Straßen häufig die Richtung ändern, stellt die Verlegung mittels spezieller Vorspannungsverfahren die günstigere Lösung dar. Auch die aufgezeigten Nachteile bei der Verlegungsmethode mit Dehnungsbögen aus der Tabelle 2.2-11 sprechen eindeutig für die einfachere Kaltverlegung oder Verlegung mit Vorwärmung.

In den Dehnungszonen können Kaltverlegung und Vorspannung kombiniert werden. Vorteil dieser Kombination ist der geminderte Einfluß der großen erstmaligen Dehnungsbewegungen. Dies wird erreicht, indem bei der Einsandung der kalten Rohrstrecke die Dehnungszonen noch offen gelassen werden. Nach Erreichen der Hälfte der Betriebstemperatur erfolgt die Einsandung der Dehnungszonen. Hinsichtlich der Dehnungszonen unterscheiden sich die 4 Verlegungsmethoden nur wenig. In der Dehnungszone wird die Ausdehnung durch Verlegen der Rohre in Dehnpolstern oder in einem gleichmäßigen Sandbett ermöglicht. Dehnungszonen können auch durch Aufbau eines Hohlraumes geschaffen werden. Dies gilt insbesondere bei großen Rohrdurchmessern mit geringer Erdüberdeckung (Randløv 1997). Gelegentlich werden in den Dehnungszonen speziell verstärkte Bögen eingesetzt. Die auftretende Reaktion gegen die Ausdehnung kann in der Dehnungszone sehr groß werden, wobei diese selbst wiederum zur Minderung der Gesamtausdehnung der Rohrleitung beiträgt.

Die Dehnpolster sind eine einfache Möglichkeit, die durch die Temperaturdehnungen hervorgerufenen Längenänderungen des KMR aufzunehmen, ohne daß unzulässig hohe Spannungen in der Rohrleitung selbst auftreten. Somit stellen Dehnpolster eine besonders zu beachtende Komponente bei der Verlegung von KMR dar. Die verwendeten Materialien der Dehnpolster müssen folgenden Anforderungen genügen:

- ausreichende Elastizität und Stabilität während der gesamten Lebensdauer,
- genügendes Rückstellverhalten bei entsprechender Steifigkeit (weich bis steif),
- ausreichende Wärmeleitfähigkeit, um eine maximale Mantelrohrtemperatur von 60 °C nicht zu überschreiten,
- genügende Druckfestigkeit gegen äußere Lasteinwirkungen (unter seitlichem aktiven Erddruck sollte sich das Dehnungspolster nicht mehr als 10 % zusammendrücken),
- ausreichende Sicherheit gegen unzulässige Verfestigung durch Verschlämmung oder Sandpenetration,
- Unverrottbarkeit sowie
- Nagetiersicherheit.

Der Aufbau der Dehnpolster kann sowohl ein- als auch mehrschichtig sein und mit einer harten Umhüllung (z. B. PE-Folie) gegen äußere Einwirkungen geschützt sein. Für die Dehnpolster direkt werden PE- und PUR-Schäume verschiedener Steifigkeiten eingesetzt. Die Anordnung um das Mantelrohr kann als Dehnpolster-Streifen, ovalförmige Teilumhüllung oder Vollumhüllung realisiert werden.

Wärmedämmung. Die Wärmedämmung übernimmt die Funktion der Reduzierung des Wärmeverlustes sowie der Übertragung äußerer Belastungen (Erd- und Verkehrslasten) vom Mantelrohr auf das Mediumrohr bzw. der Schub- und Druckkräfte vom Mediumrohr auf das Mantelrohr. Bei der Wahl der Dämmdicke können Betriebswirtschaftlichkeit und technische Verhältnisse berücksichtigt werden, wie

- Rohrdurchmesser
- Temperaturniveau,
- Verlegekosten,
- Wärmebezugspreis für verlorene Wärme,
- Temperaturverlust zwischen Erzeuger und Abnehmer,
- geforderte Oberflächentemperatur sowie
- Nähe von anderen Versorgungsleitungen (z. B. Elektrokabel, Wasserleitungen).

Die Wärmedämmung muß den Anforderungen der DIN EN 253 entsprechen. Der dabei verwendete PUR-Hartschaum wird aus zwei Komponenten – Polyol und Isocyanat – hergestellt. Bei der chemischen Reaktion der beiden Komponenten entsteht Urethan und Wärme, wobei unter Zugabe geeigneter Treibmittel das Urethan zu Polyurethan (PUR-Hartschaum) aufgetrieben wird. Durch das Zugeben der Treib- und weiterer Zusatzmittel wird u. a. das Reaktionsverhalten, die Schaumbildung sowie dessen Eigenschaften beeinflusst. Die Kernrohddichte muß mindestens 60 kg/m^3 bzw. die Gesamtrohddichte mindestens 80 kg/m^3 betragen. Die Rohddichte allgemein ist über den Treibmittelanteil einflußbar, wobei unterschieden wird in physikalische und chemische Treibmittel.

Bei dem physikalischen Schäumvorgang kann die Wärmeleitfähigkeit des Schaumes gegenüber dem chemischen Schäumvorgang vermindert und insgesamt vergleichmäßigt werden, da das physikalische Treibmittel als Bestandteil in den Zellen des Schaumes verbleibt. Dabei kommen fast ausschließlich Pentane (n-, iso- und Cyclo-Pentan) zur Anwendung.

Dagegen werden bei chemischen Schäumvorgängen sogenannte CO_2 -Schaumsysteme angewendet. Unter Zugabe von Wasser entsteht bei der chemischen Reaktion mit dem Isocyanat neben der Wärme auch das zum Aufschäumen notwendige CO_2 -Gas. Als Nachteil gegenüber den physikalischen Treibmitteln ist die physikalisch bedingt höhere Wärmeleitfähigkeit des CO_2 -Schaumes zu nennen.

Das Zellgas in den geschlossenen Zellen des PUR-Hartschaumes ist für die Dämmeigenschaften maßgebend und muß eine gleichmäßige Zellstruktur ohne Schlieren und Blasen aufweisen. Dabei muß laut DIN EN 253 der Anteil geschlossener Zellen mindestens 88 % und die Durchschnittsgröße der Zellen in radialer Richtung kleiner 0,5 mm betragen.

Der Vernetzungsgrad des Urethans übt Einfluß auf die mechanischen und temperaturabhängigen Eigenschaften aus. Je höher also der Vernetzungsgrad des Schaumes ist, desto höher liegt dann auch dessen Erweichungsbereich. Um eine hohe Lebensdauer zu erreichen, sollte ein hoher Vernetzungsgrad einen Erweichungsbereich zur Folge haben, der deutlich über der Gebrauchstemperatur liegt. Die spezifischen Eigenschaften bezüglich der axialen und lateralen Druckfestigkeit, der Gesamtrohddichte sowie der Scherfestigkeit werden in (AGFW 1997a)

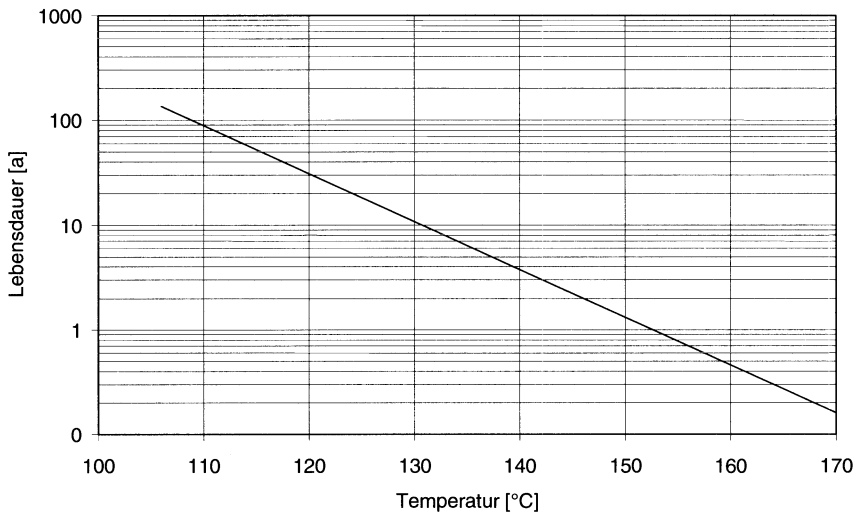


Abb. 2.2-56 Zusammenhang zwischen der erwarteten Lebensdauer bei Dauerbetriebstemperatur für die Mindestanforderungen nach DIN EN 253

ausführlich beschrieben. Der Abfall der mechanischen Eigenschaften des PUR-Hartschaumstoffes wird mittels der Bestimmung der thermischen Lebensdauer ermittelt. Dabei verursachen hohe und lang anhaltende Temperatureinwirkungen einen thermischen Abbau, der wiederum u. a. eine Festigkeitsminderung zur Folge hat.

Durchgeführte Untersuchungen bezüglich des Einflusses der Alterung des Schaumes auf die Scherfestigkeit haben gezeigt, daß eine Arrheniusgleichung, die eine Beziehung zwischen dem Logarithmus der erwarteten Lebensdauer eines Rohrsystems und dem Reziprodukt der absoluten Dauerbetriebstemperatur darstellt, herangezogen werden kann (s. Abb. 2.2-56). Die Neigung der Arrheniusgeraden beschreibt die Aktivierungsenergie bzw. die Temperaturempfindlichkeit des Materials, wobei in der DIN EN 253 von einer Aktivierungsenergie von 150 kJ/(mol K) ausgegangen wird. Diese unterstellte Aktivierungsenergie ist keine naturwissenschaftliche Konstante; sie ist abhängig von den Schaumeigenschaften und deren Herstellungsverfahren, wobei moderne Schaumsysteme deutlich über dem festgelegten Mindestwert von 150 kJ/(mol K) liegen (AGFW 1997a).

Des weiteren muß beachtet werden, daß sich mit steigender Nutzungsdauer die Wärmedämmeigenschaften vorwiegend infolge der Diffusion der Zellgase bzw. des Austausches mit Luft, aber auch der Alterung bzw. Versprödung des PUR-Hartschaumstoffes verschlechtern.

Eine eigens durchgeführte Umfrage der AGFW 1992 ergab die in Abb. 2.2-57 dargestellte Jahresdauerlinie der Vorlauftemperaturen bei gleitender Netzfahrweise, die für Deutschland als repräsentativ angesehen werden kann. Die Kurve (Abb. 2.2-57a) entspricht einer äquivalenten Dauerbetriebstemperatur von 106 °C

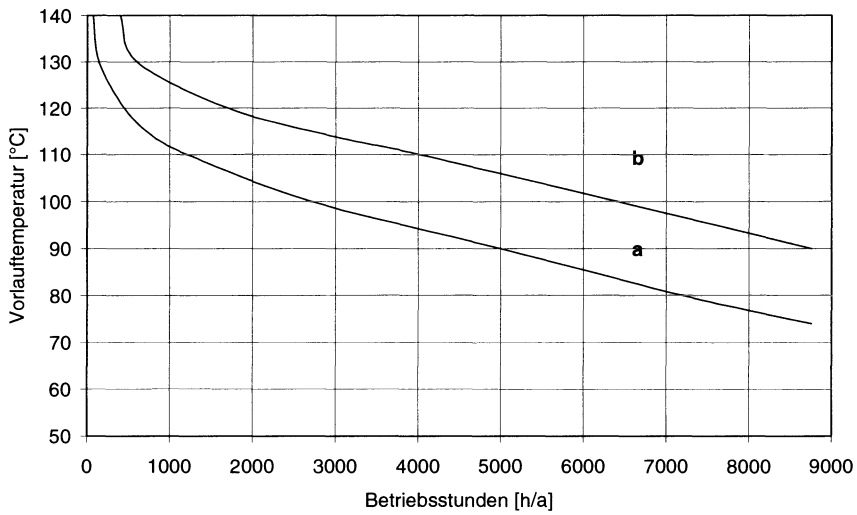


Abb. 2.2-57 Jahresdauerlinie der Vorlauftemperaturen in KMR-Netzen nach (AGFW 1997a)
a Jahresdauerlinie nach Umfrage AGFW 1992, **b** Beispiel für eine mögliche Jahresdauerlinie, die eine thermische Lebensdauer von 30 Jahren erwarten läßt

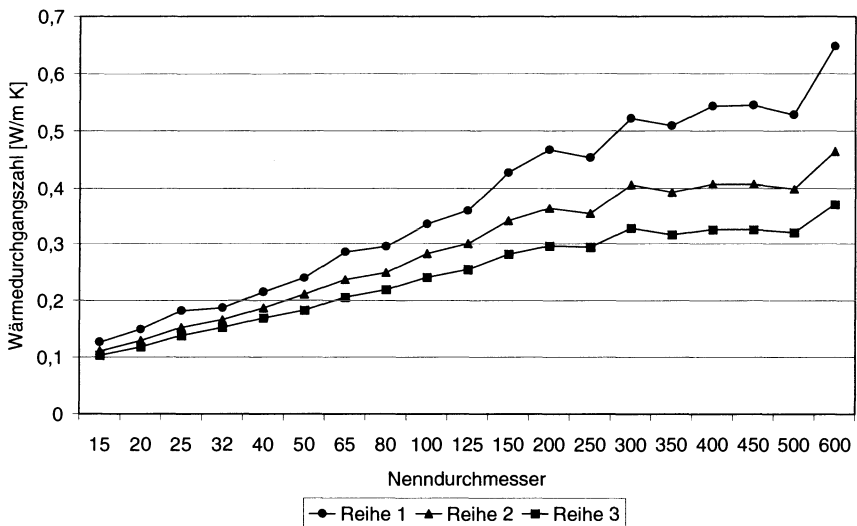


Abb. 2.2-58 Wärmedurchgangszahlen verschiedener KMR-Systeme (gültig für ein Einzelrohr, wobei der Wärmeaustausch zwischen Vor- und Rücklaufrohrleitung berücksichtigt wurde)

bezogen auf eine 30-jährige Nutzungsdauer. Unter Annahme der Aktivierungsenergie nach DIN EN 253 läßt sich anhand der formulierten Lebensdauergesetzmäßigkeiten eine thermische Lebensdauererwartung von 135 Jahren ermitteln. Seitens der AGFW wird empfohlen, eine über die Nutzungsdauer gesehene äquivalente Dauerbetriebstemperatur von 120 °C nicht zu überschreiten. Ansonsten kann dies zur Verkürzung der thermischen Lebensdauer führen. Es bestehen aber Möglichkeiten, in begrenzten Zeiträumen höhere Betriebstemperaturen zuzulassen, unter der Bedingung, daß die Betriebstemperaturen dafür im Rahmen der weiteren Nutzungsdauer auf einem entsprechend niedrigen Temperaturniveau liegen.

Hinsichtlich der Dämmdicken bieten die meisten Hersteller 3 Reihen an. Reihe 1 kommt überwiegend zur Anwendung, während in Abhängigkeit vom Energiepreis die Reihen 2 und 3, insbesondere bei kleineren und mittleren Nenndurchmessern, kosteneffektiver sein können. Die verschiedenen Wärmedurchgangszahlen sind in Abb. 2.2.58 über die Nenndurchmesser aufgetragen.

Überwachungssysteme. Sie werden durch Einbau von Meldeadern in den PUR-Hartschaum zwischen Medium- und Mantelrohr realisiert. Durch Änderung des elektrischen Isolationswiderstandes, z. B. Durchfeuchtungen der Wärmedämmung sowie äußere Beschädigungen, erfolgt die Anzeige sowie Lokalisierung. Somit stellen Überwachungssysteme ein wichtiges Hilfsmittel bei dem Betrieb von KMR-Netzen dar.

Dabei kann manuell/automatisch und zentral/dezentral überwacht werden. Manuell, meist somit auch dezentral, werden zur Überwachung von kleineren Leitungsabschnitten im Rahmen von betriebsmäßigen Routinekontrollen mit entsprechenden tragbaren Überwachungsgeräten überwacht. In den meisten Fällen geschieht dies aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus.

Mit der zentralen Überwachung werden das KMR-Netz oder einzelne Leitungsabschnitte kontinuierlich und automatisch überwacht. Diese Art von Überwachung gestattet u. a. je nach eingesetztem System und Erfordernissen

- eine einfache Meldung,
- eine automatische Fehlerortung,
- eine differenzierte Zustandsanzeige,
- eine variable Grenzwertvorgabe durch den Anwender und
- eine permanente Selbstüberwachung des Systems.

Die praktischen Erfahrungen haben gezeigt, daß eine kontinuierliche Überwachung mit zentraler Leckortung die Versorgungssicherheit eines KMR-Netzes erhöht und dadurch eine wirtschaftliche Beeinträchtigung durch Schäden klein gehalten wird (AGFW 1993a).

Überwachungssysteme haben den Vorteil, daß sie einen Schaden anzeigen, bevor die eingedrungene Feuchte ein solches Ausmaß annimmt, daß zum einen ein Risiko der Korrosion am Mediumrohr entsteht, zum anderen größere Streckenabschnitte Schaden nehmen. Wird Feuchtigkeit zu einem frühen Zeitpunkt entdeckt, können Zeit und beträchtliche Kosten eingespart werden.

An das Überwachungssystem werden allgemeine Anforderungen gestellt. Eine europäische Norm der verschiedenen Rohrhersteller ist z. Z. in Vorbereitung.

Grundsätzlich muß das Überwachungssystem über den jeweiligen Zustand des elektrischen Isolationswiderstandes der Wärmedämmung Auskunft geben können. Die Anzeigetoleranz bei der Leckortung soll nicht mehr als ± 2 m betragen. Es sind korrosionsbeständige und verrottungsfreie Materialien zu verwenden, die eine hohe Lebensdauer garantieren. Die einzuschäumenden Komponenten der Überwachungssysteme müssen für die mechanischen, thermischen und chemischen Bedingungen während der Herstellung, Montage und dem späteren Betrieb geeignet sein. Weiterhin sollte das Überwachungssystem prinzipiell unabhängig vom einzusetzenden KMR-Systemen sein. Dazu zählt auch die Möglichkeit der Erweiterung ohne besonderen Eingriff in das bestehende Überwachungssystem. Wegen der Beeinflussung ist bei nicht potentialfreien Messungen auf eventuell vorhandene Ausgleichsströme auf dem Mediumrohr zu achten. Auf entsprechende Vorschriften zum Potentialausgleich wird verwiesen.

Die Verfahren der Überwachungssysteme sind unterschiedlich. Die Überwachung auf der Grundlage von Gleichspannungsmessungen erfolgt nach dem Widerstands-Meßverfahren, wobei dabei der elektrische Isolationswiderstand zwischen 2 Meldeadern bzw. zwischen einer Meldeader und dem Mediumrohr gemessen wird. Bei Feuchteeinbruch oder bei Kurzschluß wird der elektrische Isolationswiderstand erniedrigt bzw. durch Abriß der Meldeader erhöht. Liegt beides vor, wird der elektrische Isolationswiderstand zwischen den theoretisch möglichen Maximal- und Minimalwerten liegen.

Bei einer Wechselspannungsmessung wird die Wellenwiderstandsänderung gemessen. Zur Fehlereinschätzung und -ortung werden 2 Meßverfahren angewendet (AGFW 1997a). Bei dem *Impuls-Laufzeit-Meßverfahren* erfolgt an einer Schadenstelle die teilweise oder vollständige Reflektierung des von einem Meßgerät ausgesandten Impulses, wobei dessen Laufzeit zur Ortung herangezogen wird. Bei diesem Meßverfahren wird der elektrische Widerstand mit zwei sich nicht berührenden und nicht isolierten Kupferadern gemessen, wobei beide Adern in bestimmtem gleichbleibenden Abstand zueinander und zum Mediumrohr eingeschäumt sind und somit als Sensoren in der gesamten Länge der Rohrleitung wirken. Dabei bestehen die beiden Adern aus blankem bzw. verzinnem Kupfer. Bei Rohrleitungsabzweigen wird eine Ader der Hauptleitung eingeschleift. Gemessen wird der Isolationswiderstand zwischen den Meldeadern und dem Mediumrohr, wobei diese Art von Messung nicht potentialfrei ist.

Eine andere Ausführungsart benutzt zwei isolierte und verdrehte Kupferadern. Als Sensoren fungieren sogenannte Indikatoren an den Schweißstellen. Die Indikatoren können z. B. aus zwei in Kunststoffgittern gehaltenen Kupferplättchen bestehen, die durch ein Keramikvlies gegeneinander isoliert sind. Durch Zutritt von Feuchtigkeit wird der Isolationswiderstand der Indikatoren herabgesetzt, was gleichzeitig als Überwachungsprinzip genutzt wird. Unter Verwendung beispielsweise einer perforierten Indikatorleitung ist es auch möglich, nicht nur die Muffenbereiche, sondern auch die gesamte Rohrleitung durchgängig zu überwachen. Abzweige werden in diesen aus maximal 4 Hierarchien bestehenden Systemen über sogenannte Trennweichen angeschlossen, wobei die Anzahl der Abzweige in den einzelnen Hierarchien frei wählbar ist.

Beide zuvor beschriebenen Überwachungssysteme nutzen zur Ortung eines Schadens das Impuls-Laufzeit-Meßverfahren.

Bei einem weiteren Überwachungssystem ist eine Ader durchgängig isoliert, die zweite Ader dagegen unisoliert, wobei beide verdreht sind. Als Sensoren werden in den Muffenbereichen sogenannte Ortungsschalter eingebaut. Der Kontakt zwischen den Meßdrähten wird bei Feuchteinbruch in der Wärmedämmung durch eine Quellscheibe im Ortungsschalter mechanisch ausgelöst.

Bei dem *Widerstands-Vergleichs-Meßverfahren* erfolgt die Ortung von Fehlern nach dem Prinzip des elektrisch unbelasteten Spannungsleiters. Aderabrissse werden dabei durch eine Impuls-Laufzeit-Messung und/oder eine Kapazitätsmessung lokalisiert. Bei diesem Meßverfahren wird eine Ader aus CrNi-Legierung mit einem Widerstandswert von $5,6 \Omega/\text{m}$ verwendet, der in kurzen Abständen mit einer Teflonisolation versehen ist. Dieser wirkt als Sensor über die gesamte Rohrleitungslänge. Gemessen wird der elektrische Widerstand zwischen den Fühlern und dem Mediumrohr, wobei die Messungen nicht potentialfrei sind. Gleichzeitig wird auch der Schleifendurchgang überprüft. Die Rückföhrader besteht aus Kupfer mit einer durchgehenden Teflonisolation. Durch den kontinuierlichen Schleifen-
aufbau durch alle Abzweige hindurch können alle Leitungsstellen lückenlos überwacht werden. Eine Ortung von Mehrfachfehlern in einem Meßkreis ist nicht möglich. Einzelheiten können in diesem Fall nur durch Auftrennen des Meßbereiches geortet werden.

Entsprechend detailliertere systemspezifische Informationen sind von den jeweiligen Systemanbietern zu entnehmen.

2.2.4.4.3 Flexible Kunststoff-Mantelrohrsysteme. Diese Systeme werden vorwiegend bei Fernwärme für Hausanschlüsse und kleinere Verteilungsleitungen eingesetzt. Die Rohre werden in DN 10–100 gefertigt. Grundsätzlich können flexible Systeme bezüglich der Werkstoffe entsprechend Betriebstemperatur und -druck nach Tabelle 2.2-12 ausgewählt werden.

Eine Unterteilung, wie im vorherigen Abschnitt hinsichtlich der einzelnen Komponenten, wird in diesem Fall nicht für sinnvoll gehalten, da diese Systeme zu artspezifisch in ihrer Herstellung, Verlegung und im Betrieb sind.

Eine Ausführung besteht aus einem geglöhnten nahtlosen Kupfermediumrohr nach DIN 1754. Darum liegt eine wärmedämmende Schicht aus komprimierter Glaswolle sowie ein gewelltes Mantelrohr aus Polyethylen (PE), was gleichzeitig die Funktionen des mechanischen Schutzes sowie des Feuchtigkeitsschutzes übernimmt. Die Wärmedämmung wird in zwei verschiedenen Dämmdicken eingesetzt.

Tabelle 2.2-12 Werkstoffauswahl des Mediumrohres entsprechend Betriebstemperatur und Betriebsdruck

Werkstoff	maximale Betriebstemperatur [°C]	maximaler Betriebsdruck [bar]
Stahl – weich	130–135	PN 16
Kupfer	130	PN 16
Edelstahl	140	PN 25
Kunststoff (PEX)	95	PN 6/10

Die Rohre sind biegsam und werden entweder als Rohrstangen oder als Ringbünde angeliefert. Die Standardlieferlängen sind bei den Einzelrohrsystemen nennweitenabhängig und werden in Rohrbünden zu 25 m Länge für DN 10–25, dagegen für DN 32–65 in 12 m und DN 80–100 in 9 m langen Stangen geliefert. Doppelrohrsysteme werden für DN 15–50 in 12 m langen Stangen geliefert. Die Längenänderungen dieses Ausführungssystems infolge Betriebstemperatur werden durch Verlegung in Form einer Sinuskurve kompensiert. Dabei werden bis DN 25 die Rohre ohne Hilfsmittel vor Ort in ihre sinusförmige Lage gebracht, während die größeren Nenndurchmesser bereits beim Hersteller in Sinusform gebracht werden. Die Rohrenden werden unter Verwendung von Systemfittings hartverlötet. Es kann aber auch mit einem Aufweitwerkzeug eine Muffe geformt werden. Anschließend wird mit einer vorgefertigten Dämmschale die hartverlötete Verbindungsstelle umhüllt und mit einer Schrumpfmuffe unter Zuführung von Wärme geschlossen. Durch die Temperaturänderungen des Mediumrohres wird die Wärmedämmung zusammengedrückt, hervorgerufen durch das mehr oder weniger feststehende Mantelrohr. Sehr klein sind auch die axialen Kräfte im Rohrsystem. Notwendige Festpunktkonstruktionen, die im Abstand von weniger als 100 m realisiert werden, sind einfach aufgebaut. Andere Verlegemethoden, wie Vorspannung oder Vorwärmung, sind bei diesem Verlegeverfahren nicht notwendig.

Für Richtungsänderungen, Abzweige, Reduzierungen, Hosenrohre und Festpunkte stehen sowohl für das Einzelrohr als auch für das Doppelrohr werkseitig vorgefertigte Formteile zur Verfügung. Weiterhin werden für das Mantelrohr Endabschottungen, Mauerwerkseinführungen und Mantelrohrreduzierungen angeboten. Darüber hinaus stehen für alle Einzel- und Doppelrohrsysteme entsprechende Armaturen zur Verfügung.

Dieses Verlegeverfahren läßt sich durchaus mit anderen Verlegeverfahren kombinieren. Für eventuell notwendige Kupfer/Stahl-Übergänge darf nur ein entsprechendes Übergangsstück verwendet werden.

Bei der Verlegung kann in besonderen Fällen ein mechanischer Schutz über dem Rohrsystem in Form von z. B. Maschendraht oder Abdeckung mit Betonplatten erforderlich werden.

Grundsätzlich ist in dieser Ausführung kein Überwachungssystem integriert, kann aber auf Wunsch mit Überwachungssystem geliefert werden.

Eine weitere Ausführung verwendet weichgeglühte nahtlose Stahlrohre St37. Die Rohre sind spannungsfrei und deshalb die Deformierung gut biegsam. Die Einsatzgrenze ist durch die Wärmedämmung aus PUR-Hartschaum auf 130 °C begrenzt. Das PE-Mantelrohr ist als Wellrohr ausgebildet und dadurch ebenfalls gut biegsam. Die Nennweitenauswahl ist begrenzt, wie z. B. 22 x 2,0 mm bzw. 28 x 2,3 mm und wird in Rohrlängen von 15 m bzw. 30 m und darüber hinaus als Rolle geliefert. Auch hier dürfen die Biegeradien nicht unterschritten werden, wobei kleinere Biegeradien grundsätzlich mittels Biegevorrichtungen ausführbar sind.

Es werden ebenfalls verschiedene Abzweigtechniken und eine Vielzahl anderer Formstücke vom Hersteller angeboten. Verbindungen werden durch Schrumpfmuffen realisiert.

Die Verwendung von Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen PEX¹² stellt eine weitere Ausführung dar. Dieser Werkstoff besitzt gute thermische Eigenschaften, ist korrosionsfest und chemisch beständig. Standardmäßig ist das PEX-Rohr mit einer organischen Sauerstoffdiffusionssperre versehen. Die Wärmedämmung besteht wie bei der vorherigen Ausführung aus flexiblem PUR-Hartschaumstoff. Gemeinsam mit dem PE-Mantelrohr bildet dieses System eine Einheit. Während kleinere Außenmanteldurchmesser aus glattem Rohr bestehen, können größere Außenmanteldurchmesser durchaus die Form eines Wellrohrs aufweisen. Der Durchmesserbereich geht von 22–110 mm, wobei bis 28 mm für einen maximalen Druck von 10 bar, die anderen dagegen für einen maximalen Druck von 6 bar ausgelegt sind. Diese Ausführung wird sowohl als Einzel- sowie auch als Doppelrohrsystem angeboten, wobei letzteres System auf DN 50 begrenzt ist. Die Lieferlängen bestehen entweder aus Rohrlängen bis zu 12 m oder auf Rollen mit Längen bis zu 200 m in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser.

Zur Dehnungsaufnahme werden die plastischen Eigenschaften des PEX-Mediumrohres genutzt. Die Rohre sind daher selbst kompensierend, so daß eine Dehnung nicht berücksichtigt werden braucht.

Auch hier werden von den jeweiligen Herstellern verschiedene Formstücke für Richtungsänderungen und Abzweige angeboten. Für die jeweiligen Verbindungen werden entweder Verschraubungen oder sogenannte Preßkupplungen verwendet. Die Wärmedämmung an den Verbindungen wird in den meisten Fällen über Halbschalen aus hartem PUR-Schaum realisiert. Als Abschluß dient eine Schrumpfmuffe. Bei Abzweigen kommen aber auch werkseitig vorgefertigte Mantelhalbschalen zum Einsatz.

Reicht die begrenzte Betriebstemperatur dieses Systems nicht aus, so kann im Vorlauf ein Mediumrohr aus weichem Kupfer bis 120 °C eingesetzt werden. Dieser Werkstoff weist die gleiche Funktionalität wie PEX-Rohre auf und wird somit auch kombiniert eingesetzt. Das System aus Kupferrohren wird ebenfalls als Einzel- oder Doppelrohr angeboten, wobei größere Durchmesser als Rohrlänge von maximal 10 m geliefert werden. Verschiedene Übergangs- und Verbindungsmöglichkeiten machen dieses System universell einsetzbar. Formstück und Muffen kommen wie bei PEX-Rohren zur Anwendung.

Letztendlich wird für höhere Betriebsdrücke auch der Rohrwerkstoff Edelstahl verwendet.

2.2.4.4.4 Stahlmantelrohrsysteme. Dieses Verlegeverfahren wird in Europa seit über 40 Jahren mit guten Ergebnissen in der Fernwärmeversorgung eingesetzt. Das Stahlmantelrohr besteht aus einem korrosionsgeschützten Mantelrohr und einem wärmegeprägten mediumführenden Innenrohr, das konzentrisch im Mantelrohr angeordnet ist. Das Mantelrohr übernimmt dabei die Funktion des Feuchtigkeitsschutz- und Festigkeitsschutzes des gesamten Stahlmantelrohres. Entscheidend bei diesem Verlegeverfahren ist, daß die temperaturbedingten Längenänderungen und die Dehnbewegungen des Mediumrohres innerhalb des Mantelrohres aufgenommen werden. Gleichzeitig wird die Stahlmantelrohrleitung grundsätzlich als

¹² Vernetztes Polyethylen PEX, Grundmaterial PE-HD nach DIN 16892/16893 mit der Vernetzungsart Peroxid (Engelverfahren).

geschlossenes System gas- und vakuumdicht ausgeführt. Die verbliebene Restfeuchtigkeit in der Wärmedämmung und dem sogenannten Luft-Ringraum wird nach Inbetriebnahme der Leitung abgezogen, in dem der Ringraum evakuiert wird. Durch diese Evakuierung wird eine völlige Trocknung der Wärmedämmung erreicht, die wiederum zu einer Minimierung der Wärmeverluste sowie zu einer Korrosionsfreiheit im Ringraum führt.

Stahlmantelrohre einschließlich ihrer Formstücke werden überwiegend vorgefertigt und in bis zu 12 m langen Baueinheiten geliefert. Dabei liegen die gebräuchlichsten Nenndurchmesser des Mediumrohres zwischen DN 25 und DN 1200. Bei diesem Verlegesystem ist die Betriebstemperatur auf maximal 300 °C und eine maximale Druckstufe von PN 64 für Normalausführungen begrenzt. Es besteht durchaus die Möglichkeit, bis DN 150 auch 2 Mediumrohre gemeinsam in einem Mantelrohr anzuordnen. Die Einrohrausführung eines Stahlmantelrohres zeigt Abb. 2.2-59.

Die Lagerabstände werden in Abhängigkeit des Nenndurchmessers festgelegt. Dabei werden für kleinere Nenndurchmesser 4 Lager und ab DN 200 nur noch 2 Lager verwendet. Um den Dehnungsausgleich des Mediumrohres gegenüber dem Mantelrohr zu gewährleisten, werden Gleit- oder Rollenlager eingesetzt. Dabei ist zu beachten, daß diese keine Wärmebrücken bilden.

Vorteile bietet dieses System bei Verlegung im Grundwasserbereich sowie in Bergsenkungsgebieten, letzteres begründet durch die hohen Verformungsmöglichkeiten der Stahlleitungen. Weiterhin kann der Ringraum gut überwacht werden. Im Anschluß werden folgende Schwerpunkte näher behandelt:

- Rohrleitungen und Zubehörteile einschließlich des Mantelrohres,
- Dehnungsausgleich,
- Wärmedämmung,
- Korrosionsschutz,
- Überwachungssysteme sowie
- Sonderbauformen.

Rohrleitungen. Als Rohrwerkstoff für das Mediumrohr kommen nahtlose Stahlrohre für kleinere Nenndurchmesser bis DN 100 sowie geschweißte Stahlrohre aus St37.0 bzw. St52.0 zum Einsatz. Das Mantelrohr ist ebenfalls aus diesem Werkstoff und ist zum Schutz gegen Korrosion zusätzlich umhüllt. Da die Hüllmaterialien nur begrenzt temperaturbeständig sind, ist das Mantelrohr vor Erwärmung zu schützen.

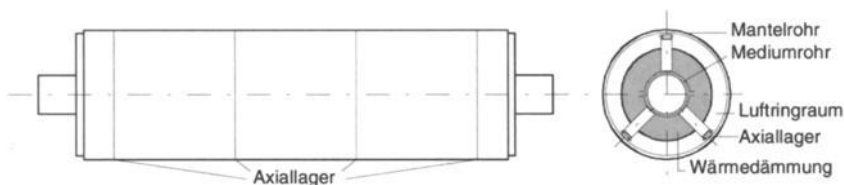


Abb. 2.2-59 Stahlmantelrohrleitung

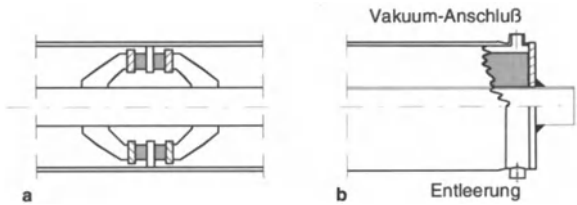


Abb. 2.2-60 Festpunktkonstruktionen

a Grundaufbau eines Zwischenfestpunktes, **b** Endfestpunkt für geringe Reaktionskräfte

Der Mantelrohrdurchmesser ist abhängig von dem Mediumrohrdurchmesser und der Wärmedämmung. Um einen problemlosen Zusammenbau zu gewährleisten, ist ein Ringspalt von mindestens 20 mm erforderlich, d. h. der Mantelrohrdurchmesser muß demnach 40 mm größer sein als der äußere Durchmesser der Wärmedämmung. Dieser Ringspalt ist auch für die Entleerung der Mantelrohre und für die schnelle Evakuierung von Bedeutung. Gleichzeitig lassen die Ring-spaltabmessungen Bewegungen der Innenrohre zu.

Formstücke werden ebenfalls werkseitig vorgestellt. Die Bögen des Mediumrohres werden nach Abmessungen der DIN 2605 gefertigt. Der Mantelrohrbogen wird mit einem oder mehreren Segmentschnitten gefertigt. Falls erforderlich, wird ein Zwickelblech eingesetzt. Abzweige werden bis PN 16 von der Hauptleitung als Schuh- oder Sattelstutzen ausgebildet. Ab PN 25 erfolgt die Fertigung der T-Stücke nach DIN 2615 bzw. es kommen sogenannte Weldolets zum Einsatz (Harders 1993). Es werden auch Medium- und Mantelrohrreduzierungen angeboten.

Bei dem Zwischenfestpunkt, als weiteres Formstück, handelt es sich um ein Verbindungsstück zwischen Medium- und Mantelrohr mit der Aufgabe, die Mediumrohrkräfte aufzunehmen und diese an das Mantelrohr und von dort an das Erdreich abzuleiten. Des weiteren muß verhindert werden, daß unzulässig hohe Temperaturen vom Mediumrohr auf das Mantelrohr gelangen. Der Zwischenfestpunkt wird projektbezogen in Abhängigkeit der Mediumrohr-Reaktionskräfte hergestellt. Der Festpunkt wird mit einer Torrosionssicherung ausgerüstet bei Anwendung von Kompensatoren, Kaltvorspannung oder thermischer Vorspannung. Bei geringen Reaktionskräften werden auch einfachere Konstruktionen eingesetzt. Einen beispielhaften Grundaufbau zeigt Abb. 2.2-60a. Weitere Ausführungen sind u. a. in (AGFW 1993a; Harders 1993) aufgeführt. Für Endfestpunkte können analoge Aussagen gemacht werden (Abb. 2.2-60b).

Zu den weiteren Zubehöerteilen gehören Mauerdurchführungen. Diese werden in den meisten Fällen mit Polyethylen-Gleitkufen zur Zentrierung der Mantelrohre und der Mauerhülsen geliefert. Die äußere Hülle der Durchführung wird entweder in das Mauerwerk einbetoniert oder in Stahlwände eingeschweißt. Grundsätzlich muß dabei beachtet werden, daß diese Gleitkufen nicht zur Aufnahme von Rohr- und Erdlasten sowie Erdsetzungen im Bereich von Gebäude- und Schachteinführungen geeignet sind. Spezielle Konstruktionen sind beim jeweiligen Hersteller zu entnehmen.

Weiterhin kommen Mantelrohr-Axialkompensator-Endverschlüsse zur Anwendung. Diese sind vakuumdichte Mantelrohrabschottungen, die Bewegungen der

Mediumrohre zulassen und gleichzeitig den Wärmeübergang zum Mantelrohr reduzieren, wobei der Axialkompensatorverschluß außen- bzw. innenliegend sein kann.

Die Verbindungen der Medium- und Mantelrohre erfolgen über Schweißung. Die Verbindungen der Mantelrohre werden mit warm zu verarbeitenden Korrosionsschutzbinden geschützt, überwiegend PE-Umhüllung nach DIN 30672.

Dehnungsausgleich. Stahlmantelrohrleitungen werden in den meisten Fällen unter Ausnutzung natürlicher Kompensation verlegt. Dazu kommen – wie bei dem Verlegeverfahren Freileitung- Kanal- und Kunststoffmantelrohr – U-, L- und/oder Z-Bögen zur Anwendung. Reicht der vorhandene Ringspalt nicht aus, kann der erforderliche Dehnungsspielraum über Erweiterungen des Mantelrohrdurchmessers geschaffen werden. Steht für die natürlichen Dehnungsausgleicher kein ausreichender Verlegungsraum zur Verfügung, können zur Dehnungsaufnahme auch Axialkompensatoren eingesetzt werden. Diese werden bereits werkseitig in den Mediumrohren verschweißt und mit Festpunkten und Führungslagern nach den Vorschriften der Kompensatorenhersteller in das Stahlmantelrohr eingebaut. Der mögliche Aufbau erfolgt wie in Abb. 2.2-61 dargestellt.

Als Kompensatoren eignen sich dabei solche, die über ein äußeres Schutzrohr und inneres Leitrohr sowie Hubbegrenzung, Vorspannsicherung, Torrosionssicherung und Eigenführung verfügen. Die Funktionsweise eines Kompensators wird im Verlegeverfahren Freileitung ausführlich beschrieben.

Aus Kostengründen kann auf Kompensationsmaßnahmen weitestgehend verzichtet werden, wenn die Verlegung unter Vorspannung realisiert wird. Dabei wird nur das Mediumrohr vorgespannt. Diese Verlegemethode ist für Stahlmantelrohrsysteme besonderes geeignet, da die Reaktionskraft aus der Vorspannung der Mediumleitung vom Mantelrohr aufgenommen wird und somit nach außen nahezu kräftefrei ist. Die Vorspannung selbst kann sowohl hydraulisch als auch thermisch vorgenommen werden. Gleichzeitig sind auch die Bewegungen des Mantelrohres infolge ihrer eigenen Temperaturdehnung oder infolge von Krafteinwirkungen aus der Vorspannung und der Temperaturdehnung des Mediumrohres zu berücksichtigen, auch wenn diese sehr gering ausfallen und den Reibungskräften aus der Erdbettung entgegenwirken.

Wärmedämmung. Die Wärmedämmung der Mediumrohre besteht aus kunstharzgebundenen, formbeständigen Mineralfaserschalen mit einem Raumgewicht zwischen 60 und 150 kg/m³. Diese werden mit Edelstahlbändern auf dem Mediumrohr befestigt. Die Formbeständigkeit wird deshalb gefordert, damit bei der Montage und beim Evakuieren der vorgesehene Luftringspalt erhalten bleibt.

Die Ringspaltgröße sollte so bemessen sein, daß das Einziehen des isolierten Mediumrohres in das Mantelrohr nicht behindert wird und liegt bei ca. 20 mm. In



Abb. 2.2-61 Anwendung Axialkompensatoren für Dehnungsausgleich
ZFP Zwischenfestpunkt, FL Führungslager, K Kompensator

(AGFW 1993a) werden diesbezüglich auch Angaben von ca. 10–15 mm gemacht. Der Ringraum wird zumindest einmal beim Bau der Leitung evakuiert, häufig jedoch bleibend unter Vakuum gehalten. Durch diese Evakuierung wird eine völlige Trocknung der Wärmedämmung erreicht, die wiederum zu einer Minimierung der Wärmeverluste im Ringraum führt. Gleichzeitig dient die Evakuierung als Dichtheitskontrolle für die Medium- und Mantelrohre. Flanschverbindungen und Stopfbuchsendurchführungen sollten somit vermieden werden.

Im Dauerbetrieb kann ein Vakuum zwischen 1 und 10 mbar erreicht werden. Um die dann noch auftretenden Wärmeverluste weiter zu minimieren, werden Anlagen mit Drücken zwischen 0,1 und 1 mbar betrieben. Die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit von Mineralfaser-Dämmschalen sinkt bei 10 mbar auf 0,1 mbar von 0,035–0,945 W/m K auf 0,01–0,015 W/m K (AGFW 1993a). Bei der Evakuierung ist zu beachten, daß neben dem Luftvolumen auch ein beachtliches Dampfvolumen abzupumpen ist. Die Erstevakuierung kann bei geringer Feuchtigkeit einige Tage und bei intensiver Durchfeuchtung bis zu mehreren Wochen dauern. Diese Evakuierungszeit wird ebenfalls wesentlich von der Vakuumpumpe beeinflusst. Weiterhin kann eine Evakuierung in Teilabschnitten kostengünstiger sein.

Der Hersteller legt die einzuhaltenden Restriktionen über die Vakuumdichtheit fest, wobei als Grenzwerte 5 mbar und bei größeren Transportleistungen 1 mbar gelten können. Gleichzeitig kann die Dichtheit der Leitung durch eine maximal zulässige Leckrate in Abhängigkeit des Ringraumvolumens beschrieben werden (AGFW 1993a). Dabei gilt eine maximale Leckrate bei 20 °C von 0,03–0,1 l/s bei 10 m³ Ringvolumen, 0,1–0,3 l/s bei 10–100 m³ und 0,3–0,5 l/s bei größer 100 m³. Die Dichtheit einer Stahlmantelrohrleitung kann mit einer Druckanstiegsmessung über eine Zeitspanne geprüft werden.

Korrosionsschutz. Als passiver Korrosionsschutz für Stahlmantelrohrleitungen ist die Umhüllung aus bitumiertem Glasvlies oder eine Polyethylen-Umhüllung üblich. Diese wird werkseitig aufgebracht. Entscheidend für die Polyethylenausführung nach DIN 30670 ist die maximal zulässige Dauerbetriebstemperatur des Mantelrohres. Bei der Bitumentumhüllung gilt entsprechend die DIN 30673. Auf der Baustelle hergestellte Umhüllungen der Schweißnahtbereiche sowie für Ausbesserungen kommen Korrosionsschutzbinden der wärmeschrumpfenden Materialien nach DIN 30672 zur Anwendung. Des weiteren wird ein kathodischer Korrosionsschutz zusätzlich empfohlen. Die Umhüllung des Mantelrohres muß folgende Anforderungen erfüllen:

- gute Haftung auf dem Mantelrohr,
- hoher Feuchtigkeitsschutz des Mantelrohres,
- hohe Schlag- und Druckfestigkeit,
- Temperaturbeständigkeit und
- ausreichend elektrischer Widerstand.

Die Prüfspannung mit einem ISO-Testgerät soll 5 kV + 5 kV je mm Schichtdicke betragen, wobei diese Prüfung mit maximal 20 kV auf der Baustelle zur Entdeckung von fehlerhaften Stellen zu wiederholen ist. Die Ausbesserung erfolgt nach

DVGW-Merkblatt GW 14 – Ausbesserung von Fehlstellen in Korrosionsschutzumhüllungen von Rohren und Rohrleitungsbauteilen aus Eisenwerkstoffen.

Besondere Aufmerksamkeit muß den Parallelführungen oder Kreuzungen mit anderen Versorgungsmedien gewidmet werden. Grundsätzlich ist eine metallische Verbindung zu Anlagen oder Anlagenteilen zu vermeiden. Spezielle Ausführungshinweise sind in (AGFW 1993a) zu finden. Auch ohne den kathodischen Korrosionsschutz besteht meistens am Isolierstück ein elektrisches Potential. Dabei spielt die Leitfähigkeit des Heizwassers eine wesentliche Rolle. Dieser fließende elektrische Strom kann eine unzulässige Innenkorrosion hervorrufen. Deshalb sind Isolierstücke mit einer elektrisch isolierenden, temperaturbeständigen Auskleidung, z. B. Emaille oder PTFE, zu versehen.

Zur Überwachung in zeitlichen Abständen von Potentialen sowie Messungen von Strömen und Widerständen können oberirdische Meßstellen eingerichtet werden, welche über ein Kabel mit dem Stahlmantelrohr verbunden sind. Einige Hersteller bieten zur ständigen Überwachung in einer Leitzentrale sogenannte Bezugsanoden an, die im Trassenverlauf installiert werden.

Überwachungssysteme. Neben der bereits erwähnten Dauerevakuierung wird bei Stahlmantelrohren seit längerem eine Überwachung angewandt, die auf einer Widerstandsmessung beruht; s. a. Beschreibung bei dem Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohrsysteme. Dabei können als Feuchtigkeitsindikatoren verschiedene Sensoren eingesetzt werden, welche an den Tiefpunkten des Trassenverlaufes angebracht werden.

Sonderbauformen. Neben den starren System des Stahlmantelrohres steht ein flexibles System mit einem längsgeschweißten, gewellten Innenrohr aus Edelstahl, welches umhüllt ist mit einer Wärmedämmung aus PUR-Hartschaumstoff und einem ebenfalls längsgeschweißten, gewellten Außenrohr aus Stahl, zur Verfügung. Dieses flexible System wird bis zu einem Mediumrohr-Innenrohrdurchmesser von maximal 147 mm hergestellt. Der äußere Korrosionsschutz besteht aus zwei durch eine Hostaphan-Folie getrennte Polymer-Schichten und einem darüber extrudierten PE-Mantel (AGFW 1993a).

Genauso wie bei den flexiblen Kunststoffmantelrohrsystemen bewirkt die Wellung eine selbständige Kompensation der Wärmedehnung, so daß daher die Kompensationselemente, Festpunkte und Gleitlager entfallen können. Anfallende Kompensationskräfte werden innerhalb des Systems aufgenommen. Hinsichtlich der Kompensierung des höheren Druckverlustes des gewellten Mediumrohres erfolgt eine etwas größere Dimensionierung des Durchmessers gegenüber einem glatten Stahlrohr gleichem Nenndurchmessers.

Verbindungen zwischen den Rohrleitungen oder anderen Rohrsystemen werden durch standardisierte Teile hergestellt. Dabei wird eine metallische Dichtung durch Schraubenkräfte so stark axial verformt, daß eine dichtende Verbindung entsteht. Diese ist zerstörungsfrei nicht wieder lösbar. Für Abzweige stehen Formstücke zur Verfügung. Durch die Möglichkeit, daß Rohrsystem von Anschlußpunkt zu Anschlußpunkt eingeschleift verlegen zu können, kommen solche Formstücke selten zur Verwendung. Das flexible Stahlmantelrohrsystem ist mit einem Überwachungssystem ausgestattet.

Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist die Kostenersparnis, hervorgerufen durch eine geringere Grabenbreite. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit anhand der Flexibilität des Systems leicht horizontale und vertikale Änderungen vornehmen zu können.

2.2.4.4.5 Weitere Einsatzmöglichkeiten der Mantelrohrsysteme. Grundsätzlich ist es möglich, das Kunststoffmantelrohr auch für die Verlegeverfahren Freileitung und Kanal einzusetzen, was einzelne ausgeführte Projekte beweisen.

Kombiniert werden sehr häufig auch Stahlmantel- und Kunststoffmantelrohrsysteme als gemeinsames Rohrleitungspaar, vor allem dann, wenn die Dauerbetriebstemperatur des Vorlaufes deutlich über der zulässigen Betriebstemperatur des Kunststoffmantelrohres liegt. Ein zweiter Grund ist der, daß das Kunststoffmantelrohr gegenüber dem Stahlmantelrohr eine kostengünstigere Variante darstellt. Somit wird das Stahlmantelrohr als Vorlaufleitung und das Kunststoffmantelrohr als Rücklaufleitung verlegt.

2.2.4.5

Übrige Verlegeverfahren

2.2.4.5.1 Allgemeines. In Deutschland kamen bisher zum größten Teil die zuvor beschriebenen Verlegeverfahren zur Anwendung. Darüber hinaus gibt es weitere Verlegeverfahren, die entweder nicht mehr den Stand der Technik darstellen und somit nicht mehr angewandt werden, oder Neuentwicklungen, die sich momentan in der Erprobungsphase befinden. Dazu zählen auch Verlegeverfahren, die nur einen kleinen prozentualen Anteil an allen eingesetzten Verlegeverfahren in Deutschland ausmachen.

Zu den heute nicht mehr angewendeten Verfahren zählen die Beton- und Bitummengießverfahren. Die Betongießverfahren scheiterten letztlich daran, daß ihr Schutzsystem unzureichende Elastizität aufweist und unter der dynamischen Beanspruchung (z. B. Wärmedehnung) der Erdverlegung versagt. Die unzureichende Elastizität liegt u. a. darin begründet, daß durch den Verbund zwischen Mediumrohr und Beton höhere Axialkräfte und Spannungen im Mediumrohr entstehen als beispielsweise beim Verlegeverfahren Kanal.

Die Schüttverfahren benutzten früher durchweg Mediumrohrleitungen, die durch den Schüttdämmstoff nur unzureichend gegen den Zutritt von Feuchtigkeit geschützt waren. Dies hatte dann Korrosion zur Folge, was letztendlich wesentlich die Lebensdauer der Fernwärmeleitung beeinflusste. Die Schüttdämmstoffe bestehen aus unterschiedlichen Materialien, wie Bitumen oder sogar aus Filteraschen.

Sollte zu den zuvor beschriebenen Verlegeverfahren noch Informationsbedarf bestehen, so kann auf frühere Verlegerichtlinien der AGFW oder entsprechende Literatur, wie u. a. (Munser 1980; Schwaigerer 1986) zurückgegriffen werden.

Im folgenden werden einige Ausführungen zu den speziellen Verlegeverfahren gemacht. Dazu zählen

- ein spezielles Schüttverfahren,
- der Einsatz von glasfaserverstärkten Verbundrohren sowie
- die Realisierung von Durchörterungen und Düker.

2.2.4.5.2 Spezielles Schüttverfahren. Obwohl eingangs davon gesprochen wurde, daß die früheren Schüttverfahren den großen Nachteil des nicht ausreichenden Schutzes gegen Feuchtigkeit besitzen, wurde diese Verfahren weiterentwickelt und optimiert. Dazu zählt ein Isoliersystem, daß aus den Materialien – Bitumen, Kork und Zellulose – besteht. Die Dauerbetriebstemperatur kann dabei 130 °C betragen, mit anderem Aufbau sogar bis 200 °C. Dieses System kann sowohl bei Neubau als auch bei der Sanierung von bestehenden Fernwärmeleitungen verwendet werden.

Die Isoliermasse wird werkseitig hergestellt, entsprechend geliefert und eingebracht. Sie paßt sich leicht und flexibel jedem beliebigen Trassenverlauf an. Die Viskosität dieser Isoliermasse ist von der Temperatur abhängig. Je höher die Temperatur ist, desto weicher wird diese Isoliermasse. Dabei werden alle Zustände von fest über zähflüssig bis dünnflüssig durchlaufen, ohne das eine stoffliche Änderung eintritt. Dieser Prozeß zwischen Erwärmen und Abkühlen ist beliebig oft wiederholbar. Die Isoliermasse ist bei Erdtemperatur zähplastisch bis fest. Unmittelbar um die warme Rohrleitung bildet sich eine ringförmige, flüssige Zone. Dadurch wird gewährleistet, daß sich die Rohrleitung frei in der Länge und im Bereich der Dehnungsschenkel (Richtungsänderungen bzw. natürliche Dehnungsausgleicher) spannungsfrei ausdehnen kann. Bei der Dehnbewegung im Bogen wird die Isoliermasse vor der Rohrleitung verdrängt und läuft dahinter wieder zusammen. Die erforderlichen Festpunkte können mit minimalem Aufwand realisiert werden, gegeben durch die geringen Rückstellkräfte. Selbst aufgezwungene Spannungen von außen können durch die viskose Verformung der Isoliermasse abgebaut werden. Diese Isoliermasse ist laut Hersteller zugleich

- korrosionsschützend,
- wärmedämmend,
- elektrisch-isolierend,
- dauerelastisch und
- formstabil.

Mit Hilfe dieses Schüttverfahrens werden Muffenverbindungen, Dehnpolster, Dehnbauwerke, Überwachungssysteme und kathodische Korrosionsschutzeinrichtungen, wie sie bei den Verlegeverfahren Kanal und Mantelrohr zum Einsatz kommen, überflüssig.

Die Isoliermasse weist eine hohe Resistenz gegen belastete Böden auf und ist ebenfalls uneingeschränkt grundwassertauglich. Selbst von Innenleckagen aus dem Mediumrohr geht keine Gefahr aus, da die Feuchtigkeit weder die Isolierung unterwandern noch durchfeuchten kann. Der Schaden bleibt auf die Wasseraustrittsstelle begrenzt.

Die Verlegung der Rohrleitung basiert auf den Auslegungskriterien wie für frei verlegte Rohrleitungen. Die Bewegungsverhältnisse des Rohres sind durch Festpunkte, auch als sogenannte Fixpunkte bezeichnet, an jeder Stelle einfach und genau definiert. Auch die Verlegung bezüglich des Tiefbaues wird kostengünstiger, da u. a. durch die robuste Isolierung eine Sandausgleichsschicht auf der Grabensohle überflüssig ist. Die Isolierung wird erst nach Beendigung der Rohrleitungsverlegung eingebracht. Es ist durchaus möglich, bereits in Betrieb befind-

liche Rohrleitungen zu isolieren. Um nur die benötigte Isoliermasse einzusetzen, wird ein nach oben offener, abgewickelter, beidseitig verzinkter Blechtrog um die Rohrleitung bzw. Rohrleitungen realisiert, welcher mit entsprechenden Halterungen gegen Ausbeulen gesichert wird (Abb. 2.2-62). Die Maße für Einzelrohr- und Doppelrohr sind in der Tabelle 2.2-13 in Abhängigkeit von dem Nenndurchmesser zusammengestellt.

Um die höhere Dauerbetriebstemperatur von 200 °C zuzulassen, wird zusätzlich eine Vorisolierung aus Dämmschalen um die Rohrleitung realisiert. Diese Dämmschalen sind innenseitig mit gebundenen Bitumen beschichtet, der mit steigender Betriebstemperatur eine Gleitschicht um das Rohr bildet. Für die Dämmschalen werden in Abhängigkeit der Betriebstemperatur verschiedene Materialien eingesetzt, wie u. a. expandierter Kork, Kalziumsilikat.

Interessant ist dieses Schüttverfahren auch beim Einsatz von zu sanierenden Fernwärmeleitungen. Dabei wird der betroffene Leitungsabschnitt der erd- oder kanalverlegten Rohrleitung freigelegt, die schadhafte Isolierung entfernt, das Mediumrohr einer äußeren Prüfung unterzogen und abschließend mit diesem Verfahren isoliert. Der Vorteil besteht u. a. darin, daß der betroffene Leitungsabschnitt nicht außer Betrieb genommen werden muß.

Für dieses System werden weitere Komponenten, wie Festpunkte sowie Gleitführungen angeboten. Darüber hinaus werden Hinweise für Systemübergänge zu anderen Verlegeverfahren gegeben.

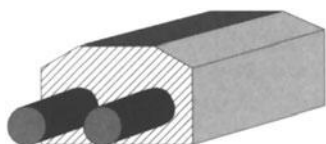


Abb. 2.2-62 Aufbau einer erdverlegten Rohrleitung mittels geschütteter Isoliermasse

Tabelle 2.2-13 Abmaße für Schüttverfahren

DN	Einzelrohr		Doppelrohr		DN	Einzelrohr		Doppelrohr	
	Breite	Höhe	Breite	Höhe		Breite	Höhe	Breite	Höhe
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
20	210	210	300	210	150	370	370	620	370
25	210	210	300	210	200	460	460	760	460
32	210	210	300	210	250	560	560	910	560
40	210	210	300	210	300	630	630	1030	630
50	220	220	320	220	350	660	660	1110	660
65	240	240	350	240	400	730	730	1230	730
80	250	250	400	250	450	780	780	1330	780
100	280	280	450	280	500	830	830	1440	830
125	340	340	560	340					

2.2.4.5.3 Glasfaserverstärktes Verbundrohr. Der Werkstoff des Mediumrohres besteht aus GFK-Rohr kreuzgewickelt auf der Basis von Epoxid-Harzen. Es wird eingesetzt als Fernwärmerohr für Betriebstemperaturen bis 130 °C und Betriebsdrücke bis 10 bar. Ohne Wärmedämmung kann das GFK-Rohr selbst Betriebsdrücke bis 60 bar gewährleisten. Es werden die Nenndurchmesser von DN 25–400 (außer DN 32, DN 65 und DN 125) als 6 m Rohrstange hergestellt. Das GFK-Fernwärmerohr ist mit einer Wärmedämmung aus geschlossenzelligem PUR-Hartschaumstoff umhüllt. Den Abschluß bildet ein Kunststoff-Mantelrohr. Die Vorteile dieses Verbundrohres liegen in

- der glatten Rohrrinnenwandung (niedrige Rauigkeit),
- der unübertroffenen Wärmedämmung,
- der einfachen Verlegung,
- der vollkommenen Korrosionsbeständigkeit,
- der Unbedenklichkeit bei aggressiven Böden,
- den Wegfall von Kathodenschutz und Überwachungssystem sowie
- der hohen Wirtschaftlichkeit, hervorgerufen durch niedrigere Wärme- und Druckverluste.

Die Korrosionsbeständigkeit wird dadurch erreicht, daß das Verbundrohr ausschließlich aus Kunststoffen besteht. Selbst bei Beschädigung der Isolierung besteht keine Korrosionsgefahr.

Auch die unübertroffene Wärmedämmung dieses Verbundrohres ist von hoher Bedeutung. Das GFK-Rohr hat einen Wärmedurchgang von nur noch 0,28 W/(m K) gegenüber dem Stahlrohr mit ca. 53 W/(m K). Damit sind die Wärmeverluste sehr gering und die Wärme wird nahezu fast verlustfrei bis zum Abnehmer transportiert.

Durch die kompensationsfreie Verlegung – Wärmedehnung und Druckkräfte werden vom Rohr selbst aufgenommen – ergibt sich eine kurze Trassenführung, d. h. es werden keine Kompensatoren oder Dehnungsbögen benötigt. Dies wird ermöglicht durch

- das geringere Elastizitätsmodul des GFK-Werkstoffes gegenüber Stahl,
- die Armierungsstruktur der Rohrwandung und
- das teilweise Abtragen der auftretenden Längskräfte an das umgebende Erdreich.

Die an den Richtungsänderungen auftretenden Restkräfte werden durch Widerlager, bestehend aus Magerbeton, an die gewachsene Grabenwand weitergegeben. Somit ist das gesamte Leitungssystem fest eingespannt und es kommt die Kreuzwicklung und der damit verbundene POISSON-Effekt voll zur Geltung. Voraussetzung bildet dabei das blockierte Rohrsystem mit kraftschlüssig verklebten Verbindungen. Bei dem POISSON-Effekt bewirkt der Innendruck eine Expansion des Rohrumfanges und versucht gleichzeitig, das Rohr in Längsrichtung zu kürzen. Die daraus resultierende Zugspannung in der Rohrwandung reduziert somit die Schubkraft auf Formstücke um etwa 50 %.

Das Verbundrohr ist außerordentlich flexibel und kann daher bei der Erdverlegung mit sehr kleinen Biegeradien gezogen werden, wofür in der Regel kein tech-

nisches Gerät notwendig ist. Dies wird erreicht, indem das verklebte gerade Leitungsstück in den gewünschten Radius hineingezogen wird. Dabei sind die zulässigen Biegeradien vom Hersteller zu beachten.

Mit Zunahme der Temperatur wird das Rohr flexibler, so daß durchaus kleinere Biegeradien möglich sind. Eine weitere Einflußgröße des Biegeradius stellt der Innendruck dar.

Die GFK-Rohre und Formstücke haben integrierte Muffen und werden mit Hilfe eines Zweikomponentenklebers verbunden. Um die Aushärtung des Klebers zu beschleunigen und gleichzeitig seine maximale Scherfestigkeit zu erzielen, wird die Verbindungsstelle mit einer elektrischen Heizbandage auf etwa 130 °C aufgeheizt. Danach wird der Raum zwischen den Endkappen zweier Rohreinheiten bzw. Formstücke mit Mineralwolle oder PUR-Halbschalen isoliert. Die vorher aufgebraachte Schiebemuffe aus Polyäthylen wird mittig verschoben und mit den ebenfalls vorher aufgetragenen Schrumpfmanschetten wasserdicht mit den Mantelrohren verbunden.

Die Schraubverbindung hat sich neben der herkömmlichen Muffenverbindung insbesondere bei der Sanierung von kanalverlegten Leitungen bewährt. Diese gestattet das Zusammenfügen längerer Leitungsabschnitte, die dann in den Kanal eingezogen werden, bei gleichzeitigem Herausziehen der alten Leitungen. Somit braucht der Kanal nicht vollständig geöffnet werden, was wiederum Kosten spart.

Neben den geraden Rohrstücken (Abb. 2.2-63) gibt es weitere werkseitig hergestellte Formstücke und Zubehörteile wie

- Rohrbogen 90 ° und 45 °,
- T-Stück,
- Reduzier-T-Stück,
- Reduzierstück,
- Flansche,
- Bauwerkseinführungen sowie
- Kleinteile (Sattel, Stopfen, Doppelmuffe bzw. Nippel).

Ebenso werden erdverlegte Kugelhähne, aber nicht in jedem Nenndurchmesser, angeboten.

Das GFK-Rohr kann ebenfalls für das Verlegeverfahren Freileitung verwendet werden. Dazu werden entsprechende Gleit- und Führungslager sowie Festpunkte vom Hersteller angeboten. Des weiteren ist es möglich, vorgedämmte Verbundrohre mit einem Wickelfalzrohr aus verzinktem Stahlblech als Mantelrohr einzusetzen. Bei dieser Verlegung kommt die natürliche Kompensation mit U-Bögen oder Kompensatoren zum Einsatz.



Abb. 2.2-63 Gerades GFK-Verbundrohr

2.2.4.5.4 Durchörterungen und Düker. Für den Bau großer und mittlerer Leitungen eignet sich der unterirdische Rohrvortrieb. Solche Durchörterungen werden fast ausschließlich für die Kreuzung von Straßen, Autobahnen und Gleisanlagen, aber auch für die Querung großer Trassen anderer Versorgungsmedien vorgenommen. Diese Bauweise ist bei großen Nenndurchmessern für Baulängen bis etwa 400 m anwendbar, so daß auch eine abschnittsweise Trassenverlegung möglich erscheint (AGFW 1993a). In Abhängigkeit des Durchmessers kommen sowohl begehbare als auch nicht begehbare Durchörterungen zur Anwendung.

Dieses Verlegeverfahren kann gegenüber einer offenen Bauweise kostengünstiger sein, vor allem dann, wenn eine offene Bauweise nicht möglich erscheint oder eine Verlegung in größeren Tiefenlagen notwendig ist. Der Grundwasserspiegel sollte dabei aber stets tiefer liegen.

Um entsprechend noch im Preßrohr arbeiten zu können, hat sich in der Praxis ein liches Mindestmaß von mindestens 1 m bewährt, in seltenen Fällen ist DN 800 für das Preßrohr die absolut unterste Grenze. Die erzeugte Preßkraft wird auf die Preß- bzw. Vortriebsrohre weitergegeben und durch deren Belastbarkeit begrenzt. Diese Belastbarkeit wird durch das zu verwendende Material, wie z. B. Stahlbeton, Stahl oder Kunststoffbeton vorgegeben.

Für das Einbringen der Preßrohre gibt es verschiedene Verfahren, entweder durch hydraulische Pressen, Schlagwerk, Erdbohrer oder Rakete und hängt im wesentlichen neben dem Durchmesser auch von der Bodenbeschaffenheit ab. Als Tiefbauarbeiten werden eine entsprechende Start- und Zielgrube benötigt. Entsprechende Beispiele zeigt Abb. 2.2-64.

Ein *Düker* ist eine kommunizierende Röhre zur Unterfahrung von Wasserläufen. Er kann sowohl in offener als auch in geschlossener Bauweise erstellt werden. Dabei wird unter offener Bauweise das Einziehen, Einschwimmen oder Einheben einer Rohrleitung in den Wasserlauf bei offenem Graben im Flußbett verstanden. Dagegen bedeutet die geschlossene Bauweise das Einfahren der Rohrleitung unter dem Flußlauf ohne Öffnung der Flußsohle. Entsprechende Ausführungsbeispiele sind u. a. in (Schwaigerer 1986; AGFW 1993a) aufgezeigt.

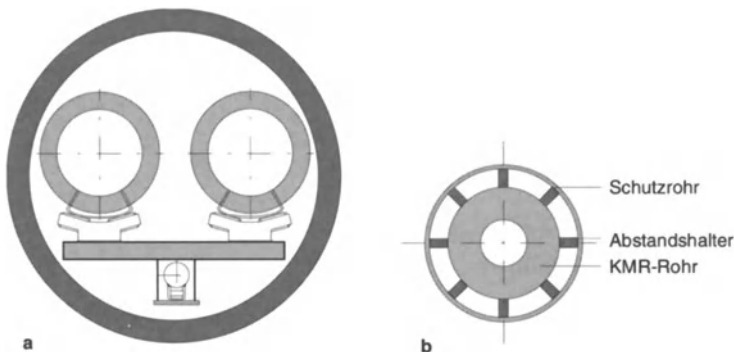


Abb. 2.2-64 Beispiel einer Durchörterung
a Mehrfachrohrausführung, **b** Einzelrohrausführung

2.2.5

Armaturen

2.2.5.1

Allgemeines

Armaturen stellen ein umfangreiches Thema dar, welches hier in seiner Gesamtheit den Rahmen des Buches sprengen würde. Im nachfolgenden sollen nur ein paar grundlegende Bemerkungen zu den Armaturen gemacht werden.

Grundsätzlich ist eine Armatur ein Verschluß zum Absperrn oder Regeln des Durchflusses in Rohrleitungen¹³. Die Absperrarmatur dient zum Absperrn oder Freigeben des Durchflusses und kann nur in den beiden Endstellungen (Auf/Zu) betrieben werden. Dagegen regelt eine Regelarmatur den Durchfluß in Abhängigkeit von der jeweiligen Zwischenstellung. Sie kann aber auch zum Absperrn verwendet werden.

In Fernwärmenetzen werden fast ausschließlich Absperrarmaturen eingebaut. Streckenarmaturen oder Armaturen in Abzweigungen sind insbesondere von Vorteil bei notwendig werdenden Reparaturen, da die Unterbrechung des Netzbetriebes eingegrenzt werden kann. Sie können aber auch bei späteren Netzerweiterungen von Nutzen sein. Weiterhin werden Armaturen als Entleerung, Entwässerung sowie Entlüftung benutzt.

An Absperrarmaturen werden folgende Anforderungen gestellt (AGFW 1993a):

- geringer Druckverlust,
- dichter Abschluß in beiden Richtungen,
- Dichtheit der Gehäusedurchführungen,
- geringer Wartungsaufwand,
- geringer Platzbedarf,
- geringe Fließgeräusche,
- Austauschbarkeit,
- Zähigkeit des Gehäusewerkstoffes,
- Unempfindlichkeit gegen äußere Kräfte und
- Unempfindlichkeit gegen Verunreinigungen.

Allen gestellten Anforderungen gerecht zu werden, wird – schon aus Kostengründen – nicht immer möglich sein. Die Geräuschbildung spielt bei der Absperrarmatur keine entscheidende Rolle, solange diese nicht als Regelarmatur mißbraucht wird. Einen weiteren Einfluß übt dabei die maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeit aus, welche bei voll geöffneter Armatur nicht überschritten werden sollte.

Die Armaturen (s. Abb. 2.2-65) werden in bezug auf die Bewegungsrichtung ihres Verschleißteiles zur Strömung unterschieden in

¹³ In der DIN 3211 wird die Armatur als ein Rohrleitungsteil definiert, das in Systemen aus Rohrleitungen, Behältern, Apparaten und Maschinen die Funktion des Schaltens und Stellens ausübt. Dabei wird unter Schalten die Position des Abschlußkörpers offen und geschlossen verstanden. Dagegen ist das Stellen in der DIN 19226 definiert.

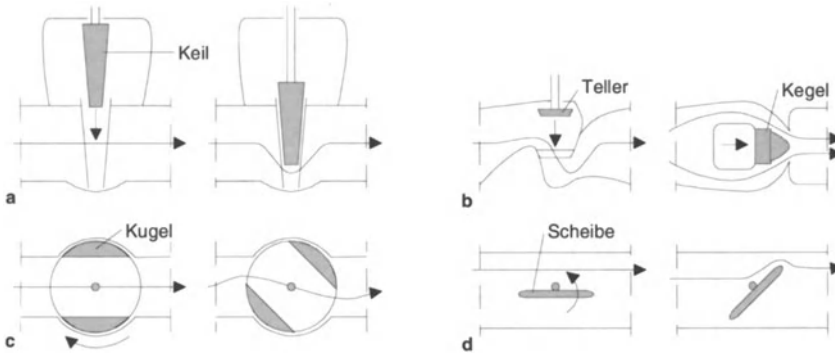


Abb. 2.2-65 Grundtypen von Armaturen
a Schieber, **b** Ventil, **c** Hahn, **d** Klappe

Tabelle 2.2-14 Armaturen – Unterteilung nach verschiedenen Kriterien

Medium	Antriebsart	Ausführung	Einsatzort	Einbauart
– Dampf	– Hand	– gegossen	– frei zugänglich	– Flanschenden
– Heizwasser	– elektrisch	– geschmiedet	– (z. B. Bauwerk)	– Einschweißenden
– Kondensat	– pneumatisch	– geschweißt	– Erdeinbau	– Monoflansch
	– hydraulisch			– Zwischenflansch (Sandwich)
				– Gewinde

- Schieber (senkrecht),
- Ventil (parallel),
- Hahn (um Achse drehend) sowie
- Klappe (um Aufhängung drehend).

In der DIN 3211 erfolgt die Benennung von Armaturen durch einen verbindlichen Teil und – falls erforderlich – frei wählbare Zusätze. Danach ist verbindlich, eine Armatur nur mit – Armatur – oder allein oder in Verbindung mit frei wählbaren Zusätzen mit der Grundbauart zu benennen, wie beispielsweise Absperrarmatur, Absperrschieber oder Rückschlagklappe. Die Armaturen lassen sich nach weiteren verschiedenen Kriterien unterteilen (Tabelle 2.2-14).

Je nach Druck- und Temperaturverhältnissen werden die Ausführungsart, der Werkstoff und das Abdichtsystem festgelegt. Für die Wahl der Werkstoffe für Gehäuseteile gilt die DIN 3339. In DIN 3840 wird die Aufnahme von Kräften und Momenten durch das Armaturengehäuse behandelt. Dabei sollte möglichst stets vermieden werden, hohe äußere Belastungen auf die Armatur zu übertragen. Auszuschließen sind Armaturen als Festpunktkonstruktion. Ist dies nicht zu umgehen, sind zusätzliche konstruktive Maßnahmen zur Entlastung der Armatur erforderlich.

Die Reaktion auf äußere Kräfte und Momente ist bei den Grundbauarten der Armaturen verschieden (AGFW 1993a). Dabei sind Schieber relativ unempfind-

lich. Dies trifft insbesondere auf Rundschieber zu, welche sich für die Aufnahme hoher Kräfte und Momente eignen. Gleiches gilt für Klappen. Ventile reagieren dagegen empfindlich auf hohe äußere Belastungen. Bei Hähnen sollten Grenzelastungen vorgegeben werden, um Undichtheiten bzw. ein Verkleben zu vermeiden.

Die Baumaße sind sowohl von der Grundbauart der Armatur als auch von dessen Nenndurchmesser abhängig. Weiteres Kriterium für die Auswahl der Armaturen sind die entsprechenden Kosten. Dabei müssen die Qualitätsanforderungen in ihrer Wechselwirkung zur Wirtschaftlichkeit gesehen werden. Für die Dichtheit im Abschluß wird in beiden Strömungsrichtungen Leckrate 1 bei Prüfung BN gemäß DIN 3230 gefordert.

Hinsichtlich der Betätigung von Armaturen gilt ebenfalls die DIN 3230 sowie als Hinweis das DVGW-Arbeitsblatt W 332¹⁴ – Hinweise und Richtlinien für Absperr- und Regelarmaturen in der Wasserversorgung. Mittlere und größere Nenndurchmesser werden überwiegend mit elektrischen Antrieben versehen. Diese werden eingesetzt, wenn die Betätigung

- manuell zu anstrengend ist,
- in der erforderlichen Zeit manuell nicht erreicht werden kann,
- im Gefahrenfall manuell nicht möglich ist,
- von einer Leitwarte aus vorgesehen ist und
- automatisch durch leittechnische Anbindungen ausgelöst werden soll.

Bei Armaturen mit Übersetzungsgetrieben zur Herabsetzung des Drehmomentes ist das Vorgelege so zu wählen, daß es ohne übermäßige Kraftanstrengungen betätigt werden kann. Zur Vermeidung von Druckstößen sollten die Öffnungs- bzw. Schließzeiten nicht zu kurz sein, aber aus betrieblichen Gründen auch nicht unnötig lang. In Abhängigkeit vom Nenndurchmesser liegen die Öffnungs- bzw. Schließzeiten im Bereich einiger Minuten.

2.2.5.2 Schieber

Der Schieber ist eine Armatur, deren Schlußkörper sich geradlinig und im Abschlußbereich quer/senkrecht zur Strömung bewegt. Absperrschieber werden für mittlere bis größere Nenndurchmesser und für alle Drücke und Temperaturen hergestellt. Hinsichtlich des Absperr-elementes erfolgt eine Unterteilung in:

- Keilschieber,
- Doppelplattenschieber,
- Keilplattenschieber sowie
- Scheibenabschlußschieber.

Ein weiteres Konstruktionskriterium stellt die Form des Deckelstutzens/Gehäuses dar. Hier wird unterschieden in Flach-, Oval- oder Rundschieber. Weitere Formen und Ausrüstungen sind aus der DIN 3352 zu entnehmen.

¹⁴ Dieses Arbeitsblatt befindet sich derzeit in Überarbeitung.

Tabelle 2.2-15 Unterteilung der Oberteile

	außenliegendes Spindelgewinde	außenliegendes Spindelgewinde	innenliegendes Spindelgewinde
Bewegung der Spindel	axiale Hubbewegung und Drehbewegung	axiale Hubbewegung	Drehbewegung
Bewegung des Handrades	steigend	nicht steigend	nicht steigend
Vorteile	– einfache Bauart – Schutz des Spindelge- windes gegen Medium – geringe Betätigungs- kräfte – zweifache Führung der Spindel – Sichtkontrolle der Spindel möglich – Handradstellung ent- spricht Keilstellung	– einfache Bauart – Schutz des Spindelge- windes gegen Medium – geringe Betätigungs- kräfte – zweifache Führung der Spindel – Sichtkontrolle der Spindel möglich – Spindelstellung ent- spricht Keilstellung – geringer Platzbedarf	– geringe Bauhöhe unabhängig von Spindelstellung – keine Verschmut- zung des Spindel- gewindes von außen
Nachteile	– mehr Platzbedarf – schwierige Bedienung durch Änderung der Handradstellung – äußere Verschmutzung an Spindelgewinde möglich	– mehr Fertigungsauf- wand – äußere Verschmut- zung an Spindel- gewinde möglich	– Spindelgewinde ist durch strömendes Medium umgeben – keine Sichtkontrolle der Spindel möglich – innere Verschmut- zung möglich

Schieber mit elastischem Keil oder Keilplatten sind für alle Belastungen anwendbar, während der starre Keil für höhere Drücke und Temperaturen ungeeignet ist. Der flexible Keil zeichnet sich dadurch aus, dass der Abschlußkörper in der Nähe der Dichtflächen nachgeben kann. Er realisiert ein gleichmäßiges Anpressen an die Gehäusesitzflächen. Keilplatten dagegen stützen sich über kugelförmige Druckstücke ab, die punktförmig gegeneinander liegen. Wird der Schieber geöffnet, löst sich der Kraftschluß der Abstützung, wobei ein leichtes Verschieben der Platten gegeneinander auftreten kann.

Parallelschieber werden mit geteilten und ungeteilten Abschlußplatten hergestellt, wobei letztere in Fernwärmenetzen nicht verwendet werden. Bei den geteilten Abschlußplatten wird durch die Spreizkeile, die kurz vor dem vollständigen Schließen auf im Gehäuse angeordnete Anschläge aufsetzen, ein Auseinanderpressen der Platten erreicht. Beim Öffnen des Schiebers gleiten dagegen die Abschlußplatten von den Dichtflächen ab.

Eine weitere Unterteilung kann über die Oberteilausführung der Schieber in Anlehnung an (AGFW 1993a) vorgenommen werden (Tabelle 2.2-15).

Die Werkstoffauswahl ist abhängig von den vorliegenden Betriebsbedingungen. Die DIN 2401 gibt u. a. hierzu Anleitungen. Dabei sollte die Verwendung von Schiebern aus Gußeisen mit Lamellen- oder Kugelgraphit auf Anlagen mit Temperaturen unter 110 °C und mit Drücken unter 16 bar beschränkt bleiben. Für

die Verwendung eines zähen Werkstoffes sprechen Beanspruchungen, die neben dem Innendruck auch noch aus der Wärmedehnung der Rohrleitung hervorgerufen werden. Die DIN 4752, maßgebend für Heißwasser-Heizungsanlagen von 120 °C, fordert, daß die Gehäuse sämtlicher Armaturen in heißwasserführenden Leitungen über DN 50 aus geeigneten zähen Werkstoffen gefertigt sein sollen, auch wenn die Werkstoffe Gußeisen oder Temperguß den Betriebsverhältnissen genügen würden.

Wesentlich höhere Belastungen können bei Einsatz von Stahlguß- oder Schweißkonstruktionen erreicht werden. Dabei muß beachtet werden, daß der Schieber in seiner Gesamtformgebung so steif sein soll, daß die Sitzflächen durch Rohrleitungskräfte und Druckbeanspruchungen nicht verformt werden und somit die Dichtheit beeinträchtigt wird. Der Gehäuseflansch muß außer der Belastung durch das Medium auch noch den Anpreßdruck der Spindel beim vollständigen Schließen aufnehmen.

Hinsichtlich der Verwendung von Schiebern sollten nur vorwiegend Typen benutzt werden, die die in (AGFW 1993a) gestellten Konstruktionsmerkmale aufweisen:

- Flexibler Keil oder Doppelplattenkeil. Der Doppelplattenkeil ist unempfindlich gegen Verformung durch Kräfte und Momente aus der Rohrleitung; außerdem ist er reparaturfreundlich.
- Soweit es die Platzverhältnisse zulassen, sind Schieber mit außenliegender Spindel zu bevorzugen. Bei Verwendung von innenliegender Spindel ist das Kriterium die Stopfbuchenabdichtung, wobei die Anwendung einer innenliegenden Spindel erst ab DN 200 sinnvoll ist.
- Gewährleistung der Leckrate 1 nach DIN 3230; dies wird durch metallische Dichtflächen in entsprechender Ausführung erreicht.

Das nachträgliche Anbauen eines Antriebes sollte kein Hindernis darstellen. Da Ablagerungen im Gehäuseunterteil zu erwarten sind, wäre eine Reinigungsöffnung an der tiefsten Stelle sinnvoll.

2.2.5.3 Ventile

Ein Ventil ist eine Armatur, deren Abschlußkörper sich geradlinig und im Abschlußbereich längs/parallel zur Strömung bewegt. Dabei wird nach der konstruktiven Gestaltung nach DIN 3356 unterschieden (Tabelle 2.2-16). Ein weiteres Konstruktionsmerkmal stellt die Spindeldurchführung dar. Das aufzubringende Moment zum Schließen eines Ventils ist wesentlich höher als bei Schiebern und Klappen, was letztendlich auch zu einer Begrenzung des Nenndurchmessers führt. Ein weiterer Nachteil stellt der erhöhte Druckverlust dar, verursacht durch die stärkere Umlenkung der Strömung. Dieser kann vermindert werden durch die Schrägsitzform.

Ventile weisen gegenüber Schiebern folgende Vorteile auf, die u. a. den bevorzugten Einsatz im unteren Nennweitenbereich begründen:

- geringe Herstellungskosten durch einfachen Aufbau,
- gute Abdichtung auch bei hohen Temperaturen und Drücken,

Tabelle 2.2-16 Ventilbauarten

Gehäuseform	Gehäuseverbindung	Oberteile	Abschlußkörper
– Oberteil gerade	– Flansch	– außenliegendes/ innenliegendes	– Teller oder Kegel
– Oberteil schräg	– verschraubt	– Spindelgewinde mit steigendem/nicht	– Kolben
– Eckform	– selbstdichtend	...steigendem Handrad	– Doppelsitz
– Mehrwegeform	– deckellos	– Spindel ohne Gewinde	– Teller oder Kegel mit Drosselansatz
		– ohne Spindeldurch- führung	– Kolben mit Drosselansatz

- gute Regel- und Drosselmöglichkeit durch entsprechend ausgeführte Abschlußkörper sowie
- einfache Nachschleifmöglichkeit bei Beschädigung des Sitzes.

2.2.5.4 Hähne

Ein Hahn ist eine Armatur, deren Abschlußkörper sich drehend um die Achse quer zur Strömung bewegt, und deren Abschlußkörper in Offenstellung durchströmt ist. Vorteile der Hähne sind die einfache und robuste Bauweise sowie der geringe Druckverlust bei strömungstechnisch günstiger Konstruktion des Öffnungsquerschnittes. Die Dichtflächen gleiten bei Hähnen beim Schaltvorgang aufeinander, so daß nur verminderte Möglichkeiten von Schmutzansammlungen bestehen. Entscheidend dabei ist aber die Härte der Verschmutzung, welche zu bleibenden Schäden an der Dichtfläche führen kann. Ebenso wie bei den Ventilen können verschmutzte oder schadhafte Dichtflächen nachgeschliffen bzw. durch Nachdichten wieder instandgesetzt werden. Der Durchgangsquerschnitt bei voller Öffnung entspricht in den meisten Fällen dem zum gleichen Nenndurchmesser gehörenden Rohrquerschnitt. Zur Betätigung von Hähnen werden meistens ab DN 200 Vorgelege in offenen oder geschlossenen Getriebekästen erforderlich. Insgesamt lassen sich rasche Schaltzeiten realisieren.

Der in den meisten Fällen eingesetzte Kugelhahn besteht aus dem Kugelkücken, der Durchgangsdichtung und dem Gehäuse. Er besitzt verschiedene Vorteile wie

- überwiegend rohrleitungsgleicher Durchgang,
- hohe Stabilität gegen innere und äußere Kräfte,
- kompakte Bauform und dadurch günstige Abmessungen,
- keine Verwendung von Dichtmittel,
- wartungsarm,
- hohe Dichtheit bei niedriger Dichtkraft,
- geschützte Lage der Dichtungen sowie
- Eignung für alle Betriebsdrücke.

Für die Formen und Ausrüstungen für Kugelhähne gilt DIN 3357. Dabei werden Kugelhähne unterschieden nach vollem und reduziertem Durchgang. Die entspre-

chende Bohrung des Kugelhahnes wird durch zwei Gleitringe abgedichtet. Dies wird durch das Anpressen von Weichdichtungen erreicht, welche im allgemeinen aus PTFE bestehen. Der Einsatz des Dichtungsmaterials ist von den Betriebstemperaturen abhängig. Die Kugeloberfläche selbst ist im allgemeinen hart verchromt und poliert, wodurch sich die Verschleißfestigkeit erhöht. Die Spindel wird ebenfalls durch weichdichtende Materialien abgedichtet. Kugelhähne mit schwimmend gelagerter Kugel erhalten die Abdichtung stets auf der Ausgangsseite des Hahnes. Die notwendige Dichtkraft wird bei niedrigen Betriebsdrücken durch die Vorspannung der Dichtelemente aufgebracht. Mit steigendem Betriebsdruck wird die Kugel durch die Druckkraft an den Dichtsitz gepreßt. Bei kleineren Nenndurchmessern kann die Kugel einseitig gelagert werden. Größere Nenndurchmesser und höhere Betriebsdrücke erfordern dagegen eine zweiseitige Lagerung der Kugel im Gehäuse. Grund dafür ist, daß die auf der Kugel wirkende Kraft bei einseitiger Lagerung die zulässige Flächenpressung der Weichdichtungen übersteigen würde. Letztendlich würde dies entsprechend hohe Schaltmomente erfordern. Dabei richtet sich die Art der Lagerung nach den Betriebsdrücken sowie Gehäuse- und Spindelmaterialien. Bei großen Nenndurchmesser kommen u. a. Kugel-, Nadel- oder Gleitlager zur Anwendung.

Die einteiligen und geteilten Gehäuse sowie die Kugel werden nach Nenndrücken und Betriebstemperaturen aus verschiedenen Werkstoffen hergestellt. Überwiegend kommen

- bis PN 10/16 Gußeisen mit Lamellengraphit,
- bis PN 25 Gußeisen mit Kugelgraphit und
- bis PN 40 Gußeisen mit Kugelgraphit bzw. Stahlguß

zur Anwendung. Einige Hersteller verwenden aber den Werkstoff Stahlguß bereits für niedrigere Nenndrücke. Kugelhähne können mit Schwenkantrieben ausgerüstet werden.

Hähne mit zylindrischen Kükten sind mit einem Dichtmittel zu versehen. Deshalb sind in gewissen Zeitabständen diese Hähne nachzudichten, unabhängig von den Betriebsverhältnissen und der Bedienhäufigkeit. Gleichzeitig übernimmt das Dichtmittel auch Korrosionsschutzaufgaben.

Als Dichtung zwischen dem oberen Gehäuseteil und dem Kükten ist eine O-Ringdichtung aus Perbunen oder PTFE eingebaut. Deswegen wird eine Stopfbuchsenpackung nicht benötigt. Das Dichtmittel wird in die Nuten des Kükens gepreßt und somit auf die Dichtflächen verteilt. Ab DN 200 bestehen noch weitere Füllöffnungen am Hahngehäuse. Das Eindichten kann nur bei geöffnetem Hahn erfolgen, wobei zur besseren Verteilung dieser mehrmals zwischendurch bewegt werden muß.

2.2.5.5 Klappen

Eine Klappe ist eine Armatur, deren Abschlußkörper sich drehend um die Achse quer zur Strömung bewegt und in Offenstellung umströmt ist. Der Abschlußkörper besitzt überwiegend die Form einer runden Scheibe. Die Vorteile der Klappe gegenüber anderen Absperrarmaturen bestehen vor allem in der kompakten Bauwei-

se, dem geringen Platzbedarf und der leichten Bedienbarkeit. Klappen werden heute so konstruiert, daß diese beidseitig dicht sind. Dies wird erreicht durch entsprechende Gestaltung der Sitz- und Dichtungsflächen sowie der Sitzgeometrie. Sie sollten aber vorzugsweise in Richtung des Druckrichtungspfeiles eingebaut werden, um die vorhandenen Spiele an der Klappenwelle voll auszunutzen.

Für Klappen gilt DIN 3354. Die Dicke der Scheibe ist abhängig vom Betriebsdruck des Mediums, während die Verwendung der Dichtung von der Betriebstemperatur abhängt. Ist in das Gehäuse der Sitzring der Scheibendichtung aus nicht korrodierenden Werkstoff eingeschweißt, dann trägt die Scheibe die Dichtung. Umgekehrt kann aber auch die Profildichtung im Gehäuse angeordnet werden.

Die heute gebräuchlichen Grundvarianten der Lager der Welle zur Klappenscheibe sind in Abb. 2.2-66 dargestellt. Hierdurch wird das Einschwenken der Scheibe in den Sitzring des Gehäuses, das Wiederabheben und die Dichteigenschaften beeinflusst.

Bei der *zentrisch* gelagerten Klappenscheibe bilden die Achsen der Klappenwelle und -scheibe eine Gerade und sind mittig zur Rohrachse im Gehäuse gelagert. Ein wesentlicher Nachteil liegt darin, daß die Dichtung im Bereich der Wellenzapfen unterbrochen werden muß. Damit wird eine temperaturbeständige Abdichtung der Klappenscheibe gegen das Gehäuse schwierig. Die Abdichtung selbst wird ausschließlich durch Anlegung und Formänderung der elastischen Profildichtung gegen den Sitzring durchgeführt. Beim Schließen der Klappe legt sich diese Profildichtung wechselseitig an die Sitzfläche an. Damit ist der Verschleiß im Sitz sehr hoch, so daß eine ausreichende mechanische und thermische Beständigkeit sowie Abriebfestigkeit des Dichtwerkstoffes gegeben sein muß. Somit kommen Gummidichtungen bis zu Betriebstemperaturen von etwa 100 °C zum Einsatz. In (AGFW 1993a) wird angemerkt, daß mit Elastomeren dichtende Klappen für Betriebstemperaturen von bis 150 °C sowie Betriebsdrücken bis 16 bar sich nicht im Betrieb bewährt haben. Bei Einsatz von PTFE-Dichtungen sind zentrische Klappen bis 130 °C einsetzbar.

Bei der *exzentrisch* gelagerten Klappenscheibe wird der Nachteil der zentrisch gelagerten Klappenscheibe durch die veränderte Lagerung behoben, so daß eine ununterbrochene Klappenscheibendichtung möglich ist. Durch Einschwenken in den überwiegend kegelförmig abgedrehten und senkrecht zur Rohrachse im Gehäuse angeordneten Sitzring wird die Abschlußdichtung gewährleistet. Der Verschleiß im Sitz ist geringer als bei der zentrisch gelagerten Klappenscheibe. Auch

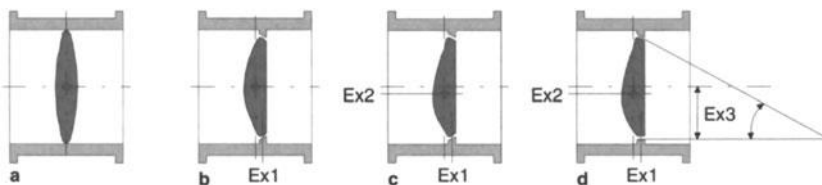


Abb. 2.2-66 Lage der Welle zur Klappenscheibe

a zentrische Lagerung, **b** exzentrische Lagerung, **c** doppelt exzentrische Lagerung, **d** 3-fach exzentrische Lagerung

hier gilt die mechanische und thermische Beständigkeit und Abriebfestigkeit. Somit werden nur Gummidichtungen bis zu Betriebstemperaturen von etwa 130 °C verwendet, wobei diese allerdings aus betrieblicher Sicht nicht zu empfehlen sind. Kleinere Nenndurchmesser bilden dazu eine Ausnahme.

Die *doppelt exzentrisch* gelagerte Klappenscheibe ist außerhalb der Klappenscheibenachse und der Gehäuseachse gelagert. Obwohl die gleichen Hauptmerkmale wie für die zentrisch gelagerte Klappenscheibe gelten, ist das auftretende Reibungsmoment geringer. Für diese Bauform werden in Abhängigkeit der maximalen Betriebstemperatur eingesetzt, z. B. endlose Profildichtung PTFE-Compound mit innenliegender Flachspiralfeder aus nichtrostendem Stahl bis etwa 200 °C, Standard-Dichtung im Gehäuse PTFE/Metallpulver-Compound mit Metallring verstärkt bis etwa 250 °C oder metallische Dichtungen bis etwa 350 °C. Die metallische Dichtung wird vorzugsweise gewählt, um das reibungsfreie Ein- bzw. Ausschwenken der Klappenscheibe in den Gehäusesitz und die gleichmäßige Anpressung über den gesamten Umfang der Dichtungsebene im Abschluß zu gewährleisten. Trotzdem ist der Verschleiß für den Metallsitz hoch.

Diese Klappenart kommt in Fernwärmesystemen überwiegend zur Anwendung. Zusammenfassend sprechen dafür die folgenden Vorteile:

- optimales Einfahren des Dichtringes in den Gehäusesitz,
- erhebliche Reduzierung der Scherbeanspruchung am Dichtring,
- hohe Lebensdauer durch geringeren Verschleiß am Dichtring gegenüber zentrisch und exzentrisch gelagerten Klappenscheiben,
- hohe Dichtkraft bei gleichzeitig geringen Betätigungskräften,
- Entlastung des Dichtringes in Offenstellung,
- ununterbrochene Dichtung um die Klappenscheibe sowie
- Möglichkeit des Dichtringaustausches in Offenstellung.

Eine Weiterentwicklung ist die *3-fach exzentrisch* gelagerte Klappenscheibe, die für Metaldichtungen bis zu Betriebstemperaturen von 450 °C optimiert wurde¹⁵. Sie besitzt gegenüber der doppelt exzentrisch gelagerten Klappe den Vorteil, daß diese keinen Verschleiß im Sitz aufweist. Dies wird gewährleistet, da sich die Dichtflächen erst unmittelbar in der ZU-Stellung berühren, wobei das Schließmoment des Antriebs dann die notwendige Flächenpressung zum dichten Schließen erzeugt. Auch das oft befürchtete Klemmen in der ZU-Stellung bei Temperaturwechseln tritt nicht auf. Der Sitz bleibt elastisch nachgiebig und dicht. Da keine Reibung im Sitz auftritt, reduziert sich der Antriebsbedarf deutlich gegenüber doppelt exzentrisch gelagerten Klappen.

Weitere Anforderungen an die Klappen bestehen darin, daß die Dichtungen der Wellenzapfen auch bei eingebauter Klappe austauschbar sein müssen. Des weiteren müssen alle mediumgeführten Schrauben und die Haltesegmente bzw. der Klemmring aus korrosionsbeständigem Material hergestellt sein.

Die Absperrklappen können mit verschiedenen Antrieben ausgerüstet werden. Größere Nenndurchmesser erfordern ein Getriebe, welches unmittelbar aufgeflanscht wird. Die Getriebe müssen selbsthemmend ausgeführt sein und ent-

¹⁵ Es handelt sich hier um eine doppelt exzentrisch gelagerte Klappenscheibe mit trizentrischer Sitzgeometrie.

sprechend dem auftretenden maximalen Drehmoment der Absperrklappe unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors ausgelegt werden. Sind große Antriebsmomente und lange Schließzeiten notwendig, können Stirnradvorgelege vorge-schaltet werden.

Neben den Absperrklappen werden häufig auch Rückschlagklappen in Fernwärmesystemen eingesetzt. Um bei Abriß der Strömung Druckstöße in Heizwas- sernetzen zu vermeiden, werden Rückschlagklappen mit Dämpfung vorgesehen. Dabei wird die Bauart der doppelt exzentrisch gelagerten Klappenscheibe ver- wendet. Sie öffnet unter Einfluß der positiven Strömung und stellt sich auf einen der Strömung entsprechenden Öffnungsgrad ein. Bei Verringerung der Strömung folgt die Klappenscheibe selbständig bis zum dichten Abschluß der Null- Strömung bzw. Umkehr der Strömung. Die Klappenscheibe ist freischwingend und folgt somit in ihrer Bewegung der Strömung des Mediums. Die Dämpfung wird eingesetzt, wo mit hartem Zuschlagen der freischwingenden Klappenscheibe zu rechnen ist. Dabei kommen verschiedene Konstruktionen zur Anwendung.

Es ist auch möglich, eine Absperrklappe und eine Rückschlagklappe als eine Armatur zu kombinieren. Damit werden sowohl die Funktion des Absperrens als auch das Verhindern des Rückflusses realisiert. Diese Kombination ist dann von Interesse, wenn beispielsweise im stromlosen Zustand die Absperrklappe ge- schlossen werden muß (Schutzzustand); die zweite Funktion als Rückschlagklappe ermöglicht dieses ohne zusätzlichen Aufwand.

2.2.5.6 Einsatzweise der Grundbauarten

Da für die Auswahl einer Armatur meist mehr als eine der genannten Grundbau- arten in Frage kommt, sind in Tabelle 2.2-17 wichtige Kriterien, in Anlehnung nach (AGFW 1993a), qualitativ vergleichend gegenübergestellt, ohne dabei den Anspruch auf deren Vollständigkeit zu erheben. Bei der Wahl der Grundbauart spielen vor allem die Baugröße und die damit verbundenen Kosten eine entschei- dende Rolle.

Tabelle 2.2-17 Qualitativer Vergleich wichtiger Kriterien von Armaturengrundbauarten

Kriterium	Schieber	Ventile	Hähne	Klappen
– Strömungswiderstand	niedrig	mäßig	niedrig	mäßig
– Öffnungs-/Schließzeit	lang	mittel	kurz	kurz
– Eignung für Richtungs- wechsel der Strömung	gut	weniger gut	gut	gut
– Baulänge	klein	groß	mittel	klein
– Bauhöhe	groß	mittel	klein	klein
– Sitz (Flächengröße)	2 breite Sitzringpaare	ein schmales Sitzringpaar	große Sitz- ringfläche	ein schmaler Sitzring
– Verwendungsbereich (bezogen auf Nenndurchmesser)	mittlere bis große	kleine	kleinere bis mittlere	mittlere bis große

2.2.5.7

Sonderarmaturen

Ringkolbenventile. Dies sind Durchgangsventile mit rotationssymmetrischer Strömungsführung, wobei der Durchflußquerschnitt in jeder Stellung ringförmig ist. Ringkolbenventile können sowohl als Absperr-, Drossel- oder Regelorgan entsprechend verschiedener Einbauarten eingesetzt werden. Den Aufbau zeigt Abb. 2.2-67. In dieser Ausführung wird er bis DN 1200 und für eine Nenndruckstufe PN 40 hergestellt. Ringkolbenventile werden ebenfalls als sogenannte Rohrbruchsicherung zum Einsatz gebracht.

Schmutzfänger/Filter. Diese werden eingesetzt, um feste Verunreinigungen vom Medium zurückzuhalten oder abzuscheiden. Sie dienen einerseits zum Reinigen des Mediums, andererseits zum Schutz von Regelarmaturen, Pumpen und anderen Rohrleitungseinbauten. Dabei wird die Größe der zurückgehaltenen Verunreinigungen von der Maschenweite des im Filter angeordneten Siebeinsatzes bzw. von der Durchlässigkeit des filtrierenden Materials bestimmt. Wichtigste Kenngröße des Filters ist das Verhältnis der freien Fläche des Siebeinsatzes zur freien Fläche des Anschlußnennendurchmessers. Um dieses Verhältnis möglichst groß zu halten, ergeben sich mit höheren Reinheitsanforderungen größere Filterabmessungen.

Schmutzfänger in Schrägsitzform (Abb. 2.2-68a) werden überwiegend vor Pumpen in der Saugleitung realisiert. Dabei bestehen verschiedene Möglichkeiten hinsichtlich der Siebform und deren Maschenweite. Das auswechselbare Sieb wird meistens aus rostbeständigem Edelstahl-Drahtgewebe hergestellt.

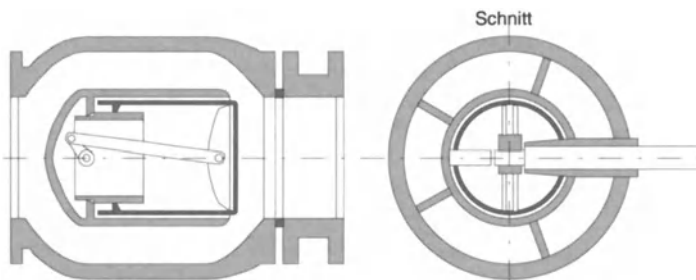


Abb. 2.2-67 Schematischer Aufbau eines Ringkolbenventiles

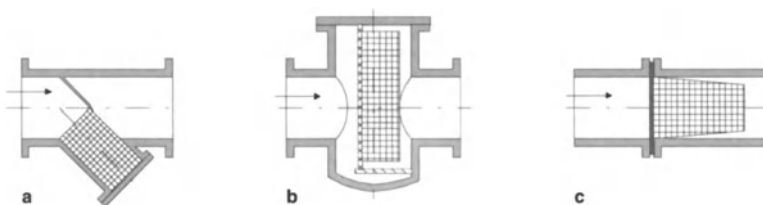


Abb. 2.2-68 Schmutzfänger

a Schrägsitzform, b Topfform, c Hutsieb

Für mittlere und größere Nenndurchmesser kommen Schmutzfänger in Topf-form zur Anwendung (Abb. 2.2-68b). Um im Bedarfsfall eine Reinigung vornehmen zu können, werden diese Art von Schmutzfänger entweder parallel zur durchgehenden Rohrleitung als Bypass oder redundant betrieben.

Ebenso besteht die Möglichkeit, sogenannte Hubsiebe (Abb. 2.2-68c) zum Einbau zwischen Normflanschen einzusetzen. Der Siebkegel besteht dabei überwiegend aus rostbeständigem Edelstahl-Drahtgewebe mit Lochblechstützkörper. Sie werden vor allem bei kleineren Nenndurchmessern verwendet. Bei mittleren und großen Nenndurchmessern müssen dagegen anhand der Baulänge entsprechende Paßstücke eingebaut werden, die den Montageaufwand bei Reinigung nur unnötig verkomplizieren (Beispiel: DN 500 – Baulänge ca. 620 mm).

Der Verschmutzungsgrad der Filter wird mit Hilfe einer Differenzdruckmessung ermittelt.

Bei längeren Streckenabschnitten werden auch sogenannte Schlammtpöfe eingesetzt. Diese sind überwiegend in Bauwerken oder vor und nach Streckenarmaturen eingebaut. Die Verunreinigungen im unterhalb der Hauptleitung angebrachten Schlammtpopf werden entweder über eine daran angebundene Entleerung oder durch Lösen des Blindflansches entfernt. Im letzteren Fall muß aber der betroffene Netzabschnitt außer Betrieb genommen werden. Die Zweckmäßigkeit solcher Schlammtpöfe besteht darin, daß die gesammelten Verunreinigungen nicht wieder in die Hauptleitung gelangen können. Auf längere Zeit hin betrachtet, können die gesammelten Verunreinigungen im Schlammtpopf bei Nichtentfernen einen Schwachpunkt im Fernwärmenetz darstellen, gegeben durch die Aggressivität von Korrosionsprodukten.

Kondensatableiter. Sie haben die Aufgabe, das anfallende Kondensat in Dampfsystemen ordnungsgemäß abzuleiten. Dampfrohrleitungen sollten entwässert werden, damit der Dampf relativ trocken (wo erwünscht) zur entsprechenden Anlage (Wärmeübertragerstation) gelangt und damit bei der relativ hohen Dampfgeschwindigkeit in der Leitung keine Kavitationen bzw. Erosionen und Wasserschläge entstehen. Während des Betriebes fällt wenig Kondensat an, mehr dagegen bei der Inbetriebnahme, bei großen Lastwechseln oder bei extremem Schwachlastbetrieb.

Es gibt Ableiter nach verschiedenen Funktionsprinzipien mit spezifischen Vorzügen und Nachteilen

- Schwimmkondensatableiter,
- thermische Kondensatableiter mit der Unterteilung in thermoelastische und thermostatische Ableiter,
- thermodynamische Kondensatableiter und
- starre Kondensatableiter,

wobei diese Funktionsprinzipien in der DIN 3680 näher beschrieben sind. Die Kondensatableiter sollten variable Arbeitsweisen ermöglichen, um auf Druck- und Mengenschwankungen ohne nachträgliches Verstellen reagieren zu können. Sie müssen so konstruiert sein, daß bei richtigem Einsatz ein Einfrieren, insbesondere bei Freileitungen, unmöglich ist. Die Wartung dieser Kondensatableiter soll ein-

fach und unproblematisch sein und möglichst eine lange Lebensdauer aufweisen. Für Anforderungen und Prüfung der Kondensatableiter gilt DIN 3545 bzw. für die Ablieferungsprüfungen und Nachweise DIN 3549. In DIN 3548 sind die entsprechenden Werkstoffauswahlen festgelegt.

2.2.6

Bauwerke

Erforderliche Bauwerke im Fernwärmenetz werden überwiegend unterirdisch errichtet. Im Bedarfsfall sind für oberirdische Bauwerke Kostenvergleiche durchzuführen. Kleinere Bauwerke werden auch als Schächte bezeichnet. Diese können begehrbar oder nicht begehrbar ausgeführt werden. Sie haben die Funktion, die für den Betrieb und die Überwachung notwendigen Bauteile und Einrichtungen aufzunehmen. Dazu zählen z. B. Streckenabsperrungen, Leitungsabzweige, Dehnungsausgleicher (Abb. 2.2-69). Bei verschiedenen Verlegeverfahren dienen Schächte auch zur Rohrnetzkontrolle.

Grundsätzlich sind Bauwerke mit erhöhten zusätzlichen Kosten versehen. Dazu kommt, daß diese nur mit erheblichem Aufwand zwischen den Leitungen anderer Versorgungsmedien im Straßenquerschnitt untergebracht werden können. Deshalb sollten nur dort Bauwerke errichtet werden, wo diese auch erforderlich sind und einen entsprechenden Verwendungszweck erfüllen. Bei Schächten für Streckenarmaturen sind alle bestehenden Vor- und Nachteile gegenüber dem Einbau von erdverlegten Armaturen abzuwägen. Sinnvoll ist auch, bei dieser Möglichkeit beispielsweise mehrere Leitungsabzweige oder Leitungen anderer Versorgungsmedien in einem Schacht zusammenzuführen.

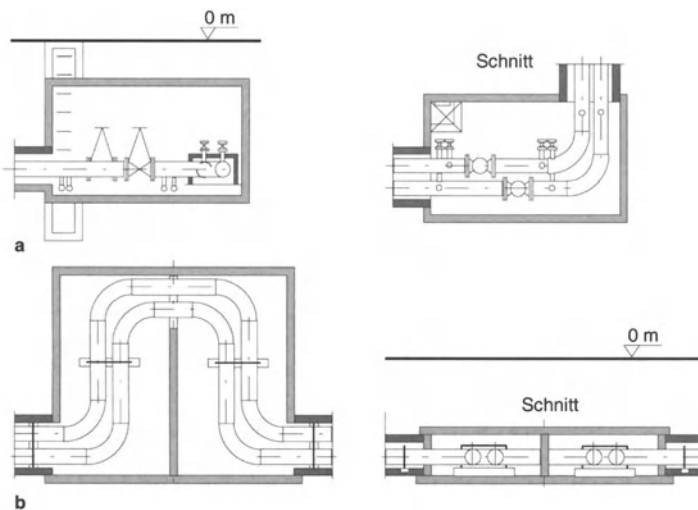


Abb. 2.2-69 Bauwerke

a Armaturenschacht, **b** Schacht für Dehnungsbogen

Die Ausführungsart kann verschieden sein, entweder vor Ort betoniert, gemauert oder aus Fertigteilen. In der Regel werden Schächte aus Stahlbeton realisiert, da diese sehr anpassungsfähig und variabel einsetzbar sind. Werden Schächte in wasserführende Böden eingebaut, müssen sie so hergestellt werden, daß keine Feuchtigkeit in den Innenraum eindringen kann. Soweit es die Platzverhältnisse zulassen, können Fertigteilschächte kostengünstiger sein, insbesondere durch die Verkürzung der Bauzeit oder in Verbindung mit einer erforderlichen Grundwasserabsenkung. Fertigteilschächte sind sofort belastbar. Die Schächte sind dabei so zu bemessen, daß der erforderliche Arbeitsraum für die Bedienung der Armaturen sowie für deren Instandhaltung zur Verfügung steht. Die vorgeschriebenen Abmessungen sind in (AGFW 1993a) aufgelistet. Mindestanforderungen für neu zu erstellende Schächte sind im AGFW-Arbeitsblatt FW 433 enthalten.

Schwerpunkte hinsichtlich der Abdichtungen bei der Schachtausführung bilden im einzelnen die Grundplatte, die Schachtwände und deren Rohrdurchführungen, die Schachtdecke sowie deren Einstiegs- und Montageöffnungen. Die Grundplatten und die Schachtwände sind gegen Grundwasser bzw. vorkommendes Druckwasser ausreichend zu schützen. Die Schachtdecke ist laut Statistik das schadenanfälligste Bauteil im gesamten Bauwerk (AGFW 1993a). Durch Kondenswasser, das unter der Decke hängenbleiben kann, und Oberflächenwasser, welches insbesondere durch die Einstiegs- und Montageöffnungen dringt, wird an der unteren Bewehrungslage Korrosion ausgelöst. Weitere Schädigungen sind die Folge, was letztendlich bis zum vollkommenen Verlust der Tragfähigkeit der Schachtdecke führen kann. Als Vorsorgemaßnahmen sollen Einstiegs- und Montageöffnungen so angeordnet werden, daß möglichst wenig Oberflächenwasser eindringen kann. Gleichzeitig wird empfohlen, diese Öffnungen in verkehrsrühigen Zonen vorzusehen, um somit ungehindert Wartungen durchführen zu können. Die lichten Öffnungen der Abdeckungen müssen mindestens 600 mm betragen, wobei Montageöffnungen wesentlich größer oder durch Entfernen von Deckenplatten realisiert werden können. Sind die Öffnungen befahrbar, so müssen sie entsprechend der Verkehrsbelastung ausgelegt werden. Um an den Schachtinnenwänden keine Bildung von Kondenswasser zuzulassen, werden zur Lüftung eine perforierte Einstiegsöffnung oder separate Lüftungsrohre realisiert.

Insbesondere bei großen Nenndurchmessern werden Bauwerke gleichzeitig verwendet mit Festpunktkonstruktionen, um somit das Schachtgewicht zur Abtragung der Kräfte und Momente vom Festpunkt zu nutzen. Dabei können die Festpunktkonstruktionen innerhalb oder außerhalb des Schachtes realisiert werden, wobei die Kosten eine wesentliche Rolle spielen.

In der letzten Zeit gewannen die Fertigteilschächte an Bedeutung. Sie bestehen aus einem fünfseitig geschlossenen Körper als eigentlichem Schacht und der Deckenplatte. Es besteht auch die Möglichkeit, die Bodenplatte separat herzustellen. Vorteilhaft gegenüber einem Schacht, der aus mehreren Platten zusammenmontiert wurde, ist die geringe Anzahl von Fugen, besonders bei von außen anstehendem Wasser. Die benötigten Öffnungen für die Rohrdurchführungen können werkseitig vorgesehen oder durch Kernbohrungen nachträglich hergestellt werden.

Größere Bauwerke, wie z. B. für unterirdische Druckerhöhungs- oder Verteilerstationen großer Nenndurchmesser, sind Sonderkonstruktionen. Dazu zählen auch

Bauwerke für begehbare Kanäle. Dabei handelt es sich um keine typenmäßigen Projekte und werden somit in diesem Rahmen nicht weiter betrachtet.

2.2.7 Druckerhöhungsstationen

Neben den Umwälzpumpen in den Erzeugeranlagen kann es durchaus erforderlich werden, zusätzliche Druckerhöhungen zu realisieren. Diese Druckerhöhungspumpen haben die gleiche Funktion wie Umwälzpumpen, sie erhöhen den zu niedrigen Druck an einer bestimmten Stelle des Fernwärmenetzes. Die Gründe für deren Realisierung können verschieden sein. Beispielsweise können die vorhandenen Umwälzpumpen den Druck an einer bestimmten Stelle im Fernwärmenetz (Netzschwachpunkt) nicht abdecken. Um dadurch die Druckdifferenz am Erzeugerausgang nicht unnötig zu erhöhen, kann eine Druckerhöhungsstation die wirtschaftlichere Variante darstellen. In manchen Fällen ist auch eine Erhöhung der Druckdifferenz nicht möglich, da dies dann zur Überschreitung der Auslegungsdrukstufe führt. Weiterhin entstehen zusätzliche Kosten bei den sich unmittelbar dahinter anschließenden Wärmeübertragerstationen durch die erforderlichen Druckreduzierungen.

Die zweite Variante wäre die Beibehaltung der vorhandenen Nenndruckstufe bei gleichzeitiger Erhöhung der Umwälzmenge durch neue Umwälzpumpen, um somit die benötigten Investitionskosten zu minimieren.

Ebenfalls sind Druckerhöhungen erforderlich, wenn der Rücklaufdruck, gegeben durch vorhandene Anlagen, zu niedrig wird.

Die Einbindung einer Druckerhöhungsstation kann verschieden sein; entweder getrennt in Vor- bzw. Rücklauf oder gleichzeitig in Vor- und Rücklauf. Dabei ist zu beachten, daß je nach Vermaschung des Fernwärmenetzes in Einzelfällen die Umkehr der Förderung in entgegengesetzter Richtung möglich sein muß.

Eine Druckerhöhungsstation für Vor- und Rücklauf zeigt Abb. 2.2-70. Bei getrennter Druckerhöhung kommt dann nur die entsprechende Pumpengruppe zur Anwendung. Die Anzahl der Pumpen hängt im wesentlichen von der Umwälzmenge, der erforderlichen Verfügbarkeit und Benutzungsstunden im Jahr sowie

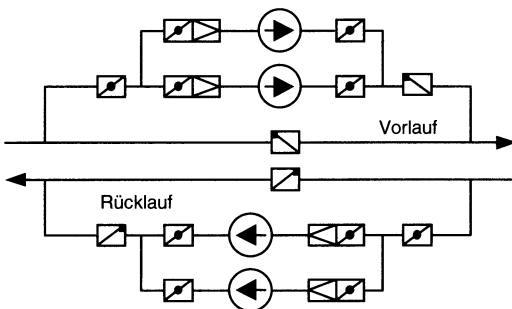


Abb. 2.2-70 Vereinfachtes Schema einer Druckerhöhungsstation für Vor- und Rücklauf

von den Investitionskosten der Druckerhöhungsstation ab. Die Druckerhöhungsstationen werden ganz bzw. teilweise unterirdisch oder oberirdisch in entsprechenden Bauwerken realisiert. Entscheidend sind die örtlichen und wirtschaftlichen Gegebenheiten.

Bei der Auswahl der Druckerhöhungspumpen gelten grundsätzlich dieselben Kriterien, wie für die Umwälzpumpen. Überwiegend werden einstufige Spiralgehäusepumpen einflutig für Leistungen bis etwa 500 kW oder zweiflutig für große Leitungen verwendet.

Hinsichtlich des Betriebes der Druckerhöhungsstation sind besonders die Ein- und Ausschaltvorgänge von Bedeutung. Um Druckstöße zu vermeiden, werden die Rückschlagklappen, vor allem die im jeweiligen Hauptstrang, mit Dämpfungseinrichtungen versehen, um somit eine entsprechende Öffnungs- bzw. Schließcharakteristik zu gewährleisten. Besondere Aufmerksamkeit ist der Verhaltensweise der Druckerhöhungsstation im Störfall zu widmen, besonders die Gewährleistung der Druckhaltung betreffend.

2.2.8 Beimischstationen

In besonderen Fällen wird es erforderlich, die Vorlauftemperatur mit Hilfe von Rücklaufwasser auf ein erforderliches Niveau zu bringen. Dies kommt zur Anwendung, wenn ein vorhandenes Fernwärmenetz erweitert werden soll, was aber durch das gewählte Verlegeverfahren in seiner maximalen Betriebstemperatur begrenzt ist (z. B. Kunststoffmantelrohrsysteme oder flexible Systeme).

Die Beimischstation (Abb. 2.2-71) ist so konzipiert, daß bei Überschreiten der Vorlauftemperatur die beiden Absperrarmaturen im Vor- und Rücklauf automatisch geschlossen werden, um somit das nachfolgende Leitungsnetz zu schützen. Die Ruhedruckauflastung wird über einen separaten Bypass im Vorlauf mit entsprechender Druckreduzierung ermöglicht. Die Einbindung der Beimischleitung ist so festzulegen, daß während des Schließens der Absperrarmatur im Vorlauf, auch bei Ausfall der Beimischpumpe, nur durch die Beimischung heruntergekühltes Heizwasser in das nachgeschaltete Netz gelangt.

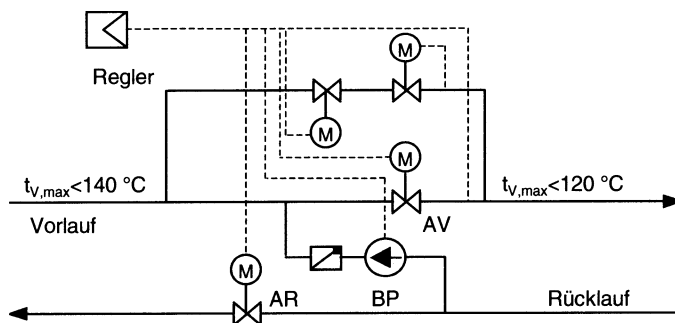


Abb. 2.2-71 Beimischstation

AV Absperrarmatur Vorlauf, AR Absperrarmatur Rücklauf, BP Beimischpumpe

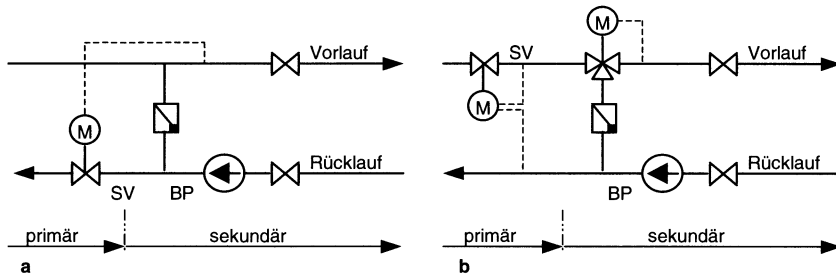


Abb. 2.2-72 Vereinfachte Schemen für Beimischstationen mit differenzdrucklosem Anschluß
SV Stellventil, BP Beimischpumpe

Bei kleineren Leistungen kommen auch Beimischstationen mit differenzdrucklosem Anschluß zur Anwendung (Glück 1985). Dabei befindet sich die Umwälzpumpe direkt im Rücklauf, wodurch die erforderliche Druckdifferenz erzeugt wird (Abb. 2.2-73). Der Temperaturregelkreis beeinflusst über das Stellventil im Primärücklauf die Abspeise- und damit auch die erforderliche Einspeisemenge. Zwischen Sekundärvorlauf und -rücklauf besteht nur der in der Beimischleitung verursachte Differenzdruck, während die primärseitige Druckdifferenz im Stellventil abgedrosselt wird. Die Beimischpumpe sollte zur Abstimmung der nachgeschalteten Abnehmer drehzahlregelt ausgeführt werden. Die Installation der Beimischpumpe und des Stellventils im Vorlauf beeinflussen die Funktion nicht, jedoch die Betriebs- und Ruhedruckverhältnisse.

Die Variante aus Abb. 2.2-73a hat zum Nachteil, daß ständig ein Beimischvolumenstrom zum Vorlauf fließt. Problematisch für die Temperaturregelung ist der Fall, wenn die geforderte sekundärseitige Vorlauftemperatur mit der primärseitigen übereinstimmt. Damit schlagen die schwankenden Primärdifferenzdrücke voll auf die Sekundärseite durch und beeinflussen somit den Massedurchsatz. Die Variante aus Abb. 2.2-73b besteht im Einsatz eines Dreiwegeventils und einer zusätzlichen Druckdifferenzregelung mit dem Stellventil. Die Drücke sind an den beiden Eingängen des Dreiwegeventils nahezu gleich, da diese Regelung einen Druckabgleich zwischen Vor- und Rücklauf bewirkt. Durch die primärseitige Druckdifferenzregelung können sich Druckschwankungen sekundärseitig nicht mehr auswirken. Somit wird auch der spezielle Fall – Gleichheit der Primärvorlauftemperatur und der geforderten Sekundärvorlauftemperatur – beherrscht. Detaillierte Ausführungen sind in (Glück 1985) zu finden.

Gleichzeitig kann neben der Beimischung eine Druckreduzierung für das nachgeschaltete Netz erfolgen. Ist dieses Netz in einer kleineren Druckstufe ausgeführt, ist eine Absicherung über entsprechende Sicherheitsventile erforderlich.

Die Beimischstationen werden ganz bzw. teilweise unterirdisch oder oberirdisch in entsprechenden Bauwerken realisiert. Entscheidend sind die örtlichen und wirtschaftlichen Gegebenheiten. Bei der Auswahl der Beimischpumpen gelten grundsätzlich dieselben Kriterien, wie für die Umwälzpumpen. Es kommen überwiegend einstufige Spiralgehäuse zur Anwendung.

2.2.9 Wärmeübertragerstationen

Zur Übergabe von Wärme aus einem Heizwasser-Primärsystem an ein Sekundärsystem oder von einem Dampfsystem an ein Sekundärsystem können besondere Stationen erforderlich sein. Sie werden insbesondere bei Heizwassersystemen auch gebaut zur Netzabgrenzung in Gebieten mit großen Höhenunterschieden bzw. zur Abgrenzung der Versorgungsgebiete unterschiedlicher Betreiber. Neuererschließungen von Versorgungsgebieten bei Dampfsystemen werden heutzutage überwiegend auf der Sekundärseite heizwasserseitig erschlossen. Gleiches trifft auch für Sanierungsmaßnahmen in bestehenden Dampfsystemen zu, d. h. es erfolgt eine Umstellung auf Heizwasser. Dies bringt den Vorteil einer höheren Wirtschaftlichkeit mit sich, u. a. verursacht durch geringere Verluste.

Wärmeübertragerstationen werden überwiegend oberirdisch realisiert. Dies gilt besonders für große Leistungen, wobei entscheidend für die Wahl der Bauart die örtlichen Gegebenheiten und wirtschaftliche Aspekte sind.

Es kommen sowohl liegende als auch stehende Wärmeübertrager zur Anwendung. Je nach Konstruktionsart wird das wärmeabgebende Medium innerhalb oder außerhalb des Rohrbündels geführt. Neben den Rohrbündel-Wärmeübertrager werden auch Platten-Wärmeübertrager verwendet, wobei letztere in ihrer Leistungsübertragung begrenzt sind.

Außer der Regelung sind in einer Wärmeübertragerstation die Umwälzpumpen für den Transport des Heizwassers ins Sekundärnetz und eine eigene dem Sekundärnetz zugeordnete Druckhaltung installiert. Dabei ist für die Ableitung des überschüssigen Heizwassers bei Aufheizung und für Zuspisungen von aufbereitetem Wasser bei Kontraktion bzw. Netzverlusten im Sekundärnetz zu sorgen. Für Heizwassersysteme entsprechend nachgeschaltete Druckhaltesysteme sind im Abschn. Druckhaltung näher beschrieben.

Im folgenden werden Wärmeübertragerstationen hinsichtlich der beiden Medien Heizwasser und Dampf erläutert.

Heizwasser. Eine ausgeführte Wärmeübertragerstation Heizwasser/Heizwasser zeigt Abb. 2.2-73. Die Anzahl der Wärmeübertrager richtet sich nach der zu übertragenden Leistung und der erforderlichen Versorgungssicherheit der angeschlossenen Abnehmer. Gleiches trifft auch für die sekundärseitigen Umwälzpumpen zu. Eine Unterteilung in mehrere Anlagenbaugruppen bringt zudem den Vorteil einer variableren und wirtschaftlicheren Leistungsabführung, insbesondere bei Minimallast in den Sommermonaten. Gleichzeitig besteht eine entsprechende Redundanz im Störfall.

Die primärseitigen Drücke liegen fast ausschließlich immer höher als die auf der Sekundärseite. Damit wird im Leckfall eines Wärmeübertragers verhindert, daß das meist qualitativ schlechtere Heizwasser des Sekundärsystems in das Primärsystem überströmt.

Die Regelung der sekundärseitigen Vorlauftemperatur erfolgt über eine Kaskadenregelung der Wärmeübertrager durch jeweiliges Zuschalten eines Wärmeübertragers sowie zusätzliches Regeln des primärseitigen Volumenstromes.

Dampf. Eine ausgeführte Wärmeübertragerstation Dampf/Heizwasser zeigt Abb. 2.2-74. Auch hier richtet sich die Anzahl der Wärmeübertrager bzw. der Umwälzpumpen nach der zu übertragenden Leistung und der erforderlichen Versorgungssicherheit der angeschlossenen Abnehmer. Die Vorteile einer entsprechenden Unterteilung in mehrere Anlagenbaugruppen sind identisch mit denen der Wärmeübertragerstation Heizwasser/Heizwasser.

Die Regelung der sekundärseitigen Vorlauftemperatur erfolgt zum einen über die Kaskadenregelung der Wärmeübertrager durch jeweiliges Zuschalten eines Wärmeübertragers, zum anderen durch eine Kondensatanstauregelung. Dabei wird der zugeführte Dampf kondensiert und über die Kondensatpumpe und ein Dreiwegeventil in das sich anschließende Kondensatnetz gefördert. Der Regelkreis hat die Aufgabe, über den Höhenstand des Kondensates und somit Abdeckung der Wärmeübertragerfläche die sekundärseitige Vorlauftemperatur zu regeln. Die Verhinderung eines Trockenlaufens der Kondensatpumpe wird über einen Mindestwasserstand gewährleistet. Der Dampfdruck wird in diesem Beispiel konstant gehalten (Nachdruckregelung).

Bei der Kondensatanstauregelung mittlerer und größerer Leistungen ist die Bauart des Wärmeübertragers – stehend oder liegend – im Gegensatz zu (AGFW 1993a) bedingungslos. Der Verfasser hat bereits Anlagen in beiden Bauarten ausgeführt. Es besteht die Möglichkeit, die Temperatur des Heizwassers am Austritt des Wärmeübertragers durch ein Regelventil in der Dampfleitung zu regeln. Der Sollwert für die Temperatur erfolgt direkt in Abhängigkeit von der Tagesmitteltemperatur. Die Vorlauftemperatur auf der Sekundärseite kann aber auch durch einen zweiten Regelkreis, in dem Rücklaufwasser geregelt beigemischt wird, der Tagesmitteltemperatur angepaßt werden.

Um Ausdampfungen auf der Heizwasserseite zu verhindern, sollte das Dampfregelventil bei dessen Unterschreitung des Mindestdruckes durch einen Druckwächter geschlossen werden. Ebenso muß der Ruhedruck auf der Heizwasserseite über dem Dampfdruck liegen, um bei Ausfall der Umwälzung ebenfalls Ausdampfungen zu vermeiden.

Das Kondensat kann aber auch durch Kondensathebeanlagen abgefördert werden. Dazu ist ein entsprechendes Druckgefälle größer 2 bar zwischen dem Kondensatdruck im Wärmeübertrager und der Kondensatförderleitung erforderlich. Auch ist die Förderleistung einer Anlage auf etwa 20 t/h begrenzt, wobei eine Parallelschaltung mehrerer Anlagen mit erhöhtem Regelaufwand möglich ist. Durch die diskontinuierliche Förderung der Kondensathebeanlage ist eine Kondensatanstauregelung kaum realisierbar. Im konkreten Fall ist eine wirtschaftliche Bewertung zwischen den Varianten Kondensatpumpen und Kondensathebeanlage durchzuführen.

Als Zusatzwasser für die Druckhaltung des Sekundärnetzes wird Kondensat verwendet, welches über eine Pumpe in den Ausgleichsbehälter gefördert wird. Die Abführung bei zu hohem Wasserstand im Ausgleichsbehälter hängt von der Wasserqualität ab. Stimmt die Wasserqualität des Heizwassers, ist eine Rückförderung in das Kondensatnetz über eine separate Pumpe möglich, sonst wird es direkt mit Hilfe einer Kühleinrichtung in das Abwassersystem gefördert.

2.2.10

Hausanschlußstationen

An ein Fernwärmesystem kann jedes Gebäude angeschlossen werden, sofern eine geeignete Hausanlage für Heizwasser oder Dampf vorhanden ist oder erstellt wird. Beim Anschluß an ein vorhandenes Fernwärmesystem bestimmen dessen Betriebsverhältnisse die Ausstattung der Hausstation. Dagegen ist bei der Planung eines neuen Fernwärmesystems die Art der anzuschließenden Gebäude zu berücksichtigen.

Durch unterschiedliche Wärmemedien, verschiedene Netzbau- und Betriebsweisen und die vielfgestaltigen Verwendungsmöglichkeiten der Wärme ergeben sich zahlreiche Ausführungsmöglichkeiten für die Übergabestation der Hausanlagen. Entsprechende Einzelheiten über die Bedingungen für die Wärmelieferung werden in einem Fernwärmeversorgungsvertrag des liefernden Unternehmens festgelegt.

Das Bindeglied zwischen der eigentlichen Hausanschlußleitung und der Hausanlage ist die Hausstation. Die Hausstation besteht aus der Übergabestation und der Hauszentrale. Dabei können die Übergabestation und die Hauszentrale baulich getrennt oder in einer Einheit als Kompaktstation zusammengefaßt sein.

Die Hausstation kann für den direkten oder den indirekten Anschluß konzipiert werden. Das Fernwärmeversorgungsunternehmen entscheidet über die Anschlußart. Dabei ist für Heizwasser die DIN 4747 und für Dampf die DIN 4750 zu beachten.

Wird die Hausanlage vom Heizmedium des Fernwärmesystems durchströmt, liegt ein direkter Anschluß vor. Die Realisierung erfolgt im einfachsten Fall nur mit Absperrarmaturen und Wärmemengenmessung, kann aber auch aus technischen Gründen zusätzlich eine Beimisch- sowie Druckerhöhungsstation umfassen.

Ist das Heizmedium der Hausanlage über einen Wärmeübertrager vom Fernwärmesystem getrennt, liegt dagegen ein indirekter Anschluß vor. Die Drücke werden nicht auf die Hausanlage übertragen. Des weiteren werden Temperatur, Betriebsdruck und chemische Beschaffenheit des Wärmemediums in der Hausanlage durch die Hauszentrale vorgegeben. Im Regelfall sieht man diese beim Übergang von Dampfsystemen auf Heizwassersysteme oder bei der Hintereinanderschaltung von Heizwassersystemen unterschiedlicher Druckstufen vor. Weiterhin wird die Realisierung indirekter Anschlüsse oftmals auch mit den erhöhten Anforderungen an die Versorgungssicherheit, mit der Forderung an überschaubare Netzgrößen begründet. Beim indirekten Anschluß müssen die nachgeschalteten Netze bzw. Gebäudeanlagen eigene Druckhalteanlagen besitzen. Um den technischen Aufwand bei der Errichtung und dem Betrieb von Sekundärnetzen zu begrenzen, werden mitunter Überström- und Füllleinrichtungen aus den vorgeschalteten Primärnetzen installiert. Sind entsprechende Rückspeiseanlagen realisiert, die bei Volumenexpansion das sogenannte Überschußwasser in das Primärnetz zurückfördern, dann tritt allerdings ein Vermischungseffekt ein. Dies ist insbesondere von Bedeutung, wenn das Wasser im Sekundärnetz eine schlechtere Wasserqualität gegenüber den Wasser des Primärnetzes besitzt. Grundsätzlich ist die indirekte Wärmeübergabe mit großem apparatetechnischen Aufwand verbunden.

Die Übergabestation ist das Bindeglied zwischen der Hausanschlußleitung und der Hauszentrale. Diese dient dazu, die vertraglich vereinbarten Parameter – Druck, Temperatur und Volumenstrom – an die Hauszentrale zu übergeben. Gleichzeitig sind Meßeinrichtungen zur Verbrauchserfassung untergebracht.

Über die Herstellung, Montage oder Änderung der Übergabestation entscheidet das Fernwärmeversorgungsunternehmen, wobei für die Wartung der Eigentümer der Station verantwortlich ist.

Im folgenden werden für die beiden Wärmemedien – Heizwasser und Dampf – sowohl der direkte als auch der indirekte Anschluß vorgestellt.

Heizwasser. Die Netzvorlauftemperatur wird durch das Fernwärmeversorgungsunternehmen festgelegt. Diese kann höher liegen als die zulässige Vorlauftemperatur der Hauszentrale. In diesem Fall sind besondere technische Maßnahmen zu ergreifen, wie z. B. Rücklaufbeimischung. Nach der Art der Regelung der Netzvorlauftemperatur wird unterschieden in gleitende, konstant/gleitende und konstante Fahrweise.

Bei der *gleitenden Fahrweise* wird die Netzvorlauftemperatur in Abhängigkeit von der Witterung, speziell der Außenlufttemperatur, geregelt (Abb. 2.2-75).

Die gleitende Fahrweise wird überwiegend für Heizungsanlagen ohne Wassererwärmung angewandt. Bei der *konstant/gleitenden Fahrweise* werden Raumheizungs-, Wassererwärmungs- und lufttechnische Anlagen betrieben. Mit fallender Außentemperatur steigt die Netzvorlauftemperatur gleitend, wobei umgekehrt diese wegen der Wassererwärmung nicht unter 60-70 °C abgesenkt werden kann.

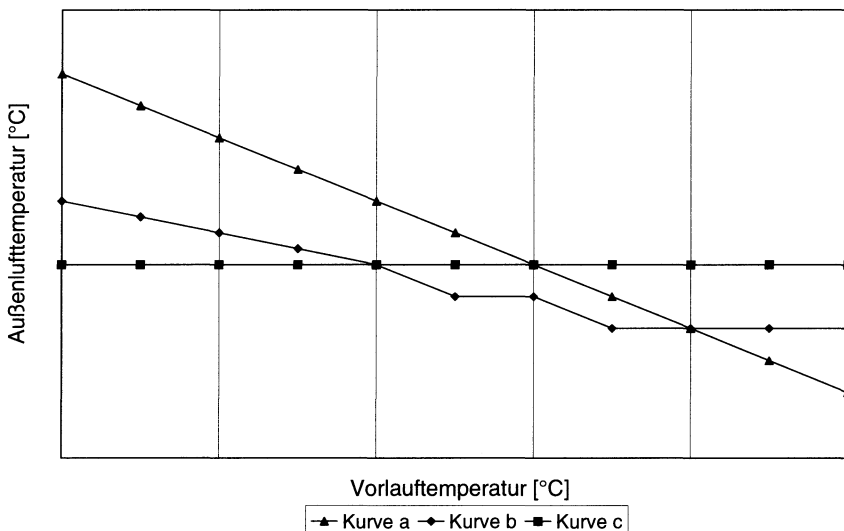


Abb. 2.2-75 Betriebsweise von Fernwärmesystemen

a gleitende Fahrweise, **b** konstant/gleitende Fahrweise, **c** konstante Fahrweise

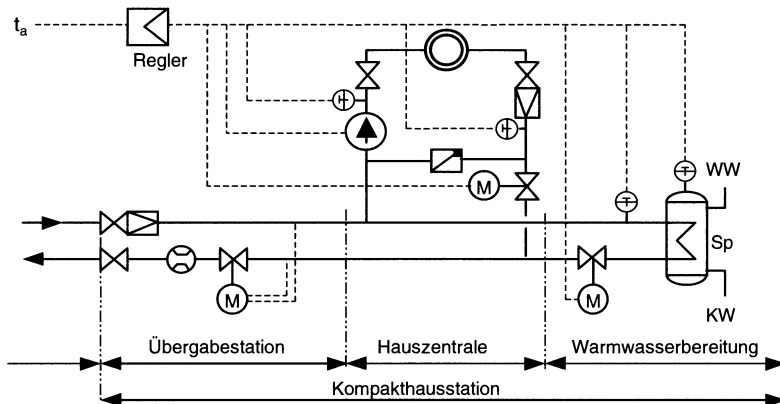


Abb. 2.2-76 Vereinfachtes Schaltschema für Hausstation direkter Anschluß
 Sp Speicher, KW Kaltwasser, WW Warmwasser

Die Netzvorlauftemperatur wird bei der *konstanten Fahrweise* unabhängig von der Außentemperatur gefahren. Diese Fahrweise kommt insbesondere bei industriellen Abnehmern für entsprechende Produktionsprozesse (z. B. Lackiereinrichtungen) zur Anwendung. Der Nachteil bei dieser Fahrweise liegt in den dadurch bedingten hohen Rücklauftemperaturen, die wiederum zu einer großen Netzbelastung führen. Eine weitere Auskühlung ist durch nachgeschaltete Anlagen möglich.

Bei Heizwassersystemen sind sowohl der direkte als auch der indirekte Anschluß möglich. Ein vereinfachtes Schaltschema für eine Hausstation mit einem geregelten Heizkreis mit Beimischung für die Raumheizung und einem geregelten Heizkreis für die Warmwasserbereitung im Vorrang zeigt Abb. 2.2-76. Geregelt wird die Vorlauftemperatur des Heizmediums. Als Führungsgröße sollte nicht die momentane, sondern eine gemittelte Außentemperatur dienen. Verbrauchergruppen mit unterschiedlichen Anforderungen sind einzeln zu regeln. Das Stellventil für die Beimischregelung wird anhand des maximal erforderlichen Heizwasservolumenstromes und dem am Einbauort vorliegenden Differenzdruck ausgelegt.

Eine Temperatur- bzw. Druckregelung nach DIN 4747 ist erforderlich, wenn die entsprechenden Parameter vor der Übergabestation größer sind als die maximal zulässigen Parameter der Hausanlage. Im Fall einer Temperaturregelung müssen die Stellventile eine Sicherheitsfunktion (Notstellfunktion) nach DIN 32730 aufweisen. Bei Netzvorlauftemperaturen bis 120 °C ist ein Sicherheitstemperaturwächter vorzusehen.

Die Einhaltung der Rücklauftemperatur ist durch den Aufbau und die Betriebsweise der Hausanlage sicherzustellen. Gegebenenfalls ist eine gleitende, der Außentemperatur angepaßte Rücklauftemperaturbegrenzung vorzusehen, entweder über die Begrenzung des Stellventiles der Vorlauftemperaturregelung oder durch ein separates Stellventil.

Vereinfachte Schaltschemen für eine Hausstation mit indirektem Anschluß zeigt Abb. 2.2-77. Geregelt wird die Vorlauftemperatur des Heizmediums. Sind

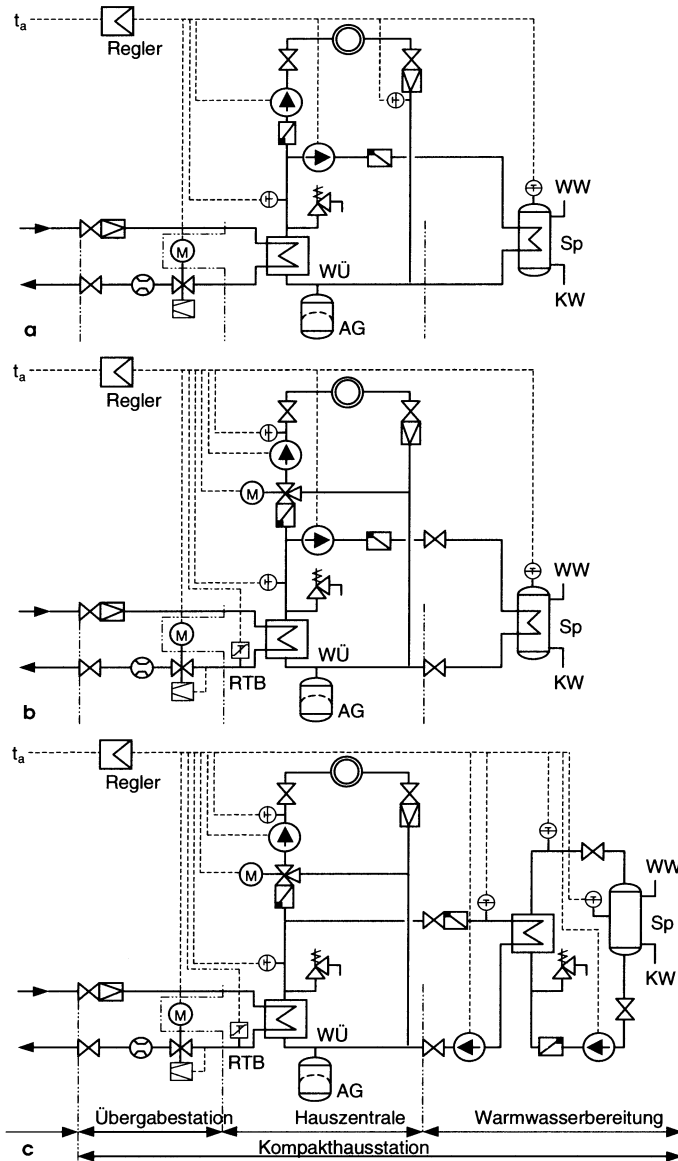


Abb. 2.2-77 Vereinfachte Schaltschemen für Hausstation (HAST) indirekter Anschluß
a HAST bis 25 kW mit einem geregelten Heizkreis (HK) für die Raumheizung (ungemischt) und einem geregelten HK für die Warmwasserbereitung (WWB), ungemischt im Vorrang mit Speicher 150 l, **b** HAST über 25 kW mit einem geregelten HK für die Raumheizung (gemischt) und einem geregelten HK für die WWB, ungemischt im Vorrang mit Speicher größer 150 l, **c** HAST über 25 kW mit einem geregelten HK für die Raumheizung (ungemischt) und einem geregelten Heizkreis für die WWB (ungemischt), WWB als Speicherladeprinzip
 WÜ Wärmeübertrager, AG Ausdehnungsgefäß, Sp Speicher, KW Kaltwasser, WW Warmwasser, RTB Rücklauftemperaturbegrenzer

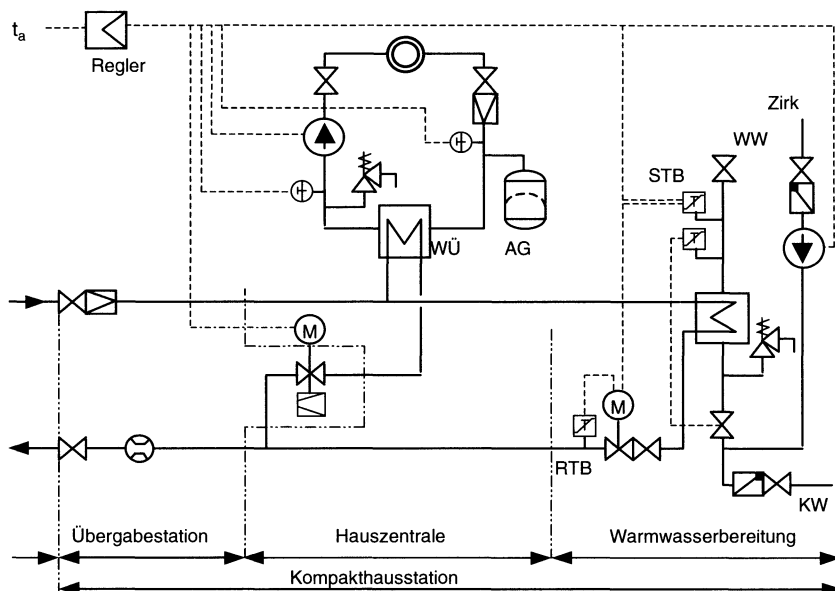


Abb. 2.2-78 Vereinfachtes Schaltschema für eine Hausstation mit indirektem Anschluß eines geregelten Heizkreises für die Raumheizung (ungemischt) und direktem Anschluß einer Warmwasserbereitung im Durchflußprinzip

WÜ Wärmeübertrager, AG Ausdehnungsgefäß, RTB Rücklauftemperaturbegrenzer, KW Kaltwasser, Zirk Zirkulation, WW Warmwasser, STB Sicherheitstemperaturbegrenzer

mehrere Verbrauchergruppen mit unterschiedlichen Anforderungen an einem Wärmeübertrager angeschlossen, so müssen diese einzeln mit einer nachgeschalteten Regelung versehen sein. Eine Bedarfsaufschaltung auf das primärseitig angeordnete Stellventil der Heizmitteltemperaturregelung wird empfohlen.

Für primärseitig angeordnete Stellventile sind Durchgangsventile zu verwenden. Die primär- und sekundärseitigen Stellventile werden anhand des jeweilig maximal erforderlichen Volumenstromes und dem am Einbauort vorliegenden Differenzdruck ausgelegt.

Maßgebend für primärseitig angeordnete Stellventile ist der Minstdifferenzdruck, wobei zur Vermeidung von Druckstößen und Geräuschbildung schnellwirkende Stellventile nicht verwendet werden sollten. Alle Stellventile müssen so bemessen sein, daß sie gegen den maximal auftretenden Differenzdruck ohne Störung schließen können.

Die Absicherung der Vorlauf- und Rücklauftemperatur sowie des Druckes erfolgt analog wie beim direkten Anschluß. Die Druckabsicherung der Sekundärseite des Wärmeübertragers hat nach DIN 4747 zu erfolgen, wobei die maximalen Druck- und Temperaturverhältnisse der Hausanlage maßgebend sind. Jeder Wärmeübertrager muß sekundärseitig durch Sicherheitsventile gegen Überschreiten des zulässigen Betriebsüberdruckes abgesichert sein. Diese müssen der TRD 421 bzw. TRD 721 entsprechen.

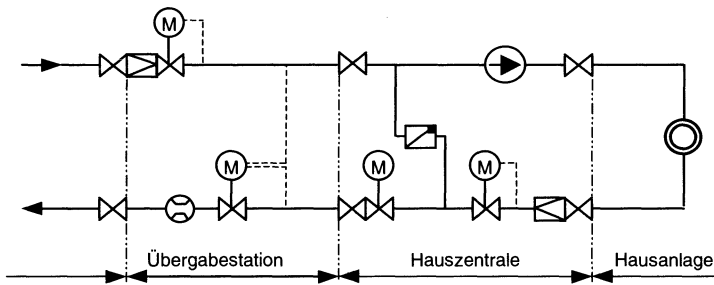


Abb. 2.2-79 Direkter Anschluß mit zusätzlicher Druckerhöhung

Primärseitig müssen die Wärmeübertrager für die maximalen Drücke und Temperaturen des Fernwärmesystems geeignet sein. Dabei hat die thermische Auslegung der Wärmeübertrager so zu erfolgen, daß die maximale Wärmeleistung bei den vereinbarten Netztemperaturen erreicht wird. Weiterhin darf die Grädigkeit zwischen der primärseitigen und der sekundärseitigen Rücklaufftemperatur nicht mehr als 3–5 K betragen. Somit muß bei höheren Außenlufttemperaturen die Rücklaufftemperatur entsprechend niedriger sein.

Grundsätzlich ist es möglich, beide Anschlußarten miteinander zu kombinieren. Ein vereinfachtes Schaltschema mit indirektem Anschluß für die Raumheizung und direktem Anschluß für die Warmwasserbereitung zeigt Abb. 2.2-78.

Beim Anschluß von Gebäuden, deren höchster Teil der Abnehmeranlage geodätisch über dem niedrigsten Vorlauf- oder Ruhedruckniveau des Fernwärmesystems liegt, sind für den direkten Anschluß besondere Maßnahmen erforderlich. Diese bestehen darin, mit Hilfe einer zusätzlichen Druckerhöhungspumpe das erforderliche Druckniveau herzustellen (AGFW 1986). Weiterhin wird in die Rücklaufleitung der Hauszentrale ein Druckhalteventil eingebaut, um ein Leerlaufen der Hausanlage zu vermeiden (Abb. 2.2-79).

An Fußbodenheizungen werden andere Anforderungen gestellt, wie für herkömmliche Raumheizungssysteme. Hierbei ist insbesondere die Trägheit des Systems zu beachten, da schwere Bauteile aufgeheizt werden müssen. Dazu sei auf entsprechende Literatur verwiesen.

Dampf. Reine Dampfheizungssysteme kommen heute nur noch selten zur Anwendung. Entweder handelt es sich um bestehende Anlagen oder um industrielle Abnehmer, die den Dampf für Produktionszwecke benötigen. Bei bestehenden Anlagen ist der Trend zu verzeichnen, daß diese entweder sogar primärseitig oder zumindest sekundärseitig auf Heizwasser umgestellt werden. Dadurch werden die erhöhten Betriebskosten, u. a. verursacht durch entsprechende Verluste und schlechtere Regelmöglichkeit, minimiert.

Prinzipiell kann bei beiden Anschlußarten die Leistungsbegrenzung sowohl dampf- als auch kondensatseitig vorgenommen werden. Dies hängt insbesondere von der Bauart des Wärmeübertragers ab. Bei liegenden Wärmeübertragern kleiner Leistung ist eine Kondensatanstauregelung möglich. Dabei ist zu beachten, daß dampfseitig nur der Volumenstrom begrenzt werden kann, der sich mit dem

Dampfdruck und der Temperatur ändert. Dagegen ist kondensatseitig für die Leistungsbegrenzung der Massestrom maßgebend.

Die Regelung bei beiden Anschlußarten erfolgt durch Stellventile mit und ohne Hilfsenergie. Dabei müssen Stellventile mit Hilfsenergie, die eine Sicherheitsfunktion erfüllen, bei Ausfall der Hilfsenergie selbsttätig schließen.

Beim direkten Anschluß wird dampfseitig der Druck geregelt. Gleiches gilt auch beim indirekten Anschluß bei Einsatz von liegenden Wärmeübertragern. Bei stehenden Wärmeübertragern wird eine Kondensatanstauregelung verwendet, wobei der Dampfdruck über eine weitere Regelung konstant gehalten wird. Die Verbrauchsmessung erfolgt zweckmäßig kondensatseitig. Wird kein Kondensat zurückgefördert, muß eine Dampfmessung vorgesehen werden.

Die Kondensatrückförderung kann auf verschiedene Weisen erfolgen, entweder über offene, geschlossene oder Systeme mit Unterdruckförderung. Bei den *offenen Systemen* wird das drucklos anfallende Kondensat in einen Sammelbehälter geführt. Nicht selten werden dabei mehrere Abnehmeranlagen zusammengeschlossen. Anschließend wird das gesammelte Kondensat mittels Pumpen in das Kondensatnetz zurückgefördert. Dabei sollten zur Vermeidung von Korrosion die Kondensatleitungen möglichst so verlegt werden, daß diese ständig gefüllt sind. Ebenso können nicht rostende Rohrstähle oder Kunststoffrohrleitungen eingesetzt werden. Bei den *geschlossenen Systemen* steht das Kondensat unter Dampfdruck und fließt deshalb selbsttätig in das Kondensatnetz mittels Kondensathebeanlagen zurück. Reicht der angebotene Dampfdruck nicht aus, so kann auch eine Pumpe zwischengeschaltet werden. Entscheidender Vorteil im Gegenteil zu offenen Systemen ist, daß kein Sauerstoff in das Kondensat gelangen kann, da dieses System überall unter Druck steht. Neben den unter offenen Systemen geschilderten Kondensatrückführungen durch Pumpen ist auch eine *Unterdruckförderung* möglich. Weitere Ausführungen sind in (AGFW 1986) enthalten.

Beim *direkten Anschluß* wird der Dampf dem Abnehmer unmittelbar zugeführt und auf den zulässigen Anlagendruck der Hausanlage reduziert. Für Niederdruckdampfheizungen ist DIN 4750 maßgebend. Das anfallende Kondensat fließt im allgemeinen drucklos in einen Sammelbehälter, von dem aus es über Pumpen oder Hebeanlagen in das Kondensatnetz zurückgefördert wird. Bei manchen industriellen Abnehmern ist es möglich, daß das Kondensat direkt für Produktionsprozesse verwendet wird. Ein vereinfachtes Schaltschema ist aus einer Vielzahl von Ausführungsmöglichkeiten in Abb. 2.2-80 dargestellt.

Beim *indirekten Anschluß* gibt der Dampf seine Wärme im Wärmeübertrager oder Verdampfer an die Hausanlage ab. Dieser Anschluß ist zu bevorzugen, denn er schließt unkontrollierten Kondensatverlust und mögliche Verunreinigungen aus. Des weiteren sichert er eine genaue Verbrauchsabrechnung. Vereinfachte Schaltschemen möglicher indirekter Anschlüsse zeigt Abb. 2.2-81. Das anfallende Kondensat wird ebenso zurückgefördert wie bei Anlagen mit direktem Anschluß. Für die Heizfläche der Wärmeübertrager, Verdampfer und Wassererwärmer sollte korrosionsbeständiges Material verwendet werden.

Für Warmwasserheizungen, Niederdruckdampfheizungen sowie Wassererwärmungsanlagen gelten u. a. die DIN 4750–4753.

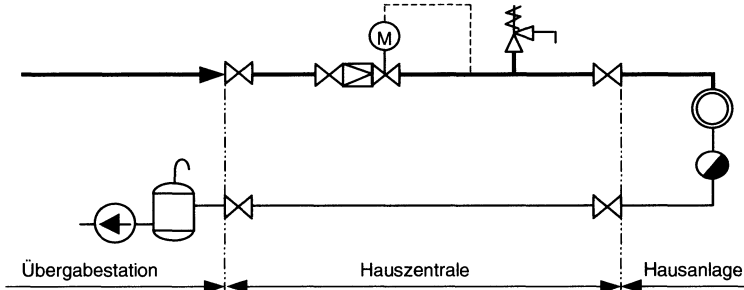


Abb. 2.2-80 Vereinfachtes Schaltschema direkter Anschluß an ein Dampfsystem

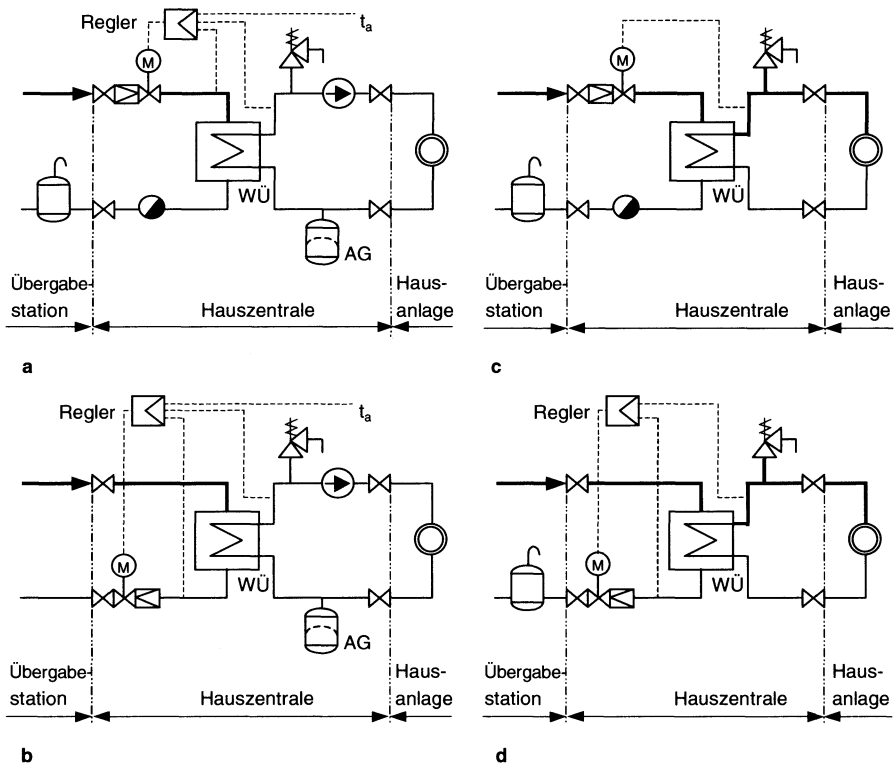


Abb. 2.2-81 Vereinfachte Schaltschemen indirekter Anschluß an ein Dampfsystem
a für sekundärseitige Warmwasserheizung mit dampfseitiger Regelung, **b** für sekundärseitige Warmwasserheizung mit kondensatseitiger Regelung, **c** für sekundärseitige Niederdruckheizung mit dampfseitiger Regelung, **d** für sekundärseitige Niederdruckheizung mit kondensatseitiger Regelung

WÜ Wärmeübertrager, AG Ausdehnungsgefäß

2.2.11

Wärmespeicher

Wärmespeicher sind Anlagen, die Energie in fühlbarer oder latenter Form aufnehmen und bei Bedarf Wärme an Transportmedien von Fernwärmenetzen abgeben können. Begründet auf diese Eigenschaft sind Wärmespeicher in Fernwärmesystemen geeignet für

- Deckung eines Spitzenleistungsbedarfes,
- Einsatz in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplung zur Aufnahme oder Abgabe von Wärme mit dem Ziel der maximalen Stromerzeugung während der elektrischen Spitzenbelastung,
- Einsatz zur Deckung eines unterhalb der technischen Mindestlast der Erzeugeranlagen liegenden Wärmebedarfs,
- Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit bestimmter Netzabschnitte oder spezieller Abnehmer,
- Einsatz in Verbindung mit diskontinuierlichen Erzeugeranlagen (z. B. Abwärme aus technologischen Prozessen)

Prinzipiell werden Wärmespeicher in Gleichdruckspeicher und Gefällespeicher unterschieden, wobei der Verdrängungsspeicher eine Sonderform des Gleichdruckspeichers darstellt.

Gefällespeicher werden bis auf wenige Ausnahmen in Fernwärmesystemen nicht angewandt. Dazu sei u. a. auf (Goldstein 1963) sowie (Pauer u. Munser 1970) verwiesen, wo diese Gefällespeicher ausführlich behandelt werden. In Heizwassersystemen werden grundsätzlich Verdrängungsspeicher eingesetzt.

Um die Vorteile des Speicherbetriebes im Hinblick auf den Einsatz der Erzeugeranlagen in der Spitzenzeit zu nutzen, ist ein Standort möglichst in der Nähe des Erzeugers zweckmäßig. Standorte in Abnehmernähe begünstigen die Auslastung der Trasse und erhöhen zusätzlich die Versorgungszuverlässigkeit bei den Abnehmern. In Fernwärmesystemen mit Vorlauftemperaturregelung ist die Aufstellung in unmittelbarer Nähe der Erzeugeranlagen Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit des Speichereinsatzes, da der Speicher nur dann mit maximaler Heizwassertemperatur aufladbar ist.

Die erste Variante aus Abb. 2.2-82a ist geeignet für einen Standort des Speichers auf dem Gelände der Erzeugeranlage. Der unmittelbare Vorteil besteht darin, daß keine Speicherladepumpe benötigt wird. Dagegen kommt die Variante aus Abb. 2.2-82b für Standorte außerhalb der Erzeugeranlage zur Anwendung. Sie wurde bei vorhandenen Speicheranlagen angewendet. Der Vorteil dieser Variante liegt in der unabhängig vom Standort des Erzeugers möglichen Aufstellung. Bei Vorlauftemperaturregelung wird die Variante aus Abb. 2.2-82c erforderlich, wobei die geforderte Temperatur für das Laden des Speichers durch einen separaten Wärmeübertrager gesichert wird. Ebenso wird die Variante aus Abb. 2.2-84d bei einer Vorlauftemperaturregelung angewendet. Hierbei ist kein separater Wärmeübertrager erforderlich. Die Netztemperatur muß in der Ladezeit des Speichers so hoch wie die erforderliche Netztemperatur in der Spitze des Fernwärmesystems sein. Dabei gewährleistet die Bypassregelung die im Netz zu fahrende Tempera-

tur. Diese Variante hat Nachteile auf die maximale Stromausbeute durch Kraft-Wärme-Kopplung (Munser 1980).

Beim Laden und Entladen des Wärmespeichers vermischen sich in einer Mischzone Vor- und Rücklaufheizwasser. Diese Mischzone stellt einen Verlust in bezug auf die vollständige Volumenausnutzung des Speicherbehälters dar. Um diese Verluste dennoch klein zu halten, werden senkrecht stehende, rohrartige Behälter aufgestellt. Um beim Entladen nur Heizwasser mit der benötigten Vorlauftemperatur einzuspeisen, ist es erforderlich, die sich beim Laden ausbildende Mischzone möglichst vollständig in den Rücklauf zu fördern. Dabei ist zu beachten, daß es nicht zu Ausdampfungen kommt. Weitere Betrachtungen zur Mischzone sowie zur Ladeziffer und Ausnutzungsgrad sind in (Munser 1980) zu finden.

Für die Wärmespeicher sind keine gesonderten Anlagen für Volumenausgleich und Druckhaltung erforderlich. Sie sind aber bei der Bemessung der Druckhaltung, insbesondere für die Beherrschung des Volumenausgleiches, für das gesamte Fernwärmesystem jedoch mit zu berücksichtigen.

Neben den oben beschriebenen zylindrischen Speicherbehältern wurden auch Behälterspeicher mit 0,5 bar Überdruck bis 110 °C sowie Behälterspeicher für Atmosphärendruck und Temperaturen unter 100 °C eingesetzt.

Zu den weiteren Speicherprinzipien zählen die der Nutzung der latenten Wärme sowie der chemischen Reaktionswärme. Diese befinden sich derzeit in der Erprobungsphase oder kommen nur in kleineren Dimensionen zur Anwendung. Untersuchungen hinsichtlich Speicherkonzepte zur Langzeitwärmespeicherung von Behältervolumen mit bis zu 28000 m³ sowie zu den zuvor genannten weiteren Speicherprinzipien werden u. a. in (Fisch u. Kübler 1991) ausführlich behandelt.

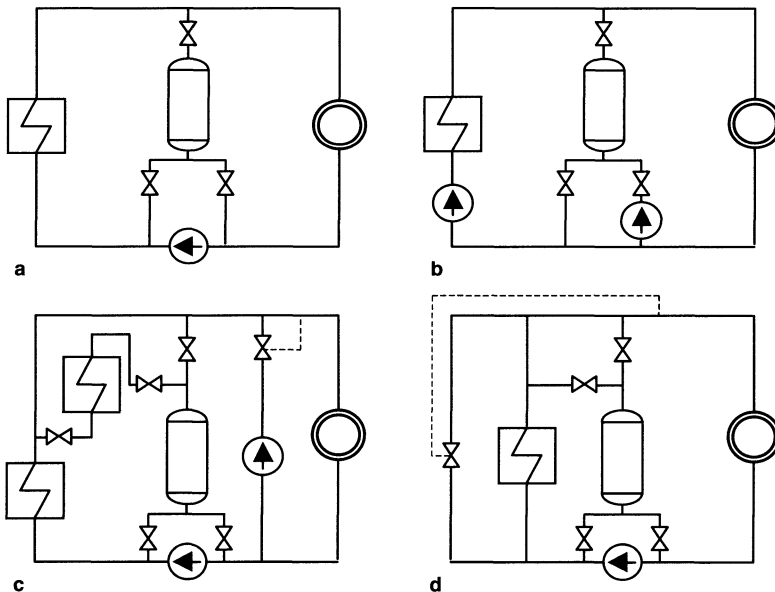


Abb. 2.2-82 Schaltungsvarianten für Wärmespeicher nach (Munser 1980)

2.2.12

Meßtechnik

Im gesamten Fernwärmesystem müssen für den Betrieb die wesentlichen Betriebswerte erfaßt werden. Dazu zählen überwiegend Temperaturen, Drücke und Durchflußmengen. Des weiteren werden vereinzelt zusätzlich Messungen bezüglich der Wasserqualität (Leitfähigkeit, pH-Wert und Sauerstoff) durchgeführt. Für die einzelnen Meßprinzipien werden verschiedenartigste Geräte eingesetzt. Eine detaillierte Abhandlung würde den Rahmen des Buches sprengen. Deshalb sei auf entsprechende Literatur sowie gültige Vorschriften verwiesen.

Überwiegend erfolgen die Messungen entweder direkt beim Erzeuger, in Bauwerken oder in Stationen. Dabei werden die Daten in den meisten Fällen an eine zentrale Leitwarte übertragen. Neben diesen Messungen werden zusätzliche Melde- und Störsignale sowie Steuerbefehle als Anzeige oder direkten Eingriff auf Erzeugeranlagen, Bauwerke oder Stationen übermittelt. Dazu zählen u. a. Stellungen von Armaturen, Leistungsangaben, Drehzahl der Pumpen, Schaltzustände von Anlagenbaugruppen.

Ziel einer zentralen Leitwarte ist es, durch möglichst wirtschaftlichen Betrieb des Fernwärmesystems dazu beizutragen, das Optimum zwischen Strom- und Wärmeerzeugung in den Erzeugeranlagen zu erreichen. Des weiteren trägt eine zentrale Leitwarte zur Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit und der Betriebssicherheit des Fernwärmesystems bei. Daneben sollen weiterhin die hydraulischen Gegebenheiten in jeder Betriebssituation voll ausgenutzt werden. Auch zählt die ständige Überwachung der Druckhaltung und der Leckverluste zu den Aufgaben der Leitwarte. Durch den somit gegebenen schnellen Eingriff bei Betriebsstörungen soll der Heizbetrieb möglichst weitgehend aufrechterhalten werden. Gleiches gilt auch bei der Eingrenzung von Schadensfällen beispielsweise durch Netztrennungen.

Alle Signale müssen schnell und mit hoher Sicherheit übertragen werden. Für die Übertragung der Daten werden entweder mehradrige Steuerkabel eingesetzt, die entlang der Trasse verlegt sind, oder andere geeignete Übertragungseinrichtungen, wie z. B. Fernwirktechnik. Die Verwendung von mehradrigen Steuerkabeln für die Signalübertragung ist am sichersten und erfordert den geringsten Geräteaufwand. Der Nachteil liegt darin begründet, daß die Übertragungskosten bei größeren Netzen sehr hoch werden.

Die Fernwirktechnik dagegen schafft Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Signalübertragung zur zentralen Überwachung und Steuerung von mehreren Anlagen, die räumlich voneinander getrennt sind. Fernwirkanlagen basieren auf der vielfachen Ausnutzung der Doppelleitung. Dabei bereiten die Geräte die Informationen auf der Sendeseite zur Übertragung und auf der Empfangsseite zur Weiterverarbeitung auf. Es gibt zwei Verfahren zur Übertragung der Signale, einerseits das Frequenzmultiplex-Verfahren, bei dem die Informationen parallel übertragen werden, andererseits das Zeitmultiplex-Verfahren, bei dem die Informationen zeitlich nacheinander übertragen werden.

Weitere detaillierte Ausführungen zur Fernwirktechnik enthalten u. a. (AGFW 1993a; Schüngel 1995).

2.2.13 Schaltungsvarianten

Die zuvor beschriebenen Komponenten eines Fernwärmesystems können unterschiedlich zusammenwirken, wobei bestimmte Komponenten, wie

- Erzeugeranlagen,
- Druckhaltung,
- Rohrleitungssysteme,
- Armaturen,
- Hausanschlußstationen sowie
- Meßtechnik

die eigentliche Grundvoraussetzung für eine Fernwärmeversorgung bilden. Für die Netzgestaltung ist insbesondere die Größe des zu versorgenden Gebietes und die Summe der einzelnen Anschlußleistungen ausschlaggebend. Ebenso ist entscheidend, in welcher Form die Abnehmer an das Netz angeschlossen sind. Da es eine Vielzahl von möglichen Schaltungsvarianten gibt, sollen im folgenden nur einige grundlegende Varianten vorgestellt werden.

Die einfachste Variante ist in Abb. 2.2-83a dargestellt. Diese kommt überwiegend in kleineren Heizwassersystemen zur Anwendung, ist aber auch bei noch vorhandenen Dampfsystemen zu finden. Im letzteren Fall ist dann aber keine Druckhaltung notwendig. Mittlere und größere Fernwärmesysteme können, unabhängig vom Wärmemedium, unterteilt werden in Primär- und Sekundärsysteme (s. a. Abschn. Rohrleitungssysteme). Eine mögliche Variante für ein Heizwassersystem zeigt Abb. 2.2-83b. Für Dampfsysteme entfällt dann die Druckhaltung. Ebenso ist es möglich, zusätzlich Druckerhöhungsstationen und Beimischstationen in einem Heizwassersystem zu integrieren. Druckerhöhungsstationen kommen dann zum Einsatz, wenn die Hauptleitungen ausgelastet sind und somit die vertraglich vereinbarte Druckdifferenz beim Abnehmer nicht für alle Lastfälle gewährleistet werden kann. Beimischstationen dienen zum Herunterkühlen der Vorlauftemperatur mit Hilfe von Rücklaufwasser, um kostengünstige Verlegeverfahren einsetzen zu können. In manchen Fällen versorgt sogar die Erzeugeranlage sowohl ein Dampf- als auch ein Heizwassersystem (Abb. 2.2-83c).

Die Einbindung einer Wärmespeicheranlage für Heizwasser vervollkommenet das Fernwärmesystem.

Es ist auch möglich, Erzeugeranlagen im Heizwassersystem unterschiedlich in ein Fernwärmesystem einzubinden. Diese Variante (Abb. 2.2-84) ist sinnvoll, wenn spezielle Abnehmer eine hohe und konstante Vorlauftemperatur (z. B. große Trocknungsanlagen für Lackieranlagen) über das ganze Jahr benötigen. Gleichzeitig verringert sich der Wärmeverlust des gesamten Fernwärmesystems, weil diese hohe Vorlauftemperatur nicht für das gesamte Fernwärmenetz vorgehalten werden muß. Diese Lösung wird auch angewendet, wenn die maximale Übertragungsleistung aus dem Heizkraftwerk in der Winterperiode kleiner ist als die benötigte Gesamtwärmeleistung des Fernwärmesystems. Dabei läuft das Heizkraftwerk in Kraft-Wärme-Kopplung in der Grund- und Mittellast und das Heizwerk in der Spitzenlast eines Betriebsjahres.

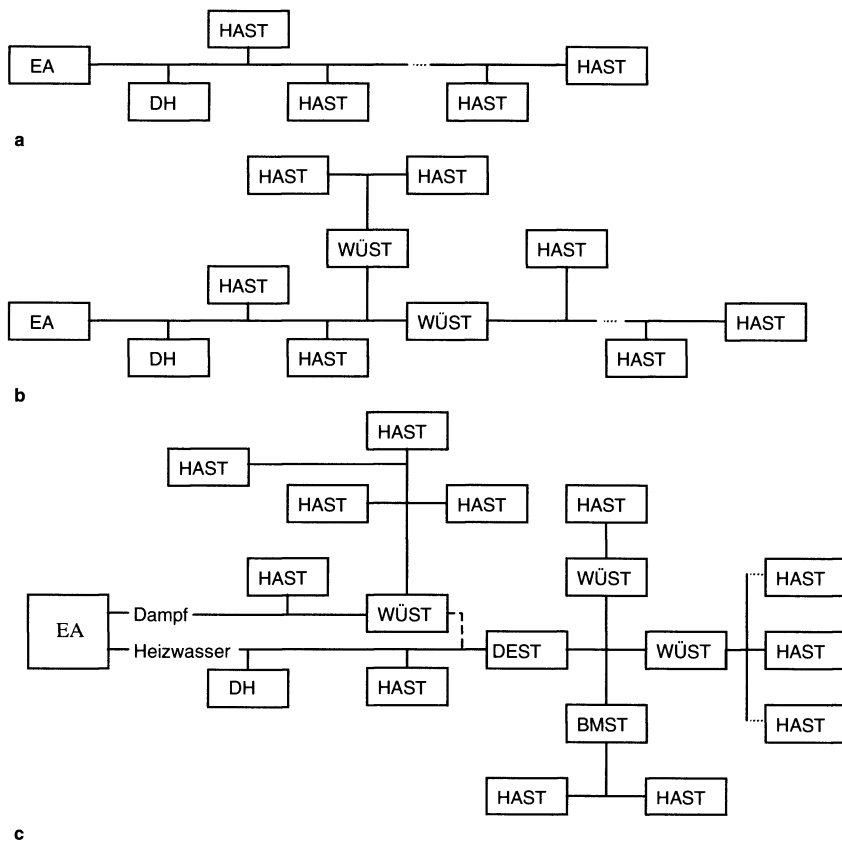


Abb. 2.2-83 Einfache Variante eines Fernwärmesystems

a einfache Variante eines Fernwärmesystems, **b** Variante mit primär- und Sekundärsystem, **c** Variante eines größeren Fernwärmesystems mit beiden Wärmemedien

EA Erzeugeranlage, DH Druckhaltung, HAST Hausanschlußstation, WÜST Wärmeübertragungsstation, BMST Beimischstation, DEST Druckerhöhungsstation

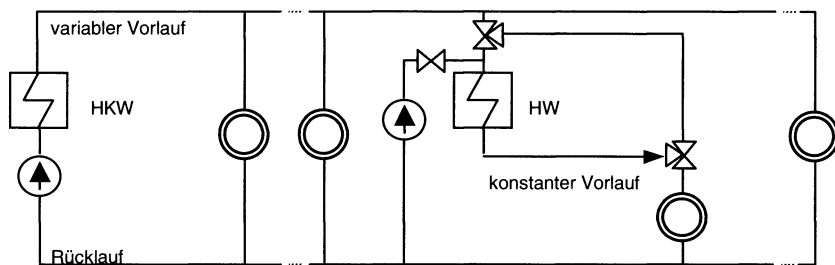


Abb. 2.2-84 Fernwärmenetz mit zwei Erzeugeranlagen

HKW Heizkraftwerk, HW Heizwerk

2.3 Berechnungsgrundlagen

2.3.1 Einleitung

Dieser Abschnitt umfaßt einige grundlegende Ausführungen zu Berechnungsgrundlagen zur Auslegung von Fernwärmesystemen einschließlich deren Zubehörteile. Dabei geht es neben allgemeinen Aussagen zu Temperatur, Druck und Masse-/Volumenstrom auch um die Bestimmung des Druckverlustes, des optimalen Durchmessers, des Wärmeverlustes und somit Festlegung der Isolierdicke sowie um Aussagen zur Druckhaltung, in Abhängigkeit des zum Einsatz kommenden Wärmedmediums und dessen Notwendigkeit. Die entscheidenden Parameter in einem Fernwärmesystem sind die Temperaturen, die Drücke und die Masse-/Volumenströme. Diese Größen, die in der Regel Zeitfunktionen darstellen, dürfen nicht losgelöst voneinander gewählt werden. Entsprechende Verbindungen bestehen beispielsweise über das Druckschaubild und die Wärmebilanzen.

2.3.2 Temperatur

Heizwasser. Große Temperaturspreizungen, d. h. hohe Vorlauf- und niedrige Rücklauftemperaturen, sind in Heizwassersystemen wünschenswert. Da aber hohe Vorlauftemperaturen die Stromausbeute bei Kraft-Wärme-Kopplung einschränken und hohe Drücke im Rohrleitungssystem bedingen sowie niedrige Rücklauftemperaturen infolge größerer Heizflächen zu kostenintensiveren Abnehmeranlagen führen, müßten unter Beachtung der gegenläufigen Kostentendenzen die zu verwirklichenden Vorlauf- und Rücklauftemperaturen einer Optimierung unterzogen werden. Dies führt aber anhand der zahlreichen Einflußfaktoren nur zu partiellen Optima und kann im gegebenen Fall nur über Variantenvergleiche ermittelt werden. Die in der Praxis vorhandenen technischen Restriktionen, wie z. B.

- Druckstufe,
- geodätische Höhenunterschiede,
- maximale Vorlauftemperatur vom Erzeuger,
- minimale Vorlauftemperatur beim Abnehmer zur Realisierung der Vollast,
- direkter/indirekter Anschluß des Abnehmers u. a. m.

schränken ohnehin die Variabilität der Temperaturparameter stark ein oder legen diese gleich fest.

Die übertragbare Wärmemenge in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser und der Temperaturspreizung ist in Abb. 2.3-1 dargestellt. Mit großen Temperaturspreizungen lassen sich bei gleichen Rohrdurchmessern größere Wärmemengen durchsetzen; umgekehrt können für die Bewältigung gleicher Wärmemengen kleinere Rohrdurchmesser verwendet werden. Gegenüber einer Temperaturspreizung von beispielsweise 20 °C ermöglicht eine solche von 50 °C bei einem Rohrdurchmesser DN 250 einen um etwa 120 % höheren Wärmedurchsatz, bei DN 400 sogar um

etwa 150 %. Der günstige Einfluß einer höheren Temperaturspreizung aus dem Wärmedurchsatz ist besonders bei großen Rohrdurchmessern erkennbar. Daher wählt man nach Möglichkeit Temperaturspreizungen von größer 50 °C.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß für Fernwärmenetze eine möglichst hohe Temperaturspreizung von etwa 60 °C angestrebt werden sollte. Dies würde einer Vorlauf-/Rücklaufftemperatur von 110/50 °C entsprechen. Zur Beherrschung extrem niedriger Außenlufttemperaturen empfiehlt sich, die Vorlauftemperatur auf 130 °C zu erhöhen bei gleichzeitigem Konstanthalten der Rücklaufftemperatur. Die Wärmeübertragungsleistung des Fernwärmenetzes würde sich dann um etwa 13 % erhöhen.

Während vor allem in den neuen Bundesländern Heizwassersysteme bis zu 180/80 °C ausgelegt wurden, ist zunehmend der Trend zu verzeichnen, die Temperaturparameter 130/55 °C zu realisieren bzw. die Vorlauftemperatur noch weiter abzusenken. Dieser Aspekt ist verbunden mit der angestrebten Kostenminimierung, insbesondere durch den Einsatz des Verlegeverfahrens Kunststoffmantelrohr. Die Wärmeübertragungsleistung wird weiterhin beträchtlich gesteigert, wenn vornehmlich die Rücklaufftemperaturen z. B. auf 130/30 °C abgesenkt werden.

Sind Warmwasserbereitungsanlagen angeschlossen, dann darf die Betriebstemperatur von 60–70 °C nicht unterschritten werden. Diese benötigte Temperatur ist dann auch außerhalb der Heizperiode sicherzustellen, d. h. die Vorlauftemperatur darf in Abhängigkeit von der Größe des Fernwärmenetzes und seiner dadurch bedingten Wärmeverluste nicht unterhalb von 85–90 °C liegen.

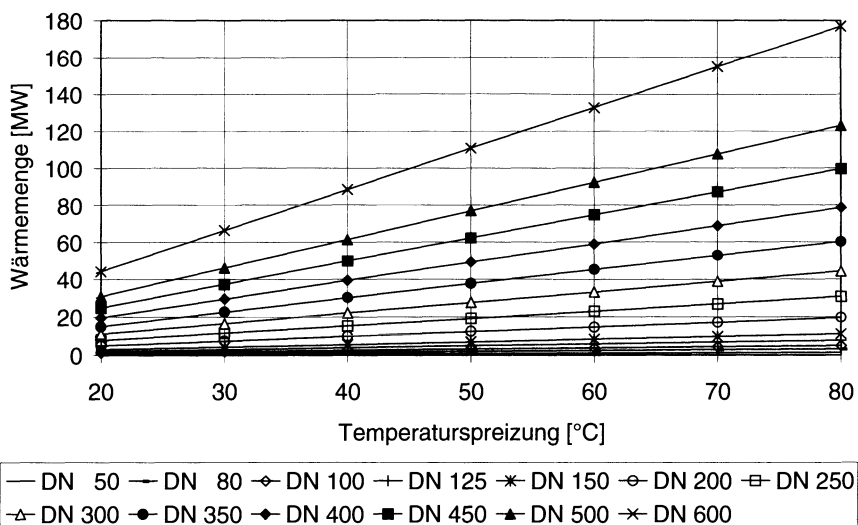


Abb. 2.3-1 Wärmemenge in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser und der Temperaturspreizung (Ansatz: Vorlauftemperatur 130 °C, Wassergeschwindigkeit 2 m/s)

Der Betrieb des Fernwärmesystems kann bei Heizwassersystemen mit konstanter Vorlauftemperatur, mit gleitender Vorlauftemperatur in Abhängigkeit z. B. von der Außenlufttemperatur oder in gemischter Betriebsweise erfolgen (s. Abschn. Hausanschlußstationen).

Dampf. Es wurden bereits mehrfach Bemerkungen hinsichtlich des derzeitigen Einsatzes von Dampfsystemen gemacht. Dort, wo solche Systeme zur Anwendung kommen, ist die Einhaltung der Mindesttemperatur zur Realisierung der Vollast, aber auch der Teillast in den Sommermonaten entscheidend. Die Dampftemperatur liegt überwiegend zu dem dazugehörigen Druck im leicht überhitzten Bereich, um somit bei Schwachlast extreme Kondensatbildung zu vermeiden. Die Kondensattemperatur ist ebenso wie bei Heizwassersystemen von den Abnehmeranlagen abhängig. Sie liegt in den meisten Fällen bei 70–80 °C.

2.3.3 Druck

Heizwasser. Um ein Ausdampfen bei hohen Temperaturen zu vermeiden, ist ein bestimmter Mindestdruck (Sättigungsdruck plus Sicherheitszuschlag) zu gewährleisten (s. a. Abschn. Druckhaltung). Die maximale Druckbegrenzung wird durch die gewählte oder einzuhaltende Druckstufe des Systems vorgegeben. Beim direkten Anschluß bestimmen meistens die Abnehmeranlagen die zulässigen Maximaldrücke.

Zwischen den vorgegebenen und den einzuhaltenden Druckgrenzwerten muß sich der reale Druckverlauf einordnen. Dieser wird beeinflusst von

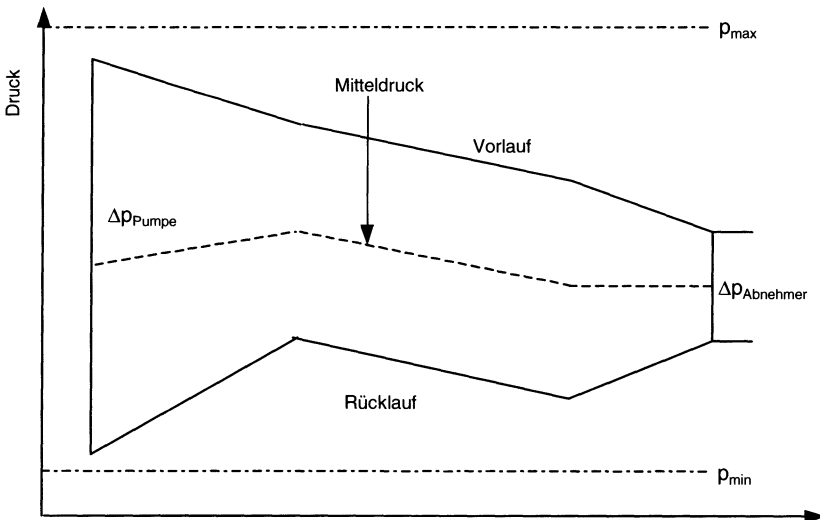


Abb. 2.3-2 Druckverlaufsschaubild mit Überlagerung des hydraulischen Druckverlaufs und des geodätischen Höhenverlaufs

- der geodätischen Höhenlage der zu versorgenden Abnehmer,
- den Druckverlusten und deren Verteilung über das Fernwärmenetz sowie
- der Art der Druckhaltung und des Anschlusses (direkt/indirekt) an das Fernwärmenetz.

Weiterhin ist zu beachten, daß die Druckverläufe während des Betriebes druckabhängig sind und vor allem von der Regelung des Pumpendruckes und der Abnehmeranlagen beeinflußt werden. Ein entsprechendes Druckverlaufsschaubild mit den verschiedenen Druckverläufen zeigt Abb. 2.3-2.

Grundsätzlich verschiebt sich bei geringeren Pumpendrüken der Vorlauf- und Rücklaufdruck prinzipiell zum Ruhedruck hin, während bei Vergrößerung der Druckdifferenz beim Abnehmer sich diese vom Mitteldruck entfernen. Diese Aussagen gelten unabhängig vom Druckhaltesystem.

Dampf. Bei Dampfsystemen bildet lediglich die Druckstufe sowie die Anschlußart die Restriktion für den Betrieb. Bei der Dampf- und Kondensatleitung handelt es sich um zwei getrennte Systeme, welche auch unterschiedlich ausgelegt werden.

2.3.4

Masse-/Volumenstrom

Heizwasser. Die Wärmeleistung des einzelnen Abnehmers oder des gesamten Heizwassersystems berechnet sich zu

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_V - t_R) = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t \quad [\text{kW}] \quad (2.19)$$

mit $\dot{m}$ - Massestrom [kg/s],
 c_p - spezifische Wärmekapazität [kJ/kg K],
 t_V - Vorlauftemperatur [°C],
 t_R - Rücklauftemperatur [°C],
 Δt - Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur [K].

und läßt sich nach dem Massestrom umstellen. Gemäß den Enthalpiedifferenzen $c_p \cdot t$, den zeitlich veränderbaren Wärmeströmen der Abnehmer und der geplanten Temperaturfahrkurve bestimmen sich die Masseströme als Zeitfunktion.

Die spezifische Wärmekapazität kann für den jeweiligen Betriebsdruck und Betriebstemperatur u. a. aus (Elsner et al. 1982) entnommen werden. Werden diese Werte der spezifischen Wärmekapazität in dem Bereich von 1–20 bar sowie von 10–200 °C für Wasser im einzelnen betrachtet, so unterscheiden sie sich nur geringfügig. Eine eigens entwickelte Approximationsgleichung für Wasser für den oben genannten Druck- und Temperaturbereich wurde durch den Verfasser zum Ansatz gebracht und ist im Anhang 1 zu finden.

Der Volumenstrom wird aus dem Massestrom ermittelt über

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \dot{m} \cdot v \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.20)$$

mit ρ - Dichte [kg/m³],
 v - spezifische Dichte [m³/kg].

Die genaue Berechnung der Wärmeleistung müßte mit der Vorlaufdichte ρ_V und der Rücklaufdichte ρ_R erfolgen. Mit hinreichender Genauigkeit kann mit der mittleren Dichte gemäß Gl. (2.17) gerechnet werden. Für die Dichte sowie für das spezifische Volumen sind im Anhang 1 entsprechende Näherungsgleichungen angegeben.

Dampf. Die Wärmeleistung wird analog berechnet bzw. über die Enthalpiedifferenz mit

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot (h_D - c_p \cdot t_K) \quad [\text{kW}] \quad (2.21)$$

mit $\dot{m}$ - Massestrom [kg/s],
 Δh - Enthalpiedifferenz Dampf zu Kondensat [kJ/kg],
 h_D - Enthalpie des Dampfes [kJ/kg],
 c_p - spezifische Wärmekapazität [kJ/kg K],
 t_K - Kondensattemperatur [°C].

Die Enthalpie des Dampfes kann für den jeweiligen Betriebsdruck und Betriebstemperatur u. a. aus (Elsner et al. 1982) entnommen werden. Die Berechnung des Volumenstromes erfolgt ebenfalls über die Gl. (2.20) mit Hilfe des Massestromes und des spezifischen Volumens des Dampfes. Mit hinreichender Genauigkeit können für die Enthalpie und für das spezifische Volumen entsprechende Approximationsgleichungen angegeben werden (s. Anhang 1).

2.3.5 Gleichzeitigkeitsfaktor

Im Zusammenhang mit der Wärmeleistung wird auch von der Wärmehöchstleistung des Abnehmers gesprochen. Diese stellt die tatsächlich auftretende maximale Leistung des Abnehmers dar und ist in der Regel kleiner als die Anschlußleistung. Die Begründung dafür liegt darin, da alle angeschlossenen Anlagen meistens nicht zeitgleich die volle Leistung benötigen.

Beide Leistungen ins Verhältnis gesetzt $\dot{Q}_{\max} / \dot{Q}_{\text{An}}$ ergeben den Gleichzeitigkeitsfaktor des Abnehmers. Dieser ist immer ≤ 1 .

Analog dazu wird der Gleichzeitigkeitsfaktor des Netzes bestimmt. Dieser ist das Verhältnis von Wärmehöchstleistung des Netzes zur Summe der Anschlußleistungen der einzelnen Abnehmer und ist ebenfalls immer ≤ 1 .

Insbesondere bei der Auslegung eines Netzes spielt der Gleichzeitigkeitsfaktor eine bedeutende Rolle, nämlich bei der Berechnung der Wärmehöchstlast. Diese Wärmehöchstlast wird wiederum geprägt durch die einzelnen Abnehmer. Der Gleichzeitigkeitsfaktor der einzelnen Abnehmer läßt sich nur empirisch ermitteln. Gleiches trifft auch für den Gleichzeitigkeitsfaktor des Netzes zu. Dieser kann nur mit den gefahrenen Maximalleistungen über ein Betriebsjahr verglichen werden. Derzeitige Analysen hinsichtlich des Gleichzeitigkeitsfaktors verschiedener Netze schwanken zwischen 0,8–0,9.

2.3.6**Geschwindigkeit und Druckverlust**

Die wirtschaftliche *Strömungsgeschwindigkeit* läßt sich aus dem Kostenminimum von Investitionskosten und Betriebskosten ermitteln. Bedingt jedoch durch die strömungstechnischen Grenzdaten, die sich bei zu hoher Strömungsgeschwindigkeit einstellen, wie Geräuschemission, Schwingungen des Rohrleitungssystems, Erosion in den Umlenkstellen sowie durch die große Abhängigkeit des Druckverlustes vom Rohrdurchmesser ($\Delta p \approx 1/d^5$) ergeben sich keine konstanten Strömungsgeschwindigkeiten für die verschiedenen Medien. Des weiteren sollte in Rohrleitungen die Geschwindigkeit möglichst konstant halten werden, um somit Beschleunigungs- und Verzögerungsverluste zu vermeiden. Ebenfalls ergibt sich

Tabelle 2.3-1 Angaben zu Strömungsgeschwindigkeiten in [m/s]

Medium	Spezifika	Quelle				
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Wasser	– Saugleitung	0,5–2,0				
	– Saugleitung (Heißwasser)		0,5–1,0			
	– Saugleitung (Kaltwasser)		0,5–1,5	0,5–1,0		
	– Saugleitung (Speisewasser)					0,4–0,8
	– Saugleitung (Kondensat)					0,4–0,8
	– Druckleitung im ständigem Betrieb	1,5–6,0	1,5–6,0	1,0–3,0		
	– Druckleitung (Speisewasser)					1,0–2,5
	– Heiß- und Warmwasser (Fernleitungen)					1,0–2,5
	– Heiß- und Warmwasser (Ortsnetze)					0,8–2,0
	– Heizwasserleitung kleiner Durchmesser				Ø 0,3	
	– Heizwasserleitung größerer Durchmesser				Ø 4,0	
	– Transportleitung ab DN 500				3,5–4,0	
	– Gebrauchswasserleitung	4,0–6,0				
	– Brauchwasserleitung, Verteilungsnetze		0,4–2,0			
	– Kondensatleitung	1,0–2,0				1,0–2,0
Dampf	– Sattdampfleitung	25–40	20–40			
	– Dampfleitung bis 10 bar			15–30		15–20
	– Dampfleitung von 10–40 bar					20–40
	– Dampfleitung von 10–60 bar			20–50		
	– gering überhitzter Dampf, Rohrbrücken		20–30			
	– Dampfleitung Mittel-/Niederdruck				30–50	
	– Heißdampfleitung bis 40 bar		20–30			

Quellen: *a* (Schmidt u. Lumpe 1988), *b* (LENTJES 1983), *c* (Wossog et al. 1990), *d* (AGFW 1993a), *e* (Groth 1985)

bei hohen örtlichen Geschwindigkeiten die Gefahr, daß bei Flüssigkeiten eine Unterschreitung des Dampfdruckes auftreten kann und somit Ausdampfungen gegeben sind sowie bei Dampf die Schallgeschwindigkeit erreicht wird und Verdichtungsstöße die Folge sind. In der Tabelle 2.3-1 sind aus verschiedenen Literaturquellen allgemeingültige Strömungsgeschwindigkeiten angegeben.

Die Geschwindigkeit läßt sich mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung über den Massestrom bestimmen. Es gilt

$$\dot{m} = A \cdot w = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot w \quad [\text{kg/s}] \quad (2.22)$$

mit d - Rohrdurchmesser [m],
 w - Geschwindigkeit [m/s].

Weitere Angaben zu wirtschaftlichen Geschwindigkeiten für Wasser und Dämpfe (Gase) sind in (Wagner 1991a) in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser aufgeführt.

Bei Dampfleitungen werden in bezug auf Geräuschemissionen in (Wos-sog et al. 1990) Empfehlungen gegeben. Dabei gilt

- geräuscharm bei $\leq 0,1 \cdot \frac{a}{w}$,
- geräuscmäßig vertretbar bei $\leq 0,2 \cdot \frac{a}{w}$ und
- Geräuschhöchstgrenze bei $\leq 0,3 \cdot \frac{a}{w}$

mit a als Schallgeschwindigkeit. Tabelle 2.3-2 zeigt in Abhängigkeit von Temperatur und Druck entsprechende Werte der isentropen Schallgeschwindigkeit für überhitzten Dampf. Die Schallgeschwindigkeit wird für überhitzten Dampf nach

$$a = \sqrt{\kappa \cdot p \cdot v} \quad [\text{m/s}] \quad (2.23)$$

mit p - Druck [Pa],
 v - spezifisches Volumen [m^3/kg],
 κ - Isentropenexponent.

Tabelle 2.3-2 Isentrope Schallgeschwindigkeit in [m/s]

Temperatur [° C]	Druck 1 bar	5 bar	10 bar	15 bar	20 bar
Sattdampfkurve	477	499	507	509	510
100	477	—	—	—	—
150	504	499	—	—	—
200	533	526	517	506	—
250	560	556	549	543	536
300	585	582	578	574	569
350	609	607	604	601	597
400	632	630	628	625	623

berechnet, wobei annähernd nach (Bohl 1984) ein Isentropenexponent für Heißdampf in dem Gültigkeitsbereich der Tabelle 2.3-2 von 1,28–1,30 gilt.

Bei der Bestimmung des *Druckverlustes* wird unterschieden in inkompressible und kompressible Strömungen. Bei *inkompressiblen Strömungen* ist der Druckabfall längs der Rohrleitung linear und somit die Geschwindigkeit konstant unter der Bedingung, daß die Dichte ebenfalls konstant ist. Dies ist bei Flüssigkeiten, sprich Heizwasser der Fall. Bei der Fortleitung von Gasen und Dämpfen in Rohrleitungen liegt eine Expansionsströmung vor, also eine *kompressible Strömung*. Im allgemeinen Fall ändern sich dabei längs der Rohrleitung Druck, Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit. Beide Strömungen sind in Abb. 2.3-3 dargestellt.

Die Grundgleichung für die reibungsbehaftete Strömung in kreisförmigen Querschnitten bildet die Differentialgleichung

$$\rho \cdot g \cdot dh + dp + \rho \cdot w \cdot dw + \frac{\lambda \cdot dl}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 0 \quad (2.24)$$

- mit h - geodätische Höhe der Rohrachse (absoluter oder relativer Bezugspunkt) [m],
 p - Druck [Pa],
 w - Geschwindigkeit [m/s],
 l - Länge des Rohres [m],
 d - Durchmesser des Rohres [mm],
 λ - Rohrreibungsbeiwert [-].

Die Integration liefert Berechnungsgleichungen für die einzelnen Randbedingungen.

Heizwasser. Da Heiß- und Warmwasser als inkompressibel betrachtet werden kann, gilt für die Lösung der obigen Differentialgleichung die BERNOULLI-Gleichung für stationäre Bewegung

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_1^2}{2 \cdot g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2}{2 \cdot g} + \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} \quad (2.25)$$

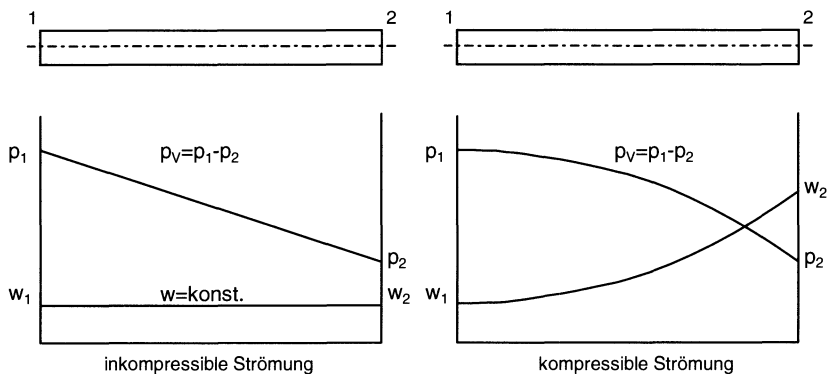


Abb. 2.3-3 Vergleich zwischen inkompressibler und kompressibler Strömung

Die Indizes 1 und 2 beziehen sich auf Anfang und Ende der Rohrleitung. Im Vergleich mit den anderen Gliedern ist die Differenz $(w_1^2 - w_2^2)/2 \cdot g$ vernachlässigbar gering (Munser 1980), so daß für den Druckabfall in einer geraden Rohrleitung aus Gl. (2.25) folgt

$$\Delta p_V = p_1 - p_2 = \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 + (h_2 - h_1) \cdot \rho \cdot g \quad [\text{Pa}] \quad (2.26)$$

Druckverlustberechnungen werden überwiegend durchgeführt mit Hilfe von entsprechender Software, so daß eine sofortige Berücksichtigung des höhenabhängigen Terms $(h_2 - h_1) \cdot \rho \cdot g$ ohne weiteres möglich ist. Viele Programme weisen aber auch beide Drücke aus, d. h. ohne und mit Berücksichtigung dieses Termes. Die einzelnen Höhen selber können entweder relativ zu einem Bezugspunkt, z. B. Einspeisequelle, oder aber auch absolut eingegeben werden.

Der Term $\rho \cdot w^2/2$ stellt den Staudruck dar. Der Strömungswiderstand in einer geraden Rohrleitung wird durch die Multiplikation mit $\lambda \cdot l/d$ bestimmt. Die Strömungswiderstände durch Rohrleitungselemente, wie Rohrbögen, Formstücke, Armaturen werden durch Multiplikation von $\sum \zeta$ mit berücksichtigt, so daß gilt

$$\Delta p_V = \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \quad [\text{Pa}] \quad (2.27)$$

Ebenso besteht die Möglichkeit, die einzelnen Widerstände in eine äquivalente Länge mit

$$l_{\text{äqu}} = \sum \zeta \cdot \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}] \quad (2.28)$$

umzurechnen und zu der gestreckten Rohrleitungslänge l dazu zu addieren, so daß für die rechnerische Länge gilt

$$l' = l + l_{\text{äqu}} \quad [\text{m}] \quad (2.29)$$

Die Gleichung für die Bestimmung des Druckverlustes mit der rechnerischen Länge lautet demzufolge

$$\Delta p_V = \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot \lambda \cdot \frac{l'}{d} \quad [\text{Pa}] \quad (2.30)$$

Dampf. Bei längeren Rohrleitungen mit merklichem Druckabfall im Verhältnis zum Absolutdruck muß die Kompressibilität von Dampf berücksichtigt werden. Dieser Druckverlust wird im wesentlichen durch den Temperaturabfall infolge Abkühlung beeinflusst. Beide Faktoren, Kompressibilität und Temperaturabfall, sind nur bei großen Längen von Bedeutung, wenn Strömungsgeschwindigkeit in der Größenordnung von Tabelle 2.3-1 und übliche Wärmedämmungen vorausgesetzt werden. Den allgemein angewandten Beziehungen zur Berechnung von Druckverlusten von kompressiblen Medien liegen folgende Annahmen zugrunde:

- infolge der geringen Dichte von Dämpfen wird der Höhenunterschied von Rohrleitungspunkten meist vernachlässigt, d. h. $\rho \cdot g \cdot dh \approx 0$,

- Dampf wird als ideales Gas betrachtet, so daß die Gasgleichung $p = \rho \cdot R \cdot T$ gilt,
- die Druckänderung infolge Zunahme der kinetischen Energie des strömenden Mediums, verursacht durch die Verringerung der Dichte bei Druckabfall, wird vernachlässigt, d. h. $\rho \cdot w \cdot dw \approx 0$.

Die Herleitung der Gleichung für die Bestimmung des Druckverlustes ist u. a. in (Bohl 1984) ausführlich beschrieben. Es gilt

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2 \cdot p_1} = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho_1}{2} \cdot w_1^2 \cdot \frac{T_m}{T_1} \quad [\text{Pa}] \quad (2.31)$$

$$\text{mit } T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}, T_1 = t_1 + 273 \text{ °C [K]}, T_2 = t_2 + 273 \text{ °C [K]}.$$

Nach Umstellung der Gl. (2.31) nach p_2 ergibt sich für den Druckabfall

$$\Delta p_v = p_1 - p_2 = p_1 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{w_1^2 \cdot \rho_1}{p_1} \cdot \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot \frac{T_m}{T_1}} \right). \quad [\text{Pa}] \quad (2.32)$$

Bezogen auf den Dampfzustand am Rohrleitungsende gilt nach (Munser 1980)

$$\Delta p_v = p_1 - p_2 = p_2 \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{w_2^2 \cdot \rho_2}{p_2} \cdot \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot \frac{T_m}{T_2}} - 1 \right). \quad [\text{Pa}] \quad (2.33)$$

In (Wossog et al. 1990) wird die Gl. (2.27) sowohl mit einem Faktor für die Kompressibilität K_K als auch mit einem Korrekturfaktor K_ϑ , der den Temperaturabfall berücksichtigt, multipliziert. Somit gilt

$$\Delta p_v = \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \cdot K_K \cdot K_\vartheta \quad [\text{Pa}] \quad (2.34)$$

$$\text{mit } K_K = \frac{1}{\frac{\Delta p_v}{p_1}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{\Delta p_v}{p_1}} \right),$$

$$K_\vartheta = 1 - \frac{t_1 \cdot b \cdot l}{(t_1 + 273) \cdot (7,2 \cdot \dot{m} + b \cdot l)},^{16}$$

$$b = 0,0012 \cdot (1 + d_i),$$

- p_1 - Absolutdruck [bar_{abs}],
- d_i - Innendurchmesser [m],
- l - Rohrleitungslänge [m],
- t_1 - Eintrittstemperatur [°C],
- $\dot{m}$ - Massestrom [kg/s].

¹⁶ Der Korrekturfaktor K_ϑ wurde in der nicht mehr gültigen TGL 190-261/03 (Druckverluste in Dampfleitungen von Fernwärmeversorgungsanlagen) als Näherungsformel zugelassen.

Der Koeffizient b ist dabei mit einer Toleranz $\pm 30\%$ angegeben. Freileitungen und schlechte Wärmedämmung bedingen einen Zuschlag, dagegen Kanal- und gebäudeverlegte Leitungen einen Abschlag (Wossog et al. 1990).

Ist die Temperatur t_2 nicht bekannt, besteht die Möglichkeit, den Druckverlust über den Ansatz, daß die Temperatur längs der Rohrleitung konstant bleibt, zu berechnen. Damit entfällt das Temperaturglied der Gl. (2.31); es gilt somit der Druckabfall bei isothermer Strömung

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2 \cdot p_1} = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho_1}{2} \cdot w_1^2 \quad [\text{Pa}] \quad (2.35)$$

Mit dem ermittelten Druck p_2 läßt sich in erster Näherung die adiabatische Endtemperatur T_2 mittels

$$T_2 \approx T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad [\text{K}] \quad (2.36)$$

bestimmen, wobei annähernd nach (Bohl 1984) ein Isentropenexponent für Heißdampf in dem Gültigkeitsbereich $1 \leq p \leq 20$ bar und $t_s(p) \leq t \leq 400$ °C von 1,28–1,30 gilt. Anschließend kann der Druck p_2 mit Temperatureinfluß unter Anwendung der Gl. (2.31) berechnet werden.

Nachfolgend werden der Rohrreibungsbeiwert und der Widerstandsbeiwert näher betrachtet, ansonsten sei auf eine Vielzahl entsprechender Literatur verwiesen.

Der *Rohrreibungsbeiwert* gilt genau genommen nur für das gerade Rohr. Er hängt von der Rauigkeit der Rohrwand, der Strömungsgeschwindigkeit, dem Rohrdurchmesser und der Zähigkeit des Fluids ab. Diese Einflüsse werden durch die Reynolds-Zahl Re und die relative Wandrauhigkeit d/k beschrieben. Dabei wird die Reynolds-Zahl bestimmt über

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad [-] \quad (2.37)$$

mit ν - kinematische Viskosität [m^2/s],
 η - dynamische Viskosität [Pa s],
 d - Durchmesser des Rohres [m]
 w - Geschwindigkeit [m/s].

Für Heizwasser lassen sich beide Größen – kinematische und dynamische Viskosität – über Näherungsgleichungen bestimmen; für Dampf ist dem Verfasser die Näherungsgleichung nach (Wukalowitsch 1954) bekannt (s. Anhang 1).

Die Rauigkeitswerte k sind nicht identisch mit der technischen (natürlichen) Rauigkeit der Rohrwand, sondern sind als äquivalente (künstliche) Sandrauigkeiten definiert (Bohl 1984). Im Anhang 4 befindet sich eine Zusammenstellung von Rauigkeiten aus verschiedenen Literaturquellen.

Laminare Strömung liegt vor, wenn $Re < 2300$ ist. In den meisten praktisch wichtigen Fällen bewegen sich die Medien in den Rohrleitungen in turbulenter

Strömung. Im Anhang 5 sind die entsprechend gültigen Gleichungen zur Bestimmung des Rohrreibungsbeiwertes für turbulente Strömung zusammengestellt.

Rohrleitungssysteme bestehen aber nicht nur aus geraden Rohrleitungsstücken, sondern enthalten auch spezielle Einbauteile zur Querschnitts-, Richtungs- und Durchflußänderung sowie Armaturen, wie Schieber, Ventile, Klappen und Hähne. In diesen speziellen Rohrleitungselementen treten erhebliche Reibungs-, Umlenkungs- und Ablöseverluste auf. Nur in wenigen Fällen ist es möglich, die Strömungsverluste in derartigen Rohreinbauten theoretisch zu berechnen. Ansonsten kann eine Bestimmung nur über Versuche erfolgen. Dies gilt insbesondere für Armaturen.

Der *Widerstandsbeiwert* ζ ist von der Art des Rohrleitungselementes und im allgemeinen von der Reynolds-Zahl abhängig. Genauso wie bei den geraden Rohrleitungsstücken muß bei der Bestimmung des Widerstandsbeiwertes zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden werden. Dabei gibt es Widerstandsbeiwerte, die als reine Formfaktoren konstant sind, andere dagegen sind von den Strömungsverhältnissen abhängig. Zu den erstgenannten zählen beispielsweise Armaturen und plötzliche Querschnittsänderungen, bei der anderen Gruppe handelt es sich vornehmlich um Rohrverzweigungen. Für die einzelnen Widerstandsbeiwerte der Rohrleitungselemente sei u. a. verwiesen auf (Albring 1978; Bohl 1984; Glück 1978; 1985; KSB 1989; Schmidt u. Lumpe 1988; VDI 1988; SULZER 1990; Wossog et al. 1990; 1998). Widerstandsbeiwerte für Armaturen sind in (KSB 1989; SULZER 1990; Wossog et al. 1998) für DN 15–1000 ausführlich dargestellt. Für genaue Berechnungen sind die Werte bei den Armaturenlieferanten zu erfragen. Gelegentlich wird bei Armaturen anstelle des Widerstandsbeiwertes auch noch der sogenannte k_V -Wert benutzt. Es gilt

$$\text{– für Wasser: } k_V = \dot{V} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{1000 \cdot \Delta p_V}} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (2.38)$$

$$\text{– für Dampf: } k_V = \frac{\dot{m}}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{v''}{\Delta p_V}} \quad \text{für } \Delta p_V < \frac{P_1}{2} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (2.39a)$$

$$k_V = \frac{\dot{m}}{31,6} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot v''}{P_1}} \quad \text{für } \Delta p_V > \frac{P_1}{2} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (2.39b)$$

mit $\dot{V}$ - Volumenstrom [m^3/h],
 ρ_1 - Dichte des Wassers vor der Armatur [kg/m^3],
 Δp_V - Druckverlust [bar],
 $\dot{m}$ - Massestrom [kg/h],
 v'' - spezifisches Dampfvolumen [m^3/kg],
 P_1 - absoluter Druck vor der Armatur [bar].

Der k_V -Wert ist der Volumenstrom durch eine Armatur bei kaltem Wasser ($\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$) und $\Delta p_V = 1 \text{ bar}$ und gibt somit den Zusammenhang zwischen Druckverlust und Volumenstrom an (s. a. Wossog et al. 1998). Somit gilt für den Widerstandsbeiwert nach (KSB 1989)

$$\zeta \approx 16 \cdot \frac{d^4}{k_v^2} \quad [-] \quad (2.40)$$

mit d - Durchmesser [cm].

Zur Druckverlustberechnung kann noch allgemein angemerkt werden, daß es neben der sehr häufig verbreiteten Berechnungsmethode noch weitere Ansätze gibt. Dazu zählen die Druckverlustberechnung nach STRICKLER und nach HAZEN und WILLIAMS, (s. a. SULZER 1990).

Zur Berechnung von Druckverlusten in Fernwärmesystemen müssen unabhängig vom Medium Annahmen getroffen werden, die gerade bei länger in Betrieb befindlichen Systemen den momentanen Zustand der Rohrleitung und seiner Elemente beschreiben. Deshalb reicht es für eine erste Abschätzung aus, die Berechnung des Druckverlustes zu vereinfachen. Für den Rohrreibungsbeiwert kann nach (Schmidt u. Lumpe 1988) überschläglich angenommen werden:

- lichter Durchmesser 50 mm und mäßige bis große Strömungsgeschwindigkeiten: $\lambda = 0,020$,
- lichter Durchmesser 200 mm und mäßige bis große Strömungsgeschwindigkeiten: $\lambda = 0,015$ sowie
- lichter Durchmesser 1000 mm und große Strömungsgeschwindigkeiten: $\lambda = 0,012$.

Gleiches gilt bei der Festlegung der Widerstandsbeiwerte im Fernwärmenetz, besonders bei älteren Anlagen. Hier sind mit dem Ansatz $\zeta = 1/100$ m Rohrleitungslänge gute Erfahrungen gesammelt worden. Des weiteren ist es möglich, für Auslegungsrechnungen überschläglich nach (Fratzscher et al. 1982) den Widerstandsbeiwert anzugeben mit

$$\zeta = A \cdot \sqrt{\dot{m}} \quad [-] \quad (2.41)$$

mit $\dot{m}$ - Massestrom [kg/h],

A - Konstante, für Dampf 0,2–0,4 und für Wasser 0,03–0,05.

Entsprechende Computerprogramme, die keine Widerstandsbeiwerte berücksichtigen, basieren dann auf der Grundlage eines Längenzuschlagsfaktors.

Beispiel. Anhand der folgenden Beispiele wird die Vorgehensweise der Berechnung des Druckverlustes beider Medien aufgezeigt.

Beispiel 1 gilt für ein Heizwassersystem. Das dazugehörige Strangschema, hier nur für den Vorlauf, zeigt Abb. 2.3-4. Es soll der Druckverlust zwischen den beiden Punkten A und B ermittelt werden. Die Wärmeleistung im Punkt A beträgt 10 MW, die Vorlauftemperatur $t_v = 130^\circ\text{C}$ bei einer Temperaturspreizung von $\Delta t = 60\text{ K}$.

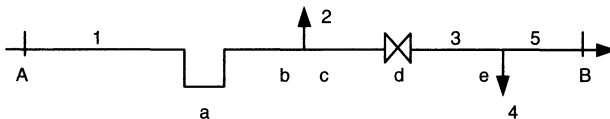


Abb. 2.3-4 Beispiel eines Strangschemas

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Druckverlustes sieht wie folgt aus:

1. Schritt: Bereitstellung der Ausgangsdaten, wie Wärmeleistung, Länge, Rohrdurchmesser
2. Schritt: Berechnung des Massestromes $\dot{m}$ nach Gl. (2.19) und der Geschwindigkeit w nach Gl. (2.22)
3. Schritt: Ermittlung der Reynolds-Zahl Re nach Gl. (2.37)
4. Schritt: Bestimmung des Rohrreibungsbeiwertes λ mit dem Ansatz der Rohrrauigkeit für dieses Beispiel mit $k = 0,2$ mm
5. Schritt: Berechnung der einzelnen Druckverluste $\Delta p_{v,i}$
6. Schritt: Bestimmung der Widerstandsbeiwerte ζ der einzelnen Rohrleitungselemente
7. Schritt: Ermittlung des Gesamtdruckverlustes

In der Tabelle 2.3-3 sind alle Ausgangsdaten und Ergebnisse zusammengefaßt. Für die Widerstandsbeiwerte der einzelnen Rohrleitungselemente wurden die folgenden Werte aus der Literatur zum Ansatz gebracht:

- Dehnungsbogen a : $\zeta = 1,2$
- T-Stück Strang 2/b : $\zeta = -0,06$ für Durchgang bei $\dot{m}_2/\dot{m}_1 = 0,3$
- Reduzierung c : $\zeta = 0,1$
- Armatur d : $\zeta = 0,26$ für Schieber mit langer Auslaufstrecke
($\zeta = 1,5$ für Klappe oder Schieber mit kurzer Auslaufstrecke)
- T-Stück Strang 4/e : $\zeta = -0,05$ für Durchgang bei $\dot{m}_4/\dot{m}_3 = 0,14$

Die jeweiligen Druckverluste werden über die Gleichung

$$\Delta p_{v,i} = \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot \sum \zeta$$

mit den dazugehörigen Werten aus der Tabelle 2.3-3 berechnet. Damit ergeben sich für

- Dehnungsbogen a : $\Delta p_{v,i} = 848,8$ Pa
- T-Stück Strang 2/b : $\Delta p_{v,i} = -59,0$ Pa mit w_3 als Durchgang
- Reduzierung c : $\Delta p_{v,i} = 98,3$ Pa
- Armatur d : $\Delta p_{v,i} = 255,6$ Pa
- T-Stück Strang 4/e : $\Delta p_{v,i} = -35,9$ Pa mit w_5 als Durchgang

Der Druckverlust zwischen den Punkten A und B setzt sich zusammen aus

Tabelle 2.3-3 Ermittlung des Druckverlustes Beispiel 1¹⁷

Strang i	$\dot{Q}$ [MW]	l [m]	DN [mm]	d_i [mm]	$\dot{m}$ [kg/s]	w [m/s]	Re [–]	λ [–]	$\Delta p_{v,i}$ [Pa]	$\Delta p_{v,i}$ [Pa/m]
1	10	50	200	206,5	39,5	1,33	1102600	0,01975	3382	67,6
2	3	10	125	131,7	11,8	0,91	520260	0,02220	653	65,2
3	7	40	150	159,3	27,6	1,45	1002713	0,02101	5186	129,6
4	1	10	80	82,5	3,9	0,76	272183	0,02522	825	82,5
5	6	20	150	159,3	23,7	1,24	857493	0,02105	1900	95,0

¹⁷ Berechnung des Rohrreibungsbeiwertes erfolgte mit der Gleichung:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$$

$$\Delta p_V = \Delta p_{V,1} + \Delta p_{V,3} + \Delta p_{V,5} + \Delta p_{V,a} + \Delta p_{V,b} + \Delta p_{V,c} + \Delta p_{V,d} + \Delta p_{V,e} = 11575,8 \text{ Pa.}$$

Dies ergibt einen spezifischen Druckverlust von $\Delta p_V / 110 \text{ m} = 105 \text{ Pa/m}$.

Die Summe der einzelnen äquivalenten Längen der Rohrleitungselemente nach Gl. (2.28) beträgt 14,3 m. Setzt man statt der Berechnung der einzelnen Widerstandsbeiwerte den Ansatz $\zeta = 1 / 100 \text{ m}$ entsprechender Rohrleitungslänge, ergibt sich

$$\Delta p_V = \Delta p_{V,1} + \Delta p_{V,3} + \Delta p_{V,5} + \frac{\rho}{2} \cdot (0,5 \cdot w_1^2 + 0,4 \cdot w_3^2 + 0,2 \cdot w_5^2)$$

$$\Delta p_V = 3382 + 5186 + 1900 + 354 + 393 + 144 = 11359 \text{ Pa.}$$

Die Abweichung zur präziseren Variante beträgt in diesem Fall ca. 1,8 % und ist somit für die praktische Handhabung durchaus ausreichend, vor allem gegeben durch die vielen zu treffenden Annahmen.

Beispiel 2 gilt für ein Dampfsystem. Das Strangschemata bleibt dasselbe, wobei hier die Berechnung nur für die Dampfleitung erfolgt. Es soll der Druckverlust zwischen den beiden Punkten A und B ermittelt werden. Die Wärmeleistung im Punkt A beträgt 10 MW, die Betriebstemperatur 260 °C, der Betriebsdruck 10 bar sowie eine konstante Kondensattemperatur von 70 °C ($c_{p,tk} = 293 \text{ kJ/kg}$).

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Druckverlustes (isotherm) sieht analog des Beispiels 1 aus:

1. Schritt: Bereitstellung der Ausgangsdaten, wie Wärmeleistung, Länge, Rohrdurchmesser
2. Schritt: Berechnung des Massestromes $\dot{m}$ nach Gl. (2.19) und der Geschwindigkeit w nach Gl. (2.22) mit Hilfe der Enthalpiedifferenz und des spezifischen Volumens
3. Schritt: Ermittlung der Reynolds-Zahl Re nach Gl. (2.37) mit der dynamischen Viskosität (konstant: $18,5E-06 \text{ Pa s}$)
4. Schritt: Bestimmung des Rohrreibungsbeiwertes λ mit dem Ansatz der Rohrrauigkeit für dieses Beispiel mit $k = 0,2 \text{ mm}$
5. Schritt: Berechnung der einzelnen Druckverluste $\Delta p_{v,i}$
6. Schritt: Ermittlung des jeweiligen Enddruckes p_2 , um somit den 3.–6. Schritt für iterativ für alle zu berechnenden Stränge zu wiederholen; der Enddruck p_2 des berechneten Stranges ist der Anfangsdruck p_1 des neu zu berechnenden Stranges
7. Schritt: Bestimmung der Widerstandsbeiwerte ζ der einzelnen Rohrleitungselemente
8. Schritt: Ermittlung des Gesamtdruckverlustes

In der Tabelle 2.3-4 sind alle Ausgangsdaten und Ergebnisse zusammengefaßt.

Für die Widerstandsbeiwerte der einzelnen Rohrleitungselemente gelten die Werte analog Beispiel 1. Für die Ermittlung der jeweiligen Druckverluste wird die Gl. (2.35) um die Summe der Widerstandsbeiwerte erweitert. Es gilt

Tabelle 2.3-4 Ermittlung des Druckverlustes Beispiel 2

Strang i	$\dot{Q}$ [MW]	l [m]	DN [mm]	d_i [mm]	$\dot{m}$ [kg/s]	w [m/s]	Re [–]	λ [–]	$\Delta p_{v,i}$ [Pa]	$\Delta p_{v,i}$ [Pa/m]
1	10	50	200	206,5	3,74	26,6	1247216	0,01973	7365	147
2	3	10	125	131,7	1,12	21,2	586120	0,02214	1469	148
3	7	40	150	159,3	2,62	33,8	1130663	0,02098	12546	314
4	1	10	80	82,5	0,37	20,9	311393	0,02514	2254	225
5	6	20	150	159,3	2,24	34,6	967332	0,02101	5308	265

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2 \cdot p_1} = \frac{\rho_1}{2} \cdot w_1^2 \cdot \left(\lambda \cdot \frac{1}{d} + \sum \zeta \right). \quad [\text{Pa}] \quad (2.42)$$

Dabei wird der Widerstandsbeiwert ζ_a dem Strang 1, $\zeta_b + \zeta_c + \zeta_d$ dem Strang 3 und ζ_e dem Strang 5 zugeordnet. Der Druckverlust zwischen den Punkten A und B setzt sich zusammen aus

$$\Delta p_v = \Delta p_{v,i} + \Delta p_{v,3} + \Delta p_{v,5} = 27830 \text{ Pa.}$$

Dies ergibt einen spezifischen Druckverlust von $\Delta p_v / 110 \text{ m} = 253 \text{ Pa/m}$.

Setzt man statt der Berechnung der einzelnen Widerstandsbeiwerte den Ansatz $\zeta = 1 / 100 \text{ m}$ entsprechender Rohrleitungslänge, d. h. $\zeta_a = 0,5$, $\zeta_b + \zeta_c + \zeta_d = 0,4$ und $\zeta_e = 0,2$, ergibt sich $\Delta p_v = 27443 \text{ Pa}$. Die Abweichung zur präziseren Variante beträgt in diesem Fall 1,2 % und ist somit für die praktische Handhabung ausreichend, vor allem gegeben durch die vielen zu treffenden Annahmen.

Die Druckverlustberechnungen von Fernwärmenetzen werden aufgrund der realen Struktur kompliziert und sind bei zunehmendem Verzweigungs- bzw. Vermaschungsgrad in den meisten Fällen nur noch mit entsprechenden Computerprogrammen lösbar. Entscheidend dabei ist, daß bei den Druckverlusten von Heizwasser zusätzlich das Höhenniveau mit zu berücksichtigen ist. Außerdem darf der Druck beim ungünstigst gelegenen Abnehmer den zur Vorlauftemperatur gehörigen Siededruck plus Sicherheitszuschlag zur Vermeidung von Ausdampfungen nicht überschreiten.

Die Bestimmung des von der Pumpe zu überwindenden Differenzdruckes ist bei Strahlennetzen unproblematisch und kann durch Summierung der Druckverluste der einzelnen Abschnitte bestimmt werden. Dabei ist bei einer Verzweigung der größte Druckverlust, der von einem sogenannten Knoten abgehenden Rohrleitung zu berücksichtigen.

Hingegen ergeben sich bei Maschennetzen für die Berechnung der Druckverluste zwei Bedingungen:

- Die Summe der zufließenden Masseströme entspricht der Summe der abfließenden Masseströme (1. KIRCHHOFF'sches Gesetz)

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_i = 0. \quad (2.43)$$

- Die Summe aller Druckverluste einer Masche muß 0 sein. Dabei ist für die Masche ein Umfahrungssinn festzulegen (z. B. Uhrzeigersinn). Im Uhrzeigersinn auftretende Druckverluste sind positiv, entgegen dem Uhrzeigersinn auftretende Druckverluste sind negativ

$$\sum_{j=1}^n \Delta p_j = 0. \quad (2.44)$$

Danach ist die in Abb. 2.3-5 dargestellte Masche wie folgt zu bilanzieren:

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 - \dot{m}_4 = 0, \quad (2.45)$$

$$\Delta p_a + \Delta p_b + \Delta p_c - \Delta p_d = 0. \quad (2.46)$$

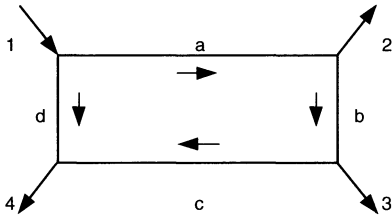


Abb. 2.3-5 Masche eines Fernwärmenetzes

Die Bestimmung der Druckverluste ist nunmehr nur auf iterativem Wege möglich. Die entsprechende Vorgehensweise ist in (Munser 1980) ausführlich dargestellt.

2.3.7 Optimaler Durchmesser

Grundsätzlich wird jede technische Anlage für bestimmte Parameter, den Auslegungszustand, bemessen. Dazu zählen u. a.

- Temperatur (Vorlauf und Rücklauf),
- Massestrom,
- Gleichzeitigkeitsfaktor,
- Netzgröße,
- Netzgestaltung (unvermascht oder/und vermascht),
- Verlegeverfahren,
- Rohrdurchmesser,
- Rohrwerkstoff,
- Dämmdicke,
- Pumpendruck.

Soll eine wirtschaftlich optimale Anlage entstehen, so sind die oben aufgezählten Parameter unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen so zu wählen, daß minimale Kosten als Zielfunktion erreicht werden. Mitunter ist die Zielfunktion auch begrenzt, so daß z. B. der Drucksprung der Umwälzpumpe vorgegeben ist und somit lediglich eine optimale Druckaufteilung auf die einzelnen Stränge gesucht wird. Die Nebenbedingungen selbst können u. a. physikalischer, konstruktiver, technologischer, regelungstechnischer Art sein. Das Aufsuchen des Minimums bereitet mitunter sehr große Schwierigkeiten, da es sich um ein nichtlineares Optimierungsproblem handelt. Für derartige Optimierungsprobleme können keine allgemeingültigen Lösungen angegeben werden. In (Munser 1980; Fratzscher et al. 1982; Glück 1985) werden diese Optimierungsprobleme beschrieben, wobei entsprechend der zustellenden Zielfunktion eine Anpassung stattfinden muß.

Grundsätzlich kann bemerkt werden, daß die Minimierung der Gesamtkosten unter Beachten der gegebenen Parametervielfalt derzeit nicht praktikabel ist. Dies hängt vor allem mit der richtigen Beschreibung der einzelnen Parameter zusammen. Nicht selten lassen sich diese nur durch zu wählende Konstanten festlegen.

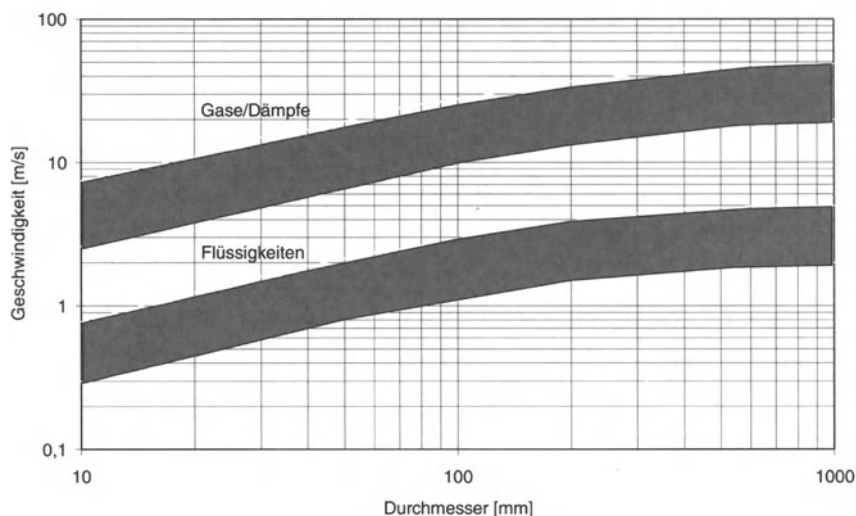


Abb. 2.3-6 Durchmesser in Abhängigkeit der wirtschaftlichen Geschwindigkeit nach (Bohl 1984)

Tabelle 2.3-5 Ausgangsbedingungen für Abb. 2.3-7 und Abb. 2.3-8

Größe	Einheit	Heizwasser	Dampf			
Druck	p bar	10	5	10	15	
Temperatur	t °C	120	$t_s(p) + 50$	$t_s(p) + 50$	$t_s(p) + 50$	
spezifisches Volumen	v m ³ /kg	0,00106	0,42682	0,22222	0,15136	
Dichte	ρ kg/m ³	943,25	—	—	—	
Rohrreibungsbeiwert	λ —	0,017	0,017	0,017	0,017	

Selbst bei der Durchmesseroptimierung eines Stranges werden die Beschreibungen der

- spezifischen Rohrkosten,
- spezifischen Dämmkosten,
- spezifischen Armaturenkosten,
- spezifischen bautechnischen Kosten,
- spezifischen Betriebskosten,
- spezifischen Wärmeverlustkosten sowie
- Pumpenkosten

benötigt. Für praktische Belange und schnelle Entscheidungen reicht es oftmals aus, den optimalen Durchmesser anhand der Geschwindigkeit, wie Abb. 2.3-6 zeigt, auszuwählen. Daraus ist nicht ersichtlich, wie hoch der zu erwartende Druckverlust bei diesem Durchmesser ist. Dieser kann über die Gl. (2.27) ermittelt werden.

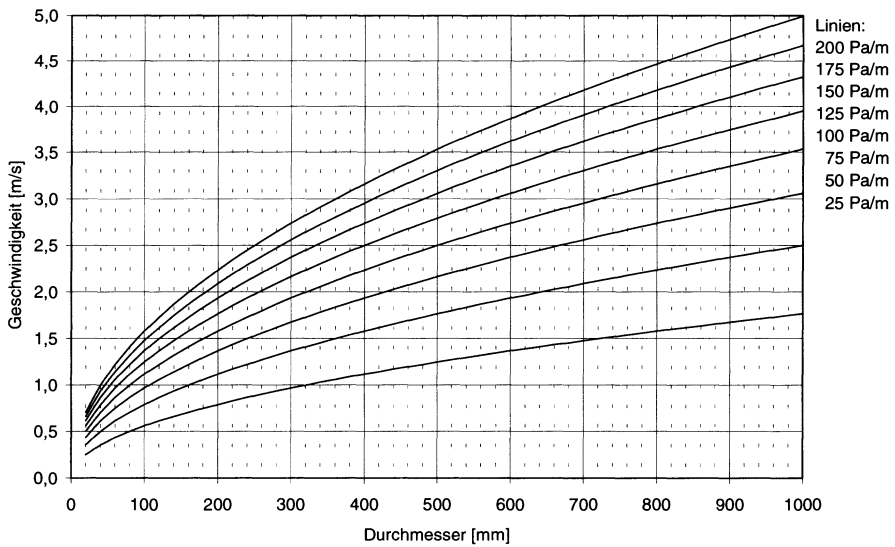


Abb. 2.3-7 Heizwassergeschwindigkeit als Funktion des Durchmessers und des spezifischen Druckverlustes

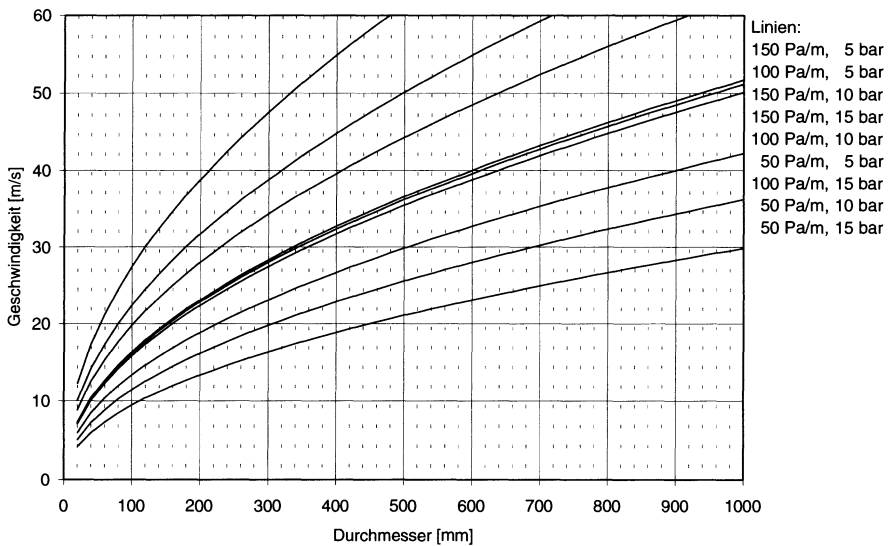


Abb. 2.3-8 Dampfgeschwindigkeit als Funktion des Durchmessers, des spezifischen Druckverlustes sowie des Eintrittsdruckes p_1

Die beiden folgenden Grafiken in Abb. 2.3-7 und Abb. 2.3-8 zeigen den zu wählenden Durchmesser in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des spezifischen Druckverlustes für die Medien Heizwasser und Dampf. Letzterer erfolgt in isothermischer Betrachtung bei verschiedenen Eingangsdrücken. Für diese Grafiken wurden folgende Bedingungen zum Ansatz gebracht (s. Tabelle 2.3-5).

2.3.8

Wärmeverluste und Isolierdicken

Für die Wirtschaftlichkeit des Betriebes von Fernwärmenetzen sind die Wärmeverluste von erheblicher Bedeutung. Diese werden bestimmt von

- der Außentemperatur,
- bei Freileitungen von der Windgeschwindigkeit,
- der Temperatur des Wärmemediums,
- dem Rohrdurchmesser,
- dem Isolierstoff für die Rohrleitung,
- der Dämmdicke und
- der Geschwindigkeit des Wärmemediums.

Der Anteil der Wärmeverluste am Wärmedurchsatz wächst bei niedrigen Belastungen des Rohrsystems und vermindert so die Wirtschaftlichkeit der Wärmeverteilung. Höhere Wärmeverluste treten in Fernwärmenetzen für die gleichzeitige Lieferung von Wärme für Raumheizung und Warmwasserbereitung auf, weil letztere mit einem geringeren Wärmedurchsatz auch im Sommer bereitgestellt werden muß. In diesem Fall sind dann die Leitungen nur schwach ausgelastet.

Bei Dampfleitungen tritt zusätzlich ein erhöhter Kondensatanfall auf, welcher die Wirtschaftlichkeit noch weiter senkt. So manche Dampfleitung transportiert im Sommer mehr Kondensat als benötigten Dampf für die Abnehmer.

Kanal- und Freileitungen. Für praktische Berechnungen ist es günstig, den Wärmedurchgangskoeffizienten von gedämmten Rohren auf dessen Innendurchmesser d_i zu beziehen, da dieser überwiegend bekannt ist (Abb. 2.3-9). Bezugnehmend auf die Abb. 2.3-9 ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient zu

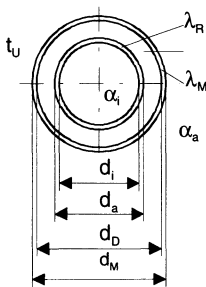


Abb. 2.3-9 Querschnitt eines wärmegeprägten Rohres

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_i}{2 \cdot \lambda_a} \cdot \ln\left(\frac{d_a}{d_i}\right) + \frac{d_i}{2 \cdot \lambda_D} \cdot \ln\left(\frac{d_D}{d_i}\right) + \frac{d_i}{2 \cdot \lambda_M} \cdot \ln\left(\frac{d_M}{d_D}\right) + \frac{d_i}{d_M \cdot \alpha_a}} \cdot [\text{W/m}^2 \text{ K}] \quad (2.47)$$

Der Wärmeverlust wird berechnet aus

$$\dot{Q}_R = k_i \cdot U_i \cdot l \cdot \Delta t, [\text{W}] \quad (2.48)$$

woraus der spezifische Wärmeverlust gebildet werden kann mit

$$\dot{q}_R = k_i \cdot U_i \cdot \Delta t = k_i \cdot d_i \cdot \pi \cdot \Delta t. [\text{W/m}] \quad (2.49)$$

Üblicherweise ist der innere Wärmeübergangswiderstand und der Wärmeleitwiderstand des Rohres vernachlässigbar und man erhält den für praktische Erfordernisse ausreichenden Wärmedurchgangskoeffizienten mit

$$k_i = \frac{1}{\frac{d_i}{2 \cdot \lambda_D} \cdot \ln\left(\frac{d_D}{d_a}\right) + \frac{d_i}{2 \cdot \lambda_M} \cdot \ln\left(\frac{d_M}{d_D}\right) + \frac{d_i}{d_M \cdot \alpha_a}} \cdot [\text{W/m}^2 \text{ K}] \quad (2.50)$$

Für α_a ist der Gesamtwärmeübergangskoeffizient, bestehend aus Konvektions- und Strahlungsanteil, einzusetzen. Dabei reicht es aus, für gedämmte Rohrleitungen in Gebäuden und Kanälen den Mittelwert von $\alpha_a = 9,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ anzusetzen. Dagegen ist der Wärmeübergangskoeffizient für Freileitungen stark von der angenommenen Windgeschwindigkeit abhängig, wobei hier der Mittelwert von $\alpha_a = 23,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ durchaus als ausreichend angesehen werden kann (Glück 1985).

In der Tabelle 2.2-6 sind Wärmeleitfähigkeiten für verschiedene Dämmstoffe angegeben. Die Wärmeleitfähigkeit des Blechmantels kann mit etwa $\lambda_M = 0,58 \text{ W/m K}$ gesetzt werden.

Beispiel. Es sollen die entsprechenden Wärmedurchgangskoeffizienten, sowohl mit und ohne Berücksichtigung des Blechmantels, mit folgenden Ausgangswerten bestimmt werden.

DN 300	s = 7,1 mm	$\lambda_D = 0,04 \text{ W/m K}$
$d_i = 323,9 \text{ mm}$	$s_D = 80 \text{ mm}$	$\lambda_M = 0,58 \text{ W/m K}$
	$s_M = 1 \text{ mm}$	$\alpha_a = 23,20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Es gelten

$$\begin{aligned} d_a &= d_i + 2 \cdot s = 338,1 \text{ mm}, \\ d_D &= d_a + 2 \cdot s_D = 498,1 \text{ mm}, \\ d_M &= d_D + 2 \cdot s_M = 500,1 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient mit Berücksichtigung des Blechmantels nach Gl. (2.50) lautet

$$k_i = 0,6259 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

und ohne Berücksichtigung des Blechmantels

$$k_i = 0,6263 \text{ W/m}^2 \text{ K}.$$

Wie dieses Beispiel zeigt, kann die Gleichung zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten noch weiter vereinfacht werden, ohne daß das Ergebnis erheblich beeinflußt wird. Somit gilt

Tabelle 2.3-6 Anhaltswerte für wirtschaftliche Isolierdicke [mm] nach (LENTJES 1993)

DN	Mediumtemperatur [°C]										
	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
15	30	30	30	30	30	30	30	40	40	50	50
20	30	30	30	30	30	30	40	40	40	50	50
25	30	30	30	30	30	30	40	40	50	50	60
32	30	30	30	30	40	40	40	50	50	50	60
40	30	30	30	30	40	40	50	50	50	60	60
50	30	30	30	40	40	50	50	50	60	60	70
65	30	30	40	40	50	50	60	60	70	70	70
80	30	40	40	50	50	60	60	70	70	70	80
100	40	40	50	50	60	60	70	70	80	80	90
125	40	50	50	60	60	70	80	80	90	90	100
150	40	50	60	60	70	80	80	90	90	100	100
200	50	60	60	70	80	80	90	100	100	110	120
250	50	60	70	80	90	90	100	110	110	120	130
300	60	70	80	80	90	100	110	110	120	130	130
350	60	70	80	90	100	100	110	120	130	130	140
400	60	70	80	90	100	110	120	120	130	140	150
450	70	80	90	100	100	110	120	130	140	150	150
500	70	80	90	100	110	120	130	130	140	150	160
600	70	90	100	110	120	120	130	140	150	160	170
700	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
800	80	90	110	120	130	140	150	160	170	180	180
900	80	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1000	90	100	110	120	140	150	160	170	180	190	200

$$k_i = \frac{1}{\frac{d_i}{2 \cdot \lambda_D} \cdot \ln\left(\frac{d_D}{d_a}\right) + \frac{d_i}{d_M \cdot \alpha_a}} \quad [\text{W/m}^2 \text{ K}] \quad (2.51)$$

Die wirtschaftliche Isolierdicke übt, wie eingangs erwähnt, erheblichen Einfluß auf den Wärmeverlust der Rohrleitung aus. Verschiedene rechnerische Ansätze werden u. a. in (Wagner 1991a; LENTJES 1993; Glück 1985) gezeigt. Tabelle 2.3-6 zeigt für einen Temperaturbereich von $100^\circ\text{C} \geq t \geq 350$ entsprechende Anhaltswerte für die wirtschaftliche Isolierdicke. Dabei wird davon ausgegangen, daß eine Oberflächentemperatur der Wärmedämmung von etwa 55°C eingehalten wird. Des weiteren ist anzumerken, daß die wirtschaftliche Isolierdicke ebenfalls von den Jahresbetriebsstunden abhängig ist, d. h. je weniger Betriebsstunden die Rohrleitung betrieben wird, desto kleiner wird die Isolierdicke unter Beachtung einer Mindestisolierdicke.

Erdverlegte Rohrleitungen. Die vorherigen Betrachtungen gelten nicht für erdverlegte Rohrleitungssysteme. Deren Berechnung gestaltet sich relativ kompliziert, da die Wärmeleitung mindestens zweidimensional mit betrachtet werden muß und die Randbedingungen – Temperatur am Rohrumfang, Außenlufttemperatur an der Erdoberfläche und Grundwassertemperatur in vorgegebener Tiefe – mit zu berücksichtigen sind. Die Temperatur am Rohrumfang und die Außenluft-

temperatur sind eigentlich als eine Zeitfunktion anzusetzen, wodurch ein instationäres Wärmeleitproblem in seiner Gesamtheit zu betrachten wäre.

Verschiedene Verfahren sind in (Glück 1985) ausführlich beschrieben. Für die vereinfachte Betrachtung, die nur den Wärmetransport zur Erdoberfläche für ein Einzelrohr – bei Vernachlässigung des Wärmeübergangswiderstandes α_i – berücksichtigt, gilt

$$\dot{q}_R = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_E \cdot \frac{t_F - t_U}{\frac{\lambda_E}{\lambda_D} \cdot \ln\left(\frac{r_D}{r_a}\right) + \operatorname{arccosh}\left(\frac{h}{r_D}\right)} \quad (2.52)$$

mit λ_E - Wärmeleitkoeffizient Erdreich ($\lambda_E = 1,2 \text{ W/m K}$),
 t_F - Mediumtemperatur [$^{\circ}\text{C}$],
 t_U - Außenlufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$],
 r_D - Radius der Dämmung [m],
 r_a - Außenradius der Rohrleitung [m],
 h - Verlegetiefe [m].

Soll ein Wärmeaustausch zur Außenluft und zum Grundwasser berücksichtigt werden, so kann u. a. die zugeschnittene Gleichung aus (Glück 1985) Anwendung finden. Dabei können auch Wärmeübergangskoeffizienten von der Erdoberfläche zur Luft und vom homogenen Erdreich an die grundwasserführende Schicht einbezogen werden. Durch die unterschiedlichst zu treffenden Annahmen hinsichtlich der Grundwassertiefe und der Umgebungstemperaturen reicht die Gl. (2.51) für diese technischen Berechnungen aus. Der Fehler liegt unter 2,5 %.

In (Randløv 1997) werden Gleichungen für die näherungsweise Berechnung des spezifischen Wärmeverlustes erdverlegter Rohrleitungspaare, speziell für das Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr, aufgezeigt. Aus den beiden Wärmeverlusten für den Vorlauf und den Rücklauf

$$\begin{aligned} \dot{q}_{V,V} &= U_1 \cdot (t_V - t_B) - U_2 \cdot (t_R - t_B), \\ \dot{q}_{V,R} &= U_1 \cdot (t_R - t_B) - U_2 \cdot (t_V - t_B) \end{aligned} \quad (2.53)$$

ergibt sich der gesamte spezifische Wärmeverlust zu

$$\dot{q}_{V,V} + \dot{q}_{V,R} = 2 \cdot (U_1 - U_2) \cdot \left(\frac{t_V + t_R}{2} - t_B \right) \quad (2.54)$$

mit U_1, U_2 - Wärmeverlustkoeffizienten [W/m K],
 t_V - Vorlauftemperatur [$^{\circ}\text{C}$],
 t_R - Rücklauftemperatur [$^{\circ}\text{C}$],
 t_B - ungestörte Bodentemperatur in der Tiefe Z [$^{\circ}\text{C}$].

Für symmetrische Rohrkonstruktionen gelten für die einzelnen Koeffizienten

$$U_1 = \frac{R_s + R_i}{(R_s + R_i)^2 - R_h^2}, \quad (2.55a)$$

$$U_2 = \frac{R_h}{(R_s + R_i)^2 - R_h^2} \quad (2.55b)$$

und somit für den gesamten Wärmeverlustkoeffizienten

$$U_1 - U_2 = \frac{1}{R_s + R_i + R_h} \quad (2.56)$$

mit R_s - spezifischer Dämmwert des Bodens [m K/W],
 R_i - spezifischer Dämmwert des Dämmstoffes [m K/W],
 R_h - spezifischer Dämmwert der Wärme zwischen Vor- und Rücklaufleitung [m K/W].

Die einzelnen Dämmwerte werden bestimmt über

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_E} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot Z_C}{d_M} \right) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_E} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot (Z + R_O \cdot \lambda_E)}{d_M} \right) \\ R_i &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_D} \cdot \ln \left(\frac{d_D}{d_a} \right) \\ R_h &= \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_E} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{2 \cdot Z_C}{C} \right)^2 \right) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_E} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{2 \cdot (Z + R_O \cdot \lambda_E)}{C} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (2.57)$$

mit Z_C - korrigierter Wert der Verlegetiefe Z [m] (gerechnet von der Oberfläche bis zur Rohrachse), so daß der Übergangswiderstand R_O an der Bodenoberfläche mit berücksichtigt ist [m],
 λ_E - Wärmeleitkoeffizient Erdreich; kann bei nassem Boden normalerweise auf etwa 1,5–2,0 W/m K, bei trockenem Sand auf etwa 1,0 W/m K angesetzt werden,
 R_O - Übergangswiderstand an der Bodenoberfläche (0,0685 m² K/W),
 d_M - Manteldurchmesser [m],
 λ_D - Wärmeleitkoeffizient Isolierung (Polyurethan-Dämmung); laut EN DIN 253 gilt als Grenzwert 0,033 W/m K wobei häufig für praktische Berechnungen der Wert 0,030 W/m K verwendet wird,
 d_D - Durchmesser der Dämmung [m],
 d_a - Außendurchmesser der Rohrleitung [m],
 C - Abstand der beiden Rohrachsen für Vorlauf und Rücklauf [m].

Der spezifische Wärmeverlust in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser ist in Abb. 2.3-10 dargestellt.

Bei dem Verlegeverfahren Stahlmantelrohr sind die spezifischen Wärmeverluste abhängig von

- der Isolierdicke,
- dem sich dadurch ergebenden Mantelrohrdurchmesser,
- dem Ringspaltdruck sowie
- der Betriebstemperatur.

In Abb. 2.3-11 sind die spezifischen Wärmeverluste bei einer wirtschaftlichen Isolierdicke sowohl für ein Heizwassersystem mit 130/70 °C als auch für ein Dampfsystem mit 250 °C entsprechend des Ringspaltdruckes dargestellt (FWT 1992).

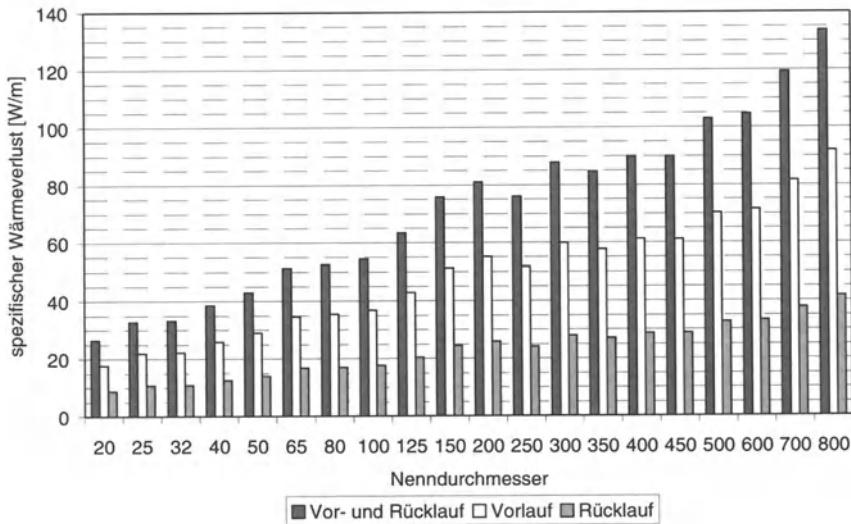


Abb. 2.3-10 Spezifischer Wärmeverlust des Verlegeverfahrens Kunststoffmantelrohr für Vor- und Rücklaufleitung gemeinsam bzw. einzeln

Bemerkung:

$\lambda_E = 2,0 \text{ W/m K}$	$t_V = 130 \text{ }^\circ\text{C}$	$Z_{\min} = 0,4 \text{ m} + \frac{1}{2} \cdot d_M$
$\lambda_D = 0,027 \text{ W/m K}$	$t_R = 70 \text{ }^\circ\text{C}$	C in Abhängigkeit von d_M
$R_0 = 0,0685 \text{ m}^2 \text{ K/W}$	$t_B = 8 \text{ }^\circ\text{C}$	

Die Wärmeverluste können mit Einsatz von größeren Isolierdicken minimiert werden. Diesem Vorteil stehen aber als Nachteil die dadurch bedingt höheren Investitionskosten gegenüber, verursacht durch einen größeren Mantelrohrdurchmesser und somit u. a. erhöhtem Tiefbauaufwand.

Das in der Rohrleitung strömende Medium mit einer entsprechenden Temperatur unterliegt einem Temperaturabfall. Dabei ergeben sich zwei verschiedene Betrachtungen, zum einem als Funktion des Weges, zum anderen als Funktion der Zeit.

Für den Temperaturabfall als Funktion des Weges gilt

$$t = t_0 \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot \pi \cdot d}{c_p \cdot \dot{m}} \cdot x\right) = t_0 \cdot \exp\left(-\frac{\dot{q}_V}{t_0 \cdot c_p \cdot \dot{m}} \cdot x\right) \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.58)$$

- mit
- k - Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{W/m}^2 \text{ K}$],
 - d - Rohrdurchmesser [m],
 - c_p - spezifische Wärmekapazität [kJ/kg K],
 - $\dot{m}$ - Massestrom [kg/s],
 - $\dot{q}_V$ - spezifischer Wärmeverlust [W/m],
 - t_0 - Eintrittstemperatur [$^\circ\text{C}$],
 - x - Wegstrecke [m].

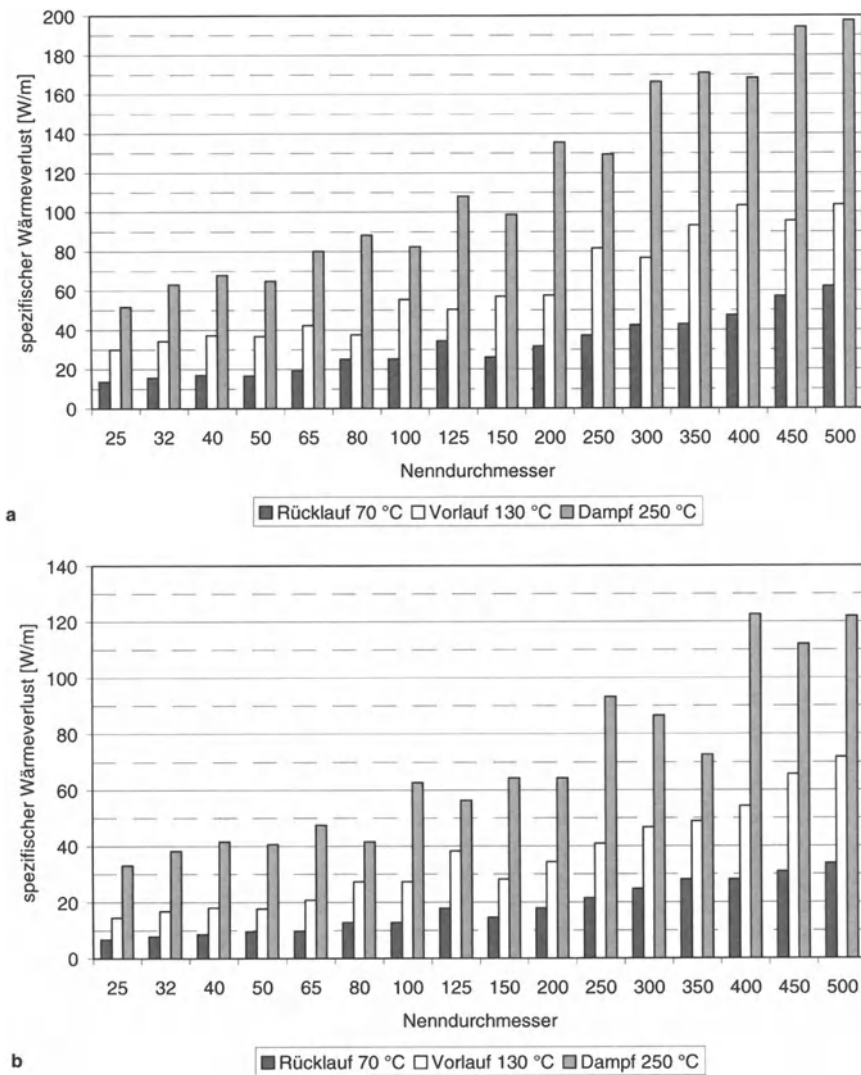


Abb. 2.3-11 Spezifischer Wärmeverlust für Rücklauf-, Vorlauf- und Dampfleitung des Verlegeverfahrens Stahlmantelrohr nach (FWT 1992)

a Ringspaltdruck 1013 mbar, **b** Ringspaltdruck 0,5 mbar (Dauervakuum)

Die exakte Herleitung ist in (Glück 1985) detailliert angegeben. Die Außentemperatur wird als sogenannte Übertemperatur mit berücksichtigt, d. h. es gilt

$$t = t - (-t_U) \text{ bzw. } t_0 = t_0 - (-t_U) \cdot [^{\circ}\text{C}] \quad (2.59)$$

Beispiel. Gegeben ist eine Rohrleitung $d_i = 60,3$ mm, welche kontinuierlich mit einem Massstrom von 2 kg/s mit einer Temperatur von 90 °C durchströmt wird. Der Wärmedurchgangskoeffizient beträgt 0,62 W/m² K. Wie groß ist der Temperaturabfall pro 100 m bei einer Außenlufttemperatur von -10 °C? Mit den beiden Gln. (2.58) und (2.59) gilt

$$t - (-10) = [90 - (-10)] \cdot \exp\left(-\frac{0,62 \cdot \pi \cdot 0,0603}{4,2644 \cdot 1000 \cdot 2} \cdot 100\right) = 89,86 \text{ °C},$$

d. h. etwa 0,14 °C/100 m Rohrleitungslänge.

Für den Temperaturabfall als Funktion der Zeit gilt

$$t = t_0 \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot \pi \cdot d}{c_p \cdot m} \cdot \tau\right) = t_0 \cdot \exp\left(-\frac{\dot{q}_V \cdot l}{t_0 \cdot c_p \cdot m} \cdot \tau\right) \quad [\text{°C}] \quad (2.60)$$

mit k - Wärmedurchgangskoeffizient [W/m² K],
 d - Rohrdurchmesser [m],
 c_p - spezifische Wärmekapazität [kJ/kg K],
 m - Flüssigkeitsmasse [kg],
 $\dot{q}_V$ - spezifischer Wärmeverlust [W/m],
 t_0 - Eintrittstemperatur [°C],
 τ - Zeit [s].

Die Gl. (2.60) gilt ohne das Wärmespeichervermögen des Stahlrohres. In (Glück 1985) wird dies berücksichtigt durch einen zusätzlichen Faktor unter der gültigen Bedingung, daß die mittlere Temperatur der Rohrwand gleich der des Mediums gesetzt wird.

In den Wintermonaten können Versorgungsunterbrechungen für das Fernwärmesystem kritisch werden. Gefährdet dabei sind vor allem kleinere Nennweiten, insbesondere im Freibereich. Dieser Sachverhalt trifft auch in ungeschützten bzw. schnell auskühlenden Räumen zu. Dazu zählen Meßleitungen, Entleerungen und Entlüftungen sowie bei Dampfsystemen die Kondensatabführungen.

Um beispielsweise die interessante Frage des Einfrierens von Heizwasserleitungen bei Netzausfall beantworten zu können, wird die Gl. (2.60) umgestellt nach der Zeit. Es gilt

$$\tau = \frac{c_p \cdot \rho \cdot A}{k \cdot \pi \cdot d} \cdot \ln\left(\frac{t_0}{t}\right) \quad [\text{s}] \quad (2.61)$$

Anhaltswerte für die Zeiten des Einfrierens in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur sind in Abb. 2.3-12 für die Nenndurchmesser DN 15–80 dargestellt. Die Berechnung der jeweiligen Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgte nach der Gl. (2.51). Diese Anhaltswerte sind neben den meteorologischen Bedingungen weiterhin von dem Zustand der Rohrleitung und deren Isolierung abhängig. Auch sollte beachtet werden, daß in den Meß-, Entleerungs- und Entlüftungsleitungen die Medientemperatur gegenüber der durchströmten Hauptrohrleitung geringer ist, da keine bzw. kaum eine Strömung vorliegt. Selbst wenn keine Versorgungsunterbrechung vorherrscht, stellen undichte Armaturen der betreffenden Leitungen ein besonderes Gefahrenpotential bei Minustemperaturen dar.

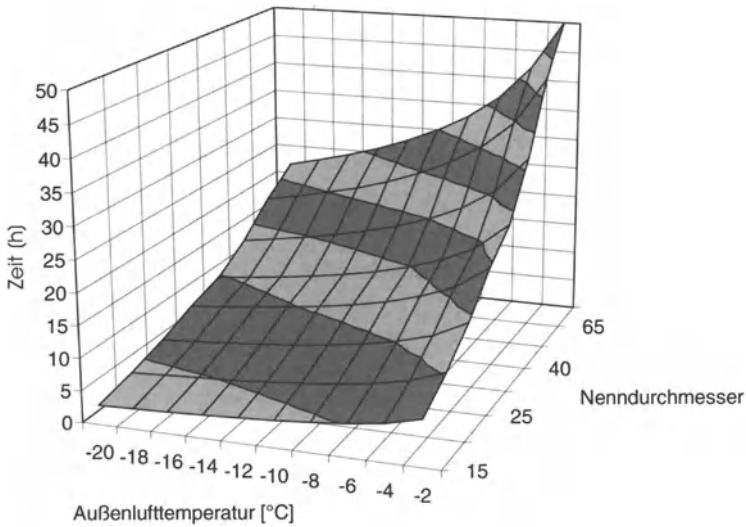


Abb. 2.3-12 Anhaltswerte für Zeiten des Einfrierens von Freileitungen bei Versorgungsunterbrechung (Ansatz: Medientemperatur bei Unterbrechung: 70 °C, Isoliertdicke nach Tabelle 2.3-6)

2.3.9

Statische Berechnung

Bei der Projektierung und Auslegung warmgehender Rohrleitungen sind die auftretenden Spannungen im Rohrwerkstoff gegenüber den zulässigen Spannungen nachzuweisen. Weiterhin sind die durch behinderte Wärmedehnung im Rohrleitungssystem entstehenden und auf die Lager wirkenden Kräfte und Momente zu bestimmen. Diese Spannungen, Kräfte und Momente werden mit der Elastizitäts- und Festigkeitsberechnung ermittelt. Bei den Berechnungen müssen alle Faktoren berücksichtigt werden, die die Festigkeit der Rohre und deren Zubehöerteile, wie beispielsweise Formstücke, Dehnungsausgleicher und vor allem Armaturen beeinflussen.

Ziel ist die Vermeidung eines Bruches der Rohrleitung oder der Unterstützung durch Überbeanspruchung sowie Undichtheiten an Rohrleitungsverbindungen. Anders formuliert lautet das Ziel: Erreichen der vorgegebenen Lebensdauer unter entsprechenden Betriebsbedingungen. Maßgebend für die statische Berechnung ist die Rohrleitungsführung, wobei ebene, räumlich verzweigte und vermaschte Systeme unterschieden werden. Weiterhin muß unterteilt werden in Rohrleitungen ohne und mit direkter Erdaufblast. Zu den erst genannten zählen die Verlegeverfahren Freileitung und Kanal, aber auch Durchörterungen und Düker, d. h. bei denen sich das Medienrohr in einem Mantelrohr bewegen kann.

Im Rahmen dieser Abhandlung wird auf eine detaillierte Darstellung der Vorgehensweise bei statischen Berechnungen von Rohrleitungssystemen verzichtet. Allgemeine Beschreibungen können nachgeschlagen werden u. a. in (Hampel 1972; Schwaigerer 1986; Schmidt u. Lumpe 1988; Wagner 1991b; Wossog et al. 1990; 1998).

Während bei einfachen Systemen (eben, unvermascht und unverzweigt) eine manuelle Berechnung durchgeführt werden kann, ist dies bei komplizierten Systemen ohne Computer nicht möglich. Ein bekanntes manuelles Berechnungsverfahren ist in (Jürgensonn 1953) beschrieben. Die Palette der hierzu existierenden Software ist vielschichtig und auf entsprechende Anwendungsfälle zugeschnitten (s. a. Wossog et al. 1998).

In (AGFW 1989) erfolgen Ausführungen speziell für die Verlegeverfahren Freileitung und Kanal in Form einer Richtlinie für die statische Berechnung und den Festigkeitsnachweis. Die darin enthaltenen Verfahren der Spannungsermittlung und deren Bewertung gelten für Stahlmedienrohre unter vorwiegend ruhenden Beanspruchungen aus Innendruck, Wärmedehnung, Eigengewicht und Reibung. Des weiteren werden für häufig vorkommende 2-Festpunkt-Rohrsysteme entsprechende Arbeitsdiagramme zur Verfügung gestellt, unter Beachtung vorgegebener Randbedingungen.

Das AGFW-Arbeitsblatt FW 401 (AGFW 1997a) beinhaltet die statische Auslegung von Kunststoffmantelrohren (KMR) und dient zur Aufbereitung der praktischen und theoretischen Grundlagen. Dieses Arbeitsblatt berücksichtigt die ausführlichen Festlegungen der europäischen Normung. Bis DN 600 kann unter vorgegebenen Randbedingungen (konstante Überdeckungshöhe, Zerlegung der Leitungstrasse in L-Schenkel, U-Bögen und Z-Schenkel) die Auslegung auch mit entsprechenden Diagrammen erfolgen. Weiterhin wird eine Übersicht über die Vorgehensweise einer statischen Berechnung der KMR dargestellt. Diese umfaßt

- die Erstellung eines Trassenplanes,
- die Ermittlung der Größen: Länge, Nenndurchmesser, Wandstärken, Überdeckungshöhe, Auslegungsparameter, Verkehrslasten usw.
- die Prüfung, ob die Auslegung mit Hilfe von Diagrammen vereinfacht durchgeführt werden können,
- die Ermittlung der Bettungsziffer bzw. Federkonstanten, der Gleitbereichslänge sowie der zulässigen Länge, der Verschiebungen, Schnittlasten und Spannungen der einzelnen berechneten Abschnitte, der Polsterdicken und -längen,
- die Nachweise der Tragsicherheit für Primäreinwirkungen sowie für Sekundäreinwirkungen (Temperatur) von Stahl, Wärmedämmung und Mantelrohr,
- die Nachweise der Stabilität (Ausknicken, Beulen, Ratcheting) für Stahl.

Neben den oben genannten Zielen, spielt bei dem Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr der Nachweis der geforderten Sicherheit gegen den Grenzzustand der Gebrauchsfähigkeit eine wesentliche Rolle. Darunter ist der Bruch des Mantelrohres oder das Reißen der Wärmedämmung (PUR) bzw. der Meldedrähte zu verstehen. Die Ursachen können dabei sehr unterschiedlich sein, beispielsweise durch zu große axiale Verschiebungen des KMR, zu starke Erwärmung des Mantelrohres und damit Undichtwerden der Muffen oder Versagen des Verbundes zwischen Wärmedämmung (Schaum) und Medienrohr.

An dieser Stelle sei auch auf (Randløv 1997) verwiesen, wo diese Thematik ebenso abgehandelt wird.

2.3.10 Druckhaltung

Die für Heizwassersysteme benötigte Druckhalteanlage hat die eigentliche Aufgabe, die Volumenkompensation des Netzinhaltswassers so durchzuführen, daß die Ruhe- und Betriebsdrücke stets innerhalb der zulässigen Grenzen liegen. Dies wird durch entsprechend geregeltes Zu- und Abspeisen erreicht. Die Volumenänderungen werden verursacht durch Druck- und Temperaturänderungen des Netzwassers sowie Leckverluste.

Bei dem *Ausdehnungsvolumen* handelt es sich dabei um das maximale Differenzvolumen, welches beim Aufheizen der kalten Anlage bis zur maximalen Betriebstemperatur abgespeist wird. Damit dieses Netzwasser nicht verlorengeht, wird es in Ausdehnungsgefäßen gespeichert, da für den Abheizvorgang entsprechendes Netzwasser benötigt wird.

Dagegen sind die maximal zu erwartenden *Zu- und Abspeiseströme* für die Bemessung der Rohrdurchmesser, der Stellventile und der Pumpen interessant.

Volumenänderung. Diese wird entscheidend beeinflusst durch Temperaturänderungen in Heizwassersystemen. Zusätzlich treten noch Volumenänderungen infolge von Druckänderungen auf. Zusammenfassend gilt für ein abschnittsweises Berechnen der maximalen Volumenänderung nach (Glück 1985)

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n V_{1,i} \cdot \left[(\alpha_R - \alpha_W)_i \cdot (t_2 - t_1)_i + \left(\frac{1}{E_W} + \frac{d}{s} \cdot \frac{b}{E_R} \right)_i \cdot (p_2 - p_1)_i \right] \quad [\text{m}^3] \quad (2.62)$$

- mit V_1 - Volumen des Netzabschnittes [m^3],
 α_R - kubischer Wärmeausdehnungskoeffizient des Stahlrohres ($\alpha_R \approx 3,6 \cdot 10^{-5}$) [K^{-1}],
 α_W - thermischer Ausdehnungskoeffizient des Wassers [K^{-1}],
 t - Temperatur (1 – kalter Zustand, 2 – Betriebszustand) [$^{\circ}\text{C}$]
 E_W - Elastizitätsmodul des Wassers [Pa],
 d - Rohrdurchmesser [m],
 s - Rohrwanddicke [m],
 b - Faktor zur Berücksichtigung der Rohrlagerung und der Systemgestaltung, für mögliche Längsdehnung gilt $b \approx 0,85$ [–],
 E_R - Elastizitätsmodul des Rohres [Pa],
 p - Druck (1 – kalter Zustand, 2 – Betriebszustand) [Pa].

Dabei besteht die Möglichkeit, neben der Bereitstellung von Tabellenwerten für den Ausdehnungskoeffizienten und die beiden Elastizitätsmodule, diese Werte über Näherungsgleichungen zu berechnen (s. Anhang 1).

Eine spezifische Abschätzung der einzelnen Glieder soll anhand eines Beispiels vorgenommen werden:

Beispiel. $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$ $p_1 = 1 \text{ bar}$ $d = 219,1 \text{ mm}$ $s = 5,9 \text{ mm}$
 $t_2 = 100^{\circ}\text{C}$ $p_2 = 10 \text{ bar}$

Berechnung der einzelnen Terme der Gl. (2.62):

$$\alpha_R \cdot \Delta t = 3,6 \cdot 10^{-5} \cdot 90 = 0,00324,$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = 45^\circ\text{C},$$

$$\alpha_w \cdot \Delta t = (4,5 + 0,916 \cdot 45 - 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot 45^2) \cdot 10^{-5} \cdot 90 = 0,0377,$$

$$\frac{1}{E_w} \cdot \Delta p = \frac{1}{(2484 - 3,76 \cdot 45 - 0,0148 \cdot 45^2) \cdot 10^6} \cdot 9 \cdot 10^5 = 0,00039,$$

$$\frac{d}{s} \cdot \frac{b}{E_R} \cdot \Delta p = \frac{(219,1 - 2 \cdot 5,9)}{5,9} \cdot \frac{0,85}{(207800 - 84,08 \cdot 90) \cdot 10^6} \cdot 9 \cdot 10^5 = 0,00013.$$

Die Bewertung der Ergebnisse zeigt, daß für die Bemessung der Druckhalteanlage nur die temperaturbedingte Volumenänderung des Heizwassers von Bedeutung ist. Die Nichtberücksichtigung der Volumenänderung der Stahlrohre stellt eine zusätzliche Reserve in der Berechnung dar, zumal die Volumenänderungen von Stahl und Wasser in gleicher Richtung wirken. Für praktische Berechnungen reicht es somit aus, nur die Beziehung

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n m_i \cdot [v(t_2) - v(t_1)]_i \quad [\text{m}^3] \quad (2.63)$$

mit m_i - Wassermasse [kg],
 v - spezifisches Volumen des Heizwassers [m^3/kg].

anzuwenden. Die exakte Herleitung kann in (Glück 1985) nachvollzogen werden. Nach DIN 4807 berechnet sich das Ausdehnungsvolumen mit Hilfe der in der DIN enthaltenen prozentualen Wasserausdehnung zu

$$V_e = n \cdot \frac{V_A}{100} \quad [\text{Liter}] \quad (2.64)$$

mit n - Wasserausdehnung [%] aus DIN 4707,
 V_A - Wasserinhalt der gesamten Anlage [Liter].

Das spezifische Volumen kann über die Näherungsgleichung aus Anhang 1 berechnet werden.

Volumenausgleichsströme. Betriebsbedingt treten in Heizwassersystemen sowohl Volumenexpansionen als auch Volumenkontraktionen auf. Diese werden verursacht durch

- planmäßiges Auf- und Abheizen des Netzes,
- Regelungsvorgänge zur Lastanpassung sowie
- Auskühlen des aufgeheizten Netzes bzw. Netzabschnittes bei nachfolgendem Stillstand.

Gleichzeitig werden die thermisch bedingten Ausgleichsströme noch von Leckverlusten überlagert. Dagegen können die hydraulisch bedingten Volumenänderungen, wie zuvor bewiesen, vernachlässigt werden. Entscheidend ist, daß bei Nachspeisung ins Netz, also bei einer Volumenkontraktion, die Leckmengenströme dazu addiert werden müssen.

Bei Volumenexpansion könnten die Leckmengenströme subtrahiert werden, wobei dies aus Sicherheitsgründen jedoch nicht erfolgt.

Im nachfolgenden wird die Vorgehensweise bei der Berechnung der Volumenausgleichsströme kurz erläutert. Für eine ausführliche Beschreibung sei auf (Glück 1985) verwiesen, insbesondere bei Berechnungen der Volumenänderungen infolge Laständerungen bei Betrieb des Netzes.

Angaben über die Größe von Leckverlusten in einem Netz sind schwierig zu machen und können überwiegend nur empirisch über Messungen gewonnen werden. Sie hängen u. a. vor allem von der Netzgröße, der Anschlußart, dem Netzzustand und der Wartungsintensität ab. Für den Anschluß von Abnehmeranlagen gilt

$$\text{– direkter Anschluß} \quad \dot{V}_L = 120 \cdot 10^{-12} \cdot m_{Anl}, \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.65)$$

$$\text{– indirekter Anschluß} \quad \dot{V}_L = 60 \cdot 10^{-2} \cdot m_{Anl} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.66)$$

mit m_{Anl} - Anlagenwassermasse [kg].

Grundsätzlich ergibt sich der zur Kompensation erforderliche Volumenstrom als die negative Summe aller Volumenstromänderungen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb des Netzes auftreten. Wird ein konstanter Massestrom im Netz umgewälzt, der den Erzeuger und alle Abnehmer durchströmt, so berechnet sich dieser Volumenausgleichsstrom zu

$$\dot{V} = - \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \cdot (v_2 - v_1)_i \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.67)$$

mit $\dot{m}_i$ - Massestrom im Anlagenteil i [kg/s],

$(v_2 - v_1)_i$ - Differenz des spezifischen Volumens zwischen Aus- und Eintritt des Anlagenteils i [m^3/kg].

Für technische Betrachtungen ist es ausreichend, nur den Erzeuger und die Abnehmer zu bilanzieren, d. h. die Rohrleitungen werden als adiabat betrachtet. Den einfachen Fall stellt der temperaturgleiche Anschluß aller Abnehmer dar. Die Abb. 2.3-13 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Somit gilt entsprechend

$$\dot{V} = -\dot{m}_E \cdot (v_{V,E} - v_{R,E}) - \sum_{i=1}^n \dot{m}_{A,i} \cdot (v_{R,A,i} - v_{V,A,i}). \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.68)$$

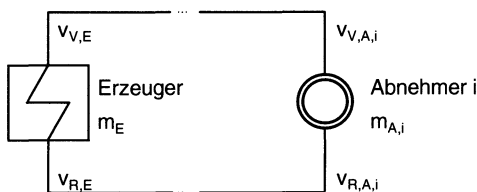


Abb. 2.3-13 Prinzipschaltbild eines Netzes

Eine Veränderung am Austritt des Erzeugers im Abnehmerschwerpunkt wird in Realität erst wirksam nach der Zeit

$$\Delta\tau \approx \frac{m_{\text{Anl}}}{2 \cdot \dot{m}_E} \quad [\text{s}] \quad (2.69)$$

mit $\dot{m}_E$ - umgewälzter Massestrom [kg/s],
 m_{Anl} - Anlagenwassermasse [kg].

Aufgrund dieser Verschiebung gestaltet sich eine genaue Berechnung durchaus kompliziert, da die Austrittstemperatur beim Abnehmer als Funktion der Eintrittstemperatur abgebildet werden muß. Die Komplexität der Berechnung trifft auch zu, wenn Netzabschnitte z. B. über Beimischstationen versorgt werden.

In (Glück 1985) werden weiterhin Ansätze für Volumenänderungen bei Stillstand des aufgeheizten Netzes unter Berücksichtigung der Abkühlung des Heizwassers und der Anlagenmaterialien aufgezeigt.

Für die Auslegung einer Druckhalteanlage sind besonders die maximale Volumenexpansion und Volumenkontraktion von Bedeutung. Die größte *Volumenexpansion* tritt beim Aufheizen des Netzes auf, z. B. beim Anfahren. Als Sonderfall gilt, wenn keine Wärmeabgabe stattfindet und die maximale Wärmeleistung übertragen wird. Es gilt

$$\dot{V}_{\text{Ab,max}} = \dot{m}_E \cdot (v_{V,E} - v_{R,E}), \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.70)$$

wobei mögliche Leckverluste hierbei unberücksichtigt bleiben.

Bei der Berechnung der größten *Volumenkontraktion* wird unterschieden zwischen betriebem und stillstehendem Netz, wobei nach (Glück 1985) gilt, daß die Volumenkontraktion beim stillstehenden Netz kleiner ist als die beim betriebem Netz. Dies hängt damit zusammen, daß die größte Volumenkontraktion unmittelbar nach Ausfall der Wärmezuführung bei weiterer Umwälzung des Netzwassers und vorausgegangenem Vollastbetrieb entsteht. Während die einzelnen Abnehmer durch die Speicherung des Vorlaufes noch ihre volle Leistung beziehen, fließt beim Erzeuger kaltes Rücklaufwasser in den ehemals warmen Vorlauf. Grundsätzlich sind die Zuspiseströme und die Leckvolumenströme zu addieren. Es gilt

$$\dot{V}_{\text{Zu,max}} = \dot{m}_E \cdot (v_{R,A} - v_{V,A}). \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.71)$$

Die Druckhalteanlage muß so bemessen werden, daß die vorgenannten Extremwerte Volumenexpansion beim vollen Aufheizen ($\dot{V}_{\text{Ab,max}}$) sowie Volumenkontraktion bei Ausfall der Wärmezuführung und Netzbetrieb ($\dot{V}_{\text{Zu,max}}$) kompensiert werden können. In diesen Fällen sind auch die übrigen Betriebsfälle ohne weiteres zu beherrschen.

Zur Festlegung verbindlicher Auslegungsdaten sind, soweit diese nicht durch Normen vorgegeben werden, auch die daraus folgenden technischen Konsequenzen zu beachten. Beeinflussen bei statischen Druckhaltesystemen die maximalen Volumenausgleichsströme nur die Bemessung der Ausgleichsleitung zwischen Netz und Ausdehnungsgefäß, so sollten die absoluten Extremwerte zugrunde

gelegt werden. Besteht die Möglichkeit, daß die maximalen Volumenströme durch ein spezielles Betriebssystem gesenkt werden, bewirkt dies ohnehin nur eine unbedeutende Reduzierung der Investitionskosten für die genannte Ausgleichsleitung. Dagegen wirkt sich eine Reduzierung der maximalen Volumenströme zu einer beachtlichen Verringerung der Investitions- und vor allem der Betriebskosten bei dynamischen Druckhaltesystemen aus, insbesondere verursacht durch die ständig mitlaufenden Druckdiktierpumpen.

Zusammenfassend werden folgende Hinweise gegeben:

1. Bei einfachen Druckhaltesystemen, z. B. statischer Druckhaltung, sind der Bemessung die maximale Volumenexpansion und -kontraktion zugrunde zu legen.
2. Bei dynamischen Druckhaltesystemen ist es möglich, durch entsprechende Pumpenauswahl die maximalen Volumenströme zu reduzieren unter dem Gesichtspunkt eines speziellen Betriebssystems. Dazu zählt das stufenweise bzw. langsame Aufheizen des Netzes, so daß die Wärmezufuhr stets mit einer partiellen Wärmeabgabe gekoppelt ist. Bei Ausfall der Wärmezufuhr wird auch die Umwälzung des Netzes sowie der Abnehmer außer Betrieb genommen.
3. Für kombinierte Druckhaltesysteme gelten die gleichen Zielstellungen wie unter Punkt 2.
4. Die praktischen Belastungsdaten für die Anlagenteile sind schaltungsspezifisch zu ermitteln. Zur Auslegung des Überströmreglers ist bei Vorhandensein einer Druckdiktierpumpe deren Mindestförderstrom zur maximalen Volumenexpansion dazu zu addieren. Der Leckvolumenstrom wird sicherheitshalber nicht subtrahiert. Gleiches gilt für die Auslegung der Druckdiktierpumpe. Diese muß die Summe aus der maximalen Volumenkontraktion, bei Vorhandensein eines Überströmreglers zur Abpeisung der Mindestdurchsatzmenge und des Leckvolumenstromes fördern.
5. Die Mindestvolumenströme durch den Einsatz von Druckdiktierpumpen sowie Überströmregler sind durch eine parallele Schaltung von mehreren Druckdiktierpumpen sowie Reglern zu minimieren.
6. Das planmäßige Kaltfahren des Netzes sollte keinesfalls den maximalen Belastungsfall darstellen. Es sind dafür Betriebsregime zu ermitteln, die die Förderleistung von mindestens zwei Druckdiktierpumpen (einschließlich Reservepumpe) in Rechnung stellen.
7. Es ist für das gewählte Druckhaltesystem die maximal mögliche Volumenänderung infolge witterungsbedingter Laständerungen nachzuweisen. Dabei ist ein maximaler Temperaturanstieg der Außentemperatur von 3 K/h anzunehmen (Glück 1985)¹⁸.

Beispiel. Die Wärmeübertragungsleistung eines Heizwassernetzes ist 60 MW bei einer Temperaturspreizung von 130/70 °C = 60 K. Das Netzvolumen beträgt 1300 m³. Die maximale Volumenexpansion beim kalten Anfahren des Netzes beträgt nach Gl. (2.59)

$$V = V_{\text{Netz}} \cdot \rho \cdot [v(130^\circ\text{C}) - v(10^\circ\text{C})] = 1300 \cdot 936 \cdot (0,001068 - 0,000996) = 87,6 \text{ m}^3.$$

¹⁸ Trifft aber nicht für plötzliche Wetterumschwünge zu, wie beispielsweise verursacht durch Gewitter.

Laut Empfehlung seitens der AGFW reicht es aus, die Druckhalteanlage für den Temperaturbereich 60–130 °C auszulegen. Das kalte Anfahren kann in Zeitschritten erfolgen, so daß die Druckhalteanlage bei maximalem Behälterstand das überschüssige Heizwasser gesichert abführen kann. Außerdem ist es nicht sinnvoll, die Druckhalteanlage für einen solchen extremen Betriebsfall auszulegen, begründet durch die höheren Investitions- und Betriebskosten. Somit gilt

$$V = V_{\text{Netz}} \cdot \rho \cdot [v(130^\circ\text{C}) - v(60^\circ\text{C})] = 1300 \cdot 936 \cdot (0,001068 - 0,001016) = 63,3 \text{ m}^3.$$

Die zu erwartende maximale Volumenexpansion bei einer in diesem Beispiel angesetzten Vorlauftemperaturspreizung von 130–100 °C sowie einer Rücklauftemperaturspreizung von 70–60 °C beträgt nach Gl. (2.66)

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{Ab,max}} &= \dot{m} \cdot v[(130-100) + v(70-60)] = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot \Delta t} \cdot [v(130-100) + v(70-60)] = \\ &= \frac{60000}{4,2645 \cdot 60} \cdot [(0,001068 - 0,001042) + (0,001021 - 0,001016)] = \\ &= 0,0075 \text{ m}^3 / \text{s} = 27,0 \text{ m}^3 / \text{h}. \end{aligned}$$

Dieses Volumen ist insbesondere für die Auslegung der Überströrmarmaturen sowie bei Voraussetzung der gleichen Volumenkontraktion einschließlich der Leckverluste für die Auslegung der Druckdiktierpumpen von Bedeutung.

Die Volumenexpansion hängt wesentlich von der Umwälzmenge ab. Mit einer Temperaturspreizung von $\Delta t = 40 \text{ K}$ erhöht sich bei gleicher Wärmeleistung die Umwälzmenge, so daß die Volumenexpansion dann 39,3 m³/h beträgt.

Interessant sind auch Betrachtungen von dynamischen Druckschwankungen, die eine Druckhalteanlage beherrschen muß. Diese werden vor allem durch hydraulische Schaltvorgänge oder durch Ausfall der Umwälzpumpen ausgelöst. Die technisch beste Lösung dieses Problems ist zweifellos das Vermeiden der Druckstöße durch entsprechende konstruktive Vorkehrungen und Betriebsweisen, basierend auf langsame Mengenstromveränderungen. Bei Armaturen kann dies erfolgen durch lange Schließ- und Öffnungszeiten, durch Anordnung von kleineren Bypassarmaturen, die zeitverzögert geschlossen werden, durch Verwendung von Armaturen mit günstiger Schließcharakteristik, z. B. Ringkolbenventile. Es ist aber auch möglich, durch ein bewußtes Herunterfahren der Umwälzpumpen, anschließende Betätigung der Armatur und nachfolgendes Wiederherstellen des Vollastbetriebes, dynamische Druckschwankungen zu vermeiden. Voraussetzung dazu ist, daß die Umwälzpumpen drehzahlregelt gefahren werden können. Damit verbleibt als unbeeinflußbarer Störfall noch der plötzliche Ausfall der Umwälzpumpen oder das schlagartige Herunterfahren der Umwälzpumpen von Vollast auf Mindestlast. Bei Pumpenausfall baut sich infolge des starken Abbremsens der Wasserförderung ein großer Druck im Saugstutzen auf, während sich im Druckstutzen ein starker Druckabfall einstellt. Beide Druckänderungen pflanzen sich im Heizwassersystem als Longitudinalwellen mit großer Geschwindigkeit fort, hervorgerufen durch die druckabhängige Dichteveränderung des Wassers.

Für die Berechnung der Druckwellengeschwindigkeit gilt

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E_W}{\rho_W}}{1 + \frac{E_W \cdot d_m}{E_R \cdot s}}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.72)$$

mit E_W - Elastizitätsmodul des Wassers [Pa],
 E_R - Elastizitätsmodul des Rohres [Pa],
 d_m - mittlerer Rohrdurchmesser [m],
 s - Rohrwanddicke [m],
 ρ_W - Dichte des Wassers [kg/m^3].

Daraus wird ersichtlich, daß die Geschwindigkeit der Welle in einer Rohrleitung in erster Linie eine Funktion des Rohrwerkstoffes und dessen elastischen Verhaltens, in zweiter Linie eine Funktion von Durchmesser und Rohrwanddicke ist. Somit kann mit geringen Einschränkungen die Druckwellengeschwindigkeit als wesentliche Eigenschaft eines Rohres angesprochen werden.

In (Kottmann 1992) wird noch auf die in der Literatur genannten verschiedenen Gleichungen mit den Durchmesserbezeichnungen d oder d_m hingewiesen. Bei üblichen dünnwandigen Rohren ist das Problem ohne Bedeutung. Dagegen gilt für dickwandige und in Richtung der Rohrachse frei bewegliche Rohre

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E_W}{\rho_W}}{1 + 2 \cdot \frac{E_W}{E_R} \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot d_a^2 + (1 - \mu) \cdot d_i^2}{(d_a^2 - d_i^2)}}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.73)$$

mit μ - Querkontraktion bzw. Querdehnung [-].

Die Wahl des richtigen Wertes ist schwer, weil die Querkontraktion ähnlich wie das Elastizitätsmodul nicht bei allen Beanspruchungsarten gleich ist. Es gilt grundsätzlich $0 \leq \mu \leq 0,5$, speziell für Stahl $0,2 \leq \mu \leq 0,3$.

In (Glück 1985) wird die Gleichung für die Berechnung der Druckwellengeschwindigkeit des Heizwassers angegeben mit

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho_W \cdot \left(\frac{1}{E_W} + \frac{d_i}{s} \cdot \frac{b}{E_R} \right)}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.74)$$

mit b - Faktor zur Berücksichtigung der Rohrlagerung und der Systemgestaltung; für mögliche Längsdehnung gilt $b \approx 0,85$ [-].

Für die Berechnung des Elastizitätsmodules des Wassers und des Rohres sind im Anhang 1 Näherungsgleichungen angegeben. Für praktische Bedingungen ergeben sich Werte für die Druckwellengeschwindigkeit zwischen 1000 m/s und 1400 m/s. Bei Rohren mit sehr starren Wänden ($s \cdot E_R \rightarrow \infty$) erreicht die Druckwellengeschwindigkeit den Wert 1425 m/s, d. h. die Schallgeschwindigkeit im Wasser.

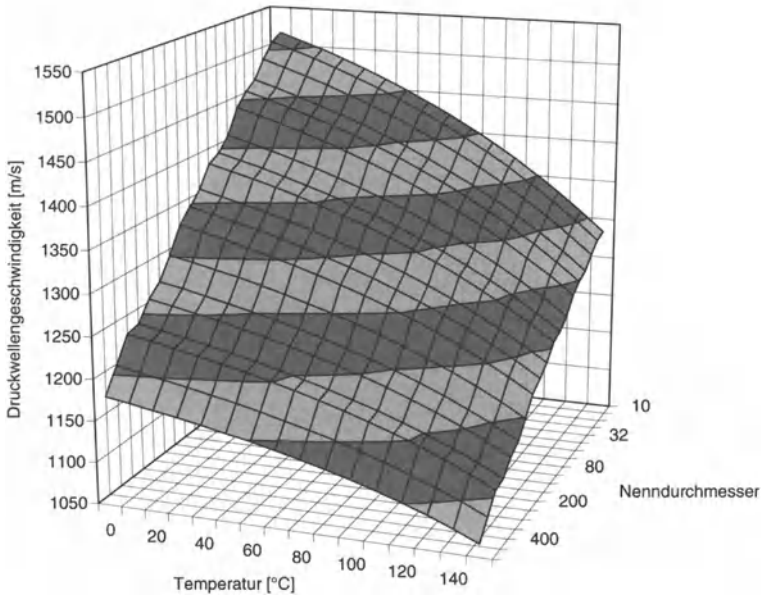


Abb. 2.3-14 Abhängigkeit der Druckwellengeschwindigkeit

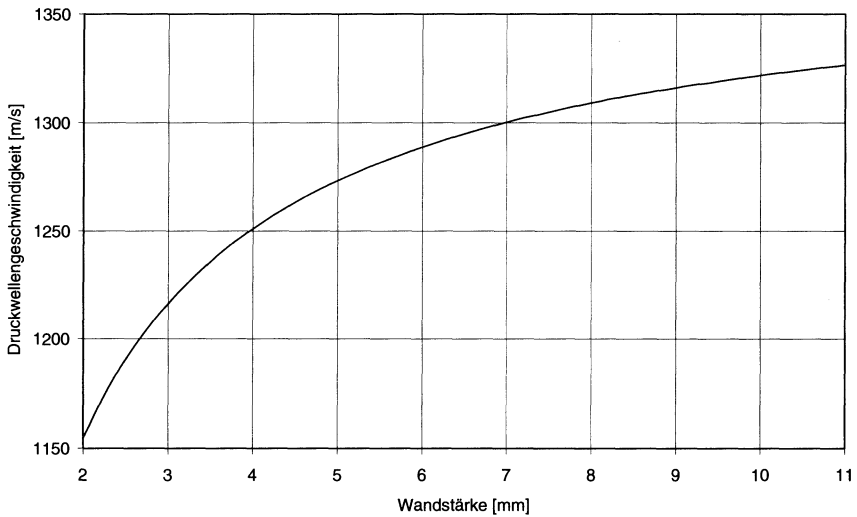


Abb. 2.3-15 Abhängigkeit der Druckwellengeschwindigkeit von der Wandstärke des Rohres
Beispiel DN 100

In der Abb. 2.3-14 wird der Zusammenhang zwischen den Größen Druckwellengeschwindigkeit, Temperatur des Wassers und des jeweiligen Nenndurchmessers verdeutlicht. Daraus ist ersichtlich, daß mit steigender Temperatur und mit Zunahme des Nenndurchmessers die Druckwellengeschwindigkeit absinkt. Der unmittelbare Einfluß der Starrheit eines Rohres, gegeben durch die Zunahme der Wandstärke, gegenüber der Druckwellengeschwindigkeit zeigt Abb. 2.3-15.

Wie die Druckschwingungen verlaufen, sich fortpflanzen und gedämpft werden, hängt von der Rohrsystemgestaltung und von den eingebauten Armaturen ab. Der mittlere Druckverlauf wird in erster Linie von der installierten Druckhaltung beeinflusst. Dabei sind entscheidend die maximalen Volumenströme, die zwischen Netz und Druckhalteanlage infolge von Druckänderungen im Netz fließen können, und die auftretenden Reaktionszeiten.

Die hydrodynamisch bedingte Ausgleichsmenge für einen Rohrstrang, der einer zeitlichen Druckänderung unterworfen wurde, läßt sich in erster Näherung bei Vernachlässigung temperaturbedingter Volumenänderungen und der Leckverluste nach (Glück1985) berechnen zu

$$\Delta V = V \left(\frac{1}{E_W} + \frac{d_i}{s} \cdot \frac{b}{E_R} \right) \cdot (p_2 - p_1). \quad [\text{m}^3] \quad (2.75)$$

Dabei wird davon ausgegangen, daß zu Beginn der Druckänderung die Rohrleitung vollständig mit Wasser gefüllt war.

Weitere Ausführungen zu fluiddynamischen Berechnungen sind u. a. in (Kottmann 1992; Wossog et al. 1998) enthalten. In (Wossog et al. 1998) werden des weiteren Hinweise für entsprechende Software gegeben.

2.4

Planung und Bau

2.4.1

Einleitung

Eine komplexe Abhandlung zur Vorgehensweise der Planung von Fernwärmeleitungen oder sogar eines Fernwärmesystems mit seinen Zubehörteilen ist nur bedingt möglich, begründet durch die hohe gegebene Variantenvielfalt. Bei der Planung spielen solche Überlegungen, wie

- das Wärmemedium,
- die Auslegungsparameter,
- die Dimensionierung der Leitung,
- das Verlegeverfahren,
- die zum Einsatz kommenden Armaturen,
- die Notwendigkeit von Bauwerken,
- die Anschlußart des Abnehmers usw.

eine wesentliche Rolle. Weiterhin muß geklärt werden, ob Beimisch- oder Druckerhöhungsstationen notwendig sind. In diesem Abschnitt werden deshalb nur

einige grundlegende Ausführungen zur Planung von Fernwärmeleitungen gemacht. Als weiterführende Literatur können (Schwaigerer 1986; AGFW 1993a; Wossog et al. 1998) und speziell für das Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr (AGFW 1997a; Randløv 1997) angegeben werden.

Bauwerke für Kompensatoren bzw. Absperrarmaturen, Wärme-, Druckerhöhungs- und Beimischstationen kommen entsprechend den zu erfüllenden Anforderungen in einem Fernwärmesystem zur Anwendung. In Abhängigkeit von der Größe des Fernwärmenetzes, den Betriebsparametern Druck und Temperatur sowie der Anschlußart der Abnehmer werden diese Komponenten erforderlich, während sie in kleineren Fernwärmesystemen nur selten oder gar nicht eingesetzt werden. Gleiches gilt für Hausanschlußstationen. Hier ist die Vielzahl an Gestaltungsmöglichkeiten, wie beispielsweise direkter oder indirekter Anschluß sehr groß. Um die Investitionskosten möglichst niedrig zu halten, werden die sogenannten Kompaktstationen in unterschiedlichen Baugrößen mit entsprechenden leistungsabhängigen austauschbaren Modulen werkseitig angeboten. Anhand des Wärmebedarfes des anzuschließenden Abnehmers erfolgt dann die Auswahl der erforderlichen typisierten Baugröße. Für diese eventuell notwendigen Komponenten werden verallgemeinerte Ableitungen getroffen, die aber an die jeweiligen konkret vorliegenden Bedingungen angepaßt werden müssen.

Die Planung und Auslegung von Erzeugeranlagen wird u. a. in (Suttor u. Suttor 1991; Strauß 1992; Schmitz u. Koch 1996) ausführlich behandelt.

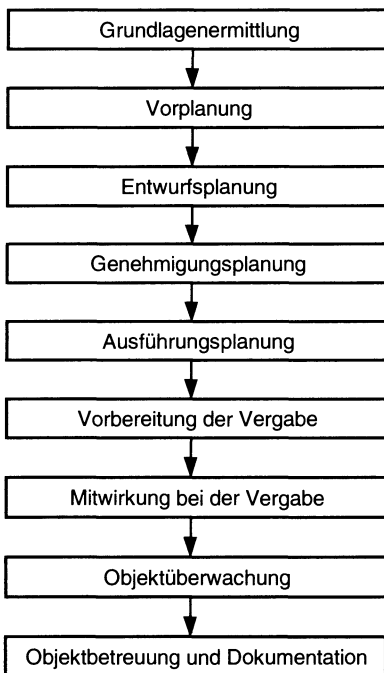


Abb. 2.4-1 Leistungsphasen nach HOAI

Der Stellenwert der Planung ergibt sich durch den direkten Einfluß auf die Kosten und die Betriebssicherheit. Der Aufwand an Planungsleistungen ist an die Aufgabenstellung des Projektes entsprechend anzupassen. Ziel der Planung ist es, technische Lösungen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte zu erarbeiten. Dabei müssen die Lösungen so dokumentiert werden, daß diese durch Dritte nachvollziehbar sind. Als weitere Ziele der Planung können genannt werden:

- Kosten- und Materialerfassung,
- Terminablaufplan,
- Koordinierung der einzelnen Gewerke,
- reibungslose Baudurchführung,
- Sicherung der geforderten Qualität,
- Vermeidung von Schäden.

Eine mögliche Rechtsgrundlage für die Vereinbarung von Planungsleistungen bietet in Deutschland die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI), speziell das Leistungsbild technische Ausrüstung nach §73. Die einzelnen Leistungsphasen und deren Reihenfolge sind in Abb. 2.4-1 dargestellt, wobei die Grenzen als fließend zu betrachten sind.

2.4.2 Grundlagenermittlung

Diese Leistungsphase dient der Ermittlung der zur Lösung der Aufgabe notwendigen Voraussetzungen. Die eigentliche Aufgabenstellung der technischen Ausrüstung wird im Einvernehmen mit dem Auftraggeber geklärt. Besondere Leistungen im Rahmen der Grundlagenermittlung sind, soweit erforderlich, u. a. die Bedarfsaufnahme, die Standortanalyse, die Betriebsplanung sowie die Prüfung auf Umweltverträglichkeit. Dazu gehört auch die Erfassung des Wärmebedarfes. Die Grundlagenermittlung ist vor allem dann wichtig, wenn verschiedene Varianten untersucht werden sollen. Existiert dagegen nur eine Lösungsvariante, wird sehr oft auf diese Leistungsphase zugunsten einer erweiterten Vorplanung verzichtet.

2.4.3 Vorplanung

Den eigentlichen ersten Planungsschritt stellt die Vorplanung dar. Diese beginnt mit der Analyse der Grundlagen, da eine Grundlagenermittlung nicht unbedingt zwingend vorher erforderlich ist. Ziel ist die Erarbeitung eines Planungskonzeptes einschließlich Untersuchung der alternativen Lösungsmöglichkeiten unter Einhaltung aller vorgegebenen Randbedingungen. Dazu zählt auch die überschlägige Auslegung der Fernwärmeleitung und deren Grobtrassierung.

Soweit noch nichts vorgegeben ist, erfolgt in dieser Leistungsphase die Wahl des Verlegeverfahrens. Entscheidend dabei ist auch, ob die geplante Trasse im öffentlichen oder privaten Bereich realisiert werden soll. Bei der Verlegung von Freileitungen besteht, wie bereits erwähnt, ein wesentlicher Vorteil in den relativ niedrigen Investitionskosten. Dieses Verlegeverfahren wird überall dort angewen-

det, wo es die territoriale Nutzung zuläßt, verliert aber aus städteplanerischen und architektonischen Gesichtspunkten zunehmend an Bedeutung, obwohl sich bei Zusammenarbeit aller beteiligten Behörden, Architekten und Planer durchaus sinnvolle Lösungen gestalten lassen. Berühren die auf Stützen geführten Freileitungen den Verkehrsraum, sind die vorgeschriebenen Lichtraumprofile der Bahnen sowie sonstige Bestimmungen der betreffenden Verkehrsträger und der Straßenverwaltungen als eine der wichtigsten Restriktionen einzuhalten. Freileitungen lassen sich relativ einfach planen, egal ob es nun die Trassierung betrifft, den Einbau von Streckenarmaturen, die Gestaltung von Hoch- und Tiefpunkten für Entlüftungs- bzw. Entleerungszwecke oder die zu einem späteren Zeitpunkt zu realisierende Anbindungen und Erweiterungen.

Alle anderen Verlegeverfahren werden direkt im Erdreich eingebaut. Kanäle haben sich beim Bau von Fernwärmenetzen seit vielen Jahren in unterschiedlichsten Formen bewährt, ursprünglich insbesondere bei den Dampfsystemen. Die Kanäle übernehmen den mechanischen Schutz und tragen konstruktionsbedingt zum Feuchtigkeitsschutz der Rohrleitungen bei. Gleichzeitig werden dadurch günstige Bedingungen für die Wärmedämmung geschaffen sowie die Korrosion an Rohrleitung und Lager weitestgehend verhindert. Für Gebiete mit hohem Grundwasserstand müssen dann Kanalformen verwendet werden, die wasserdicht sind. Mantelrohrsysteme bestehen aus einem Mediumrohr, meistens aus Stahl, welches von einem Schutzrohr umgeben wird. Das Schutzrohr, bestehend bei Kunststoffmantelrohren aus Kunststoff bzw. bei Stahlmantelrohren aus Stahl mit Korrosionsschutz, verhindert als eine Art Feuchtigkeitsschutz die Korrosion des Mediumrohres und kann bei einigen Bauarten auch Tragfunktionen gegenüber den Erdlasten übernehmen. Der Raum zwischen Medium- und Mantelrohr nimmt die Wärmedämmung auf. Grundsätzlich kann gesagt werden, daß Mantelrohrsysteme unter den speziellen Gegebenheiten einer Verlegesituation eine kostengünstige Alternative zur Kanalverlegung darstellen, was sich in der Rohrnetzstatistik der AGFW bisher verlegter Verfahren widerspiegelt. Als Vorteile lassen sich niedrigere Tiefbaukosten durch einen geringeren Platzbedarf sowie eine kürzere Montagezeit nennen, gegeben durch die werkseitige Vorfertigung. Letztendlich sind Schüttssysteme, beispielsweise für die Sanierung von Kanälen, sowie Rohrsysteme mit dem Mediumrohr aus GFK oder PEX für besondere Einsatzfälle zu erwähnen. Alle hier aufgezählten Verlegeverfahren sind im Abschn. Aufbau und Struktur detailliert beschrieben.

Bei den erdverlegten Verfahren sind gegenüber dem Verlegeverfahren Freileitung Bauwerke und Leitungen anderer Versorgungsmedien, wie beispielsweise Strom, Gas, Wasser, Abwasser, Telefon, bei der Planung zu berücksichtigen. Die Lage dieser Leitungen ist daher vor Baubeginn anhand von Lageplänen und Schnittzeichnungen mit den zuständigen Stellen abzustimmen. Dabei ist nicht nur der derzeitige Bestand von Interesse, sondern auch alle zukünftigen Planungen, um somit ein späteres Umverlegen der Trasse zu vermeiden. Erfahrungswerte besagen, je früher alle behördlichen Stellen und Eigentümer anderer Versorgungsmedien angefragt werden, desto weniger muß während der Planungsphase die Trasse neu geplant werden, was letztendlich auch Kosten spart. In innerstädtischen Ballungszentren können sich die Abstimmungen unter Umständen als sehr

schwierig erweisen. Insbesondere bei älteren Leitungsbeständen ist es nicht selten, das die genaue Lage durch Suchschachtungen erst festgestellt werden muß. Unterbleiben diese Erkundigungen, so besteht nach Rechtssprechung im Schadensfall eine Schadensersatzpflicht.

Grundsätzlich ist zu den vorhandenen Leitungen anderer Versorgungsmedien ein ausreichender Mindestabstand zu gewährleisten. Das Unterschreiten solcher Mindestabstände bedarf die Zustimmung des jeweiligen Eigentümers. Es gibt aber nicht wenige Fälle, wo dieses Problem absolut nicht zu vermeiden ist und somit für Sonderlösungen zum Teil zusätzliche Kosten entstehen. Für die Mindestabstände sind neben den gültigen Richtlinien die jeweiligen örtlichen Festlegungen maßgebend. Auch bei neu angelegten Erschließungsgebieten kann für Fernwärmeleitungen häufig eine günstigere Trasse gefunden werden, als die DIN 1998 vorsieht (AGFW 1993a).

Bei erdverlegten *Stromkabel* sinkt die Übertragungsleistung mit steigender Bodentemperatur. Deshalb sind erfahrungsgemäß bei auftretenden Kreuzungen Fernwärmeleitung/Stromkabel folgende Mindestabstände einzuhalten (Tabelle 2.4-1).

Weiterhin ist bei Parallelführungen von Stromkabeln und Fernwärmeleitungen für eventuell notwendige Montagearbeiten ein angemessener Platz zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für unterirdische Bauwerke.

Grundsätzlich ist bei *Telefon-, Signal- oder Fernsehkabeln* ähnlich zu verfahren, wobei hier aber die Wärmeempfindlichkeit dieser Kabel wesentlich geringer ist. Weiterhin sollte bedacht werden, daß z. B. Koaxialkabel in ihrer Länge nachträglich durch eine Umverlegung nicht verändert werden können. In einem größeren Bauvorhaben hat der Verfasser eine Übereinanderverlegung von zwei verschiedenen Trassen über eine längere Strecke realisiert. Unterhalb befanden sich mehrere Lagen von Kabelzugschächten für eine Haupttrasse der Telekom, unmittelbar darüber eine Fernwärmetrasse im Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr. Diese gemeinsame Lösung stellt eher einen Ausnahmefall dar.

Besondere Aufmerksamkeit ist dem *Straßenbahnverkehr* und seiner damit verbundenen Stromanlagen zu widmen, da diese Anlagen durch ihre Kriechströme eine Korrosionsgefahr für Fernwärmeleitungen darstellen. Dies ist besonders dann von Bedeutung, wenn die Fernwärmeleitung unweit der Straßenbahnschiene verlegt wird.

Bei Parallelführung von Fernwärmeleitungen mit *Gas- oder Wasserleitungen* sollte zwischen beiden Außenkanten der Leitungen ein Mindestabstand von 40 cm realisiert werden. In (Randløv 1997) werden zu Fernwärmeleitungen Parallelabstände für Wasserleitungen von 50–100 cm und für Gasleitungen aus Polyethylen von sogar 200 cm genannt. Bei Kreuzungen von Gasleitungen werden 100 cm aufgrund von negativen Einwirkungen empfohlen. Gasleitungen dürfen nicht ohne besondere technische bzw. bauliche Vorkehrungen ungeschützt Fernwärmeleitungen und Bauwerke durchqueren. Gleiches gilt dann auch für Fernwärmeleitungen, insbesondere bei Abzweigungen sowie bei Entleerungs- und Entwässerungsleitungen. Bei der gemeinsamen Verlegung Kunststoffmantelrohr und Trinkwasserleitungen lassen sich erhebliche Kosten einsparen. In (AGFW 1997a) werden Empfehlungen für Mindestabstände zu Trinkwasserleitungen für Vorlauftemperaturen bis 140 °C gegeben (Abb. 2.4-2).

Tabelle 2.4-1 Mindestabstände zu Stromkabel in Anlehnung nach (AGFW 1993a)

Kabelart	Mindestabstand bei Kreuzungen und Parallelführungen bis 5 m Länge	Mindestabstand bei Parallelführungen über 5 m Länge
– 1 kV-Signal- oder Meßkabel	30 cm	30 cm
– 10 kV-Kabel oder ein 30 kV-Kabel	60 cm	70 cm
– mehrere 30 kV-Kabel oder Kabel über 60 kV	100 cm	150 cm

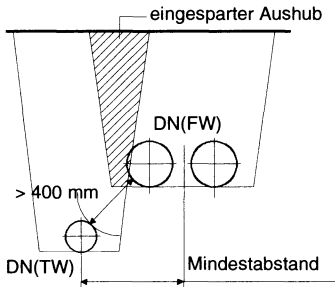


Abb. 2.4-2 Anhaltswerte für Mindestabstand bei gemeinsamer Verlegung von Trinkwasser- und Fernwärmeleitungen nach (AGFW 1997a)

Wasserleitung DN (TW)	Fernwärmeleitung (Kunststoffmantelrohr) DN (FW)							
	25	32	50	65	80	100	125	150
50	470	485	505	520	540	580	610	650
65	480	495	515	530	550	590	620	660
80	490	505	525	540	560	600	630	670
100	500	515	535	550	570	610	640	680
125	510	525	545	560	580	620	650	690
150	525	540	560	575	595	635	665	705

Obwohl in den überwiegenden Fällen *Abwasserleitungen* tiefer als Fernwärmeleitungen liegen, ist eine Verlegung übereinander möglichst zu vermeiden. Sonst besteht die Gefahr, daß bei Reparaturen an der Abwasserleitung die darüber liegende Fernwärmeleitung beschädigt wird oder zumindest erhebliche Sicherungsmaßnahmen dafür notwendig werden. Selbst bei begehbaren Abwasserkanälen, wo Reparaturen von innen her realisiert werden können, geben die Eigentümer in den bekannten Fällen keine Zustimmung. Als sehr kompliziert haben sich Genehmigungen erwiesen für notwendige Einengungen der Abwasserleitung bzw. Durchführungen von Abwasserkanälen. Einen wichtigen Aspekt stellen dabei u. a. die statischen Gegebenheiten dar. In (Randløv 1997) werden zu Fernwärmeleitungen Parallelabstände für Abwasserleitungen von 100 cm und für Kreuzungen von 50 cm genannt.

Erfahrungsgemäß kann festgestellt werden, daß eine Änderung der Trassierung in dieser frühen Leistungsphase sich zum Teil komplizierter gestalten kann, aber

immer billiger ist, als eine Umverlegung einer vorhandenen Versorgungsleitung. Praktische Beispiele belegen, daß gerade bei älteren Versorgungsleitungen die Gefahr besteht, nicht nur die notwendigen Meter, sondern wesentlich größere Abschnitte umverlegen zu müssen.

Hinsichtlich des Planungsumfanges kann speziell bei dem Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr (KMR) zwischen der vereinfachten und der detaillierten Planung unterschieden werden (AGFW 1997a)¹⁹. Dieser Ansatz ist auch begrenzt anwendbar für andere Verlegeverfahren. Die vereinfachte Planung ist ausreichend, wenn es sich bei der zu planenden KMR-Trasse um Rohrleitungen der Nenn-durchmesser DN 25–400, Vorlauftemperaturen kleiner 85 °C (Stahllängsspannungen überschreiten nicht die Streckgrenze) und Verlegetiefen kleiner 1,6 m handelt. Weiterhin wird davon ausgegangen, daß der Trassenverlauf nicht durch eine Vielzahl von Zwangspunkten und anderen Versorgungsleitungen beeinflusst wird. Mögliche Änderungen werden dann vor Ort auf der Baustelle abgeklärt. Dagegen ist eine detaillierte Planung immer dann anzusetzen, wenn die Randbedingungen der vereinfachten Planung nicht erfüllt werden. Dann ist die bereits oben erwähnte Vorgehensweise anzuwenden.

In (Randløv 1997) wird die Planung von KMR-Trassen anhand von Projektklassen bestimmt. Dabei muß einerseits die zuverlässige Verlegung und Versorgungssicherheit des Fernwärmenetzes gesichert, andererseits Personenschäden, Umweltbeanspruchungen und wirtschaftliche Risiken auf ein annehmbares Minimum reduziert werden. Die Einstufung wird über Restriktionen der einzelnen Projektklassen vorgenommen:

Projektklasse A	– Rohre kleinen oder mittleren Durchmessers mit niedrigen axialen Spannungen, – Rohre, die nur ein geringes Risiko des Personen- oder Umweltschadens darstellen, – Rohre, die nur ein geringes Risiko wirtschaftlichen Verlustes darstellen,
Projektklasse B	– große axiale Spannungen, Rohre kleinen oder mittleren Durchmessers,
Projektklasse C	– Rohre großen Durchmessers und/oder mit hohem Druck, – Rohre, die ein größeres Risiko des Personen- oder Umweltschadens darstellen, – spezielle oder komplexe Konstruktionen.

Die Projektklassen wurden eingeführt, um die Einstufung der Anforderungen an ein zu realisierendes Projekt zu erleichtern. Die jeweilige Klasse ist dabei nicht entscheidend, denn man kann eine Fernwärmeleitung der Projektklasse A mit den Qualitätsanforderungen der Projektklasse C behandeln. Die Projektklassen selbst umfassen unterschiedliche Anforderungen, wie die Bestimmung des Sicherheitsbeiwertes gegen Ermüdungsversagen, die Anforderungen an die Schweißnahtqualität und dem Prüfumfang sowie die Dokumentation. Ein zu realisierendes Projekt sollte grundsätzlich eine einheitliche Projektklasse aufweisen. Weiterführende Aussagen sind in (Randløv 1997) zu finden.

¹⁹ Entwurf des Normierungsgremiums CEN TC 107 JWG1 „Design and Installation“.

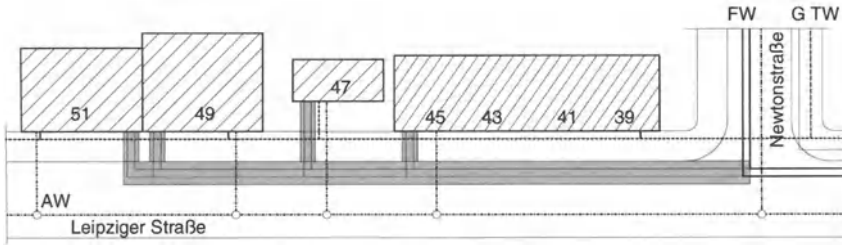


Abb. 2.4-3 Planungsanfrage der Leistungsphase Vorplanung
 AW Abwasser, TW Trinkwasser, G Gas, FW Fernwärme (Bestand)

Einen Auszug aus einer Planungsanfrage an die Eigentümer der anderen Versorgungsleitungen sowie als erste Diskussionsgrundlage mit den zu genehmigenden Behörden zeigt Abb. 2.4-3.

Letztendlich erfolgt die Zusammenfassung aller Ergebnisse einschließlich einer Bewertung sowie einer ersten Grobkostenschätzung für den geplanten Leistungsumfang.

2.4.4 Entwurfsplanung

Die Entwurfsplanung beginnt mit der detaillierten Überarbeitung des zuvor aufgestellten Planungskonzeptes unter Berücksichtigung aller spezifischen Anforderungen, wobei die Grenzen zwischen der Vorplanung und Entwurfsplanung fließend sind. Dabei sind alle Leistungen anderer an der Planung fachlich Beteiligter mit zu integrieren.

Die Stellungnahmen der angefragten Eigentümer anderer Versorgungsleitungen beinhalten entweder die Befürwortung, in den überwiegenden Fällen verbunden mit einzuhaltenden Randbedingungen (beispielsweise gesonderte Mindestabstände) oder eine Ablehnung. Letzteres ist nicht unmöglich, da Eigentümer sogenannte Vorbehaltstrassen für einen späteren Bauzeitpunkt bei den zu genehmigenden Behörden für sich reserviert haben.

Im gezeigten Beispiel (Abb. 2.4-3) ist eine größere Vorbehaltstrasse für Stromkabel durch den Eigentümer vorgegeben worden, so daß eine neue Trasse festgelegt werden mußte. Vorgespräche mit dem Eigentümer des Hauses 39–45 führten dazu, daß im vorhandenen Kellergang die Durchführung und der Hausanschluß realisiert werden können (Abb. 2.4-4). Die Anbindung an die bereits vorhandene Fernwärmeleitung war nicht möglich, da zum einem der Schwenkbereich der Stromkabel und die Kabelanzahl noch nicht feststand, zum anderen hätte die neue Fernwärmeleitung durch einen Tiefpunkt zusätzliche Entleerungsarmaturen im Straßenbereich erfordert.

Somit liegen die Trassierung, das Verlegeverfahren, die Auslegungsparameter und die Bemessung der neu zu verlegenden Fernwärmeleitungen vor. Des weiteren müssen die Art und Weise der Verlegung, der Einbau von Armaturen, das Leckwarnsystem bei der Verlegung von Kunststoffmantelrohr festgelegt werden.

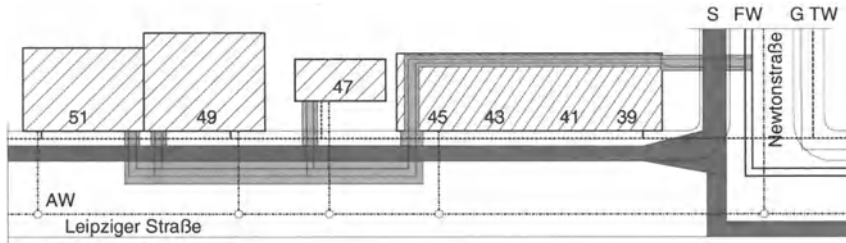


Abb. 2.4-4 Planungsanfrage der Leistungsphase Entwurfsplanung
 AW Abwasser, TW Trinkwasser, G Gas, FW Fernwärme (Bestand), S Strom

Unter Art und Weise der Verlegung von KMR ist zu verstehen, ob die Vorlauf- und die Rücklaufleitung beispielsweise nebeneinander oder übereinander realisiert werden soll. Weitere Ausführungen sind dazu in (AGFW 1997a) zu finden. Weiterhin wird gerade bei dem Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr aus Wirtschaftlichkeitsgründen eine möglichst oberflächennahe Verlegung angestrebt. Bei der sogenannten Flachverlegung erfolgt die Leitungsverlegung mit minimaler Überdeckung, d. h. sie orientiert sich nicht an definierten Hoch- und Tiefpunkten, sondern vielmehr am Geländeprofil und den zu kreuzenden Versorgungsleitungen. Damit entstehen eine Vielzahl von nicht definierten Hoch- und Tiefpunkten im Leitungsverlauf, wobei eine vollständige Entlüftung bzw. Entleerung der Leitungen in Kauf genommen werden müssen. Sofern die Leitungsführung nicht mehr als 3° von der Horizontalen abweicht, werden die an den Hochpunkten vorhandenen Lufteinschlüsse im Betrieb mitgerissen und können durch eine Entgasung entfernt werden. Entlüftungs- und Entleerungsarmaturen werden nicht benötigt, wenn das notwendige Entlüften und Entleeren durch andere Maßnahmen ermöglicht wird. Verschiedene Varianten sind dazu in (AGFW 1997a) aufgezeigt. Gegeben durch eine Flachverlegung ist eine Gefährdung bei Stillstandszeiten durch Frost grundsätzlich auszuschließen. Eine Möglichkeit bestände darin, mit Hilfe von Kurzschlüssen eine ausreichende Mindestmenge bei längeren Stillstandszeiten umzuwälzen.

Bei dem Verlegeverfahren Freileitung ist die konstruktive Gestaltung der Stützen bzw. Sockel auszuwählen. Gleiches trifft bei dem Verlegeverfahren Kanal für die Wahl der Kanalform und dessen Funktion zu (nicht begehbar, begehbar, Sammelkanal).

Während der Einbau von Armaturen beim Verlegeverfahren Freileitung völlig einfach ist, kann er bei erdverlegten Fernwärmeleitungen ein Problem darstellen. Dabei ist zu entscheiden, ob die Armaturen in einem Bauwerk untergebracht oder ob erdverlegte Armaturen zum Einsatz kommen sollen. Erdverlegte Armaturen haben den Vorteil der geringeren Kosten. Nachteilig dagegen wirkt sich aus, daß bei einem Schaden der Armatur ein erhöhter Aufwand durch Tiefbau notwendig wird.

Die beim Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr notwendigen Überwachungssysteme wurden im einzelnen beschrieben. Entscheidend dabei ist, ob bereits ein Überwachungssystem bei vorhandenen Fernwärmeleitungen existiert und ob die-

ses auch erweitert werden kann. Als Grenzkriterium wird die Gesamtlänge des KMR von 5000 m angesehen. Gegebenenfalls ist eine Prüfung der Kompatibilität mit bestehenden Überwachungssystemen durchzuführen. Erfahrungsgemäß sollten die Grenzen der Leitungsabschnitte eindeutig definiert werden. Es wird empfohlen, einen neuen Teilabschnitt zu bilden, wenn sich beispielsweise der Hersteller, der Rohrleger oder die Gewährleistung ändern. Eine beispielhafte Darstellung des Ablaufplanes zur Planung von Überwachungssystemen ist in (AGFW 1997a) zu finden. Ab DN 500 wird der Einbau von zwei voneinander unabhängigen Überwachungssystemen durch die AGFW empfohlen. Die Begründung liegt darin, daß sich die Ansprechzeit des Überwachungssystems bei Durchfeuchtungen aufgrund der Wärmedämmdicke sich eventuell verlängern kann.

Bei größeren Bauvorhaben wird bereits in der Entwurfsplanung eine Vorstatik angefertigt, um somit die Trassierung zu überprüfen. Grundlegende Ausführungen zu statischen Berechnungen wurden im vorherigen Abschnitt ausgeführt.

Letztendlich erfolgt die Zusammenfassung aller Ergebnisse einschließlich einer Bewertung sowie die Überarbeitung der Grobkostenschätzung für den geplanten Leistungsumfang.

2.4.5 Genehmigungsplanung

Bei der Planung von Fernwärmeleitungen ist die Genehmigungsplanung von der Größe des Bauvorhabens abhängig. Für diese Genehmigungsplanung zeichnet sich der Planer verantwortlich. Dies gilt für die Erarbeitung, Einreichung und Prüfung aller Vorlagen. Dabei ist es von Vorteil, wenn die Stellungnahmen der Eigentümer anderer Versorgungsleitungen bereits vorliegen.

Im allgemeinen unterliegen Fernwärmeleitungen nicht dem Geltungsbereich der jeweiligen Landesbauordnung. Somit besteht keine Bauanzeigepflicht und es muß keine Baugenehmigung erreicht werden. Es kann aber auch Ausnahmen geben, beispielsweise beim Verlegeverfahren Freileitung. Die Begründung der erforderlichen Genehmigung beruht dann auf den sonstigen gesetzlichen Vorschriften, wie sie für den Bereich der Bundesautobahnen und der Bundes-, Landes- und Kreisstraßen bestehen (AGFW 1993a). Deshalb sollte sich rechtzeitig im Vorfeld bei den zu genehmigenden Behörden über den Sachverhalt der Genehmigungspflicht erkundigt werden.

Für die Benutzung von öffentlichen Straßen und Grundstücken durch Fernwärmeleitungen zeichnet sich meistens die kommunale Verwaltung verantwortlich. Komplizierter gestalten sich Verlegungen im privaten Grundstücksbereich. Dort sollten frühzeitig Vereinbarungen getroffen und die entsprechenden Dienstbarkeiten in die Grundbücher eingetragen werden. Im Regelfall wird der für die Verlegung der Anschlußleitung zur Versorgung des betreffenden Kunden benötigte Bereich unentgeltlich zur Verfügung gestellt.

2.4.6

Ausführungsplanung

Die Ausführungsplanung enthält alle detaillierten Angaben über das geplante Bauvorhaben, anfangen von der Materialliste der Fernwärmeleitung und aller einzubauenden Zubehörteile bis hin zu benötigten Bauwerken einschließlich des Tiefbaues. In dieser Leistungsphase fließen alle Ergebnisse der Entwurfs- und Genehmigungsplanung unter Berücksichtigung städtebaulicher, funktionaler, technischer und wirtschaftlicher Anforderungen ein. Gleichzeitig wird damit der erste Grundstein über Art und Umfang für die Dokumentation gelegt.

Dazu gehören weiterhin neben Übersichtsplänen auch sämtlich benötigte zeichnerische Darstellungen in verschiedenen Maßstäben (beispielsweise 1:500, 1:200–1:50). Für die Verlegung innerhalb von Gebäuden werden durch den höheren Detaillierungsgrad (Primär- und Sekundärstahlbau) auch Werkstattzeichnungen angefertigt. In diesen Darstellungen fließen die Ergebnisse der Statik des Rohrleitungssystems ein. Des weiteren ist insbesondere bei dem Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr die Verlegemethode (Kaltverlegung, Vorwärmung, spezielle Vorspannungsverfahren, Dehnungsbögen oder Kompensatoren) festzulegen.

Auf die Durchführung von statischen Berechnungen gibt es unterschiedliche Praktiken. Diese können sowohl durch den Auftraggeber als auch durch den Planer durchgeführt werden. Im Ergebnis erfolgt dann die genaue Vorgabe der Verlegung in der Ausschreibung für den Lieferanten und Rohrleger. Diese Variante ist gebunden an entsprechend zur Verfügung stehende Software. Es ist aber auch üblich, in der folgenden Leistungsphase eine funktionale Ausschreibung mit der Maßgabe zu erstellen, daß die Statik durch den Lieferanten zu erbringen ist.

Weiterhin müssen Aussagen zur Schweißnahtausführung getroffen werden. Für die Verlegung von Fernwärmeleitungen und für die Durchführung der Schweißarbeiten gelten die technischen Vorschriften entsprechender Regelwerke. Im besonderen ist auf die Güte der Schweißarbeiten Wert zu legen und es sind dafür nur Schweißer einzusetzen, die nach DIN in den entsprechenden Gruppen und in den angewendeten Schweißverfahren geprüft sind. Diese Bestimmung gilt auch für die Schweißarbeiten in der Werkstatt des Rohrlegers. Die Bewertung der Unregelmäßigkeiten bei der Schweißnahtausführung erfolgt nach DIN EN 25817 in den Bewertungsgruppen B, C und D. Dabei werden in der Bewertungsgruppe B die höchsten Anforderungen an die Schweißnaht gestellt. Bei Unregelmäßigkeiten, wie

- Poren,
- Einbrandkerben,
- zu große Naht- oder Wurzelüberhöhungen,
- Kantenversatz und
- Wurzelkerben

werden in der Bewertungsgruppe B nur sehr kleine, in D dagegen schon größere Unregelmäßigkeiten zugelassen. Die AGFW empfiehlt in ihrem AGFW-Arbeitsblatt FW 446²⁰ die Prüfung von Schweißnähten für Stahlmedienrohre in Fernwärmesystemen nach der Bewertungsgruppe B vorzunehmen.

²⁰ Arbeitsblatt befindet sich derzeit in Erarbeitung.

Tabelle 2.4-2 Schweißnahtprüfumfang unterteilt nach Projektklassen (Randløv 1997)

		Projektklasse		
		A	B	C
Prüfumfang	[%]	5	10	20
2. Prüfung	[%]	20	20	50
3. Prüfung	[%]	50	50	100
4. Prüfung	[%]	100	100	–

Tabelle 2.4-3 Schweißnahtprüfumfang unterteilt nach Schweißverfahren (AGFW 1997a)

Schweißverfahren	Bereich	Prüfumfang [%]
Gasschweißen (G)	DN 25–150	20
Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	DN 25–150	10
Lichtbogenhandschweißen (E)	DN 150–	10–20
WIG/E	DN 150–	10

Weiterhin ist bei dem Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr insbesondere auf den Schutz des PUR-Schaumes und der Leckwarndrähte bei dem Schweißen hinzuweisen. Letztendlich erfolgen gemeinsam mit dem Auftraggeber Festlegungen zur Schweißnahtprüfung und zum Prüfumfang. Hinsichtlich des Prüfumfanges gibt es verschiedene Erfahrungswerte, welche von 10–100 % Prüfumfang reichen. Dabei sind verschiedene Faktoren abzuwägen, denn mit zunehmendem Prüfumfang sind auch höhere Kosten verbunden. Bezugnehmend auf die in (Randløv 1997) aufgestellten Projektklassen wird der Prüfumfang prozentual zur Schweißnahtlänge einschließlich einer erweiterten Prüfung nach Feststellung von Fehlern wie folgt angegeben (Tabelle 2.4-2). Dagegen werden in (AGFW 1997a) für eine radiografische Prüfung in Abhängigkeit vom Schweißverfahren folgende Empfehlungen gegeben (Tabelle 2.4-3).

Dabei wird empfohlen, die zuerst ausgeführten Schweißnähte eines Schweißers vollständig (100 %) zu prüfen. Dies gilt auch für Schweißnähte, die keiner Dichtigkeitsprüfung unterzogen werden können bzw. dort, wo sich Instandsetzungen als äußerst schwierig erweisen, beispielsweise Düker oder Durchörterungen.

Für die durchzuführende Dichtigkeits- und Druckprobe sind ebenfalls entsprechende Festlegungen zu treffen. Grundlage bildet dazu das AGFW-Merkblatt FW 602 – Festigkeits- und Druckprüfung, daß derzeit als Entwurf existiert.

Bei der Luftdruckprobe werden die Leitungsabschnitte, falls zweckmäßig die Hauptleitungen und Hausanschlußleitungen getrennt, einer Dichtigkeitsprüfung mittels Luft auf 0,2–0,5 bar Überdruck unterzogen. Anschließend werden alle Schweißnähte mit einer schaumbildenden Flüssigkeit benetzt. Die Schweißnaht ist in Ordnung, wenn visuell keine Undichtigkeiten erkennbar sind. Bei der Dichtigkeitsprüfung mit Vakuumbrille wird ebenfalls die zu prüfende Schweißnaht benetzt, die Vakuumbrille aufgesetzt und ein Unterdruck von etwa 0,2 bar erzeugt. Letzteres Verfahren eignet sich gut für eine sukzessive Prüfung während des Bau-

ablaufes. Mit den Isolierarbeiten darf erst nach Freigabe durch die Bauleitung begonnen werden. Die Wasserdruckprobe verläuft ähnlich. Die gebauten Leitungsabschnitte sind einer Wasserdruckprobe mit 1,3-fachem Betriebsdruck zu unterziehen²¹. Die neuverlegten Leitungen werden dabei über den Anschlußpunkt mit Heizwasser gefüllt. Die Prüfdauer der Wasserdruckprüfung und deren Aussagefähigkeit ist abhängig von der Einhaltung der angegebenen Versuchsbedingungen aus dem DVGW-Arbeitsblatt G 469 – Druckprüfverfahren für Leitungen und Anlagen der Gasversorgung. Die Prüfdauer ist mindestens 8 Stunden aufrecht zu erhalten (AGFW 1997a), wobei der Prüfdruck nicht mehr als $\pm 5\%$ von dem geforderten Wert abweichen sollte²². Die visuelle Kontrolle darf keine feuchten Schweißnähte ergeben. Bei der Versuchsdurchführung ist der Druckanstieg durch Sonneneinstrahlung zu beachten. Es ist daher ratsam, den Druckverlauf sowie die Außenlufttemperaturen gleichzeitig zu erfassen. Prinzipiell ist zur Wasserdruckprüfung mit Kaltwasser anzumerken, daß diese nicht als Festigkeitsprüfung für die Fernwärmeleitung angesehen werden kann, da eine Durchführung ohne die dynamischen Betriebsvorgänge während des Netzbetriebes erfolgt. Somit dient eine Innendruckprüfung mit Wasser lediglich zum Nachweis der Tragfähigkeit der Konstruktion. Bei der Wahl der Abschnitte ist auf einen optimierten Gesamtablauf zu achten und die Minimierung der Behinderungen im Straßenbereich besonders zu berücksichtigen. Die entsprechenden Nachweisgrenzen der verschiedenen Prüfverfahren zur Prüfung der Dichtigkeit liegen nach (AGFW 1997a) für die Luftdruckprobe mit Überdruck liegt bei etwa 10^{-3} mbar l/s, mit Unterdruck bei 10^{-4} mbar l/s und bei der Wasserdruckprobe bei etwa 1 mbar l/s.

Entsprechende Aussagen zum möglichen Verzicht von Druckprüfungen werden in (AGFW 1998) gemacht.

Im folgenden einige Anmerkungen zum Tiefbau. Während bei dem Verlegeverfahren Freileitung nur die für die Sockel bzw. Stützen benötigten Baugruben realisiert werden müssen, werden für die erdverlegten Verfahren Rohrgräben mit entsprechenden Abmessungen benötigt. Dabei ist oft der für die Verlegung zur Verfügung stehende Arbeitsraum begrenzt. Hier ist insbesondere im öffentlichen Bereich ein Optimum zu finden, einerseits einen ausreichenden Platz für eine effektive und sichere Verlegung zu gewährleisten, andererseits den Verkehr so wenig wie möglich zu beeinträchtigen.

Der Rohrgraben ist abhängig von der Aufgrabungsmethode, der Verlegetiefe, von der Beschaffenheit des Bodens usw. und kann somit verschiedenartig gestaltet werden. Nach der Unfallverhütungsvorschrift Bauarbeiten (VBG 37) ist die DIN 4124²³ die anzuwendende und einzuhaltende Anweisung. Die darin getroffenen Festlegungen dürfen nicht unterschritten werden. Dies gilt insbesondere bei Mindestanforderungen. Des weiteren wird bei den Rohrgrabenabmessungen in lichte Mindestbreiten ohne und mit betretbaren Arbeitsraum unterschieden. In (DIN TB 271 1997) ist die AGFW-Richtlinie 4.3.3 für Grabenbreiten einzelner Verlegeverfahren angegeben.

²¹ In (Randløv 1997) wird dafür der 1,5-fache Auslegungsdruck genannt.

²² Die Angaben hinsichtlich der Prüfdauer sind in der Literatur verschieden und reichen von 15 min bis maximal 24 Stunden.

²³ Diese Norm befindet sich derzeit in Überarbeitung.

Rohrgrabenwände mit Spundwänden oder Verbau sind an den Stellen erforderlich, an denen Verlegetiefe, Platzbedingungen, Bodenbeschaffenheit und Verkehrsbelastung keinen normalen senkrechten Rohrgraben mit Böschung zulassen. Ohne einen Nachweis der Standsicherheit dürfen Böschungswinkel nach (AGFW 1997a) bei nicht bindigen oder weichen bindigen Böden (Mutterboden, nichtbindige Sande und Kiese, Gesteinsschotter) von 45° , bei steifen oder halbfesten bindigen Böden (stark lehmiger Sand, Lehm, Ton) von 60° und bei Fels von 80° nicht überschritten werden. Einen erheblichen Einfluß auf die Böschung übt die Witterung aus und muß somit berücksichtigt werden. Die Grabenabsicherung selbst ist entsprechend DIN 4124 festzulegen. Dabei zählen zu den wichtigsten Verbaumethoden

- der Verbau mit Saumdielen bis zu einer Verlegetiefe von 1,25 m,
- der waagerechte Holzbohlenverbau für standfeste Böden,
- der senkrechte Holzbohlenverbau,
- der Kanaldielenverbau aus Stahl ab einer Verlegetiefe von 2,0 m,
- der großflächige Verbau aus Stahl.

Straßenbeläge sollten so weit vom Grabenrand entfernt werden, daß Schäden der verbliebenen Straßenbeläge während der Realisierung vermieden werden. Die Bildung von Hohlräumen ist möglichst zu vermeiden. Gleiches gilt auch in Nähe bestehender Fundamente. Gegebenenfalls ist hierfür ein statischer Nachweis für die Standsicherheit erforderlich.

Letztendlich ist auch die Herstellung der Rohrgrabensohle von entscheidender Bedeutung. Es ist zu gewährleisten, daß diese auf ihrer Gesamtlänge tragfähig und steinfrei ist. Wird ein Sandbett für das entsprechende Verlegeverfahren gefordert, so hat die Beschaffenheit in Anlehnung der DIN 4033 zu erfolgen.

Nach Abschluß der Rohr- bzw. Kanalverlegung erfolgt die Verfüllung. Gerade im öffentlichen Straßenraum können durch mangelhafte Verdichtung des Verfüllmaterials erhebliche Folgeschäden verursacht werden. Die Verfüllung des Rohrgrabens hat schichtweise zu erfolgen. Für die ordnungsgemäße Verfüllung darf die Schichtdicke bei mechanischer Verdichtung ein Maß von etwa 30 cm, bei manueller Verdichtung etwa 15 cm nicht übersteigen. Die mechanische Verdichtung sollte erst dann zum Einsatz kommen, wenn die Verfüllung über den Rohrleitungen mindestens 30 cm beträgt.

Bei dem Verlegeverfahren der Mantelrohre wird bei der Verfüllung unterschieden zwischen Leitungszone und Verfüllzone. Die Leitungszone endet etwa 30 cm über dem Rohrscheitel. Dort wird Sand mit einer Körnung von 0–4 mm etwa 10 cm aufgebracht und manuell verdichtet. Insbesondere ist dabei auf die Verdichtung unterhalb der Rohrachse zu achten. Anschließend wird eine Lage von mindestens 20 cm Verfüllmaterial eingebracht und mechanisch verdichtet. In der Leitungszone ist ein Verdichtungsgrad von $D_{Pr} \geq 97\%$ erforderlich. Das Einbringen von fließfähigen Bettungsmaterialien in die Leitungszone sowie deren einzuhaltende Bedingungen sind in (AGFW 1997a) beschrieben. Recyclingmaterialien sollten in der Leitungszone nicht zur Anwendung kommen.

Für die sich anschließende Verfüllzone kann vorhandener Aushub verwendet werden, solange dieser wiederverwendungsfähig ist, d. h. er muß den Verdich-

tungsklassen V1–V3 nach ZTV A-StB 89 genügen. Dabei sind die Verdichtungsgrade nach ZTV E-StB 94 einzuhalten. Grundsätzlich sollte zur Vermeidung von Schäden an den Fernwärmeleitungen das dazu benötigte Verfüllmaterial nicht direkt in den Rohrgraben abgekippt werden.

Das Kennzeichnungsband muß in einem Abstand von 20–50 cm über den Fernwärmeleitungen ausgelegt werden. Gleiches gilt für notwendige Begleitkabel oder Kabelschutzrohre.

Die Oberfläche, in den meisten Fällen handelt es sich um Gehwege oder Straßen, ist nach den entsprechenden Vorgaben der zu genehmigenden Behörde entsprechend wieder herzustellen und anschließend einer Abnahme zu unterziehen.

Speziell für das Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr werden in (Randløv 1997 u. AGFW 1997a) entsprechend zu erfüllende Anforderungen an Rohrgräben genannt. Dazu zählen u. a. der ausreichende Platz im Rohrgraben für die Ausrichtung, Unterstützung und Schweißen der einzelnen Rohrleitungen sowie für das sichere bauseitige Verdichten und Verfüllen. Ebenso sind die geltenden Sicherheitsbestimmungen einzuhalten. Alle erforderlichen Abmessungen sind daran und an die zu verlegenden Nenndurchmesser der Rohrleitungen gebunden. Gleichzeitig sind auch die jeweiligen Bedingungen in Nähe von Leitungen anderer Versorgungsmedien mit zu berücksichtigen. Anhaltswerte für die Größe des Rohrgrabens sind in Abb. 2.4-5 enthalten.

In (DIN TB 271 1997) bzw. DIN 4124 sind die Randbereiche zwischen Rohrleitung und Rohrgrabenwand größer ausgebildet.

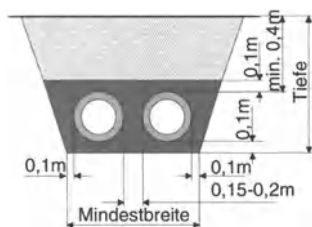


Abb. 2.4-5 Empfohlene Anhaltswerte für Rohrgrabenabmessung bei Verlegung Kunststoffmantelrohr nach (Randløv 1997)

Mantelrohr- durchmesser [mm]	Mindest- breite [m]	Tiefe [m]	Mantelrohr- durchmesser [mm]	Mindest- breite [m]	Tiefe [m]
90	0,7	0,65	355	1,3	1,0
110	0,7	0,65	400	1,4	1,0
125	0,7	0,65	450	1,5	1,0
140	0,8	0,65	500	1,6	1,1
160	0,8	0,70	520	1,7	1,1
200	0,9	0,75	560	1,8	1,2
225	1,0	0,80	630	2,0	1,3
250	1,1	0,90	710	2,2	1,4
315	1,2	1,00	780	2,4	1,5

Die Abmessungen des Rohrgrabens müssen für

- benötigte Kopflöcher,
- das Verschweißen von Einmalkompensatoren,
- Leitungsabgänge,
- die Schaffung von Dehnungszonen sowie
- das Einbringen eventuell erforderlicher Dränage

angepaßt werden. Dabei sind Kopflöcher für Schweißungen als eine Erweiterung des normalen Rohrgrabens herzustellen, wobei ein Abstand zwischen der Fernwärmeleitung und der Rohrgrabensohle von etwa 0,4–0,7 m empfohlen wird. Die Böschung ist entsprechend anzupassen.

2.4.7

Vorbereitung der Vergabe

In der Leistungsphase der Vorbereitung der Vergabe werden die erforderlichen Ausschreibungsunterlagen in Form von Leistungsverzeichnissen für den gesamten Leistungsumfang erstellt. Diese werden je nach Umfang meist in Teillöse nach Gewerken, wie Tiefbau, Verlegung und Wärmedämmung unterteilt. Es besteht aber auch die Möglichkeit, über eine sogenannte funktionale Ausschreibung einen Generalunternehmer (GU) für die Erbringung des gesamten Leistungsumfanges auszuschreiben. Dabei erübrigt sich die detaillierte Ausführungsplanung, da sie im Umfang des GU enthalten ist.

Weiterhin ist bei der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen entscheidend, welches Ausschreibungsverfahren gewählt werden soll. Hierbei wird unterschieden in öffentliche Ausschreibungen, Ausschreibungen über Prequalifikation sowie beschränkte Ausschreibungen.

In den Leistungsverzeichnissen sind die Lieferungen und Leistungen eindeutig zu beschreiben. Die Leistungen sind so aufzugliedern, daß unter einer Position nur solche Leistungen aufgenommen werden, die nach ihrer technischen Beschaffenheit und für die Preisbildung als in sich gleichartig anzusehen sind. Ziel ist es, daß alle Bewerber die Beschreibung im gleichen Sinn verstehen und ihre Preise sicher und ohne umfangreiche Vorarbeiten berechnen können. Hält der Anbieter die der Ausschreibung beigefügten Unterlagen für die Kalkulation für nicht ausreichend, so hat er dies innerhalb der Angebotsfrist ausdrücklich mitzuteilen.

Die Aufforderung zur Abgabe eines kostenlosen Angebotes ist ohne Verbindlichkeiten für den Auftraggeber. Die Gliederungen von Ausschreibungen sind verschieden. Der Einheitlichkeit halber werden in den meisten Fällen die Ausschreibungsunterlagen unterteilt in:

- Teil A Allgemeine Bedingungen, Informationen und Vertragsbedingungen für den Anbieter,
- Teil B Leistungsbeschreibung,
- Teil C Leistungsverzeichnis, Preisblätter,
- Teil D zusätzliche technische Vorschriften und Regelwerke sowie eigene Standards vom Auftraggeber.

Angebotsgrundlagen sind die in der Ausschreibung zugrunde gelegten Vertragsbedingungen und Informationen (Teil A) sowie alle auf den Liefergegenstand und dessen Betrieb zutreffenden deutschen Gesetze und Verordnungen, Normen und Richtlinien. Insbesondere sind mit dem Angebot einzureichen (soweit für die Teile zutreffend):

- Die vollständig ausgefüllten und unterschriebenen Ausschreibungsunterlagen, Einheitspreisblätter, die Aufstellung der Baukosten, einschließlich der zusätzlich gewünschten Angaben und Unterlagen.
- Beschreibung der einzelnen angebotenen Anlagenteile, einschließlich Funktionsbeschreibungen und Schemata.
- Eine spezielle Referenzliste über ausgeführte Anlagen der vorliegenden Eigenart und Größenordnung mit Angaben von Typ, Leistung, Auslegungsdaten, Betriebsbedingungen, Aufstellungsort und Datum der Inbetriebsetzung.
- Stellungnahme zum Terminablaufplan mit Personaleinsatzangaben über die Verlegung und Montage.
- Liste der vorgesehenen Subunternehmer für Lieferungen und Leistungen.
- Haftpflichtversicherung mit Angabe der Deckungssumme für Sach- und Personenschäden sowie Montageversicherung mit Angabe der Deckungssumme.

Das Leistungsverzeichnis muß sämtliche auszuführende Arbeiten enthalten und richtet sich nach den Ergebnissen der Ausführungsplanung. Nachfolgend werden einige Positionen als Hinweise zur Aufstellung des Leistungsverzeichnisses in Anlehnung von (AGFW 1993a) gegeben, ohne dabei den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben:

- Aufbruch und Wiederherstellung der aufgebrochenen Oberflächen in den verschiedenen Ausführungen,
- Aushub des Grabens und der Baugruben, gegebenenfalls in verschiedenen Tiefen abgestuft und nach Bodenklassen unterteilt; Maße unter Berücksichtigung der zu vereinbarenden Arbeitsraumbreiten,
- waagerechter und senkrechter Graben- und Baugrubenverbau,
- Abbrucharbeiten im Bereich des Grabens und der Baugruben, aufgeteilt in Beschaffenheit der Abbruchteile,
- Durchbrüche für Fernwärmeleitungen und Stemmen von Löchern in Mauerwerk und Beton,
- Abfuhr der von den Leitungen und Bauwerken verdrängten Bodenmassen,
- Abfuhr der gesamten ausgehobenen Bodenmassen und Anfuhr von Verfüllmaterial soweit es Bodenqualität und Verdichtung erfordern,
- Abfuhr von Schutt und Abbruchmaterial,
- Herstellen, Transportieren und Versetzen der Fertigbetonteile,
- Herstellen der Kanäle, Sohlen, Schächte, Fundamente, Sockel entsprechend Verlegeverfahren,
- Vergießen der Gleitlager, Festpunkte, Konsolen, Stützen,
- Herstellen des Sandbettes auf der Grabensohle entsprechend Beschaffenheit der Sohle,
- Einsanden des Mantelrohres,

- Umlegen von Versorgungsleitungen anderer Eigentümer, die ein Hindernis für die Leitung oder das Bauwerk bilden,
- Herstellen, Unterhalten und Wiederabbau von Fahrzeugbrücken und Fußgängerstegen,
- Baustelleneinrichtung mit An- und Abtransport,
- Transport der Baustoffe und
- Wasserhaltung.

2.4.8

Mitwirkung bei der Vergabe

Bei der Vergabe werden alle eingereichten Angebote geprüft und einer Bewertung unterzogen. Dazu gehört auch der Preisleistungsspiegel. Im Anschluß erfolgen in Abhängigkeit des Ausschreibungsverfahrens die Verhandlungen mit den Bietern, mit dem Ziel der vollständigen Klärung aller technischen und kommerziellen Belange. Gleichzeitig erfolgt die Festlegung nach der Abrechnung, entweder zum Festpreis oder per Einheitspreise nach erfolgtem Aufmaß. Den Abschluß dieser Leistungsphase bildet die Auftragsvergabe.

2.4.9

Bauüberwachung

Den wichtigsten Teil der Leistungsphasen bildet die Bauüberwachung. Hier erfolgt das Überwachen der Ausführung des Neubaus auf Übereinstimmung mit der Baugenehmigung, den Ausführungsplänen und den Leistungsbeschreibungen sowie mit den anerkannten Regeln der Technik und den einschlägigen Vorschriften. Wichtige Bestandteile der Bauüberwachung sind die

- Prüfung der qualitätsgerechten Lieferungen nach Materialliste,
- Überwachung des Bauablaufes,
- Mitwirkung beim Aufmaß mit den ausführenden Unternehmen in Abhängigkeit des vereinbarten Auftrages,
- fachtechnische Abnahme der Leistungen,
- gemeinsame Festlegung mit dem Auftraggeber der zu prüfenden Schweißnähte gemäß Prüfumfang,
- Auswertung der Schweißnahtprüfung mit den Prüfenden,
- Durchführung der Dichtigkeits- und Druckprüfungen,
- Kontrolle der Vermessung,
- Feststellung der Mängel,
- Überwachung der Beseitigung der bei der Abnahme festgestellten Mängel,
- Überwachung des Terminablaufplanes,
- Mitwirkung bei der Kostenkontrolle,
- Rechnungsprüfung,
- Übergabe des Objektes sowie
- Übergabe der Prüfprotokolle und Bedienungsanleitungen.

2.4.10

Objektbetreuung und Dokumentation

Die letzte Leistungsphase enthält die Objektbetreuung und Dokumentation. Dazu gehören die Mitwirkung bei der systematischen Zusammenstellung der Dokumentation über das gesamte Bauverfahren sowie die Objektbegehung zur Mängelfeststellung vor Ablauf der Verjährungsfristen der Gewährleistungsansprüche gegenüber den ausführenden Unternehmen.

Diese Leistungsphase ist mit Übersendung der Dokumentation und der Inbetriebnahme der Anlage im wesentlichen beendet. Liegen schwerwiegende betriebliche Mängel vor, kann die Übernahme durch den Auftraggeber bis zur Behebung dieser Mängel zurückgestellt werden.

2.5

Betrieb und Instandhaltung

Hinsichtlich des Betriebes und der Instandhaltung eines Fernwärmesystems sollen in diesem Abschnitt nur die Themen kurz angeschnitten werden, die unmittelbar die Versorgungszuverlässigkeit beeinflussen. Dazu zählen die

- Schadensmeldung und deren Behebung,
- Überwachen des Fernwärmesystems (Überwachungssysteme, Thermographie),
- Wasserqualität bei Heizwassernetzen,
- Kontroll- und Wartungsintervalle.

Das Auftreten von *Schäden* an Fernwärmeleitungen kann verschiedene Ursachen haben. Gleiches gilt auch für deren Entdeckung. Diese können aber auch, je nach Schadensart und Schadensursache, über einen längeren Zeitraum unentdeckt bleiben und erst nach entsprechender Ausweitung durch äußere Wahrnehmungen festgestellt werden. Es kommt aber auch zu Schäden an Bauteilen des Rohrnetzes, die nicht unmittelbar zu einem Wasseraustritt führen, aber eine Funktionsstörung oder gar Gebrauchsuntauglichkeit zur Folge haben können. Dazu zählt z. B. eine verbogene Armaturenspindel. Solche Schadensfälle werden in der Regel durch eine Inspektion oder im Rahmen einer Wartung entdeckt. In vielen Fällen erfolgt die anschließende Instandsetzung der Schäden. Entscheidend ist die Zeit der Ortung des Schadens, um rechtzeitig reagieren zu können. Dabei ist zu unterteilen in Schäden, die eine sofortige Außerbetriebnahme erfordern und in solche, die einen Weiterbetrieb des Fernwärmenetzes ohne Einschränkungen bis zu einem geplanten Stillstand gestatten. Bei der Erkennung eines Schadens spielen insbesondere bei dem Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr die Überwachungssysteme eine wesentliche Rolle. Auch ist es bei Heizwassersystemen möglich, über eine Differenzbildung zwischen Zuspese- und Abspeisevolumen der Druckhaltung unter Berücksichtigung der dynamischen Vorgänge die Leckverluste auszuweisen bzw. deren Tendenz zu erkennen. Die Ortung des Schadens kann sich sehr kompliziert gestalten, solange keine Schadensmeldung – beispielsweise durch Dritte – vorliegt. Ist dabei der Leckvolumenstrom größer als die zur Verfügung stehenden

Nachspeisevolumen der Druckhaltung müssen Netzabschnitte oder sogar das komplette Netz außer Betrieb genommen werden. Während sich freiverlegte Rohrleitungen relativ einfach kontrollieren lassen, können bei erdverlegten Rohrleitungen nur die dazwischen befindlichen Bauwerke als ersten Schritt kontrolliert werden. Weitere Ausführungen zu Schäden bzw. unplanmäßigen Ereignissen sind ab Kap. 4 zu finden.

Wie bereits erwähnt, kommen *Überwachungssysteme* hauptsächlich bei dem Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr, aber auch bei dem Stahlmantelrohr zum Einsatz. Die dazu erforderlichen Meldedrähte zwischen dem Mantelrohr und dem Mediumrohr haben den Vorteil, daß sie einen Schaden anzeigen, bevor die Feuchte ein solches Ausmaß annimmt, daß ein Risiko der Korrosion am Mediumrohr besteht. Wird die Feuchtigkeit in einem relativ frühen Stadium entdeckt, können meistens Instandsetzungsarbeiten ohne Versorgungsunterbrechung durchgeführt werden. Dies gilt für Schäden am Mantelrohr bzw. Muffe. Schäden am Mediumrohr sind bereits kritischer zu betrachten. Mit der frühen Entdeckung wird gleichzeitig verhindert, daß sich der Schaden ausbreitet. Die Funktionsfähigkeit des Überwachungssystems hängt von dessen ordnungsgemäßen Montage ab.

Bei der Überwachung der nicht an zentrale Dauerüberwachungsgeräte angeschlossenen Trassenabschnitte, sind in angepaßten Zeitabständen die elektrischen Isolationswiderstände manuell zu überprüfen. Die Festlegung der Überwachungsintervalle ist sowohl von den Prioritäten der Leitungen (Prioritätskriterium) als auch von den vorher gemessenen Isolationswiderständen bzw. deren tendenziellen Entwicklungen (Gradientenkriterium) abhängig (AGFW 1999a). Leitungen mit hoher Priorität, wie beispielsweise größere Hauptleitungen oder Anschlußleitungen sensibler Abnehmer, sollten in möglichst kurzen Intervallen überwacht werden. Dagegen wird für Leitungen mittlerer Priorität ein Intervall von halbjährlich bis jährlich und für Leitungen mit niedriger Priorität ein Intervall mit bis zu 2 Jahren empfohlen. Die Intervalle des Gradientenkriteriums sind abhängig von der sich bei stetigem Abfall des Isolationswiderstandes ergebenden Tendenz und sollten so bestimmt werden, damit eine möglichst frühzeitige Schadensortung ermöglicht und eine Schadensbehebung planbar wird. Grundsätzlich sollten neu verlegte Leitungen im ersten Betriebsjahr häufiger überwacht werden.

Entscheidend ist, daß sich nach der Inbetriebnahme einer neuen Fernwärmeleitung und einem mehrwöchigen Betrieb ein entsprechender elektrischer Isolationswiderstand ausbildet. Verantwortlich dafür sind u. a. die nicht vollständig auszuschließenden Restfeuchten, Nachreaktionen des PUR-Hartschaumes der Muffen. Voraussetzung dazu ist eine ordnungsgemäße Muffenmontage. Die Messung des Zustandes sollte nach etwa 4 Wochen Betrieb wiederholt werden. Ist die zu überwachende Fernwärmeleitung bzw. der Trassenabschnitt in Ordnung, so bilden diese Werte die Ausgangsgrundlage für alle weiteren Messungen.

Bei bereits vorhandenen Fernwärmeleitungen mit Überwachungssystemen werden die neu erbauten Fernwärmeleitungen mit integriert.

Meldungen des Überwachungssystems sind hinsichtlich der Ursache zu bewerten. Bei der Einstufung der Meldungen als Schaden ist eine Einmessung der Schadenstelle vorzunehmen. Diese Messung kann entsprechend des Ausstattungsgrades des Überwachungssystems sowohl automatisch und/oder manuell erfolgen,

wobei Durchfeuchtungen oder Aderabrisse einmeßbar sind. Tritt dies während der Gewährleistung auf, so ist der Bauausführende für diese Leistung verantwortlich. Eine Fehlerortung ist vom jeweils eingesetzten Meßverfahren abhängig. Weitere Ausführungen zur Funktionsweise der einzelnen Verfahren sind in Abschn. Kunststoffmantelrohre beschrieben.

Eine weitere Methode zur Einschätzung des Zustandes der Fernwärmeleitung ist die Thermographie. Diese beruht auf dem Prinzip des Langwellen-Infrarot-scanning, womit die von einem Körper ausgehenden Temperaturen und somit dessen Wärmeabstrahlung gemessen werden. Dabei wird das von einem Infrarot-sensor abgegebene Signal digital für die Weiterverarbeitung umgewandelt. Nach (Randløv 1997) ist eine Auflösung des Temperaturgradienten von etwa $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ möglich, wobei im praktischen Einsatz von etwa $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgegangen werden kann. Laut (AGFW 1997a) können Fehlstellen in der Wärmedämmung mit Temperaturunterschieden ab etwa $1,5\text{ K}$ bei einer Vorwärmtemperatur von etwa $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen werden.

Bei Anwendung der Thermographie in Fernwärmesystemen verschafft dieses Verfahren einen Überblick über die Wärmeabstrahlung der Trassen. Damit sind die Wärmeverluste bewertbar. Dieses Verfahren wird insbesondere bei erdverlegten Rohrleitungen eingesetzt, da keine andere Kontrollmöglichkeit über den Zustand des Trassenabschnittes besteht. Auch bei dem Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr gestattet die thermographische Untersuchung die Erkennung von mangelhaft gedämmten Verbindungen sowie von bereits durchfeuchteten Bereichen. Es ist aber auch möglich, selbst die unterschiedlichen Wärmedämmeigenschaften über der Rohrlänge (Abstandshalter, Muffenschäume usw.) an der Manteloberfläche abzubilden. Unterschiede zwischen den werkseitig hergestellten Bauteilen und Muffenschäumen und unzureichend oder nur teilgefüllte Muffen können deutlich festgestellt werden. Es muß aber angemerkt werden, daß die erhaltenen Ergebnisse zum Teil anhand der Umgebungseinflüsse schwer bewertbar sind. Zu diesen Einflüssen zählen u. a. die Verlegetiefe, die Beschaffenheit des Bodens, die Struktur der Oberfläche, die Witterungsverhältnisse, aber auch parallel liegende Leitungen anderer Versorgungsmedien. Bei den Witterungsverhältnissen übt die Sonnenstrahlung einen erheblichen Einfluß auf die Messungen aus.

Einen weiteren Einfluß auf die Versorgungssicherheit üben die *Wasserqualität* des Heizwassers, aber auch die Kondensatqualität aus. Für die Kondensatqualität zeichnen sich vor allem die einzelnen Wärmeübertrager- und Hausanschlußstationen verantwortlich. Dagegen ist die Bildung von Ablagerungen oder Korrosion im Heizwasser oftmals Ursache für eine nicht ausreichende oder sogar fehlende Wasseraufbereitung.

Korrosion in Fernwärmenetzen kann hauptsächlich begrenzt werden, indem die Konzentration von aufgelöstem Sauerstoff auf unter $0,02\text{ mg/l}$ reduziert wird. Ziel ist es, daß die selbstschützende Magnetitschicht auf der Stahloberfläche unbeschädigt bleibt. Dies gilt auch bei Einsatz von Messing, wo die Korrosion auf ein Mindestmaß zu begrenzen ist, sowie bei Kupfer durch Erhaltung der aufgebauten Kupferoxidbeschichtung. In Wärmeübertragern und Kompensatoren wird überwiegend rostfreier Stahl eingesetzt. Um Spannungsrißkorrosion zu vermeiden, darf die Konzentration von Chlorionen nicht mehr als 100 mg/l betragen.

Tabelle 2.5-1 Auszug zu wasserchemischen Richtwerten für Kreislaufwasser direkter und indirekter Anschlußart nach (Wieland 1990 u. DIN TB 281 1997)

Parameter	ME	salzarm	salzhaltig
– elektrische Leitfähigkeit bei 25 °C	µS/cm	10–30	>30–100
– pH-Wert bei 25 °C	–	9–10	9–10,5
– Sauerstoff	mg/l	<0,1	<0,05
– Erdalkalien (Ca + Mg)	mmol/l	<0,02	<0,02

Weitere Probleme können durch das Vorhandensein von Bakterien auftreten, die sowohl aufgrund der Bildung von Schwefelwasserstoff einen unangenehmen Geruch bewirken, als auch bei eisen- und sulfatreduzierenden Bakterien sogar zu Korrosion führen können.

Entsprechende Qualitätsanforderungen an Fernheizwasser sind im VGB-Merkblatt (VGB-M 410 N 1994 u. DIN TB 281 1997) zu finden. Je mehr Anforderungen erfüllt werden, desto höher liegt die Lebensdauer der Anlagenteile des Fernwärmenetzes. Grundsätzlich wird zwischen salzarmen (10–100 µS/cm) und salzhaltigen (100–1500 µS/cm) Kreislaufwasser unterschieden. Für beide Wasserarten werden die in Tabelle 2.5-1 enthaltenen wasserchemischen Richtwerte empfohlen.

Weitere Werte bei Einsatz von Sauerstoffbindemitteln, wie Hydrazin oder Natriumsulfit sowie wasserchemische Richtwerte für Kreislaufwasser von Heizungsanlagen mit Mischkondensation sind ebenfalls in (Wieland 1990 u. DIN TB 281 1997) enthalten.

Entscheidend ist nicht die Einhaltung der Richtwerte, sondern vielmehr die Erkennung von Tendenzänderungen, die durch z. B. eine kontinuierliche, registrierende Leitfähigkeitsmessung möglich wird. Dies ist erforderlich, um rechtzeitig Maßnahmen gegen größere Einbrüche von sauerstoff- und salzhaltigem Trinkwasser einleiten zu können. Dies trifft auch zu bei geteilten Heizwassersystemen zu, da das Sekundärwasser in den meisten Fällen eine schlechtere Wasserqualität besitzt. Im Hinblick auf den Korrosionsschutz von Stahl soll der pH-Wert im Heizwasser zwischen 9 und 10 liegen. In (VGB-M 410 N 1994) wird darauf hingewiesen, daß ein Minimum des Gehaltes an gelösten und suspendierten Eisenspezies erst bei einem pH-Wert $\geq 9,5$ erreicht wird. Die Anhebung des pH-Wertes sollte zweckmäßigerweise mit Natriumhydroxid erfolgen, dagegen wird Ammoniak zur Einstellung nicht empfohlen. Lufteinbrüche sind nicht nur wegen der möglichen Gefahr der Korrosion unerwünscht, sondern auch deshalb, weil bei jedem Lufteinbruch zusätzlich Luftstickstoff in das Heizwasser gelangt. Dieser Stickstoff beteiligt sich zwar nicht an den Korrosionsprozessen, führt aber in höheren Konzentrationen zu Ausgasungen in Hochpunkten, was wiederum zur Beeinträchtigung der Versorgung führen kann. Gleichzeitig vergrößert das Vorhandensein von Sauerstoff im Heizwasser die Korrosionsgefahr proportional zum größeren Salzgehalt, besonders in Verbindung mit Sulfat und Chlor.

Bei Einhaltung des Gesamt-Eisengehaltes von kleiner 0,03 mg/l stellt sich im Fernwärmenetz ein niedriger Korrosionsproduktpegel ein.

Die Enthärtung von Heizwasser erfolgt über Kationenaustauscher. In Abhängigkeit von den verwendeten Werkstoffen im Fernwärmenetz kann es notwendig werden, einen Teilstrom des Heizwassers über eine Vollentsalzungsanlage zu führen bzw. vollentsalztes Wasser nachzuspeisen. Um den Sauerstoffgehalt im Heizwasser auf unter 0,02 mg/l zu erreichen, kann eine thermische Entgasung im Überdruck bei etwa 115 °C oder im Vakuum erfolgen. Kleinere Sauerstoffmengen können auch durch Zusatz von Chemikalien reduziert werden.

Weiterhin wird empfohlen, das Heizwasser zu filtrieren, um somit feste Ablagerungen in Form von Schlamm und Eisenpartikel zu entfernen. Damit werden auch Erosion und mechanische Abnutzung in den Rohrleitungen und Zubehöerteilen vermindert. Die Empfehlungen schreiben klares und schlammfreies Heizwasser vor, was in Kombination von mechanischer und magnetischer Filtrierung erreicht wird. Erfahrungsgemäß sind Filteranlagen im Nebenstrom (5–10 % vom Gesamtvolumenstrom) von Vorteil, da diese den Druckverlust im Hauptsystem nicht beeinflussen und gleichzeitig nur geringe Investitionskosten aufweisen.

Konkrete Empfehlungen für *Wartungsintervalle* für Fernwärmeleitungen und deren Zubehöerteile zu geben, ist anhand der jeweils vorliegenden Komplexität sehr schwierig. Grundlage bilden die Bedienungs- und Wartungsvorschriften der eingesetzten Bauteile und Anlagen. Darüber hinaus werden Empfehlungen von Verbänden, wie beispielsweise der AGFW gegeben.

Im allgemeinen bedürfen erdverlegte Fernwärmeleitungen keiner besonderen Wartung, soweit keine Einflußmöglichkeiten insbesondere von außen gegeben sind. Vorhandene Bauwerke sind regelmäßig, wenigstens einmal jährlich zu kontrollieren (AGFW 1997a). Hierbei spielen die Abdichtungen des Bauwerkes sowie alle Durchführungen eine wesentliche Rolle. Gleiches gilt für Armaturen – erdverlegt als auch in Bauwerken – bei denen sowohl die Spindeldurchführungen als auch die Gängigkeit ein- bis zweimal jährlich zu überprüfen sind. Hier kann beispielsweise austretendes Heizwasser das Mantelrohr zerstören. Damit die Spindelenden der Erdarmaturen unter einer Straßenkappe nicht im Oberflächenwasser stehen, ist für das Versickern des Wassers zu sorgen. Dabei stellt die Überprüfung auf Gängigkeit während des Netzbetriebes ein nicht einfaches Problem dar, da dafür die Wärmeversorgung aller dahinter befindlichen Abnehmer kurzzeitig unterbrochen werden muß. Aussagen zum Zustand und zur Dichtigkeit der Armatur anhand der Gängigkeit können in diesem Fall nicht gemacht werden.

Einen weiteren Schwachpunkt stellen schwarz ausgeführte, im Erdreich verlegte Entleerungen dar. Darunter sind beispielsweise solche Sonderlösungen zu verstehen, wo an dem vorliegenden Tiefpunkt keine andere Möglichkeit zum Entleeren über einen Zumschschacht gegeben ist. Durch die Medientemperatur halten aufgebrachte Schutzanstriche nicht, so daß durch die Feuchtigkeit Korrosionsangriffe gegeben sind.

Die Kontrolle von begehbaren Kanälen ist relativ unkompliziert. Wesentlich umfangreicher gestalten sich Kontrollen in nicht begehbaren Kanälen, soweit diese überhaupt möglich sind. Gleiches gilt für Bauwerke, wobei hier die eindringende Nässe den Angriffsschwerpunkt darstellt.

Weitere Hinweise zur Instandhaltung befinden sich im AGFW-Regelwerk derzeit in Bearbeitung (FW 436 und FW 437).

3 Wasserversorgungssysteme

3.1

Allgemeines und Besonderheiten

Wasser hat für den Menschen eine sehr große Bedeutung, denn ohne Wasser gibt es kein Leben. Die erforderliche Qualität des Wassers muß den Anforderungen der Volksgesundheit entsprechen und die vorgesehene Nutzung gewährleisten. In nüchterner Betrachtung sind die Wasservorräte nicht unerschöpflich, so daß es immer dringlicher wird, sie zu erhalten, sparsam damit umzugehen und wo immer möglich, zu vermehren. Diese hier eingangs erwähnten sowie noch weitere Grundsätze sind in der Europäischen Wasser-Charta des Europarates verankert. Auf die Präambel und die entsprechenden Erläuterungen dieser Grundsätze kann hier nur hingewiesen werden.

Auf den geschichtlichen Aspekt wird zugunsten entsprechender zur Verfügung stehender Literatur in diesem Rahmen verzichtet.

Die Versorgung mit hygienisch einwandfreiem Trink- und Brauchwasser in stets ausreichender Menge ist somit eine unerläßliche Voraussetzung für unser Dasein sowie für die demographische Entwicklung. Trinkwasser ist das wichtigste Lebensmittel, es kann nicht durch andere Stoffe ersetzt werden. In dem hier vorherrschenden mitteleuropäischen Klima muß ein Erwachsener etwa 2–3 Liter Wasser täglich zu sich nehmen, um leben zu können; in Summe sind dies in einem Menschenleben immerhin etwa 65.000 Liter.

Nach DIN 4046 ist Trinkwasser für menschlichen Genuß und Gebrauch geeignetes Wasser mit den nach DIN 2000 festgelegten Güteeigenschaften. Demgegenüber ist Betriebswasser ein gewerblichen, industriellen, landwirtschaftlichen und öffentlichen Zwecken dienendes Wasser mit unterschiedlichen Güteeigenschaften, sofern dafür keine Trinkwasserqualität verlangt wird.

Das ureigenste Ziel der Wasserversorgung besteht darin, Trinkwasser von einwandfreier Beschaffenheit jederzeit in ausreichender Menge und mit ausreichendem Druck an jeder Stelle des Versorgungsgebietes zu liefern. Nach der Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser ist das Wasserversorgungsunternehmen verpflichtet, das Wasser unter dem Druck zu liefern, der für eine einwandfreie Deckung des üblichen Bedarfes in dem entsprechenden Versorgungsgebiet erforderlich ist. Im weiteren ist auch Löschwasser im Rahmen der technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Möglichkeiten bereitzustellen.

Für den Fall einer unzureichenden Bedarfsdeckung besteht die Gefahr in der Verwendung von gesundheitlich nicht einwandfreiem Wasser sowie der ungenü-

genden Reinigung und kann Druckminderung bis zum Leerlaufen des Rohrnetzes mit Rücksaugefährdungen verursachen.

In Anlehnung an (Mutschmann et al. 1997) können allgemeingültige Zielstellungen für die Wasserversorgung formuliert werden. Diese lauten:

- Die Wasserversorgung soll so ausgebaut werden, daß die Deckung des gegenwärtigen und künftigen Bedarfes gesichert ist, unter Berücksichtigung eines sparsamen Umganges mit Trink- und Brauchwasser.
- Für die Trinkwasserversorgung soll vorrangig Grundwasser herangezogen werden.
- Bei der Nutzung der Grundwasservorkommen und bei Eingriffen, die Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit befürchten lassen, soll der öffentlichen Trinkwasserversorgung Vorrang eingeräumt werden.
- Ergiebige Grundwasservorkommen und andere Wasservorkommen, die sich für die Trinkwasserversorgung eignen, sollen durch geeignete Maßnahmen entsprechend geschützt werden.
- Örtliche Versorgungsanlagen sollen beibehalten bzw. angestrebt werden, soweit damit eine einwandfreie Wasserversorgung mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand gewährleistet werden kann. Dagegen ist der Verbund zwischen Gruppenanlagen anzustreben, wenn wasserwirtschaftliche oder betriebstechnische Gründe dies erfordern.
- Für großräumige Wassermangelgebiete und besondere Bedarfsschwerpunkte soll die Deckung des Wasserbedarfes, falls erforderlich, durch Erweiterung überregionaler Versorgungsanlagen sichergestellt werden.
- Es ist in jedem Fall zu prüfen, ob der gewerbliche Wasserbedarf – soweit keine Trinkwasserqualität gefordert ist – insbesondere in Wassermangelgebieten möglichst aus oberirdischen Gewässern und durch die betriebliche Mehrfachverwendung des Wassers gedeckt werden kann.

Der Umfang und die Aufgaben auf dem Gebiet der Wasserversorgung für die Wasserstatistik 1992 für die alten Bundesländer sind beispielhaft aus Tabelle 3.1-1 erkennbar. Die Gesamtlänge der Wasserverteilungsnetze in den alten und neuen Bundesländern mit Stand 1991 betrug wie folgt:

- alte Bundesländer: 313.200 km
- neue Bundesländer: 77.500 km
- Deutschland: 390.700 km

Tabelle 3.1-1 Stand der Wasserversorgung 1992 für die alten Bundesländer

Bezeichnung	ME	
versorgte Einwohner	$\times 10^3$	56.342
Zahl der Hausanschlüsse	$\times 10^3$	10.352
Rohrnetzlänge	[km]	317.785
versorgte Einwohner/Rohrnetzlänge	[E/km]	177
Hausanschlüsse/Rohrnetzlänge	[A/km]	32,6
Wasserabgabe an Verbraucher	$\times 10^6$ [m ³ /a]	3.878
Wasserabgabe/Rohrnetzlänge	[m ³ /m]	12,2

Wasserwirtschaft und Wasserversorgung sind wichtige Teilbereiche des Umweltschutzes. Jährlich entfallen hohe Summen der umweltwirksamen Maßnahmen auf Investitionen der Wasserwirtschaft, denn sauberes reines Wasser hat einen hohen Stellenwert.

Grundsätzlich ist die Wasserwirtschaft nach DIN 4049 die zielbewußte Ordnung aller menschlichen Einwirkungen auf das ober- und unterirdische Wasser. Dem Inhalt nach erfordert diese Ordnung

- das Erforschen der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse,
- das Erfassen der Wasservorkommen,
- den Schutz der Allgemeinheit vor dem Wasser,
- die Vorsorge, daß das Wasser in ausreichender Menge, in hinreichender Güte, am richtigen Ort und zur richtigen Zeit zur Verfügung steht sowie
- den Schutz des Wassers vor dem Menschen, das Reinhalten und Sanieren der ober- und unterirdischen Gewässer.

Allein gegeben durch die Wichtigkeit des Trinkwassers hat der Teilbereich Wasserversorgung vorrangige Bedeutung.

In den überwiegenden Fällen handelt es sich bei der Wasserversorgung der Allgemeinheit um eine öffentliche Wasserversorgung. Die einwandfreie Wasserversorgung wird im allgemeinen nur durch öffentliche, zentrale Anlagen erreicht. In etwa 80 % der Anschlüsse handelt es sich um derartige Anlagen, wobei diese Verbraucher Anschlußrecht, im allgemeinen auch Anschlußpflicht haben. Dagegen versorgt die Eigen- und Einzelwasserversorgung nur einen kleinen Verbraucherkreis aus einer eigenen Anlage.

Im folgenden wird unter einer öffentlichen zentralen Wasserversorgung eine Anlage verstanden, die von einem Wasserversorgungsunternehmen betrieben wird. Dies ist in der Tatsache begründet, daß die gestellten hohen Anforderungen nur von einem Wasserversorgungsunternehmen erfüllt werden können und das in einem entsprechenden wirtschaftlichen Rahmen. Ferner erfordern die Raumeinheit und die Gefährdung der Wasservorkommen durch Umwelteinflüsse aller Art die Verminderung der Vielzahl der kleineren Wassergewinnungsanlagen und die Beschränkung auf die Ausnützung der ergiebigen Wasservorkommen. Erfahrungsgemäß ist dieses Anliegen nur durch größere Wasserversorgungsunternehmen durchsetzbar. daher sollten diese kleiner Anlagen zu technisch, organisatorisch und wirtschaftlich leistungsfähigen Anlagen zusammengeschlossen werden. Für die überregionale Wasserversorgung gibt es je nach Größe und Struktur des zu versorgenden Gebietes folgende Möglichkeiten:

- Das Wasserversorgungsunternehmen eines Versorgungsgebietes baut und betreibt die Wasserversorgungsanlage, d. h. Hauptleitungsnetz und Ortsnetze, und liefert das Wasser bis zum Verbraucher.
- Das Wasserversorgungsunternehmen eines Versorgungsgebietes baut und betreibt das Hauptleitungsnetz und liefert das Wasser an die versorgenden Gemeinden bis zur Ortsgrenze; die Gemeinden betreiben ihre Ortsnetze selbst.
- Die Versorgung erfolgt wie zuvor, jedoch übernimmt das Wasserversorgungsunternehmen auf vertraglicher Basis die Betriebsleitung der gemeindlichen Wasserversorgungsanlagen.

Auf die Vor- und Nachteile dieser Formen der Gebietsversorgungen wird hier nicht weiter eingegangen.

Zunächst noch einige Ausführungen zur Thematik der Einzel- oder doppelten Wasserversorgungsnetze. Die öffentliche zentrale Wasserversorgung liefert das Wasser aus einer (einzigen) Wasserversorgungsanlage an Haushalt, Gewerbe und Industrie und auch als Löschwasser, unabhängig von den Qualitätsanforderungen an das Wasser. Begründet durch den ständig zunehmenden großen Wasserbedarf und der hohen Betriebskosten wird immer wieder diskutiert, die Versorgung aus 2 Wasserversorgungsnetzen zu realisieren – zum einen für Wasser mit gehobenen Anforderungen (Trinkwasserqualität), zum anderen für Wasser mit verminderten Anforderungen (Nicht-Trinkwasserqualität).

Neben den Gefahren einer Verwechslung beim Verbraucher, den erhöhten Kosten für das zweite Wasserversorgungsnetz, insbesondere bei bereits vollständig erschlossenen Gebieten, sowie den erhöhten Betriebskosten für die Wartung und Unterhaltung wurde diese Art der Versorgung verworfen. Die gesundheitliche Gefährdung der Bevölkerung war auch mit ein Grund, daß bestehende doppelte Rohrnetze in der öffentlichen Wasserversorgung aufgegeben wurden. Des weiteren würde der kostendeckende Wasserpreis für beide Wasserarten wegen der hohen Fixkosten erheblich ansteigen. Solche Ausführungen der doppelten Rohrnetze sind allenfalls im Gewerbe- und Industriebereich anzutreffen.

Zusammenfassend kann angemerkt werden, daß es ökologisch und ökonomisch wesentlich zweckmäßiger und sinnvoller ist, eine rationelle Wasserverwendung anzustreben.

Jede Verbindung einer öffentlichen Wasserversorgungsanlage mit Eigenanlagen ist nach DIN 1988 und der Trinkwasserverordnung unzulässig. Die Verantwortung des Wasserversorgungsunternehmens für Betrieb und Wasserbeschaffenheit schließt dies aus. Soweit eine Eigenanlage im Versorgungsgebiet zulässig ist, muß nach DIN 1988 eine atmosphärische Trennung (Luftspalt) der beiden Wasserversorgungsanlagen gewährleistet werden. Schieber oder Rückflußverhinderer werden als etwaiges Trennungsorgan nicht zugelassen.

Wird der Wasserbedarf im zu versorgendem Gebiet durch die Anlagen des Wasserversorgungsunternehmens nicht vollständig gedeckt, macht es sich erforderlich, Zusatzwasser über Fremdbezug zu beziehen. Neben den Problemen der Wasserbeschaffenheit des entstehenden Mischwassers müssen bei der Gestaltung des Anschlusses die Betriebssicherheit und die Abgrenzung der Verantwortung für die maßgeblichen Anlagenteile berücksichtigt werden. Dabei sind folgende Möglichkeiten gegeben:

- Die betrieblich günstigste Variante ist die Versorgung eines gesonderten Gebietes durch den Fremdwasserbezug.
- Die Vermischung des Fremdwassers mit dem Eigenwasser erfolgt in einem Behälter des Wasserversorgungsunternehmens, gegebenenfalls mit Aufbereitung eines oder beider Wässer oder des Mischwassers.
- Das Fremdwasser wird in das Netz des Wasserversorgungsunternehmens direkt eingeleitet, entweder bei Weiterbetrieb oder Einstellung der Versorgung mit Eigenwasser.

Im letzteren Fall kann sich die Abgrenzung der Verantwortung der Drücke im Rohrnetz und die Wasserbeschaffenheit sowie der Betrieb als schwierig erweisen. Deshalb sollte immer eine der beiden vorherigen Varianten gewählt werden.

Zunächst einige Definitionen zu verwendeten Begriffen. Grundlage dazu bildet die DIN 4046. Dabei beziehen sich hier die Definitionen Wasserabgabe, Wasserverbrauch und Wasserbedarf auf Trinkwasser, das von einem Wasserversorgungsunternehmen geliefert wird. Unter dem Begriff *Wasserbedarf* wird der Planungswert für die in einer bestimmten Zeitspanne unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse und möglichen Einflüsse voraussichtlich benötigten Wassermenge, die von einem Wasserversorgungsunternehmen zur ausreichenden künftigen Versorgung zu liefern ist, verstanden. Die für eine bestimmte Zeiteinheit nutzbare Wassermenge eines Wasservorkommens wird als *Wasserdargebot* bezeichnet. Dabei kann sich das Wasservorkommen aus Grund- oder/und Oberflächenwasservorkommen zusammensetzen. Bei der *Wasserbereitstellung* handelt es sich um die vorhandene größte Wassermenge je Zeit, die ein oder mehrere Wasserwerke eines Wasserversorgungsunternehmens unter Berücksichtigung der wasserrechtlichen Genehmigung tatsächlich aus dem nutzbaren Wasserdargebot zur Verfügung stellen kann. *Wasserwerke* selbst stellen dabei Betriebseinheiten für die Gewinnung, Aufbereitung, Förderung und Speicherung von Wasser dar. Das *Wasseraufkommen* entspricht mengenmäßig der Wasserabgabe eines Wasserversorgungsunternehmens und setzt sich zusammen aus Wassergewinnung und gegebenenfalls Wasserbezug von anderen Wasserversorgungsunternehmen. Die *Wasserabgabe* ist die wirklich vorhandene, gemessene oder geschätzte Wasserlieferung des Wasserversorgungsunternehmens. Diese setzt sich zusammen aus den Abgaben an die Verbraucher, auch als Letztverbraucher oder Endabnehmer bezeichnet, dem Eigenbedarf des Wasserversorgungsunternehmens, den Wasserverlusten und, falls erforderlich, aus der Wasserabgabe zur Weiterverteilung. Die *nutzbare Wasserabgabe* ist die gemessene Wasserlieferung an die Verbraucher, d. h. die Wasserabgabe abzüglich des Eigenbedarfes und der Wasserverluste unter Berücksichtigung von Volumendifferenzen in Wasserbehältern. Der *Eigenbedarf* umfaßt den betriebsinternen Wasserverbrauch innerhalb eines Wasserversorgungsunternehmens beispielsweise für Filter- oder Rohrnetzspülungen. Der *Wasserverlust* ist der Anteil der in das Rohrnetz eingespeisten Wassermenge, dessen Verbleib im einzelnen volumenmäßig nicht erfaßt werden kann. Dieser läßt sich unterteilen, zum einen in die tatsächlichen Verluste, welche z. B. verursacht werden durch Rohrbrüche oder Undichtigkeiten, zum anderen in die scheinbaren Verluste, welche beispielsweise Fehlanzeigen der Meßgeräte und unkontrollierte Entnahmen umfassen.

Die Wasserabgabe bzw. Wasserverbrauchswerte werden durch viele verschiedenartige Faktoren beeinflusst, wie

- dem vorherrschenden Klima,
- dem Wasserdargebot,
- den sonstigen Wasserbezugsquellen,
- der Wasserbeschaffenheit,
- dem Wasserpreis,
- der Kanalisation,
- der Kontrolle der Abnahme,

- der wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung,
- der Größe des Versorgungsgebietes,
- der Besiedlungsart sowie
- den Wasserverlusten.

Grundsätzlich läßt sich bemerken, daß diese Faktoren in ihrem Zusammenwirken mehr oder weniger Einfluß auf die Wasserabgabe haben. Dazu einige Anmerkungen. In bezug auf das vorherrschende Klima ist der mittlere Wasserverbrauch in Gebieten mit geringen Niederschlagshöhen und hohen Sommertemperaturen höher. Das Wasserversorgungsunternehmen zeichnet sich für die Deckung des Wasserbedarfes verantwortlich. Das Vorhandensein von Privatbrunnen, insbesondere für Gewerbe und Industrie, bedingt einen geringeren Gesamtverbrauch und führt somit zur Entlastung der Wasserversorgungsanlage. Ungünstige Wasserbeschaffenheit kann u. a. sparsamen Verbrauch zur Folge haben, insbesondere bei hoher Wasserhärte. Einen entscheidenden Einfluß auf den Wasserverbrauch hat der Wasserpreis; ein hoher Wasserpreis wirkt kostendämpfend. Auch das Fehlen einer Kanalisation bewirkt einen geringeren Wasserverbrauch. Das Fehlen einer Verbrauchskontrolle durch Wasserzähler bzw. die Wasserabgabe nach Pauschaltarif kann dagegen schnell zu unkontrollierter Wasserverschwendung führen. Besonders Einfluß auf die Wasserabgabe üben auch die wirtschaftlichen und sozialen Komponenten aus. Mit der Größe des Versorgungsgebietes und bei stärkerem Anteil an Gewerbe und Industrie nehmen die Verbrauchswerte zu. Gleiche Aussagen treffen u. a. auch zu bei entsprechendem Wohnkomfort, technischer Ausstattung der Wohnungen mit wasserverbrauchenden Geräten, verbesserten sozialen Verhältnissen, aufgelockerter Bebauung mit hohem Anteil an Grünflächen usw. Letztendlich sind für die Wasserabgabe auch die Wasserverluste von entscheidender Bedeutung. Hoher Wasserdruck im Rohrnetz, ungünstige Wasserbeschaffenheit, die wiederum häufige Netzspülungen erfordert, überalterte undichte Rohrnetze sowie nicht rechtzeitiges Beheben der Wasserverluste können die Wasserabgabe stark anheben.

Somit ist die gemessene Wasserabgabe des Wasserversorgungsunternehmens die Grundlage für die Betriebskontrolle sowie dessen Auslastung.

Bei der Wasserabgabe handelt es sich um keine einzelne feste Größe. Diese ist abhängig von dem gewählten Betrachtungszeitraum und schwankt entsprechend den örtlichen Verhältnissen. Der Betrachtungszeitraum kann sowohl über einen Zeitraum, m^3/a , m^3/d , l/s oder als Einheitswert je Verbraucher, beispielsweise in Liter je Einwohner und Tag, l/E d , gewählt werden.

Tabelle 3.1-2 Wasserabgabe an Verbraucher sowie Wasserverbrauch je Einwohner und Tag, Stand 1992

Versorgungsgebiete	Wasserabgabe an Verbraucher	Wasserverbrauch je Einwohner und Tag	
	$[\times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}]$	Verbraucher insgesamt $[\text{l/E d}]$	nur Haushalt und Kleingewerbe $[\text{l/E d}]$
alte Bundesländer mit Berlin-Ost	3.878	188	143
neue Bundesländer ohne Berlin-Ost	860	171	105

Für Jahresbilanzen wird die Größe Wasserabgabe pro Jahr herangezogen. Sie ist gleichzeitig maßgebend für die Leistung und Ausstattung. In der Tabelle 3.1-2 werden die Jahreswasserabgabe und der Wasserverbrauch je Einwohner und Tag (insgesamt und für Haushalt einschließlich Kleingewerbe) gegenübergestellt.

Nach Vergleich vorliegender Jahreswasserabgaben kann festgestellt werden, daß in Abhängigkeit von den klimatischen Verhältnissen, d. h. auch bei nassen oder trockenen Jahren, diese relativ gering ausfallen. Diese Verbrauchsschwankungen werden wesentlich geprägt von der Zu- und Abnahme der Verbraucher, von der Verringerung der Haushaltgröße, von der Ausstattung der Wohnungen mit wasserintensiven und wassersparenden Einrichtungen und Armaturen sowie von der Änderung des Verbraucherverhaltens.

Von großem Nutzen über das Verbraucherverhalten eines Jahres sind entsprechende Ganglinien, welche je nach vorhandener Datenbasis über Tageswerte oder sogar Stundenwerte erstellt werden können. Beispiele dazu sind in der Literatur, wie u. a. in (Böhme et al. 1996 u. Mutschmann et al. 1997) zu finden. Aus diesen Ganglinien sind die typischen Schwankungen erkennbar. Im Sommer tritt der Spitzenwert, im Winter der Minimalwert auf. Im Frühjahr (außer an Feiertagen, wie Ostern und Pfingsten) und im Herbst sind die Verbräuche mehr oder weniger ausgeglichen. Werden diese Werte aus der Ganglinie geordnet über die Tage aufgetragen, so entsteht daraus die Jahresdauerlinie. Ein entsprechendes Beispiel zeigt Abb. 3.1-1. Daraus ist erkennbar, daß nur an wenigen Tagen ein Spitzenverbrauch vorliegt. Da die Wasserversorgungsanlage auch diesen Spitzenverbrauch gewährleisten muß, ist es vorteilhaft, wenn durch Ausgleichsspeicherung diese Spitzen abgedeckt werden können. Ab etwa 250 Tagen sinkt der Verbrauch, gegeben durch die arbeitsfreien Tage, wie Samstage, Sonn- und Feiertage sowie Festtage, wobei dies keine Restriktion für andere Wasserversorgungssysteme darstellt.

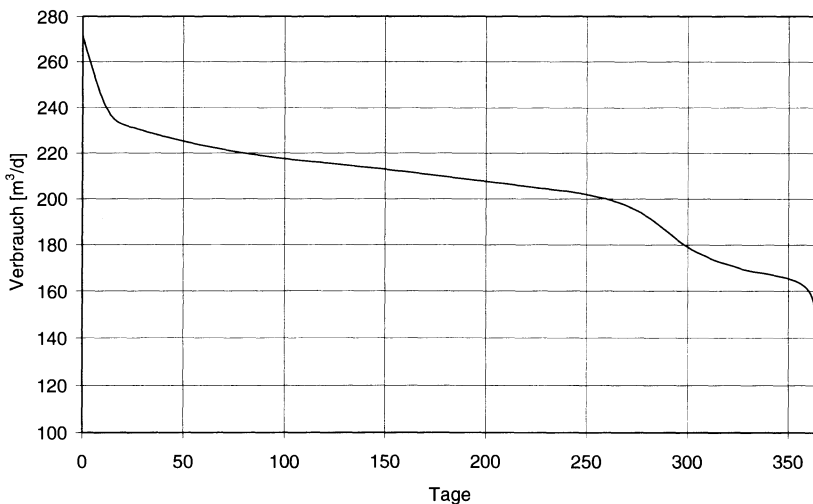


Abb. 3.1-1 Jahresdauerlinie

Der absolute Größtwert $Q_{d,max}$ tritt praktisch nur an einem Tag im Jahr auf. Dieser Größtwert muß nicht jedes Jahr erreicht werden. Er ist neben den bereits oben erwähnten Faktoren insbesondere auch von meteorologischen Einflußgrößen, wie Lufttemperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer abhängig. Deshalb wird ein sogenannter Normtag anhand dieser Einflußgrößen definiert und die auftretenden Größtwerte somit normiert. Mit dieser Definition stellt sich die Frage nach der Wahrscheinlichkeit seines Auftretens, die wesentlich von diesen Einflußgrößen bestimmt wird und folglich abgeschätzt werden müssen. Für die Auslegung der Wasserversorgungsanlage zählen aber neben dieser Restriktion vor allem auch wirtschaftliche Gesichtspunkte.

Weitere entsprechende Aussagen zum Größtwert werden u. a. in (Mutschmann et al. 1997) getroffen, wo in Abhängigkeit der Einwohneranzahl (400–2.000.000) mathematische Beziehungen für diesen Wert, basierend auf einer Auswertung der DVGW von 1976 und 1983, formuliert worden sind.

Die Wasserabgabe pro Monat ist als Größe für den Betrieb nicht von Bedeutung, wesentlich jedoch deren Schwankungen. Dies liegt darin begründet, daß die örtlichen klimatischen Verhältnisse von Winter und Sommer, niederschlagsreiche und niederschlagsarme Monate mehr oder weniger diese Schwankungen verursachen. Weiterhin sind diese Schwankungen abhängig von der Größe des Versorgungsgebietes. In Abb. 3.1-2 sind für einen Landort, eine Kleinstadt sowie eine Großstadt entsprechende Beispiele aufgezeigt, die diese Problematik nochmals verdeutlichen sollen. Hieraus ist erkennbar, daß sich mit zunehmender Besiedlungsgröße sich die Schwankungen über ein Jahr vergleichmäßigen. Dies kommt daher, daß in Großstädten der Anteil an Grünflächen geringer und der Anteil an Gewerbe und Industrie größer ist, als in Kleinstädten und Landorten.

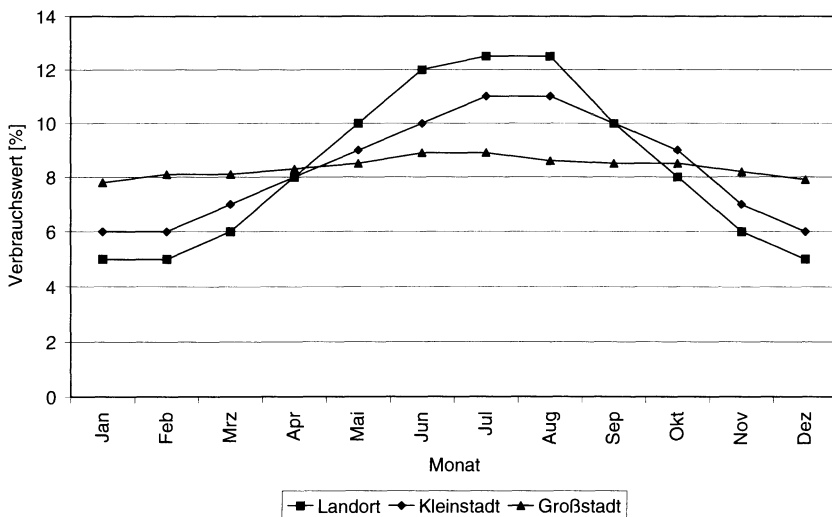


Abb. 3.1-2 Monatsmittelwerte bezogen auf den Jahresverbrauch für verschiedene Größen von Versorgungsgebieten

Dagegen ist die Wasserabgabe pro Tag, insbesondere der Größtwert, die Grundlage für die Bemessung der Wassergewinnung, der Aufbereitung, der Zuleitung zum Speicher und der Speicherung selbst. Für die Wasserbilanz bildet die mittlere Wasserabgabe pro Tag die Voraussetzung. Des weiteren wird diese Größe, wie bereits erläutert, für Gang- und Dauerlinien für die Jahresbetrachtung benötigt. Die tägliche Wasserabgabe schwankt in unterschiedlichen Grenzen, der Größtwert stärker als der Kleinstwert. Weitere entsprechende Aussagen dazu werden u. a. in (Mutschmann et al. 1997) gemacht, wo in Abhängigkeit der Einwohneranzahl (400–2.000.000) mathematische Beziehungen für die tägliche Wasserabgabe, basiert auf einer Auswertung der DVGW von 1976 und 1983, formuliert worden sind.

Wird die tägliche Wasserabgabe hinsichtlich der Schwankungsbreite in der Woche betrachtet, so schwankt diese bei gleichbleibenden Verhältnissen in Abhängigkeit der Struktur des Versorgungsgebietes. Dies wird verursacht vor allem durch den Rückgang des Verbrauchs am Wochenende infolge Arbeitsruhe des Gewerbes und der Industrie. Nach (Mutschmann et al. 1997) wird im allgemeinen folgender Verlauf in den Städten festgestellt, bezogen auf den höchsten Spitzenwert am Dienstag:

- Arbeitstage mit hohem Verbrauch, besonders hoch am Dienstag mit etwa 1,0,
- Arbeitstage mit normalem Verbrauch, Montag mit etwa 0,98; Mittwoch mit etwa 0,99; Donnerstag und Freitag mit etwa 0,95,
- Samstag, geringerer Verbrauch mit etwa 0,90,
- Sonn- und Feiertage, wesentlich geringerer Verbrauch mit etwa 0,80,
- besondere Festtage, wie Ostern, Pfingsten und Weihnachten erheblich geringerer Verbrauch mit etwa 0,75.

Die Unterschiede sind wiederum um so größer, je größer das Versorgungsgebiet sowie der Anteil an Gewerbe und Industrie ist. Diese Schwankungsbreiten können genutzt werden, um die Spitzenverbräuche an bestimmten Tagen entsprechend durch Speicheranlagen auszugleichen.

Der Größtwert der Wasserabgabe pro Stunde am Tag des Spitzenverbrauches ist maßgebend für die Bemessung der Anlagenteile, für die kein Ausgleich der stündlichen Verbrauchsschwankungen am Spitzentag durch Speicherung möglich ist. Der Löschwasserbedarf ist dabei gesondert zu berücksichtigen. Dagegen wird die mittlere Wasserabgabe am Tag des Spitzenverbrauches für die Anlagenteile benötigt, für die ein entsprechender Ausgleich durch Speicherung möglich ist.

Die Wasserabgabe pro Stunde schwankt während des Tages erheblich. Auf diese Schwankungen wirken vor allem die Größe des Versorgungsgebietes, der Anteil der Haushaltsabgabe sowie die meteorologischen Einflußfaktoren. Für einen Arbeitstag in Abhängigkeit der Größe des Versorgungsgebietes sind in Abb. 3.1-3 entsprechende Beispiele aufgezeigt. Der Verlauf der Schwankungen an Samstagen und Sonntagen ist ähnlich, jedoch ist die Schwankungsbreite nicht so groß, der Anstieg am Morgen (5–7 Uhr) flacher, ebenso der Abfall am Abend (20–23 Uhr).

Diese Ganglinien bilden den Ausgangspunkt für die Bestimmung des fluktuierenden Wasservolumens, d. h. des erforderlichen Speichervolumens zum Ausgleich der Schwankungen. Während der maximale Stundenwert für die Dimensio-

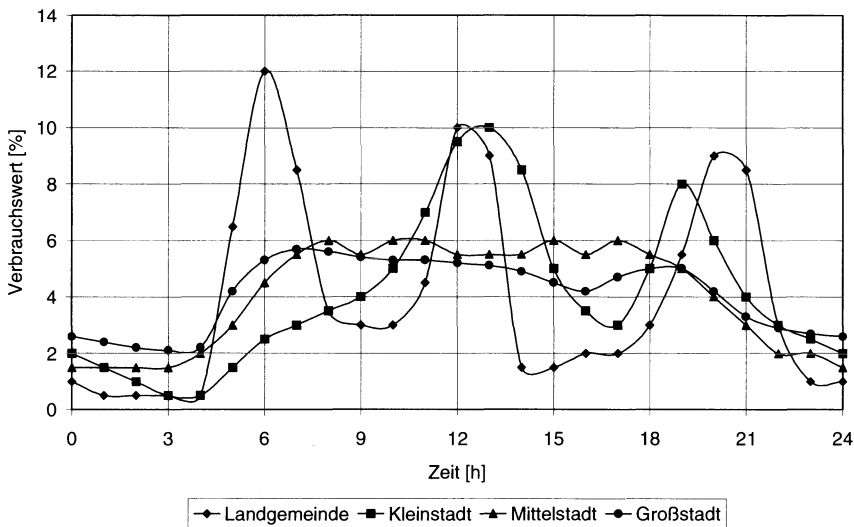


Abb. 3.1-3 Verlauf der stündlichen Wasserabgabe anteilig bezogen auf den Tageswert an einem Arbeitstag für verschiedene Größen von Versorgungsgebieten

nierung benötigt wird, ist der Kleinstwert wichtig bei der Lecksuche. Dieser Kleinstwert tritt im allgemeinen nachts zwischen 1–4 Uhr auf und ist an verbrauchsschwachen Tagen in ländlichen Versorgungsgebieten wesentlich kleiner als in städtischen. Der Minimumfaktor kann in Abhängigkeit der Größe des Versorgungsgebietes somit betragen für

- eine Landgemeinde mit etwa 0,05–0,06,
- eine Kleinstadt mit etwa 0,06–0,08,
- eine Mittelstadt mit etwa 0,25 sowie
- eine Großstadt mit etwa 0,38.

Ziel eines Wasserversorgungsunternehmens muß es also sein, unabhängig von der Spannweite zwischen dem Kleinstwert und dem Größtwert eine Versorgung ohne Minderung der Wasserqualität zu gewährleisten. Diese Spannweite kann bei Landgemeinden bis zu 1:150 und in Großstädten bis zu 1:7 betragen.

Abschließend noch einige Anmerkungen zu kurzzeitigen Wasserabgaben. Diese bezeichnen den Spitzendurchfluß für Bezugszeiträume von einer Stunde und weniger und werden herangezogen für die Bemessung von Versorgungsleitungen kleiner Gebiete, von Druckerhöhungsstationen, von Wasserzählern sowie von Hausanschlußleitungen. Hier sei auf die entsprechenden Abschnitte verwiesen.

In diesem Kapitel werden der Ausbau und die Struktur der Komponenten eines Wasserversorgungssystems beschrieben. Darauf aufbauend erfolgen grundlegende Ausführungen zur Planung und Auslegung sowie zum Bau und zur Verlegung eines Wasserversorgungssystems. Der Abschnitt Betrieb und Instandhaltung wird vor allem unter dem Gesichtspunkt der Versorgungszuverlässigkeit aus betrachtet.

3.2 Aufbau und Struktur

3.2.1 Unterteilung

Das Wasserversorgungssystem kann in verschiedene Anlagen unterteilt werden, wobei die Größe des Versorgungsgebietes, die mögliche Versorgungsvariante sowie die Struktur des Wasserversorgungsunternehmens einen entscheidenden Einfluß auf die Gestaltung ausüben. Im einzelnen zählen zu den Hauptgruppen:

- *Wassergewinnung* mit Quelfassung durch Schicht- oder Stauquelle; Grundwasserfassung durch Schacht-, Bohr-, Horizontalfilterbrunnen sowie Sickerleitungen; Oberflächenfassungen durch Trinkwassertalsperre, Seewasser- oder Flußwasserentnahme.
- *Wasseraufbereitung* mit den Verfahren der Oxidation, Ozonung, Filterung, Flockung, Klärung, Entsäuerung, Enteisung, Entmanganung, Arsenentfernung, Enthärtung, Entsalzung, Desinfektion.
- *Wasserförderung* mit Pumpen, Antriebsmaschinen mit Energiezuführung und Fernwirkanlagen.
- *Wasserspeicherung* mit Wasserturm, Hoch-, Tief-, Saug-, Druck- und Löschwasserbehälter sowie Trinkwassertalsperre.
- *Wasserverteilung* mit öffentlichen Anlagen durch Zubringerleitung, Fernleitung, Rohrnetz mit Hauptleitung, Versorgungsleitung; nichtöffentliche Anlagen durch Anschluß- und Verbrauchsleitung.

Dabei ist anzumerken, daß das Hauptaugenmerk auf die Wasserverteilung gerichtet ist, allein gegeben durch den weitaus größten Kostenanteil in der Wasserversorgung. Um einen Vergleich mit den Anlagen von Fernwärmesystemen zu gewährleisten, wird das Wasserversorgungssystem unterteilt in:

- Wassergewinnung,
- Wasseraufbereitung,
- Wasserspeicherung,
- Druckerhöhungs- und Druckminderstationen,
- Rohrleitungssysteme,
- Armaturen,
- Bauwerke und Schächte,
- Hausanschlüsse sowie
- Meßtechnik.

Im folgenden werden diese Begriffe näher erläutert bzw. auf entsprechende Literatur verwiesen.

3.2.2

Wassergewinnung

Bei der Herkunft des für die öffentliche Wasserversorgung gewonnenen Wassers sind in den europäischen Ländern auffallende Unterschiede festzustellen, die für 1991 in Abb. 3.2-1 aufgetragen sind.

In Auswertung dieser Darstellung sind grundsätzlich die geologischen, hydrologischen und klimatischen Voraussetzungen dafür ausschlaggebend, zu welchen Anteilen Grund- und Quellwasser oder nur Oberflächenwasser aus Talsperren, Seen und Flüssen sowie uferfiltriertes bzw. angereichertes Grundwasser herangezogen werden kann. In den Ländern Norwegen, Schweden und Finnland, wo im Untergrund aus kristallinem Urgestein kaum nutzbares Grundwasser zur Verfügung steht, ist somit die Wasserversorgung hauptsächlich von den Oberflächengewässern abhängig. Traditionell überwiegt auch in Großbritannien die Gewinnung aus Oberflächenwasser. Spanien ist aufgrund seines Mittelmeerraumklimas ebenfalls stark auf Oberflächenwasser angewiesen, das dort in etwa 500 Talsperren gesammelt und über weitläufige Ausgleichssysteme in die Verbrauchszentren transportiert werden muß. Solche Länder, wie Deutschland, Frankreich und Belgien mit großer landwirtschaftlicher und geologischer Vielfalt, bevorzugen zwar die Grundwassernutzung, müssen aber dennoch regional auf Oberflächengewässer zurückgreifen. Gegeben durch die nur wenig ausgeprägte oberirdische Gewässer Ausbildung, versorgt sich Dänemark fast ausschließlich mit Grundwasser. Die gebirgigen Länder dagegen, wie Österreich, Schweiz und Italien können ihre Wasserversorgung im überwiegenden Teil aus Grundwasservorräten und Quellwässern sicherstellen.

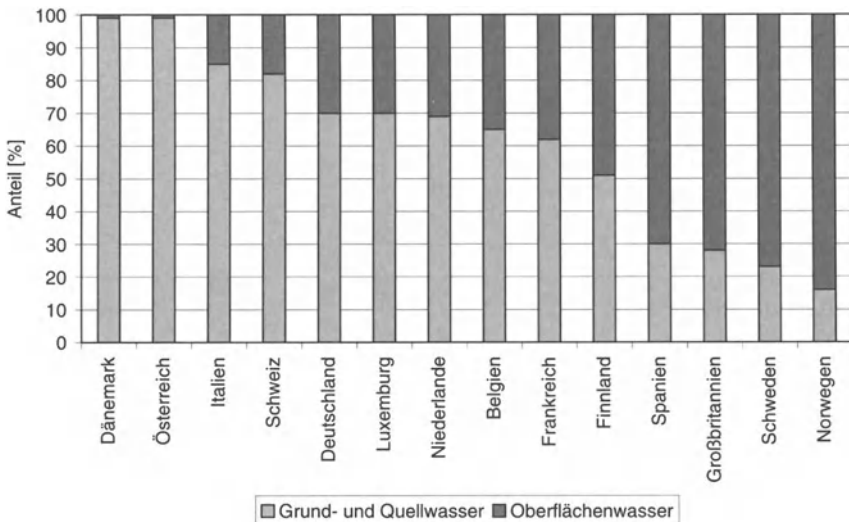


Abb. 3.2-1 Art der Wassergewinnung 1991 für verschiedene Länder

Das in Deutschland nutzbare Wasserdargebot aus Flüssen, Seen und Grundwasser liegt durchschnittlich jährlich bei etwa 187 Mrd.m³. Für die öffentliche Wasserversorgung wurden 1991 etwa 6,4 Mrd.m³ beansprucht, was 3,4 % von dem jährlich zur Verfügung stehenden Wasserdargebot entspricht. Die Gesamtförderung erfolgte durch etwa 1100 in der BGW-Statistik¹ erfaßten Wasserversorgungsunternehmen sowie etwa 5000 kleinen, nicht erfaßten Wasserversorgungsunternehmen.

Der Wasserbedarf wird in Deutschland zu 63 % aus echtem Grundwasser, zu 7 % aus Quellwasser sowie zu 30 % aus Oberflächenwasser gedeckt. Die hauptsächlichsten Arten der Wasserfassungen für Wasserversorgungsanlagen wurden bereits eingangs erwähnt. Maßgebend für die Wahl der Wassergewinnungsstelle und Art der Wasserfassung sind verschiedenartigste Faktoren. Dazu zählen im einzelnen

- der Wasserbedarf,
- die hydrologischen Verhältnisse,
- die Wasserbilanz,
- die Wasserbeschaffenheit,
- die Möglichkeit des Einrichtens wirksamer Schutzgebiete,
- die Erwerbsmöglichkeit von Grundstücken,
- die Einordnung in die wasserwirtschaftlichen Planungskonzepte sowie
- die Wirtschaftlichkeit der Erschließung und Beileitung.

Grundsätzlich ist bei der Wahl der Wassergewinnung diejenige vorzuziehen, welche die beste Wasserbeschaffenheit und den besten Schutz bietet. Wie bereits in Abschn. 3.1 erwähnt, sind für die Wassergewinnungsanlage die Spitzenverbrauchswerte ausschlaggebend. Ist eine Speicherung zum Ausgleich der täglichen Verbrauchsschwankungen vorhanden, so ist nur der Wert des größten Tagesbedarf

Tabelle 3.2-1 Wassergewinnungsanlagen für Rohwasser verschiedener Wasserwerke

Leistung [m ³ /Tag]	Anlagenteile
150.000	67 Vertikalbrunnen, 50–170 m tief, Pumpenleistungen: 50–250 m ³ /h
30.000	14 Vertikalbrunnen, 34–93 m tief, Pumpenleistungen: 80–250 m ³ /h
60.000	30 Vertikalbrunnen, 33–38 m tief, Pumpenleistungen: 90–200 m ³ /h
80.000	52 Vertikalbrunnen, 30–100 m tief, Pumpenleistungen: 50–120 m ³ /h
250.000	130 Vertikalbrunnen, 30–62 m tief, Pumpenleistungen: 80–200 m ³ /h, 1 Horizontalfilterbrunnen, 16 m tief, Pumpenleistungen: 400 m ³ /h
160.000	44 Vertikalbrunnen, 35–52 m tief, Pumpenleistungen: 100–250 m ³ /h, 1 Horizontal- filterbrunnen
200.000	260 Vertikalbrunnen, 30–40 m tief, Pumpenleistungen: 40–200 m ³ /h
20.000	36 Vertikalbrunnen, 30–40 m tief, Pumpenleistungen: 50–75 m ³ /h
35.000	144 Vertikalbrunnen, 40–45 m tief, davon 126 Heberleitungsbrunnen und 18 mit Pumpen, Pumpenleistungen: 50 m ³ /h
30.000	16 Vertikalbrunnen, 45 und 60 m tief, Pumpenleistungen: 120 m ³ /h
120.000	141 Vertikalbrunnen, 30–190 m tief, Pumpenleistungen: 40–60 m ³ /h

¹ BGW–Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V.

fes notwendig, dagegen wird bei Nichtvorhandensein einer Speicherung der Wert des größten Stundenbedarfes benötigt. Ebenso sind auf Hinblick einer späteren Erweiterung der Wassergewinnungsanlage ausreichende Reserven mit vorzusehen. Ziel eines jeden Wasserversorgungsunternehmens ist die Bereitstellung von hygienisch einwandfreiem Trinkwasser in entsprechender Quantität.

In der Tabelle 3.2-1 sind beispielhaft Wassergewinnungsanlagen für Rohwasser verschiedener Wasserwerke zusammengestellt.

Da der Schwerpunkt dieses Kapitels auf die Wasserverteilung ausgerichtet ist, wird auf eine Abhandlung dieser sehr umfassenden Thematik zu Gunsten verfügbarer Literatur, wie u. a. (Schneider 1988; DIN TB 12 1995; DVGW 1996; Mutschmann et al. 1997; Castell-Exner et al. 1998) verzichtet. Ein weiterer Grund ist der, daß diese Anlagen gegenüber der Wasserverteilung, durch ihre in den überwiegenden Fällen vorhandenen Redundanz, keine bzw. kaum entscheidende Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit des Wasserversorgungssystems haben.

3.2.3

Wasseraufbereitung

Da die geforderte Trinkwasserqualität bei der Erschließung neuer Wasservorkommen nicht gewährleistet wird, muß das Wasser aufbereitet werden. Wasser, das als Trinkwasser verwendet werden soll, muß bestimmten hygienischen Anforderungen entsprechen. Dies wiederum bedeutet, daß das Wasser die vorgegebenen Werte hinsichtlich der mikrobiologischen, physikalisch-chemischen und organoleptischen Beschaffenheit erfüllen muß. Diese Werte sind grundsätzlich als Grenz- und Richtwerte für Einzelstoffe sowie als Summen- und Gruppenparameter festgelegt. Die Begriffe dazu sind in der DIN 4046 definiert.

Bakterien sind fast in jedem Wasser vorhanden, in besonders großer Anzahl in Oberflächenwässern. Mit Hilfe der mikrobiologischen Parameter werden durch Kulturen auf oder in bestimmten Nährböden die Zahl von Mikroorganismen nachgewiesen. Unter den organoleptischen Parametern werden die mit den Sinnesorganen wahrnehmbaren Eigenschaften des Wassers verstanden, die qualitativ und auch quantitativ bestimmbar sind. Dazu zählen beispielsweise Geruch, Geschmack, Färbung und Trübung. In der Trinkwasserverordnung werden diese auch als sensorische Kenngrößen bezeichnet. Die Summenparameter umfassen Parameter, die mehrere Stoffe in gleicher Weise kennzeichnen, wie beispielsweise die elektrische Leitfähigkeit oder der chemische Sauerstoffbedarf. Dagegen umfassen Gruppenparameter die Parameter, die den Teil eines Stoffes kennzeichnen, der auch in anderen Stoffen gemeinsam ist, wie beispielsweise organisch gebundener Chlor oder Kohlenwasserstoffe.

Die einzuhaltenden Werte für Trinkwasser sind in der DIN 2000 sowie in der Trinkwasserverordnung enthalten.

Das zu wählende Aufbereitungsverfahren richtet sich vor allem nach der vorhandenen Rohwasserqualität. Die einzelnen Aufbereitungsverfahren lassen sich entsprechend der Unterteilung der Wassergüte wie folgt gliedern:

- Die physikalische Aufbereitung umfaßt die Verfahren, die der Entfernung der ungelösten Stoffe dienen.

- Die chemische Aufbereitung umfaßt die Verfahren, die der Entfernung der echt und kolloidal² gelösten Stoffe dienen.
- Die biologische und bakteriologische Aufbereitung dient der Entfernung biologischer Verunreinigungen und der Entkeimung.

Die physikalische und chemische Aufbereitung tritt meist in kombinierter Form auf, da nur in dieser Form die schwierig zu behandelnden Wässer gereinigt werden können. Im folgenden werden die einzelnen Aufbereitungsverfahren und einige wichtige Elemente der Wasseraufbereitung in Form eines Überblicks kurz erörtert.

Sieben. Ein Vorgang, bei dem Schweb- und Schwimmstoffe, die normalerweise größer als die Öffnungen der Siebvorrichtungen sind, aus dem Wasser entfernt werden. Das Zurückhalten dieser Stoffe erfolgt dabei durch Rechen, Siebe und Filter. Je nach Feinheit des Durchtrittsquerschnittes lassen sich Schwebestoffe bis etwa 20 µm entfernen.

Absetzen bzw. Klärung. Ein Vorgang, bei dem die Schleppkraft des Wassers vermindert wird und sich die Schwebestoffe des Wassers infolge ihrer Masse absetzen können. Neben der Einwirkung der Schwerkraft kommt auch die der Zentrifugalkraft zum Einsatz. Es handelt sich um die Entschlammung und Entsandung des Wassers in Absetzanlagen.

Filtration. Ein Vorgang, bei dem in erster Linie Schwebestoffe durch Absieben, Absetzen und Oberflächenkräfte am Filtermaterial angesammelt werden. Filter können in geschlossener (Druckfilter) oder offener Bauweise konzipiert werden. Druckfilter werden in hydraulisch geschlossenen Drucksystemen mit entsprechend höherem Druckverlust eingebaut. Ihre Filterlaufzeit zwischen 2 Spülungen wird eher über das Mitreißen der zu filtrierenden Feststoffe als über den Druckverlust begrenzt. Offene Filter werden dagegen im freien Gefälle durchflossen. Die Filtergeschwindigkeit richtet sich in erster Linie nach der gewählten Körnung des Filtermaterials sowie nach der Art der abzufiltrierenden Stoffe. Dabei wird unterschieden in Schnellfiltration mit fest eingebauten Rückspülsystemen und in Langsamfiltration, wo mit Hilfe zusätzlicher Technik die Reinigung erfolgt. Es sind aber auch biologische und chemische Vorgänge, wie z. B. bei der Entmanganung und Entsäuerung, möglich.

Fällung. Ein chemischer Vorgang, bei dem gelöste Stoffe in unlöslicher Form ausgefällt werden. Dies erfolgt anschließend auf dem Wege der Schwerkraftabscheidung mit nachgeschalteter Filtration. Dazu gehört die Ausfällung von Eisen und Mangan durch Oxidation oder Kalkzugabe und die Enthärtung des Wassers durch Kalk und Soda. Bei dem heutigen Stand der Technik wird die Wasserenthärtung in der Hauptsache mit Ionenaustauschern durchgeführt. Fällung und Flockung laufen in der Wasseraufbereitung häufig zusammen ab.

Flockung. Ein vorwiegend chemischer Vorgang, bei dem flockenbildende Chemikalien dem Wasser zugegeben werden. Die sogenannten Flockungsmittel

² *Kolloidale* Verunreinigungen sind mit dem Auge nicht erkennbar. Die Teilchengröße liegt bei 10^{-4} – 10^{-7} cm, wobei zu beachten ist, daß die verschiedenen Stoffsysteme nicht klar voneinander getrennt sind, sondern ineinander übergehen. Aus diesen Gründen sind kolloiddisperse Stoffe nicht oder nur unvollkommen in den üblichen Filtern abscheidbar. *Disperse* Stoffe sind Verunreinigungen in der Größenordnung größer 1 µm und somit mit dem Auge wahrnehmbar.

sind löslich und reagieren mit bestimmten Inhaltsstoffen des Wassers, so daß unlösliche Flocken entstehen. Dadurch werden absetzbare, nicht absetzbare und kolloidale Verunreinigungen adsorbiert und durch Flockenvergrößerung zum Absetzen gebracht. Die Entfernung dieser erfolgt durch Schwerkraft oder Filtration. Die bekanntesten Flockungsmittel sind Salze des Aluminiums und Eisens. Diese Salze bilden in Reaktion mit Carbonathärte Flocken von Aluminiumhydroxid oder Eisenhydroxid. Ursache hierfür ist die Tatsache, daß die gebildeten Eisen- und Aluminiumhydroxidniederschläge positive Oberflächenladungen haben, während die meisten im natürlichen Wasser vorkommenden Kolloidpartikel wie Ton, Farbstoffe, Kieselsäure, Huminsäuren und andere negative Oberflächenladungen tragen.

Gasaustausch. Ein Vorgang, bei dem Gase aus dem Wasser entnommen (Desorption) oder in das Wasser zugegeben werden (Absorption). Dazu gehören Verdünnungen, Kaskaden und andere Einrichtungen zur Entfernung von Kohlensäure, Schwefelwasserstoff und anderer flüchtiger Gase sowie zur Sauerstoffanreicherung.

Adsorption. Ein Vorgang, bei dem kolloiddisperse aber auch gelöste organische Stoffe aus dem Wasser entfernt werden. Dabei werden die Stoffe an den Oberflächen fester Körper angereichert. Ursache sind die nach außen hin freien Bindekräfte der Oberflächenatome, die natürlich nur dann spürbar wirksam werden, wenn die Oberfläche des festen Stoffes groß gegenüber seinem Volumen ist. Ein Stoff dieser Art wird mit Adsorptionsmittel oder Adsorbens bezeichnet, während der adsorbierte Stoff auch Adsorptiv genannt wird. Grundsätzlich gilt die Aussage, daß die Adsorptionsgeschwindigkeit um so größer ist, je kleiner die Korngröße des Adsorptionsmittels und je kleiner die Moleküle des Adsorptivs sind. Zu den Adsorptionsmitteln gehören z. B. Koks, Aktivkohle oder makroporöse Ionenaustauscherharze.

Desinfektion bzw. Entkeimung. Ein Vorgang, bei dem besonders schädliche und unschädliche Keime im Wasser abgetötet werden. Dabei werden im wesentlichen Stoffe mit starkem Oxidationsvermögen, wie Chlor und seine Verbindungen sowie Ozon eingesetzt. Chlor tötet nicht nur im Wasser enthaltene Keime ab, sondern es oxydiert auch organische Verbindungen, die im Wasser gelöst oder suspendiert sind. Ozon ist noch stärker in seinem Oxidationsvermögen gegenüber Chlor. Auch die virucide Wirkung liegt höher. Des weiteren hat Ozon die Vorteile, keine Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigungen im Wasser hervorzurufen, flockend auf bestimmte Inhaltsstoffe des Wassers zu wirken sowie als Zerfallsprodukt nur Sauerstoff und Wasser zu bilden. Ein Nachteil der Ozonbehandlung ist die Tatsache, daß es in Wasser allmählich zerfällt. Dies gilt insbesondere bei ausgedehnten Versorgungsgebieten mit entsprechender Wasserverteilung. Infolgedessen bietet sich in solchen Fällen eine Nachbehandlung mit Chlor an, wobei dann erheblich geringere Zusätze als bei ihrer alleinigen Anwendung erforderlich sind.

Entsäuerung. Hierbei handelt es sich um Verfahren zur Entfernung von Kohlensäure. Kohlendioxid zählt zu den am häufigsten im Wasser auftretenden gasförmigen Inhaltsstoffen. Es wird im Wasser nicht nur physikalisch gelöst, sondern auch chemisch gebunden. Bei der chemischen Bindung entsteht Kohlensäure, die

jedoch relativ unbeständig ist. Die Entsäuerung, d. h. Neutralisation der freien überschüssigen Kohlensäure des Wasser bis zum Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, kann durch Zugabe einer Lauge wie Natronlauge oder Kalkwasser erzielt werden.

Enteisenung. Diese Verfahren dienen der Entfernung von Eisenverbindungen. Eisen ist in fast allen natürlichen Wässern in Form gelöster Salze bzw. als kolloidale Eisenverbindung enthalten. Die Ausscheidung beruht auf der Oxydation der Eisenverbindungen im Wasser und anschließender Abtrennung durch Filtration. Je nach Art der Eisenverbindungen können verschiedene Verfahren zur Anwendung kommen, entweder durch Luftsauerstoff in offenen Rieselbehältern bzw. geschlossenen Behältern mit Luftzuführung oder durch Zusatz von Oxidationsmitteln unter gleichzeitiger Anwendung von Flockungsmitteln.

Entmanganung. Mit Hilfe dieser Verfahren wird das neben Eisen im Wasser auch häufig befindliche Mangan entfernt. Da das Eisen meist zusammen mit dem Mangan im reduzierten Wasser vorkommt, spielen die Geschwindigkeit und die Oxidationsfolge beider Elemente eine entscheidende Rolle. Die Oxidation von Mangan wird erst dann wirksam, wenn die des Eisens abgeschlossen ist. Je nach Art der Manganverbindungen kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz, wie beispielsweise die Oxidation mit Luft oder die Filtrierung über Brauneisfilter ohne Belüftung. Geringe Manganmengen werden gleichzeitig mit der Enteisenung entfernt.

enthärtung. Hierbei handelt es sich um Verfahren zur Entfernung der Kalzium- und Magnesiumionen aus dem Wasser mit Hilfe von Kationenaustauscher.

Entsalzung. Umfaßt die Verfahrenskombination des Kationenaustausches und des Anionenaustausches zur Entfernung der Kalzium- und Magnesiumionen aus dem Wasser. Dabei wird unterschieden in Teil- und Vollentsalzung.

Letztendlich kann das Wasser einer chemische Stabilisierung unterzogen werden. Es handelt sich dabei um eine Vielzahl von Vorgängen, bei denen durch Zugabe von Chemikalien lästige Geruchsstoffe des Wassers in harmlose Substanzen überführt werden, ohne sie aus dem Wasser zu entfernen.

Wie bereits eingangs erwähnt, ist die Anwendung der verschiedenen Verfahren zur Wasseraufbereitung abhängig von dem eingesetzten Rohwasser, d. h. handelt es sich um ein Grund-, Quell- oder Oberflächenwasser. In der Tabelle 3.2-2 sind beispielhaft Wasseraufbereitungsanlagen für Rohwasser verschiedener Wasserwerke zusammengestellt.

Da der Schwerpunkt dieses Kapitels auf die Wasserverteilung ausgerichtet ist, wird auf eine Abhandlung dieser sehr umfassenden Thematik zugunsten verfügbarer Literatur, wie u. a. (Obst et al. 1990; Ahlers et al. 1993; DIN TB 12 1995; WABAG 1996; Mutschmann et al. 1997; Jekel et al. 1998) verzichtet. Ein weiterer Grund ist der, daß diese Anlagen gegenüber der Wasserverteilung keine bzw. kaum entscheidende Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit des Wasserversorgungssystems haben.

Tabelle 3.2-2 Wasseraufbereitungsanlagen für Rohwasser verschiedener Wasserwerke

Leistung [m ³ /Tag]	Anlagenteile
150.000	Steilrohrdüsen zur Belüftung, 8 Mehrschichtfilter (Filtergeschwindigkeit: 8,5 m/h), 12 Einschichtfilter (Filtergeschwindigkeit: 5,8 m/h), Gesamtfilterfläche: 1.200 m ²
30.000	2 rechteckige Belüftungskammern mit 200 Düsen zur Belüftung, Filterhalle mit 4 offenen Doppelfiltern (Filtergeschwindigkeit: 6,0 m/h), Gesamtfilterfläche: 276 m ²
60.000	2 Verdüsungstürme (Durchmesser: 14 m) zur Belüftung, Filterhalle mit 10 offenen Doppelfiltern (Filtergeschwindigkeit: 7,5 m/h), Gesamtfilterfläche: 840 m ²
80.000	2 rechteckige Belüftungskammern mit Flachstrahldüsen zur Belüftung, Filterhalle mit 8 offenen Doppelfiltern (Filtergeschwindigkeit: 6,0 m/h), Gesamtfilterfläche: 672 m ²
250.000	3 Verdüsungstürme (Durchmesser: 17 m) zur Belüftung, Schnellfilteranlage mit 30 offenen Doppelfiltern (Filtergeschwindigkeit: 6,0 m/h), Gesamtfilterfläche: 2.610 m ²
160.000	2 rechteckige Belüftungskammern mit 400 Düsen zur Belüftung, Filterhalle mit 10 offenen Doppelfiltern (Filtergeschwindigkeit: 5,5–13,6 m/h), Gesamtfilterfläche: 700 m ²
200.000	2 Belüftungsbauwerke mit Wehrüberfall, 2 Filterhallen mit zusammen 37 offenen Schnellfiltern (Filtergeschwindigkeit: 6,5 m/h), Gesamtfilterfläche: 2.368 m ²
20.000	Belüftung erfolgt durch Fallrohre und über Rohrgitterkaskade, Filterhalle mit 21 offenen Schnellfiltern (Filtergeschwindigkeit: 2,0 m/h), Gesamtfilterfläche: 1.260 m ²
35.000	Belüftung erfolgt durch Fallrohre und offene Grobfilter (385 m ²), 54 geschlossene Bollmannfilter (337 m ²), 8 Manganfilterkammern (800 m ²)
30.000	Belüftung erfolgt über 6 Oxidatoren (Durchmesser: 0,8 m), 24 geschlossene, zweistufige Schnellfilter (Filtergeschwindigkeit: 3,0–10,0 m/h), Gesamtfilterfläche: 72 m ²
120.000	Belüftungsbauwerk mit Wehrüberfall, Filterhalle mit 8 offenen Mehrschichtfiltern (Filtergeschwindigkeit: 8,0 m/h), Gesamtfilterfläche: 600 m ²

3.2.4**Wasserspeicherung**

Die eigentliche Wasserverteilung beginnt beim Wasserwerk und endet am Hausanschluß des Verbrauchers. Damit gehören die Speichereinrichtungen mit zu der Wasserverteilung eines Wasserversorgungssystems. Die Speichereinrichtungen erfüllen in der Wasserversorgung mehrere Aufgaben:

- Ausgleich der zeitlichen Schwankungen der Wassergewinnung und der Abgabe ins Netz,
- Sicherstellung einer Notversorgung bei Ausfall der Wassergewinnung oder Wasseraufbereitung,
- Vermeidung von Versorgungsengpässen bei Stromausfall (Pumpwerke) und unplanmäßigen Ereignissen im Rohrnetz,
- Gewährleistung eines ausreichenden, annähernd gleichbleibenden Versorgungsdruckes durch die Höhendifferenz zwischen Behälter und Netz,
- Bereithalten von Löschwasserreservemengen für Wasserversorgungsanlagen, wo die maximale Tagesabgabe kleiner als 2000 m³/d ist,
- Verwendung als Misch-, Filter- und Absetzbecken.

Dazu einige Bemerkungen. Wie bereits erwähnt, schwankt der Wasserverbrauch in einem Versorgungsgebiet innerhalb einer Stunde, eines Tages und eines Jahres zum Teil erheblich. Da es nicht sinnvoll ist, diese nur kurzzeitig auftretenden Verbrauchsspitzen auf die Auslegung von Wassergewinnungsanlagen anzuwenden, müssen Speicher den Ausgleich zwischen dem Wasserzulauf und dem ungleichförmigen Wasserablauf schaffen. Damit wird es grundsätzlich möglich, nicht nur die Wasserfassung, sondern auch die Förderanlage, Aufbereitungsanlage, insbesondere der Zubringerleitung für den gleichmäßigen, durchschnittlichen Verbrauch an Spitzentagen zu bemessen, so daß lediglich die Haupt- und Versorgungsleitungen im Versorgungsgebiet für den maximalen Stundenverbrauch ausgelegt werden müssen.

Ebenso notwendig erscheint eine Speicherung für den Ausgleich bei vorhandener Vor- und Hauptförderung, d. h. bei Vorförderung aus Brunnen über eine Aufbereitungsanlage in einen Reinwasser- (Zwischen-)behälter und anschließend Hauptförderung aus diesem ins Netz oder in einen Hochbehälter. Solche Zwischenbehälter können aber auch bei Unterteilung von zu großen Förderhöhen sinnvoll sein.

Die Wasserabgabe soll bei kurz andauernden unplanmäßigen Ereignissen, wie Stromunterbrechung, Maschinenschaden, Rohrschaden, nicht unterbrochen werden, da ansonsten die Gefahren des Leerlaufens von Rohrnetzteilen sowie des Rücksaugens von verunreinigtem Wasser bestehen. Außerdem ist das Füllen der Leitungen wegen der notwendigen Entlüftung langwierig und umständlich, was wiederum ebenso die Gefahr des Auftretens von Rohrbrüchen infolge von Druckstößen hervorrufen kann. Bei sparsamem Wasserverbrauch und richtiger Bemessung wird ein Speicher über derartige kurzfristige Ereignisse hinweghelfen, auch wenn es in der Praxis meistens etwas anders vonstatten geht.

Des weiteren werden Speicher für das Einhalten der Druckbereiche in den Zubringer- und Versorgungsleitungen verwendet. Der freie Wasserspiegel eines hochgelegenen Speichers legt die Druckhöhe an diesem Standort fest und bestimmt somit, unter Berücksichtigung der Schwankungen des Wasserspiegels im Speicher und der Druckverluste im Rohrnetz, die Versorgungsdrücke. Bei Anwendung verschiedener Druckzonen ist für jede Zone eine Speicherung des Wassers für das Einhalten eines gleichmäßigen Versorgungsdruckes in der jeweiligen Zone sowie zur Druckminderung für die tiefer gelegene Zone notwendig.

Das Bereithalten von Löschwasser gehört in der Regel zu den Aufgaben einer Wasserversorgungsanlage. Im Bedarfsfall werden dann Wassermengen innerhalb kurzer Zeit benötigt, die außer bei großen Anlagen insbesondere im Vergleich zur normalen Wasserabgabe sehr erheblich sind. Somit muß ein entsprechender Löschwasservorrat bereitgehalten werden³.

Weiterhin ist eine Zwischenspeicherung auch dann notwendig, wenn verschiedene Wässer gemischt werden, Wässer nach der Aufbereitung noch ausreagieren müssen oder wenn durch längere Verweildauer erreicht werden soll, daß im Wasser enthaltene Bestandteile ausgeschieden werden.

³ S. a. DVGW-Arbeitsblatt W 405 – Bereitstellung von Löschwasser durch die öffentliche Trinkwasserversorgung.

Grundsätzlich existieren verschiedene Möglichkeiten der Speicherung von Wasser in Wasserversorgungssystemen. Am häufigsten anzutreffen sind dabei Hochbehälter. Als *Hochbehälter* werden die Wasserspeicher bezeichnet, deren Wasserspiegel höher als das Versorgungsgebiet liegt und von dem aus das Wasser dem Rohrnetz mit natürlichem Gefälle zufließt. Die Höhendifferenz zwischen Hochbehälter und Versorgungsgebiet sollte etwa 40–80 m betragen. Neben dem Ausgleich der Verbrauchsschwankungen dienen Hochbehälter dem Einhalten eines gleichmäßigen Versorgungsdruckes, der Notversorgung sowie der Speicherung eines Wasservorrates für Löschzwecke. Bei Fernleitungen und Wasserversorgungsanlagen kleiner Versorgungsgebiete erfüllen diese auch den Zweck als Druckunterbrecherbehälter bzw. Zwischenbehälter. Weitere Vorteile sind die der Gewährleistung einer hohen Versorgungssicherheit, der wirtschaftlichen Auslastung der Förderanlagen bei großem Nutzinhalt, des geringen Instandhaltungsaufwands sowie in der Erweiterbarkeit zu sehen. Hochbehälter bieten sich besonders bei günstigen topographischen Verhältnissen an. In den meisten Fällen werden diese unter Gelände errichtet.

Falls aus geographischen Gründen der Bau eines Wasserturms oder von Wasserkammern, die im oberen Teil eines turmartigen Bauwerks untergebracht werden (beispielsweise in einem hochgelegenen Wohnblock), erforderlich ist, werden diese an zentraler Stelle im Rohrnetz errichtet. Auch ein Wasserturm gewährleistet eine hohe Versorgungssicherheit. Nachteilig dagegen wirken sich besonders die Baukosten aus. Aus diesem Grund wird der Wasserspiegel daher meist nicht so hoch über dem Versorgungsgebiet wie bei reinen Hochbehältern gelegt und damit sein Inhalt kleiner gehalten. Ein weiterer Nachteil ist in der Erweiterbarkeit solcher Anlagen begründet.

Im Gegensatz zu Hochbehältern, aus denen das Wasser durch die Wirkung der Schwerkraft abfließt, ist bei *Tiefbehältern* der Einsatz von Pumpen erforderlich. Hier liegt der Wasserspiegel tiefer als es dem Versorgungsdruck entspricht. Sie werden in der Regel in Verbindung mit Wasseraufbereitungsanlagen erstellt, wodurch ein gleichmäßiger Betrieb möglich wird. Bedarfsschwankungen im Versorgungsgebiet werden über das Pumpwerk ausgeglichen.

Kleinere Speicheranlagen werden in Form von Druckbehältern ausgeführt. Diese haben, bedingt durch den kleineren Nutzinhalt, überwiegend nur die Aufgabe, die Schaltintervalle von reinen Pumpwerken ohne nachfolgenden Wasserspeicher zu verringern. Bei diesen kleineren Speicheranlagen besteht der Nachteil darin, daß bei Stromausfall oder unplanmäßigen Ereignissen der Fördereinrichtungen der Versorgungsdruck nach Verbrauch des Speicherinhaltes in kurzer Zeit bis auf die Höhe der Pumpe abfällt. Ist keine Redundanz vorhanden, besteht insofern die Gefahr des Leerlaufens des Rohrnetzes. Aus der Forderung der Gewährleistung einer stabilen Versorgungssicherheit heraus, bedingt diese Variante einen höheren Instandhaltungsaufwand.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle für die Speicherung von Wasser noch auf Trinkwassertalsperren und Grundwasserspeicher verwiesen. Löschwasserspeicher nehmen ebenso eine Sonderposition ein. Aus Gründen der Kosten für eine zusätzliche Speicherung oder hygienischen Risiken (hohe Verweilzeiten) werden dazu nicht selten vorhandene Weiher oder künstliche Weiher in kleineren

Landgemeinden benutzt. In geschlossen bebauten Gebieten sind dagegen unterirdische Löschwasserbehälter zweckmäßig.

Das Speichervolumen eines Behälters muß so bemessen sein, daß der Ausgleich zwischen dem Zufluß und der Entnahme an Tagen mit Spitzenverbrauchswerten gewährleistet werden kann. Zusätzlich kommt dazu der Sicherheitsvorrat zur Überbrückung von Betriebsstörungen. Ebenso kann ein Löschwasservorrat in Frage kommen, der zwar auch zur Bevorratung zählt, aber nur im entsprechenden Ereignisfall genutzt wird.

Bei kleineren Wasserversorgungsanlagen bis etwa 2000 m³/d sollte der Nutzinhalt des Behälters dem Tagesbedarf in etwa entsprechen. Dagegen bei großen Anlagen mit Tagesabgaben größer als 4000 m³/d kann die Speicherkapazität etwa 30–40 % der höchsten Tagesabgabe betragen. Genauere Angaben zu durchschnittlichen Tagesausgleichsvolumen in Abhängigkeit des Tagesspitzenverbrauchs sind in (Mutschmann et al. 1997) zu finden, die auf einer Auswertung von 24 Versorgungsgebieten basieren (Tabelle 3.2-3). In der Tabelle 3.2-4 ist beispielhaft die Größe von Wasserspeichieranlagen für Wasser verschiedener Wasserwerke zusammengestellt.

Die Bemessung des Speicherinhaltes nach dem Ausgleich der Verbrauchsschwankungen umfaßt keine ausreichende Reserve für unplanmäßige Ereignisse. Dieser betriebliche Sicherheitsvorrat ist abhängig vom System der Zubringerleitungen, von der Wahrscheinlichkeit und Dauer von unplanmäßigen Ereignissen sowie dem Zustand und der Leistung benachbarter Wasserversorgungsanlagen im Notverbund. Der Sicherheitszuschlag kann klein ausfallen und im günstigsten Fall sogar entfallen, wenn mehrere Zubringerleitungen vorhanden sind, die Häufigkeit der unplanmäßigen Ereignisse gering ist bzw. ein leistungsfähiges Nachbarunternehmen mit guten Einspeisemöglichkeiten existiert. Liegen dagegen diese Voraussetzungen nicht vor, muß die Dauer der Behebung eines unplanmäßigen Ereignis-

Tabelle 3.2-3 Tagesausgleichsvolumen aus 24 Versorgungsgebieten

Tagesspitzenverbrauch $Q_{d,max}$ [m ³ /d]	Tagesausgleichsvolumen von $Q_{d,max}$ [%]
bis 10.000	28
50.000	27
100.000	25
300.000	23
1.000.000	20

Tabelle 3.2-4 Größe von Wasserspeichieranlagen verschiedener Wasserwerke

Leistung [m ³ /Tag]	Speichergröße [m ³]	Leistung [m ³ /Tag]	Speichergröße [m ³]
150.000	8 × 60.000	160.000	6 × 60.000
30.000	2 × 15.000	200.000	3 × 54.400
60.000	4 × 39.600	20.000	4 × 39.200
80.000	4 × 34.000	35.000	4 × 27.400
250.000	12 × 106.400	120.000	4 × 38.200

nisses, d. h. eines Ausfalles abgeschätzt werden, um somit den Sicherheitszuschlag festlegen zu können. Nach (Mutschmann et al. 1997) kann die Faustformel für die Größe des notwendigen Sicherheitsvorrates wie folgt angesetzt werden:

$$V_{Si} = \frac{Q_d}{L_{Anz}} \cdot t_A \quad [\text{m}^3] \quad (3.1)$$

mit Q_d - durchschnittlicher Tagesbedarf [m^3/d],
 L_{Anz} - Anzahl der Zuleitungen,
 t_A - Ausfalldauer [d].

In dieser Gleichung wurde nur der durchschnittliche Tagesbedarf herangezogen, weil es unwahrscheinlich ist, daß bei hier angenommen gleich leistungsfähigen Zubringerleitungen ein Schaden mit dem Tagesspitzenverbrauch zusammenfällt. Weitere Ausführungen dazu sind u. a. in (Mutschmann et al. 1997) enthalten.

Wie bereits bei der Definition der Hochbehälter erwähnt, sind diese so hoch über das Versorgungsgebiet zu legen, daß bei der Entnahme des Wassers auch bei stark abgesenktem Wasserspiegel im Behälter noch ein Druck vorhanden ist, der für die erforderliche Bedarfsdeckung in dem betreffenden Versorgungsgebiet ausreicht. Diese Restriktionen sind in der Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser (AVBWasserV) festgelegt. Dabei wird der niedrigste Wasserspiegel im Behälter durch die Forderung bestimmt, daß unter Berücksichtigung der hydraulischen Randbedingungen (Ruhedruck, Betriebsdruck, Druckverluste im Rohrnetz) sowie der örtlichen topographischen Verhältnisse der erforderliche Mindestdruck am ungünstigsten Punkt des Versorgungsgebietes sichergestellt ist. In Tabelle 3.2-5 sind diese Mindestdrücke, deren Messung am Hausanschluß unmittelbar vor dem Zähler erfolgt, nach dem DVGW-Merkblatt W 403 – Planungsregeln für Wasserleitungen und Wasserrohrnetze – und AVBWasserV in Abhängigkeit der Gebäudehöhe aufgelistet. Gleichzeitig sind aber zu hohe Drücke zu vermeiden, da sonst die Wasserverluste durch Leckstellen, undichte Armaturen usw. stark anwachsen sowie die Gefahr von Rohrbrüchen vergrößert wird. Dadurch bedingt steigen auch die Kosten für die Hausanschlüsse, gegeben durch die höhere Druckstufe. Besonders zu beachten sind der hydrostatische Druck und der Druck bei Förderung ohne gleichzeitige Entnahme.

Tabelle 3.2-5 Mindestüberdrücke in Ortsnetzen

Gebäude mit	Mindestüberdruck (für die Bemessung neuer Ortsnetze) nach DVGW W403 [bar]	Mindestüberdruck (bei bestehenden Ortsnetzen) nach AVBWasserV [bar]
Erdgeschoß	2,0	2,00
Erdgeschoß + 1 Obergeschoß	2,5	2,35
Erdgeschoß + 2 Obergeschosse	3,0	2,70
Erdgeschoß + 3 Obergeschosse	3,5	3,05
Erdgeschoß + 4 Obergeschosse	4,0	3,40
Erdgeschoß + 5 Obergeschosse	4,5	3,75

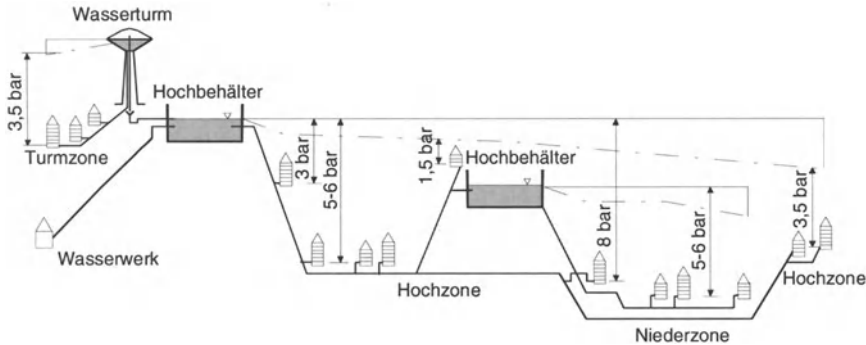


Abb. 3.2-2 Teilung des Versorgungsgebietes in Druckzonen nach DVGW-Merkblatt W 403

Die Höhendifferenz zwischen Hochbehälter und Versorgungsgebiet sollte etwa 40–60 m bzw. in einzelnen Fällen bis maximal 80 m betragen. Ebenso kann bei ungünstig gelegenen Teilen eines Versorgungsgebietes die Druckhöhe auf 30 m bei Hochbehältern und auf 20 m bei Wassertürmen herabgesetzt werden, unter der Voraussetzung, daß der Versorgungsdruck noch ausreicht. Sind im Versorgungsgebiet größere Höhenunterschiede vorhanden, kann ein hydrostatischer Druck für Teile des Versorgungsgebietes bis 80 m zugelassen werden, wobei dann Druckmindereinrichtungen zum Schutz der Hausanlagen zum Einsatz kommen. Bei noch größeren Höhenunterschieden muß dann die Teilung des Versorgungsgebietes in Druckzonen erfolgen. Ein entsprechendes Beispiel ist in Abb. 3.2-2 nach DVGW-Merkblatt W 403 – Planungsregeln für Wasserleitungen und Wasserrohrnetze – dargestellt. Hierbei ist noch anzumerken, daß nur sinnvolle Teilungen in einzelne Druckzonen vorgenommen werden sollten, da diese den Nachteil erhöhter Investitions- und Betriebskosten nach sich ziehen. Deshalb ist in Versorgungsgebieten mit größeren Höhenunterschieden eine genaue Höhenfestlegung für die Wasserversorgung außerordentlich wichtig.

Die Speicherbehälter können hinsichtlich ihrer Anordnung als Gegen- oder Durchlaufbehälter in der Wasserteilung des Wasserversorgungssystems unterschieden werden. Bei Gegenbehältern liegt das Rohrnetz zwischen der Wassergewinnung und dem Behälter (Abb. 3.2-3a). Aus diesem Grund sind Gegenbehälter auch nur als Hochbehälter möglich. Diese Art von Anordnung führt einerseits zu einer Versorgungssicherheit, gegeben durch die zweiseitige Einspeisemöglichkeit ins Rohrnetz, andererseits aber auch zu geringeren Druckverlusten. Gleichzeitig wird ferner die Lufterneuerung in den Wasserkammern erzwungen, da jeder Kubikmeter Wasserentnahme aus dem Behälter die Einstromung von einem Kubikmeter Luft bewirkt und umgekehrt. Nachteilig wirken sich dagegen die stark wechselnden Drücke bei verschiedenen Betriebsfälle, die wechselnden Fließrichtungen im Netz sowie die langsame Wassererneuerung im Behälter aus. Letzteres geschieht vor allem dann, wenn die Wasserförderung in das Rohrnetz größer ist als der Verbrauch. Dies kann dadurch vermieden werden, indem in lastschwachen Zeiten der Gegenbehälter gefüllt wird. Der Tagesverbrauch an sich wird dann nur aus dem Behälter gedeckt. Gegenbehälter eignen sich des weiteren nicht zur Mi-

schung von Wässern unterschiedlicher Beschaffenheit, weil kein konstantes oder eng begrenztes Mischungsverhältnis erreicht werden kann. Hinsichtlich der Lage gilt, je näher der Gegenbehälter in Richtung der Wassergewinnung rückt, um so stärker nimmt dieser die Eigenschaften eines Durchlaufbehälters an.

Durchlaufbehälter liegen zwischen der Wassergewinnung und dem Rohrnetz (Abb. 3.2-3b). Während Hochbehälter sowohl als Gegenbehälter oder Durchlaufbehälter ausgeführt werden können, handelt es sich bei Tiefbehältern immer um Durchlaufbehälter. Für Durchlaufbehälter sprechen Vorteile, wie die annähernd gleichbleibenden Förderdrücke, die eindeutigen Fließrichtungen, die geringeren Druckschwankungen als beim Gegenbehälter, die sehr gute Wassererneuerung im Behälter sowie die Unabhängigkeit des Versorgungsdruckes von der Förderhöhe der Pumpe. Durchlaufbehälter eignen sich für die Mischung von Wässern unterschiedlicher Beschaffenheit. Ein gewisser Nachteil gegenüber den Gegenbehältern besteht in der Versorgungssicherheit, gegeben durch die einseitige Netzeinspeisung.

Weitere Ausführungen hinsichtlich der Anordnung mehrerer Hochbehälter in der gleichen Druckzone sind u. a. in (Mutschmann et al. 1997) zu finden.

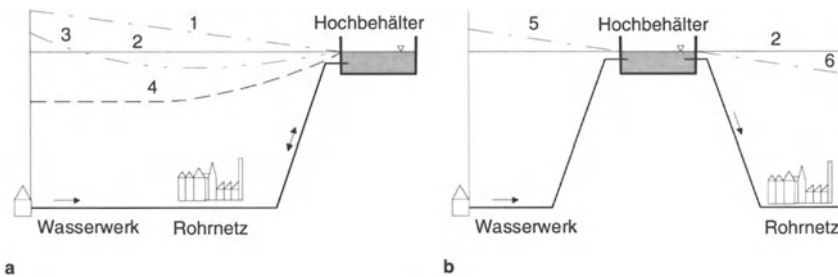


Abb. 3.2-3 Anordnung der Speicherbehälter

a Gegenbehälter, **b** Durchlaufbehälter

1 Drucklinie bei einseitiger Einspeisung aus Brunnen in Hochbehälter und Rohrnetz, 2 Ruhedrucklinie bei Nullentnahme im Rohrnetz, 3 Drucklinie bei zweiseitiger Einspeisung aus Hochbehälter und Brunnen ins Rohrnetz, 4 Drucklinie bei einseitiger Einspeisung aus Hochbehälter ins Rohrnetz, 5 Drucklinie bei einseitiger Einspeisung aus Brunnen in Hochbehälter, 6 Drucklinie bei einseitiger Einspeisung aus Hochbehälter ins Rohrnetz

3.2.5

Druckerhöhungs- und Druckminderstationen

Druckerhöhungsstationen sind Förderanlagen, die auf der Saugseite an einem Behälter, einem Rohrnetz oder an einer Leitung angeschlossen sind und druckseitig das Wasser in einen Behälter, ein Rohrnetz oder in eine Hausinstallation fördern. Dabei werden verschiedene Varianten unterschieden. Während die Druckerhöhungsstation (s. Abb. 3.2-4a) ständig Wasser aus der Tiefzone in die Hochzone fördert, geschieht dies bei dem Beispiel aus Abb. 3.2-4b erst, wenn der Mindestüberdruck an einem bestimmten Schwachpunkt des nachgeschalteten Rohr-

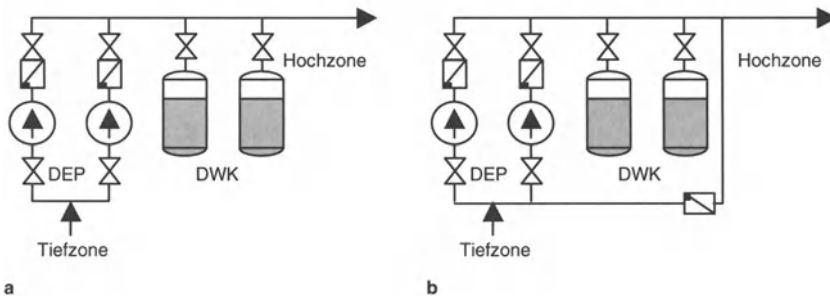


Abb. 3.2-4 Prinzipschaltbild Druckerhöhungsstation
a für ständigen Betrieb, **b** für verbrauchsabhängigen Betrieb
 DEP Druckerhöhungspumpen, DWK Druckwindkessel

netzes der Hochzone unterschritten wird. Dabei kann es sich um höher gelegene Abnehmer, wie beispielsweise Hochhäuser oder sogar um höher gelegene Ortsteile, handeln.

Bei stark schwankendem Vordruck wird zur Sicherheit der Anlage ein Druckreduzierventil vor den Pumpen eingebaut und so eingestellt, daß der Druck dem minimalen Vordruck entspricht. Die Steuerung der Pumpen durch Ein- und Ausschalten erfolgt druckabhängig über einen ausreichend bemessenen Druckwindkessel⁴. Die Druckwindkessel dienen als Druckstoßdämpfung beim Ein- und Ausschalten der Pumpen und als kleiner Speicher, der die Schalthäufigkeit der Pumpen verringert. Gelegentlich wird die Druckerhöhungspumpe auch ausgeschaltet durch die Temperaturerhöhung des Wassers, infolge Kreisbetrieb über einen entsprechenden Bypass oder durch das Absinken der Strömungsgeschwindigkeit in der Hauptleitung. Auf der Zulaufseite ist oft ein Druckschalter eingebaut, der bei Unterschreiten des minimalen Vordruckes die Druckerhöhungspumpe ausschaltet.

Heute werden vielfach drehzahlregelte Pumpen eingesetzt, die sich automatisch den Bedarfsschwankungen im Rohrnetz anpassen. Die Druckwindkessel können in solchen Fällen kleiner ausgelegt werden bzw. ganz entfallen, was letztendlich auch zu einer Verringerung des Platzbedarfes führt. Durch diese Lösungsmöglichkeiten läßt sich auch die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessern.

Druckerhöhungsstationen werden häufig auch in Transport- oder Falleitungen eingebaut, um z. B. bei Spitzenbedarf die Förderleistung steigern zu können. Diese Möglichkeiten werden insbesondere in Fernwasserleitungen vorgesehen.

Aber auch in Gebäuden, wie beispielsweise Hochhäusern, kommen Druckerhöhungsanlagen zum Einsatz. Die maßgebliche Richtlinie für die Planung und Ausführung von Druckerhöhungsanlagen solcher Art ist die DIN 1988, wonach Druckerhöhungsanlagen erforderlich werden bei:

⁴ In der Literatur werden Druckwindkessel häufig auch im eigentlichen Sinne als Druckbehälter bezeichnet.

- unzureichendem Netzdruck,
- Brandschutz- und Feuerlöschanlagen,
- erforderlicher Netztrennung mittels offenem Vorlaufbehälter, wenn Rohrnetztrenner nicht ausreichen,
- starken Druckschwankungen, die die Gebäudeversorgung gefährden.

Druckerhöhungsanlagen werden konventionell mit Druckwindkessel oder als drehzahlgeregelte Anlage, in der Regel als vorgefertigte Kompaktanlage, ausgeführt. Auch in diesen Anlagen dürfen gemäß DIN 4807-5 zukünftig nur noch durchströmte Gefäße eingesetzt werden.

Je nach Anschlußart muß die Geschwindigkeit in der Anschlußleitung und der zur Druckerhöhung führenden Verbrauchsleitung auf bestimmte Höchstwerte begrenzt werden. Dadurch wird erreicht, daß die Versorgung benachbarter Verbraucher wegen zu hohen Druckabfall nicht unzumutbar beeinträchtigt wird und unzulässige Druckstöße in der Anschlußleitung sowie den Leitungen der zentralen Wasserversorgung vermieden werden. Die Geschwindigkeit in der Anschluß- sowie der Verbrauchsleitung soll 2 m/s nicht überschreiten. Die möglichen Anschlußarten für Druckerhöhungsanlagen sind zum einen der unmittelbare, zum anderen der mittelbare Anschluß. Der unmittelbare Anschluß ist die direkte Verbindung der Druckerhöhungsanlage mit der von der Versorgungsleitung abzweigenden Anschlußleitung. Da bei dem hier vorliegenden geschlossenen System die Gefahr der hygienischen Beeinträchtigung des Wassers von außen nicht besteht, ist der unmittelbare Anschluß dem mittelbaren vorzuziehen. Dagegen ist der mittelbare Anschluß die indirekte Verbindung der Druckerhöhungsanlage mit der von der Versorgungsleitung abzweigenden Anschlußleitung über einen atmosphärisch offenen Vorbehälter, dem das Wasser über eine oder mehrere Leitungen zuläuft. Diese Anschlußart wird erforderlich, wenn infolge der maximalen Entnahme durch die Druckerhöhungsanlage der erforderliche Mindestüberdruck am ungünstigsten Verbraucher unterschritten wird, Wasserleitungen der öffentlichen Versorgung mit der der Eigenversorgung gekoppelt werden sollen oder es zu Kontakten des Wassers mit anderen Stoffen kommen könnte.

Druckminderstationen umfassen sowohl Anlagen, die mit Druckminderventilen ausgerüstet sind, als auch Druckunterbrecherbehälter (Abb. 3.2-5a), die den Druck vollständig abbauen. Druckminderventile dienen dazu, einen konstanten oder

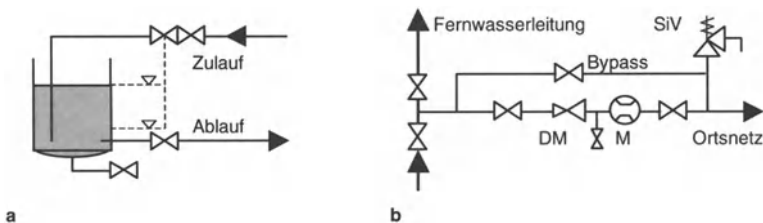


Abb. 3.2-5 Varianten einer Druckminderstation

a Druckunterbrecherbehälter, **b** Schacht mit Druckminderer

DM Druckminderer, M Verbundmessung, SiV Sicherheitsventil/Überdruckventil

wechselnden Vordruck auf einen einstellbaren konstanten Druck zu reduzieren. Bei Netzdrücken größer 5–6 bar ist eine Druckreduzierung vorzunehmen, wobei je nach örtlichen Verhältnissen zentrale (s. Abb. 3.2-5b) oder dezentrale Varianten zum Einsatz kommen. Die Anforderungen an Druckminderer in Gebäuden sind in DIN 1988 beschrieben. Dabei sind in Abhängigkeit der Wasserqualität die Wartungsintervalle festzusetzen, da Ablagerungen an den Ventilen zu Betriebsstörungen führen können. Im praktischen Einsatz haben sich Membranventile bewährt.

Um bei ungesteuerten Druckminderventilen entsprechende Schwankungen des Ausgangsdruckes zu vermeiden, werden bei höheren Ansprüchen Druckregler eingesetzt, die über ein Pilotventil gesteuert werden. Eine Druckminderung kann bei großen Durchflüssen auch mit einem Ringkolbenventil geschehen.

3.2.6 Rohrleitungssysteme

3.2.6.1 Einteilungen

Unter dem Wassernetz bzw. Rohrnetz wird im allgemeinen das Verbindungsglied zwischen Wassergewinnungsanlage und Verbraucher verstanden. Häufig wird auch der Begriff Wasserverteilung verwendet. Auf die Wahl der Netzgestaltung, des Rohrsystems, der Verlegeart und der eingebauten Komponenten (Zubehörteile) nehmen zahlreiche

- technische,
- wirtschaftliche,
- architektonische,
- territoriale,
- sicherheitstechnische

und viele andere Faktoren Einfluß.

Die Rohrleitungen einer Wasserversorgungsanlage beanspruchen etwa 63–82 % der gesamten Anlagekosten. Es wird deshalb eine möglichst hohe Lebensdauer dieser Anlage angestrebt. Dies bedingt eine vorausschauende Anordnung und Bemessung der Leitungen.

Wirtschaftlichkeit und Sicherheit einer Wasserversorgungsanlage hängen in starkem Maße von den Rohrleitungen ab. Sie sollen nicht nur die quantitative Versorgung nach Menge und Druck, sondern auch die weitgehende Beibehaltung der vom Wasserwerk gelieferten Qualität des Wassers gewährleisten. Rohrwerkstoff und Rohrverbindungen müssen deshalb sorgfältig unter Beachtung der örtlichen Gegebenheiten ausgewählt werden. Die billigste Lösung ist nicht immer die wirtschaftlichste. Letztere ergibt sich aus den Abschreibungs- und Betriebskosten, so daß die Lebensdauer der Rohrleitung einen großen Einfluß hat. Oft muß und wird auch die Betriebssicherheit über die in Zahlen auszudrückende Wirtschaftlichkeit gestellt werden.

Die Größe des Wassernetzes liegt ebenso meistens nicht von vornherein fest; sie ist in der Regel historisch entstanden. Das Wassernetz besteht aus verschiedenen

dimensionierten Rohrleitungen unterschiedlicher Rohrwerkstoffe. Diese Rohrleitungen schließen die dazu gehörigen verschiedenartigsten Komponenten mit ein, wie

- Rohrbögen,
- Formstücke,
- Rohrhalterungen,
- Kompensatoren,
- Armaturen,
- Entleerungen sowie
- Be- und Entlüftungen.

Im folgenden sollen die verschiedenen Rohrleitungssysteme einschließlich ihrer darin enthaltenen Komponenten nach

- den Rohrleitungssystemen,
- der Netzform (Strahlen- und Maschennetz),
- der Netzgestaltung,
- den Verlegeverfahren in bezug auf den Rohrwerkstoff,
- den zum Einsatz kommenden Komponenten u. a.

erläutert werden.

Die Rohrleitungssysteme werden nach versorgungstechnischen Aufgaben unterteilt. *Zubringer-* oder *Transportleitungen* sind Rohrleitungen, die nicht selbst der eigentlichen Wasserversorgung dienen, sondern ohne Entnahme längs der Strecke das Wasser zur Aufbereitungsanlage, zum Speicherbehälter oder zum Verteilungsnetz führen. Von *Hauptleitungen* zweigen die Versorgungsleitungen, aber in der Regel keine Anschlußleitungen ab. Sie sind deshalb nur in größeren Wassernetzen erforderlich. *Fernwasserleitungen* können sowohl zu den erst- als auch zu den letztgenannten zählen. Anschlüsse an solche Leitungen erfolgen über Wasserzähler zur Verbrauchskontrolle (s. a. Abb. 3.2-5). *Versorgungsleitungen* bilden das eigentliche Versorgungsnetz. Von ihnen zweigen die Anschlußleitungen zu den einzelnen Verbrauchern ab. Bei den *Anschlußleitungen*, auch als Hausanschluß bezeichnet, handelt es sich um Wasserleitungen zwischen der Versorgungsleitung und der Hauptabspernung beim Verbraucher. Der danach angeschlossene Wasserzähler befindet sich dabei im Eigentum des Wasserversorgungsunternehmens. Letztendlich stellen *Verbrauchsleitungen* die Hausinstallation zu den einzelnen Zapfstellen dar.

Im Vergleich mit Fernwärmesystemen sind die Einteilungen der Rohrleitungssysteme und Definition der Leitungsarten somit analog.

Nach hydraulischen Gesichtspunkten sind Freispiegel- und Druckrohrleitungen zu unterscheiden. Während *Freispiegelleitungen* grundsätzlich mit natürlichem Gefälle verlaufen, können *Druckrohrleitungen* als Gefälleleitungen oder Pumpendruckleitungen arbeiten. Häufig treten Gefälleleitungen als Kombination von Freispiegel- und Druckrohrleitungen auf. Düker sind Druckrohrleitungen zur Unterführung von Wasserläufen und dergleichen. Sie sind durch die tiefere Lage gegenüber den anschließenden Rohrstrecken gekennzeichnet. Im hydraulischen Sinne werden nur Unterführungen im Zuge von Freispiegelleitungen als Düker

bezeichnet, jedoch ist der gleiche Begriff auch für die konstruktiv ähnliche Lösung bei Unterführungen im Rahmen von Druckrohrleitungen üblich. Heber sind Rohrleitungen, in denen Unterdruck herrscht und die mit Hilfe des Luftdruckes einen Hochpunkt überwinden. Ein entsprechendes Beispiel zeigt Abb. 3.2-6.

Die ohne inneren Überdruck laufenden Freispiegleleitungen stellen wesentlich geringere Anforderungen an den Rohrwerkstoff und können dadurch kostengünstiger sein als Druckrohrleitungen. Je nach den topographischen Verhältnissen sind jedoch längere Rohrtrassen und Übertiefen erforderlich. Freispiegleleitungen kommen als Zubringerleitungen von der Wasserefassung zur Aufbereitungsanlage, zum Speicherbehälter und teilweise auch als Falleitung von Hochbehältern in Frage. Ihre wirtschaftliche Anwendung hängt weitgehend von den topographischen Verhältnissen ab und ist durch einzelne Variantenuntersuchung gegenüber einer Druckrohrleitung einschließlich der Förderanlagen abzuwägen. Druckrohrleitungen haben den Vorteil, daß ihre Leistungsfähigkeit durch Zwischenschaltung von Pumpen in gewissen Grenzen erhöht werden kann.

Die der Wasserverteilung im Versorgungsgebiet dienenden Rohrnetze werden nach ihrer Form und den dadurch bedingten hydraulischen Verhältnissen als Verästelungs-, Umlauf- und Ringnetze bezeichnet (s. Abb. 3.2-7). Auch hier bestehen durchaus Analogien zu Fernwärmesystemen.

Verästelungsnetze bestehen aus sich verzweigenden Rohrleitungen. Den einfach zu erfassenden hydraulischen Verhältnissen stehen wesentliche betriebliche Nachteile gegenüber. Bei Unterbrechung eines Rohrstranges infolge Rohrbruches oder wegen Reparaturen ist das gesamte hinter der Störstelle liegende Versorgungsgebiet ohne Wasser. Durch Stagnation in den Endsträngen leidet die Wasserqualität und steigt die Frostgefahr. Bei direkter Löschwasserversorgung aus dem Rohrnetz sind oft größere Rohrdurchmesser erforderlich, da der Zufluß nur von einer Seite erfolgt. Verästelungsnetze sollten nur noch angewendet werden, wenn infolge weitläufiger Bebauung ein Umlauf- oder Ringnetz zu aufwendig wird, und bei kleineren Versorgungsgebieten, bei denen die Betriebssicherheit nicht diese Rolle spielt. Die Baukosten für das Verästelungsnetz sind niedriger als beim Umlaufnetz.

Umlaufnetze entstehen durch Verbindung der Endstränge eines Verästelungsnetzes. Umlaufnetze werden des öfteren auch als vermaschte Rohrnetze bezeichnet. Dadurch wächst die Länge und steigen oft auch die Kosten eines Rohrnetzes.

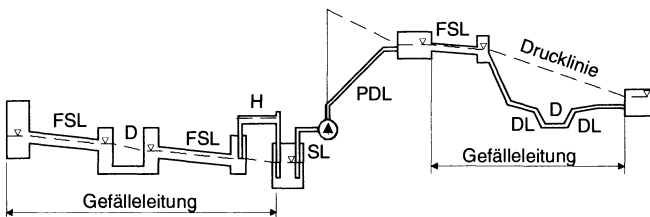
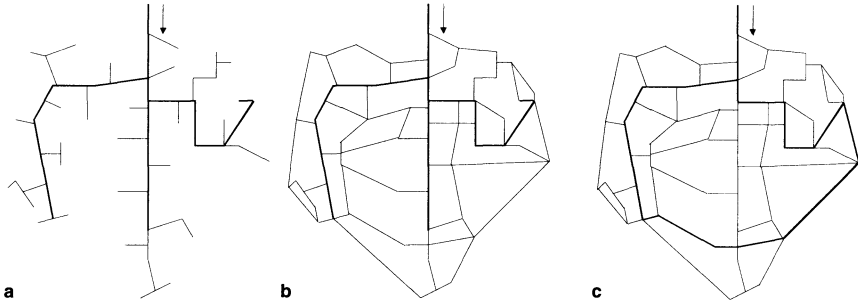


Abb. 3.2-6 Rohrleitungssysteme in einem Wassernetz

FSL Freispiegleitung, D Düker, H Heber, SL Saugleitung, PDL Pumpendruckleitung, DL Druckleitung

**Abb. 3.2-7** Netzformen

a Verästelungsnetz, b Umlaufnetz, c Ringnetz

Die Kontrolle des Rohrnetzes auf Wasserverluste gestaltet sich schwieriger, da die Fließrichtung wechselt. Umlaufnetze sind trotzdem wegen der betrieblichen Vorteile dem Verästelungsnetz vorzuziehen. In ihnen wird das Stagnieren des Wassers weitgehend verhindert, die Druckverhältnisse sind ausgeglichener, und im Brandfall fließt das Löschwasser von zwei Seiten zu, so daß an Rohrdurchmesser gespart werden kann. Bei Absperrung von Teilstrecken kann das dahinter liegende Versorgungsgebiet zumindest mit einer Teilmenge weiter versorgt werden. Die Baukosten liegen über denen des Verästelungsnetzes.

In *Ringnetzen* sind die Hauptleitungen zu Ringen mit entsprechend großem Nenndurchmesser geschlossen. Es handelt sich dabei um eine Sonderform des Umlaufnetzes. Sie gewähren die größte Betriebssicherheit und den besten Druckausgleich im gesamten Versorgungsgebiet. Erweiterungen gestalten sich relativ leicht mit geringem Aufwand. Ringnetze sind bevorzugt anzuwenden, auch wenn diese anfangs kostenintensiver sind. Bei späteren Erweiterungen machen sie sich mehrfach bezahlt. Ringleitungen an oder nahe der Peripherie des Versorgungsgebietes schaffen gute Druckverhältnisse auch in den Randgebieten. Bei größeren Wasserversorgungssystemen sind außerdem Ringleitungen um und im Versorgungszentrum hydraulisch vom Vorteil. Durch nachträgliche Anordnung von Ringleitungen sind Wasserbedarfssteigerungen relativ leicht zu realisieren. Somit stellt ein Ringnetz das rein technisch ideale Rohrnetz dar, das allen Forderungen gerecht wird. Die Baukosten liegen jedoch weitaus höher als beim Verästelungs- bzw. Umlaufnetz.

Aus wirtschaftlichen Gründen wird das Rohrnetz eines Versorgungsgebietes nie als reines Ringnetz oder Umlaufnetz ausgebildet sein, sondern alle 3 Netzformen mehr oder weniger stark enthalten. Rohrnetze generell weisen durch die vielen Teilstrecken, die durch die Verästelung oder Vermaschung entstehen, sehr große Längenausdehnungen auf.

Des weiteren sind der Aufbau sowie die Gestaltung eines Wasserversorgungssystems, wie bereits im Abschn. 3.1 erläutert, von den unterschiedlichsten Faktoren abhängig. Ein konkretes Beispiel einer Netzgestaltung zeigt Abb. 3.2-8. Die einzelnen Versorgungsgebiete stellen dabei Teilgebiete innerhalb eines Wasserversorgungsunternehmens dar.

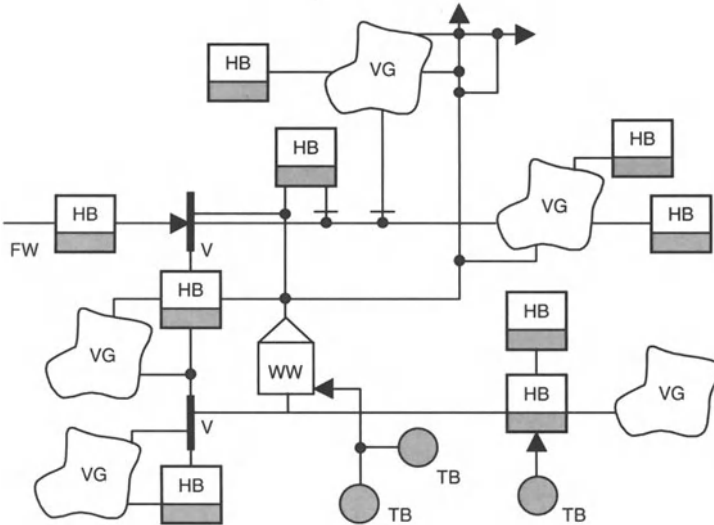


Abb. 3.2-8 Beispiel einer Netzgestaltung
VG Versorgungsgebiet, FW Fernwasser, HB Hochbehälter, TB Tiefbrunnen, WW Wasserwerk, V Verteiler

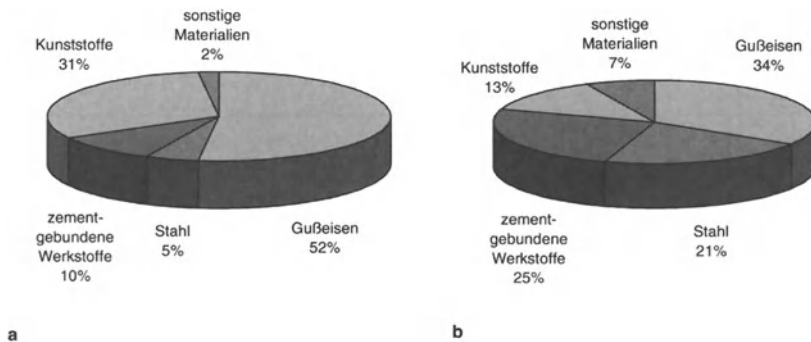


Abb. 3.2-9 Eingesetzte Verlegeverfahren für Wasserversorgungssysteme in Deutschland 1991 hinsichtlich der Materialanteile nach (Moser 1995)
a alte Bundesländer (Netzlänge: 313.200 km), **b** neue Bundesländer (Netzlänge: 77.500 km)

Bei der Verlegung der Wasserversorgungssysteme kommen verschiedene Verlegeverfahren zur Anwendung. Deren Unterteilung wird anhand der Statistik von Deutschland 1991, getrennt in alte und neue Bundesländer, in Abb. 3.2-9 vorgenommen. Der Anteil der zum Einsatz gekommenen Verlegeverfahren kann im konkreten Fall durchaus von der oben gezeigten Gesamtstatistik abweichen. Anhand der zwei ausgewählten Beispiele (Abb. 3.2-10 und 3.2-11) wird dies verdeutlicht.

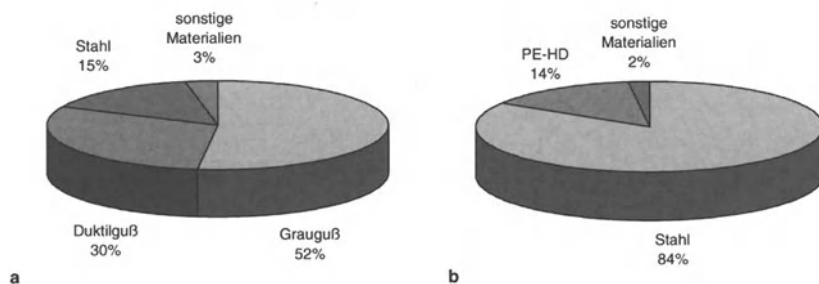


Abb. 3.2-10 Eingesetzte Verlegeverfahren am Beispiel Nürnberg 1993/94 hinsichtlich der Materialanteile nach (Moser 1995)

a Rohrnetzlänge: 1.340 km, **b** Hausanschlußleitungen (57.000 Stück)

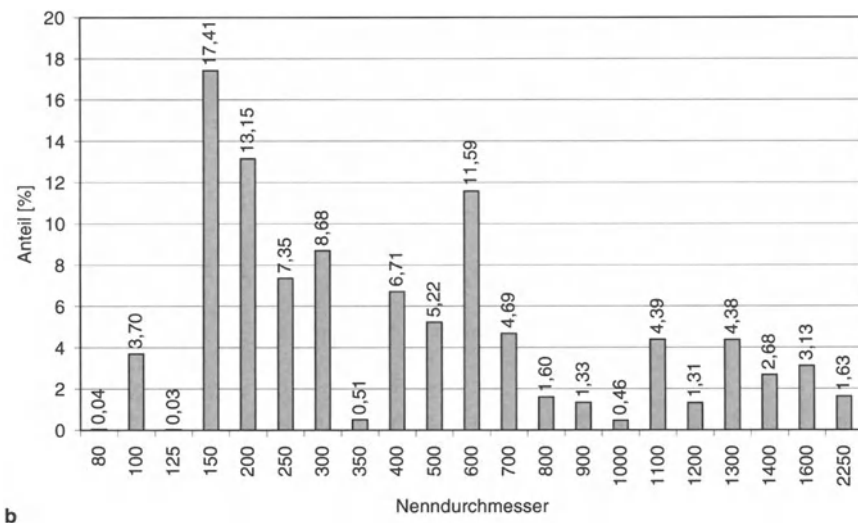
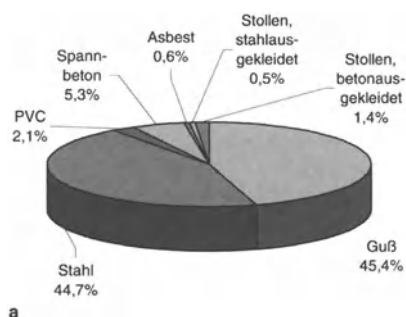


Abb. 3.2-11 Eingesetzte Verlegeverfahren am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung nach (Naber 1990)

a hinsichtlich Materialanteile (Netzlänge: 1.476,8 km), **b** bezogen auf Nenndurchmesser

Tabelle 3.2-6 Allgemeine Empfehlungen für die Werkstoffauswahl von Wasserrohrleitungen

Leitungsart	Restriktion	Werkstoff
Zubringer- und Transportleitungen, Fernleitungen	DN > 700 ^a , über PN 16	Stahl mit Innenschutz durch Zementmörtelauskleidung mit Schweißverbindung, duktiles Gußeisen mit Zementmörtelauskleidung
	DN > 700, bis PN 16	Stahl mit Innenschutz durch Zementmörtelauskleidung mit Schweißverbindung, Spannbeton, duktiles Gußeisen mit Zementmörtelauskleidung
	DN > 700 ^b , über PN 16	Stahl mit Innenschutz durch Zementmörtelauskleidung mit Schweißverbindung, duktiles Gußeisen mit Zementmörtelauskleidung, glasfaserverstärktes Polyesterharz
	DN > 700, bis PN 12,5	Stahl mit Innenschutz durch Zementmörtelauskleidung mit Schweißverbindung, duktiles Gußeisen mit Zementmörtelauskleidung, Asbestzement, (Faserzement)
Hauptleitungen, Fernleitungen	DN < 700, bis PN 12,5	Stahl mit Innenschutz durch Zementmörtelauskleidung mit Schweißverbindung, duktiles Gußeisen mit Zementmörtelauskleidung, Asbestzement, (Faserzement), glasfaserverstärktes Polyesterharz
Versorgungsleitungen PN 10		duktiler Gußeisen mit Zementmörtelauskleidung, Asbestzement, (Faserzement), Polyvinylchlorid (hart), glasfaserverstärktes Polyesterharz
Anschlußleitungen		Polyethylen hart, Stahl mit Sonderschutz

^a Leitung unterliegt höchster Priorität und darf somit nicht ausfallen, außer bei planmäßiger Instandhaltung.

^b Leitungsausfall wird für einen kurzen Zeitraum toleriert.

Wie aus den gezeigten Darstellungen ersichtlich, können Rohrnetze für Wasser aus den unterschiedlichsten Rohrwerkstoffen hergestellt werden. Hauptsächlich kommen dabei die Rohre aus Gußeisen (Grauguß), Stahl, Asbestzement, Spannbeton, Stahlbeton sowie Kunststoff zum Einsatz. Die Wahl der Werkstoffe obliegt im eigentlichen Sinne dem Planer sowie dem Betreiber der Anlage. Entscheidende Faktoren sind dabei die Festigkeit gegenüber Innendruck und äußerer Belastung, die Korrosionsbeständigkeit, die Verbindungsart und letztendlich die anfallenden Kosten. Dazu werden entsprechend u. a. in (Mutschmann et al. 1997) allgemeine Empfehlungen gegeben (Tabelle 3.2-6).

Bevor auf die einzelnen Verlegeverfahren näher eingegangen werden soll, zunächst einige grundlegende Ausführungen zum Korrosionsschutz. Die Korrosion ist nach der Definition von DIN 50900 die Reaktion eines metallischen Werkstoffs mit seiner Umgebung, die eine meßbare Veränderung (Korrosionserscheinung) des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems führen kann (Korrosionsschaden). In den meisten Fällen ist diese Reaktion elektrochemischer Natur, sie kann aber auch chemischer oder metall-physikalischer Natur sein. Auch Nichtmetalle, wie bei-

Tabelle 3.2-7 Bodenklassen in Abhängigkeit der Bodenaggressivität

Boden- klasse	Bodenaggressivität	Korrosionswahrscheinlichkeit		Summe der Bewertungszahlen
		Lochkorrosion	Flächenkorrosion	
I a	praktisch nicht aggressiv	sehr gering	sehr gering	> 0
I b	schwach aggressiv	gering	sehr gering	0 bis -4
II	aggressiv	schwach	gering	-5 bis -10
III	stark aggressiv	hoch	mittel	< -10

spielsweise Kunststoffe, unterliegen korrosiven Angriffen. Derartige Vorgänge sollen aber in diesem gesteckten Rahmen nicht weiter verfolgt werden.

Die Korrosion ist im allgemeinen mehr oder weniger durch die Aggressivität des Bodens gegeben. Diese Bodenaggressivität wird durch Bewertungszahlen für 12 zu betrachtende Eigenschaften des Bodens dargestellt, deren Summe ein Maß für die Korrosionswahrscheinlichkeit bildet (s. a. DVGW-Arbeitsblatt GW 9 – Beurteilung von Böden hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens auf erdverlegte Rohrleitungen und Behälter aus unlegierten und niedriglegierten Eisenwerkstoffen – und DIN 50829). Tabelle 3.2-7 umfaßt die einzelnen Bodenklassen anhand der Bodenaggressivität.

Längere Rohrleitungen liegen in den meisten Fällen in verschiedenen Bodenarten. Daher werden alle metallisch im Boden liegenden Rohrleitungen gegen Außenkorrosion geschützt.

Im allgemeinen wird, entsprechend dem DVGW-Regelwerk, in allen Rohren aus metallischem Werkstoff ein Innenschutz empfohlen. In der Wasserversorgung enthalten heute Rohre aus duktilem Gußeisen oder Stahl eine Zementmörtelauskleidung.

Hinsichtlich der Arten des Korrosionsschutzes wird unterschieden in den passiven und aktiven Schutz. Die Aufgabe der *passiven* Schutzmaßnahme ist es, angreifenden korrosiven Medien den Zutritt zur Rohroberfläche zu verwehren. Die Korrosion selber kann nur dann ablaufen, wenn Wasser und Sauerstoff (gelöst im Bodenelektrolyten) Zutritt zur Rohroberfläche haben und die Elektronenübergänge der einzelnen Teilreaktionen ablaufen können. Werden Wasser und Sauerstoff sowie andere korrosive Medien von der Rohroberfläche ferngehalten und der Elektronenfluß verhindert, so kann die Korrosionsreaktion nicht ablaufen. Eine absolute Sperrung des Zutritts des korrosiven Mediums ist in der Praxis nicht möglich, jedoch kann durch Wahl geeigneter Umhüllungsmaterialien eine akzeptable Medienabwehr erreicht werden. In Verbindung mit dem kathodischen Korrosionsschutz als aktive Schutzmaßnahme wird eine vernachlässigbar kleine Korrosionsgeschwindigkeit erreicht, was somit unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine optimale Lösung darstellt.

Zu dem passiven Korrosionsschutz gehören äußere und innere Anstriche oder Beschichtungen der Rohroberfläche. Dabei werden Anforderungen an den passiven Rohrschutz gestellt, wie

- chemische und mechanische Beständigkeit,
- Haftung am Rohr,
- Alterungs- und Temperaturbeständigkeit,

- Druck- und Schlagfestigkeit,
- geringe Sauerstoffdurchlässigkeit und Wasserdurchlässigkeit,
- hohes elektrische Isolationsvermögen sowie
- Dehnbarkeit.

Die letzten drei Anforderungen gelten nicht im Zusammenhang bei Anwendung der Zementmörtelauskleidung, wobei diese selbst auch eine passive Schutzmaßnahme darstellt.

Je nach Rohrwerkstoff kommen verschiedenartigste Systeme und Materialien als Außenschutz zur Anwendung. Dazu zählen u. a. der Korrosionsschutz durch Thermoplaste, Petrolatumbänder, bituminöse Stoffe, Kunststoffbänder, Schrumpfmaterialeien, duroplastische Kunststoffe. Weitere Ausführungen sind u. a. in (Baeckmann u. Jacob 1995; DIN TB 143, 168, 219 1995; Baeckmann 1996; Timm 1996; DIN TB 266 1997; Wossog et al. 1998) zu finden.

Schäden an der Rohrumhüllung durch Transport und Lagerung sind in der Regel sichtbar. Poren und Mängel an der manuell aufgetragenen Umhüllung sind dagegen in den meisten Fällen nur schwer erkennbar. Solche Fehler können aber mit Hilfe eines Hochspannungsgerätes aufgespürt werden. Die Spannung beträgt nach DIN 30672-1 bei Nachumhüllungen 5 kV + 5 kV/mm Schichtdicke der zu prüfenden Umhüllung, höchstens jedoch 25 kV. Dabei ist auf abweichende Prüfspannungen bei nichtmetallischen Rohrwerkstoffen zu achten. Prinzipiell sind nach erfolgter Ausbesserung der fehlerhaften Stellen diese erneut einer Prüfung zu unterziehen.

Aktive Schutzmaßnahmen dagegen können durch den elektrochemischen bzw. kathodischen Schutz in Vorgänge der Außenkorrosion eingreifen. Diese werden für Rohre aus duktilem Gußeisen nur im besonderen Fall und für Rohre aus Stahl als zusätzlicher Schutz angewandt. Dadurch werden unbekannte Fehlstellen in der Werks- und Nachumhüllung somit zuverlässig kathodisch geschützt. Hauptanwendung findet der kathodische Schutz bei der Bekämpfung von Boden- und Streustromkorrosionen. Voraussetzung für eine Anwendung des kathodischen Schutzes sind:

- ausreichender Umhüllungswiderstand der Rohrumhüllung (Isolierung),
- durchgehende elektrische Längsleitfähigkeit der Rohrleitung, somit auch der Muffenverbindungen sowie
- elektrische Trennung der Leitung von niederohmig geerdeten Anlagen und Fremdinstallationen mit Hilfe möglichst zugänglicher Isolierstücke.

Beim kathodischen Korrosionsschutz werden durch einen Verbund mit einer galvanischen Anode oder mit Hilfe einer Fremdstromquelle über eine Fremdstromanode so viele Elektronen dem zu schützenden Metallrohr zugeleitet, daß damit der kathodische Reduktionsvorgang vollständig befriedigt wird. Somit besteht keine Möglichkeit mehr für das Eisen, weiterhin als positive Eisenionen in Lösung zu gehen.

In bestimmten Fällen sind passive und aktive Schutzmaßnahmen notwendig, gegeben aus der Tatsache, daß unter einer PE-Umhüllung, im Gegensatz zur Verzinkung bei Gußrohren, bei Stahlrohren die blanke Metalloberfläche vorliegt. Der kathodische Schutz und die trennende Isolierung ergänzen einander.

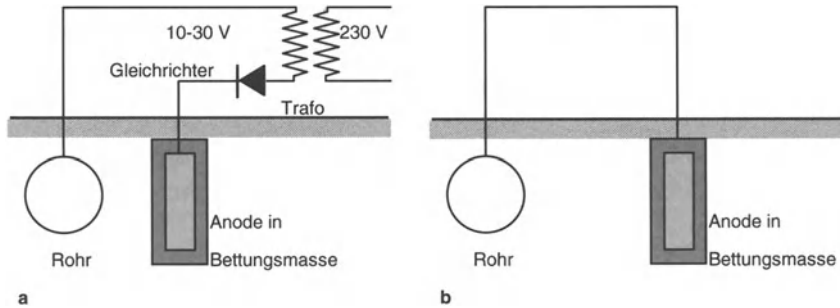


Abb. 3.2-12 Kathodische Schutzverfahren

a Fremdstromschutzverfahren, **b** Galvanische Schutzverfahren

Die Wahl der Art des kathodischen Korrosionsschutzes ist neben den Kosten insbesondere auch von der Güte der Rohrumhüllung abhängig. Die Anlagen selber sind gleichzeitig mit der Rohrleitung zu planen. Grundlage dazu bilden die DIN 30676 und das DVGW-Arbeitsblatt GW 12 – Planung und Errichtung kathodischer Korrosionsschutzanlagen für erdverlegte Lagerbehälter und Stahlrohrleitungen. Dabei kommen das Fremdstromschutzverfahren sowie die galvanischen Schutzverfahren zur Anwendung (Abb. 3.2-12). Mit dem Ziel, die Rohrleitungen über den gesamten Leitungsverlauf zu schützen, werden vorwiegend fremdgespeiste kathodische Schutzanlagen eingebaut. Diese haben gegenüber den galvanischen Schutzanlagen hauptsächlich den Vorteil, daß der Schutzstrom entsprechend den Erfordernissen eingestellt werden kann. Dafür wird Wechselstrom aus dem öffentlichen Netz bis auf einige 10 V heruntergespannt und gleichgerichtet. Als Anoden dienen anodisch passivierbare Werkstoffe, wie beispielsweise Eisenschrott, Aluminium, Magnetit oder Graphit, die wie Erder wirken. Diese Anoden sind mit dem positiven Pol, die zu schützende Rohrleitung mit dem negativen Pol der Gleichrichteranlage verbunden.

Bei dem galvanischen Schutzverfahren wird die Rohrleitung mit einer Anode über ein isoliertes Kabel metallisch verbunden. Sie werden vorwiegend beim kathodischen Schutz gut isolierter oder kurzer Rohrleitungen sowie zum örtlich begrenzten Schutz einzelner Korrosionsbereiche eingesetzt. Die galvanische Schutzanode, auch als Opferanode bezeichnet, muß aus einem unedleren Material als die schützende Rohrleitung bestehen. Sie bildet die Anode eines galvanischen Elementes, während die Rohrleitung dabei zur Kathode wird. Wegen der dadurch entstehenden Potentialdifferenz fließt ein Schutzstrom durch das Erdreich zur Rohrleitung und kompensiert den Korrosionsstrom. Als Werkstoff für die Anoden kommen überwiegend Magnesium oder Zink, aber auch Aluminiumlegierungen zum Einsatz. Um den Ausbreitungswiderstand der Anoden herabzusetzen und einen möglichst gleichmäßigen Materialabtrag zu erzielen, werden die Anoden mit einer gut leitfähigen Bettungsmasse umgeben.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Verlegeverfahren einschließlich ihrer Spezifika, soweit relevant und ihrer Einsatzgebiete vorgestellt. Für detaillierte Ausführungen sei an dieser Stelle bereits auf entsprechende Lite-

ratur verwiesen, wie u. a. (DIN TB 63 1993; Moser 1995; DIN TB 62, 160 1997; Mutschmann et al. 1997; DVGW 1998; Wossog et al. 1998; Behrens et al. 1999).

3.2.6.2 Verlegeverfahren Gußeisen

Werkstoff. Gußeisen wird nach der Farbe des Bruches unterschieden in weißes oder graues Gußeisen. Das graue Gußeisen enthält das Graphit entweder in lamellarer (lamellares Gußeisen: GG oder GGL) oder in globularer Form (globulares Gußeisen, sphärolithisches Gußeisen, duktiles Gußeisen oder Kugelgraphitguß: GGG). Die entsprechenden Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften sind für GG in DIN 1691 und für GGG in DIN 1693-1 enthalten.

Die nach dem Regelwerk möglichen Einsatzgrenzen sollten nicht voll ausgeschöpft werden, weil Einflüsse durch Druckstoß, Schwingungen, Biegebeanspruchungen gerade bei untergeordneten Rohrleitungen in ihrer Wirkung oft nicht einschätzbar sind. Eine Begrenzung auf PN 16 bei GG und PN 40 bei GGG erscheint sinnvoll.

Im Rohrleitungsbau haben Gußrohre für erdverlegte Wasserrohrleitungen große Bedeutung. Lamellares Gußeisen wurde aufgrund der günstigeren Zähigkeits- und Festigkeitseigenschaften durch duktiles Gußeisen verdrängt. Dadurch bedingt haben diese Rohre eine geringere Wandstärke und somit ein niedrigeres Gewicht. Weiterhin sind GGG-Rohre wesentlich elastischer, so daß in gewissem Umfang Biegespannungen aufgenommen werden können. Bei Überschreiten der Streckgrenze verformt sich GGG plastisch.

GG-Rohre werden heute nicht mehr hergestellt. Formstücke aus GG gibt es noch, soweit diese in Asbestzement- und PVC-Leitungen benötigt werden.

Rohrleitungen. GGG-Rohre werden vorrangig im Bereich DN 80–800 eingesetzt. Die technischen Lieferbedingungen für Druckrohre und Formstücke aus GGG richten sich nach DIN 28600. Tabelle 3.2-8 bezieht sich auf Rohre der Klasse K10 (Abb. 3.2-13). Die Lieferung von Rohren geringerer Wandstärke ist auf Vereinbarung möglich und zwar ab DN 200 in Klasse K9 und ab DN 350 in Klasse K8 und K9, wobei dann die zulässigen Betriebsdrücke niedriger sind. Wegen der möglichen Druckschwankungen bzw. Druckstöße muß der Betriebsdruck immer unter dem ausgewiesenen Nenndruck PN liegen (s. a. DIN 28610). Die wichtigsten Vorschriften – Gußrohrleitungen betreffend – sind in (DIN TB 9 1998) zusammengefaßt.

Empfohlen wird aber, immer Klasse 10 zu verwenden, um die Planungssicherheit für künftig höhere Betriebsdrücke zu haben, außer aus Kostengründen bei längeren Fernleitungen, die mit langfristigen Planungsdaten belegt sind.

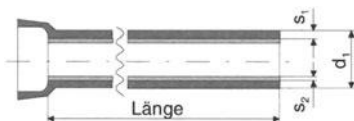


Abb. 3.2-13 Rohr aus duktilem Gußeisen (GGG)

Tabelle 3.2-8 Abmessung und Nenndrücke für Rohre aus duktilem Gußeisen

DN	Nenndruck PN			Außendurch- messer d_1 [mm]	Wandstärke s_2 für ZM ^a [mm]	Wandstärke s_1			Liefer- längen [m]
	K8	K9	K10			K8 ^b	K9 ^c	K10 ^d	
80	40	40	40	98	3	6,0	6,0	6,0	6
100	40	40	40	118	3	6,0	6,0	6,0	6
125	40	40	40	144	3	6,0	6,0	6,2	6
150	40	40	40	170	3	6,0	6,0	6,5	6
200	32	40	40	222	3	6,0	6,3	7,0	6
250	25	32	40	274	3	6,0	6,8	7,5	6
300	25	32	40	326	3	6,4	7,2	8,0	6
350 ^e	25	32	32	378	5	6,8	7,7	8,5	6
400	25	25	32	429	5	7,2	8,1	9,0	6
500	20	25	32	532	5	8,0	9,0	10,0	6
600	20	25	32	635	5	8,8	9,9	11,0	6
700	20	25	25	738	6	9,6	10,8	12,0	6 und 8
800	20	25	25	842	6	10,4	11,7	13,0	6 und 8
900	20	20	25	945	6	11,2	12,6	14,0	6 und 8
1000	20	20	25	1048	6	12,0	13,5	15,0	6 und 8
1200	20	20	20	1255	6	13,6	15,3	–	6 und 8

^a Zementmörtelauskleidung.

^b Wandstärke: $s_1 = 4 + 0,008 \cdot \text{DN}$, jedoch mindestens 6 mm sowie Berücksichtigung einer Überdeckungshöhe von 0,6–6 m und einer Verkehrslast SLW 60.

^c Wandstärke: $s_1 = 4,5 + 0,009 \cdot \text{DN}$, jedoch mindestens 6 mm sowie Berücksichtigung einer Überdeckungshöhe von 0,6–8 m und einer Verkehrslast SLW 60.

^d Wandstärke: $s_1 = 5 + 0,01 \cdot \text{DN}$, jedoch mindestens 6 mm sowie Berücksichtigung einer Überdeckungshöhe von 0,6–10 m und einer Verkehrslast SLW 60.

^e Dieser Nenndurchmesser ist möglichst zu vermeiden.

In der Regel werden als Verbindungen angegeben:

- Schraubmuffen für DN 40–400 nach DIN 28601,
- Stopfbuchsenmuffen für DN 500–1200 nach DIN 28602,
- Steckmuffen für DN 80–2000 nach DIN 28603 sowie
- Flansche für verschiedene Nenndrücke nach DIN 28604–28607.

Die *Schraubmuffen* bestehen aus einer Muffe mit Innengewinde in Sägeform, dem Dichtring aus Gummi mit einer härteren Schutzkante vorne und hinten und dem Schraubring aus GGG mit Außengewinde (s. Abb. 3.2-14a). Es wird empfohlen zusätzlich noch einen Gleitring aus Stahl beizulegen, damit der Schraubring mit geringer Reibung auf dem Dichtring läuft. Schraubmuffen sind, einen maßhaltigen Guß vorausgesetzt, leicht herstellbare und lösbare Rohrverbindung. Sie sind weitgehend beweglich bei absoluter Dichtigkeit. Schraubmuffen gestatten nach dem Anziehen des Schraubringes eine seitliche Ausknickung aus der Geraden in allen Richtungen bis 3°. Die Schraubmuffen sind nur bedingt zugfest, da die Reibkraft vom Anzugsmoment bei der Montage abhängig ist. Diese Verbindungsart kommt heute nicht mehr oft zur Anwendung.

Die *Stopfbuchsenmuffen* bestehen aus einer besonders geformten Muffe, dem Gummiring mit Hartgummispitze, dem Stopfbuchsenring und den Hammerkopf-

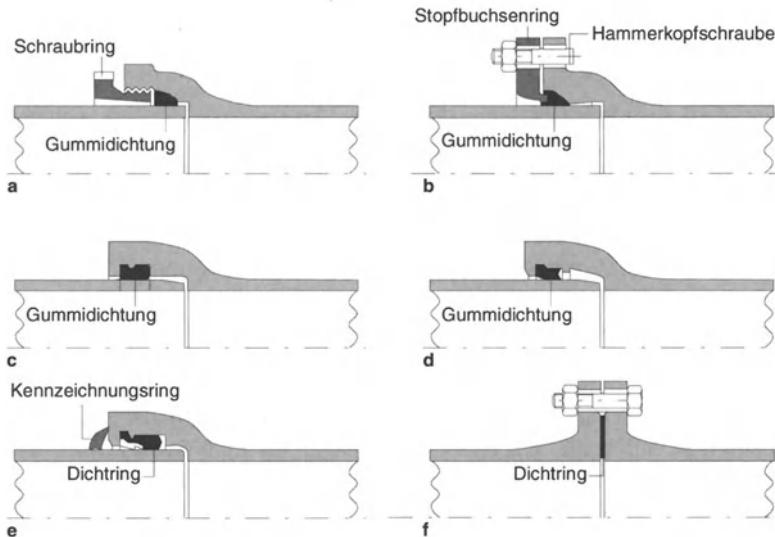


Abb. 3.2-14 Verbindungen für Rohre aus duktilem Gußeisen (GGG)
a Schraubmuffe, **b** Stopfbuchsenmuffe, **c** Steckmuffe TYTON-System (Form A und B),
d Steckmuffe System Standard (Form C), **e** zugfeste Steckmuffe nach TYTON-SIT
f Flansch

schrauben, alle Teile aus GGG (Abb. 3.2-14b). Die Muffe ist als Langmuffe ausgebildet und erlaubt so Bewegungen in positiver als auch negativer Längsrichtung von mehreren Zentimetern sowie eine seitliche Ausknickung, wie die TYTON-Muffe. Die Stopfbuchsenmuffe ist hinsichtlich der Längskraftübertragung wie eine Schraubmuffe einzuordnen.

Die *Steckmuffe* ist eine der am meisten angewandten Verbindung mit dem Vorteil der einfachen und schnellen Herstellung. Der Dichtring besteht aus einem Hartgummiteil am Rande, der in der Haltenut der Muffe liegt, und einem weichen Teil, der die eigentliche Abdichtung gegen das eingeschobene Spitzende des Rohres bewirkt. Die Muffe ermöglicht eine seitliche Ausknickung in Abhängigkeit des Nenndurchmessers, bis DN 300 bis zu 5 °, DN 400 bis 4 °, DN 500/600 bis 3 °. Die Elastizität der Dichtringe kompensiert Schwingungen und Bodenbewegungen. Abgestimmte Abmessungen der Muffe, Spitzende des Rohres und Dichtring sind für die Funktionssicherheit des Systems maßgebend. Dabei kommt für DN 80–1400 die Steckmuffe TYTON-System (Abb. 3.2-14c) und von DN 1000–2000 die Steckmuffe Standard (Abb. 3.2-14d) zur Anwendung.

Falls längskraftschlüssige Muffenverbindungen erforderlich sind, wie beispielsweise für instabile Böden oder beim Verlegen in Schutzrohren, werden Muffen mit Schub Sicherung verwendet. Dies trifft auch dort zu, wo sich Betonwiderlager für Krümmer nicht unterbringen lassen oder die Leitung sich nicht gegen Schachtwände abstützen kann. Für solche Fälle kommen zugfeste Steckmuffen unterschiedlichster Bauart zum Einsatz, wie z. B. TYTON-SIT (Abb. 3.2-14e). Bei dieser Bauart übernimmt ein Spezialdichtring mit einvulkanisierten Verriegelungs-

lungszargen die Sicherung gegen Herausziehen des Spitzendes des Rohres. Als weitere Bauarten können die Verbindungen TYS, NOVO-SIT oder TYS-K genannt werden.

Flanschverbindungen kommen hauptsächlich bei Formstücken vor, an welchen Armaturen mit Flansche angeschlossen werden, z. B. innerhalb von Bauwerken (Abb. 3.2-14f). Hier dienen sie zur Aufnahme von Längszugkräften. Für Wasserversorgungsleitungen genügen ebene Dichtleisten. Es werden lediglich nur bei höheren Drücken Flansche mit Vor- und Rücksprungleisten gewählt, die ein Herausdrücken der Dichtung verhindern. Als Dichtungsmaterial kommt Vollgummi mit Stahleinlagen zur Anwendung.

Erwähnenswert sind noch *Stemmuffen* in verschiedenen Formen, die aber nach dem heutigen Stand der Technik eine veraltete Lösung darstellen, sich aber noch im Einsatz befinden. Die Dichtung wird hierbei durch eingestemmtten Hanfstrick erreicht, der durch Bleivorlage gehalten wird. Unprägnierter Hanfstrick kann bei Freispigelleitungen durch die Wechselwirkung von Luft und Wasser verrotten. Bei dieser Verbindungsart handelt es sich um eine nahezu starre Rohrverbindung.

Formstücke aus duktilem Gußeisen dienen als Übergang von Rohren zu besonderen Einbauteilen, bei Erweiterungen oder Reduzierungen, bei Krümmungen und Abzweigen. Prinzipiell sind die Formstücke nach DIN 28622–28648 genormt. Auf eine Aufzählung wird in diesem Rahmen verzichtet.

Die Verwendung von muffenlosen Reststücken wurde durch die Einführung von Doppelmuffenformstücken ermöglicht, was somit zur Verringerung der Typenanzahl der Formstücke geführt hat. Die Formstücke besitzen wie die Rohre eine Zementmörtelauskleidung. Da duktiles Gußeisen schweißbar ist, stehen für spezielle Formstücke, wie Anschweißstutzen mit Spitzend-, Muffen-, Gewinde- und Flanschanschluß zur Verfügung.

Korrosionsschutz. Rohre aus duktilem Gußeisen sind in der Regel innen und außen wie Stahlrohre gegen Korrosion geschützt. Die Begründung dafür liegt darin, daß die Korrosionsträgheit wie beim früher üblichen lamellaren Gußeisen nicht vorhanden ist. Für den Außenschutz können verschiedene Materialien zum Einsatz kommen (Tabelle 3.2-9).

Umhüllungen mit Hilfe von Polyethylen und Zementmörtel können uneingeschränkt in allen Böden eingesetzt werden. Generell wird die Empfehlung gege-

Tabelle 3.2-9 Arten des Außenschutzes für Rohre aus duktilem Gußeisen (DIN 30675-2)

Umhüllung mit	Kurz- zeichen	Norm	Schicht- dicke [mm]	Einsatzbereich nach Bodenklasse
Polyethylen	PE	DIN 30674-1	1,8–3,0 ^a	I,II,III
Zementmörtel	ZM	DIN 30674-2	5,0	I,II,III
Zinküberzug mit Deckbeschichtung	Zn	DIN 30674-3	≥ 0,09 ^b	I,II
Beschichtung mit Bitumen	Bt	DIN 30674-4	0,07 ^c	I
Polyethylen-Folienumhüllung	F	DIN 30674-5	0,2	I,II,III

^a Abhängig vom Nenndurchmesser.

^b Zinkauflage ≥ 130 g/m².

^c Mittelwert (an keiner Stelle < 0,05).

ben, im städtischen Rohrleitungsbau wegen der häufig wechselnden Bodenklassen und der relativ großen Gefahr einer nachträglichen Beschädigung der Umhüllung des GGG-Rohres bei Aufgrabungsarbeiten seitens Dritter nur diese beiden oben genannten Arten der Umhüllung zu verwenden.

Bei dem Verfahren mit einem Zinküberzug beruht die Schutzwirkung auf einem elektrochemischen Prozeß. An äußeren Beschädigungen wirkt das Zink als Opferanode, d. h. es geht an Stelle von Eisen in Lösung. Das in Lösung gehende Zink wird in Form schwerlöslicher Zinksalze wieder ausgeschieden und bildet somit Deckschichten, die auch dann noch wirksam sind, wenn kein metallisches Zink mehr vorhanden ist.

Hinsichtlich des Innenschutzes werden GGG-Rohre serienmäßig mit einer Zementmörtelauskleidung nach DIN 2614 versehen. Die Auskleidung hat eine aktive und passive Schutzwirkung. Die aktive Wirkung beruht auf einem elektrochemischen Prozeß. Dabei dringt Wasser in die Poren des Zementmörtels ein, das durch die Aufnahme von freiem Kalk aus dem Mörtel einem pH-Wert von über 12 annimmt. In diesem pH-Bereich wird bei Gußeisen eine Korrosion verhindert. Die passive Wirkung ergibt sich durch die mechanische Trennung der metallischen Rohrwand vom Wasser. Die Dicke der Zementmörtelauskleidung ist nennweitenabhängig und beträgt für DN 80–300 gleich 3 mm, für DN 350–600 gleich 5 mm und für DN 700–1200 gleich 6 mm. Entstehende Haarrisse der Zementmörtelauskleidung sintern im Laufe der Zeit durch die im Wasser befindlichen Kalkkristalle wieder zu. Nach DIN 2614 sind Rißbreiten bis 1,5 mm unbedenklich.

Ein kaum zum Einsatz kommender Innenschutz ist der Bitumenüberzug. Dies ist darin begründet, daß die Beschaffenheit des Wassers langfristig nicht stabil bleibt, was zur Beeinträchtigung des Schutzes führen kann.

3.2.6.3 **Verlegeverfahren Stahl**

Werkstoff. In der Wasserversorgung werden überwiegend geschweißte und nahtlose Rohre aus unlegiertem Stahl verwendet. Dabei kommen geschweißte Rohre nach DIN 1626 in den Werkstoffen USt37.0, St37.0, St44.0 und St52.0 sowie nahtlose Rohre nach DIN 1629 in den Werkstoffen St37.0, St44.0 und St52.0 zum Einsatz. In besonderen Fällen, wie beispielsweise für Fernleitungen mit höchster Sicherheit, können auch geschweißte Rohre nach DIN 1628 und nahtlose Rohre nach DIN 1630 in den Werkstoffen St34.7, St44.4 und St52.4 Verwendung finden.

Stahlrohre zeichnen sich durch geringe Masse, leichte Verarbeitung und hohe mechanische Festigkeiten aus, sind weitgehend unempfindlich gegen Stoß, Schlag und Erschütterungen und können große Biegemomente aufnehmen. Ihr wesentlichster Nachteil ist die geringe Korrosionsbeständigkeit.

Rohrleitungen. In der Wasserversorgung werden überwiegend Rohre aus Stahl nach DIN 2460 verwendet. In der Tabelle 3.2-10 sind für verlegefertige geschweißte Stahlrohre die Abmessungen sowie in Abhängigkeit des Werkstoffes die entsprechenden Nenndrucke zusammengestellt. Vorgefertigte nahtlose Stahlrohre werden in den Abmessungen DN 80–500 mit der Normalwandstärke nach DIN 2448 hergestellt. Die Lieferlängen können 6–18 m betragen.

Tabelle 3.2-10 Auszug zu den Abmessungen und Nenndrücken geschweißter Stahlrohre für Wasserleitungen

DN	Außendurchmesser [mm]	Nennwandstärke ^a [mm]	Nenndrücke PN der Rohrleitung ^b				
			St37.0 $v_N = 0,9$	St37.0 $v_N = 0,9$	St52.0 $v_N = 0,9$	St37.0 $v_N = 1,0$	St52.0 $v_N = 1,0$
80	88,9	3,2	63	80	125	100	125
100	114,3	3,2	50	63	100	63	100
125	139,7	3,6	50	63	80	63	100
150	168,3	3,6	40	50	63	50	80
200	219,1	3,6	32	40	50	40	63
250	273,0	4,0	25	32	50	40	50
300	323,9	4,5	25	32	50	32	50
350	355,6	4,5	25	32	40	32	50
400	406,4	5,0	25	32	40	32	50
500	508	5,6	25	25	40	25	40
600	610	6,3	20	25	32	25	40
700	711	6,3	16	20	32	20	32
800	813	7,1	16	20	32	20	32
900	914	8,0	16	20	32	20	32
1000	1016	8,8	16	20	32	20	32
1200	1219	11,0	16	20	32	20	32
1400	1422	12,5	16	20	32	20	32
1600	1626	14,2	16	20	32	20	32
1800	1829	16,0	16	20	32	20	32
2000	2032	17,5	16	20	32	20	32

^a Die dazu erforderlichen Berechnungskriterien und Zuschläge sind aus der DIN 2460 zu entnehmen.

^b Die Wertigkeit der Schweißnaht v_N und die Stahlsorten entsprechenden der DIN 1626.

Die Verbindung der einzelnen Rohrleitungen erfolgt mit Hilfe von

- Schweißverbindungen,
- Muffenverbindungen,
- Flanschverbindungen oder
- Gewindeverbindungen, speziell für kleinere Nenndurchmesser.

Rohrleitungen größer DN 600, aber auch kleinere Rohre werden durch eine *Stumpfschweißung* (s. Abb. 3.2-15a) verbunden. Diese Verbindungsart ist besonders vorteilhaft für die Herstellung endloser Leitungsstränge. Alle Schweißverbindungen haben den schwerwiegenden Nachteil, daß beim Schweißen nicht nur die äußere, sondern auch die innere Schutzschicht zerstört wird. Wenn diese Stellen nicht einwandfrei nachisoliert werden, hat auch die übrige Rohrumhüllung und Auskleidung keinen Wert, da für die Lebensdauer der Rohrleitung die schwächsten Stellen maßgebend sind. Dabei braucht bei Trinkwasser der entstehende Spalt der Zementmörtelauskleidung von maximal 8–10 mm, wie er bei Rohr bis DN 600 vorhanden ist, nicht ausgebessert werden, da der Spalt selber ausheilt. Bei diesem Selbstheilungseffekt hat die Beschaffenheit des Wassers eine wesentliche Bedeutung.

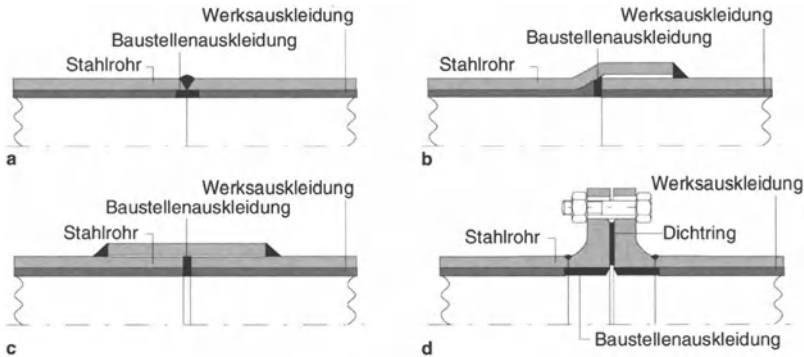


Abb. 3.2-15 Verbindungen für Rohre aus Stahl

a Schweißnaht, **b** Einsteckschweißmuffe, **c** Überschieb-Schweißmuffe, **d** Flansch

Für nicht begehbare Rohrleitungen kann auch die *Einsteckschweißmuffe* oder eine gummigedichtete *Steckmuffe* zur Anwendung kommen (Abb. 3.2-15b). Dabei ermöglicht die Einsteckschweißmuffe ein gänztliches Verschließen der Schweißstelle. Die Verbindung im Bereich DN 80–600 erfolgt vorzugsweise durch Steckmuffen in längskraftschlüssiger, also zugfester Ausführung, wobei je nach Leitungsführung auch eine Kombination mit nicht zugfesten Muffen möglich ist. Eine spezielle Form ist die Überschieb-Schweißmuffe, die zum Verbinden zweier Spitzenden dient (Abb. 3.2-15c).

Ebenso können Rohre aus Stahl durch werkseitig oder auf der Baustelle vorge-schweißte *Flansche* verbunden werden (Abb. 3.2-15d), welche insbesondere bei der Montage von Armaturen oder Formstücken zur Anwendung kommen.

Für Rohrleitungen kleiner DN 50, d. h. für Verbrauchs- und Gebäudeleitungen (verzinkt oder PE-umhüllt), wird überwiegend die *Gewindeverbindung* eingesetzt. Gewinderohre werden durch Tempergußmuffen oder -fittings mit Whitworth-Rohrgewinde nach DIN 2999-1 verbunden. Dabei handelt es sich um nicht lösbare Verbindungen, auch wenn sie demontierbar sind. Der durch das Gewinde unterbrochene Außenschutz ist sorgsam wiederherzustellen. Bei der Verlegung im Boden gilt dies auch für die Muffen und Formstücke, auch wenn diese aus dem weniger korrosionsempfindlichen Temperguß hergestellt sind. Stahlfittings werden in schwarzer und verzinkter Ausführung hergestellt und meist in Zusammenhang mit schweren Gewinderohren nach DIN 2442 eingesetzt. Für die Montage existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Fittings aus Stahl mit Gewindeanschluß. Stahlmuffen finden dabei häufig Anwendung, um einen entsprechenden Übergang auf Gewindeanschlüsse zu schaffen.

Bei der Verlegung von Stahlrohrleitungen kommen beliebige Formstücke aus Stahl zur Anwendung, welche mit dem entsprechenden Außen- und Innenschutz wie die dazugehörigen Rohre versehen sind. Für große Nenndurchmesser werden auch T-Stücke und andere Abzweige mit eingeschweißten Rohrstützen bis zum gleichen Nenndurchmesser für Durchgangs- und Abzweigrohr hergestellt. Ebenso ist es möglich, neben werkseitig hergestellten Krümmern bzw. Rohrbögen, diese mit speziellen Biegemaschinen in verschiedenen Radien vor Ort als Einschweiß-

stücke herzustellen. Auch hier ist nach Realisierung auf die Vervollständigung des Außen- und Innenschutzes zu achten.

Korrosionsschutz. Der Außenschutz, d. h. die Umhüllungen müssen so ausgelegt werden, daß sie ohne Erneuerung über 50 Jahre lang wirksam bleiben. Es kommen überwiegend thermoplastische Kunststoffe zur Anwendung, insbesondere Polyethylen (PE) nach DIN 30670. Außenschutz auf Bitumenbasis nach DIN 30673 wird nur noch ausnahmsweise angewendet. Bei der Verlegung in Gebäuden werden Stahlrohrleitungen bis DN 50 in verzinkter Ausführung nach DIN 2444 verwendet.

Hinsichtlich des Innenschutzes werden Stahlrohre, genau wie GGG-Rohre, serienmäßig mit einer Zementmörtelauskleidung nach DIN 2614 versehen. Die Dicke der Zementmörtelauskleidung ist nennweitenabhängig und kann 3–12 mm betragen. Eventuell entstehende Haarrisse der Zementmörtelauskleidung sintern im Laufe der Zeit durch die im Wasser befindlichen Kalkkristalle wieder zu. Nach DIN 2614 sind Rißbreiten bis 1,5 mm unbedenklich.

Ein kaum zum Einsatz kommender Innenschutz ist der Bitumenüberzug. Dies ist darin begründet, daß die Beschaffenheit des Wassers langfristig nicht stabil bleibt, was zur Beeinträchtigung des Schutzes führen kann.

3.2.6.4

Verlegeverfahren Asbestzement

Werkstoff. Wie die Bezeichnung Asbestzement ausdrückt, besteht dieser Werkstoff aus Asbest und Zement. Asbest selbst ist ein faseriges Magnesiumhydrosilikat-Mineral. Die feinsten Fasern betragen etwa 1/10.000 mm. Die beiden Hauptanteile Asbestfasern und Bindemittel werden miteinander gemischt und mit der entsprechenden Menge Wasser versehen. Die Fasern bilden die Armierung des mit Normzementen hergestellten Asbestzementes. Das Asbestzementgemisch wird als dünnes, endloses Vlies auf blanke Stahlkerne, welche die Größe des jeweiligen Innendurchmessers besitzen, unter Druck gewickelt. Anschließend härtet das Rohr im Wasserbad spannungsfrei aus.

Asbestzement ist von seinen Eigenschaften her beständig, dicht, chemisch und bakteriologisch unempfindlich. Er läßt sich spanabhebend bearbeiten. Die Rohre besitzen ausreichende Festigkeiten und sind zähelastisch. Die Oberfläche im Inneren des Rohres ist hydraulisch glatt. Asbestzement weist eine geringe Wärmeleitfähigkeit aus. Die Neigung zur Inkrustation ist sehr gering.

In Deutschland durften asbesthaltige Erzeugnisse für Druckrohre für den Tiefbaubereich nur noch bis 31.12.1993 hergestellt und bis zum 31.12.1994 verwendet werden. Dabei wird unter dem Begriff – Verwendung – Einbau, Reparatur und Ersatz im Sinne der Gefahrenstoffverordnung verstanden. Der Betrieb selbst stellt kein Verwenden dar. Allerdings gilt eine generelle, unbefristete Ausnahme für Instandhaltungen an bestehenden Anlagen.

Gegeben aus dieser Tatsache sind im Zuge der Entwicklung asbestfreie Faserzement-Druckrohre für die Wasserversorgung in Erprobung. Alle für Asbestzement gemachten Ausführungen werden hier in ähnlicher Weise zutreffen.

Tabelle 3.2-11 Abmessungen für Rohre aus Asbestzement

DN	PN 10		PN 12,5		PN 16	
	Außendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]	Außendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]	Außendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]
100	120	10	124	12	130	15
125	149	12	153	14	159	17
150	178	14	182	16	190	20
200	234	17	240	20	252	26
250	286	18	296	23	308	29
300	342	21	352	26	368	34
350	400	25	410	30	428	39
400	456	28	470	35	488	44
450	510	30	524	37	546	42
500	564	32	582	41	606	53
600	678	39	698	49	726	63

Rohrleitung. Rohre aus Asbestzement werden für die Nenndrücke PN 2,5–16 hergestellt, wobei in der Wasserversorgung nur die Druckstufe PN 10–16 in Betracht kommen. Rohre unter PN 10 sind grundsätzlich nicht zugelassen. Für die Abmessungen, Festigkeiten und deren Abweichungen gilt DIN 19800. In der Tabelle 3.2-11 sind die Abmessungen in Abhängigkeit des Nenndruckes zusammengestellt. Der Innendurchmesser entspricht dabei dem Nenndurchmesser. Ab DN 700 werden die Rohre nach den Belastungs- und Betriebsbedingungen gemäß den Festigkeitsanforderungen der DIN 19800 bemessen. Hergestellt werden Rohre bis DN 2000. Die Lieferlängen sind vom jeweiligen Nenndurchmesser abhängig; es gelten 4 m für DN 100–150 und 5 m für DN 200–600.

Die Wanddicken sind so bemessen, daß bei Druckrohren bis DN 100 der 4-fache Nenndruck, bei Druckrohren der DN 125–200 der 3,5-fache Nenndruck und bei Druckrohren der DN 250–400 der 3-fache Nenndruck garantiert ist.

Prinzipiell ist noch anzumerken, daß die Rohrwandung trockener Rohre aus Asbestzement Wasser aufnimmt. Diese Wasseraufnahme muß bei der Durchführung von Druckproben berücksichtigt werden.

Für die Verbindung der Rohre aus Asbestzement existieren verschiedenartigste Varianten. Bei allen Kupplungen wird durch Gummiringe gedichtet, wobei zwischen Gummigleitverbindungen (z. B. Reka), Gummirollverbindungen (z. B. Simplex) und Gummiquetschverbindungen (z. B. Gibault) zu unterscheiden ist. Letztere kommt auch bei anderen Rohrwerkstoffen zum Einsatz. Die *Reka-Kupplung* (s. Abb. 3.2-16a–c) besteht aus einer Überschiebmuffe ebenfalls aus Asbestzement, in die 2 konische, gezahnte (lamellenförmig) Dichtringe eingelegt werden, deren Lippen sich beim Einschieben der maßgerecht bearbeiteten Rohrenden nach innen legen. Die Rohre können etwas in der Kupplung verschwenkt werden. Eine Sonderausführung ist dabei die *Reka-Langkupplung* (s. Abb. 3.2-16b), welche ein großes axiales Spiel ermöglicht, wie es beispielsweise in Bergsenkungsgebieten erforderlich ist. Für Dükerleitungen oder Leitungen in Schutzrohren kommt ab DN 150 die *zugfeste Reka-Kupplung* (s. Abb. 3.2-16d) zur Anwendung. Durch zwei sich gegenüberliegende Nuten in der Überschiebmuffe

und an den beiden Rohrenden wird ein Stahlseil als Scherelement durch eine tangentielle Bohrung eingeschoben. Bei der *Simplex-Kupplung* (Abb. 3.2-16e) werden 2 Gummiringe auf ein Rohrende aufgezogen und die Überschiebmuffe über den Rohrstoß aufgerollt. In die *Magnani-Kupplung* (Abb. 3.2-16f) werden 3 Gummiringe eingelegt. In allen Fällen brauchen die Rohre nur in die Überschiebmuffe eingesteckt zu werden. Dabei ist zu beachten, daß im Interesse der Beweglichkeit die Rohrenden nicht zusammenstoßen. Die Magnani-Kupplung verhindert dies von selbst durch den mittleren Gummiring. Diese doppelgelenkigen Kupplungen lassen durchaus eine seitliche Ausknickung von 3–4 °, bei kleineren Nenndurchmessern sogar bis 6 ° zu. Zu dieser Kategorie gehört auch die Kuas-Kupplung. Dabei handelt es sich um eine Gummigleitringverbindung wie die Reka-Kupplung, doch werden Rundgummiringe wie bei der Magnani-Kupplung eingesetzt. Die gußeiserne, dreiteilige *Gibault-Kupplung* (Abb. 3.2-16g) kam seltener zur Anwendung. Ferner existieren noch Kupplungen zum Übergang auf Rohre anderen Werkstoffes und Außendurchmessers oder zur Verbindung zweier Rohre aus Asbestzement verschiedener Nenndurchmesser ohne Verwendung eines Zwischenformstückes. Als Abgang einer Hausanschlußleitung bis DN 50 dient die Reka-Kupplung mit festeingebauten Abgangsstützen mit Außengewinde, woran sich unmittelbar ein Absperrventil anschließen läßt.

Die Formstücke für Rohre aus Asbestzement sind in den meisten Fällen aus Gußeisen oder Stahl, mit entsprechenden Rohrenden, passend zur Reka-Kupplung.

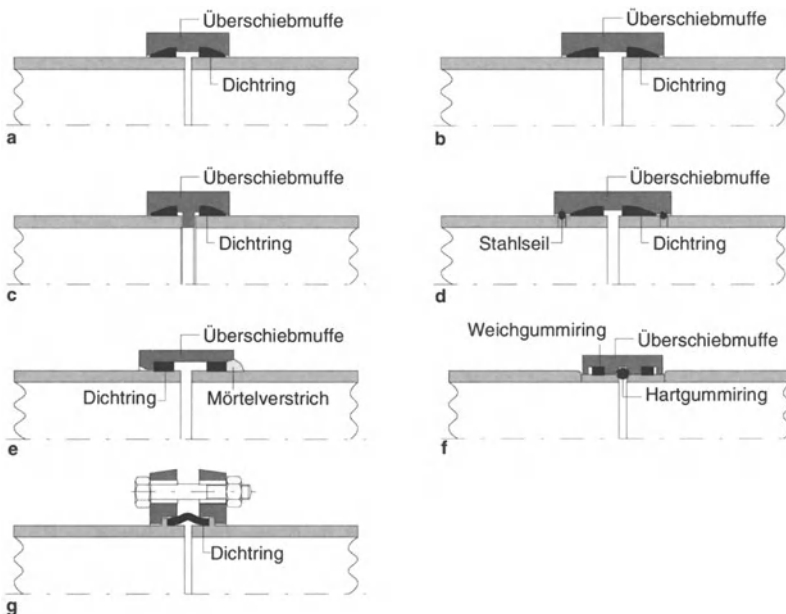


Abb. 3.2-16 Verbindungen für Rohre aus Asbestzement

a Reka-Kupplung, **b** Reka-Langkupplung, **c** Reka-Übergangskupplung mit Anschlagring, **d** zugfeste Reka-Kupplung, **e** Simplex-Kupplung, **f** Magnani-Kupplung, **g** Gibault-Kupplung

Erwähnenswert an dieser Stelle ist die Herstellung von Schächten aus asbestfreien Faserzement-Rohren. Die Konstruktion kann in stehender oder liegender Anordnung ausgeführt werden. Die Vorteile dieser Fertigbauweise liegen vor allem in der Verkürzung des Offenhaltens der Schachtbaugruben sowie in dem problemlosen Anbringen von späteren Rohrdurchführungen.

Korrosion. Für die Korrosion sind sowohl die jeweiligen Bodenverhältnisse als auch die im Wasser gelösten Stoffe maßgebend. In den meisten Fällen handelt es sich jedoch um elektrolytische Korrosion. Da aber der Werkstoff Asbestzement ein schlechter elektrischer Leiter ist, spielt sie hier keine Rolle. Korrosionsgefährdet ist praktisch nur der Zement durch kalkaggressive Wässer oder Böden. In der Regel wird werkseitig auch bei nicht aggressiven Böden oder Wässern außen eine Beschichtung aus Bitumen aufgebracht. Der äußere Bitumenüberzug bedingt jedoch absolut wasserdichte Rohre. Anderenfalls löst er sich durch Blasenbildung. Erforderlichenfalls ist innen ein Schutz durch Bitumen möglich.

3.2.6.5

Verlegeverfahren Spann- und Stahlbeton

Werkstoff. Rohre aus Spann- oder Stahlbeton bestehen aus Beton mit dichtem Gefüge unter Verwendung von Normenzement, gegebenenfalls auch Sonderzement mit erhöhtem Widerstand gegen Sulfatangriffe. Als Spannstähle werden kalt gezogene Drähte verwendet.

Als besonderer Vorteil von Rohren aus Spann- und Stahlbeton ist die hohe Lebensdauer bei nicht betongefährlichen Wässern und Böden zu werten. Es findet keine Korrosion und Inkrustation statt.

Nachteilig dagegen wirkt das Gewicht der Rohre, weil Beton im Gegensatz zu Rohren aus Gußeisen oder Stahl eine relativ geringe Zugfestigkeit besitzt und deshalb bei schlaff bewehrten Rohren aus Stahlbeton größere Wanddicken notwendig werden. Die geringe Zugfestigkeit des Betons einerseits und die relativ hohe Druckfestigkeit andererseits führten zur Entwicklung von Rohren aus Spannbeton.

Rohrleitung. Bei Druckrohren aus Spann- und Stahlbeton handelt es sich um Rohre, die nach den für den Spann- bzw. Stahlbeton allgemein geltenden Regeln unter Berücksichtigung des Herstellverfahrens aufgrund statischer Erfordernisse außer gegen andere Kräfte auch gegen inneren Überdruck und Unterdruck bewehrt sind. Die Rohrwandung der Rohre aus Spannbeton steht im Gegensatz zu der aus Stahlbeton unter einer auf den ganzen Rohrumfang wirkenden Betondruckspannung. Infolge der immer relativ großen Wanddicke besteht bei diesen Rohren keine Einbeulgefahr bei Unterdruck.

Rohre aus Stahlbeton können mit Hilfe des Rüttel-, Schleuder-, Vakuum- und Walz-Verfahrens, Rohre aus Spannbeton in einem oder 3 Arbeitsgängen hergestellt werden. Weitere Ausführungen enthält dazu u. a. (Schwaigerer 1986 u. Mutschmann et al. 1997).

Rohre aus Spann- oder Stahlbeton werden in DN 250–4000 hergestellt, wobei in der Wasserversorgung meist nur ab DN 500 aufwärts diese zum Einsatz kom-

men. Ein entsprechendes Beispiel ist in (Naber 1990) beschrieben. Während für niedrige Betriebsdrücke (bis zu 0,3 bar) schlaff bewehrte Rohre aus Stahlbeton Verwendung finden, werden für Nenndrücke PN 16 und höher Rohre aus Spannbeton hergestellt. Die Abmessungen werden der Konstruktion, Bemessung und dem Herstellungsverfahren durch eigene Normen der Hersteller angepaßt. Die Lieferlängen dieser Rohre liegen zwischen 2,5–8 m, aber in der Regel bei 5 m.

Die Fertigung der Typenrohre basiert auf der Bemessung bestimmter Belastungsannahmen, wie Erd- und Verkehrslast sowie Innendruck (s. a. DVGW-Arbeitsblatt W 341 – Rohre aus Spannbeton und Stahlbeton in der Trinkwasserversorgung). Bei der Verlegung von Fernleitungen ist es üblich, entsprechende Anpassungen an die jeweiligen örtlichen Verhältnisse vorzunehmen.

Hinsichtlich der Verbindungen bei Rohren aus Spann- oder Stahlbeton kommt in den überwiegenden Fällen die *Glockenmuffe* (Abb. 3.2-17a) mit Rollgummidichtung zum Einsatz. Die Rohrenden besitzen eine große Maßgenauigkeit und verformen beim Zusammenschieben den runden Gummidichtring auf etwa den halben Ausgangsquerschnitt. Die Abdichtung erfolgt durch die elastische Verformung des Gummidichtringes, wobei später noch die zusätzliche Anpreßkraft, hervorgerufen durch den Innendruck des Wassers, hinzukommt.

Bei einer Verbindung mit *Quetschgummidichtung* (Abb. 3.2-17b) wird durch eine Nut am Rohrende, die eventuell mit verzinkten Stahlringen verstärkt ist, die Lage des Gummiringes fixiert. Es erfolgt also kein Abrollen beim Einbau wie bei der Glockenmuffe, sondern lediglich eine Pressung, wobei die Muffenseite mit entsprechendem Anlauf ausgebildet ist. Eine Sonderausführung einer Quetschgummidichtung mit *Überschieber* zeigt Abb. 3.2-17c, welche insbesondere für den nachträglichen Einbau von Formstücken und für Übergänge auf Rohre anderer Werkstoffe zur Anwendung kommt.

Zuweilen ist es erforderlich, von einer Rohrleitung aus Spann- oder Stahlbeton auf Rohrleitungen aus anderen Werkstoffen bzw. auf andere Querschnitte überzugehen. Entsprechende Übergangsstücke für Rohre aus Gußeisen, Stahl oder Asbestzement werden dazu entsprechend gefertigt (Schwaigerer 1986). Damit ist es möglich, Formstücke beispielsweise aus Gußeisen oder besonderen Stahlblechmantel-Konstruktionen einzusetzen.

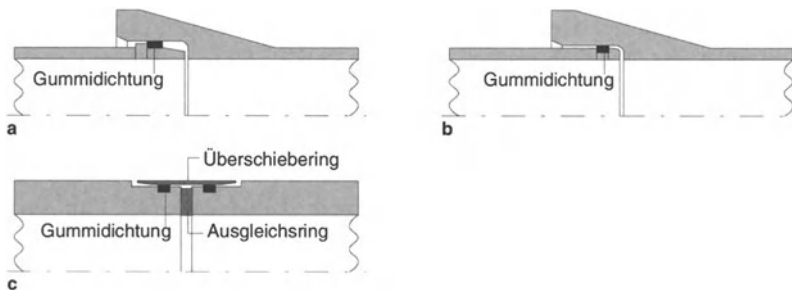


Abb. 3.2-17 Verbindungen für Rohre aus Spann- und Stahlbeton

a Glockenmuffe, **b** Verbindung mit Quetschgummidichtung, **c** Verbindung mit Überschieber

Korrosionsschutz. Für Rohre aus Spann- oder Stahlbeton sind Außen- bzw. Innenschutz in der Regel nicht notwendig, gegebenenfalls werden die Rohre aus Sonderzement hergestellt. Als Beschichtungen kommen im Bedarfsfall Kunststoff, Bitumen (für innen und außen) oder Teerpech (nur für außen) zum Einsatz.

3.2.6.6

Verlegeverfahren Kunststoff

Werkstoff. Die Kunststoffarten lassen sich grundsätzlich in Thermoplaste und Duroplaste unterteilen. *Thermoplaste* lassen sich durch Erwärmen jederzeit in einen plastischen Zustand versetzen, während sie bei Raumtemperaturen spröde oder hart sind. Weiterhin sind sie schmelzbar, schweißbar, quellbar und löslich. Der Aufbau ist einem Knäuel verschlungener langer Fadenmoleküle ähnlich, wobei die Fäden nicht durch Querverbindungen vernetzt sind. Thermoplastische Kunststoffe haben alle eine temperaturabhängige abfallende Langzeitfestigkeit und Fließfähigkeit.

Duroplaste dagegen sind chemisch gehärtete Kunststoffe, die durch Erwärmen nicht wieder in den plastischen Zustand zurückversetzt werden können. Sie sind somit temperaturstandfest, nicht plastisch verformbar, nicht schmelz- und schweißbar, unlöslich und nur schwach quellbar. Duroplaste sind aus untereinander vernetzten Fadenmolekülen aufgebaut, wobei ihr Widerstand gegen Verformung und ihre Warmfestigkeit mit dem Vernetzungsgrad steigt.

Beide Kunststoffarten können nach dem Gefügebau nochmals unterteilt werden in amorph und amorph-kristalline Typen. Im amorphen Gefüge sind die Moleküle völlig ungeordnet strukturiert. Dagegen liegt im amorph-kristallinen Gefüge ein Teil der Moleküle kristallähnlich geordnet zwischen ungeordneten Molekülen vor und besitzt deshalb daher im allgemeinen eine höhere mechanische Festigkeit als rein amorphe Typen. Zu den amorphen Typen zählt z. B. Polyvinylchlorid, während zu den amorph-kristallinen Typen beispielsweise Polyäthylen⁵ oder Polypropylen gehören.

Weitere wichtige Eigenschaften für Rohre aus Kunststoff sind deren Unempfindlichkeit gegen Korrosion und die nahezu hydraulisch glatte Rohrwandung im Inneren.

Zu den wichtigsten Vertretern thermoplastischer Kunststoffe im Rohrleitungsbau gehören:

- PVC-U: weichmacherfreies Polyvinylchlorid,
- PVC-C: nachchloriertes Polyvinylchlorid,
- PE-HD: Polyäthylen hoher Dichte,
- PE-LD: Polyäthylen niedriger Dichte und
- PP: Polypropylen.

Daneben werden auch die Kunststoffe, wie Polybuten-1 (PB), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), vernetztes Polyethylen (VPE), Polyvinylidenfluorid (PVDF) und Polytetrafluorethylen (PTFE) zu Rohren verarbeitet.

⁵ In der Literatur sind für einen Werkstoff die beiden unterschiedlichen Schreibweisen Polyäthylen und Polyethylen zu finden.

Tabelle 3.2-12 Einsatzrichtwerte für Rohre aus Kunststoff

Kunststoff	zulässiger Betriebsdruck bei 20 °C für Wasser [bar]	zulässiger Temperaturbereich ^a	
		minimal [°C]	maximal [°C]
PVC-U	16	-10	+60
PVC-C	25	-10	+90
PE-HD	10	-50	+60
PE-LD	10	-50	+60
PP	10	-10	+80
UP-GF	32 ^b	-20	+110 ^c

^a In Abhängigkeit vom Betriebsdruck.^b In Abhängigkeit von Vernetzung und Harztyp.^c Kurzzeitige Belastung bis +130 °C möglich.

Duroplaste finden wegen der oben genannten Eigenschaften im Rohrleitungsbau nur begrenzte Anwendung. Für die Herstellung sind ungesättigte Polyesterharze (UP) und Epoxidharze (EP) von besonderer Bedeutung. Die Rohre aus UP-GF⁶ und EP-GF sind ein Verbund von Reaktionsharzformstoffen und Textilglasfasern.

Tabelle 3.2-12 umfaßt die jeweiligen Einsatzrichtwerte für Rohre aus Kunststoffen. Hinsichtlich der Herstellung und Eigenschaften der einzelnen Kunststoffe können folgende Angaben gemacht werden. PVC-U wird hergestellt durch Polymerisation von Vinylchlorid. Es ist dielektrisch, schwer entflammbar, frost- und bruchsicher und thermisch umformbar. Dieser Werkstoff besitzt einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizient gegenüber Stahl und erfordert somit Maßnahmen zur Kompensation der Wärmedehnung. PVC-C besteht aus einem schlagzähen, modifizierten und weichmacherfreien Polyvinylchlorid (nachchloriert). PE ist ein aus Ethylen hergestelltes Polymerisat. Es ist dielektrisch, brennbar, jedoch nicht quell- oder lösbar, so daß PE nicht verklebt werden kann. PP gehört zur Gruppe der Polyolefine und wird hergestellt aus Propylen durch Polymerisation. Im Rohrleitungsbau sind 3 verschiedene Lieferformen üblich: Das PP-Homopolymerisat (PP-H), das PP-Block-Copolymerisat (PP-B) und das PP-Random Copolymerisat (PP-R). Für die Herstellung von Fittings und Armaturen wird unter Berücksichtigung der günstigen Charakteristik der Zeitstandskurven überwiegend PP-H eingesetzt. PP ist hochwärmestabilisiert, besitzt jedoch keine besondere Ausrüstung gegen Einwirkung von UV-Strahlen und muß somit im Bedarfsfall entsprechend geschützt werden. Die Oberfläche ist nicht quell- oder lösbar, so daß Kleben nur bedingt möglich ist. PP ist brennbar und mit der chemischen Beständigkeit von PE vergleichbar. Der duroplastische Verbundwerkstoff UP-GF besteht aus glasfaserverstärkten (GF) ungesättigten (U) Polyesterharzen (P) und Füllstoffen. Nach DIN 16948-2 sind neun glasfaserverstärkte Reaktionsharzformstoffe genormt. Die Glasfasern aus alkalifreiem Aluminium-Bor-Silikat-Glas besitzen einen Faserdurchmesser von etwa 10 µm. Dagegen dient als Füllmittel gewachse-

⁶ Während Rohre aus UP-GF in Österreich, Holland und Schweden für den Trinkwassertransport seit Jahren eingesetzt werden, liegt in Deutschland dagegen noch keine Zulassung vor. Derzeit läuft dazu das Verfahren, wobei die Rohre selbst bereits in der DIN 16869 erfaßt sind.

ner, feuergetrockneter Quarzsand. Dieser Kunststoff ist temperaturfest, nicht plastisch verformbar, nicht schmelz- und schweißbar, unlöslich, nur schwach quellbar und normal entflammbar. Weitere Ausführungen, zum Teil nur zu einzelnen Kunststoffen, enthält dazu u. a. das DVGW-Arbeitsblatt W 320' – Herstellung, Gütesicherung und Prüfung von Rohren aus PVC hart, HDPE und LDPE für die Wasserversorgung und Anforderungen an Rohrverbindungen und Rohrleitungsteile – sowie (KRV 1997; Mutschmann et al. 1997; Wossog et al. 1998).

Rohrleitung. Rohre aus *PVC-U* sind in 6 Wanddickenreihen nach DIN 8062 genormt. Rohre der Reihe 1 sind für die Lüftungstechnik vorgesehen, Rohre der Reihe 6 für spezielle Rohrleitungen der chemischen Industrie. Die Bemessung der Wanddicke erfolgt nach der Forderung einer Mindestzugspannung von 25 N/mm^2 bei einer Dauerbelastung durch den Nennndruck bei 20°C von 50 Jahren. Die Berechnungsspannung berücksichtigt dabei eine Sicherheit von 2,5. In der folgenden Tabelle 3.2-13 sind Wasserleitungsrohre für PN 10 und PN 16 des Rohrtyps PVC 100 nach DIN 19532 aufgeführt⁸. Die Rohrfarbe ist dunkelgrau. Der Nenn-durchmesser weicht vom tatsächlichen Innendurchmesser ab.

Für Rohre aus *PVC-C* sind in 7 Wanddickenreihen nach DIN 8079 von drucklos bis PN 25 für Außendurchmesser von 40–630 mm genormt. Der Sicherheitsfaktor für die Bemessung der Wanddicke beträgt für diesen Werkstoff 2,75.

Die Verbindung der Rohre erfolgt überwiegend durch Muffen, Kleben oder Flansche. Bei der Einsteckmuffe (Abb. 3.2-18a, b) handelt es sich um eine Muffe

Tabelle 3.2-13 Maße für Rohre aus PVC 100

DN	Außendurch- messer [mm]	PN 10 Innendurch- messer [mm]	Wand- stärke [mm]	PN 16 Innendurch- messer [mm]	Wand- stärke [mm]
10	16	–	–	13,6	1,2
15	20	–	–	17,0	1,5
20	25	–	–	21,2	1,9
25	32	–	–	27,2	2,4
32	40	–	–	34,0	3,0
40	50	–	–	42,5	3,7
50	63	57,0	3,0	40,6	4,7
65	75	67,8	3,6	53,6	5,6
80	90	81,4	4,3	63,8	6,7
100	110	99,4	5,3	76,6	8,2
125	140	126,6	6,7	93,6	10,4
150	160	144,6	7,7	119,2	11,9
200	225	203,4	10,8	136,2	16,7
250	280	253,2	13,4	191,6	20,8
300	315	285,0	15,0	238,4	23,4
400	450	407,0	21,5	268,2	–

⁷ Dieses Arbeitsblatt befindet sich derzeit in Überarbeitung und wird GW 335.

⁸ Die Abmessungen für *PVC-U* nach DIN 8062 (GF 1996) weichen von der DIN 19532 ab.

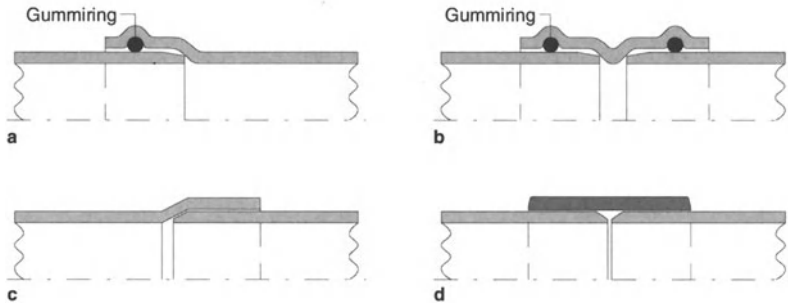


Abb. 3.2-18 Verbindungen für Rohre aus PVC-U

a einseitige Einsteckmuffe, **b** doppelseitige Einsteckmuffe **c** angeformte Klebemuffe, **d** Klebemuffe als Überschieber

mit einer ausgebildeten Sicke für den Dichtring, wobei die Wanddicke der Muffe selbst größer als die des Rohres ist, gegeben durch die höhere Randzugsspannung. Die Steckmuffen werden für DN 50–400 gefertigt. Klebemuffen (Abb. 3.2-18c, d) kommen für DN 10–300 zur Anwendung, wobei die Klebemuffe in Form einer zylindrischen kalibrierlosen Verbindung mit einfachem Überschieber nur für DN 10–200 angewendet wird. Klebeverbindungen sind in der Werkstatt einfach, am Rohrgraben aber witterungsabhängig und somit schwieriger herzustellen. Unter 5 °C ist das Kleben von PVC nicht mehr möglich. Aus diesen Gründen ist Kleben im erdverlegten Rohrleitungsbau nicht mehr gebräuchlich. Neben diesen Verbindungsmöglichkeiten kommen Flansche für DN 50–400 auch als Spreizringflansch, Verschraubungen für DN 10–80 sowie Schalenkupplungen zum Einsatz. Dabei sind Flanschverbindungen mit Spreizringflansch sowie Schalenkupplungen längskraftschlüssig.

Formstücke aus PVC-U werden in ausreichender Auswahl zur Verfügung gestellt, so daß alle Verbindungen mit Abzweigungen zusammengebaut werden können. Diese besitzen in den überwiegenden Fällen Muffenenden. Zum Übergang auf metallische Rohre oder Armaturen gibt es besondere E- und F-Stücke mit Flanschen.

Rohre aus *PE-LD* sind in 3 Wanddickenreihen nach DIN 8072 für PN 2,5–10 für Außendurchmesser 10–160 mm genormt. Diese Rohre können zwar für Trinkwasserleitungen verwendet werden, sind jedoch in der Wasserversorgung nicht gebräuchlich, allein gegeben durch die Druckbegrenzung. Rohre aus *PE-HD* sind in 6 Wanddickenreihen nach DIN 8074 für PN 2,5–16 für Außendurchmesser 10–1600 mm genormt. Die Bemessung der Wanddicke erfolgt ebenso wie bei Rohren aus PVC nach der Forderung einer Mindestzugspannung von 8 N/mm^2 bei einer Dauerbelastung durch den Nenndruck bei 20 °C von 50 Jahren. Die Berechnungsspannung berücksichtigt dabei eine Sicherheit von 1,6. Diese Rohre sind leicht und biegsam. Die Lieferlängen können 5, 6 und 12 m oder bei Ringbunden bis DN 125 etwa 100 m, bei kleineren Nenndurchmessern auf Stahltrommeln bis zu 2000 m betragen.

Tabelle 3.2-14 Maße für Rohre aus PE-HD (Auszug)

DN	PN 10 (DIN 19533)			PN 10 (DIN 8074)		PN 16 (DIN 8074)	
	Außendurchmesser [mm]	Innendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]	Innendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]	Innendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]
15	20	16,0	2,0	16,2	1,9	14,4	2,8
20	25	20,4	2,3	20,4	2,3	18,0	3,5
25	32	26,0	3,0	26,0	3,0	23,0	4,5
32	40	32,6	3,7	32,6	3,7	28,8	5,6
40	50	40,8	4,6	40,8	4,6	36,2	6,9
50	63	51,4	5,8	51,4	5,8	45,6	8,7
65	75	61,2	6,9	61,2	6,9	54,2	10,4
80	90	73,6	8,2	73,6	8,2	65,0	12,5
	110	–	–	90,0	10,0	79,6	15,2
100	125	102,2	11,4	102,2	11,4	90,4	17,3
	140	–	–	114,4	12,8	101,2	19,4
125	160	130,8	14,6	130,8	14,6	115,8	22,1
150	180	147,2	16,4	147,2	16,4	130,2	24,9
	200	–	–	163,6	18,2	144,8	27,6
	225	–	–	184,0	20,5	162,8	31,1
200	250	204,4	22,8	204,4	22,8	181,0	34,5
	280	–	–	229,0	25,5	202,6	38,7
250	315	257,6	28,7	257,6	28,7	228,0	43,5
300	355	290,4	32,3	290,4	32,2	257,0	49,0

Rohre aus PE-HD werden in PE 80 (schwarz RAL 9004 mit Streifen blau RAL 5012) und PE 100 (blau RAL 5005) unterteilt. PE 100 wird für Rohre in der Wasserversorgung mit einem Wanddickenverhältnis SDR 17,0⁹ für PN 10 und mit SDR 11,0 (Rohrreihe 5 nach DIN 8074) für PN 16 zugelassen. In der Literatur wird des öfteren darauf verwiesen, daß die Einteilung der Nenndruckstufen für Rohre aus PE 100 auf der Dimensionierung mit dem Sicherheitsbeiwert 1,25 basiert, die Einteilung für Rohre aus PE 80 (nach DIN 8074/75) aber auf der Dimensionierung mit dem Sicherheitsbeiwert 1,60. Die DVGW schlägt in ihrer Überarbeitung der Normen die Gleichbehandlung beider Werkstoffe mit der Festlegung des Sicherheitsbeiwertes 1,25 vor. PE 80 wird für Rohre in der Wasserversorgung mit einem Wanddickenverhältnis SDR 7,25 für PN 20 und mit SDR 11,0 (Rohrreihe 5 nach DIN 8074) für PN 12,5 zugelassen.

In der Tabelle 3.2-15 sind Wasserleitungsrohre für PN 10 und PN 16 nach DIN 19533 aufgeführt¹⁰. Der Nenndurchmesser weicht vom tatsächlichen Innendurchmesser ab.

Neben diesen herkömmlichen Rohren werden auch spezielle Rohre mit Schutzmantel angeboten. Diese eignen sich besonders für Verlegungen, bei denen die Rohrleitungen extrem mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Dieser Schutzmantel verringert den Abrieb an der Rohroberfläche gegenüber Rohren

⁹ SDR stammt aus dem amerikanischen Raum und ist die Abkürzung für Standard Dimension Ratio. Mit SDR wird das Durchmesser/Wanddickenverhältnis angegeben.

¹⁰ Die Abmessungen für PE-HD nach DIN 8074 (GF 1996) weichen von der DIN 19533 ab.

ohne Schutzmantel. Solche Rohrausführungen können unmittelbar auf der Grabensohle und ohne entsprechenden Bodenaustausch bei Korngrößen kleiner 63 mm verlegt werden. Für die Verlegung in kontaminierten Böden (z. B. in landwirtschaftlichen Flächen, in der Nähe von Mülldeponien oder in industriell genutztem Gelände) kommen Rohre aus PE mit Schutzmantel sowie einer dazwischen liegenden Aluminiumschicht zur Anwendung. Diese Aluminiumschicht gewährleistet einen sicheren Diffusionsschutz.

Für die Verbindung der Rohre kommen verschiedene Lösungen zur Anwendung. Bei der Elektroschweißmuffe (Abb. 3.2-19a) werden die Verbindungsflächen (Rohroberfläche und Muffeninnenseite) durch in der Muffe vorhandene Widerstandsdrähte durch elektrischen Strom auf Schweißtemperatur erwärmt und geschweißt. Beim Heizelementmuffenschweißen (Abb. 3.2-19b) werden Rohr und Rohrleitungsteil überlappend und ohne Verwendung von Zusatzwerkstoffen verschweißt. Rohrende und Fittingsmuffe werden mit Hilfe eines muffen- bzw. stutzenförmigen Heizelementes auf Schweißtemperatur erwärmt und anschließend verbunden. Beim Heizelementstumpfschweißen (Abb. 3.2-19c) wird die Verbindung mit Hilfe besonders dafür konstruierter Schweißvorrichtungen hergestellt. Hierbei werden die Rohrenden mit Spannelementen gefaßt, an denen mechanisch oder hydraulisch wirkendes Gerät angreift, so daß die zu verschweißenden Stirnseiten der Rohre zueinander bewegt werden können. Die Verbindungsflächen der zu verschweißenden Teile werden am Heizelement unter Druck angeglichen, anschließend bei reduziertem Druck auf Schweißtemperatur erwärmt und nach Entfernung des Heizelementes unter Druck zusammengefügt.

Klemm- oder Steckverbindungen aus Metall (Messing oder beschichtetes Gußeisen) oder Kunststoff werden bis DN 50, aber auch bis Außendurchmesser 110 mm verwendet. Die Steckverbindung nimmt dabei sogar Zugbelastungen auf. Ebenso können bei entsprechender Notwendigkeit Flanschverbindungen zum Ein-

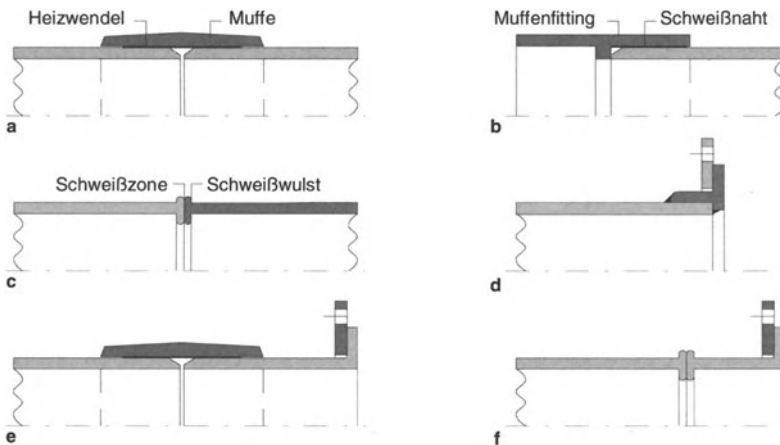


Abb. 3.2-19 Verbindungen für Rohre aus PE

a Elektroschweißmuffe, **b** Heizelement-Schweißmuffe, **c** Heizelement-Stumpfschweißung, **d, e, f** Kombinationen mit Flanschanschluß

satz kommen. Für die Herstellung von Flanschverbindungen sind 3 Ausführungsarten gebräuchlich, entweder Bundbuchse für Heizelementmuffenschweißen (Abb. 3.2-19d), Vorschweißbund mit Elektroschweißmuffe (Abb. 3.2-19e) oder Vorschweißbund für Heizelementstumpfschweißen (Abb. 3.2-19f).

Formstücke aus PE werden in ausreichender Auswahl zur Verfügung gestellt, so daß alle Verbindungen mit Abzweigungen zusammengebaut werden können. Zum Übergang auf metallische Rohre oder Armaturen gibt es besonders ausgebildete Elektroschweißmuffen.

Rohre aus PP sind in 6 Wanddickenreihen nach DIN 8077 für PN 2,5–20 für Außendurchmesser 10–1000 mm genormt. Die Bemessung der Wanddicke erfolgt ebenso wie bei Rohren aus PVC nach der Forderung einer Mindestzugspannung von etwa $10,5 \text{ N/mm}^2$ bei einer Dauerbelastung durch den Nenndruck bei 20 °C von 50 Jahren. Die Berechnungsspannung berücksichtigt dabei eine Sicherheit von 2,1. Die Lieferlängen betragen in der Regel 5 m. In der folgenden Tabelle 3.2-15 sind Rohre für PN 10 (SDR 11,0) nach DIN 8077 aufgeführt. Die Rohrfarbe ist kieselgrau.

Die Verbindungen der Rohre aus PP-H werden mit Hilfe der bereits aufgezeigten Möglichkeiten analog denen der Rohre aus PE, aber auch durch Infrarot-Schweißung hergestellt. Bei der Infrarot-Schweißung werden die zu verbindenden Teile im Schweißbereich auf Schweißtemperatur erwärmt und unter Fügedruck ohne Verwendung von Zusatzstoffen verschweißt.

Formstücke aus PP-H werden in ausreichender Auswahl zur Verfügung gestellt, so daß alle Verbindungen mit Abzweigungen zusammengebaut werden können. Zum Übergang auf metallische Rohre oder Armaturen gibt es besonders ausgebildete Elektroschweißmuffen.

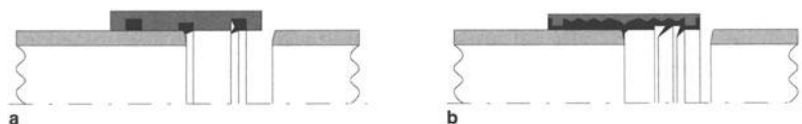
Rohre aus UP-GF sind nach DIN 16867–16869, 16964 und 16965 genormt. Die Rohre werden je nach Verwendungszweck mit verschiedenen Nennsteifigkeiten hergestellt. Speziell für PN 10 bzw. PN 16 gelten die Nennsteifigkeiten SN 5000 bzw. SN 10000. Die Lieferlängen betragen in der Regel 6 m. In der folgenden Tabelle 3.2-16 sind Rohre für verschiedene Nennsteifigkeiten aufgeführt.

Tabelle 3.2-15 Maße für Rohre aus PP-H für PN 10 (Auszug)

Außendurchmesser [mm]	Innendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]	Außendurchmesser [mm]	Innendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]
20	16,2	1,9	140	114,4	12,8
25	20,4	2,3	160	130,8	14,6
32	26,0	3,0	180	147,2	16,4
40	32,6	3,7	200	163,6	18,2
50	40,8	4,6	225	184,0	20,5
63	51,4	5,8	250	204,4	22,8
75	61,2	6,9	280	229,0	25,5
90	73,6	8,2	315	257,6	28,7
110	90,0	10,0	355	290,4	32,3
125	102,2	11,4	400	327,2	36,4

Tabelle 3.2-16 Maße für Rohre aus UP-GF (Auszug)

DN	Außendurchmesser [mm]	SN 5000		SN 10000	
		Innendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]	Innendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]
200	220,8	211,8	4,5	210,4	5,2
250	272,5	262,1	5,2	259,9	6,3
300	324,5	312,5	6,0	310,1	7,2
350	376,1	362,7	6,7	359,7	8,2
400	427,1	412,1	7,5	408,9	9,1
500	530,2	512,0	9,1	508,0	11,1
600	616,4	595,6	10,4	591,0	12,7
700	718,8	694,8	12,0	689,6	14,6
800	820,4	793,4	13,5	787,4	16,5
900	924,1	894,1	15,0	887,1	18,5
1000	1026,1	993,1	16,5	985,3	20,4
1200	1229,0	1189,6	19,7	1179,4	24,8

**Abb. 3.2-20** Verbindungen für Rohre aus UP-GF
a DC-Kupplung, **b** FWC-Kupplung

Hinsichtlich der Verbindung werden Rohre bis DN 400 für PN 10–25 mit Hilfe der DC-Kupplung für Nenndurchmesser größer DN 500 für PN 10–20 mit der FWC-Kupplung hergestellt (Abb. 3.2-20). Eine Ausknickung der Rohre in den Kupplungen ist möglich. Formstücke aus UP-GF sind in DIN 16966 genormt.

Korrosionsschutz. Für Rohre aus Kunststoff entfällt in der Regel der Außen- und Innenschutz. Wie bereits bei Rohren aus PE erwähnt, besteht die Möglichkeit, bei extrem mechanischen Belastungen bzw. bei vorherrschenden kontaminierten Böden diese Rohre mit einem entsprechenden Schutzmantel auszuführen.

3.2.6.7 Zubehörteile

Im folgenden werden einige Ausführungen hinsichtlich des Dehnungsausgleiches und der Rohrhalterungen gemacht, wo diese entsprechend erforderlich werden. Da aber in der Wasserverteilung fast ausschließlich erdverlegte Rohrleitungen realisiert werden, treten die Anwendungsfälle eher begrenzt auf. Ausnahmen bilden Verlegungen in Bauwerken, Schächten sowie Gebäuden.

Dehnungsausgleicher. Im allgemeinen wird bei erdverlegten Wasserleitungen die Längenänderung vernachlässigt. Oberirdisch, d. h. also nicht im Erdreich verlegter Leitungen müssen hingegen Dehnungselemente enthalten und mit Festpunkten

versehen sein. Bei Schraub- und Rollgummi-Muffenverbindungen wird die geringe Dehnung der Rohrleitungen durch die Muffen aufgenommen. Rohrleitungen mit Flansch- oder Schweißverbindungen erhalten Dehnungsausgleicher. In besonderen Fällen, wie bei der Verlegung in Bergbausenktungsgebieten, können aber auch Dehnungsausgleicher erforderlich werden. Ziel dieser Maßnahmen ist es somit, auftretende Längenänderungen abzufangen, so daß keine überlagerten Zusatzbeanspruchungen entstehen.

Prinzipiell sollten oberirdische Verlegungen weitestgehend vermieden werden, da diese Leitungen dann gegen Einfrieren durch beispielsweise eine Frostschutzdämmung zusätzlich geschützt werden müssen.

Der Dehnungsausgleich ist nicht nur bei metallischen Werkstoffen erforderlich, sondern auch bei thermoplastischen Kunststoffen, denn die Längenänderung der Kunststoffe als Folge von Temperaturschwankungen ist größer als die metallischer Werkstoffe (Abb. 3.2-21).

Am zweckmäßigsten ist es, diesen Dehnungsausgleich durch eine entsprechende Rohrleitungsführung zu kompensieren. Häufig nehmen diese Biegeschenkel die Längenänderung auf. Die notwendige Ausladung von sogenannten U-Bögen ist bei kleineren Nenndurchmessern gering und läßt somit eine Verlegung ohne Kompensator meist zu. Bei großen Durchmessern nehmen U-Bögen beachtliche Dimensionen ein und lassen sich dadurch nicht immer realisieren. In Abhängigkeit von der Trassenführung werden auch Dehnungsausgleicher als Z- oder L-Bogen bzw. L-Schenkel verwendet, so daß vorhandene natürliche Möglichkeiten genutzt werden können und sollten. Lassen sich diese Dehnungsausgleichsmöglichkeiten mit dem gewünschten Trassenverlauf in Einklang bringen, so ist dadurch die betriebssicherste und im allgemeinen auch wirtschaftlichste Aufnahme der Rohrleitungsausdehnung gegeben. Gleichzeitig sind diese Systeme wartungsfrei.

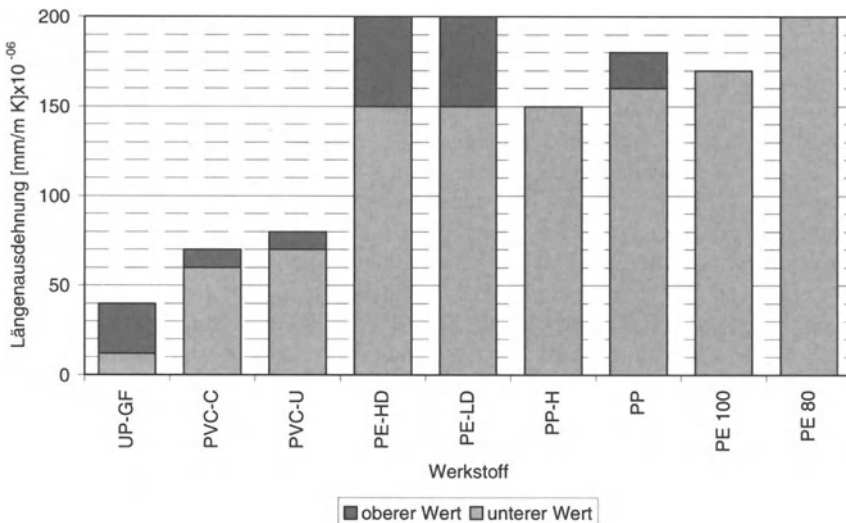


Abb. 3.2-21 Längenausdehnungskoeffizienten für thermo- und duroplastische Kunststoffe

Bei einem U-Bogen wächst mit der Ausladung die Dehnungsaufnahme und sinkt die Verstellkraft. Mittels der eingebrachten Vorspannung vermindert sich die Festpunktkraft, während sie keinen Einfluß auf die Dehnungsaufnahme hat. Vorteilhaft ist auch, daß sich mehrere parallel verlegte Rohrleitungen ineinanderschachteln lassen.

Ein U-Bogen muß nicht unbedingt in der Mitte zwischen den beiden Festpunkten liegen. Ohne Beeinträchtigung seiner Dehnfähigkeit könnte er im Extremfall einseitig nahe an einem Festpunkt eingebaut werden. Dadurch erfährt lediglich der Scheitelpunkt eine geringe Verschiebung.

Weitere Ausführungen, speziell zu verschiedenen Kunststoffen, enthält dazu u. a. (GF 1996).

Scheitert die Realisierung von Dehnungsausgleichen durch die entsprechende Rohrleitungsführung, ist der Einbau von Kompensatoren erforderlich. Darüber hinaus können auch wirtschaftliche Gesichtspunkte zur Verwendung von Kompensatoren führen.

Hinsichtlich der Bauarten von Kompensatoren, deren Funktionsweise sowie Anwendungsgebiete, insbesondere bei Verwendung von metallischen Rohrwerkstoffen, sei entsprechend auf die Ausführungen in Abschn. 2.2.4.2 verwiesen. Bei der Verlegung von Rohren aus Kunststoff ist aufgrund des niedrigen Elastizitätsmoduls die Reaktionskraft der Kunststoffrohre bei Temperaturänderungen im Vergleich zu metallischen Werkstoffen geringer. Die für metallische Rohrwerkstoffe bestimmten Kompensatoren sind daher im Regelfall aufgrund ihres hohen Eigenwiderstandes ungeeignet. In Rohrleitungen aus Kunststoff dürfen daher nur leichtgängige Kompensatoren eingebaut werden, d. h. solche, deren Eigenwiderstand gering ist. Dazu zählen beispielsweise vorwiegend Gummikompensatoren, seltener PTFE-Kompensatoren oder bei entsprechender Auswahl auch metallische Mehrlamellenkompensatoren.

Gummikompensatoren beziehen ihre Beweglichkeit aus einem Gummibalg, der mit einer Karkasse aus Gewebe verstärkt ist. Der Gummibalg bildet üblicherweise eine tonnenförmige Welle. Er besteht aus einer inneren sowie einer äußeren Gummischicht, zwischen der die drucktragenden Gewebeeinlagen fest einvulkanisiert sind. Für Trinkwasser kommt als innere Gummischicht Butyl-Kautschuk zum Einsatz. Durch die Balgform können axiale, angulare und laterale Bewegungen aufgenommen werden. Darüber hinaus haben Gummikompensatoren eine schalldämmende Wirkung, die sich besonders an Pumpenanschlüssen positiv auswirkt. Gummikompensatoren werden vorwiegend mit Flanschanschluß geliefert. *PTFE-Kompensatoren* haben als bewegliches Element einen gewellten Balg aus PTFE oder einen mit PTFE ausgekleideten Metallbalg. Diese Kompensatoren bestehen neben der guten Temperaturbeständigkeit (die für Wasserleitungen nicht erforderlich ist) vor allem durch ihre hervorragende Korrosionsbeständigkeit gegen die meisten aggressiven Medien.

Für die Anordnung des Einbaues der Kompensatoren sind dieselben Richtlinien, wie bereits in Abschn. 2.2.4.2 genannt, zu beachten.

Rrohrhalterungen. Für die bei der oberirdischen Verlegung notwendigen Rohrhalterungen sind, wie bei Freileitungen in Fernwärmesystemen, entsprechende Unterstützungskonstruktionen notwendig. Dabei muß sich die Rohrleitung bewe-

gen können und somit funktionssicher gelagert sein. Bei der oberirdischen Verlegung werden fast ausschließlich Unterstützungsstrukturen verwendet. Die Abb. 3.2-22 zeigt einen funktionellen Zusammenhang der Unterstützungsarten.

Unterstützungen an den Rohrleitungen sind an den Lagerstellen angeordnet und bestehen in den meisten Fällen aus Rohralterung, Halterungszubehör und Unterstützungsstruktur. Weitere Ausführungen sind dazu in Abschn. 2.2.4.2 zu finden, welche insbesondere für Stahlrohrleitungen gelten.

Für die Festlegung der zulässigen Lagerabstände bzw. Stützweiten einer Rohrleitung sind im wesentlichen drei Kriterien maßgebend:

- Einhaltung der zulässigen Biegebeanspruchung des Rohres,
- Vermeidung eines Gegengefälles infolge der Durchbiegung sowie
- Einhaltung der zulässigen Beanspruchung der Unterstützelemente.

Die Stützweite ist abhängig vom Widerstandsmoment des zu unterstützenden Rohres und somit vom Werkstoff, vom Gewicht des Mediums und des Prüfmediums, vom Verlegegefälle und, bei einer Verlegung im Freien, von Schnee- und Windlast. Ferner können Schwingungsanfälligkeit und Belastbarkeit vorhandener Auflagestellen die Stützweite bestimmen.

Die zulässige Durchbiegung wird nach dem Gefälle der Rohrleitung bemessen. Diese soll gerade so groß sein, daß ein Gegengefälle vermieden wird. Gleichzeitig sollte auch der optische Eindruck mit berücksichtigt werden.

In Abschn. 2.2.4.2 sind Anhaltswerte von Stützweiten für Rohre aus Stahl aufgelistet. Bei Rohren aus Kunststoff wird bei den Berechnungen der Stützweiten, auch als Rohrschellenabstände bezeichnet, eine zulässige Durchbiegung zwischen 2 Rohrschellen von maximal 0,25 cm zugrunde gelegt. In Abb. 3.2-23 sind für verschiedene Kunststoffe für eine maximale Mediumtemperatur von 20 °C und verschiedene Nenndrücke die Rohrschellenabstände in Anlehnung nach (GF 1996) dargestellt. Weitere Ausführungen dazu enthält u. a. (GF 1996).

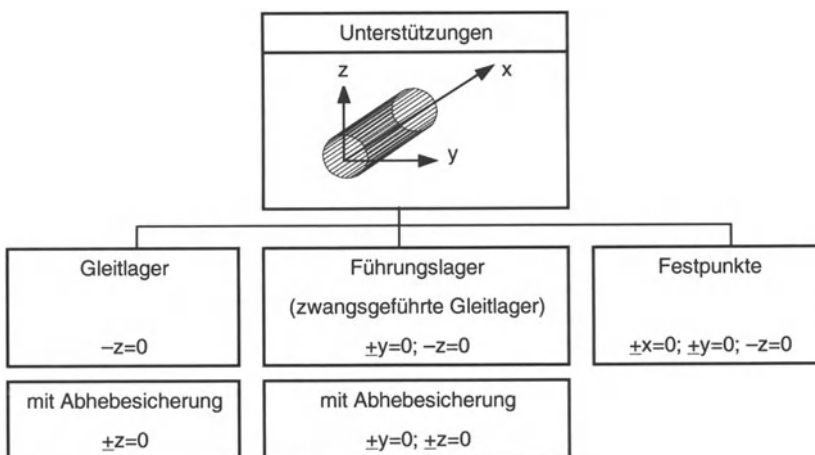


Abb. 3.2-22 Unterteilung der Unterstützungsarten

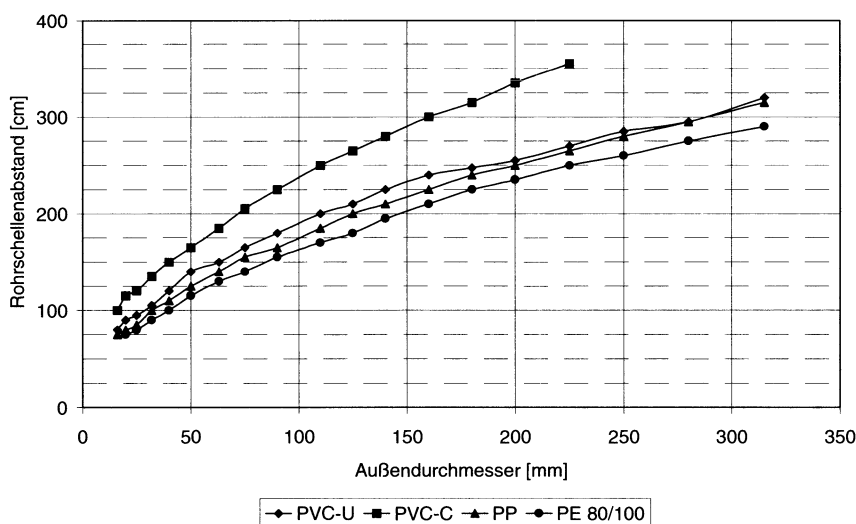


Abb. 3.2-23 Rohrschellenabstände für Rohre aus verschiedenen Kunststoffen

Es gelten folgende Nenndrücke: PN 10 und PN 16 für PVC-U, PN 16 für PVC-C, PN 10 für PP, PN 10 für PE80/100

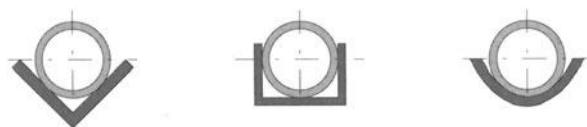


Abb. 3.2-24 Varianten für durchlaufende Unterstüzungen

Bei waagerecht verlegten Rohrleitungen kann, insbesondere bei kleineren Durchmessern, eine durchlaufende Unterstüzung wirtschaftlicher und vorteilhafter sein als eine Befestigung mit Rohrschellen. Dabei hat sich die Verlegung in Winkel- oder U-Profilen aus metallischen oder auch duroplastischen Werkstoffen bewährt (Abb. 3.2-24).

Zwischen 2 Festpunkten sind die Dehnungsbewegungen und die hieraus entstehenden Beanspruchungen der Rohrleitung in den zulässigen Grenzwerten zu halten. Die durch die Lager geführte Bewegung der Rohrleitung darf nicht behindert werden. Rohrhalterungen müssen in jedem Betriebszustand die statischen und dynamischen Lasten auf die Unterstüzungs- bzw. Halterungskonstruktion übertragen können. Die Befestigung der Rohrhalterung an der Rohrleitung wird entweder unlösbar oder lösbar realisiert.

Entsprechende Ausführungen für die einzelnen Lagerausführungen für Stahlrohrleitungen sind in Abschn. 2.2.4.2 zu finden. Für Rohre aus Kunststoff gelten im allgemeinen dieselben Ausführungsrichtlinien. Grundsätzlich muß der Innendurchmesser der Rohrschelle im befestigten Zustand größer sein, um somit die

Längenänderung der Leitung an den dafür bestimmten Stellen nicht zu behindern. Dabei sollte die Innenseite der Rohrschelle so beschaffen sein, daß eine Beschädigung der Rohroberfläche vermieden wird.

Eine Bewegung der Rohrleitung in mehreren Richtungen wird durch Gleitschellen oder Pendelschellen ermöglicht (Abb. 3.2-25a–c). Der unten an der Rohrschelle befestigte Gleitschuh erlaubt auf einer entsprechenden ebenen Unterstützungsfläche die beliebigen Verschiebungen (Abb. 3.2-25b). Für die Anordnung von sogenannten Festschellen ergeben sich verschiedene Lösungsvarianten. Einseitige Festpunkte werden realisiert, indem die Rohrschelle unmittelbar neben einem Fitting angeordnet wird (Abb. 3.2-25d). Für den Fall, daß die Längenänderung auf beiden Seiten zu begrenzen ist, kann die Rohrschelle zwischen 2 Fittings oder als Doppelschelle ausgeführt werden (Abb. 3.2-25e–g). Da die aus der Rohrleitung entstehenden Kräfte durch die Festschelle aufgenommen werden müssen, können hier nur Gleitschellen zum Einsatz kommen. Es ist aber auch möglich, bei Rohren, die ein Kleben zulassen, entsprechende Begrenzungen auf der Rohroberfläche zu befestigen (Abb. 3.2-25g).

Widerlager. Diese besondere Form von Lager wird bei erdverlegten Rohrleitungen erforderlich. Formstücke werden durch den Innendruck (Prüf- oder Betriebsdruck) verschoben, wenn nicht die Druckkräfte in geeigneter Weise aufgenommen werden. Dies kann einerseits durch längskraftschlüssige Verbindungen, wie beispielsweise Schweißverbindungen, Flanschverbindungen oder speziellen Muffen (TYTON-SIT), andererseits – bei nicht längskraftschlüssigen Verbindungen (z. B. Steckmuffen) – durch Betonwiderlager gemäß DVGW-Merkblatt GW 310¹¹ – Hinweise und Tabellen für die Bemessung von Betonwiderlagern an Bogen und Abzweigen mit nicht längskraftschlüssigen Verbindungen – realisiert werden.

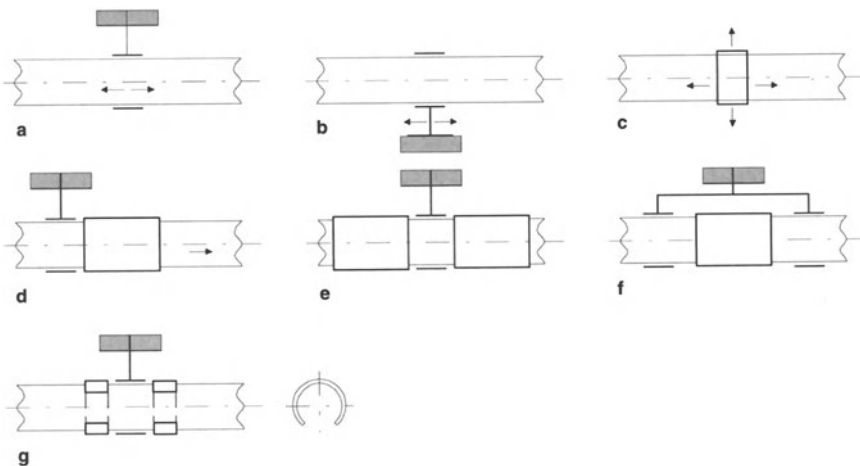


Abb. 3.2-25 Lösungsvarianten für Anordnungen von Rohrschellen

a, b, c Los- und Gleitschellen, **d, e, f** Festschellen, **g** Festschelle mit geklebten Begrenzungsring

¹¹ Dieses Merkblatt befindet sich derzeit in Überarbeitung.

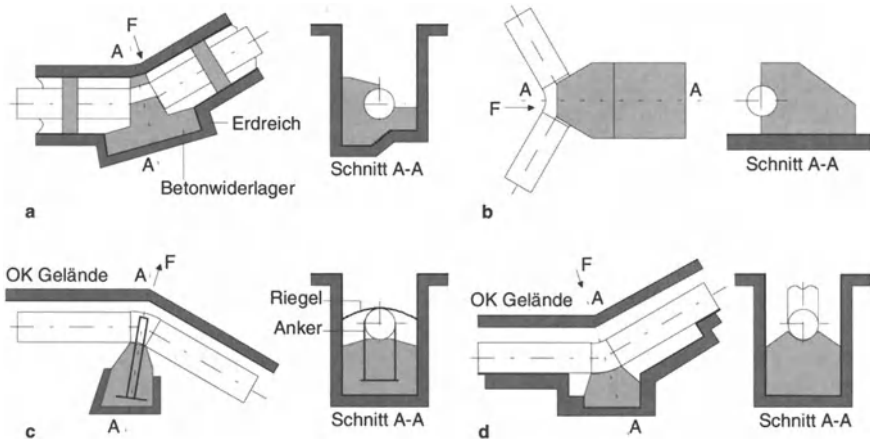


Abb. 3.2-26 Anwendungsfälle für Widerlager nach DVGW GW 310

a, Aufnahme der Schubkraft durch Grabenwand, **b** Aufnahme der Schubkraft durch Grabensohle, **c** Schubkraft gegen Luft; **d** gegen Erdreich gerichtete Schubkraft

Da die Betonwiderlager für die maximal auftretenden Kräfte auszulegen sind, ist für die Berechnung der Längskraft von dem Prüfdruck der betreffenden Rohrleitung auszugehen. Damit sich die Formstücke nicht verschieben, muß die resultierende Kraft durch das Widerlager aufgenommen werden. Die Anordnung und Gestaltung des Widerlagers hängt von der Rohrleitungsführung ab. Das Widerlager wird zwischen Rohr und Grabenwand eingebracht. Dabei sind verschiedene Anwendungsfälle zu unterscheiden:

- Rohrbogen liegt in der Waagerechten; Aufnahme der Schubkraft durch Grabenwand (Abb. 3.2-26a),
- Rohrbogen liegt in der Waagerechten; Aufnahme der Schubkraft durch Grabensohle (Abb. 3.2-26b),
- Rohrbogen mit resultierender Schubkraft gegen Luft (Abb. 3.2-26c) sowie
- Rohrbogen mit gegen das Erdreich gerichteter Schubkraft (Abb. 3.2-26d).

Ist der Boden nicht genügend tragfähig, um die Drücke aufzunehmen, so sind längskraftschlüssige Verbindungen zu wählen. Da auch hier dieselben Bedingungen gelten, ist die Anzahl der zugfesten Muffenverbindungen abhängig vom Prüfdruck, dem Nenndurchmesser und der Güte der Verfüllung (Bodenart, Verdichtungsgrad). Die Anzahl der zu sichernden Muffen beträgt in jedem Fall mindestens 2; wieviel darüber hinaus gesichert werden müssen, kann anhand des DVGW-Merkblattes GW 368¹² – Herstellung und Einbau von zugfesten Verbindungsteilen zur Sicherung nicht längskraftschlüssiger Rohrverbindungen – ermittelt werden.

¹² Dieses Merkblatt befindet sich derzeit in Überarbeitung.

3.2.7 Armaturen

3.2.7.1 Allgemeines

Armaturen stellen ein umfangreiches Thema dar, welches hier in seiner Gesamtheit den Rahmen des Buches sprengen würde. Im nachfolgenden sollen nur ein paar grundlegende Bemerkungen zu den Armaturen gemacht werden.

Grundsätzlich ist eine Armatur ein Verschluß zum Absperrn oder Regeln des Durchflusses in Rohrleitungen¹³. Die Absperrarmatur dient zum Absperrn oder Freigeben des Durchflusses und kann nur in den beiden Endstellungen (Auf/Zu) betrieben werden. Dagegen regelt eine Regelarmatur den Durchfluß in Abhängigkeit von der jeweiligen Zwischenstellung. Sie kann aber auch zum Absperrn verwendet werden.

In der Wasserverteilung werden fast ausschließlich Absperrarmaturen eingebaut. Streckenarmaturen oder Armaturen in Abzweigungen sind insbesondere von Vorteil bei notwendig werdenden Reparaturen, da die Unterbrechung des Netzbetriebes eingegrenzt werden kann. Sie können aber auch bei späteren Netzerweiterungen von Nutzen sein. Weiterhin werden Armaturen als Entleerung, Be- sowie Entlüftung benutzt.

Absperrarmaturen sollen folgende Anforderungen erfüllen:

- geringer Druckverlust,
- dichter Abschluß in beiden Richtungen,
- Dichtheit der Gehäusedurchführungen,
- geringer Wartungsaufwand,
- geringer Platzbedarf,
- geringe Fließgeräusche,
- Austauschbarkeit,
- ausreichende Festigkeit gegen statische und dynamische Druckbelastungen,
- Unempfindlichkeit gegen Rohrleitungskräfte und Momente,
- ausreichender, über Jahrzehnte beständiger Korrosionsschutz,
- Vermeidung von Inkrustationen sowie
- Gewährleistung einer hygienisch einwandfreien Unbedenklichkeit.

Allen gestellten Anforderungen gerecht zu werden, wird – schon aus Kostengründen – nicht immer möglich sein. Die Geräuschbildung spielt bei der Absperrarmatur keine entscheidende Rolle, solange diese nicht als Regelarmatur mißbraucht wird. Einen weiteren Einfluß übt dabei die maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeit aus, welche bei voll geöffneter Armatur nicht überschritten werden sollte.

¹³ In der DIN 3211 wird die Armatur als ein Rohrleitungsteil definiert, das in Systemen aus Rohrleitungen, Behältern, Apparaten und Maschinen die Funktion des Schaltens und Stellens ausübt. Dabei wird unter Schalten die Position des Abschlußkörpers offen und geschlossen verstanden. Dagegen ist das Stellen in der DIN 19226 definiert.

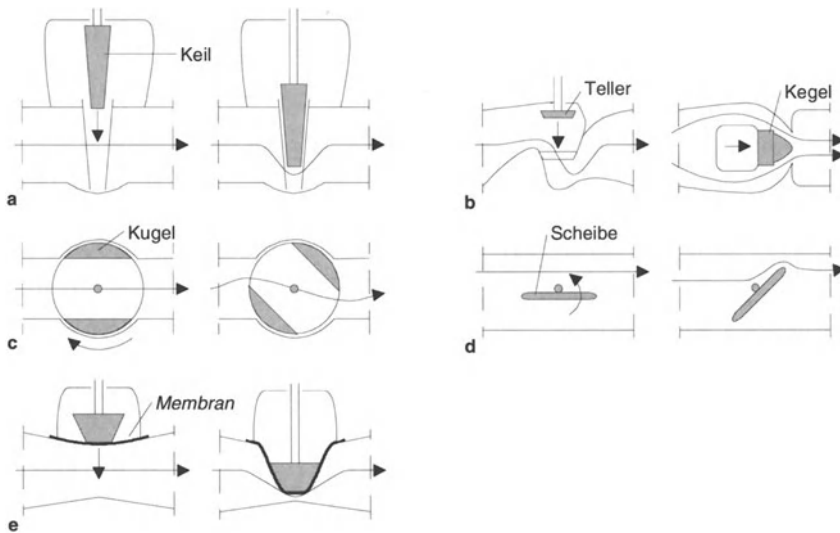


Abb. 3.2-27 Grundtypen von Armaturen

a Schieber, **b** Ventil, **c** Hahn, **d** Klappe, **e** Membranarmatur (Ausführungsmöglichkeit)

Die Armaturen (Abb. 3.2-27) werden in Bezug auf die Bewegungsrichtung ihres Verschleißteiles zur Strömung unterschieden in

- Schieber (senkrecht),
- Ventil (parallel),
- Hahn (um Achse drehend) sowie
- Klappe (um Aufhängung drehend).

Die Membranarmaturen sind dabei eine spezielle Ausführung, welche sich durch den flexiblen Abschlußkörper im Gegensatz des starren Abschlußkörpers in Schiebern, Ventilen, Hähnen und Klappen unterscheiden. Alle Membranarmaturen lassen sich auf diese Grundbauarten wiederum zurückführen.

In der DIN 3211 erfolgt die Benennung von Armaturen durch einen verbindlichen Teil und – falls erforderlich – frei wählbare Zusätze. Danach ist verbindlich, eine Armatur nur mit – Armatur – oder allein oder in Verbindung mit frei wählbaren Zusätzen mit der Grundbauart zu benennen, wie beispielsweise Absperrarmatur, Absperrschieber oder Rückschlagklappe. Die Armaturen lassen sich nach weiteren verschiedenen Kriterien unterteilen (Tabelle 3.2-17).

Je nach Druckverhältnissen werden die Ausführungsart, der Werkstoff und das Abdichtsystem festgelegt. Für die Wahl der Werkstoffe von Gehäuseteilen gilt die DIN 3339. In DIN 3840 wird die Aufnahme von Kräften und Momenten durch das Armaturengehäuse behandelt. Dabei sollte möglichst stets vermieden werden, hohe äußere Belastungen auf die Armatur zu übertragen. Auszuschließen sind Armaturen als Festpunktkonstruktion. Ist dies nicht zu umgehen, sind zusätzliche konstruktive Maßnahmen zur Entlastung der Armatur erforderlich.

Tabelle 3.2-17 Armaturen – Unterteilung nach verschiedenen Kriterien

Antriebsart	Ausführung	Einsatzort	Einbauart
– Hand	– gegossen	– frei zugänglich	– Flanschenden
– elektrisch	– geschmiedet	(z. B. Bauwerk)	– Schweißenden
– pneumatisch	– geschweißt	– Erdeinbau	– Monoflansch
– hydraulisch			– Zwischenflansch (Sandwich)
			– Steckmuffe
			– Spitzende
			– Gewinde

Die Reaktion auf äußere Kräfte und Momente ist bei den Grundbauarten der Armaturen verschieden. Dabei sind Schieber relativ unempfindlich. Dies trifft insbesondere auf Rundschieber zu, welche sich für die Aufnahme hoher Kräfte und Momente eignen. Gleiches gilt für Klappen. Ventile reagieren dagegen empfindlich auf hohe äußere Belastungen. Bei Hähnen sollten Grenzbelastungen vorgegeben werden, um Undichtheiten bzw. ein Verklemmen zu vermeiden.

Die Baumaße sind sowohl von der Grundbauart der Armatur als auch von dessen Nenndurchmesser abhängig. Für die Dichtheit im Abschluß wird in beiden Strömungsrichtungen Leckrate 1 bei Prüfung BN gemäß DIN 3230 gefordert.

Hinsichtlich der Betätigung von Armaturen gilt ebenfalls die DIN 3230 sowie als Hinweis das DVGW-Arbeitsblatt W 332¹⁴ – Hinweise und Richtlinien für Absperr- und Regelarmaturen in der Wasserversorgung. Mittlere und größere Nenndurchmesser werden überwiegend mit elektrischen Antrieben versehen. Diese werden eingesetzt, wenn die Betätigung

- manuell zu anstrengend ist,
- in der erforderlichen Zeit manuell nicht erreicht werden kann,
- im Gefahrenfall manuell nicht möglich ist,
- von einer Leitwarte aus vorgesehen ist und
- automatisch durch leittechnische Anbindungen ausgelöst werden soll.

Bei Armaturen mit Übersetzungsgetrieben zur Herabsetzung des Drehmomentes ist das Vorgelege so zu wählen, daß es ohne übermäßige Kraftanstrengungen betätigt werden kann. Zur Vermeidung von Druckstößen sollten die Öffnungs- bzw. Schließzeiten nicht zu kurz sein, aber aus betrieblichen Gründen auch nicht unnötig lang. In Abhängigkeit vom Nenndurchmesser liegen die Öffnungs- bzw. Schließzeiten im Bereich einiger Minuten. Soweit Armaturen nicht in Schächten angeordnet sind, müssen diese für den Erdeinbau geeignet und von der Erdoberfläche aus bedienbar sein.

Bei der Wahl der Armaturenbauart besteht das eigentliche Ziel in der geforderten Lebensdauer, woraus sich entsprechende Anforderungen an die Armaturen ableiten lassen. In (Ibañez 1997) werden verschiedene spezifische Kriterien (Funktionssicherheit, Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit) anhand von Bereichen der Wasserversorgung (Wassergewinnung/-förderung, Aufbereitung, Fernleitung und Verteilung) andiskutiert. In der Tabelle 3.2-18 sind einige dieser Anforderun-

¹⁴ Dieses Arbeitsblatt befindet sich derzeit in Überarbeitung.

Tabelle 3.2-18 Anforderungen an Armaturen für Fernleitungen und Wasserverteilung

Bereich	Funktionssicherheit	Betriebssicherheit	Wirtschaftlichkeit
Fernleitung	– geeignet für große Strömungsgeschwindigkeiten – Beständigkeit im Sitz gegen Erosion und Kavitation – Festigkeit gegen maximal auftretende hydraulische Kräfte und Momente auf alle Bauteile der Armatur – Einhaltung von Stellgesetzen	– hohe Betriebssicherheit – schwingungssichere Verbindungen und Schalteinrichtungen – Fundamentabstützung – geeignete Kennlinie – Vermeidung von Kavitationserscheinungen	– geringer Druckverlust
Verteilung	– korrosionsfest – frostsicher – Vermeidung von Inkrustationen	– bedienungssicher – hygienisch einwandfrei (keine Totwasserräume) – Werkstoffe entsprechend den KTW-Richtlinien – DIN/DVGW-Zulassung	– wartungsfrei – Anschluß an unterschiedliche Rohrwerkstoffe

gen für die Bereiche Fernleitung und Verteilung zusammengefaßt. Aus diesen Anforderungen heraus werden für den Bereich Fernleitung Absperrklappen, Kugelhähne, Ventile (Ringkolben-, Druckminder-, Be- und Entlüftungsventile) sowie Rohrbruchsicherungen und für den Bereich Verteilung Schieber (überwiegend weichdichtend), Absperrklappen, Ventile (Druckminderer, Hydranten, Anbohrarmaturen) eingesetzt.

Somit sind für die Beurteilung nicht nur die Armaturenbauart oder der Werkstoff maßgebend, sondern auch das komplexe Zusammenspiel von Medium, Dichtsystem und vorherrschenden Betriebsbedingungen. Letztendlich spielen die Kosten eine nicht unwesentliche Rolle dabei.

Korrosionsschutz. Armaturen, die für einen Erdeinbau vorgesehen sind, müssen bei Böden mit geringen Beanspruchungen (Bodenklasse I) nach dem Sandstrahlen eine Mindestschichtdicke von 120 µm an ebenen und drucktragenden Flächen bzw. 80 µm an außen konvexen Kanten aufweisen (s. DIN 30677-1). Die gleichen Anforderungen sind für den Einbau von Armaturen in Schächten anzuwenden.

Dagegen gelten die Anforderungen für die Beschichtungen mit Epoxydharz (EP), Polyurethan (PUR) und Polyurethan-Teer (PUR-Teer) für erhöhte Korrosionsbelastungen, d. h. für die Bodenklassen II und III, nach DIN 30677-2. Dabei ist eine Mindestschichtdicke von 150–1500 µm je nach Umhüllungsstoff und Fläche vorgeschrieben. Bei der Emaillierung wird Emaille auf das Gehäuse aufgesprüht und bei etwa 800 °C im Durchlaufofen eingebrannt.

Die Beschichtungen mit EP und Emaille gewährleisten eine hohe Funktionssicherheit durch

- ausreichende mechanische Festigkeit gegen mögliche Beschädigungen bei Transport, Einbau und Betrieb,

- ausreichende chemische und physikalische Beständigkeit gegen Beanspruchungen aus dem Medium und der Umgebung sowie
- glatte Oberflächen mit geringer Neigung zur Ablagerungsbildung.

Die Schrauben an den Gehäusen sollen aus nichtrostendem Stahl bestehen bzw. Schraubenlöcher zur Aufnahme der Schraubenköpfe vertieft ausgeführt und mit Dichtungsmasse vergossen sein. Ebenso ist bei Anwendung von Flanschschrauben ein entsprechender Schutz vorzusehen.

Ein Innenschutz kann mit elektrostatischer Kunststoffbeschichtung (EKB) oder Emaille entsprechend den KTW-Empfehlungen vorgenommen werden.

3.2.7.2 **Schieber**

Der Schieber ist eine Armatur, deren Schlußkörper sich geradlinig und im Abschlußbereich quer/senkrecht zur Strömung bewegt. Absperrschieber werden für mittlere bis größere Nenndurchmesser und für alle Drücke und Temperaturen hergestellt. Das herausragende Merkmal eines Schiebers besteht darin, daß in Offenstellung der gesamte Querschnitt der Rohrleitung zur Verfügung steht. Hierdurch ergeben sich minimale Druckverluste, die sich gerade bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten positiv bemerkbar machen. Der freie Durchgang bietet außerdem die Möglichkeit, die Rohrleitung zu molchen.

Hinsichtlich des Absperrelementes erfolgt eine Unterteilung in:

- Keilschieber,
- Doppelplattenschieber,
- Keilplattenschieber sowie
- Scheibenabschlußschieber.

Nicht selten wird auch in der Literatur unterschieden in Starrkeil, Flexikeil und gummierten Keil. Ein weiteres Konstruktionskriterium stellt die Form des Deckelstutzens/Gehäuses dar. Hier wird unterschieden in Flach-, Oval- oder Rundschieber. Formen und Ausrüstungen sind aus der DIN 3352 zu entnehmen.

Weitere Unterteilungen können über die Oberteilausführung der Schieber (s. Tabelle 3.2-19) in Anlehnung nach (AGFW 1993a) sowie über die Art der Abschlußdichtung – metallisch oder weichdichtend – vorgenommen werden.

Metallisch dichtende Schieber mit innen- oder außenliegendem Spindelgewinde kommen bei größeren Nenndurchmessern zum Einsatz. Der Grund dafür liegt darin, daß weichdichtende Schieber überwiegend nur bis DN 300 hergestellt werden. Die Nachteile des metallisch dichtenden Schiebers, keine absolute Dichtheit bei langer Standzeit, sowie Verschmutzungsgefahr im Schiebersack (Gehäuseausbuchtung unterhalb des Keiles) und somit keine dichte Endlagenstellung, führten zur Konstruktion der weichdichtenden Schieber. Am häufigsten werden *weichdichtende Schieber* mit innenliegendem Spindelgewinde eingesetzt. Dieser Schieber hat konstruktiv keinen Schiebersack, so daß Ablagerungen und Inkrustationen am Keil vermieden werden. Dadurch bedingt ist der Druckverlust geringer als beim metallisch dichtenden Schieber. Der meist allseitig gummierte Keil dichtet im unteren Bereich radial auf dem Gehäusedurchgang ab, während im oberen

Bereich überwiegend axial die Abdichtung erfolgt. Die weiche Abdichtung ermöglicht auch bei verschmutzten Sitzflächen eine gute Dichtheit. Die Abdichtung der Spindel erfolgt durch einen O-Ring. Diese wartungsfreie Abdichtung macht es möglich, daß der Schieber für Erdeinbau geeignet ist. Des weiteren ist das Drehmoment der Spindel kleiner als bei der Ausführung mit Stopfbuchse. Alle Innenteile, besonders bei kleinen Nenndurchmessern müssen, so ausgelegt sein, daß das maximale Betätigungsmoment des Straßenschlüssels aufgenommen werden kann. Beide Schieberbauarten werden bei entsprechend niedrigem Druck oder beengten Platzverhältnissen mit Baulänge F4 eingebaut. Darüber hinaus kommen Schieber mit Baulänge F5 zur Anwendung.

Neben diesen beiden Schieberbauarten werden weichdichtende Plattenschieber gefertigt, die die Vorteile der weichdichtenden Keilabdichtung mit denen der Schieber mit außenliegendem Spindelgewinde vereinen. Zum Abdichten dient eine Platte, die auf Gummidichtungen im Gehäuse zur Anlage kommt. Aufgrund dieser Bauart ist es möglich, diese in Einklemmbaulänge K2 auszuführen.

Die vorangegangenen Ausführungen zu den einzelnen Schieberbauarten erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es sollte lediglich nur ein Überblick auf die am häufigsten zum Einsatz kommenden Bauarten gegeben werden.

Die Werkstoffwahl ist von den vorliegenden Betriebsbedingungen abhängig. Schieber in der Wasserversorgung werden überwiegend aus Gußeisen hergestellt.

Tabelle 3.2-19 Unterteilung der Oberteile

	außenliegendes Spindelgewinde	außenliegendes Spindelgewinde	innenliegendes Spindelgewinde
Bewegung der Spindel	axiale Hubbewegung und Drehbewegung	axiale Hubbewegung	Drehbewegung
Bewegung des Handrades	steigend	nicht steigend	nicht steigend
Vorteile	– einfache Bauart – Schutz des Spindelgewindes gegen Medium – geringe Betätigungskräfte – zweifache Führung der Spindel – Sichtkontrolle der Spindel möglich – Handradstellung entspricht Keilstellung	– einfache Bauart – Schutz des Spindelgewindes gegen Medium – geringe Betätigungskräfte – zweifache Führung der Spindel – Sichtkontrolle der Spindel möglich – Spindelstellung entspricht Keilstellung – geringer Platzbedarf	– geringe Bauhöhe unabhängig von Spindelstellung – keine Verschmutzung des Spindelgewindes von außen
Nachteile	– mehr Platzbedarf – schwierige Bedienung durch Änderung der Handradstellung – äußere Verschmutzung an Spindelgewinde möglich	– mehr Fertigungsaufwand – äußere Verschmutzung an Spindelgewinde möglich	– Spindelgewinde ist durch strömendes Medium umgeben – keine Sichtkontrolle der Spindel möglich – innere Verschmutzung möglich

Dieser Werkstoff bietet eine bessere Korrosionsbeständigkeit als Stahl. Im Gegensatz zu früher kommt heute fast nur noch Kugelgraphitguß (duktiles Gußeisen) anstelle von Lamellengraphit zur Anwendung. Die Spindel wird aus nichtrostendem Edelstahl gefertigt.

Wesentlich höhere Belastungen können in besonderen Fällen Schieber aus Stahlguß- oder Schweißkonstruktionen erfordern. Dabei muß beachtet werden, daß der Schieber in seiner Gesamtformgebung so steif sein soll, daß die Sitzflächen durch Rohrleitungskräfte und Druckbeanspruchungen nicht verformt werden und somit die Dichtheit beeinträchtigt wird. Der Gehäuseflansch muß außer der Belastung durch das Medium auch noch den Anpreßdruck der Spindel beim vollständigen Schließen aufnehmen.

Hinsichtlich der Anschlußarten werden Schieber mit Flanschen, Steckmuffen, Spitzenden oder, speziell für Rohre aus PE, mit Schweißenden geliefert. *Flansche* stellen dabei die herkömmliche Form der Verbindung von Rohrleitungen dar. Bei dieser Verbindung ist es möglich, daß die Dichtung zwischen den Flanschen ohne eine größere axiale Verschiebung der Rohrleitung ausgetauscht werden kann. In zunehmendem Maße werden aus Kostengründen Schieber mit *Steckmuffen* eingesetzt. Steckmuffen kommen für verschiedene Rohrwerkstoffe, wie Gußeisen, Stahl oder Kunststoff zur Anwendung. Der Vorteil gegenüber Flaschen liegt in erster Linie darin, daß zum einen schneller montiert werden kann, zum anderen die korrosionsanfälligen Schrauben vermieden werden. Außerdem ermöglicht die Steckmuffe eine gewisse Ausknickung der Rohrleitung. Das Gegenstück zum Schieber mit Steckmuffen ist der Schieber mit *Spitzenden*, welcher direkt in die Muffen der Rohrleitung eingebaut werden kann. Eine Kombination zwischen beiden Anschlußarten ist möglich. Immer häufiger kommt es in der Wasserversorgung zum Einsatz von Rohren aus PE. Für diese Anwendungsfälle werden Schieber mit speziellen Schweißenden aus PE verwendet.

3.2.7.3 Ventile

Ein Ventil ist eine Armatur, deren Abschlußkörper sich geradlinig und im Abschlußbereich längs/parallel zur Strömung bewegt. Dabei wird nach der konstruktiven Gestaltung nach DIN 3356 unterschieden (Tabelle 3.2-20). Ein weiteres Konstruktionsmerkmal stellt die Spindeldurchführung dar. Das aufzubringende Moment zum Schließen eines Ventils ist wesentlich höher als bei Schiebern und Klappen, was letztendlich auch zu einer Begrenzung des Nenndurchmessers führt.

Ventile weisen gegenüber Schiebern folgende Vorteile auf, die u. a. den bevorzugten Einsatz im unteren Nennweitenbereich begründen:

- geringe Herstellungskosten durch einfachen Aufbau,
- gute Abdichtung auch bei hohen Drücken,
- gute Regel- und Drosselmöglichkeit durch entsprechend ausgeführte Abschlußkörper sowie
- einfache Nachschleifmöglichkeit bei Beschädigung des Sitzes.

Tabelle 3.2-20 Ventilbauarten

Gehäuseform	Gehäuseverbindung	Oberteile	Abschlußkörper
– Oberteil gerade	– Flansch	– außenliegendes/ innenliegendes	– Teller oder Kegel
– Oberteil schräg	– verschraubt		– Kolben
– Eckform	– selbstdichtend	Spindelgewinde mit	– Doppelsitz
– Mehrwegeform	– deckellos	steigendem/nicht steigendem Handrad	– Teller oder Kegel mit Drosselansatz
		– Spindel ohne Gewinde	– Kolben mit Drosselansatz
		– ohne Spindeldurch- führung	

In der Wasserversorgung werden Ventile, bis auf Sonderbauarten, kaum mehr eingesetzt. Dies liegt vor allem in den erhöhten Druckverlusten, bedingt durch die konstruktive Ausführung, begründet.

3.2.7.4 Hähne

Ein Hahn ist eine Armatur, deren Abschlußkörper sich drehend um die Achse quer zur Strömung bewegt, und deren Abschlußkörper in Offenstellung durchströmt ist. Vorteile der Hähne sind die einfache und robuste Bauweise sowie der geringe Druckverlust bei strömungstechnisch günstiger Konstruktion des Öffnungsquerschnittes. Die Dichtflächen gleiten bei Hähnen beim Schaltvorgang aufeinander, so daß nur verminderte Möglichkeiten von Schmutzansammlungen bestehen. Entscheidend dabei ist aber die Härte der Verschmutzung, welche zu bleibenden Schäden an der Dichtfläche führen kann. Verschmutzte oder schadhafte Dichtflächen können nachgeschliffen bzw. durch Nachdichten wieder instandgesetzt werden. Der Durchgangsquerschnitt bei voller Öffnung entspricht in den meisten Fällen dem zum gleichen Nenndurchmesser gehörenden Rohrquerschnitt. Zur Betätigung von Hähnen werden ab DN 200 meistens Vorgelege in offenen oder geschlossenen Getriebekästen erforderlich. Insgesamt lassen sich rasche Schaltzeiten realisieren.

In der Wasserversorgung werden überwiegend Kugelhähne für PN 10, 16, 25 und 40 und DN 80–1400 eingesetzt. Sie bestehen aus dem Kugelküken, der Durchgangsdichtung und dem Gehäuse und besitzen verschiedene Vorteile wie

- überwiegend rohrleitungsgleicher Durchgang,
- hohe Stabilität gegen innere und äußere Kräfte,
- kompakte Bauform und dadurch günstige Abmessungen,
- keine Verwendung von Dichtmittel,
- wartungsarm,
- hohe Dichtheit bei niedriger Dichtkraft,
- geschützte Lage der Dichtungen sowie
- Eignung für alle Betriebsdrücke.

Für die Formen und Ausrüstungen für Kugelhähne gilt DIN 3357. Dabei werden Kugelhähne unterschieden nach vollem und reduziertem Durchgang. Letztere kommen in der Wasserversorgung kaum zur Anwendung, da diese ein Molchen der Rohrleitung beeinträchtigen würden. Die entsprechende Bohrung des Kugelhahnes wird durch 2 Gleitringe abgedichtet. Dies wird durch das Anpressen von Weichdichtungen erreicht. Gehäuse und Kugel bestehen bis PN 16 aus Gußeisen (GG-25), ab PN 25 aus duktilem Gußeisen (GGG-50) und ab PN 40 aus Stahlguß. Einige Hersteller verwenden aber den Werkstoff Stahlguß bereits für niedrigere Nenndrücke. Die Spindel wird ebenfalls durch weichdichtende Materialien abgedichtet. Kugelhähne mit schwimmend gelagerter Kugel erhalten die Abdichtung stets auf der Ausgangsseite des Hahnes. Die notwendige Dichtkraft wird bei niedrigen Betriebsdrücken durch die Vorspannung der Dichtelemente aufgebracht. Mit steigendem Betriebsdruck wird die Kugel durch die Druckkraft an den Dichtsitz gepreßt. Bei kleineren Nenndurchmessern kann die Kugel einseitig gelagert werden. Größere Nenndurchmesser und höhere Betriebsdrücke erfordern dagegen eine zweiseitige Lagerung der Kugel im Gehäuse. Grund dafür ist, daß die auf der Kugel wirkende Kraft bei einseitiger Lagerung die zulässige Flächenpressung der Weichdichtungen übersteigen würde. Letztendlich würde dies entsprechend hohe Schaltmomente erfordern. Dabei richtet sich die Art der Lagerung nach den Betriebsdrücken sowie Gehäuse- und Spindelmaterialien. Bei großen Nenndurchmessern kommen u. a. Kugel-, Nadel- oder Gleitlager zur Anwendung. Kugelhähne können mit Schwenkantrieben ausgerüstet werden.

Hinsichtlich der Anschlußarten werden Hähne mit Flanschen, Schweißenden oder Gewindemuffen mit Innen- bzw. Außengewinde, in Abhängigkeit vom Nenndruck und Nenndurchmesser, geliefert.

Anhand des hohen Materialaufwandes und somit der Herstellungskosten spielt der Kugelhahn in der heutigen Wasserversorgung eher eine untergeordnete Rolle.

3.2.7.5 Klappen

Eine Klappe ist eine Armatur, deren Abschlußkörper sich drehend um die Achse quer zur Strömung bewegt, und deren Abschlußkörper in Offenstellung umströmt ist. Der Abschlußkörper besitzt überwiegend die Form einer runden Scheibe. Die Vorteile der Klappe gegenüber anderen Absperrarmaturen bestehen vor allem in der kompakten Bauweise, dem geringen Platzbedarf und der leichten Bedienbarkeit. Klappen werden heute so konstruiert, daß diese beidseitig dicht sind. Dies wird erreicht durch entsprechende Gestaltung der Sitz- und Dichtungsflächen sowie der Sitzgeometrie. Sie sollten aber vorzugsweise in Richtung des Druckrichtungspfeiles eingebaut werden, um die vorhandenen Spiele an der Klappenwelle voll auszunutzen. Nachteilig bei Klappen ist der nicht freie Durchgang in Offenstellung für das Molchen der Rohrleitung.

Für Klappen gilt DIN 3354. Die Dicke der Scheibe ist abhängig vom Betriebsdruck des Mediums. Die Abdichtung der Scheibe erfolgt überwiegend weichdichtend, aber auch in besonderen Fällen metallisch dichtend.

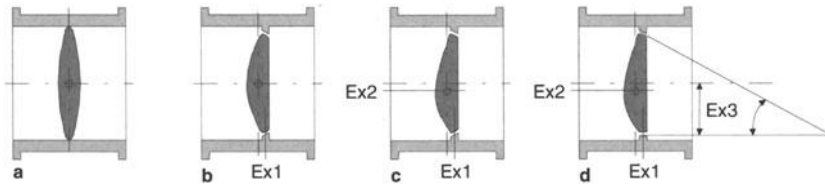


Abb. 3.2-28 Lage der Welle zur Klappenscheibe

a zentrische Lagerung, **b** exzentrische Lagerung, **c** doppelt exzentrische Lagerung, **d** 3-fach exzentrische Lagerung

Die heute gebräuchlichen Grundvarianten der Lager der Welle zur Klappenscheibe sind in Abb. 3.2-28 dargestellt. Hierdurch werden das Einschwenken der Scheibe in den Sitzring des Gehäuses, das Wiederabheben und die Dichteigenschaften beeinflusst.

Bei der *zentrisch* gelagerten Klappenscheibe bilden die Achsen der Klappenwelle und -scheibe eine Gerade und sind mittig zur Rohrachse im Gehäuse gelagert. Ein wesentlicher Nachteil liegt darin, daß die Dichtung im Bereich der Wellenzapfen unterbrochen werden muß. Die Abdichtung selbst wird ausschließlich durch Anlegung und Formänderung der elastischen Profildichtung gegen den Sitzring durchgeführt. Beim Schließen der Klappe legt sich diese Profildichtung wechselseitig an die Sitzfläche an. Damit ist der Verschleiß im Sitz sehr hoch, so daß eine ausreichende mechanische und thermische Beständigkeit sowie Abriebfestigkeit des Dichtwerkstoffes gegeben sein muß. In der Wasserversorgung kommt somit überwiegend die Elastomer-Dichtung (z. B. EDPM oder Perbunan) zum Einsatz, welche beispielsweise mit Keilring-Segmenten befestigt wird.

Eine spezielle Entwicklung, die auf der Grundlage des weichdichtenden Schiebers mit vulkanisiertem Absperркеil basiert, stellt die zentrische Klappe mit allseitig gummierter Scheibe dar. Diese wird für PN 10 und 16 in DN 100–300 hergestellt. Diese Klappe ist beidseitig dicht und im Achsbereich nicht unterbrochen. Das Dichtprinzip bietet gegenüber der herkömmlichen zentrischen Klappe mit Manschettendichtung, die am Gehäuse verankert ist, den Vorteil geringerer Betätigungsmomente nach langer Standzeit. Des weiteren ist die gummierte Scheibe strömungsgünstiger, gegeben durch das Fehlen der Befestigungselemente für die Hauptdichtung. Der freie Strömungsquerschnitt beträgt beispielsweise bei DN 150 77 % gegenüber einer doppelt exzentrischen Klappe mit 61 %. Infolgedessen ergeben sich geringere Widerstandsbeiwerte. Als Dichtungswerkstoff kommt das bewährte Elastomer NBR zur Anwendung. Die gummierte Scheibe und das vollständig gekapselte Axialgetriebe verhindern, daß die Antriebselemente mit dem Medium in Kontakt kommen.

Bei der *exzentrisch* gelagerten Klappenscheibe wird der Nachteil der zentrisch gelagerten Klappenscheibe durch die veränderte Lagerung behoben, so daß eine ununterbrochene Klappenscheibendichtung möglich ist. Durch Einschwenken in den überwiegend kegelförmig abgedrehten und senkrecht zur Rohrachse im Gehäuse angeordneten Sitzring wird die Abschlußdichtung gewährleistet. Der Verschleiß im Sitz ist geringer als bei der zentrisch gelagerten Klappenscheibe. Auch hier gilt die mechanische und thermische Beständigkeit und Abriebfestigkeit.

Hierbei erfolgt die Innenabdichtung der Scheibe durch eine endlose Elastomer-Dichtung, welche mit Halteringen oder -segmenten befestigt wird. Ein Nachstellen und Austauschen ohne Demontage der Klappenscheibe ist möglich.

Die *doppelt exzentrisch* gelagerte Klappenscheibe ist außerhalb der Klappenscheibenachse und der Gehäuseachse gelagert. Obwohl die gleichen Hauptmerkmale wie für die zentrisch gelagerte Klappenscheibe gelten, ist das auftretende Reibungsmoment geringer. Hierbei erfolgt ebenso die Innenabdichtung der Scheibe durch eine endlose Elastomer-Dichtung, welche mit Halteringen oder -segmenten befestigt wird. Ein Nachstellen und Austauschen ohne Demontage der Klappenscheibe ist möglich. Die metallische Dichtung wird vorzugsweise gewählt, um das reibungsfreie Ein- bzw. Ausschwenken der Klappenscheibe in den Gehäusesitz und die gleichmäßige Anpressung über den gesamten Umfang der Dichtungsebene im Abschluß zu gewährleisten. Trotzdem ist der Verschleiß für den Metallsitz hoch.

Diese Klappenart kommt in der Wasserversorgung überwiegend zur Anwendung. Zusammenfassend sprechen dafür die folgenden Vorteile:

- optimales Einfahren des Dichtringes in den Gehäusesitz,
- erhebliche Reduzierung der Scherbeanspruchung am Dichtring,
- hohe Lebensdauer durch geringeren Verschleiß am Dichtring gegenüber zentrisch und exzentrisch gelagerten Klappenscheiben,
- hohe Dichtkraft bei gleichzeitig geringen Betätigungskräften,
- Entlastung des Dichtringes in Offenstellung,
- ununterbrochene Dichtung um die Klappenscheibe sowie
- Möglichkeit des Dichtringaustausches in Offenstellung.

Die Vorteile der Einfach- und Doppel exzentrität werden bei kleinen Nenn-durchmessern mit einer Verschlechterung des Widerstandsbeiwertes gegenüber der zentrischen Bauart eingebüßt. Der freie Strömungsquerschnitt wird bauartbedingt stärker eingeengt als bei den zentrisch gelagerten Klappen.

Eine Weiterentwicklung ist die *3-fach exzentrisch* gelagerte Klappenscheibe, die für Metalledichtungen optimiert wurde¹⁵. Sie besitzt gegenüber der doppelt exzentrisch gelagerten Klappe den Vorteil, daß sie keinen Verschleiß im Sitz aufweist. Dies wird gewährleistet, da sich die Dichtflächen erst unmittelbar in der ZU-Stellung berühren, wobei das Schließmoment des Antriebs dann die notwendige Flächenpressung zum dichten Schließen erzeugt. Auch das oft befürchtete Klemmen in der ZU-Stellung tritt nicht auf. Der Sitz bleibt elastisch nachgiebig und dicht. Da keine Reibung im Sitz auftritt, reduziert sich der Antriebsbedarf deutlich gegenüber doppelt exzentrisch gelagerten Klappen.

Weitere Anforderungen an die Klappen bestehen darin, daß die Dichtungen der Wellenzapfen auch bei eingebauter Klappe austauschbar sein müssen. Des weiteren müssen alle mediumgeführten Schrauben und die Haltesegmente bzw. der Klemmring aus korrosionsbeständigem Material hergestellt sein.

Die Gehäuse werden im allgemeinen für niedrige Betriebsdrücke aus Gußeisen, für höhere Betriebsdrücke aus duktilem Gußeisen oder Stahlguß hergestellt.

¹⁵ Es handelt sich hier um eine doppelt exzentrisch gelagerte Klappenscheibe mit trizentrischer Sitzgeometrie.

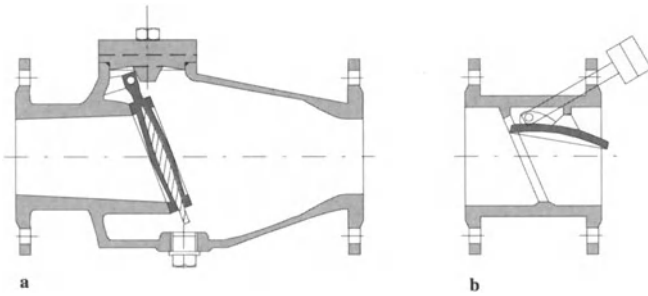


Abb. 3.2-29 Rückschlagklappe

a einfache Bauart, **b** doppelt exzentrisch gelagerte Klappenscheibe mit Gegengewicht

Hinsichtlich der Anschlußarten werden Klappen mit Flanschen, Schweißenden oder als Einklemmbauweise geliefert.

Die Absperrklappen können mit verschiedenen Antrieben ausgerüstet werden. Größere Nenndurchmesser erfordern ein Getriebe, welches unmittelbar aufgef lanscht wird. Die Getriebe müssen selbsthemmend ausgeführt sein und entsprechend dem auftretenden maximalen Drehmoment der Absperrklappe unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors ausgelegt werden. Sind große Antriebsmomente und lange Schließzeiten notwendig, können Stirnradvorgelege vorge schaltet werden.

Neben den Absperrklappen werden häufig auch Rückschlagklappen in der Wasserversorgung eingesetzt. Eine übliche Rückschlagklappe für kleine Nenndurchmesser zeigt Abb. 3.2-29a. Ab DN 300 sollten Rückschlagklappen mit exzentrisch gelagerter Scheibe verwendet werden. Sie benötigen in jeder Lage eine herausgeführte Welle mit Hebel und Gegengewicht (Abb. 3.2-29b).

Um bei Abriß der Strömung, insbesondere bei größeren Nenndurchmessern, Druckstöße in Wassernetzen zu vermeiden, werden Rückschlagklappen mit Dämpfung vorgesehen. Dabei wird die Bauart der doppelt exzentrisch gelagerten Klappenscheibe verwendet. Sie öffnet unter Einfluß der positiven Strömung und stellt sich auf einen der Strömung entsprechenden Öffnungsgrad ein. Bei Verringerung der Strömung folgt die Klappenscheibe selbständig bis zum dichten Abschluß der Null-Strömung bzw. Umkehr der Strömung. Die Klappenscheibe ist freischwingend und folgt somit in ihrer Bewegung der Strömung des Mediums. Die Dämpfung wird eingesetzt, wo mit hartem Zuschlagen der freischwingenden Klappenscheibe zu rechnen ist. Dabei kommen verschiedene Konstruktionen zur Anwendung.

Es ist auch möglich, eine Absperrklappe und eine Rückschlagklappe als eine Armatur zu kombinieren. Damit werden sowohl die Funktion des Absperrens als auch das Verhindern des Rückflusses realisiert. Diese Kombination ist dann von Interesse, wenn beispielsweise im stromlosen Zustand die Absperrklappe geschlossen werden muß (Schutzzustand); die zweite Funktion als Rückschlagklappe ermöglicht dieses ohne zusätzlichen Aufwand.

3.2.7.6 Einsatzweise der Grundbauarten

Da für die Auswahl einer Armatur meist mehr als eine der genannten Grundbauarten in Frage kommt, sind in Tabelle 3.2-21 wichtige Kriterien, wie Dichtheit, Druckverlust, Platzbedarf, Gewicht, Bedienbarkeit, Öffnungs-/Schließzeit, Eignung für Richtungswechsel der Strömung und Betriebssicherheit qualitativ vergleichend gegenübergestellt, ohne dabei den Anspruch auf deren Vollständigkeit zu erheben (Ibañez 1997). Bei der Wahl der Grundbauart spielen vor allem die Baugröße und die damit verbundenen Kosten eine entscheidende Rolle. Das Ergebnis stimmt auch mit der Bedeutung der Armaturentypen in der Wasserversorgung überein.

Bis DN 200 sind der weichdichtende Schieber und ab DN 250 die Klappe sowohl nach der Bewertungstabelle als auch in der Praxis die beiden führenden Bauarten. Alle anderen Bauarten haben höhere Bewertungen und sind somit nur begrenzt oder sogar in bestimmten Fällen nicht einsetzbar.

Kugelhähne haben in der Wasserversorgung ebenso eine Tradition wie Schieber und Klappen. Der Vorteil des Kugelhahnes liegt gegenüber der Klappe im freien molchenbaren Durchgang bei Offenstellung. Nachteilig dagegen wirken der Materialaufwand und somit die Herstellungskosten, so daß der Kugelhahn in der heutigen Wasserversorgung eher eine untergeordnete Bedeutung hat. Ventile kommen in der Wasserversorgung im allgemeinen bis auf einige Ausnahmefälle nur noch begrenzt zum Einsatz, was insbesondere im hohen Widerstandsbeiwert begründet ist.

Tabelle 3.2-21 Qualitativer Vergleich wichtiger Kriterien von Armaturengrundbauarten

Kriterium	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
– Dichtheit	3	1	2	1	1	2	1	1	1
– Druckverlust	1	1	1	3	2	1	4	4	1
– Platzbedarf	4	2	3	2	1	3	2	3	3
– Gewicht	4	1	2	2	1	4	1	2	3
– Bedienbarkeit	3	2	3	2	1	2	2	3	3
– Öffnungs-/Schließzeit	2	2	2	1	1	1	2	2	2
– Eignung für Richtungswechsel der Strömung	1	1	1	1	1	1	3	3	3
– Betriebssicherheit	2	2	2	2	2	2	2	2	4
Summe der Kriterien	20	12	16	14	10	16	17	20	20

Bewertung: 1 = gut, 2 = befriedigend, 3 = bedingt tolerierbar, 4 = nicht tolerierbar

A1 metallisch dichtender Schieber DN ≥ 500 , A2 weichdichtender Schieber DN ≤ 200 ,

A3 weichdichtender Schieber DN ≥ 250 , A4 Klappe DN ≤ 200 , A5 Klappe DN ≥ 250 ,

A6 Kugelhahn, A7 weichdichtendes Ventil DN ≤ 200 , A8 weichdichtendes Ventil DN ≥ 250 ,

A9 Membranventil

3.2.7.7

Sonderarmaturen

Ringkolbenventile. Dies sind Durchgangsventile mit rotationssymmetrischer Strömungsführung, wobei der Durchflußquerschnitt in jeder Stellung ringförmig ist. Ringkolbenventile können sowohl als Absperr-, Drossel- oder Regelorgan entsprechend verschiedener Einbauarten eingesetzt werden. Den Aufbau zeigt Abb. 3.2-30. In dieser Ausführung werden sie bis DN 1200 und für eine Nenn-druckstufe PN 40 hergestellt; wobei andere Ausführungen bis DN 2000 und PN 10–25 möglich sind. Zum Betätigen dient ein Schubkurbelantrieb.

Die Vorteile der Ringkolbenventile liegen u. a. in der beliebig einstellbaren Schließzeit, in dem guten Regelverhalten, auch in gedrosselter Stellung sowie in den geringen Druckverlusten. Ebenso ist es möglich, in Verbindung mit einer angebauten Meßeinrichtung, Ringkolbenventile zur Messung des Durchflusses zu verwenden. Hinter einer Pumpe eingebaut, ist die Armatur gleichzeitig Absperr- und Rückschlagorgan sowie Durchflußmeßgerät. Auch zum Öffnen eines Nebenauslasses zur Druckstoßsicherung ist dieser geeignet. Ringkolbenventile werden ebenfalls als sogenannte Rohrbruchsicherung zum Einsatz gebracht, um das Auslaufen langer Leitungen oder von Behältern und die dadurch möglichen Schäden im Gelände und an Bauwerken zu verhindern.

Schmutzfänger/Filter. Diese werden eingesetzt, um feste Verunreinigungen vom Medium zurückzuhalten oder abzuscheiden. Sie dienen einerseits zum Reinigen des Mediums, zum anderen zum Schutz von Regelarmaturen, Pumpen und anderen Rohrleitungseinbauten. Dabei wird die Größe der zurückgehaltenen Verunreinigungen von der Maschenweite des im Filter angeordneten Siebeinsatzes bzw. von der Durchlässigkeit des filtrierenden Materials bestimmt. Wichtigste Kenngröße des Filters ist das Verhältnis der freien Fläche des Siebeinsatzes zur freien Fläche des Anschlußdurchmessers. Um dieses Verhältnis möglichst groß zu halten, ergeben sich mit höheren Reinheitsanforderungen größere Filterabmessungen.

Schmutzfänger in Schrägsitzform (Abb. 3.2-31a) werden überwiegend vor Pumpen in der Saugleitung realisiert. Dabei bestehen verschiedene Möglichkeiten hinsichtlich der Siebform und deren Maschenweite. Das auswechselbare Sieb wird meistens aus rostbeständigem Edelstahl-Drahtgewebe hergestellt.

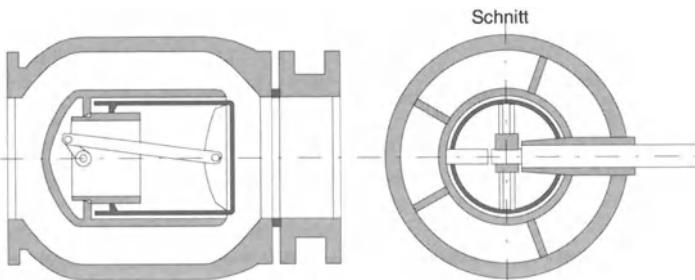


Abb. 3.2-30 Schematischer Aufbau eines Ringkolbenventiles

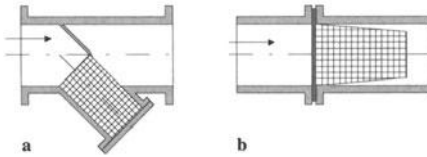


Abb. 3.2-31 Schmutzfänger
a Schrägsitzform, **b** Hutsieb

Ebenso besteht die Möglichkeit, sogenannte Hubsiebe (Abb. 3.2-31b) zum Einbau zwischen Normflanschen einzusetzen. Der Siebkegel besteht dabei überwiegend aus rostbeständigem Edelstahl-Drahtgewebe mit Lochblechstützkörper. Sie werden vor allem bei kleineren Nenndurchmessern verwendet. Bei mittleren und großen Nenndurchmessern müssen dagegen anhand der Baulänge entsprechende Paßstücke eingebaut werden, die den Montageaufwand bei Reinigung nur unnötig verkomplizieren (Beispiel: DN 500 – Baulänge ca. 620 mm).

Der Verschmutzungsgrad der Filter wird mit Hilfe einer Differenzdruckmessung ermittelt.

Des weiteren kommen Flansch-, Muffen- und Einsteck-Siebe insbesondere an Saugleitungen, seltener am Beginn von Behälterentnahmen gegen das Eindringen von groben Verunreinigungen zum Einsatz. Die Siebe werden aus verzinktem Stahlblech bzw. nichtrostendem Stahl, in Sonderfällen aus Messing oder Kupferblech hergestellt. Der Gesamtquerschnitt der 6–10 mm breiten Schlitzte soll aus strömungstechnischen Gründen nicht geringer sein als der 2,5-fache Rohrdurchmesser.

Be- und Entlüftungsventile. Selbsttätige Be- und Entlüftungsventile haben die Aufgabe, die sich in Druckrohrleitungen und Druckbehältern an Hochpunkten ansammelnden geringen Gasmengen unter Druck abzulassen und beim Entleeren und Anfüllen der Leitungen, also im drucklosen Zustand, große Luftmengen ein- bzw. auszulassen. Ist die Entnahme größer als der Zufluß, so verhindern sie Vakuumbildung in der Rohrleitung und die damit verbundene Gefahr des Ansaugens von verschmutztem Grundwasser durch Undichtigkeiten. Schließlich können aber auch betriebliche Störungen größere Luftmengen der Rohrleitung zuführen.

Die Ansammlung der mitgeführten Luft erfolgt in den meisten Fällen an geodätischen und hydraulischen Hochpunkten der Leitung, an Armaturen oder Querschnittsveränderungen, aber auch an Leitungsstellen, an denen sich die Schleppkraft des Wassers und die Auftriebskraft der Luftblasen im Gleichgewicht befinden. Diese Luftansammlungen können den Rohrquerschnitt vermindern, unzulässige dynamische Druckänderungen verursachen und Durchflußmessungen verfälschen.

Nach (Mutschmann et al. 1997) sind in Fern-, Zubringer- und Hauptleitungen keine störenden Luftansammlungen während des normalen Betriebes zu erwarten, wenn die Luft stets selbständig entweichen kann und die Schleppkraft des fließenden Wassers ausreicht, die Luftblasen mitzureißen. Ausreichende Schleppkraft des Wassers ist gegeben, wenn die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers die Mindestwerte erreicht (Abb. 3.2-32). Sind größere Luftansammlungen zu erwarten, so

können vorgesteuerte Entlüftungsarmaturen zum Einsatz kommen. Die Gefährdung der Rohrleitungen durch Unterdruckbildung ist klein, wenn diese entsprechend durch einen Innen- und Außenschutz gegen Korrosion versehen und für einen kurzzeitigen Unterdruck von 0,8 bar geeignet sind.

Das betriebsmäßige Entlüften der Versorgungs- und Anschlußleitungen erfolgt in der Regel über die Anschlußleitungen. Hinsichtlich der Einfriergefahr sind grundsätzlich Be- und Entlüftungsventile im Freien möglichst dicht auf der Rohrleitung anzuordnen. Die Spindel soll senkrecht stehen, damit die anschließende Leitung leerlaufen kann. Aus funktionstechnischen Gründen müssen diese Armaturen in ausreichend großen Schächten mit entsprechenden Möglichkeiten zur Be- und Entlüftung untergebracht werden.

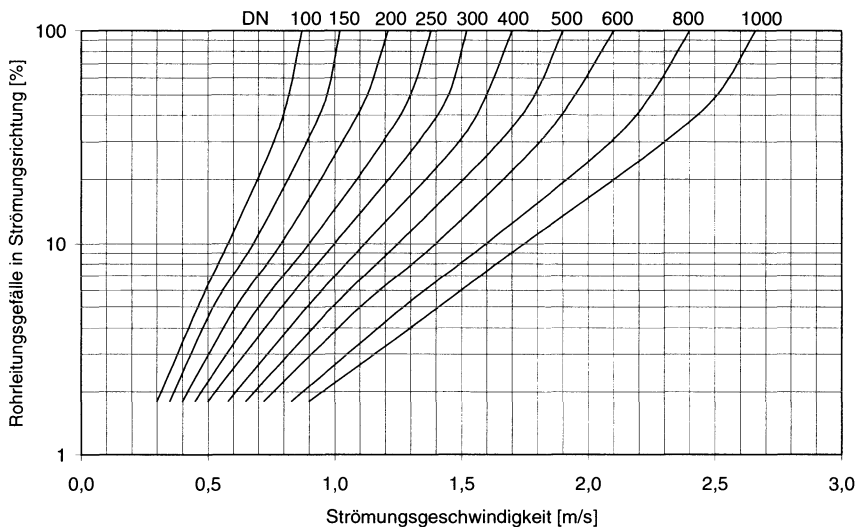


Abb. 3.2-32 Kleinste Strömungsgeschwindigkeit und größtes Rohrleitungsgefälle zur Selbstentlüftung nach (Mutschmann et al. 1997)

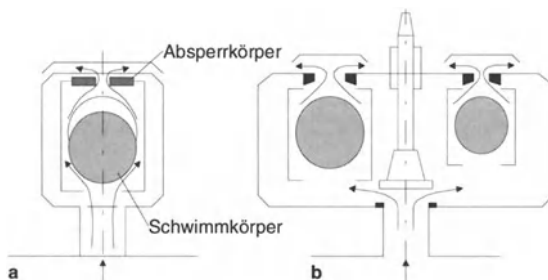
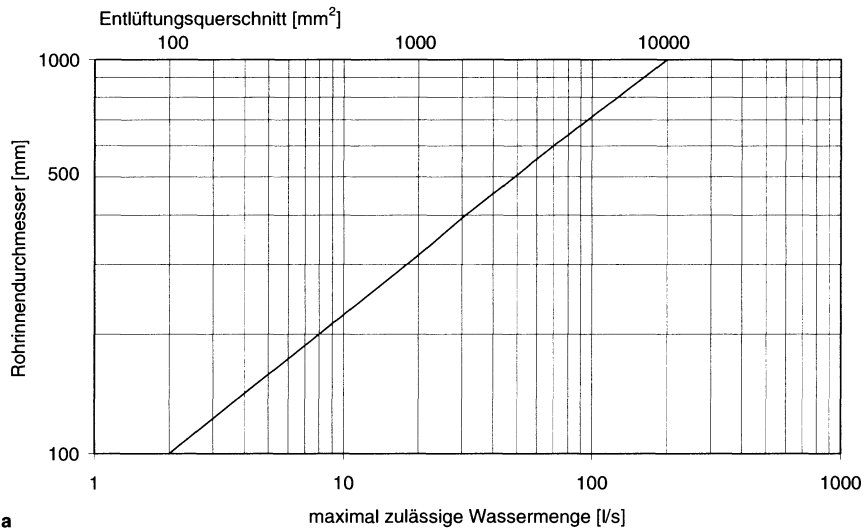
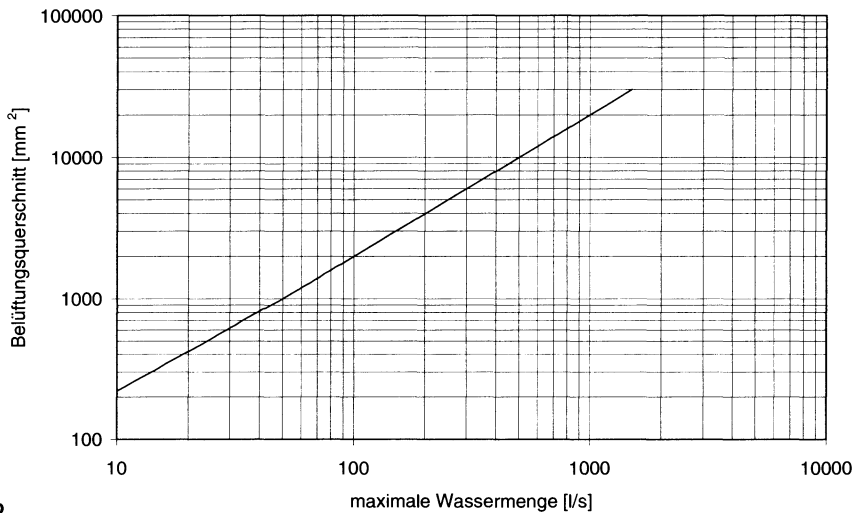


Abb. 3.2-33 Be- und Entlüftungsventile
a Einkammer-Ventil, **b** Zweikammer-Ventil



a



b

Abb. 3.2-34 Auslegung von Be- und Entlüftungsventilen nach (Mutschmann et al. 1997)

a erforderlicher Entlüftungsquerschnitt (Ansatz: 20 m/s Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Entlüftungsquerschnitt) bei maximal zulässiger Wassermenge (Ansatz: 0,25 m/s Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in der Rohrleitung), **b** erforderlicher Belüftungsquerschnitt

Bei den Be- und Entlüftungsventilen kommen verschiedene Bauarten zur Anwendung. Bei den Einkammer-Ventilen (Abb. 3.2-33a) handelt es sich um Ventile mit Schwimmkörper, die einen großen Lüftungsquerschnitt mit Absperrkörper und gleichzeitig einen kleinen Lüftungsquerschnitt im Absperrkörper besitzen. Für

größere Rohrleitungen werden vorwiegend Doppelventile eingesetzt. Bei Zwei- oder Doppelkammer-Ventilen (s. Abb. 3.2-33b) übernimmt die größere Kugel die wechselnde Be- und Entlüftung, während die kleinere Kugel die laufende Entlüftung unter Betriebsdruck gewährleistet. Das integrierte Absperrorgan dient dabei für Instandhaltungszwecke. Federbelastete Tellerventile sind nur für das automatische Belüften großer Luftmengen geeignet und werden vom Betriebsdruck gesteuert. Neben diesen Bauarten können noch vorgesteuerte Kolbenventile zum Einsatz kommen.

Die Größe der erforderlichen Be- und Entlüftungsquerschnitte kann anhand der Darstellungen aus Abb. 3.2-34 vorgenommen werden. Weitere Ausführungen zur Auslegung sind im DVGW-Merkblatt W 334 – Be- und Entlüften von Wassertransport- und Verteilungsanlagen – enthalten.

Hydranten. Diese Armaturen (PN 16) werden außer zur Löschwasserversorgung zum Spülen kleiner Rohrleitungen und zum Be- und Entlüften von Hand beim Entleeren und Auffüllen von Rohrleitungen benutzt. Sie dienen gleichzeitig zur Wasserentnahme für öffentliche Zwecke sowie zur Entnahme von Bauwasser.

Für den Brandschutz sind *Überflurhydranten* unbedingt vorzuziehen. Sie sind leichter auffindbar und schneller betriebsbereit. Die Herstellung der Betriebsbereitschaft erfolgt ohne Verwendung von Zusatzteilen (z. B. Standrohren). Sie gewährleisten höhere Durchflüsse (140 m³/h bei DN 80, 200–210 m³/h bei DN 100 und 1 bar Druckdifferenz sowie 2 geöffneten Abgängen) als Unterflurhydranten. Abgesehen von älteren Überflurhydranten, weisen diese Hydranten grundsätzlich oben 2 B-Abgänge auf. Ab DN 100 ist zusätzlich noch ein unterer A-Abgang vorgeschrieben, wobei der untere Abgang ausschließlich nur für Druckschläuche bestimmt ist. Als Nachteile sind neben höheren Anschaffungskosten sowie Wartungskosten vor allem die mögliche Behinderung und Gefährdung durch den Verkehr zu nennen. Aus diesen Gründen heraus werden Überflurhydranten nur noch mit einer Sollbruchstelle verwendet, damit bei einem Umfahren die Hauptabspernung oder sogar die Rohrleitung nicht beschädigt werden.

Bei enger Bebauung und verkehrsreicher Lage müssen jedoch *Unterflurhydranten* verwendet werden. Sie haben geringere Anschaffungskosten und stellen keine Behinderung des Straßenverkehrs dar. Des weiteren sind Unterflurhydranten einfacher einzubauen. Nachteilig dagegen ist, daß diese bei Dunkelheit, bei Schnee oder wegen parkender Fahrzeuge schlecht zu finden sind. Deshalb sind entsprechende Hinweisschilder nach DIN 4066 erforderlich. Für die Herstellung der Bereitschaft wird mehr Zeit benötigt als bei Überflurhydranten, da Zusatzteile (z. B. Standrohr) verwendet werden müssen. Auch werden Undichtheiten schlechter erkannt. Unterflurhydranten ermöglichen einen geringeren Durchfluß (etwa 110 m³/h bei 1 bar Druckdifferenz) als Überflurhydranten. In der Wasserversorgung werden vorrangig (etwa 2/3) Unterflurhydranten DN 80 eingesetzt. Unterflurhydranten DN 100 sind nicht in der öffentlichen Wasserversorgung und nicht für öffentliche Feuerlöschzwecke anwendbar, sondern sind ausschließlich für Betriebe mit Werksfeuerwehren bestimmt.

Mit Ausnahme untergeordneter Rohrleitungen können die Hydranten neben der Rohrleitung mit einem Absperrschieber dazwischen aufgestellt werden, so daß Reparaturen ohne Absperrung des gesamten Rohrabschnittes möglich sind. Zur

Be- und Entlüftung dienende Hydranten an Hochpunkten werden von oben an die Rohrleitung angeschlossen.

Die Anforderungen und Anerkennungsprüfungen für Hydranten sind in DIN 3321, die Abmessungen der Unterflurhydranten in DIN 3221 und die der Überflurhydranten in DIN 3222 genormt. Im DVGW-Arbeitsblatt W 331¹⁶ – Hydranten – sind u. a. die Grundsätze zum Einbau und die Betriebshinweise enthalten.

Hinsichtlich der Bauformen werden Hydranten unterschieden in Unterflurhydranten DN 80 mit A1, AD1, AD2, B1, BD1 und BD2 sowie Überflurhydranten DN 80, 100, 125 mit AU, AUD, AFU, AFUD, BU, BUD, BFU und BFUD. Dabei bedeuten:

- A: mit selbsttätiger Entleerung und Druckwasserschutz,
- B: ohne selbsttätige Entleerung,
- D: mit zusätzlicher Absperrung,
- 1: mit unterem Anschluß,
- 2: mit seitlichem Anschluß sowie
- F: mit Fallmantel.

Anbohrarmaturen. Die von den Versorgungsleitungen zu den einzelnen Verbrauchern führenden Hausanschlußleitungen werden am Hauptrohr in den meisten Fällen mit Hilfe einer Anbohrung angeschlossen. Hierbei werden Anbohrschellen verwendet, welche gleichzeitig das Anschluß- und Absperrorgan umfassen (s. Abb. 3.2-35). Sie ermöglichen somit den Anschluß an unter Druck stehende Rohrleitungen. Nach Ausbau des Abschlußkörpers wird durch das Absperrorgan hindurch die vorhandene Rohrleitung mit einem Anbohrapparat aufgeschnitten. Nach vollzogenem Durchbruch wird der Abschlußkörper eingesetzt. Ein zwangsläufiges Ausspülen der Bohrspäne ist gegeben. Der Anbohrapparat und die Anbohrschelle sind konstruktiv so aufeinander abgestimmt, daß nur unbedeutend Wasser ausläuft. Zur Abdichtung zwischen Rohr und Anbohrschelle dienen Flach- oder Runddichtungen, die sich an den jeweiligen Außendurchmesser des Rohres angleichen.

Die Anbohrschellen bzw. -brücken werden für DN 80–300 bis PN 16 entsprechend für anzubohrende Rohre aus Gußeisen, Stahl, Asbestzement, Faserzement sowie Kunststoff gefertigt. Hierbei ist insbesondere der Außendurchmesser entscheidend. Rohre aus Asbestzement größerer Nenndurchmesser werden jedoch in den meisten Fällen nicht angebohrt, die Anschlüsse erfolgen an den Überschiebkupplungen, welche mit Gewindeabgangsstutzen versehen sind.

In vielen Fällen ist es üblich oder sogar nötig, das Absperrorgan der Hausanschlußleitung nicht unmittelbar an der Versorgungsleitung zu realisieren, sondern beispielsweise aus der Fahrbahn in den Gehweg zu verlegen. Hierbei ist an der Versorgungsleitung nur eine Anbohrschelle mit Übergang auf die Hausanschlußleitung nötig. Das Absperrorgan besteht dabei in Form einer Steckscheibe, die durch einen O-Ring abgedichtet ist. Damit ist ein Herankommen an das Zwischenstück zwischen Anbohrschelle und Absperrschieber der Hausanschlußleitung im Schadensfall immer gewährleistet.

¹⁶ Dieses Arbeitsblatt befindet sich derzeit in Überarbeitung.

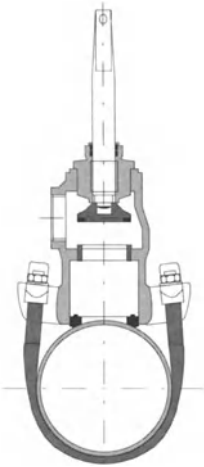


Abb. 3.2-35 Anbohrschelle

Neben der beschriebenen Bauart gibt es weiterhin Ventil- oder Schieberarmaturen, die mit einem Einbausatz von der Bodenoberfläche aus bedienbar sind. Dazu zählen Drehscheiben- und Schließblechverschlüsse, Anbohrbrücken mit Kükenhahn sowie Eckventile mit Gewinde- oder Steckfitting-Abgang.

Auf den Korrosionsschutz der eingebauten Armaturen ist besonders Wert zu legen. Dies gilt sowohl für die Schrauben, als auch für die Haltebügel. Letztere sollten gummiert oder PE-beschichtet sein.

3.2.8

Bauwerke und Schächte

In der Wasserversorgung wird hauptsächlich von Schächten gesprochen, da es sich in der Regel um kleinere Bauwerke handelt. Diese Schächte dienen u. a. für die Unterbringung von größeren Armaturen in Leitungsabgängen, für Be- und Entlüftungszwecke sowie für Entleerungszwecke. Eine entsprechende Ausführung beispielsweise für einen Entlüftungsschacht zeigt Abb. 3.2-36.

Für Schächte ohne offenen Wasserspiegel werden die leichteren Schachtdeckel aus rostfreiem Stahl verwendet. Es ist aber auch möglich, Deckel aus glasfaserverstärktem Polyester einzusetzen. Diese Deckel sind leichter und gestatten dadurch eine größere Öffnungsweite von 1,0 m statt nur 0,8 m. Schachtdeckel werden mit einer entsprechenden Gummidichtung versehen, um somit das Eindringen von Kleinlebewesen zu verhindern.

Grundsätzlich sind Schächte mit erhöhten zusätzlichen Kosten verbunden. Dazu kommt, daß diese nur mit erheblichem Aufwand zwischen den Leitungen anderer Versorgungsmedien im Straßenquerschnitt untergebracht werden können. Deshalb sollten nur dort Schächte errichtet werden, wo diese auch erforderlich sind und einen entsprechenden Verwendungszweck erfüllen.

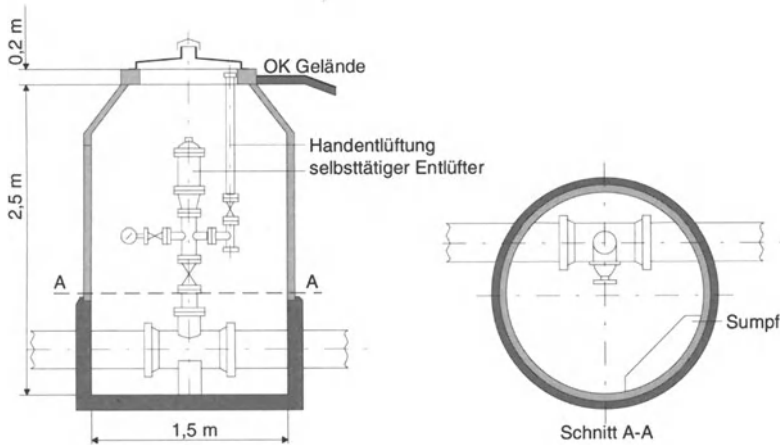


Abb. 3.2-36 Entlüftungsschacht

Die Ausführungsart kann verschieden sein, entweder vor Ort betoniert, gemauert oder aus Fertigteilen. Werden Schächte in wasserführende Böden eingebaut, müssen sie so hergestellt werden, daß keine Feuchtigkeit in den Innenraum eindringen kann. Soweit es die Platzverhältnisse zulassen, können Fertigteilsschächte kostengünstiger sein, insbesondere durch die Verkürzung der Bauzeit oder in Verbindung mit einer erforderlichen Grundwasserabsenkung. Fertigteilsschächte sind sofort belastbar.

Schwerpunkte hinsichtlich der Abdichtungen bei der Schachtausführung bilden im einzelnen die Grundplatte, die Schachtwände und deren Rohrdurchführungen, die Schachtdecke sowie deren Einstiegs- und Montageöffnungen. Die Grundplatten und die Schachtwände sind gegen Grundwasser bzw. vorkommendes Druckwasser ausreichend zu schützen. Die Schachtdecke ist in den meisten Fällen das schadenanfälligste Bauteil. Durch Kondenswasser, das unter der Decke hängenbleiben kann, und Oberflächenwasser, welches insbesondere durch die Einstiegs- und Montageöffnungen dringt, wird an der unteren Bewehrungslage Korrosion ausgelöst. Weitere Schädigungen sind die Folge, was letztendlich bis zum vollkommenen Verlust der Tragfähigkeit der Schachtdecke führen kann. Als Vorsorgemaßnahmen sollen Einstiegs- und Montageöffnungen so angeordnet werden, daß möglichst wenig Oberflächenwasser eindringen kann. Um an den Schachtinnenwänden keine Bildung von Kondenswasser zuzulassen, werden zur Lüftung eine perforierte Einstiegsöffnung oder separate Lüftungsrohre realisiert.

Die Schächte sind so zu bemessen, daß der erforderliche Arbeitsraum für die Bedienung der Armaturen sowie für deren Instandhaltung zur Verfügung steht.

Weitere Ausführungen zu Leitungsschächten sind im DVGW-Arbeitsblatt W 355¹⁷ – Leitungsschächte – enthalten.

¹⁷ Dieses Arbeitsblatt befindet sich derzeit in Überarbeitung.

3.2.9

Hausanschluß

In der Wasserversorgung gestaltet sich der Hausanschluß relativ einfach. Nach dem Eintritt der Hausanschlußleitung in das Gebäude (vorwiegend Keller) folgt, in der Regel noch vom Wasserversorgungsunternehmen realisiert, die Hauptabsperrarmatur, auch als Wasserzählereingangsarmatur bezeichnet, dann der Wasserzähler sowie danach eine weitere Armatur, die mit einem Entleerungshahn ausgerüstet ist. Des weiteren ist nach dem Wasserzähler eine Armatur zu setzen, die das Rückströmen von Wasser aus der Gebäudeleitung in die Hausanschluß- oder Versorgungsleitung verhindert und zwar für den Fall, wenn das Versorgungsnetz drucklos wird. Diese Armatur kann in die nachgeschaltete Armatur nach Wasserzähler integriert werden. An den oberen Enden der Gebäudeleitungen sind Be- und Entlüftungen vorzusehen, um bei Druckabfall das Einsaugen von unreinem Wasser zu verhindern.

Für den Fall, daß kein Keller im Gebäude zur Verfügung steht, ist ein durch Sickergrube entwässerter Zäblerschacht, mit den Mindestmaßen von 1 m Durchmesser und etwa 1,5 m Tiefe, vorzusehen.

Während früher u. a. die Hausanschlußleitungen aus Grauguß- oder sogar Bleirohren bestanden, kommen heute als Rohrwerkstoffe überwiegend PE-HD, seltener Stahl zum Einsatz (s. a. Abb. 3.2-10).

Grundlagen für die Planung und den Bau von Trinkwasseranlagen in Grundstücken und Gebäuden sind in der DIN 1988-2 enthalten. Solche Anlagen sind so auszuführen, daß eine sparsame Wasserverwendung möglich ist. Weiterhin sind die Rohrleitungen so zu bemessen, daß zum einen der Mindestversorgungsdruck an allen Entnahmestellen und zum anderen, zur Erhaltung der Trinkwasserqualität, der dazu nötige Wasseraustausch gewährleistet ist. Die Berechnung der Hausanschlußleitung erfolgt in der Regel durch das Wasserversorgungsunternehmen. Grundlage für die Auslegung dazu bildet die DIN 1988-3. Hierbei wird unterschieden nach dem vereinfachten (z. B. Wohnbau ohne Größenbegrenzung, kleine Hotelgebäude u. a.) und nur, wenn diese Berechnungsart nicht ausreichend ist, dem differenzierten Berechnungsgang (z. B. zum Nachweis der Notwendigkeit einer Druckerhöhungsanlage). Der Mindestquerschnitt der Hausanschlußleitung beträgt DN 25, selbst auch dann, wenn ein kleinerer Nenndurchmesser für die Versorgung ausreichen würde. Dies liegt darin begründet, daß die Materialkosten sowie die Kosten für Verlegung gleich groß bleiben. Durch die einheitlichen Bauteile läßt sich somit auch eine gewisse Lagerhaltung organisieren.

3.2.10

Meßtechnik

Im gesamten Wasserversorgungssystem müssen für den Betrieb die wesentlichen Betriebswerte erfaßt werden. Dazu zählen überwiegend Temperaturen, Drücke, Mengen und Volumenströme, wobei für die einzelnen Meßprinzipien verschiedenartigste Geräte zur Anwendung kommen. Hauptsächlich wird in der Wasserversorgung sowohl gezählt als auch gemessen. *Zählen* ist die Erfassung einer

Menge innerhalb eines beliebigen Zeitabschnittes, beispielsweise in m^3 . *Messen* dagegen ist die Erfassung der Menge in der Zeiteinheit. Hier erfolgt die Angabe entweder in l/s oder m^3/h .

Die Wasserzählung wird zum Zählen oder Festhalten von in Pumpwerken gefördert oder an die Verbraucher gelieferten Wassermengen eingesetzt. Die Differenz zwischen 2 Ablesungen stellt somit den Verbrauch dar. Für die Wasserzählung kommen heute überwiegend Flügelrad- oder Woltmannzähler, auch als Kombination in Form eines Verbundzählers, zur Anwendung. Letztere gewährleisten auch die Erfassung der kleineren Wassermengen. In seltenen Fällen werden auch Ringkolbenzähler verwendet.

Bei der Wassermessung kommen Wirkdruckgeräte, Durchflußmesser nach dem magnetisch-induktiven Meßverfahren (MID) oder Durchflußmesser mit Hilfe von Ultraschallgeräten zur Anwendung.

Die Messungen erfolgen an unterschiedlichen Standorten und werden in den meisten Fällen an eine zentrale Leitwarte übertragen. Neben diesen Messungen werden zusätzliche Melde- und Störsignale sowie Steuerbefehle als Anzeige oder direkten Eingriff auf Anlagen der Wasserversorgung übermittelt. Dazu zählen u. a. Stellungen von Armaturen, Leistungsangaben, Drehzahl der Pumpen, Schaltzustände von Anlagenbaugruppen.

Ziel einer zentralen Leitwarte ist es, einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb des Wasserversorgungssystems zu erreichen. Des weiteren trägt eine zentrale Leitwarte zur Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit und der Betriebssicherheit des Wasserversorgungssystems bei. Daneben sollen weiterhin die hydraulischen Gegebenheiten des Wassernetzes in jeder Betriebssituation voll ausgenutzt werden. Auch zählt die ständige Überwachung der Wasserverluste zu den Aufgaben der Leitwarte. Durch den somit gegebenen schnellen Eingriff bei Störungen soll die Versorgung möglichst weitgehend aufrechterhalten werden. Gleiches gilt auch bei der Eingrenzung von Schadensfällen beispielsweise durch Netztrennungen.

Alle Signale müssen schnell und mit hoher Sicherheit übertragen werden. Für die Übertragung der Daten werden entweder mehradrige Steuerkabel eingesetzt, die entlang der Trasse verlegt sind, oder andere geeignete Übertragungseinrichtungen, wie z. B. Fernwirktechnik. Die Verwendung von mehradrigen Steuerkabeln für die Signalübertragung ist am sichersten und erfordert den geringsten Geräteaufwand. Der Nachteil liegt darin begründet, daß die Übertragungskosten bei größeren Netzen sehr hoch werden.

Die Fernwirktechnik dagegen schafft Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Signalübertragung zur zentralen Überwachung und Steuerung von mehreren Anlagen, die räumlich voneinander getrennt sind. Fernwirkanlagen basieren auf der vielfachen Ausnutzung der Doppelleitung. Dabei bereiten die Geräte die Informationen auf der Sendeseite zur Übertragung und auf der Empfangsseite zur Weiterverarbeitung auf. Es gibt zwei Verfahren zur Übertragung der Signale, einerseits das Frequenzmultiplex-Verfahren, bei dem die Informationen parallel übertragen werden, andererseits das Zeitmultiplex-Verfahren, bei dem die Informationen zeitlich nacheinander übertragen werden.

Weitere detaillierte Ausführungen enthalten u. a. (Bonfig 1986; Profos u. Pfeifer 1994; Schüngel 1995; Böhme et al. 1996; Mutschmann et al. 1997).

3.3

Berechnungsgrundlagen

3.3.1

Einleitung

Dieser Abschnitt umfaßt einige grundlegende Ausführungen zu Berechnungsgrundlagen zur Auslegung von Wasserversorgungssystemen einschließlich ihrer Zubehörteile. Dabei geht es neben allgemeinen Aussagen zu Temperatur, Druck und Volumenstrom auch um die Bestimmung des Druckverlustes und des optimalen Durchmessers. Diese Größen, die in der Regel Zeitfunktionen darstellen, dürfen nicht losgelöst voneinander betrachtet werden.

3.3.2

Temperatur

Die Temperatur des Wassers selbst kann statische Beanspruchungen hervorrufen. Dazu zählen beispielsweise Spannungen infolge Verhinderung der Längenausdehnung, Erhöhung der Belastungen verursacht durch Bodenfrost bzw. Hebung von frostgefährdeten Böden. Diese Beanspruchungen durch Temperatur sollen aber durch ausreichende Erdüberdeckung, Wärmeisolierung sowie Einbau von Dehnungsstücken klein gehalten werden. Aus diesen Gründen heraus wird die Temperatur bei der Betrachtung der statischen Beanspruchung von erdverlegten Rohrleitungen in der Regel als konstant, meist mit 10 oder 15 °C, angenommen und entsprechend berücksichtigt. Bei oberirdisch verlegten Rohrleitungen müssen die real vorliegenden Verhältnisse in Ansatz gebracht werden.

3.3.3

Druck und Druckhöhe

Die maximale Druckbegrenzung wird durch die gewählte oder einzuhaltende Druckstufe des Systems vorgegeben, welche wiederum vom jeweiligen Rohrwerkstoff abhängig ist. Jeder Rohrwerkstoff ist für einen bestimmten maximalen Nenndruck zugelassen (s. a. Abschn. Verlegeverfahren). Der *Nenndruck* gibt dabei den zulässigen Betriebsüberdruck bei 20 °C, also den höchsten Innenüberdruck an. Der an einem beliebigen Punkt des Wassernetzes auftretende Innenüberdruck wird als *Betriebsüberdruck* oder *Netzdruck*, der an der Anschlußstelle vorherrschende Netzdruck wird als *Versorgungsdruck* bezeichnet. Der *Ruhedruck* tritt ein, wenn an einer bestimmten Stelle keine Wasserentnahme erfolgt.

Zwischen den vorgegebenen und den einzuhaltenden Druckgrenzwerten muß sich der reale Druckverlauf, auch als Drucklinie bezeichnet, einordnen. Dieser wird beeinflusst von der geodätischen Höhenlage der zu versorgenden Verbraucher sowie den Druckverlusten und deren Verteilung über das Wassernetz. Weiterhin ist zu beachten, daß die Druckverläufe während des Betriebes druckabhängig sind, gegeben durch die ständig unterschiedliche Entnahme bei den Verbrauchern. Dieses Verhalten muß durch die Regelung des Pumpendruckes ausgeglichen werden.

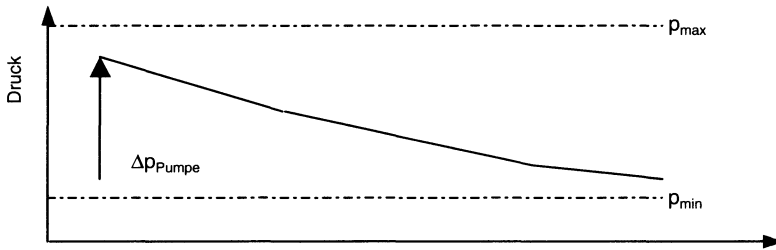


Abb. 3.3-1 Druckverlaufsschaubild

Ein entsprechendes Druckverlaufsschaubild zeigt Abb. 3.3-1.

In der Wasserversorgung werden meistens die Druckverhältnisse als Höhen in m angegeben, wie z. B. bei Förderhöhen von Pumpen oder bei der Ermittlung von Druckverlusten. Die Druckhöhe in der Rohrleitung wird im allgemeinen nicht von einem Versorgungsdruck bestimmt, sondern vielmehr von den Höhen des Wasserspiegels am Anfang und Ende der Rohrleitung. Dabei muß über den Hochpunkten eine ausreichende Druckhöhe vorhanden sein, damit die Entlüfter gut funktionieren und Druckwellen die Rohrachse nicht unterschreiten. Resultierend aus Druckstößen muß zusätzlich eine Druckhöhe von etwa 20 m berücksichtigt werden. Entscheidend dabei ist, daß die größte Druckhöhe nicht den Nenndruck der Rohrleitung übersteigen darf.

3.3.4 Volumenstrom

Allgemein beinhaltet der Volumenstrom den Quotient des Wasservolumens, das in einer Zeiteinheit einen bestimmten Strömungsquerschnitt durchfließt. Die Maßeinheit ist l/s oder m³/h. Als Synonym für Volumenstrom kann auch der Begriff Durchfluß verwendet werden. Der Volumenstrom ist entscheidend für die Dimensionierung der Rohrleitung. Beispielsweise wird für Hausanschlußleitungen der Spitzendurchfluß mit einer Strömungsgeschwindigkeit von maximal 2 m/s empfohlen, um Druckstöße zu vermeiden. Des weiteren soll zur Vermeidung von hohen örtlichen Druckverlusten der Druckabfall auf der gesamten Hausanschlußleitung höchstens 0,2 bar betragen. Mit diesen Angaben erfolgt die Dimensionierung der Hausanschlußleitung in bestimmten Abhängigkeiten:

- bei Gebäuden nach Wohneinheiten,
- bei Schulen nach Schüler- und Lehreranzahl,
- bei Hotels nach Zimmern,
- bei Krankenhäuser nach Betten,
- bei Verwaltungsgebäuden nach Beschäftigten sowie
- bei landwirtschaftlichen Anwesen nach dessen Verbrauchern.

Entsprechende Werte und Hinweise sind u. a. in (Mutschmann et al. 1997) oder im DVGW-Merkblatt W 404 – Wasseranschlußleitungen; Planungen und Errichtung – enthalten.

Die richtige Dimensionierung der Rohrleitung nach den Volumenströmen ist deshalb so wichtig, da sich eine Überdimensionierung nachteilig auf die hygienisch erwünschte Wassererneuerung und auf das Korrosionsverhalten der Rohrwerkstoffe auswirkt. Ebenso ist der Volumenstrom für die Auslegung der erforderlichen Pumpwerke von Bedeutung.

Um nach kurzer Betriebszeit ein Auswechseln der Rohrleitungen oder Neuverlegen einer zweiten Rohrleitung zu vermeiden, erfolgt die Dimensionierung nach dem zukünftigen Bedarf. Ist eine spätere Erweiterung der Pumpwerke mit größerer Förderhöhe oder der Einbau von Druckerhöhungspumpen möglich, so kann der Volumenstrom für den Bedarf in 15 Jahren die Grundlage bilden. Anderenfalls sollte der Volumenstrom für den Bedarf in 30 Jahren berücksichtigt werden.

3.3.5

Gleichzeitigkeitsfaktor

Neben dem Volumenstrom bzw. Durchfluß spielt auch der Gleichzeitigkeitsfaktor bei der Dimensionierung des späteren Betriebes eine bedeutende Rolle. Dieser Gleichzeitigkeitsfaktor, auch als Gleichzeitigkeitsgrad bezeichnet, gibt das Verhältnis des tatsächlich auftretenden Spitzenwertes der nutzbaren Wasserabgabe zur Summe des Spitzenbedarfs aller Verbraucher wider. Dieser ist immer ≤ 1 bzw. 100 %, da alle angeschlossenen Verbraucher meistens nicht zeitgleich den Spitzenbedarf haben.

Die Gleichzeitigkeit nimmt mit zunehmender Verbraucherzahl ab. Dies verdeutlicht das folgende Beispiel aus (Mutschmann et al. 1997). Mit einem Ansatz von 2,5 Einwohner pro Wohneinheit und einem installierten Summendurchfluß von 1,5 l/s werden bei 10 Einwohnern in Spitzenverbrauchszeiten 41 % der installierten Entnahmestellen gleichzeitig betätigt, bei 100 Einwohnern nur 8 % und bei 1000 Einwohnern nur noch 3 %. Grundlage dazu bildete der einwohnerbezogene Spitzendurchfluß nach DVGW-Merkblatt W 403 – Planungsregeln für Wasserleitungen und Wasserrohrnetze.

3.3.6

Geschwindigkeit und Druckverlust

Die wirtschaftliche *Strömungsgeschwindigkeit* läßt sich aus dem Kostenminimum von Investitionskosten und Betriebskosten ermitteln. Bedingt jedoch durch die strömungstechnischen Grenzdaten, die sich bei zu hoher Strömungsgeschwindigkeit einstellen, wie Geräuschemission, Schwingungen des Rohrleitungssystems, Druckstöße, Erosion in den Umlenkstellen sowie durch die große Abhängigkeit des Druckverlustes vom Rohrdurchmesser ($\Delta p \approx 1/d^5$) ergeben sich keine konstanten Strömungsgeschwindigkeiten. Des weiteren sollte in Rohrleitungen die Geschwindigkeit möglichst konstant halten werden, um somit Beschleunigungs- und Verzögerungsverluste zu vermeiden. Ebenso haben aber auch zu kleine Geschwindigkeiten zu lange Verweilzeiten zur Folge. Vor allem für Fern- und Zubringerleitungen sind deshalb Untersuchungen über die Wahl des technisch-wirtschaftlich günstigsten Geschwindigkeitsbereiches erforderlich.

Nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 302¹⁸ – Hydraulische Berechnung von Rohrleitungen und Rohrnetzen – kann in erster Näherung von folgenden Richtwerten für Strömungsgeschwindigkeiten ausgegangen werden

- Fern- und Zubringerleitungen $\geq 2,0$ m/s,
- Hauptleitungen in Versorgungsnetzen 1,0–2,0 m/s,
- Versorgungsleitungen 0,5–0,8 m/s.

Prinzipiell kann davon ausgegangen werden, daß große Strömungsgeschwindigkeiten und damit kleine Nenndurchmesser die Kosten der Rohrleitung und Armaturen senken. Dadurch bedingt vergrößern sich aber die Förderkosten und das Auftreten von Druckstößen. Einen entsprechenden Anhaltspunkt zu wirtschaftlichen Strömungsgeschwindigkeiten und die sich daraus ergebenden Volumenströme in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser zeigt Abb. 3.3-2 in Anlehnung nach (Mutschmann et al. 1997). Weitere Angaben zu wirtschaftlichen Geschwindigkeiten enthält u. a. (Wagner 1991a).

Die Geschwindigkeit läßt sich mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung über den Volumenstrom bestimmen. Es gilt

$$\dot{V} = A \cdot v = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot v \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3.2)$$

mit d - Rohrdurchmesser [m],
 v - Geschwindigkeit [m/s]¹⁹.

Bei der Bestimmung des *Druckverlustes* in Druckrohrleitungen wird unterschieden in inkompressible und kompressible Strömungen. Da es sich bei Wasser um ein inkompressibles Medium handelt, ist der Druckabfall längs der Rohrleitung linear und somit die Geschwindigkeit konstant unter der Bedingung, daß die Dichte ebenfalls konstant ist (Abb. 3.3-3).

Die Grundgleichung für die reibungsbehaftete Strömung in kreisförmigen Querschnitten bildet die Differentialgleichung

$$\rho \cdot g \cdot dh + dp + \rho \cdot v \cdot dv + \frac{\lambda \cdot dl}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = 0 \quad (3.3)$$

mit h - geodätische Höhe der Rohrachse (absoluter oder relativer Bezugspunkt) [m],
 p - Druck [Pa],
 v - Geschwindigkeit [m/s],
 l - Länge des Rohres [m],
 d - Durchmesser des Rohres [mm],
 λ - Rohrreibungsbeiwert [-].

Die Integration liefert Berechnungsgleichungen für die einzelnen Randbedingungen. Die Gleichung für stationäre Bewegung lautet

¹⁸ Dieses Arbeitsblatt befindet sich derzeit in Überarbeitung und wird GW 303.

¹⁹ In der Literatur werden für die Geschwindigkeit sowohl v als auch w , u oder c , für den Volumenstrom $\dot{V}$ oder Q verwendet. Dabei ist zu beachten, daß das Formelzeichen v gleichzeitig auch für das spezifische Volumen Anwendung findet.

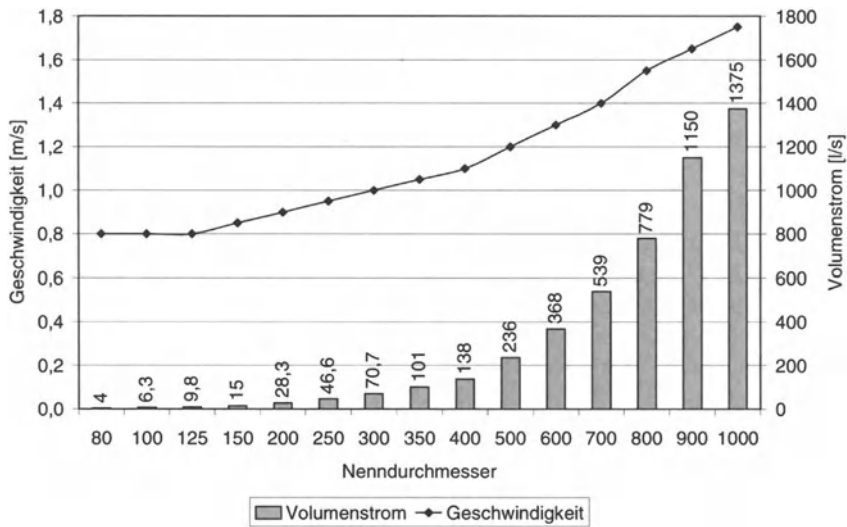


Abb. 3.3-2 Wirtschaftliche Strömungsgeschwindigkeiten und Volumenströme

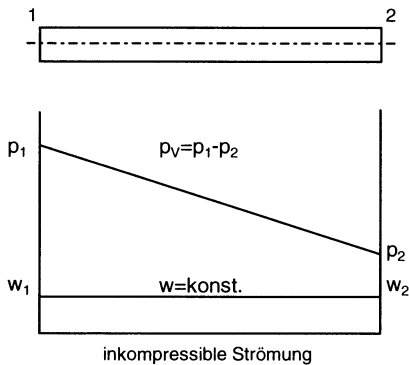


Abb. 3.3-3 Inkompressible Strömung

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.4)$$

Die Indizes 1 und 2 beziehen sich auf Anfang und Ende der Rohrleitung. Für die Berechnung des Druckverlustes in einem Rohrnetz wird im allgemeinen von NN als Bezugslinie ausgegangen, nur Drücke und Druckverlust selbst werden berücksichtigt, jedoch nicht die sehr kleine Geschwindigkeitshöhe $v^2/2 \cdot g$. Dies trifft nicht zu bei der Berechnung des Druckverlustes von Pumpenausleitungen. Aus Gl. (3.4) folgt

$$\Delta p_V = p_1 - p_2 = \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 + (h_2 - h_1) \cdot \rho \cdot g \quad [\text{Pa}] \quad (3.5)$$

Druckverlustberechnungen werden überwiegend durchgeführt mit Hilfe von entsprechender Software, so daß eine sofortige Berücksichtigung des höhenabhängigen Terms $(h_2 - h_1) \cdot \rho \cdot g$ ohne weiteres möglich ist. Viele Programme weisen aber auch beide Drücke aus, d. h. ohne und mit Berücksichtigung dieses Termes.

Der Term $\rho \cdot v^2 / 2$ stellt den Staudruck dar. Der Strömungswiderstand in einer geraden Rohrleitung wird durch die Multiplikation mit $\lambda \cdot l / d$ bestimmt. Die Strömungswiderstände durch Rohrleitungselemente, wie Rohrbögen, Formstücke, Armaturen werden durch Multiplikation von $\Sigma \zeta$ mit berücksichtigt, so daß gilt

$$\Delta p_V = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma \zeta \right) \quad [\text{Pa}] \quad (3.6)$$

Ebenso besteht die Möglichkeit, die einzelnen Widerstände in eine äquivalente Länge mit

$$l_{\text{äqu}} = \Sigma \zeta \cdot \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}] \quad (3.7)$$

umzurechnen und zu der gestreckten Rohrleitungslänge l dazu zu addieren, so daß für die rechnerische Länge gilt

$$l' = l + l_{\text{äqu}} \quad [\text{m}] \quad (3.8)$$

Die Gleichung für die Bestimmung des Druckverlustes mit der rechnerischen Länge lautet demzufolge

$$\Delta p_V = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot \lambda \cdot \frac{l'}{d} \quad [\text{Pa}] \quad (3.9)$$

In der Wasserversorgung werden die Druckverhältnisse als Höhen in m angegeben, so daß es zweckmäßiger ist, die Druckverluste ebenfalls in m auszudrücken. Die Druckverlusthöhe, auch des öfteren nur als Reibungsverlust bezeichnet, errechnet sich zu

$$h_r = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (3.10)$$

bzw. mit der rechnerischen Länge nach Gl. (3.8)

$$h_r = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \lambda \cdot \frac{l'}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (3.11)$$

Für die bezogene Druckverlusthöhe gilt

$$J = \frac{h_r}{l} \quad [\text{m/km}] \quad (3.12)$$

Die zuvor beschriebenen Gleichungen sind auch für unrunde Querschnitte und teilweise gefüllte Rohre (Freispiegelleitungen) anwendbar, wenn statt des Innendurchmessers d_i der gleichwertige Durchmesser d_{Gl} eingesetzt wird. Die Abhängigkeit des Rohrreibungsbeiwertes von der Querschnittsform im Laminarbereich ist dabei für technische Berechnungen vernachlässigbar. Der gleichwertige Durchmesser wird ermittelt über

$$d_{Gl} = \frac{A}{U} \quad [m] \quad (3.13)$$

mit A - durchströmter Querschnitt $[m^2]$,
 U - benetzter Umfang $[m]$.

Grundlage für die Berechnung des Druckhöhenverlustes bzw. der Strömungsgeschwindigkeit von Wasser in Freispiegelleitungen und in Druckrohrleitungen ist die Gleichung von BRAHMS und de CHEZY. Es gilt

$$v = C \cdot R^{1/2} \cdot J^{1/2} \quad [m/s] \quad (3.14)$$

mit C - Beiwert $[-]$,
 R - hydraulische Radius nach Gl. (3.13) $[m]$,
 J - bezogene Druckverlusthöhe $[m/km]$.

Diese Potenzgleichungen zur Berechnung des Druckhöhenverlustes sind einfach aufgebaut. Bekannt sind vor allem die Gleichungen von MANNIG-GAUCKLER-STRICKLER, von WILLIAMS-HAZEN und von LUDIN. Weitere Ausführungen enthält u. a. (Mutschmann et al. 1997).

In der Praxis erfolgt die Berechnung des Druckhöhenverlustes in Freispiegelleitungen überwiegend mit der zugeschnittenen Gleichung von MANNING-GAUCKLER-STRICKLER

$$v = k_{St} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad [m/s] \quad (3.15)$$

mit k_{St} - Rauigkeitsbeiwert nach STRICKLER $[m]$, s. a. (Mutschmann et al. 1997),
 R - hydraulischer Radius nach Gl. (3.13) $[m]$,
 J - bezogene Druckverlusthöhe $[m/km]$.

Der *Rohrreibungsbeiwert* gilt genau genommen nur für das gerade Rohr. Er hängt von der Rauigkeit der Rohrwand, der Strömungsgeschwindigkeit, dem Rohrdurchmesser und der Zähigkeit des Fluids ab. Diese Einflüsse werden durch die Reynolds-Zahl Re und die relative Wandrauigkeit d/k beschrieben. Dabei wird die Reynolds-Zahl bestimmt über

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad [-] \quad (3.16)$$

mit ν - kinematische Viskosität $[m^2/s]$,
 η - dynamische Viskosität $[Pa \cdot s]$,
 d - Durchmesser des Rohres $[m]$,
 v - Geschwindigkeit $[m/s]$.

Für Wasser lassen sich beide Größen – kinematische und dynamische Viskosität – über Näherungsgleichungen bestimmen (s. Anhang 1) oder aus entsprechen-

den Tabellen entnehmen. Der Verlauf einer quadratischen Trendfunktion sowie die wahren Werte für die kinematische Viskosität sind in Abb. 3.3-4 dargestellt.

Die Rauigkeitswerte k sind nicht identisch mit der technischen (natürlichen) Rauigkeit der Rohrwand, sondern sind als äquivalente (künstliche) Sandrauigkeiten definiert (Bohl 1984). Im Anhang 4 befindet sich ein Auszug von Rauigkeiten aus verschiedenen Literaturquellen.

Im DVGW-Arbeitsblatt W 302 – Hydraulische Berechnung von Rohrleitungen und Rohrnetzen – wird die Rauheit als integrale, scheinbare Rauheit aller den Druck steigernden und mindernden Einflüsse definiert. In diesen darin definierten Werten für die Rauheit sind alle Einzelwiderstände aus Armaturen, Richtungsänderungen usw. enthalten. Dies wird damit begründet, daß eine mathematisch exakte Erfassung sämtlicher Widerstände in der Rohrleitung nur begrenzt möglich ist. Die Tabelle 3.3.-1 beinhaltet die verschiedenen Werte, beruhend auf Einzelmessungen und vorliegenden Erfahrungen.

Für die Nachrechnung älterer Rohrleitung ist es kaum möglich, Zahlenwerte für die Annahme von Rauheiten anzugeben. Beispielsweise verändert sich der Druckverlust bei einem Anstieg der Rauheit von 0,1 mm auf 0,4 mm je nach Nenn-durchmesser um 35–50 %. Einflußfaktoren sind Ablagerungen bzw. Inkrustationen, welche wiederum den Druckhöhenverlust vergrößern und das, bedingt durch Strömungsgeschwindigkeit, Wasserbeschaffenheit und Betriebsalter, sehr unterschiedlich. Daraus schlußfolgernd läßt sich die jeweils vorhandene Rauheit in der Regel nur durch Druckmessungen im Netz ermitteln.

Laminare Strömung liegt vor, wenn $Re < 2300$ ist. In den meisten praktisch wichtigen Fällen bewegen sich die Medien in den Rohrleitungen in turbulenter Strömung. Im Anhang 5 sind die entsprechend gültigen Gleichungen zur Bestimmung des Rohrreibungsbeiwertes für turbulente Strömung zusammengestellt.

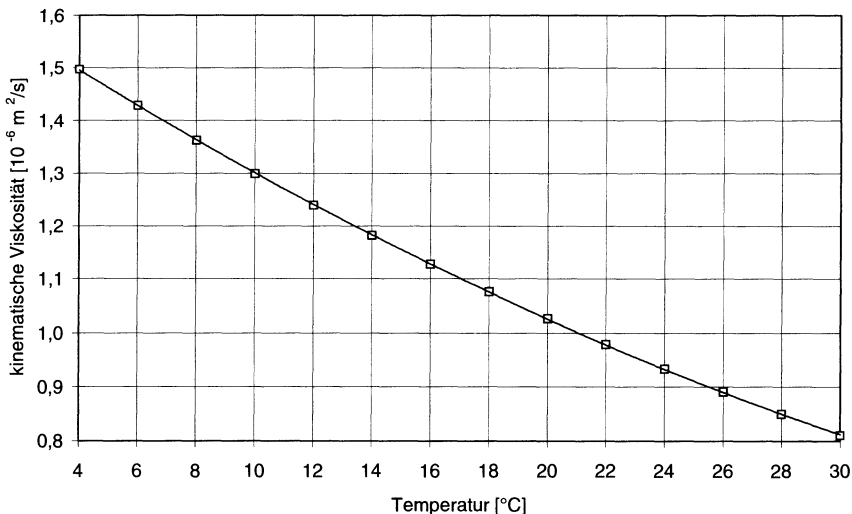


Abb. 3.3-4 Kinematische Viskosität des Wassers

Tabelle 3.3-1 Integrale Rauheiten für Wasserleitungen nach DVGW-Arbeitsblatt W 302

Leitungsart und Ausführung	Rauheit k_i [mm]
– Fern- und Zubringerleitungen mit gestreckter Leitungsführung aus Stahl- oder Gußrohren mit Zementmörtel- bzw. Bitumenauskleidung sowie aus Spannbeton- oder Faserzement-Rohren	0,1
– Hauptleitungen mit weitgehend gestreckter Leitungsführung aus denselben Rohren, aber auch aus Stahl- und Gußrohren, ohne Auskleidung, sofern Wassergüte und Betriebsweise nicht zu Ablagerungen führen	0,4
– neue Netze, durch den Übergang von $k = 0,4$ mm auf 1,0 mm wird der Einfluß starker Vermaschung näherungsweise berücksichtigt	1,0

Rohrleitungssysteme bestehen aber nicht nur aus geraden Rohrleitungsstücken, sondern enthalten auch spezielle Einbauteile zur Querschnitts-, Richtungs- und Durchflußänderung sowie Armaturen. In diesen speziellen Rohrleitungselementen treten erhebliche Reibungs-, Umlenkungs- und Ablöseverluste auf. Nur in wenigen Fällen ist es möglich, die Strömungsverluste in derartigen Rohreinbauten theoretisch zu berechnen. Ansonsten kann eine Bestimmung nur über Versuche erfolgen. Dies gilt insbesondere für Armaturen.

Der *Widerstandsbeiwert* ζ ist von der Art des Rohrleitungselementes und im allgemeinen von der Reynolds-Zahl abhängig. Genauso wie bei den geraden Rohrleitungsstücken muß bei der Bestimmung des Widerstandsbeiwertes zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden werden. Dabei gibt es Widerstandsbeiwerte, die als reine Formfaktoren konstant sind, andere dagegen sind von den Strömungsverhältnissen abhängig. Zu den erstgenannten zählen beispielsweise Armaturen und plötzliche Querschnittsänderungen, bei der anderen Gruppe handelt es sich vornehmlich um Rohrverzweigungen. Für die einzelnen Widerstandsbeiwerte der Rohrleitungselemente sei u. a. verwiesen auf (Albring 1978; Bohl 1984; Glück 1978; 1985; KSB 1989; Schmidt u. Lumpe 1988; VDI 1988; SULZER 1990; Wossog et al. 1990; 1998). Widerstandsbeiwerte für Armaturen sind in (KSB 1989; SULZER 1990; Wossog et al. 1998) für DN 15–1000 ausführlich dargestellt. Für genaue Berechnungen sind die Werte bei den Armaturenlieferanten zu erfragen.

Des weiteren ist es möglich, für Auslegungsrechnungen überschläglich nach (Fratzscher et al. 1982) den Widerstandsbeiwert anzugeben mit

$$\zeta = A \cdot \sqrt{m} \quad [-] \quad (3.17)$$

mit m - Massestrom [kg/h],
 A - Konstante, für Wasser 0,03–0,05.

Entsprechende Computerprogramme, die keine Widerstandsbeiwerte berücksichtigen, basieren dann auf der Grundlage eines Längenzuschlagsfaktors.

Beispiel. Anhand der folgenden Beispiele wird die Vorgehensweise der Berechnung des Druckhöhenverlustes aufgezeigt.

Im *Beispiel 1* soll der Druckhöhenverlust in einer Gußleitung ermittelt werden. Gegeben sind der Nenndurchmesser mit DN 250 mit einer Länge von 2000 m. Der Volumenstrom beträgt $55 \text{ l/s} = 0,055 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Druckhöhenverlustes sieht wie folgt aus:

1. Schritt: Bereitstellung der Ausgangsdaten, wie Volumenstrom, Länge und Rohrdurchmesser
2. Schritt: Berechnung der Geschwindigkeit v nach Gl. (3.2)
3. Schritt: Ermittlung der Reynolds-Zahl Re nach Gl. (3.16) mit einer kinematischen Viskosität von $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ bei einer Temperatur von 10°C
4. Schritt: Bestimmung des Rohrreibungsbeiwertes λ mit dem Ansatz der Rohrrauigkeit für dieses Beispiel mit $k = 0,4 \text{ mm}$
5. Schritt: Berechnung des Druckhöhenverlustes nach Gl. (3.10)

Es gelten

- Geschwindigkeit nach Gl. (3.2):
$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{0,055 \cdot 4}{\pi \cdot 0,25^2} = 1,12 \text{ m/s}$$
- Reynolds-Zahl nach Gl. (3.16):
$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{1,12 \cdot 0,25}{1,3 \cdot 10^{-6}} = 215385$$
- Rohrreibungsbeiwert nach PRANDTL-COLEBROOCK (s. Anhang 5), da $Re \cdot \frac{k}{d} = 345$

$$\lambda = 0,023$$
- Druckhöhenverlust nach Gl. (3.10):
$$h_r = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 0,023 \cdot \frac{2000}{0,25} \cdot \frac{1,12^2}{2 \cdot 9,81} = 11,8 \text{ m}$$

Im *Beispiel 2* soll der Druckhöhenverlust in einer Gußleitung zwischen den beiden Punkten A und B ermittelt werden. Das dazugehörige Strangschemata zeigt Abb. 3.3-5.

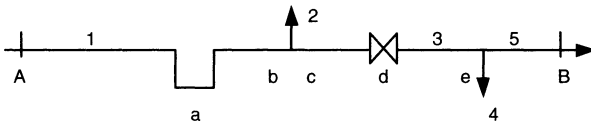


Abb. 3.3-5 Beispiel eines Strangschemas

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Druckverlustes sieht wie folgt aus:

1. Schritt: Bereitstellung der Ausgangsdaten, wie Volumenstrom, Länge und Rohrdurchmesser
2. Schritt: Berechnung der Geschwindigkeit v nach Gl. (3.2)
3. Schritt: Ermittlung der Reynolds-Zahl Re nach Gl. (3.16) mit einer kinematischen Viskosität von $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ bei einer Temperatur von 10°C
4. Schritt: Bestimmung des Rohrreibungsbeiwertes λ mit dem Ansatz der Rohrrauigkeit für dieses Beispiel mit $k = 0,4 \text{ mm}$
5. Schritt: Berechnung der einzelnen Druckhöhenverlustes $h_{r,i}$ nach Gl. (3.10)
6. Schritt: Bestimmung der Widerstandsbeiwerte ζ der einzelnen Rohrleitungselemente
7. Schritt: Ermittlung des gesamten Druckhöhenverlustes

In der Tabelle 3.3-2 sind alle Ausgangsdaten und Ergebnisse zusammengefaßt. Für die Widerstandsbeiwerte der einzelnen Rohrleitungselemente wurden die folgenden Werte aus der Literatur zum Ansatz gebracht:

- Dehnungsbogen a : $\zeta = 0,96$

Tabelle 3.3-2 Ermittlung des Druckhöhenverlustes Beispiel 2

Strang i	$\dot{V}$ [l/s]	$\dot{V}$ [m ³ /s]	l [m]	DN [mm]	v [m/s]	Re [-]	λ [-]	$h_{r,i}$ [m]
1	25,0	0,0250	50	200	0,80	122427	0,0248	0,2
2	1,5	0,0015	5	32	1,87	45910	0,0420	1,2
3	23,5	0,0235	25	200	0,75	115081	0,0249	0,1
4	2,5	0,0025	10	50	1,27	48971	0,0365	0,6
5	21,0	0,0210	20	200	0,67	102839	0,0250	0,1

- T-Stück Strang 2/b : $\zeta = 0,01$ für Durchgang bei $\dot{V}_2/\dot{V}_1 = 0,06$
- Armatur c : $\zeta = 0,23$ für Schieber
- T-Stück Strang 4/d : $\zeta = -0,02$ für Durchgang bei $\dot{V}_4/\dot{V}_3 = 0,11$

Die Rohrreibungsbeiwerte wurden nach PRANDTL-COLEBROOCK (s. Anhang 5) ermittelt. Die jeweiligen Druckhöhenverluste werden über die Gleichung

$$h_{r,i} = \frac{\Delta p_v}{\rho \cdot g} = \sum \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

mit den dazugehörigen Werten aus der Tabelle 3.3-2 berechnet. Damit ergeben sich für

- Dehnungsbogen a : $h_{r,i} = 0,03$ m
- T-Stück Strang 2/b : $h_{r,i} = 0,0003$ m mit v_3 als Durchgang
- Armatur c : $h_{r,i} = 0,01$ m
- T-Stück Strang 4/d : $h_{r,i} = -0,01$ m mit v_5 als Durchgang

Der Druckhöhenverlust zwischen den Punkten A und B setzt sich zusammen aus

$$h_r = h_{r,1} + h_{r,3} + h_{r,5} + h_{r,a} + h_{r,b} + h_{r,c} + h_{r,d} = 0,43 \text{ m.}$$

Die Druckverlustberechnungen von Wassernetzen werden aufgrund der realen Struktur kompliziert und sind bei zunehmendem Verzweigungs- bzw. Vermaassungsgrad in den meisten Fällen nur noch mit entsprechenden Computerprogrammen lösbar.

Die Bestimmung des von der Pumpe zu überwindenden Differenzdruckes ist bei Strahlennetzen unproblematisch und kann durch Summierung der Druckverluste bzw. Druckhöhenverluste der einzelnen Abschnitte bestimmt werden. Dabei ist bei einer Verzweigung der größte Druckverlust bzw. Druckhöhenverlust der von einem sogenannten Knoten abgehenden Rohrleitung zu berücksichtigen.

Hingegen ergeben sich bei Maschennetzen für die Berechnung der Druckhöhenverluste zwei Bedingungen:

- Die Summe der zufließenden Masseströme entspricht der Summe der abfließenden Volumenströme (1. KIRCHHOFF'sches Gesetz)

$$\sum_{i=1}^n \dot{V}_i = 0. \quad (3.18)$$

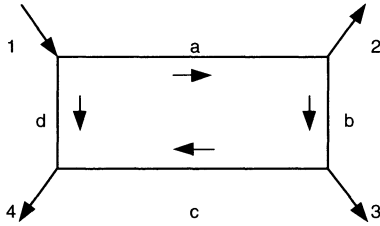


Abb. 3.3-6 Masche eines Wassernetzes

- Die Summe aller Druckhöhenverluste einer Masche muß 0 sein. Dabei ist für die Masche ein Umfassungssinn festzulegen (z. B. Uhrzeigersinn). Im Uhrzeigersinn auftretende Druckhöhenverluste sind positiv, entgegen dem Uhrzeigersinn auftretende Druckhöhenverluste sind negativ

$$\sum_{j=1}^n h_{r,j} = 0. \quad (3.19)$$

Danach ist die in Abb. 3.3-5 dargestellte Masche wie folgt zu bilanzieren:

$$\dot{V}_1 - \dot{V}_2 - \dot{V}_3 - \dot{V}_4 = 0, \quad (3.20)$$

$$h_{r,a} + h_{r,b} + h_{r,c} - h_{r,d} = 0. \quad (3.21)$$

Weiterhin ist die Knotenanzahl-Bedingung mit zu berücksichtigen, wobei gilt

$$K - n + m = 1 \quad (3.22)$$

mit K - Knotenanzahl,
 n - Stranganzahl,
 m - Maschenanzahl.

Die Bestimmung der Druckverluste ist nunmehr nur auf iterativem Wege möglich. Die entsprechende Vorgehensweise ist u. a. in (Mutschmann et al. 1997) ausführlich dargestellt.

3.3.7

Optimaler Durchmesser

Grundsätzlich wird jede technische Anlage für bestimmte Parameter, den Auslegungszustand, bemessen. Dazu zählen u. a.

- Druck,
- Volumenstrom,
- Gleichzeitigkeitsfaktor,
- Netzgröße,
- Netzgestaltung (unvermascht oder/und vermascht),
- Verlegeverfahren,
- Rohrdurchmesser,

- Rohrwerkstoff,
- Pumpendruck.

Soll eine wirtschaftlich optimale Anlage entstehen, so sind die oben aufgezählten Parameter unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen so zu wählen, daß minimale Kosten als Zielfunktion erreicht werden. Mitunter ist die Zielfunktion auch begrenzt, so daß z. B. der Drucksprung der Pumpwerke vorgegeben ist und somit lediglich eine optimale Druckaufteilung auf die einzelnen Stränge gesucht wird. Die Nebenbedingungen selbst können u. a. physikalischer, konstruktiver, technologischer, regelungstechnischer Art sein. Das Aufsuchen des Minimums bereitet mitunter sehr große Schwierigkeiten, da es sich um ein nichtlineares Optimierungsproblem handelt. Für derartige Optimierungsprobleme können keine allgemeingültigen Lösungen angegeben werden.

Grundsätzlich kann bemerkt werden, daß die Minimierung der Gesamtkosten unter Beachten der gegebenen Parametervielfalt derzeit nicht praktikabel ist. Dies hängt vor allem mit der richtigen Beschreibung der einzelnen Parameter zusammen. Nicht selten lassen sich diese nur durch zu wählende Konstanten festlegen. Für die Durchmesseroptimierung eines Stranges werden u. a. die Beschreibungen benötigt, wie die der

- spezifischen Rohrkosten,
- spezifischen Armaturenkosten,
- spezifischen bautechnischen Kosten,
- spezifischen Betriebskosten sowie
- Pumpenkosten.

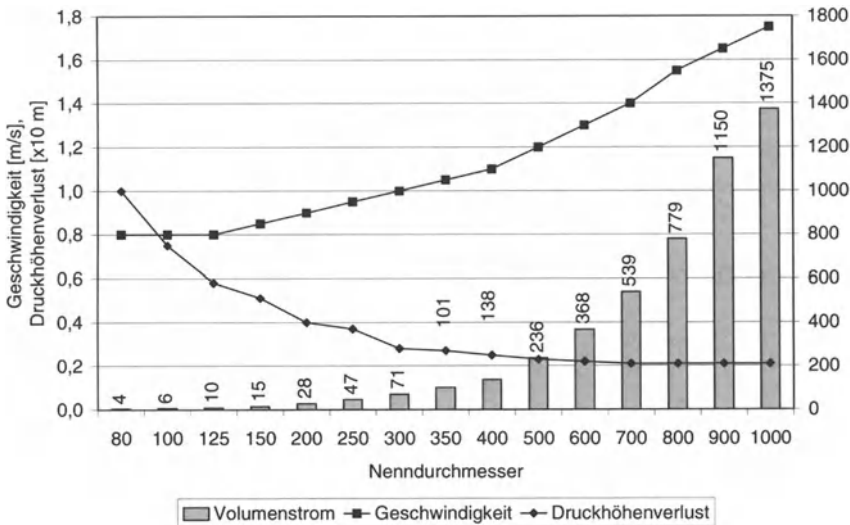


Abb. 3.3-7 Wirtschaftliche Strömungsgeschwindigkeiten in Verbindung mit Volumenstrom und bezogenem Druckhöhenverlust

Prinzipiell kann davon ausgegangen werden, daß große Strömungsgeschwindigkeiten und damit kleine Nenndurchmesser die Kosten der Rohrleitung und Armaturen senken. Dadurch bedingt vergrößern sich aber die Förderkosten und das Auftreten von Druckstößen. Einen entsprechenden Anhaltspunkt zu wirtschaftlichen Strömungsgeschwindigkeiten und die sich daraus ergebenden Volumenströme sowie bezogene Druckhöhenverluste in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser zeigt Abb. 3.3-7 in Anlehnung an (Mutschmann et al. 1997).

3.3.8 Auskühlzeiten

Stillstehende Wasserleitungen können bei Lufttemperaturen unter $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ einfrieren. Freiverlegte Rohrleitungen sind deshalb mit einer Wärmedämmung zu versehen. Liegt die Auskühlzeit trotz optimaler Dämmschichtdicke zu niedrig, sind andere Maßnahmen erforderlich, wie beispielsweise elektrische Begleitheizung, Entleeren der Rohrleitung beim Stillstand oder Gewährleistung eines ständigen geringen Wasserdurchflusses. Letzteres kann erhebliche Kosten verursachen und führt unweigerlich zu einer Wasserverschwendung.

Um ein Einfrieren von erdverlegten Wasserleitungen zu vermeiden, sollte immer eine Verlegung in frostfreien Tiefen erfolgen. Bei strengem Frost kann es aber trotzdem passieren, daß gerade Strangenden durch geringe Abnahmen einfrieren und somit die Versorgung nicht mehr gewährleisten.

Entsprechende Berechnungen zum Temperaturabfall in Rohrleitungen als Funktion des Weges und der Zeit sind in Abschn. 2.3.8 ausführlich dargestellt.

3.3.9 Statische Berechnung

Bei der Projektierung und Auslegung kaltgehender Rohrleitungen sind die auftretenden Spannungen im Rohrwerkstoff gegenüber den zulässigen Spannungen nachzuweisen. Diese Spannungen, Kräfte und Momente werden mit der Elastizitäts- und Festigkeitsberechnung ermittelt. Bei den Berechnungen müssen alle Faktoren berücksichtigt werden, die die Festigkeit der Rohre und deren Zubehörteile, wie beispielsweise Formstücke, Dehnungsausgleicher und vor allem Armaturen beeinflussen.

Ziel ist die Vermeidung eines Bruches der Rohrleitung durch Überbeanspruchung sowie Undichtheiten an Rohrleitungsverbindungen. Anders formuliert lautet das Ziel: Erreichen der vorgegebenen Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel und einem Einsatztemperaturbereich von -10 – $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Maßgebend für die statische Berechnung sind die Rohrleitungsführung sowie die Unterteilung der Rohrleitungen ohne und mit direkter Erdauflast. Weiterhin wird zwischen starren und flexiblen Rohren unterschieden. Dabei bezieht sich die Bezeichnung – starre Rohre – vor allem auf die metallischen und zementgebundenen Rohrwerkstoffe und die Bezeichnung – flexible Rohre – auf die Kunststoffrohre. Während bei den starren Rohren der Boden nur zur Lastübertragung auf das Rohr betrachtet wird, ist bei den flexiblen Rohren die Abstützwirkung des Bodens

und damit die mechanische Interaktion zwischen Boden und Rohr für das Strukturverhalten der Rohre von Bedeutung. Daraus schlußfolgernd ist für starre Rohre aufgrund der hohen Tragfähigkeit der Spannungsnachweis und für flexible Rohre aufgrund der großen Verformbarkeit der Verformungsnachweis maßgebend.

Das Strukturverhalten erdverlegter Rohrleitungen selbst ist nicht nur von den Rohreigenschaften abhängig, sondern vor allem auch von den Bodeneigenschaften, den Verlege- und Einbaubedingungen. Für die Beurteilung des Beanspruchungs- und Verformungszustandes erdverlegter Rohre ist daher das gesamte mechanische System – Fahrbahn-Boden-Rohr – zu betrachten.

Für die Berechnung erdverlegter Rohrleitungen stehen folgende Verfahren zur Verfügung:

- Berechnung gegen Innendruck,
- vereinfachtes Verfahren,
- analytisches Verfahren sowie
- Finite-Elemente-Methode.

Die Berechnung gegen Innendruck stellt dabei die einfachste Berechnungsart für erdverlegte Rohre dar und wird überwiegend zur Dimensionierung der Rohre angewendet. Die vereinfachten Verfahren können nur begrenzt für die Berechnung erdverlegter Rohre zur Anwendung kommen, da diese nicht alle auf die Rohre einwirkenden Lasten beschreiben. Dazu zählen insbesondere die Einbaulasten während der Verfüllung und Verdichtung, die Zusatzlasten durch Rohrverbindungen sowie durch das Ziehen des Grabenverbaues (Wossog et al. 1998). Ebenso lassen sich flexible Rohre nur unvollkommen in ihrem Strukturverhalten nachbilden. Analytische Verfahren und die Finite-Elemente-Methode sind komplexe Berechnungsverfahren, die nur mit Hilfe von spezieller Computerprogramme gelöst werden können. Beide Verfahren liefern sehr effiziente Ergebnisse über das Strukturverhalten erdverlegter starrer und flexibler Rohre.

Im Rahmen dieser Abhandlung wird auf eine detaillierte Darstellung der Vorgehensweise der einzelnen statischen Berechnungsverfahren von erdverlegten Rohrleitungen verzichtet. Entsprechende Ausführungen sind enthalten u. a. in (Mutschmann et. a. 1997 u. Wossog et al. 1998).

Während bei einfachen Systemen (eben, unvermascht und unverzweigt) eine manuelle Berechnung durchgeführt werden kann, ist dies bei komplizierten Systemen ohne Computer nicht möglich. Die Palette der hierzu existierenden Software ist vielschichtig und auf entsprechender Anwendungsfälle zugeschnitten (Wossog et al. 1998).

3.3.10

Druckstoßberechnung

Wird das Wasser in der Rohrleitung beschleunigt oder verzögert, beispielsweise durch schnelles Öffnen oder Schließen einer Armatur, so werden in dem System Unter- bzw. Überdruckwellen erzeugt. Diese Druckwellen laufen mit Schallgeschwindigkeit von der Armatur weg in das Rohr hinein, werden reflektiert, überlagern sich und klingen schließlich infolge Dämpfungseffekte allmählich ab. Diese

Druckwellen werden auch bei Ausfall von Pumpwerken ausgelöst. Bei Flüssigkeiten kann eine Geschwindigkeitsänderung von 1 m/s in der Rohrleitung durch einen Druckstoß von 10 bar erzeugen, so daß erhebliche Drücke möglich sind, die die zulässigen Spannungen der Rohrleitungen überschreiten. Die Druckstöße wirken dabei als dynamische äußere Lasten und können erhebliche Schäden anrichten, falls keine Vorkehrungen getroffen sind.

Die technisch beste Lösung dieses Problems ist zweifellos das Vermeiden der Druckstöße durch entsprechende konstruktive Vorkehrungen und Betriebsweisen, basierend auf langsame Veränderungen des Volumenstromes. Dies kann erfolgen bei Armaturen durch lange Schließ- und Öffnungszeiten, durch Anordnung von kleineren Bypassarmaturen, die zeitverzögert geschlossen werden, durch Verwendung von Armaturen mit günstiger Schließcharakteristik, z. B. Ringkolbenventile. Es ist aber auch möglich, durch ein bewußtes Herunterfahren der Pumpen, anschließende Betätigung der Armatur und nachfolgendes Wiederherstellen des Vollastbetriebes, dynamische Druckschwankungen zu vermeiden. Voraussetzung dazu ist, daß die Pumpen drehzahl geregelt gefahren werden können. Damit verbleibt als unbeeinflussbarer Störfall noch der plötzliche Ausfall der Pumpe oder das schlagartige Herunterfahren der Pumpen von Vollast auf Mindestlast. Bei Pumpenausfall baut sich infolge des starken Abbremsens der Wasserförderung ein großer Druck im Saugstutzen auf, während sich im Druckstutzen ein starker Druckabfall einstellt. Beide Druckänderungen pflanzen sich im Wassersystem als Longitudinalwellen mit großer Geschwindigkeit fort, hervorgerufen durch die druckabhängige Dichteveränderung des Wassers.

Für die Berechnung der Druckwellengeschwindigkeit gilt

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E_W}{\rho_W}}{1 + \frac{E_W \cdot d_m}{E_R \cdot s}}} \quad [\text{m/s}] \quad (3.23)$$

mit E_W - Elastizitätsmodul des Wassers [Pa],
 E_R - Elastizitätsmodul des Rohres [Pa],
 d_m - mittlerer Rohrdurchmesser [m],
 s - Rohrwanddicke [m],
 ρ_W - Dichte des Wassers [kg/m^3].

Den relativ geringen Einfluß von Druck und Temperatur in Wassernetzen auf die Druckwellengeschwindigkeit in einer unbegrenzten Wassermasse, d. h. für

$$a_0 = \sqrt{\frac{E_W}{\rho}} \quad (3.24)$$

zeigt Abb. 3.3-8. Daraus wird ersichtlich, daß die Geschwindigkeit der Welle in einer Rohrleitung in erster Linie eine Funktion des Rohrwerkstoffes und dessen elastischen Verhaltens, in zweiter Linie eine Funktion von Durchmesser und Rohrwanddicke ist. Somit kann mit geringen Einschränkungen die Druckwellengeschwindigkeit als wesentliche Eigenschaft eines Rohres angesprochen werden.

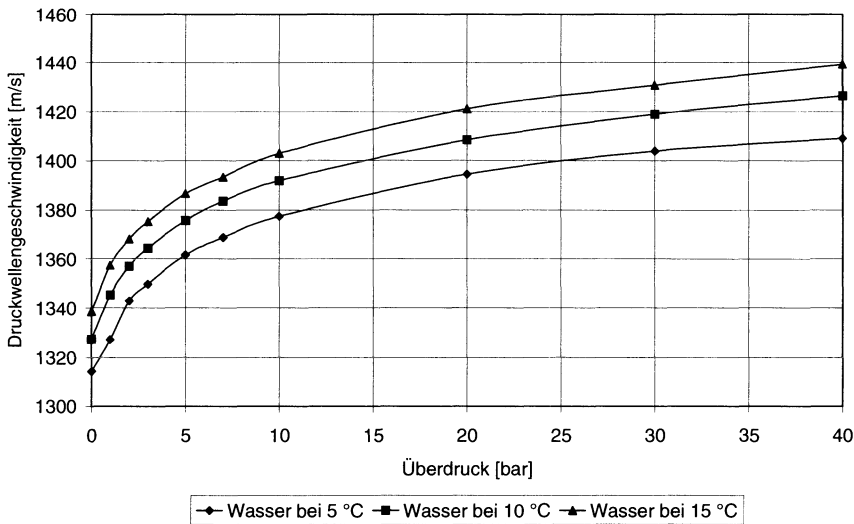


Abb. 3.3-8 Druck- und Temperaturabhängigkeit der Druckwellengeschwindigkeit

In (Kottmann 1992) wird noch auf die in der Literatur verschiedenen Gleichungen mit den Durchmesserbezeichnungen d oder d_m hingewiesen. Bei üblichen dünnwandigen Rohren ist das Problem ohne Bedeutung. Dagegen gilt für dickwandige und in Richtung der Rohrachse frei bewegliche Rohre

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E_W}{\rho_W}}{1 + 2 \cdot \frac{E_W}{E_R} \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot d_a^2 + (1 - \mu) \cdot d_i^2}{(d_a^2 - d_i^2)}}} \quad [\text{m/s}] \quad (3.25)$$

mit μ - Querkontraktion bzw. Querdehnung [-].

Die Wahl des richtigen Wertes ist schwer, weil die Querkontraktion, ähnlich wie das Elastizitätsmodul nicht bei allen Beanspruchungsarten gleich ist. Es gilt grundsätzlich $0 \leq \mu \leq 0,5$ oder speziell für die verschiedenen Rohrwerkstoffe:

- $0,2 \leq \mu \leq 0,3$ für Gußeisen, Beton und Stahl,
- $\mu = 0,3$ für hochpolymere, glasharte Kunststoffe,
- $\mu = 0,5$ für gummielastische Kunststoffe,
- $\mu = 0,35$ für PVC,
- $\mu = 0,5$ für Polyethylen.

Für die Berechnung des Elastizitätsmodules des Wassers und des reinen Stahlrohres sind im Anhang 1 Näherungsgleichungen angegeben. Für Stahl- und Gußrohre mit Zementmörtelauskleidung, Stahl- bzw. Spannbetonrohre sowie Rohre aus

verschiedenen Kunststoffen werden in (Kottmann 1992) entsprechende Aussagen zum Elastizitätsmodul getroffen.

Den Einfluß der Druckwellengeschwindigkeiten auf die Rohre PN 10 verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit des Nenndurchmessers zeigt Abb. 3.3-9. Für Rohre aus weichem Polyethylen beträgt die Druckwellengeschwindigkeit unter bestimmten Voraussetzungen 300–400 m/s. Für Rohre aus hartem Polyethylen liegt dieser Bereich bei 380–450 m/s, für Rohre aus PVC bei 400–500 m/s. Demnach beträgt die Druckwellengeschwindigkeit in Rohren aus Kunststoff im Gegensatz zu den herkömmlichen Werkstoffen nur 25–50 %. Das die Ergebnisse unterschiedlich ausfallen können, zeigen die berechneten Druckwellengeschwindigkeiten für verschiedene Rohrwerkstoffe in (Mutschmann et al. 1997). Der unmittelbare Einfluß der Starrheit eines Rohres, gegeben durch die Zunahme der Wandstärke, gegenüber der Druckwellengeschwindigkeit zeigt Abb. 2.3-15.

Druckstoßberechnungen werden für verzweigte und vermaschte Rohrsysteme ausschließlich mit Hilfe von Computern durchgeführt. Dafür wird verschiedene Software bereitgestellt (Wossog et al. 1998). Für Wasser bzw. Flüssigkeiten wird in der Regel das Charakteristikenverfahren angewendet, bei dem die partiellen Differentialgleichungen in gewöhnliche Differentialgleichungen umgeformt werden. Eine andere Möglichkeit besteht in dem Verfahren der finiten Differenzen, wo die partiellen Differentialgleichungen direkt integriert werden. Das zu berechnende Rohrsystem wird bei dem aufgestellten Modell in sehr kleinen Zeitschritten im Millisekundenbereich durchgerechnet und analysiert.

Weitere, sehr detaillierte Ausführungen zu diesen fluiddynamischen Berechnungen sind in (Kottmann 1992) enthalten. Ansonsten kann u. a. auf (Schwaigerer 1986 u. Wossog et al. 1998) verwiesen werden.

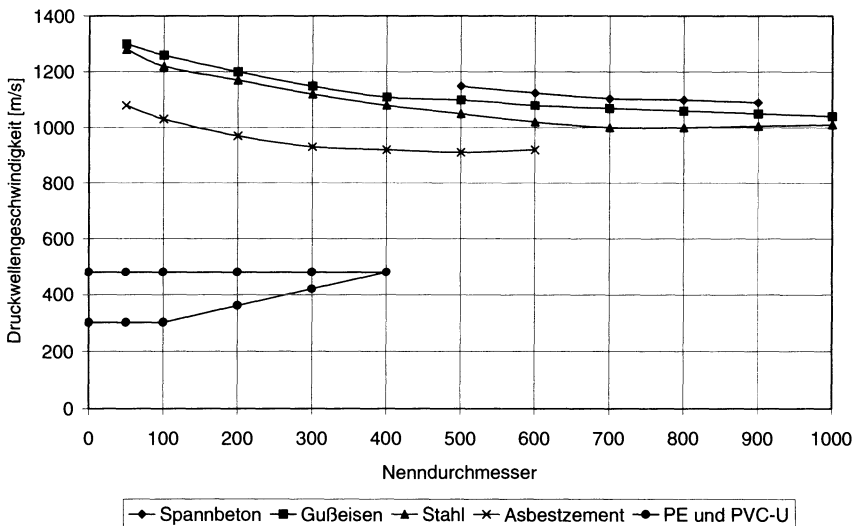


Abb. 3.3-9 Abhängigkeit der Druckwellengeschwindigkeit vom Rohrwerkstoff nach (Kottmann 1992)

3.4

Planung und Bau

3.4.1

Einleitung

Eine komplexe Abhandlung zur Vorgehensweise der Planung von Wasserleitungen oder sogar eines Verteilungssystems mit seinen Zubehörteilen ist nur bedingt möglich, begründet durch die hohe gegebene Variantenvielfalt. Bei der Planung spielen solche Überlegungen, wie

- die Abgrenzung des Planungsraumes,
- die Ermittlung des Wasserbedarfs für den Planungsraum,
- die Erarbeitung von verschiedenen technischen Lösungsvorschlägen unter Berücksichtigung der wasserwirtschaftlichen Rahmenpläne, Raumordnungspläne und Flächennutzungspläne,
- die Auslegungsparameter,
- die Dimensionierung der Leitung,
- das Verlegeverfahren,
- die zum Einsatz kommenden Armaturen,
- die Notwendigkeit von Bauwerken usw.

eine wesentliche Rolle. In diesem Abschnitt werden deshalb nur einige grundlegende Ausführungen zur Planung von Wasserleitungen gemacht. Die Forderungen an die Planung und Ausführung von Wasserleitungen sind in einer Vielzahl von Normen, Regeln und technischen Vorschriften enthalten. Hierbei sei insbesondere das DVGW-Merkblatt W 403 – Planungsregeln für Wasserleitungen und Wasserrohrnetze – genannt. Als weiterführende Literatur kann u. a. (Schwaigerer 1986; DIN TB 63 1993; Moser 1995; Böhme et al. 1996; Mutschmann et al. 1997; Wosog et al. 1998) angegeben werden.

Der Stellenwert der Planung ergibt sich durch den direkten Einfluß auf die Kosten und die Betriebssicherheit. Der Aufwand an Planungsleistungen ist an die Aufgabenstellung des Projektes entsprechend anzupassen. Ziel der Planung ist es, technische Lösungen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte zu erarbeiten. Dazu zählt auch die sorgfältige Auswahl der Rohrwerkstoffe, der Armaturen und des Korrosionsschutzes, um somit eine hohe Versorgungssicherheit und Nutzungsdauer zu gewährleisten. Die dabei zur Anwendung kommenden Materialien dürfen die Wasserqualität nicht nachteilig beeinflussen. Die Lösungen müssen so dokumentiert werden, daß diese durch Dritte nachvollziehbar sind. Als weitere Ziele der Planung können genannt werden:

- Kosten- und Materialerfassung,
- Terminablaufplan,
- Koordinierung der einzelnen Gewerke,
- reibungslose Baudurchführung,
- Sicherung der geforderten Qualität,
- Vermeidung von Schäden.

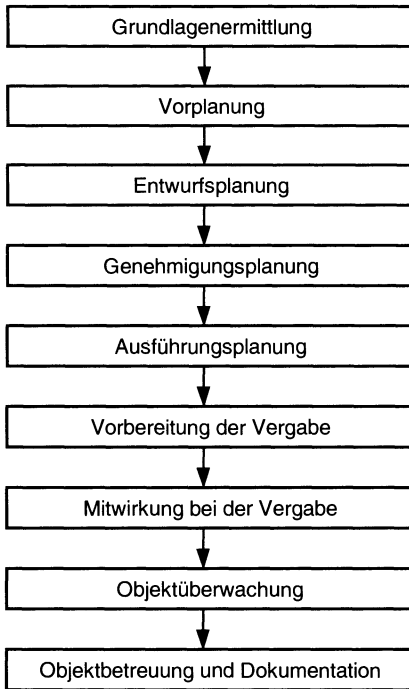


Abb. 3.4-1 Leistungsphasen nach HOAI

Die Bauwerke und Anlagen des Wasserbaus und der Wasserwirtschaft sind Ingenieurbauwerke, für welche die Berechnung des Honorars nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) §51ff. geregelt ist. Das Honorar für Grundleistungen bei Ingenieurbauwerken richtet sich nach den anrechenbaren Kosten des Objekts, nach der Honorarzone I–V, der das Objekt angehört, sowie nach der Honorartafel. Planungen werden entweder vollständig in Eigenleistung durch entsprechendes Personal in einem Wasserversorgungsunternehmen durchgeführt oder, vor allem bei kleineren und mittleren Gemeinden, teilweise oder komplett an Ingenieurbüros vergeben.

Die einzelnen Leistungsphasen und deren Reihenfolge sind in Abb. 3.4-1 dargestellt, wobei die Grenzen als fließend zu betrachten sind.

3.4.2 Grundlagenermittlung

Diese Leistungsphase dient der Ermittlung der zur Lösung der Aufgabe notwendigen Voraussetzungen. Die eigentliche Aufgabenstellung der technischen Ausrüstung wird im Einvernehmen mit dem Auftraggeber geklärt. Besondere Leistungen im Rahmen der Grundlagenermittlung sind, soweit erforderlich, u. a. die Bedarfsaufnahme, die Standortanalyse, die Betriebsplanung sowie die Prüfung auf

Umweltverträglichkeit. Dazu gehört auch die Erfassung des derzeitigen und zukünftigen Wasserbedarfes. Die Grundlagenermittlung ist vor allem dann von Wichtigkeit, wenn verschiedene Varianten untersucht werden sollen. Existiert dagegen nur eine Lösungsvariante, wird sehr oft auf diese Leistungsphase zugunsten einer erweiterten Vorplanung verzichtet.

3.4.3

Vorplanung

Den eigentlichen ersten Planungsschritt stellt die Vorplanung dar. Diese beginnt mit der Analyse der Grundlagen, da eine Grundlagenermittlung nicht unbedingt zwingend vorher erforderlich ist. Die Erstellung einer Vorplanung ist in den überwiegenden Fällen für jede Baumaßnahme erforderlich, ausgenommen einfache Vorhaben, für die gleich ein Entwurf erstellt werden kann und soweit nicht über mehrere Lösungsvarianten zu entscheiden ist. Ziel ist die Erarbeitung eines Planungskonzeptes einschließlich Untersuchung der alternativen Lösungsmöglichkeiten unter Einhaltung aller vorgegebenen Randbedingungen. Dazu zählt auch die überschlägige Auslegung der Wasserleitungen und deren Grobtrassierung auf der Grundlage der Ermittlung des derzeitigen und zukünftigen Wasserbedarfes. Des weiteren gehören u. a. dazu, das Feststellen der vorhandenen Wasserversorgung und Feuerlöscheinrichtungen sowie das Prüfen der Wasserbeschaffungsmöglichkeiten und, bei bereits erschlossenen Wasservorkommen, die Berücksichtigung des gesamten Versorgungsgebietes, die Überprüfung der Wasserversorgung der Nachbarorte sowie Berücksichtigung der wasserwirtschaftlichen Rahmen- und Fachplanung.

Die Vorplanung ist somit die erste Grundlage für die Beratung und die Entscheidung des Vorhabensträgers, ob und wie das Vorhaben durchgeführt werden soll. Ebenso dient die Vorplanung auch dazu, die zu genehmigenden Behörden über das Vorhaben zu unterrichten und anzuhören und gegebenenfalls das Raumordnungsverfahren zu beantragen sowie Zweckverbände zu gründen.

Bei der Grobtrassierung der Wasserleitungen sind Bauwerke und Leitungen anderer Versorgungsmedien, wie beispielsweise Strom, Gas, Fernwärme, Abwasser, Telefon, bei der Planung zu berücksichtigen. Die Lage dieser Leitungen ist daher vor Baubeginn anhand von Lageplänen und Schnittzeichnungen mit den zuständigen Stellen abzustimmen. Dabei ist nicht nur der derzeitige Bestand von Interesse, sondern auch alle zukünftigen Planungen, um somit ein späteres Umverlegen der Trasse zu vermeiden. Erfahrungswerte besagen, je früher alle behördlichen Stellen und Eigentümer anderer Versorgungsmedien angefragt werden, desto weniger muß während der Planungsphase die Trasse neu geplant werden, was letztendlich auch Kosten spart. In innerstädtischen Ballungszentren können sich die Abstimmungen unter Umständen als sehr schwierig erweisen. Insbesondere bei älteren Leitungsbeständen ist es nicht selten, daß die genaue Lage durch Suchschachtungen erst festgestellt werden muß. Unterbleiben diese Erkundigungen, so besteht nach Rechtssprechung im Schadensfall eine Schadensersatzpflicht.

Grundsätzlich ist zu den vorhandenen Leitungen anderer Versorgungsmedien ein ausreichender Mindestabstand zu gewährleisten. Das Unterschreiten solcher

Mindestabstände bedarf der Zustimmung des jeweiligen Eigentümers. Es gibt aber nicht wenige Fälle, wo dieses Problem absolut nicht zu vermeiden ist und somit für Sonderlösungen zum Teil zusätzliche Kosten entstehen. Für die Mindestabstände sind neben den gültigen Richtlinien die jeweiligen örtlichen Festlegungen maßgebend.

Um eine gegenseitige Beeinflussung zwischen Wasserleitungen und anderen Bauwerken zu vermeiden, soll der Mindestabstand 40 cm betragen. Bei Parallelführungen mit anderen Leitungen oder Kabeln kann dieser Wert an Engpässen auf 20 cm minimiert werden. Wird dieser Abstand aus technischen Gründen trotzdem unterschritten, so ist eine direkte Berührung zu vermeiden.

Erfahrungsgemäß sollten bei auftretenden Kreuzungen Wasserleitung/*Stromkabel* etwa die gleichen Mindestabstände, analog denen der Fernwärmeleitungen eingehalten werden (s. a. Tabelle 2.4-1). Wird der Abstand zu Stromkabeln von etwa 20 cm unterschritten, muß eine Berührung durch das Zwischenlegen elektrisch nichtleitender Platten verhindert werden. Weiterhin ist bei Parallelführungen von Stromkabeln und Wasserleitungen für eventuell notwendige Montagearbeiten ein angemessener Platz zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für Bauwerke. Grundsätzlich ist bei *Telefon*-, *Signal*- oder *Fernsehkabel* ähnlich zu verfahren.

In (Randløv 1997) werden zu *Fernwärmeleitungen* Parallelabstände für Wasserleitungen von 50–100 cm genannt. Bei der gemeinsamen Verlegung Kunststoffmantelrohr und Trinkwasserleitungen lassen sich erhebliche Kosteneinsparungen realisieren. In (AGFW 1997a) werden Empfehlungen für Mindestabstände zu Trinkwasserleitungen für Vorlauftemperaturen bis 140 °C gegeben (Abb. 3.4-2).

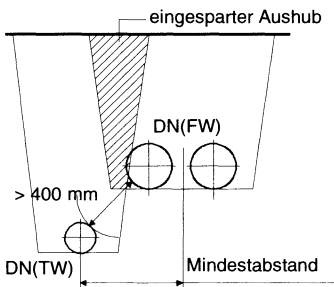


Abb. 3.4-2 Anhaltswerte für Mindestabstand bei gemeinsamer Verlegung von Trinkwasser- und Fernwärmeleitungen nach (AGFW 1997a)

Wasserleitung DN (TW)	Fernwärmeleitung (Kunststoffmantelrohr) DN (FW)							
	25	32	50	65	80	100	125	150
50	470	485	505	520	540	580	610	650
65	480	495	515	530	550	590	620	660
80	490	505	525	540	560	600	630	670
100	500	515	535	550	570	610	640	680
125	510	525	545	560	580	620	650	690
150	525	540	560	575	595	635	665	705

Bei Parallelführung von Wasserleitungen mit *Gasleitungen* ist zwischen beiden Außenkanten der Leitungen ein Mindestabstand von etwa 40 cm zu realisieren.

Trinkwasserleitungen sind grundsätzlich höher als *Abwasserleitungen* zu verlegen. Ist dies nicht möglich, so soll ein Mindestabstand von 1 m nicht unterschritten werden. Gleichzeitig ist möglichst eine Verlegung übereinander zu vermeiden. Sonst besteht die Gefahr, daß bei Reparaturen an der Abwasserleitung die darüber liegende Wasserleitung beschädigt wird oder zumindest erhebliche Sicherungsmaßnahmen dafür notwendig werden. Selbst bei begehbaren Abwasserkanälen, wo Reparaturen von innen her realisiert werden können, geben die Eigentümer in den bekannten Fällen keine Zustimmung. Als sehr kompliziert haben sich Genehmigungen erwiesen für notwendige Einengungen der Abwasserleitung bzw. Durchführungen von Abwasserkanälen.

Kreuzungen und Längsführungen an *Bahnanlagen* erfordern wegen der Sicherheit des Bahnbetriebes besondere Vorkehrungen. Die Mindestabstände zu Bahnanlagen sind in den DVGW-Hinweisen W 305 – Prinzipskizzen und Musterentwürfe für die Kreuzung von DB-Gelände mit Wasserleitungen – und W 306²⁰ – Prinzipskizzen und Musterentwürfe für die Kreuzung von NE-Gelände mit Wasserleitungen – angegeben.

Besondere Aufmerksamkeit ist dem *Straßenbahnverkehr* und seiner damit verbundenen Stromanlagen zu widmen, da diese Anlagen durch ihre Kriechströme eine Korrosionsgefahr für Rohrleitungen aus Stahl darstellen. Diese Streuströme werden hervorgerufen, zum einen durch den Betrieb elektrischer Gleichstrombahnen, zum anderen aber auch durch hohe Wechselstromdichten elektrischer Bahnen und können innerhalb kürzester Zeit erhebliche Korrosionsschäden hervorrufen. Grundsätzlich sind bei Kreuzungen oder Näherungen mit Hochspannungs- und Drehstromanlagen sowie Wechselstrombahnanlagen die Hinweise der AfK-Empfehlung Nr. 3 – Maßnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen im Einflußbereich von Hochspannungs-Drehstromanlagen und Wechselstrom-Bahnanlagen – zu beachten. Entsprechende Schutzmaßnahmen sind u. a. ausführlich in (Behrens 1999) beschrieben.

Erfahrungsgemäß kann festgestellt werden, daß sich eine Änderung der Trassierung in dieser frühen Leistungsphase zum Teil komplizierter gestalten kann, aber immer billiger ist, als die Umverlegung einer vorhandenen Versorgungslei-

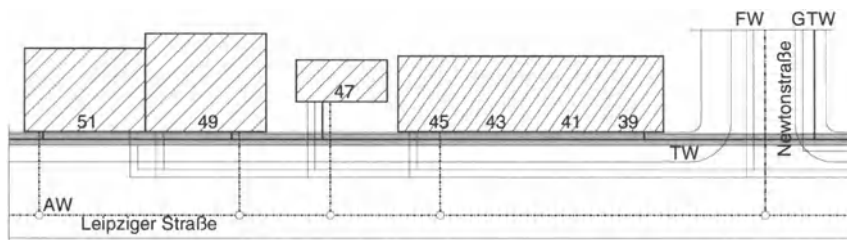


Abb. 3.4-3 Planungsanfrage der Leistungsphase Vorplanung (grau gekennzeichnet)

AW Abwasser, TW Trinkwasser, G Gas, FW Fernwärme

²⁰ Beide Hinweise befinden sich derzeit in Überarbeitung.

tung. Praktische Beispiele belegen, daß gerade bei älteren Versorgungsleitungen die Gefahr besteht, nicht nur die notwendigen Meter, sondern wesentlich größere Abschnitte umverlegen zu müssen.

Einen Auszug aus einer Planungsanfrage an die Eigentümer der anderen Versorgungsleitungen sowie als erste Diskussionsgrundlage mit den zu genehmigenden Behörden zeigt Abb. 3.4-3. Letztendlich erfolgt die Zusammenfassung aller Ergebnisse einschließlich einer Bewertung sowie einer ersten Grobkostenschätzung für den geplanten Leistungsumfang.

3.4.4 Entwurfsplanung

Die Entwurfsplanung beginnt mit der detaillierten Überarbeitung des zuvor aufgestellten Planungskonzeptes unter Berücksichtigung aller spezifischen Anforderungen, wobei die Grenzen zwischen der Vorplanung und Entwurfsplanung fließend sind. Die Entwurfsplanung ist die Grundlage für die Entscheidung des Vorhabensträgers über das Vorhaben. Sie umfaßt die Art der Ausführung und die Kosten des Vorhabens. Die Entwurfsplanung dient auch dazu, die öffentlich-rechtlichen Verfahren zu beantragen, Grundstücke oder Dienstbarkeiten zu erwerben, die Leistungen – Ausführungsplanung und Vorbereitung zur Vergabe – zu veranlassen sowie staatliche Zuwendungen zu beantragen. Dabei sind alle Leistungen anderer an der Planung fachlich Beteiligter mit zu integrieren. Grundsätzlich gilt, je sorgfältiger die Entwurfsplanung erstellt wird, um so einfacher und wirtschaftlicher verläuft die Bauausführung.

Die Stellungnahmen der angefragten Eigentümer anderer Versorgungsleitungen beinhalten entweder die Befürwortung, in den überwiegenden Fällen verbunden mit einzuhaltenden Randbedingungen (beispielsweise gesonderte Mindestabstände), oder eine Ablehnung. Letzteres ist nicht unmöglich, da Eigentümer sogenannte Vorbehaltstrassen für einen späteren Bauzeitpunkt bei den zu genehmigenden Behörden für sich reserviert haben.

Somit liegen die Trassierung, das Verlegeverfahren, die Auslegungsparameter und die Bemessung der neu zuverlegenden Wasserleitungen und deren Zubehörteile sowie notwendiger Armaturen vor.

Bei größeren Bauvorhaben wird bereits in der Entwurfsplanung eine Vorstatik angefertigt, um somit die Trassierung zu überprüfen. Grundlegende Ausführungen zu statischen Berechnungen wurden im vorherigen Abschnitt ausgeführt.

Letztendlich erfolgt die Zusammenfassung aller Ergebnisse einschließlich einer Bewertung sowie die Überarbeitung der Grobkostenschätzung für den geplanten Leistungsumfang.

3.4.5 Genehmigungsplanung

Die Genehmigungsplanung ist bei der Planung von Wasserleitungen von der Größe des Bauvorhabens abhängig. Sie beginnt im eigentlichen Sinne zeitgleich mit der Vor- und Entwurfsplanung des durchzuführenden Vorhabens. Für diese Genehmigungsplanung zeichnet sich der Planer verantwortlich. Zu seinen Aufgaben

gehören die Erarbeitung, Einreichung und Prüfung aller Vorlagen für die öffentlich-rechtlichen Verfahren einschließlich der Anträge auf Ausnahmen und Befreiungen. Dazu zählen auch, bei entsprechender Notwendigkeit, der Grunderwerbsplan und das Grunderwerbsverzeichnis.

Die Genehmigungsplanung umfaßt die Einholung der privatrechtlichen, wasserrechtlichen und baurechtlichen Genehmigungen. Bei den privatrechtlichen Genehmigungen werden der in bestimmten Fällen notwendige Kauf oder die vorübergehende Benutzung von Grundstücken sowie die Bestellung von Grunddienstbarkeiten geregelt. Zu diesen Regelungen gehört auch das Einholen von Stellungnahmen von Eigentümern anderer Versorgungsleitungen. Des weiteren sind durch den Auftraggeber rechtzeitig die Anträge auf Genehmigung der Inanspruchnahme öffentlicher Grundstücke unter Beigabe der Pläne bei den zuständigen Behörden einzureichen. Grundsätzlich ist die Entnahme und Ableitung von Wasser für zentrale Wasserversorgungsanlagen genehmigungspflichtig. Die wasserrechtlichen Regelungen treffen insbesondere für Anlagen der Wassergewinnung zu. Weiterhin ist zu prüfen, inwieweit die erforderlichen Anlagenteile des Vorhabens nach der Bauordnung baurechtlich genehmigungspflichtig sind. Form und Art der Anträge und der Eingabepläne sind in der jeweils gültigen Bauordnung festgelegt. Bei größeren Bauwerken, wie beispielsweise Pumpwerken, ist es zweckmäßig, auf der Grundlage der Vorplanung eine Bauvoranfrage an die Baugenehmigungsbehörde zu richten, damit grundsätzlich geklärt wird, ob das Bauwerk an der vorgesehenen Stelle und unter welchen voraussichtlichen Auflagen errichtet werden kann. Die Ergebnisse sind bei der Entwurfsplanung mit zu berücksichtigen.

In diesem Genehmigungsverfahren wird auch zu prüfen sein, ob und wie die geplante Baumaßnahme in bestehende wasserwirtschaftliche Rahmen- und Fachpläne eingeordnet werden kann.

3.4.6

Ausführungsplanung

Die Ausführungsplanung enthält alle detaillierten Angaben über das geplante Bauvorhaben, angefangen von der Materialliste der Wasserleitung und aller einzubauenden Zubehörteile bis hin zu benötigten Bauwerken einschließlich der Bauausführung. In dieser Leistungsphase fließen alle Ergebnisse der Entwurfs- und Genehmigungsplanung unter Berücksichtigung städtebaulicher, funktionaler, technischer und wirtschaftlicher Anforderungen ein. Gleichzeitig wird damit der erste Grundstein über Art und Umfang für die Dokumentation gelegt.

Die Lagepläne der Fern- und Zubringerleitungen werden zur besseren Übersichtlichkeit im Maßstab 1:5000 gefertigt. Für die Verlegung in Ortsnetzen empfiehlt es sich, die Übersichtspläne in den Maßstäben 1:5000 oder 1:2500 und in 1:1000 für die Darstellung der Einordnung der Rohrleitungen und Armaturen in den Straßen zu erstellen. Es ist aber auch nicht unüblich, Detailpläne kleineren Maßstabs zu verwenden. In diese Darstellungen fließen die Ergebnisse der Statik des Rohrleitungssystems ein. Dabei werden u. a. Angaben zu der Tiefe der Verlegung, den Dehnungsbögen sowie der Widerlager gemacht.

Zur Durchführung von statischen Berechnungen gibt es unterschiedliche Praktiken. Diese können sowohl durch den Auftraggeber als auch durch den Planer durchgeführt werden. Im Ergebnis erfolgt dann die genaue Vorgabe der Verlegung in der Ausschreibung für den Lieferanten und Rohrleger. Diese Variante ist gebunden an entsprechend zur Verfügung stehende Computerprogramme. Es ist aber auch üblich, in der folgenden Leistungsphase eine funktionale Ausschreibung mit der Maßgabe zu erstellen, daß die Statik durch den Lieferanten zu erbringen ist.

Die Verbindungen der Rohre, unabhängig vom Rohrwerkstoff, erfolgen grundsätzlich nach den technischen Vorschriften entsprechender Regelwerke und der Lieferwerke. Die einzelnen Verbindungsarten sind bei dem jeweiligen Verlegeverfahren dieses Kapitels näher beschrieben. Speziell bei der Verlegung von Stahlrohrleitungen müssen Aussagen zur Schweißnahtausführung getroffen werden. Für die Durchführung der Schweißarbeiten gelten die technischen Vorschriften entsprechender Regelwerke. Im besonderen ist auf die Güte der Schweißarbeiten Wert zu legen und es sind dafür nur Schweißer einzusetzen, die nach DIN in den entsprechenden Gruppen und in den angewendeten Schweißverfahren geprüft sind. Diese Bestimmung gilt auch für die Schweißarbeiten in der Werkstatt des Rohrlegers. Die Bewertung der Unregelmäßigkeiten bei der Schweißnahtausführung erfolgt nach DIN EN 25817 in den Bewertungsgruppen B, C und D. Dabei werden in der Bewertungsgruppe B die höchsten Anforderungen an die Schweißnaht gestellt. Bei Unregelmäßigkeiten, wie

- Poren,
- Einbrandkerben,
- zu große Naht- oder Wurzelüberhöhungen,
- Kantenversatz und
- Wurzelkerben

werden in der Bewertungsgruppe B nur sehr kleine, in D dagegen schon größere Unregelmäßigkeiten zugelassen. Letztendlich erfolgen gemeinsam mit dem Auftraggeber Festlegungen zur Schweißnahtprüfung und zum Prüfumfang, welche von 10-100 % reichen. Dabei sind verschiedene Faktoren abzuwägen, denn mit zunehmendem Prüfumfang sind auch höhere Kosten verbunden. Des weiteren wird empfohlen, die zuerst ausgeführten Schweißnähte eines Schweißers vollständig (100 %) zu prüfen.

Weiterhin sind Maßnahmen zum erforderlichen Korrosionsschutz festzulegen. Beschädigungen des Außenschutzes an den einzelnen Rohren sind grundsätzlich vor dem Ablassen der Rohre in den Graben zu beheben. Eine nochmalige Prüfung aller ausgebesserten Stellen auf der Baustelle ist zu empfehlen.

Zur Vermeidung späterer Wasserverluste müssen die neuverlegten Rohrleitungen vor ihrer Inbetriebnahme einer Innendruckprüfung mit Hilfe von Wasser unterzogen werden. Diese Druckprüfung dient der Aufdeckung von Haarrissen, Lunkerbildungen und Dichtungs- bzw. Verbindungsfehlern. In der Regel werden einzelne Rohrleitungsabschnitte geprüft, beispielsweise zwischen 2 Schächten, um somit entsprechende Kontrollmöglichkeiten zu besitzen. Je größer die zu prüfenden Abschnitte werden, desto schwieriger lassen sich etwaige Fehler eingrenzen. Sind die Enden der Rohrleitungsabschnitte offen, müssen diese so verspannt wer-

den, daß keine axiale Bewegung möglich ist. Ebenso können spezielle Rohrendstücken zum Einsatz kommen.

Das Füllen soll mit Trinkwasser sorgfältig so durchgeführt werden, daß der zu prüfende Rohrleitungsabschnitt völlig luftfrei ist. Die Kontrolle kann über entsprechende Entlüfter erfolgen. Gleichzeitig sind die zum Teil noch offenen Rohrleitungen gegen Temperatureinflüsse, beispielsweise bei starker Sonneneinstrahlung, durch Matten zu schützen, um somit Verspannungen durch Längsdehnungen zu vermeiden.

Die für die Druckprüfung erforderliche Pumpe wird in der Regel an der tiefsten Stelle des Rohrleitungsabschnittes angeschlossen. Diese ist mit einer Rückschlag- und einer Absperrarmatur ausgerüstet. Die Druckmessung erfolgt über ein Feinmeßmanometer der Klasse 0,6 und ein Druckschreibgerät. Des weiteren wird ein Thermometer zur Messung der Wasser- und Außenlufttemperatur benötigt.

Grundlage für die Innendruckprüfung von Druckrohrleitungen für Wasser bildet die DIN 4279. Diese Vorschrift gilt für die verschiedenen Rohrwerkstoffe und ist wie folgt unterteilt:

- DIN 4279-1: Allgemeine Angaben,
- DIN 4279-2: Druckrohre aus duktilem Gußeisen,
- DIN 4279-3: Druckrohre aus duktilem Gußeisen und Stahlrohre mit Zementmörtelauskleidung,
- DIN 4279-4: Stahlrohre mit und ohne Bitumenauskleidung,
- DIN 4279-5: Stahlbetondruckrohre und Spannbetondruckrohre,
- DIN 4279-6: Asbestzement-Druckrohre,
- DIN 4279-7: Druckrohre aus Polyethylen geringer Dichte (PE-LD), Druckrohre aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) und Druckrohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U),
- DIN 4279-8: Druckrohre aus PE hart (Polyäthylen hart) und PE weich (Polyäthylen weich),
- DIN 4279-9: Muster für Prüfberichte sowie
- DIN 4279-10: Übersicht.

Bei der Innendruckprüfung wird zum einen in eine Vorprüfung, zum anderen in eine Hauptprüfung unterschieden. Die *Vorprüfung* ist immer nötig bei Rohren aus Spannbeton, Asbestzement, PVC und PE, soweit nicht für Rohre aus PVC und PE eine Kurzprüfung zulässig ist. Die Vorprüfung dient auch der Sättigung der Rohrwand mit Wasser und der Restentlüftung von Rohren aus Spannbeton und Asbestzement sowie der Zementmörtelauskleidung von Rohren aus duktilem Gußeisen und Stahl. Die Vorprüfung kann je nach den örtlichen Verhältnissen und je nach Rohrwerkstoff in die Hauptprüfung einbezogen werden. Die *Hauptprüfung* schließt an eine Vorprüfung ohne Fehler unmittelbar an und wird mit einem den Nenndruck übersteigenden Prüfdruck durchgeführt. Für Leitungen mit einem zulässigen Betriebsdruck bis 10 bar beträgt dabei der Prüfdruck $1,5 \times$ Nenndruck und für Leitungen mit einem zulässigen Betriebsdruck über 10 bar Nenndruck plus 5 bar. Der zu prüfende Rohrleitungsabschnitt ist grundsätzlich so zu wählen, daß der Prüfdruck am höchsten Punkt einer Leitung mindestens dem 1,1-fachen Nenndruck entspricht.

Tabelle 3.4-1 Prüfdauern [h] für Innendruckprüfung nach DIN 4279

	DIN							
	4279-2 <i>A</i>	4279-3 <i>B</i>	4279-4 <i>C</i>	4279-5 <i>D</i>	<i>E</i>	4279-6 <i>F</i>	4279-7 <i>G</i>	4279-8 <i>H</i>
Vorprüfung								
– bis DN 200	3	24	3	≥ 24	≥ 24	≥ 24	≥ 12	4 ^a
– DN 250–400	6	24	6	≥ 24	≥ 24	≥ 24	≥ 12	
– über DN 400	12	24	12	≥ 24	≥ 24	≥ 24	≥ 12	12 ^b
Hauptprüfung								
1. nach Vorprüfung								
– bis DN 150	3	3	3	12	12	3	3	3
– DN 200	3	3	3	12	12	3	6	6
– DN 250–300	3	6	3	12	12	6	6	6
– DN 400	3	6	3	12	12	6	6	–
– DN 500–700	12	18	12	12	12	18	–	–
– über DN 700	24	24	24	18	18	24	–	–
2. ohne Vorprüfung								
– bis DN 200	3	^c	3	–	–	–	–	–
– DN 250–400	6	^c	6	–	–	–	–	–
– DN 500–700	18	^c	18	–	–	–	–	–
– über DN 700	24	^c	24	–	–	–	–	–
Kurzprüfung^d								
– bis DN 50	–	–	–	–	–	–	1	1

A duktiles Gußeisen, *B* duktiles Gußeisen und Stahl mit Zementmörtelauskleidung, *C* Stahl mit und ohne Bitumenauskleidung, *D* Stahlbeton, *E* Spannbeton, *F* Asbestzement, *G* PVC hart, *H* PE hart und PE weich

^a Leitungen ohne Zwischenverbindungen.

^b Leitungen mit Zwischenverbindungen.

^c Nach Sonderverfahren DIN 4279-3.

^d Nur für Prüfstrecken bis etwa 30 m und bis DN 50 zulässig.

Die Prüfdauer selbst ist abhängig vom Rohrwerkstoff, Nenndurchmesser sowie den einzelnen Prüfungsarten (Tabelle 3.4-1). Weiterhin sind in der DIN 4279 Angaben zum maximalen Druckabfall bzw. zur maximal zulässigen Wasserzugabe enthalten.

Die Prüfung, ob die Rohrleitungen praktisch luftfrei waren und somit die Prüfergebnisse nicht durch Lufteinschlüsse verfälscht wurden, kann mit Hilfe eines Ablaßtests vorgenommen werden. Hierbei wird eine Wassermenge aus der noch unter Druck stehenden Rohrleitung entnommen, wobei die dadurch eingetretene Druckänderung festgehalten wird. Die theoretische Volumenänderung basiert auf der Berechnung der Druckänderung, der Rohrleitungslänge sowie einer Druckkonstanten, welche wiederum vom Rohrwerkstoff abhängig ist. Die einzelnen Druckkonstanten, bezogen auf Nenndurchmesser und Rohrwerkstoff, sind u. a. in (Mutschmann et al. 1997) enthalten.

Treten während der Vor- oder Hauptprüfung Mängel auf, muß die Prüfung unterbrochen und der Rohrleitungsabschnitt so weit entleert werden, bis die schadhafte Stellen wasserfrei sind. In Ausnahmefällen ist eine Nachdichtung nach dem

Ablassen des Druckes möglich. Die Prüfung selbst darf erst nach vollständiger Beseitigung der Mängel wiederholt werden.

Im folgenden einige Anmerkungen zum Tiefbau. Für die Verlegung von erdverlegten Rohrleitungen werden Rohrgräben mit entsprechenden Abmessungen benötigt. Dabei ist oft der für die Verlegung zur Verfügung stehende Arbeitsraum begrenzt. Hier ist insbesondere im öffentlichen Bereich ein Optimum zu finden, einerseits einen ausreichenden Platz für eine effektive und sichere Verlegung zu gewährleisten, andererseits den Verkehr so wenig wie möglich zu beeinträchtigen.

Der Rohrgraben ist abhängig von der Aufgrabungsmethode, der Verlegetiefe, von der Beschaffenheit des Bodens usw. und kann somit verschiedenartig gestaltet werden. Nach der Unfallverhütungsvorschrift Bauarbeiten (VBG 37) ist die DIN 4124²¹ die anzuwendende und einzuhaltende Anweisung. Die darin getroffenen Festlegungen dürfen nicht unterschritten werden. Dies gilt insbesondere bei Mindestanforderungen. Des weiteren wird bei den Rohrgrabenabmessungen in lichte Mindestbreiten ohne betretbaren Arbeitsraum (Tabelle 3.4-2) und mit betretbaren Arbeitsraum (Tabelle 3.4-3) unterschieden. Die vorgenannten Grabenbreiten gelten nicht für Gräben, die bei dem vorgesehenen Arbeitsablauf (endlos verlegte Rohrstränge) nicht betreten werden müssen. Als lichte Breite gelten in geböschten Rohrgräben die Sohlenbreiten, in verbauten Rohrgräben der lichte Abstand der Bohlen. Die Abmessungen des Rohrgrabens müssen für

- benötigte Kopflöcher,
- Leitungsabgänge,
- Dehnungsbögen sowie
- Einbindung in Schächte

angepaßt werden. Dabei sind Kopflöcher, z. B. für die Montage einer Armatur, als

Tabelle 3.4-2 Lichte Mindestbreite für Gräben ohne betretbaren Arbeitsraum

Regelverlegetiefe [m]	lichte Mindestbreite [m]
bis 0,70	0,30
0,70–0,90	0,40
0,90–1,00	0,50
1,00–1,25	0,60

Tabelle 3.4-3 Lichte Mindestbreite für Gräben mit betretbaren Arbeitsraum

äußerer Leitungs- bzw. Rohrdurchmesser d [m]	lichte Mindestbreite b [m]		nicht verbauter Graben	
	Regelfall	Umsteifung	≤ 60 °	≥ 60 °
bis 0,40	b = d + 0,40	b = d + 0,70	b = d + 0,40	
0,40–0,80	b = d + 0,70			
0,80–1,40	b = d + 0,85		b = d + 0,40	b = d + 0,70
über 1,40	b = d + 1,00			

²¹ Diese Norm befindet sich derzeit in Überarbeitung.

Tabelle 3.4-4 Mindestüberdeckung

DN	Überdeckung [m]	DN	Überdeckung [m]	DN	Überdeckung [m]
bis 200	1,50	400	1,35	800	1,15
250	1,45	500	1,30	900	1,15
300	1,40	600	1,25	1000	1,10
350	1,40	700	1,20	> 1000	≥ 1,00

eine Erweiterung des normalen Rohrgrabens herzustellen, wobei ein Abstand zwischen der Wasserleitung und der Rohrgrabensohle von etwa 0,4–0,7 m empfohlen wird. Die Böschung ist entsprechend anzupassen.

An der oberen Kante eines Rohrgrabens muß weiterhin auf jeder Seite ein mindestens 60 cm breiter unbelasteter Schutzstreifen freigehalten werden. Ist dies nicht möglich, sind besondere Schutzmaßnahmen notwendig. In dem DVGW-Merkblatt W 403 – Planungsregeln für Wasserleitungen und Wasserrohrnetze – werden weitere Hinweise für Schutz- und Arbeitsstreifen gegeben. Während Schutzstreifen grundsätzlich dazu dienen, die Rohrleitungen gegen Beschädigungen zu sichern und die Zugänglichkeit zu gewährleisten, ermöglichen die Arbeitsstreifen die Bereitstellung der für die Durchführung von Arbeiten an der Rohrleitung notwendigen Platzverhältnisse. Diese Arbeitsstreifen können je nach Nenndurchmesser und Verlegetiefe zwischen 14 m und 22 m betragen. Die Praxis zeigt aber immer wieder, daß mit wesentlich weniger Platz ausgekommen werden muß. Aus diesem Grund wird in solchen Fällen der Aushub teilweise bis ganz abgefahren und später zum Verfüllen des Rohrgrabens wieder angefahren.

Die Verlegetiefe und somit die Erdüberdeckung richtet sich nach Frosttiefe und Nenndurchmesser. In Deutschland gelten gewöhnlich folgende Mindestüberdeckungen (Tabelle 3.4-4). Bodenfrosttiefen können über die Wetterdienststellen in Erfahrung gebracht werden. Die Regelgrabentiefe setzt sich somit aus dem äußeren Rohrdurchmesser und der Mindestüberdeckung zusammen, wobei zur Sicherung der Rohrleitung gegen Beschädigungen von oben die Mindestüberdeckung von 1,0 m eingehalten werden sollte.

Rohrleitungen können aber nicht allen Unebenheiten der Erdoberfläche folgen, so daß die Regelgrabentiefe nicht immer eingehalten werden kann. Demzufolge wird sie auch unterschritten, so daß Mindertiefen entstehen, die bei entsprechender Kürze unerheblich sind.

Rohrgrabenwände mit Spundwänden oder Verbau sind an den Stellen erforderlich, an denen Verlegetiefe, Platzbedingungen, Bodenbeschaffenheit und Verkehrsbelastung keinen normalen senkrechten Rohrgraben mit Böschung zulassen. Ohne einen Nachweis der Standsicherheit dürfen Böschungswinkel bei nichtbindigen oder weichen bindigen Böden (Mutterboden, nichtbindige Sande und Kiese, Gesteinsschotter) von 45 °, bei steifen oder halbfesten bindigen Böden (stark lehmiger Sand, Lehm, Ton) von 60 ° und bei Fels von 80 ° nicht überschritten werden. Einen erheblichen Einfluß auf die Böschung übt die Witterung aus und muß somit berücksichtigt werden. Die Grabenabsicherung selbst ist entsprechend DIN 4124 festzulegen. Dabei zählen zu den wichtigsten Verbaumethoden

- der Verbau mit Saumdielen bis zu einer Verlegetiefe von 1,25 m,
- der waagerechte Holzbohlenverbau für standfeste Böden,
- der senkrechte Holzbohlenverbau,
- der Kanaldielenverbau aus Stahl ab einer Verlegetiefe von 2,0 m,
- der großflächige Verbau aus Stahl.

Wasserhaltung ist im Rohrgraben bei Auftreten von Wasser stets notwendig, da zur Kontrolle der Grabensohle, zum Verlegen und insbesondere zum Verbinden der Rohre ein trockener Graben die Voraussetzung für eine qualitätsgerechte Ausführung bildet. In den meisten Fällen kommen dafür motorbetriebene Pumpen mit Förderleistungen bis zu 30 l/s zum Einsatz.

Straßenbeläge sollten so weit vom Grabenrand entfernt werden, daß Schäden der verbliebenen Straßenbeläge während der Realisierung vermieden werden. Die Bildung von Hohlräumen ist möglichst zu vermeiden. Gleiches gilt auch in Nähe bestehender Fundamente. Gegebenenfalls ist hierfür ein statischer Nachweis für die Standsicherheit erforderlich.

Letztendlich ist auch die Herstellung der Rohrgrabensohle von entscheidender Bedeutung. Es ist zu gewährleisten, daß diese auf ihrer Gesamtlänge tragfähig und steinfrei ist. Bei Auftreten von wenig tragfähiger Sohle des Rohrgrabens werden u. a. in (Mutschmann et al. 1997) verschiedene Lösungen in Abhängigkeit des Rohrwerkstoffes und des Nenndurchmessers beschrieben.

Nach Abschluß der Rohrverlegung erfolgt die Verfüllung. Gerade im öffentlichen Straßenraum können durch mangelhafte Verdichtung des Verfüllmaterials erhebliche Folgeschäden verursacht werden. Die Verfüllung des Rohrgrabens hat schichtweise zu erfolgen. Für die ordnungsgemäße Verfüllung darf die Schichtdicke bei mechanischer Verdichtung ein Maß von etwa 30 cm, bei manueller Verdichtung etwa 15 cm nicht übersteigen. Die mechanische Verdichtung sollte erst dann zum Einsatz kommen, wenn die Verfüllung über den Rohrleitungen mindestens 30 cm beträgt. Unterhalb dieses Bereiches ist die Sandschicht manuell zu verdichten. Insbesondere ist dabei auf die Verdichtung unterhalb der Rohrachse zu achten.

Bei der Verfüllung wird unterschieden zwischen Leitungszone und Verfüllzone. Die Leitungszone endet etwa 30 cm über dem Rohrscheitel. Dort darf nur verdichtungsfähiges und steinfreies Material verwendet werden, welches in Lagen von 20–30 cm einzubringen und manuell zu verdichten ist. Eine maschinelle Verdichtung mit Geräten bis 100 kg ist in der Regel erst über 75 cm über dem Rohrscheitel zulässig. Auch in diesen Bereichen sollte die Verfüllung in Schichten nicht über 50 cm erfolgen. In der Leitungszone ist ein Verdichtungsgrad von $D_{Pr} \geq 97\%$ erforderlich. Für die sich anschließende Verfüllzone kann vorhandener Aushub verwendet werden, solange dieser wiederverwendungsfähig ist, d. h. er muß den Verdichtungsklassen V1–V3 nach ZTV A-StB 89 genügen. Dabei sind die Verdichtungsgrade nach ZTV E-StB 94 einzuhalten. Grundsätzlich sollte zur Vermeidung von Schäden an den Wasserleitungen das dazu benötigte Verfüllmaterial nicht direkt in den Rohrgraben abgekippt werden.

Das Kennzeichnungsband muß in einem Abstand von 20–50 cm über den Wasserleitungen ausgelegt werden.

Die Oberfläche, in den meisten Fällen handelt es sich um Gehwege oder Straßen, ist nach den entsprechenden Vorgaben der zu genehmigenden Behörde entsprechend wieder herzustellen und anschließend einer Abnahme zu unterziehen.

Vor einer Inbetriebnahme sind alle bakteriellen Verunreinigungen zu entfernen, d. h. die Rohrleitungen sind zu spülen und gegebenenfalls, meist anschließend, zu entkeimen. Zum Spülen wird dabei nur einwandfreies Trinkwasser verwendet. Um alle Ablagerungen auszuspülen, ist in der Rohrleitung mindestens eine Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 m/s erforderlich. Hinsichtlich der Dauer ist solange zu spülen, bis das Wasser die Spülausläufe völlig klar verläßt. Als Mindestspülwassermenge kann bei Rohrleitungen $DN \leq 150$ der 3–5-fache Inhalt und bei $DN \geq 200$ der 2–3-fache Inhalt der zu spülenden Rohrleitungslänge angesetzt werden.

Sind die Ablagerungen durch einfaches Spülen nicht entfernbar, muß die betreffende Rohrleitung durch Molchen gereinigt werden. Um diese erhöhten Kosten zu vermeiden, sind daher die Rohre sorgfältig zu lagern, vor Einbau zu reinigen und vor Eindringen von schmutzigem Wasser aus dem Rohrgraben zu schützen.

Zur Entkeimung der Rohrleitungen kommen verschiedene Desinfektionsmittel zur Anwendung, wobei die Wahl nach den örtlichen Gegebenheiten zu treffen ist. Im allgemeinen werden zur Desinfektion Chlorpräparate auf der Basis von Hypochlorit verwendet. Dabei hat sich das Standzeitverfahren besonders gut bewährt, da dieses Verfahren durch eine unterschiedliche Chlorkonzentration und Einwirkungsdauer variiert und somit an die vorliegenden Verhältnisse angepaßt werden kann. Ein Eindringen der Desinfektionslösung in angrenzende Rohrleitungsabschnitte und Abnehmeranlagen muß mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Nach abgeschlossener Entkeimung ist bei der Entleerung darauf zu achten, daß keine unzulässigen und somit umweltbelastenden Konzentrationen von Desinfektionsmitteln entstehen.

3.4.7 Vorbereitung der Vergabe

In der Leistungsphase der Vorbereitung der Vergabe werden die erforderlichen Ausschreibungsunterlagen in Form von Leistungsverzeichnissen für den gesamten Leistungsumfang erstellt. Diese werden je nach Umfang meist in Teillote nach Gewerken, wie Tiefbau und Verlegung unterteilt. Es besteht aber auch die Möglichkeit, über eine sogenannte funktionale Ausschreibung einen Generalunternehmer (GU) für die Erbringung des gesamten Leistungsumfanges auszuscribeiben.

Weiterhin ist bei der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen entscheidend, welches Ausschreibungsverfahren gewählt werden soll. Hierbei wird unterschieden in öffentliche Ausschreibungen, Ausschreibungen über Prequalifikation sowie beschränkte Ausschreibungen.

In den Leistungsverzeichnissen sind die Lieferungen und Leistungen eindeutig zu beschreiben. Die Leistungen sind so aufzugliedern, daß unter einer Position nur solche Leistungen aufgenommen werden, die nach ihrer technischen Beschaffenheit und für die Preisbildung als in sich gleichartig anzusehen sind. Ziel ist es, daß alle Bewerber die Beschreibung im gleichen Sinn verstehen und ihre Preise sicher

und ohne umfangreiche Vorarbeiten berechnen können. Hält der Anbieter die der Ausschreibung beigefügten Unterlagen für die Kalkulation für nicht ausreichend, so hat er dies innerhalb der Angebotsfrist ausdrücklich mitzuteilen.

Die Aufforderung zur Abgabe eines kostenlosen Angebotes ist ohne Verbindlichkeiten für den Auftraggeber. Die Gliederungen von Ausschreibungen sind verschieden. Der Einheitlichkeit halber werden in den meisten Fällen die Ausschreibungsunterlagen unterteilt in:

- Teil A Allgemeine Bedingungen, Informationen und Vertragsbedingungen für den Anbieter,
- Teil B Leistungsbeschreibung,
- Teil C Leistungsverzeichnis, Preisblätter,
- Teil D zusätzliche technische Vorschriften und Regelwerke sowie eigene Standards vom Auftraggeber.

Angebotsgrundlagen sind die in der Ausschreibung zugrunde gelegten Vertragsbedingungen und Informationen (Teil A) sowie alle auf den Liefergegenstand und dessen Betrieb zutreffenden deutschen Gesetze und Verordnungen, Normen und Richtlinien. Insbesondere sind mit dem Angebot einzureichen (soweit für die Teile zutreffend):

- Die vollständig ausgefüllten und unterschriebenen Ausschreibungsunterlagen, Einheitspreisblätter, die Aufstellung der Baukosten, einschließlich der zusätzlich gewünschten Angaben und Unterlagen.
- Beschreibung der einzelnen angebotenen Anlagenteile, einschließlich Funktionsbeschreibungen und Schemata.
- Eine spezielle Referenzliste über ausgeführte Anlagen der vorliegenden Eigenart und Größenordnung mit Angaben von Typ, Leistung, Auslegungsdaten, Betriebsbedingungen, Aufstellungsort und Datum der Inbetriebsetzung.
- Stellungnahme zum Terminablaufplan mit Personaleinsatzangaben über die Verlegung und Montage.
- Liste der vorgesehenen Subunternehmer für Lieferungen und Leistungen.
- Haftpflichtversicherung mit Angabe der Deckungssumme für Sach- und Personenschäden sowie Montageversicherung mit Angabe der Deckungssumme.

Das Leistungsverzeichnis muß sämtliche auszuführende Arbeiten enthalten und richtet sich nach den Ergebnissen der Ausführungsplanung.

3.4.8

Mitwirkung bei der Vergabe

Bei der Vergabe werden alle eingereichten Angebote geprüft und eine Bewertung unterzogen. Dazu gehört auch der Preisleistungsspiegel. Im Anschluß erfolgen in Abhängigkeit des Ausschreibungsverfahrens die Verhandlungen mit den Bietern, mit dem Ziel der vollständigen Klärung aller technischen und kommerziellen Belange. Gleichzeitig erfolgt die Festlegung nach der Abrechnung, entweder zum Festpreis oder per Einheitspreise nach erfolgtem Aufmaß. Den Abschluß dieser Leistungsphase bildet die Auftragsvergabe.

3.4.9

Bauüberwachung

Den wichtigsten Teil der Leistungsphasen bildet die Bauüberwachung. Hier erfolgt das Überwachen der Ausführung des Neubaus auf Übereinstimmung mit der Baugenehmigung, den Ausführungsplänen und den Leistungsbeschreibungen sowie mit den anerkannten Regeln der Technik und den einschlägigen Vorschriften. Wichtige Bestandteile der Bauüberwachung sind die

- Prüfung der qualitätsgerechten Lieferungen nach Materialliste,
- Überwachung des Bauablaufes,
- Mitwirkung beim Aufmaß mit den ausführenden Unternehmen in Abhängigkeit des vereinbarten Auftrages,
- fachtechnische Abnahme der Leistungen,
- Feststellen des Fördervermögens,
- Durchführung der Dichtheits- und Druckprüfungen,
- Kontrolle der Vermessung,
- Feststellung der Mängel,
- Überwachung der Beseitigung der bei der Abnahme festgestellten Mängel,
- Überwachung des Terminablaufplanes,
- Mitwirkung bei der Kostenkontrolle,
- Rechnungsprüfung,
- Übergabe des Objektes sowie
- Übergabe der Prüfprotokolle und Bedienungsanleitungen.

3.4.10

Objektbetreuung und Dokumentation

Die letzte Leistungsphase enthält die Objektbetreuung und Dokumentation. Dazu gehören die Mitwirkung bei der systematischen Zusammenstellung der Dokumentation über das gesamte Bauverfahren sowie die Objektbegehung zur Mängelfeststellung vor Ablauf der Verjährungsfristen der Gewährleistungsansprüche gegenüber den ausführenden Unternehmen.

Diese Leistungsphase ist mit Übersendung der Dokumentation und der Inbetriebnahme der Anlage im wesentlichen beendet. Liegen schwerwiegende betriebliche Mängel vor, kann die Übernahme durch den Auftraggeber bis zur Behebung dieser Mängel zurückgestellt werden.

3.5

Betrieb und Instandhaltung

Hinsichtlich des Betriebes und der Instandhaltung eines Wassersystems sollen in diesem Abschnitt nur die Themen näher beschrieben werden, die unmittelbar die Versorgungszuverlässigkeit beeinflussen. Dazu zählen die

- Schadensmeldung und deren Behebung,
- Wasserverluste,
- Instandhaltung von Rohrleitungen.

Schäden am Rohrnetz sind sofort zu erkennen, wenn größere Wassermengen sichtbar an der Oberfläche austreten. Diese können aber auch, je nach Schadensart und Schadensursache, über einen längeren Zeitraum unentdeckt bleiben und erst nach entsprechender Ausweitung durch äußere Wahrnehmungen festgestellt werden. Es kommt aber auch zu Schäden an Bauteilen des Rohrnetzes, die nicht unmittelbar zu einem Wasseraustritt führen, aber eine Funktionsstörung oder gar Gebrauchsuntauglichkeit zur Folge haben können. Dazu zählt z. B. eine verbogene Armaturenspindel oder eine defekte Armaturenabdeckung. Solche Schadensfälle werden in der Regel durch eine Inspektion oder im Rahmen einer Wartung entdeckt. In vielen Fällen erfolgt die anschließende Instandsetzung der Schäden. Entscheidend ist die Zeit der Ortung des Schadens, um rechtzeitig reagieren zu können. Dabei ist zu unterteilen in Schäden, die eine sofortige Außerbetriebnahme erfordern und in die, die einen Weiterbetrieb des Wassernetzes ohne Einschränkungen bis zu einem geplanten Stillstand gestatten.

In den meisten Fällen werden die auftretenden Schäden unterschieden in Rohrbrüche, undichte Rohrverbindungen, Korrosions- und Armaturenschäden. Rohrbrüche entstehen, wenn das Arbeitsvermögen des Rohrwerkstoffes überschritten bzw. durch außergewöhnliche Einwirkungen vermindert wird. Kleine Rohrleitungen aus sprödem Werkstoff neigen häufig zu Rundbrüchen und können in der Regel mit mehrteiligen Dichtungs- oder Bandschellen repariert werden. Größere Rohrleitungen aus sprödem Werkstoff tendieren dagegen zu Längsrissen oder Schalenbrüchen. Dies kommt daher zustande, da das Verhältnis Durchmesser/Wanddicke für die Festigkeit quer zur Rohrachse wesentlich ungünstiger als bei kleinen Durchmessern ist. Diese Schäden lassen sich langfristig nur durch Auswechseln der betroffenen Rohrleitung beheben.

Undichte Rohrverbindungen werden verursacht durch Montage- bzw. Verlegefehler oder durch äußere Einflüsse und können in der Regel in ihrer ursprünglichen Art erneuert oder abgedichtet werden. Dies kann erfolgen z. B. durch Nachstemmen, Demontage bzw. Anbringen von Dichtungsklemmen, Muffenkappen oder Austausch von Dichtungs- und Halteelementen.

Korrosionsschäden sind auf chemische oder elektrochemische Vorgänge, die den metallischen Rohrwerkstoff sowohl innen als auch außen angreifen, zurückzuführen. Hierbei spielt die Ausführung des Korrosionsschutzes sowie dessen Beständigkeit gegen das umgebende Erdreich eine bedeutende Rolle. Dies gilt auch für die Wasserqualität. Bei Rohren aus Stahl und duktilem Gußeisen können in kleinem Umfang auftretende Korrosionsschäden durch Auftrags- oder Überlappungsschweißen behoben werden. Anschließend ist der Rohrschutz entsprechend wieder herzustellen. Dagegen ist bei großflächigen Korrosionsschäden eine Erneuerung der Rohrleitung zweckmäßig. Vereinzelt auftretende Lochbildungen, insbesondere bei Rohren aus Grauguß, können mit Dichtungsschellen repariert werden, soweit Erscheinungen der Spongiose – Korrosionsvorgang von Grauguß, wobei das metallische Eisen herausgelöst wird – ausgeschlossen sind. Ansonsten muß die Behebung des Schadens durch Erneuerung der Rohrleitung erfolgen.

Schäden an Armaturen können vielfältigster Art sein. Dazu zählen Bruchschäden, Deformationen, Materialschäden an Gehäusen, Schäden an Schließelementen, Dichtungs- und Befestigungsteilen. Ihre Funktion wird aber auch durch Inkrustation und Korrosion beeinträchtigt. Auch spielt dabei das Alter der Armatur eine wesentliche Rolle. Beispielsweise schließen erfahrungsgemäß ältere Schieber mit metallischen Dichtflächen und Schiebersack nicht dicht, weil Ablagerungen den Schiebersack füllen. Ebenso kann ein nicht ausreichender Schutz gegen Korrosion und Ablagerungen innerhalb des Gehäuses bei Schiebern mit elastisch dichtendem Keil zu Problemen beim Schließen führen. Durch die Vielzahl der verschiedenen Armaturenbauarten und deren Ausführungen lassen sich nicht alle Instandsetzungsarbeiten einzeln aufzählen. Sie ergeben sich aus der jeweiligen Situation und den vorhandenen Ersatzteilen, wobei auch die Hinweise der Hersteller zu beachten sind. Weitere Ausführungen zu Schäden sind ab Kap. 4 zu finden.

Grundsätzlich sind auftretende Schäden mit Wasserverlusten verbunden. Dabei handelt es sich bei *Wasserverlusten* um den Anteil der in das Rohrnetz eingespeisten Wassermenge, dessen Verbleib im einzelnen volumenmäßig nicht erfaßt werden kann. Dieser läßt sich unterteilen, zum einen in die tatsächlichen Verluste, welche z. B. verursacht werden durch Rohrbrüche oder Undichtigkeiten, zum anderen in die scheinbaren Verluste, welche beispielsweise Fehlanzeigen der Meßgeräte und unkontrollierte Entnahmen umfassen. Zu den tatsächlichen Wasserverlusten gehören aber auch verursachte Bedienungsfehler. Insgesamt lassen sich tatsächliche Wasserverluste weitgehend durch vorbeugende Maßnahmen vermeiden. Hilfreich ist dabei die Führung einer Ereignisstatistik, um somit Schwachstellen im Netz ausfindig machen und entsprechend beheben zu können. Scheinbare Wasserverluste können neben den Fehlanzeigen der Meßgeräte ebenso durch Fehler bei der zeitlichen und räumlichen Zuordnung der Verbrauchsmengen zu den eingespeisten Wassermengen auftreten. Eine Reduzierung dieser Wasserverluste ist möglich, wenn die an Verbraucher abgegebene Wassermenge möglichst vollständig erfaßt wird. Dazu trägt im wesentlichen die Überwachung und Auswechselung der Wasserzähler bei. Bei den oben erwähnten unkontrollierten Entnahmen handelt es sich um Wasserentnahmen für den Eigenbedarf, für Rohrnetzspülungen oder für Brandbekämpfungen.

Die Wasserverluste können zum Teil erheblich sein. In der Literatur sind dazu verschiedene Angaben zu finden. In (Wehr 1993) werden bezugnehmend auf die BGW-Statistik für 1991 Größenordnungen der Trinkwasserverluste in Deutschland von nahezu 1000 Mio. m³ genannt.

Da der Verursacher für die Wasserverluste das Rohrnetz ist, erscheint es als sinnvoll, den festgestellten Wasserverlust auf das Rohrnetz zu beziehen. Der spezifische Wasserverlust ist u. a. von folgenden Einflußfaktoren abhängig

- Bodenart,
- Anschlußdichte,
- Versorgungsdruck,
- mittlerer Rohrdurchmesser des Verteilungsnetzes,
- Rohrwerkstoff und die damit verbundene Art der Rohrverbindungen,
- Ausführung des Korrosionsschutzes sowie
- Armaturenanzahl und deren Dichte.

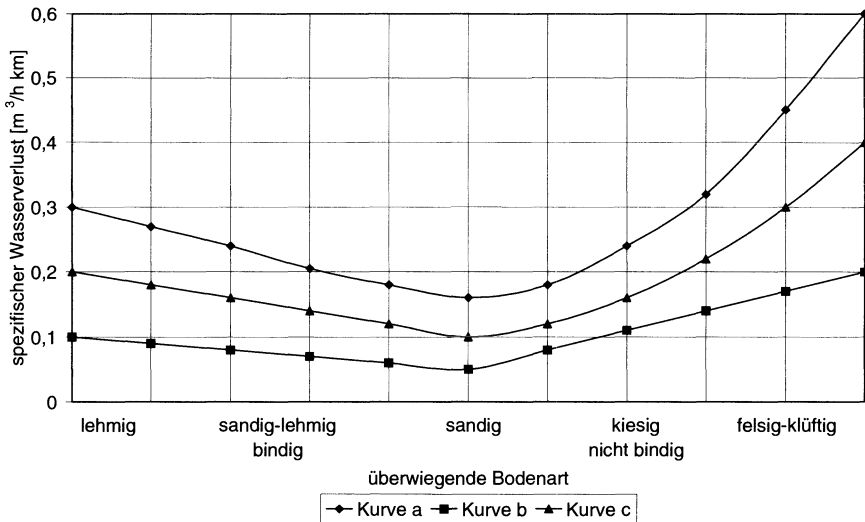


Abb. 3.5-1 Kennwerte der spezifischen Wasserverluste in Abhängigkeit von der Bodenart nach DVGW-Merkblatt W 391

a Grenzkurve q_{v1} , **b** Sollkurve q_{v2} , **c** Grenzkurve q_{v3}

In Abb. 3.5-1 sind die spezifischen Wasserverluste in einem sogenannten Bodenart-Diagramm nach dem DVGW-Merkblatt W391²² – Wasserverluste in Wasserverteilungsanlagen; Feststellung und Beurteilung – dargestellt. Die darin enthaltenen drei verschiedenen Kurven geben die Grenzkurve q_{v1} und die Sollkurve q_{v2} , die laut W 391 nicht überschritten werden sollen, sowie die empfohlene Grenzkurve q_{v3} wider. Dabei ist anzumerken, daß eine Herabsetzung der Grenzwerte von q_{v1} auf q_{v3} für die überwiegende Anzahl der gewarteten Rohrnetze mit der heutigen Verfahrenstechnik kein Problem mehr darstellt. Neben dieser Beurteilung der spezifischen Wasserverluste und seiner Ermittlung werden in W 391 auch die Ursachen der Wasserverluste, die Verlustermittlung sowie deren Einflußfaktoren behandelt. In dem DVGW-Arbeitsblatt W 390²³ – Überwachen von Trinkwasserrohrnetzen – werden dagegen die wesentlichen Inhaltspunkte diskutiert, wie

- die Ziele und Anlässe der Überwachungsmaßnahmen,
- die Dichtheitsprüfung durch Nachtmindestverbrauchsmessung, Nullverbrauchsmessung bzw. Orten der Schadenstelle,
- die Überwachungszeiträume sowie
- der Nachweis der Überwachungsmaßnahmen.

²² Dieses Merkblatt befindet sich derzeit in Überarbeitung und wird das Arbeitsblatt W 392 – Überwachung von Trinkwasserrohrnetzen mit der Feststellung und Beurteilung von Wasserverlusten.

²³ Dieses Arbeitsblatt befindet sich derzeit in Überarbeitung und wird das Arbeitsblatt W 392.

Weiterhin gehören noch der DVGW-Hinweis W 393 – Verfahren zur Leckortung an Trinkwasserleitungen – sowie das erst kürzlich erschienene DVGW-Merkblatt W 395 – Schadensstatistik für Wasserrohrnetze – dazu. Auf beide wird später eingegangen.

Am Anfang einer sinnvollen Wasserverlustbekämpfung steht für das Wasserversorgungsunternehmen die quantitative Ermittlung der Wasserverluste. Dabei kommen die folgenden Verfahren zur Anwendung:

1. Ableitung aus einer Wassermengenbilanz (z. B. Jahresmengenbilanz),
2. Ableitung aus Tageseinspeisungen (in der Regel Sonntagsangaben),
3. Ermittlung aus Stundeneinspeisungen (in der Regel Nachtmindestverbrauchs-messung) sowie
4. Messung des Nullverbrauchs.

Nach (Wehr 1993) stellt in Hinblick auf die Erfassung der tatsächlichen Wasserverluste die genannte Reihenfolge auch eine Reihenfolge der erreichbaren Genauigkeit dar. Aus einer Jahresmengenbilanz lassen sich die tatsächlichen Wasserverluste nur grob und zudem erst nachträglich ableiten, während aus der Nullverbrauchsmessung diese direkt und momentan ablesbar sind.

Um die tatsächlichen und rohrnetzbedingten Wasserverluste in einem Versorgungsgebiet zu ermitteln, bietet sich praktisch nur die Dichtheitsprüfung in Form der Nachtmindest- bzw. der Nullverbrauchsmessung an. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Messung des zu überprüfenden Versorgungsgebietes von der Größe her möglichst über eine Leitung, entweder stationär oder durch das Einbringen einer mobilen Durchflußmeßeinrichtung, erfolgen kann. Dazu muß weiterhin der nächtliche Minimalverbrauch des Versorgungsgebietes von der Größenordnung her bekannt sein. Als Richtwerte für den nächtlichen Minimalverbrauch liefert das DVGW-Merkblatt W 390 – Überwachen von Trinkwasserrohrnetzen – die Spanne von 0,5–2,0 m³/h je 1000 Einwohner. In (Wehr 1993) wird diese Spanne auf der Grundlage von durchgeführten Wasserverlustanalysen reduziert auf 0,4–0,8 m³/h (bei Einwohnerzahlen von etwa 2000 bis etwa 40000 und Ausklammerung größerer industriellen Nachtverbrauchs).

Liegen dagegen die meßtechnischen Voraussetzungen und ein gesicherter Vergleichswert für das verlustfreie Rohrnetz nicht vor, kommt die mobile Momentanzuflußmessung zur Anwendung. Hierbei wird der Wasserzufluß des zu prüfenden Versorgungsgebietes kurzzeitig ausschließlich über ein Meßfahrzeug geleitet, um anhand des gemessenen Verlaufs von Volumenstrom bzw. Durchfluß und Netzdruck eine gesicherte Aussage über den Wasserverlust zu erhalten. Die günstigste Zeit für diese sogenannte Nullverbrauchsmessung liegt erfahrungsgemäß in den Nachtstunden zwischen 1.00 Uhr und 3.00 Uhr. Der Nullverbrauch setzt sich dabei zusammen aus

- dem Schleichverlust (Menge unterhalb der Zähleranlaufgrenze),
- den nicht ortbaren Kleinstleckstellen an Stopfbuchsen von Armaturen, Rohrverbindungen und Korrosionsstellen,
- dem Schleichverbrauch (Menge oberhalb der Zähleranlaufgrenze) sowie
- den größeren Leckverlusten.

Der Schleichverlust zählt zu den scheinbaren Wasserverlusten und geht somit zu Lasten des Wasserversorgungsunternehmens. Er wird mit etwa 2 l/min angegeben. Bei den nicht ortbaren Kleinstleckstellen handelt es sich um Leckstellen mit einem sehr kleinen Geräuschpegel, die nur durch Sichtkontrolle erkannt werden können. Dazu gehören auch Tropfverluste. Diese werden mit etwa 1 l/min angegeben. Der Schleichverbrauch setzt sich aus Tropfverlusten an Zapfstellen zusammen und stellt einen unbeabsichtigenden Wasserverlust beim Verbraucher dar. Er kann etwa 1–7 l/min betragen. Sämtliche Verlustangaben beziehen sich auf eine Rohrleitungslänge in km.

Läßt sich anhand der Meßergebnisse erkennen, daß größere Wasserverluste im zu prüfenden Rohrnetz vorliegen, so können diese durch schrittweises Ausgrenzen von Rohrabschnitten oder einzelnen Leitungen örtlich näher bestimmt werden.

Erfahrungen hinsichtlich der Wasserverlustanalysen haben gezeigt, daß es sinnvoll ist, bei Rohrnetzen mit einer hohen Schadensdynamik eine Dauermeßstelle für Nachtmindestverbrauchsmeasureungen einzurichten. Der Ist-Wert gestattet mit einem zuvor festgelegten Referenzwert den jeweiligen Soll-Ist-Vergleich und damit zuverlässige Aussagen über auftretende momentane Wasserverluste. Liegt kein Referenzwert vor, kann aber die Tendenz ausgewertet werden. In Rohrnetzen mit geringer Schadensdynamik reicht es dagegen aus, beispielsweise im Abstand von 4 Jahren oder kürzer, eine Wasserverlustanalyse durchzuführen.

Prinzipiell wird bei der Zuflußmessung das Ausmaß vorhandener Wasserverluste deutlich erkennbar. Dadurch können Schwerpunkte bei der Ortung des Schadens gesetzt werden. Daraus schlußfolgernd ergibt sich der Verfahrensablauf einer erfolgsorientierten Lecksuche (Irle u. Wehr 1990), welche als ersten Schritt die Eingrenzung des Schadens mit Hilfe der Dichtheitsprüfung und als zweiten Schritt die Lokalisierung des Schadens umfaßt.

Die für den zweiten Schritt benötigten Leckortungsverfahren beruhen auf der akustischen Wahrnehmung, Erfassung und Auswertung von Leckgeräuschen. Leckgeräusche werden durch den Austritt von unter Druck stehendem Wasser verursacht. Sie breiten sich als Körper- und Wasserschallwellen aus. Entsprechende Ausführungen werden im DVGW-Hinweis W 393 – Verfahren zur Leckortung an Trinkwasserleitungen – gegeben. Hinsichtlich der Verfahren können

- die akustische und elektroakustische Leckortung,
- die Ortung mit Hilfe von Spürgasen (Tracergas-Technik),
- die Ortung durch Differenzdruckmessung sowie
- die Leckortung mit dem Korrelationsmeßverfahren

zum Einsatz kommen. Die bisher in den überwiegenden Fällen angewendete Ortungsmethode in Rohrnetzen ist die des direkten und indirekten Abhorchens mit akustischen und elektroakustischen Geräten. Zur Aufnahme des Körperschalls und dessen Umwandlung in hörbaren Luftschall werden Horchdosen und Membrangeophone und, für die Umwandlung in elektrische Impulse, Körperschallmikrophone eingesetzt. Die Ortung des Schadens wird in der Weise durchgeführt, daß zuerst an den zugänglichen Netzteilen, wie beispielsweise Armaturen, durch direkten Kontakt eine Vorortung vorgenommen wird. Dabei handelt es sich um das direkte Abhören. Im Anschluß daran erfolgt die Lokalisierung mit dem Geo-

phon bzw. Bodenmikrophon durch Abhören direkt über der Rohrleitung (indirektes Abhören). Die Lage der Rohrleitung selbst sollte so genau wie möglich bekannt sein, da die Intensität des Leckgeräusches an der kürzesten Entfernung zur Schadenstelle am größten ist.

Geräusche im Stadtbereich und an verkehrsreichen Straßen wirken sich besonders nachteilig bei dieser Ortungsmethode aus, so daß die Messung nur nachts durchgeführt werden kann. Des weiteren ist das Abhören von Zufälligkeiten, wie Rohrwerkstoff, der Schadensart, dem vorhandenen Betriebsdruck, der Bodenart und der Oberflächenbefestigung abhängig. Weitere Störeinflüsse, die sogar ein Abhören unmöglich machen können, sind z. B. in der Nähe verlaufende Stromkabel, Pumpenbetrieb sowie andere geräuscherzeugende Aggregate beim Verbraucher.

Bei der Ortung mit Hilfe von Spürgasen wird das Spürgas in die zu untersuchende Rohrleitung zugemischt, wobei der Nachweis durch eine Tiefenbohrung über der Leitung erfolgt. Äußere Bedingungen, wie Wind, Temperatur und Niederschläge beeinflussen den Erfolg der Ortung. Aus diesen Gründen ist der Einsatz von Spürgasen auf besonders schwierige Leckstellen beschränkt, da die Leitung vorher außer Betrieb genommen werden muß, was letztendlich bei vermaschten Rohrnetzen sehr aufwendig ist.

Bei der Ortung mittels Differenzdruckmessung müssen zur Aufnahme einer Drucklinie, über die der Leckort bestimmt wird, direkte Ankoppelstellen zur untersuchenden Rohrleitung vorhanden sein. Dazu dienen in erster Linie Entleerungen oder Hydranten. Ein anderes Verfahren, das mit einem sogenannten Lecksuchmolch nach dem Differenzdruckverfahren arbeitet, kann ebenfalls nur für einzelne Rohrleitungsabschnitte größerer Nenn Durchmesser angewendet werden. Dabei wird die unter statischem Druck stehende Leitung an einer Stelle so abgedichtet, daß zwei voneinander unabhängige Leitungsabschnitte entstehen. Während im Leitungsabschnitt mit dem Leck ein Druckabfall eintreten wird, bleibt in dem anderen Abschnitt der Druck konstant.

Die Leckortung mit dem Korrelationsmeßverfahren basiert auf der Grundlage der durch das Leck gebildeten Schallquelle. Es handelt sich somit um eine Laufzeitdifferenzmessung der vom Leckgeräusch ausgehenden Schallwellen. Anders als bei der akustischen Leckortung wird hier nicht die Intensität des Leckgeräusches als Indikator verwendet, sondern der Laufzeitunterschied von Schallwellen an 2 Meßstellen zu beiden Seiten eines Lecks. Ziel dieser Ortungsmethode ist es, aus der vom Korrelator berechneten Zeitverzögerung, der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen und der Länge der Meßstrecke möglichst genau den Leckort zu bestimmen.

Die Leckortung kann auf dem Prinzip des Körper- oder Wasserschalls erfolgen, da sich das Leckgeräusch entlang der Rohrleitung und im Wasser ausbreitet. Die Schallaufnahme selbst wird bei Körperschall über piezoelektrische Druckwandler an zugänglichen Netzteilen und bei Wasserschall über Hydrophone, die im Wasser untergebracht werden, realisiert. Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit richtet sich im wesentlichen nach Werkstoff, Durchmesser und Wanddicke der Rohre sowie dem umgebenden Erdreich. Bei schalleitenden Werkstoffen, wie beispielsweise Kunststoff, ist nur unter Einsatz von Wasserschallaufnehmern eine Leckor-

tung möglich. Grundsätzlich kann zu dieser Ortungsmethode angemerkt werden, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit um so kleiner wird, je geringer der Elastizitätsmodul des Rohrwerkstoffes und je kleiner das Verhältnis von Wandstärke zum Innenradius wird.

Aus diesen Gründen heraus, ist der Messung eine besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Entsprechende Hinweise sind u. a. in (Weimer 1993) enthalten.

Somit lassen beide Methoden – Dichtheitsprüfung und Lokalisierung des Lecks – in kombinierter Anwendung eine bis etwa 90 % quantitative und punktgenaue Erfassung der momentanen Wasserverluste zu.

Abschließend ist auf eine andere Verfahrensweise der Wasserverlustbekämpfung hinzuweisen, die sich aus dem Zustand der im Rohrnetz befindlichen Armaturen ergeben kann (Wehr 1993): Wenn sich nicht mindestens jede zweite Streckenarmatur schließen läßt, muß die Verlustreduzierung mit der Sanierung des Armaturenbestands beginnen.

Schäden am Rohrnetz sind sofort zu erkennen, wenn größere Wassermengen sichtbar an der Oberfläche austreten. Diese können aber auch, je nach Schadensart und Schadensursache, über einen längeren Zeitraum unentdeckt bleiben und erst nach entsprechender Ausweitung durch äußere Wahrnehmungen festgestellt werden. Es kommt aber auch zu Schäden an Bauteilen des Rohrnetzes, die nicht unmittelbar zu einem Wasseraustritt führen, aber eine Funktionsstörung oder gar Gebrauchsuntauglichkeit zur Folge haben können. Dazu zählt z. B. eine verbogene Armaturenspindel oder eine defekte Armaturenabdeckung. Solche Schadensfälle werden in der Regel durch eine Inspektion oder im Rahmen einer Wartung entdeckt. In vielen Fällen erfolgt die anschließende Instandsetzung der Schäden.

Der Begriff *Instandhaltung* umfaßt in Anlehnung an DIN 31051 in erster Linie

- die Wartung: vorbeugende Arbeiten zum Erhalt der Funktionstüchtigkeit,
- die Instandsetzung: Arbeiten zur Wiederherstellung nicht mehr tolerierbarer Istzustände sowie
- die Inspektion: Kontrolle des vorliegenden Zustandes.

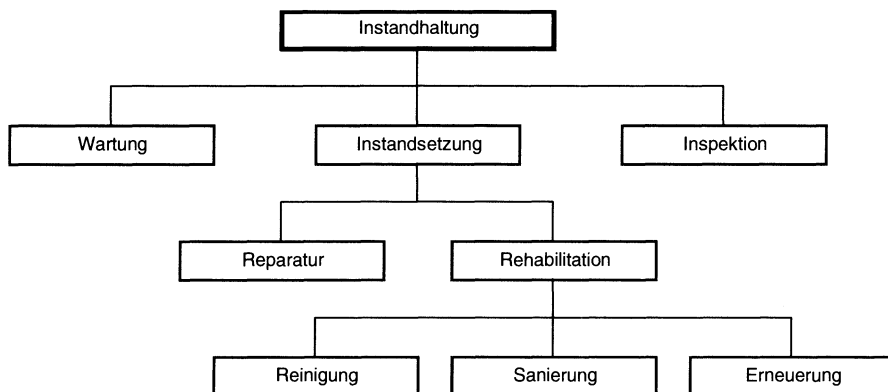


Abb. 3.5-2 Systematik der Instandhaltung nach DVGW-Hinweis W 401

Die Systematik der Instandhaltung ist im DVGW-Hinweis W 401 – Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserrohrnetzen – enthalten (Abb. 3.5-2).

Im allgemeinen bedürfen erdverlegte Wasserleitungen keiner besonderen Wartung, soweit keine Einflußmöglichkeiten insbesondere von außen gegeben sind. Vorhandene Schächte sind regelmäßig, wenigstens einmal jährlich zu kontrollieren. Hierbei spielen die Abdichtungen des Schachtes sowie alle Durchführungen eine wesentliche Rolle. Gleiches gilt für Armaturen, bei denen sowohl die Spindeldurchführungen als auch die Gängigkeit ein- bis zweimal jährlich zu überprüfen sind. Damit die Spindelenden der Armaturen unter einer Straßenkappe nicht im Oberflächenwasser stehen, ist für das Versickern des Wassers zu sorgen. Dabei stellt die Überprüfung auf Gängigkeit während des Netzbetriebes ein nicht einfaches Problem dar, da dafür die Versorgung aller dahinter befindlichen Verbraucher kurzzeitig unterbrochen werden muß. Aussagen zum Zustand und zur Dichtigkeit der Armatur anhand der Gängigkeit können in diesem Fall nicht gemacht werden.

Konkrete Empfehlungen für Wartungs- und Inspektionsintervalle für Wasserleitungen und deren Zubehörteile zu geben, ist aufgrund der jeweils vorliegenden Komplexität sehr schwierig. Grundlage bilden die Bedienungs- und Wartungsvorschriften der eingesetzten Bauteile und Anlagen. Darüber hinaus werden Empfehlungen von entsprechenden Verbänden, wie beispielsweise des DVGW gegeben.

Bei der Instandsetzung gibt es Schadensfälle, die sofort behoben werden müssen (lokale Reparaturen) und Schadensfälle, die umfassend angegangen werden sollten, Fälle für die Rehabilitation. Dabei wird unter Rehabilitation das Zurücksetzen eines Rohrleitungsabschnittes in den ursprünglichen Zustand verstanden. Regelmäßige Maßnahmen zur Rehabilitation, d. h. zur Sanierung oder Erneuerung von Rohrleitungsabschnitten, sichern langfristig die Versorgungszuverlässigkeit des Rohrnetzes, sind aber mit entsprechenden Kosten verbunden. Eine Vernachlässigung der notwendigen Maßnahmen führt jedoch zur Steigerung der Wasserverluste und Reparaturkosten. Beides beeinträchtigt die Wirtschaftlichkeit eines Wasserversorgungsunternehmens und muß optimiert werden.

Die Rehabilitation umfaßt Reinigung, Sanierung und Erneuerung von Rohrleitungsabschnitten. Einen Teil der Wartung des Rohrnetzes bildet die *Reinigung*. Hierbei wird nicht nur wieder ein einwandfreier Durchfluß gewährleistet, sondern in diesem Bereich werden auch die allgemeinen Zustände der Rohre und Armaturen überprüft. Reinigungen können sowohl aggressiv (mechanisch oder hydraulisch) oder nicht aggressiv (Spülen oder Molchen) durchgeführt werden. Sanierungsverfahren setzen immer eine solche Reinigung voraus. Im Rohrnetz bringt die ausschließliche Reinigung meist keinen bleibenden Erfolg.

Unter *Sanierung* werden die geplanten, teilweise systematisch durchzuführenden Arbeiten mit dem Ziel verstanden, alte Rohrleitungen zu erhalten, die in ihren hydraulischen Eigenschaften und ihrer technischen Bewertung neuen Rohrleitungen gleicher Abmessung nahekommen. Es ist die Ertüchtigung einer vorhandenen Rohrleitung mit einer nicht selbsttragenden Auskleidung. Die einzelnen Sanierungsmöglichkeiten sind in Abb. 3.5-3a dargestellt. Aufgrund der positiven Eigenschaften und unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Gesichtspunkten hat

sich bei grundlegenden Sanierungen von Wasserrohrleitungen die Zementmörtel- auskleidung mit großem Abstand vor anderen Verfahren durchgesetzt. Die Sanierung von Rohrverbindungen kann sowohl von außen als auch bei begehbaren Leitungen von innen mit Hilfe von Manschetten realisiert werden. Bei Rohren aus Stahl erfolgt dies durch Schweißen.

Beim Roll-down-Verfahren handelt es sich um das Einziehen eines Rohres aus PE. Dabei wird das Rohr in die alte Rohrleitung eingezogen und anschließend durch Aufbringen von Druck in den ursprünglichen Durchmesser zurückverformt. Die Reduzierung des Durchmessers beträgt etwa 10 %. Beim Swage-Lining-Verfahren wird gegenüber dem Roll-down-Verfahren lediglich die Reduzierung des Durchmessers thermisch realisiert. Bei dem Schlauch- bzw. Folienrelining handelt es sich dagegen um nicht selbsttragende Verfahren.

Die *Erneuerung* ist der Ersatz einer vorhandenen Rohrleitung. Die einzelnen Möglichkeiten der Erneuerung sind in Abb. 3.5-3b dargestellt. Je nach Verfahren muß Trasse, Werkstoff oder Nenndurchmesser der neuen Rohrleitung nicht der vorhandenen Rohrleitung entsprechen. Über die offene Bauweise wird an dieser Stelle verzichtet, da diese in den vorangegangenen Abschnitten bereits beschrieben wurde. Beim Verlegen neuer Rohrleitungen in neue Trassen in der geschlossenen Bauweise muß unterschieden werden zwischen steuerbaren und nicht steuerbaren Systemen sowie zwischen Vortrieb eines Pilotgestänges vorab oder Vortrieb des Produkten- oder Schutzrohres direkt. Dabei muß angemerkt werden, daß gerade im städtischen Bereich eine Führung bzw. Steuerung beim Verlegen der Rohrleitung erforderlich ist. Die einzelnen Verfahren sind u. a. in (Beyer 1995; Behrens 1999) beschrieben.

Grundsätzlich gilt sowohl für die wirtschaftliche als auch die technische Nutzungsdauer, daß die tatsächlichen Jahreskosten bei abgeschriebenen Rohrleitungen aus dem jährlichen Aufwand für Betrieb und Instandhaltung, bei neuen Rohrleitungen aus der jährlichen Abschreibung, Verzinsung und den vergleichsweise niedrigen Kosten für Betrieb und Instandhaltung bestehen.

Dabei wird unter der betriebswirtschaftlichen Nutzungsdauer die Begrenzung der Nutzungsdauer im Sinne der kalkulatorischen Bewertung der Gesamtkosten einer neuen Rohrleitung mit denen der vorhandenen Rohrleitung verstanden. Dagegen kann die technische Nutzungsdauer einer Rohrleitung aus versorgungstechnischen und/oder wirtschaftlichen Gründen begrenzt sein. Sie liegt meist deutlich über der betriebswirtschaftlichen Nutzungsdauer.

Daraus schlußfolgernd ist die Aufgabe jeder Erneuerungsplanung zum einen die rechtzeitige Durchführung notwendiger, zum anderen aber auch, durch mögliche Sanierungsmaßnahmen, die Verhinderung nicht erforderlicher Auswechselung von Rohrleitungen.

In manchen Fällen reicht schon eine mechanische Reinigung der Rohrleitung aus. Aus diesem Grunde ist es notwendig, sich der zuvor beschriebenen Verfahren zu bedienen, um Fakten über den aktuellen Zustand der Rohrleitungen zu bekommen. Erst aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse kann die Entscheidung für Reinigung, Sanierung oder Erneuerung unter Berücksichtigung der Faktoren Betriebssicherheit, Versorgungszuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit individuell getroffen werden.

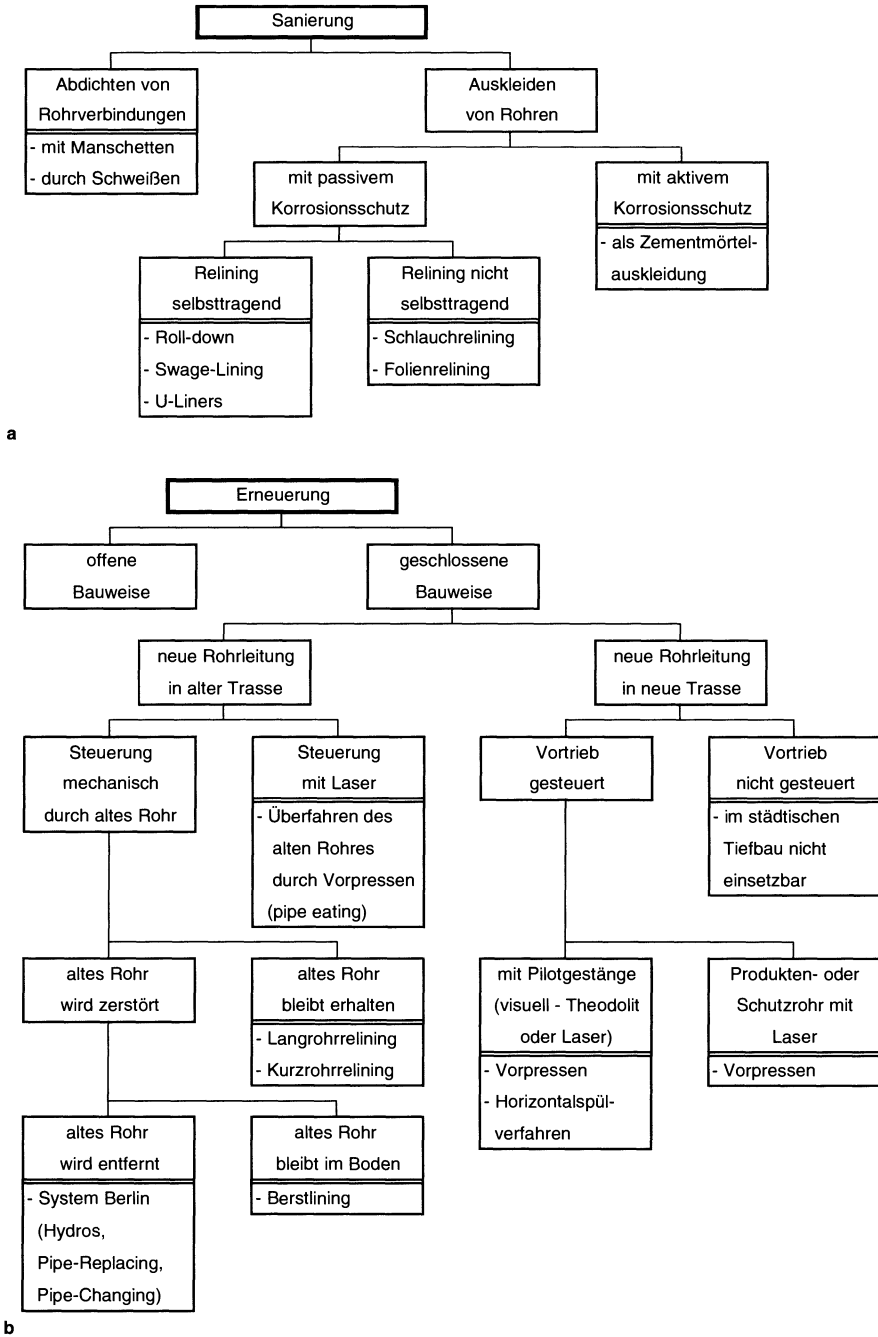


Abb. 3.5-3 Überblick zum Komplex Rehabilitation nach (Beyer 1995)
a Sanierung, **b** Erneuerung

Voraussetzungen für Planung und Durchführung von Rehabilitationsmaßnahmen sind ausreichende Kenntnisse im Detail nach Maß und Zahl des Rohrnetzes. Dazu gehört auch die Erfassung aller Schäden nach dem DVGW-Merkblatt W 395 – Schadensstatistik für Wasserrohrnetze. Auch ohne das Vorliegen von Schäden sollte der Netzzustand (innerer und äußerer Zustand der Rohre, Umhüllung, Korrosionserscheinungen, Dichtheit der Rohrverbindungen) schematisiert bei jeder sich ergebenden Aufgrabung festgehalten werden.

Prinzipiell sagen Wasserverluste in einem betrachteten Rohrnetz nur Summarisches aus. Werden diese Wasserverluste auf einzelne Abschnitte und Bauteile bezogen, ergeben sich hieraus relativierte Hinweise. Auch spielt die Wasserqualität bei der Bewertung des Rohrnetzes eine wesentliche Rolle. Etwa auftretende Trübungen sind häufig auf Inkrustationen und deren Ablösung bei Wechsel der Strömungsrichtung oder auf Störungen des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes zurückzuführen. Des weiteren können aber auch von außen einwirkende Einflüsse Rehabilitationsmaßnahmen hervorrufen, wie z. B. zu flach verlegte Rohrleitungen, ungesicherte Lage in Fremdgrundstücken oder durch rutschgefährdete Hänge.

Aus den Erkenntnissen muß ein generelles, langfristiges Konzept für den Erhalt des Rohrnetzes abgeleitet werden. Die Ziele einer strategischen Langzeitplanung von Rehabilitationsmaßnahmen für einen Zeitraum von 10–20 Jahren lassen sich somit wie folgt zusammenfassen:

- Festlegung der Versorgungsziele anhand konkreter Zielwerte (z. B. Reduzierung der Schadensrate, Wasserverluste, Verbraucherreklamationen, Verbesserung der Wasserqualität),
- Ableitung der für das Erreichen dieser Ziele erforderlichen Rehabilitationsmaßnahmen (Reinigung, Sanierung, Erneuerung),
- Auswahl am Netzzustand orientierter, geeigneter Verfahren für Sanierung und/oder Erneuerung,
- Ermittlung der Kosten und Prüfung der Wirtschaftlichkeit (z. B. Kostenreduzierung des bisher erforderlichen Instandhaltungsaufwandes im Vergleich zu Rehabilitationskosten unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer für die bestehenden und die erneuerten Anlagen) sowie
- Erstellung von Finanzplänen.

Daraus lassen sich die differenzierten Jahrespläne ableiten, die es entsprechend umzusetzen gilt. Eine Anleitung zum Vorgehen zu einem möglichst effizienten Einsatz der Mittel und zu einer zweckmäßigen Auswahl aus den Möglichkeiten und Verfahren gibt der DVGW-Hinweis W 401 – Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserrohrnetzen. Die darin enthaltenen Beispiele von Wasserversorgungsunternehmen zeigen die Voraussetzungen und Grenzen dieser Maßnahmen auf. Hier sei auch auf die Literatur verwiesen, wie u. a. (Hirner u. Poß 1992; Hofer 1994; Beyer 1995; Moser 1995; Böhme et al. 1996; Mayr 1996; Mutschmann et al. 1997; Behrens 1999).

4 Zuverlässigkeit von Versorgungssystemen

Die Entwicklung der Technik enthält einen großen Widerspruch: die ständige Vervollkommnung und Komplizierung der technischen Systeme, die im Interesse der Gesellschaft erfolgen, verkürzen die Dauer ihres störungsfreien Betriebes und kompromittieren sie auf diese Weise. Aus diesem Widerspruch heraus entwickelte sich die Konzeption – Zuverlässigkeit.

Die Zuverlässigkeit ist ein sehr alter Begriff und eine neue wissenschaftliche Disziplin. Bereits in der Antike wurden als zuverlässig jene Menschen bezeichnet, die ihr Wort hielten und auf die Verlaß war. Seitdem vergeht kaum ein Tag, an dem nicht eine Frage gestellt wird, die mit diesem Begriff zusammenhängt. Denn das Vertrauen zu einer technischen Anlage enthält stets eine gewisse Unsicherheit. Durch die Theorie der Zuverlässigkeit ist es möglich, diese Unsicherheit zu prognostizieren.

Ihrem Wesen nach ist die Zuverlässigkeit ein Zweig der modernen Mathematik, sie ist jedoch bereits seit ihrer Entstehung durch Anwendbarkeit gekennzeichnet. Dabei wurde früher der Begriff Zuverlässigkeit im klassischen Sinne definiert als die Wahrscheinlichkeit, daß ein System in einem vorher festgelegten Zeitraum nach vorgegebenen operativen Bedingungen präzise funktioniert. Diese Definition gilt nicht mehr als vollständig, sie verbindet jedoch grundlegend die Zuverlässigkeit mit der Wahrscheinlichkeit, die mit Hilfe von mathematischen Methoden einen zahlenmäßigen Ausdruck von technischen Problemen mit einem philosophischen Sinn geben kann. Ziel ist es, mit einer verhältnismäßig zufriedenstellenden Genauigkeit die Wahrscheinlichkeit einer Wiederholung der untersuchten technischen Betrachtungseinheit zu prognostizieren und sie durch Austausch oder Instandsetzung zu beseitigen.

Später wird die Zuverlässigkeit als Eigenschaft des Objektes, vorgegebene Handlungen in einem vorgesehenen Umfang unter bestimmten Betriebsbedingungen auszuführen, definiert. Sie ist durch Komplexität gekennzeichnet, weil sie in Abhängigkeit vom Verwendungszweck des Objektes und von seinen Betriebsbedingungen eine Reihe anderer damit in Verbindung stehender Eigenschaften einschließen kann, wie u. a. Störungsfreiheit, Lebensdauer, Reparatureignung, Sicherheit.

Ganz allgemein kann die Zuverlässigkeit als Zeitkomponente der Qualität charakterisiert werden. Diese Begriffe decken sich jedoch nicht völlig, denn die Qualität enthält noch zwei wichtige Komponenten: Sicherheit und Wirtschaftlichkeit. Die Sicherheit und die Zuverlässigkeit sind durch das unplanmäßige Ereignis miteinander verbunden. Während jedoch die Zuverlässigkeit das Eintreten eines unplanmäßigen Ereignisses nicht ausschließt, wird sie von der Sicherheit nur unter

der Bedingung zugelassen, daß alle Maßnahmen zum Schutz des Menschen und zum Umweltschutz getroffen sind. Die Wirtschaftlichkeit ist dagegen ein notwendiges Merkmal einer jeden technischen Ausrüstung und ist durch möglichst niedrige Herstellungs- und Betriebskosten gekennzeichnet. Die hohe Zuverlässigkeit bei der Projektierung der Ausrüstung führt normalerweise zur Wirtschaftlichkeit bei ihrem Betrieb.

Die mit der Erhöhung der Sicherheit und der Wirtschaftlichkeit in Verbindung stehenden Maßnahmen sichern nicht immer eine längere Lebensdauer der Ausrüstung. Die höhere Zuverlässigkeit bedeutet stets eine größere Sicherheit, bessere Qualität und größere Wirtschaftlichkeit im Betrieb. Aufgrund dieser Komplexität des Begriffes Zuverlässigkeit gilt er heute als eine Eigenschaft, die jedes technische System besitzen muß, während die Theorie der Zuverlässigkeit dazu beiträgt, sich schnell an die einzelnen Zweige der Technik anzupassen. Durch die Einführung dieser wissenschaftlichen Methoden auch in andere Zweige wird sie ständig weiterentwickelt und bereichert. Jeder dieser Bereiche ist durch eigene spezifische Besonderheiten, verschiedene Möglichkeiten zur mathematischen Modellierung und verschiedene Anforderungen an die Zuverlässigkeitsanalyse gekennzeichnet. Daher ist die Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie in einem bestimmten technischen Bereich ohne die vorherige Erarbeitung einer umfassenden wissenschaftlichen Anwendungskonzeption nicht möglich.

In diesem Rahmen geht es nicht um die Entwicklung neuer mathematischer Theorien, sondern vielmehr um die Anwendung bereits vorhandener mathematischer Modelle für die Praxis.

Die Verbindung zwischen der Zuverlässigkeit und der Mathematik wird vorwiegend durch den Begriff Störung bzw. allgemein definiert – unplanmäßiges Ereignis – hergestellt. Darauf beruhen alle Wahrscheinlichkeitsberechnungen, die die Zuverlässigkeit der technischen Ausrüstungen betreffen. Deshalb stellt die Änderung der Funktion des Ereignisstromes stets eine wichtige Kennziffer für die Untersuchungen dar.

Wird das Stör- und Ausfallgeschehen von verschiedenen Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen analysiert, so kann festgestellt werden, daß sich hauptsächlich nur Ausfälle geringeren Schadensausmaßes ereigneten. Totalausfälle der Systeme oder Ausfälle größeren Schadensausmaßes waren dagegen nur selten zu verzeichnen. Die Störanfälligkeit solcher Versorgungssysteme wird entscheidend beeinflusst durch die Netzlänge, die Komplexität, das Alter und den Zustand der Anlagen sowie der Fahrweise. Diese Einflußfaktoren bestimmen in erheblichem Maße die Versorgungszuverlässigkeit des einzelnen Abnehmers bei Fernwärme- bzw. Verbrauchers bei Wasserversorgungssystemen.

Damit außerdem die Fernwärme, hervorgerufen durch die oben erwähnten Einflußfaktoren, nicht an Attraktivität insbesondere gegenüber den Alternativen Gas und Öl verliert, müssen die Fernwärmeversorgungssysteme so ausgelegt werden, daß dem Abnehmer jederzeit die vereinbarte Wärmeleistung qualitäts- und quantitätsgerecht geliefert werden kann. Dies wiederum ist abhängig von der Priorität der Versorgung, d. h. während für Abnehmer sensibler Bereiche, wie Krankenhäuser, zoologische Gärten, Innenstadtbereiche (Kaufhäuser und Hotels) sowie bei technologischem Bedarf für Industrieanlagen eine hohe Versorgungszuverlässig-

keit gewährleistet werden muß, spielt diese für Abnehmer kommunaler Bereiche keine so bedeutende Rolle. Letzteres wird stark beeinflusst von der Außenlufttemperatur und der Ausfalldauer. Bei Wasserversorgungssystemen ist dies nicht so von entscheidender Bedeutung, da hier keine Alternativen hinsichtlich der Versorgung existieren.

Des weiteren handelt es sich im Gegensatz zu Wasserversorgungssystemen bei Fernwärmeversorgungssystemen in der Regel um Mehrleiter-Systeme. Daraus ist bereits erkennbar, daß selbst zwischen diesen rohrleitungsgebundenen Versorgungssystemen gewisse Unterschiede bestehen. Dazu zählen weiterhin

- der Anschlußgrad,
- die Systemform,
- die Einspeisung,
- die Verlegeverfahren,
- die Systemgestaltung sowie
- die Rohrleitungsbeanspruchungen.

Um diese oben angesprochene Versorgungszuverlässigkeit zu gewährleisten, ist es notwendig, die Zuverlässigkeit des Systems auf ein dafür entsprechendes Niveau zu heben. Entscheidend dabei ist, ein Optimum zwischen der geforderten Zuverlässigkeit und den Kosten für die zuverlässigkeitserhöhenden Maßnahmen zu finden. Ein weiteres Kriterium für die zusätzlichen Kosten sind die Ausfallkosten, welche durch die eingetretenen Ausfälle verursacht werden. Derzeitig ist es aber fast unmöglich, Abhängigkeiten zwischen den Ausfallkosten und der geforderten Zuverlässigkeit nachzuweisen. Deswegen können gegenwärtig die Probleme der Zuverlässigkeit dieser Versorgungssysteme nur intuitiv gelöst werden, beispielsweise durch den Bau von Maschensystemen.

Grundlage für die Berechnung der Zuverlässigkeit von rohrleitungsgebundenen Versorgungssystemen bildet eine umfangreiche Literaturrecherche aller dafür in Betracht kommenden Systeme. Am weitesten ausgeprägt hinsichtlich der Zuverlässigkeitsarbeit sind die Systeme für die Elektroenergieversorgung. Hierbei kann auf entsprechende Arbeiten der letzten 30 Jahre zurückgegriffen werden. Bei den Elektroenergiesystemen wird die zu gewährleistende Versorgungszuverlässigkeit des Abnehmers ebenfalls über Prioritäten gelöst. Die Realisierung erfolgt z. B. über Maschensysteme, Mehrfacheinspeisungen bzw. Einspeisungen aus übergeordneten Systemen, unter der Voraussetzung des ständigen Vergleiches zwischen den zusätzlichen Kosten für die zuverlässigkeitserhöhenden Maßnahmen und den Ausfallkosten.

Ansätze und Analysen zum zuverlässigkeitsorientierten Systemverhalten von Fernwärmeversorgungssystemen, insbesondere in bezug auf die Systemauslegung, liegen durch vereinzelte Arbeiten vor. Über die Berechnung der Zuverlässigkeit dieser Systeme existieren so gut wie keine verwertbaren Ansätze. Gleiches gilt auch für entsprechende Datensammlungen mit gesicherten Erkenntnissen über Elemente von Fernwärmeversorgungssystemen. Bei den Systemen der Wasser- und Gasversorgung liegt derselbe Kenntnisstand wie bei den Fernwärmeversorgungssystemen vor. Auf die einzelnen Ausführungen wird in den nachfolgenden Kapiteln eingegangen.

Die ausführlichen Datensammlungen aus der Kernkraftwerkstechnik können, bedingt durch die höheren Ansprüche gegenüber Betriebsverhalten und Sicherheit, gar nicht oder nur begrenzt verwendet werden. Oftmals wird sogar darauf hingewiesen, daß diese Daten nicht verallgemeinert werden sollten. Für die chemische Industrie treffen gleiche Analogien zu, wobei hier aber entscheidend ist, welche Medien transportiert werden. In der konventionellen Kraftwerkstechnik existieren die verschiedenartigsten Datensammlungen. Die Kenngröße Verfügbarkeit, entweder von einzelnen Hauptaggregaten oder von Blockanlagen, ist die am häufigsten verwendete Größe zur Beschreibung des Zustandes solcher Anlagen. Konkrete Angaben zu Betriebs- und Ausfallraten einzelner Elemente werden nur selten ausgewiesen.

Insgesamt ist zu beachten, daß zur Gewinnung der Daten verschiedene Verteilungsfunktionen zur Anwendung kommen. Die Verallgemeinerungsfähigkeit der vorhandenen Daten wird entscheidend beeinflußt durch die verschiedenartigsten Einflußfaktoren wie u. a.

- Größe der Anlage,
- Alter der Elemente,
- Bauart der Elemente,
- Fahr- und Einsatzweise der Anlage,
- Redundanzfähigkeit der Elemente.

Des öfteren wird darauf hingewiesen, daß ein weiteres Problem die viel zu geringen Mengen an Daten darstellt.

Somit kann insgesamt festgestellt werden, daß anhand der gegenwärtig zunehmenden Bedeutung der rohrleitungsgebundenen Versorgungssysteme einerseits und des gleichzeitig zunehmenden Alters der Netze andererseits die Bewertung dieser Versorgungssysteme immer mehr an Brisanz gewinnt. Letztere Tatsache beeinflußt in erheblichem Maße die Zuverlässigkeit der Systeme und somit letztendlich auch die Versorgungssicherheit der Abnehmer bzw. Verbraucher. Literaturrecherchen haben gezeigt, daß es bereits genügend theoretische Ansätze für die Berechnung der Zuverlässigkeit verschiedener Systeme gibt, welche aber anhand der vorliegenden Spezifik der betrachteten Versorgungssysteme nicht übernommen werden können.

5 Theoretische Grundlagen

5.1 Definitionen

Die in diesem Kapitel zu definierenden Begriffe beziehen sich überwiegend auf Betrachtungseinheiten. Als eine *Betrachtungseinheit* wird im allgemeinen ein Gegenstand mit bestimmtem Verwendungszweck bezeichnet, der hinsichtlich seiner zweckgerichteten Nutzung, Erforschung, Untersuchung oder Prüfung auf Zuverlässigkeit betrachtet wird. Als Betrachtungseinheit kommen dabei ganze, in sich geschlossene Systeme, Teilsysteme oder einzelne Elemente in Frage.

Das *Element* ist die kleinste Betrachtungseinheit, die eine weitere Unterteilung für die jeweilige Zuverlässigkeitsbetrachtung nicht erfordert. Anstelle des Begriffes Element wird in vielen Literaturstellen das Synonym Komponente verwendet.

Ein *System* dagegen ist aus verschiedenen Elementen zusammengesetzt und bildet für die jeweiligen Zuverlässigkeitsbetrachtungen eine funktionelle Einheit. Große Systeme werden in entsprechende Teilsysteme getrennt.

Im allgemeinen ist die *Zuverlässigkeit* definiert als die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, die beabsichtigte Funktion unter vorgegebenen Bedingungen für einen bestimmten Zeitraum zu erfüllen, die den vorgegebenen Betriebsarten und Bedingungen der Nutzung, der Instandhaltung, der Lagerung und des Transports entsprechen.

Prinzipiell ist von der Zuverlässigkeit die Sicherheit zu unterscheiden. Diese läßt sich als die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit definieren, von der unter vorgegebenen Bedingungen keine Gefährdung für die Umwelt ausgeht. Darauf begründet haben die Zuverlässigkeits- und die Sicherheitstechnik unterschiedliche Zielrichtungen. Während die Sicherheitstechnik das Ziel verfolgt, das Auftreten einer Gefahr aufzuzeigen und zu verhindern, beispielsweise durch Abschalten einer Anlage, hat die Zuverlässigkeitstechnik das Ziel, das Auftreten eines Ausfalles einer Funktion zu bewerten und abhängig davon bestimmte Maßnahmen zu ergreifen, beispielsweise durch Einbau von Redundanz.

Die Zuverlässigkeitstechnik umfaßt die entsprechenden systematischen Vorgehensweisen für eine Zuverlässigkeitsanalyse sowie die für eine Zuverlässigkeitsberechnung notwendigen mathematischen Modelle und Verfahren.

Die Zuverlässigkeit eines Systems hängt sowohl vom Systementwurf als auch von der Betriebsführung ab. Zu den Einflußgrößen beim Entwurf zählen dessen Aufbau, die Auswahl der einzeln notwendigen Elemente, das insoweit erforderliche Überwachungskonzept, das Schutz- und Sicherheitskonzept sowie die Bedienungsweisen, wozu auch die Instandhaltung zählt. Die Zuverlässigkeit bei der

Betriebsführung hängt im wesentlichen von den Fähigkeiten des Bedienungspersonals ab. In Schlußfolgerung daraus kann angemerkt werden, daß die Zuverlässigkeit eines Systems bzw. Elementes abhängig ist von vielen deterministischen (planmäßig) und stochastischen (zufällig auftretenden) Ereignissen. Begründet auf dieser Tatsache ist die Zuverlässigkeit somit eine schwierig zu quantifizierende Größe. Nach (Schneeweiss 1992) ist die Zuverlässigkeit keine quantitative Größe und somit auch keine Wahrscheinlichkeit.

Die Zuverlässigkeit eines Elements wird im allgemeinen entscheidend in der Entwurfsphase festgelegt. Gleiches trifft auch für in sich geschlossene Systeme zu. Hier besteht eine der wichtigsten Aufgaben darin, verschiedene Entwürfe zuverlässigkeitslogisch und -technisch zu beurteilen, um somit Entscheidungshilfen für die technisch-wirtschaftlich günstigste Lösung zu erhalten. Dabei kommen verschiedene mathematische Verfahren zur Anwendung.

Bei sich während der Betriebszeit verändernden Systemen, gegeben durch Veränderungen des strukturellen Aufbaus, kann die Zuverlässigkeit erheblich beeinflußt werden. Hierzu zählen Rohrleitungssysteme für die Fernwärme- und Wasserversorgung.

Wesentlich komplexer und somit schwieriger zu beschreiben ist die Anwendung mathematischer Verfahren für die Betriebsführung von Systemen. Dies ist begründet durch die menschlichen Eigenschaften, wie Anpassung von Entscheidungen an die jeweilige Betriebssituation, Möglichkeiten der Fehlerkorrektur sowie Improvisationstalent, welche sich wiederum nicht oder nur schwer in mathematischen Algorithmen berücksichtigen lassen.

Die Zuverlässigkeit eines Systems wird in einer Zuverlässigkeitsanalyse ermittelt. In (Kochs 1984) wird in qualitative und quantitative Beurteilungskriterien unterschieden. Zur qualitativen Beurteilung werden dabei u. a. Kriterien, wie beispielsweise der Einsatz langjährig erprobter Elemente, gute Dokumentation sowie entsprechende Diagnostikhilfsmittel zum schnellen Auffinden von Fehlern herangezogen. Dagegen sind zur quantitativen Beurteilung wahrscheinlichkeitstheoretische Untersuchungen nötig, welche Aussagen zum Ausfallverhalten und zur Häufigkeit wiedergeben. Für welche Systeme welche Beurteilungskriterien zur Anwendung kommen, hängt in erster Linie vom eigentlichen System und dessen Aufbau ab. Der Vorteil mathematischer Verfahren für die Zuverlässigkeitsberechnung liegt darin, daß systematisch eine große Anzahl an Ausfallkombinationen analysiert werden können. Allgemeine Anforderungen an die mathematischen Verfahren werden in (Kochs 1984) genannt.

Mit Hilfe der Zuverlässigkeitsanalyse ist es möglich, neben dem Zuverlässigkeitsnachweis für ein System, Variantenvergleiche für alternative Schaltungsmöglichkeiten sowie eine Sensibilitätsanalyse durchzuführen. Letzteres bedeutet, den Einfluß der Elemente hinsichtlich ihres Ausfalls auf das System zu analysieren.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, daß alle Zuverlässigkeitsangaben wahrscheinlichkeitstheoretische Größen sind und somit nicht im klassischen Sinn als determinierte Angaben interpretiert werden dürfen. Diese Tatsache liegt im Prinzip der Wahrscheinlichkeitstheorie begründet.

Der mit der Gewährleistung einer Versorgungsaufgabe in Verbindung stehende Begriff ist die *Versorgungszuverlässigkeit*. Speziell für Versorgungssysteme ist

dies die Eigenschaft, die Abnehmer bzw. Verbraucher mit beispielsweise Fernwärme, Wasser, Gas, Elektroenergie unter definierten Betriebsbedingungen in entsprechender Qualität und Quantität zu versorgen. Bei Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen entspricht der Volumenstrom der Quantität. Die Qualitätsparameter bei Fernwärme sind Druck und Temperatur des Wärmemediums. Für Wasser gelten dagegen der Parameter Druck und die eigentliche Wasserqualität. Die durch unplanmäßige und planmäßige Ereignisse entstehenden Versorgungsunterbrechungen können einen Versorgungsausfall nach sich ziehen.

In (Kloeppe et al. 1990) werden des weiteren die Begriffe Strukturzuverlässigkeit und Funktionszuverlässigkeit genannt. Dabei ist die *Strukturzuverlässigkeit* die Eigenschaft einer Betrachtungseinheit, das betreffende Versorgungsmedium von der Einspeisung bzw. Erzeugung bis zum Abnehmer unter Einhaltung vorgegebener Restriktionen bereitzustellen. Hierbei erfolgt eine Zuverlässigkeitsanalyse hinsichtlich des Aufbaues und der Struktur der Betrachtungseinheit, ohne dabei auf entsprechende Qualitätsparameter einzugehen. Die *Funktionszuverlässigkeit* ist die Fähigkeit eines komplexen Systems, alle vorgegebenen Funktionen durch Einhaltung von Grenzwerten der Ergebniskenngrößen aller zu lösenden Teilaufgaben über eine bestimmte Zeitdauer zu erfüllen. Damit werden Parameter und Entscheidungen bewertet, die den zeitlichen Verlauf von wichtigen Betriebskenngrößen (Druck, Temperatur, Wasserqualität usw.) und deren Zuverlässigkeit innerhalb vorgegebener Restriktionen umfassen. Dabei werden je nach Möglichkeit auch die stationären und instationären Vorgänge innerhalb des Systems mit berücksichtigt.

Ist eine Reparatur des Elements in einem System möglich, wird nicht mehr von der Zuverlässigkeit schlechthin gesprochen, sondern von der *Verfügbarkeit*. Die Verfügbarkeit gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, eine reparierfähige Betrachtungseinheit zu einem vorgegebenen Zeitpunkt in einem arbeitsfähigen Zustand anzutreffen. Die Verfügbarkeit ist die in der Zuverlässigkeitstechnik mit am häufigsten benutzte quantitative Größe.

Anlaß eines Ereignisses ist die technische Wirkung der Ereignisursache auf die betroffene Betrachtungseinheit. Die Ursache des Ereignisses selbst ist dabei der wirkende Einfluß, der das Ereignis hauptsächlich hervorruft. *Unplanmäßige Ereignisse* werden verursacht durch Störungen oder Ausfälle, die mit oder ohne Schaden auftreten können. Die *Störung* ist ein unplanmäßiges Ereignis, das eine ungewollte Änderung der Versorgung, Verzögerungen bei der Inbetriebnahme oder Überschreitungen der Reparaturzeit zur Folge hat. Der *Ausfall*, als ein unplanmäßiges Ereignis, geht immer mit einer teilweisen oder völligen Störung der Versorgung einher, während sich der *Schaden* im Eintreten einer Veränderung der normalen Funktion des Elementes äußert, jedoch nicht immer zur Beeinträchtigung der Versorgung führt. Die Tabelle 5.1-1 enthält verschiedene Klassifizierungen von Ausfällen. Ganz allgemein werden die Ausfälle in völlige und teilweise Ausfälle untergliedert. Der völlige Ausfall, auch als Totalausfall bezeichnet, versetzt die Betrachtungseinheit in einen betriebsunfähigen Zustand, während der teilweise Ausfall einen teilweise arbeitsfähigen Zustand hervorruft, der durch eine normale Versorgung gekennzeichnet ist.

Tabelle 5.1-1 Klassifizierung der Ausfälle¹

Ausfallgliederung	Benennung	Erklärung
nach technischem Umfang	Totalausfall	Ausfall, nach dessen Eintreten die Verwendung der Betrachtungseinheit bis zur Wiederherstellung ihrer Arbeitsfähigkeit nicht möglich ist
	Teilausfall	Ausfall, nach dessen Eintreten die Arbeitsfähigkeit der Betrachtungseinheit teilweise noch möglich ist
	Katastrophenausfall	plötzlicher Totalausfall
	Degraditionsausfall	allmählicher Ausfall, der sich zum Totalausfall entwickeln kann
nach Beanspruchung	bei zulässiger Beanspruchung	Ausfall einer Betrachtungseinheit bei zulässiger Beanspruchung
	bei unzulässiger Beanspruchung	Ausfall, der infolge von Beanspruchungen entsteht, die die für die Betrachtungseinheit zulässigen Grenzwerte überschreiten
	Folgeausfall	Ausfall eines Elements einer Betrachtungseinheit, der durch Fehler oder Ausfall anderer Elemente der Betrachtungseinheit hervorgerufen wird
	unabhängiger Ausfall	Ausfall eines Elements, der nicht durch Fehler oder Ausfall anderer Elemente der Betrachtungseinheit hervorgerufen wird
nach Entstehungsursache	konstruktionsbedingt	Ausfall, der infolge eines Konstruktionsfehlers entsteht
	fertigungsbedingt	Ausfall, der bei der Herstellung oder Instandhaltung der Betrachtungseinheit entsteht
	nutzungsbedingt	Ausfall, der infolge einer Verletzung der festgelegten Bedingungen für den Betrieb entsteht
nach Verlauf der Änderung	Sprungausfall	Ausfall, der durch eine sprunghafte Änderung eines oder mehrerer Parameter der Betrachtungseinheit charakterisiert wird
	Driftausfall	Ausfall, der durch eine allmähliche Änderung eines oder mehrerer Parameter der Betrachtungseinheit charakterisiert wird
nach Verlauf der Ausfallrate	Zufallsausfälle	Ausfälle von Betrachtungseinheiten, wo eine konstante Ausfallrate vorliegt; diese Ausfälle kommen durch das statistische Zusammenwirken vieler voneinander unabhängiger Faktoren zustande
	systematische Ausfälle	Ausfälle von Betrachtungseinheiten, die eine Änderung der Ausfallrate bewirken, gegeben durch eine bestimmte Wirkung eines Ausfallmechanismus
	Frühausfälle	Ausfälle von Betrachtungseinheiten, die mathematisch eine ständige Abnahme der Ausfallrate mit der Betriebszeit ergeben
	Spätausfälle	Ausfälle von Betrachtungseinheiten, die mathematisch eine ständig steigende Ausfallrate ergeben

¹ Klassifizierung nach der nicht mehr gültigen Vorschrift TGL 26096.

Grundsätzlich ist der *Schaden* die ungewollte Änderung der Nenneigenschaften der Betrachtungseinheit. Es liegt also eine Zustandsänderung vor. In (Mexis u. Hennig 1994) wird eine Unterscheidung nach beispielsweise instandhaltungstechnischen, werkstoffkundlichen, kraftfahrzeugtechnischen, zuverlässigkeitstechnischen, juristischen oder wirtschaftlichen Gesichtspunkten diskutiert.

Dabei liefern die DIN und die VDI-Richtlinie die wohl wichtigsten Beiträge zur Definition. Laut DIN ist der Schaden der Zustand nach Überschreiten eines bestimmten (festzulegenden) Grenzwertes der Sollzustandsabweichung, der eine verwendungsspezifische, unzulässige Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit bedingt. Dagegen wird nach der VDI-Richtlinie der Schaden definiert als eine Veränderung an einem Bauteil, der dadurch seine vorgesehene Funktion beeinträchtigt oder unmöglich macht bzw. eine Beeinträchtigung erwarten läßt. Interessant ist auch, daß der Begriff Schaden aus dem Instandhaltungsgeschehen zunehmend durch den Begriff Schwachstelle ersetzt wird.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, daß in einer Betrachtungseinheit beispielsweise in einem System fehlerfreie und fehlerhafte Elemente eingebaut sind. Ein *Fehler* ist ein Ereignis, das in der Verletzung der Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit besteht. Das Zahlenverhältnis zwischen fehlerfrei und fehlerhaft ist weder bekannt, noch läßt sich vorhersagen, wann und ob überhaupt die Elemente ausfallen werden. Weiterhin können ebenso vorerst fehlerfreie Elemente ausfallen. Allgemein betrachtet entstehen Schäden in einer Betrachtungseinheit also dann, wenn folgende Verhältnisse vorliegen:

- Auswirkung eines Elementefehlers,
- Auswirkung eines Elementefehlers auf ein anderes, fehlerfreies oder fehlerbehaftetes Element sowie
- äußere Einwirkungen auf ein fehlerfreies oder fehlerbehaftetes Element.

Ist ein Schaden eingetreten, so wird das betroffene Element als Schadensteil bezeichnet. Für die Schadensforschung ist ein fehlerhaftes Element noch kein Schadensteil, sondern erst nach dem eingetretenen Schaden. Für die Schwachstellenanalyse ist dieses Element bereits ein schwaches Teil, vielleicht der Ort der Schwachstellenursache, die sich unter Umständen irgendwo anders auswirkt oder eine Schwachstelle hervorruft, die mit dem schwachen Teil nicht identisch ist. Beispiel: Korrosion einer Rohrleitung in einem Bauwerk, verursacht durch Nässe, die von außen durch das Bauwerk dringt.

Die Schadensteile werden in primäre und sekundäre Schadensteile unterteilt. Dabei werden die als *primär* bezeichnet, die als erste beschädigt wurden bzw. den Schaden selbst ausgelöst haben. Es ist nicht maßgebend, ob die Einwirkung von innen oder von außen wirkte, sondern, daß das Element als erstes den Schaden erlitt. Als *sekundär* werden die Schadensteile bezeichnet, die in zweiter, dritter usw. Folge beschädigt wurden, wobei die Reihenfolge nicht immer nachträglich einwandfrei feststellbar ist. Dies liegt darin begründet, daß die Schadensfolgen nicht unbedingt identisch mit der Reihe der beschädigten Elemente sind. In vielen Fällen kann es sogar vorkommen, daß ein Element beschädigt wird, ohne daß seine Beschädigung sichtbar oder feststellbar ist. Dadurch kann es passieren, daß ein sekundäres Schadensteil einen neuen Schaden verursacht.

Bei Elektroenergiesystemen wird eine weitere Unterteilung hinsichtlich in schadensanonyme und schadensdefinierte Abnehmer vorgenommen (Kloepfel u. Rodeck 1966). Bei *schadensanonymen* Abnehmern kann eine Schadensauswirkung nicht konkret angegeben werden. Dazu zählen in erster Linie Abnehmer mit unterschiedlichen, meist nicht zu hohen Zuverlässigkeitsanforderungen, die im einzelnen nicht bekannt sind. Weiterhin gehören Abnehmer dazu, die bei der Netzplanung ihre Schadensauswirkungen bei einem Ausfall nicht angeben können bzw. um solche, die bei prinzipiellen Untersuchungen von Netzvarianten anonym sind. Bei *schadensdefinierten* Abnehmern handelt es sich um Abnehmer, bei denen klare Vorstellungen über Schadenserwartungen in Abhängigkeit der Ausfallzeit bestehen.

Werden diese Erkenntnisse auf Fernwärmeversorgungssysteme übertragen, so könnten zu den schadensanonymen Abnehmern die der kommunalen Bereiche gezählt werden. Abnehmer mit technologischem Bedarf (Industrie und Gewerbe) oder sensible Bereiche, wie beispielsweise Krankenhäuser, zoologische Gärten, Innenstadtbereiche, Großmärkte, zählen dann eher zu den schadensdefinierten Abnehmern, wobei auch hier die Schadensauswirkungen nur selten konkret erfaßt werden können. Bei Wasserversorgungssystemen können diese Erkenntnisse analog zum Ansatz gebracht werden.

Prinzipiell durchläuft das Element in der Betrachtungseinheit einen bestimmten Lebenslauf, von der Planung bis zur Verschrottung oder Außerbetriebnahme. In diesem Zeitraum kann grundsätzlich von vier verschiedenen Arten von Schadensursachen ausgegangen werden, welche zum Teil mit der in Tabelle 5.1-1 vorgenommenen Klassifizierung von Ausfällen eine Übereinstimmung erzielt. Dazu gehören nach (Mexis u. Hennig 1994):

- Schadensursachen infolge menschlicher Fehler,
- Schadensursachen infolge Unvollkommenheit des Standes der Technologie,
- Schadensursachen aufgrund von Fremdeinwirkungen sowie
- technische Schadensursachen.

Zu den menschlichen Fehlern zählen alle die Fehler, die dieser im Umgang mit der Technik machen kann. Dabei wird einerseits unterschieden in Fehler, für die der Mensch zwar voll verantwortlich ist, die er aber nicht absichtlich begangen hat. Dazu zählen Herstellungs-, Errichtungs- und Betriebsfehler. Andererseits sind dies Fehler, für die der Mensch verantwortlich ist, d. h. die er absichtlich begangen hat. Dazu zählen u. a. Sabotage, mutwillige Zerstörung oder bewußte Falscheinstellungen.

Ursachen, die in der Unvollkommenheit des Standes der Technik liegen, stellen eine weitere Möglichkeit dar. Der Mensch ist für die Schadensursachen nicht verantwortlich, er kann auch nicht durch Einhaltung von Vorschriften das Risiko erheblich vermindern, d. h. es wird immer ein gewisses Restrisiko geben. Eine vollkommene Zuverlässigkeit eines Elementes ist nicht bezahlbar.

Umwelteinflüsse sowie Einflüsse durch Dritte gehören zu den Schadensursachen infolge Fremdeinwirkungen. Umwelteinwirkungen können zum Teil enorme Schäden verursachen, die sogar oft irreparabel sind. Bei Einflüssen durch Dritte zeigt die Praxis, daß hier das Unmögliche doch noch möglich ist. Dazu zählen

Kurzschlüsse und Brände in Bauwerken, die hervorgerufen werden durch Kleintiere, oder Schäden bei der Bauausführung z. B. beim Neubau einer Straße, wo eigentlich die vorhandenen Versorgungsleitungen nicht unmittelbar betroffen sind.

Technische Schadensursachen können nicht gleichrangig neben die bereits oben erwähnten Ursachen gesetzt werden. Vielmehr werden technische Schadensursachen durch sie erzeugt. In der Literatur werden diese auch als anormale Vorgänge oder auch als schadensauslösendes Ereignis bezeichnet. Schlußfolgernd können somit als technische Schadensursache alle Vorgänge und Zustände definiert werden, die durch eine andere Schadensursache entstehen und unmittelbar zum Schaden führen.

Erwähnenswert erscheint noch im diesem Zusammenhang noch die Definition eines Störfalles. In einem Versorgungssystem wird als *einfacher Störfall* durch störungsbedingten Ausfall eines einzigen Elementes bezeichnet, wodurch andere Betriebsverhältnisse als vor diesem Ereignis auftreten. Dazu gehören auch planmäßige Ereignisse. Der *doppelte Störfall* umfaßt den Zustand in einem Versorgungssystem bei gleichzeitigem Ausfall zweier Elemente. Beide Definitionen finden hauptsächlich Gebrauch bei Elektroenergiesystemen, können aber auch bei

Tabelle 5.1-2 Wichtige Begriffe und Definitionen der Schadensforschung

Begriff	Definition
Schaden	Veränderung an einer Betrachtungseinheit, welche die vorgegebene Funktion beeinträchtigt oder unmöglich gemacht wird oder eine Beeinträchtigung erwarten läßt
Folgeschaden	Schaden, der durch einen vorangegangenen Schaden ausgelöst wird
Primärschaden	zeitlich zuerst auftretender Schaden, der Ursache für weitere Schäden ist
Vorschaden	früher an der Betrachtungseinheit aufgetretener Schaden
Wiederholungsschaden	gleichartiger Vorschaden
Schadensabhilfe	Maßnahmen gegen die Wiederholung eines bestimmten Schadens
Schadensablauf	zeitliche Entwicklung eines Schadens
Schadensanalyse	Schadensuntersuchungen und Ableitungen der Maßnahmen für Schadensabhilfe und gegebenenfalls Ableitung allgemeiner Maßnahmen zur Schadensverhütung und -vorbeugung
Schadenart	Benennung des Schadens
Schadensbefund	Ermittlung von Schadensbild und Schadenserscheinung
Schadensbegünstigung	Beschleunigung eines Schadensablaufes oder Vergrößerung des Schadens durch zusätzliche Einflüsse
Schadensbereich	Betrachtungseinheit (System, Teilsystem, Element), in der der Schaden aufgetreten ist
Schadensbild	äußerer Zustand der beschädigten Betrachtungseinheit
Schadenerscheinung	kennzeichnende Merkmale einer Schadensart
Schadenort	Einbauort des Schadenteils im Schadensbereich
Schadenstelle	Stelle des Schadens am Schadensteil
Schadensteil	vom Schaden betroffene Betrachtungseinheit
Schadenuntersuchung	Ansatz und Auswertung von Untersuchungen zur Ermittlung von Schadenablauf und -ursache
Schadenursache	Summe der schadenauslösenden Einflüsse
primäre Ursachen	zeitlich zuerst auftretende Schadenursache
Schadensverhütung	vorbeugende Maßnahmen gegen das Auftreten von Schäden

Wasserversorgungssystemen und begrenzt bei Fernwärmesystemen, gegeben durch bedingte Maschen- sowie Redundanzausbildung, verwendet werden.

Abschließend werden in der Tabelle 5.1-2 alle wichtigen Begriffe und Definitionen der Schadensforschung in Anlehnung nach (Mexis u. Hennig 1994) auf einen Blick aufgezeigt.

5.2

Zuverlässigkeit des Elements technischer Systeme

5.2.1

Das Element im System

Die Zuverlässigkeit eines Systems hängt von seinem Aufbau und von der Zuverlässigkeit seiner Elemente ab. Ziel ist es, unabhängig von seinem inneren Aufbau und der Zuverlässigkeit seiner Bestandteile, relevante Zuverlässigkeitskennwerte zuzuordnen.

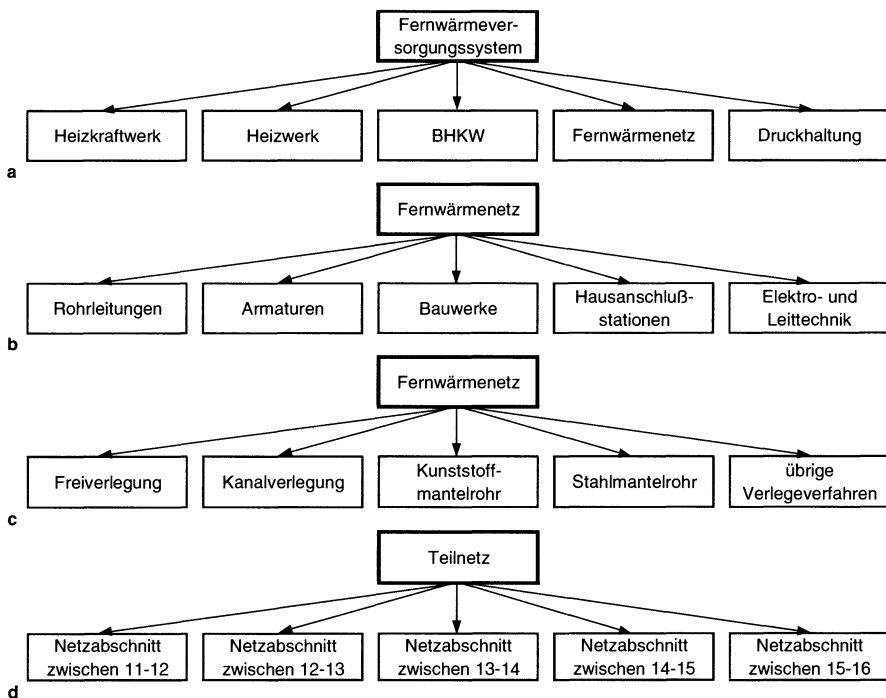


Abb. 5.2-1 Beispiel zu den unterschiedlichen Betrachtungsebenen (Fernwärme)

a Fernwärmenetz als Element eines Fernwärmeversorgungssystems betrachtet, **b** Fernwärmenetz als System betrachtet, das aus verschiedenen Elementen besteht, **c** Fernwärmenetz als System betrachtet, das aus verschiedenen Verlegeverfahren besteht, **d** Teilnetz als System betrachtet, das aus verschiedenen Elementen (hier Netzabschnitte) besteht

Dabei ist ein *Element* die kleinste Betrachtungseinheit, die eine weitere Unterteilung für die jeweilige Zuverlässigkeitsbetrachtung nicht erfordert. Ein *System* dagegen ist aus verschiedenen Elementen zusammengesetzt und bildet somit für die jeweiligen Zuverlässigkeitsbetrachtungen eine funktionelle Einheit. Bei großen Systemen erfolgt größtenteils die Aufgliederung in entsprechende Teilsysteme.

Der Umfang der Berechnungen sowie deren Ergebnisse sind im wesentlichen abhängig vom Detaillierungsgrad des zu betrachtenden Systems in seine Elemente. Wird ein System in viele Elemente zerlegt, wächst der Umfang der statistischen Informationen. Werden dagegen die Systembestandteile zu groß gelassen, sinkt im allgemeinen die Genauigkeit der Lösung (Kloepfel et al. 1990).

In einem ersten Schritt werden die Betrachtungseinheiten – System und seine Elemente – für die Zuverlässigkeitsanalyse definiert. Damit erfolgt bereits die Aufarbeitung von der rein technologiebezogenen Anlagenstruktur zur zuverlässigkeitsbezogenen Struktur. Entscheidend dabei ist, wie die zu betrachtende Anlage als Betrachtungseinheit analysiert werden soll. Diese Zuverlässigkeitsanalyse kann sowohl nach innen als auch nach außen gerichtet sein. In (Kochs 1984) wird dies auch als mikroskopische und makroskopische Betrachtung bezeichnet. Die wichtigsten Grundüberlegungen zur Festlegung von Elementen und System werden anhand der Abb. 5.2-1 und 5.2-2 für beide Versorgungssysteme vertieft. Für Wasserversorgungssysteme kann ebenso ein Teilnetz als System betrachtet werden.

Weitere Ausführungen zur Definition von System und Elementen hinsichtlich der Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme werden in Kap. 6 besprochen.

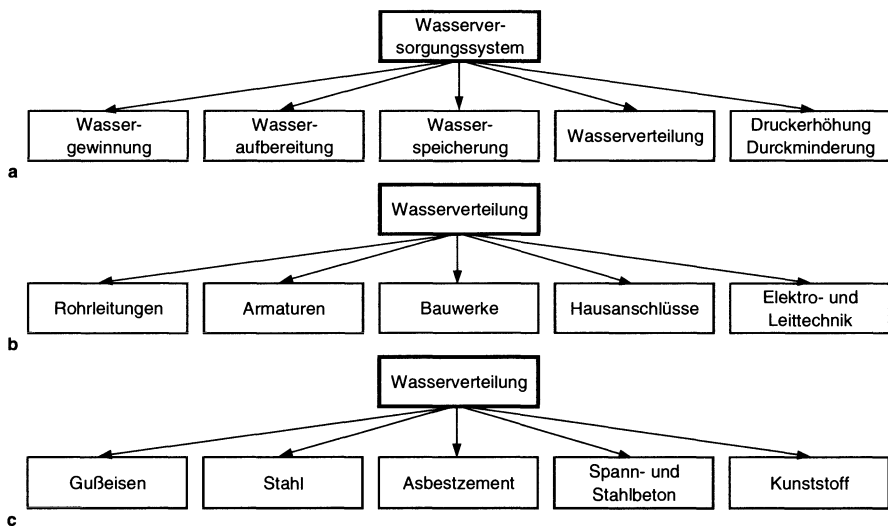


Abb. 5.2-2 Beispiel zu den unterschiedlichen Betrachtungsebenen (Wasser)

a Wasserverteilung als Element eines Wasserversorgungssystems betrachtet, **b** Wasserverteilung als System betrachtet, das aus verschiedenen Elementen besteht, **c** Wasserverteilung als System betrachtet, das aus verschiedenen Verlegeverfahren besteht

5.2.2

Zuverlässigkeitskenngrößen und deren Berechnung

5.2.2.1

Allgemeines

Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit eines Systems oder bestimmter Elemente haben die nachstehend definierten Kenngrößen, die auf der Grundlage der Wahrscheinlichkeitsrechnung basieren, nicht alle das gleiche Gewicht. Die Wahl der Zuverlässigkeitskenngrößen ist u. a. abhängig davon, ob die ausgefallenen Elemente im betrachteten System repariert (erneuert) werden können oder im ausgefallenen Zustand verbleiben. Des weiteren ist entscheidend, ob Maßnahmen der vorbeugenden Instandhaltung an dem System durchgeführt werden.

Grundsätzlich wird bei der Berechnung der Zuverlässigkeit unterschieden in Elemente ohne und mit Erneuerung. Unter Element ohne Erneuerung sollen alle Elemente verstanden werden, bei denen eine Reparatur aufgrund ihrer Spezifika absolut nicht möglich oder ökonomisch nicht sinnvoll ist. Elemente, welche beispielsweise in den betrachteten Versorgungssystemen eingesetzt werden, gehören bis auf wenige Ausnahmen zu Elementen mit Erneuerung. Dabei sind unter bestimmten Bedingungen die Zuverlässigkeitskenngrößen für Elemente ohne Erneuerung auch für erneuerungsfähige Elemente von Bedeutung, vor allem für den Zeitraum vom Funktionsbeginn bis zum Eintreten des Ausfalls, auch nach durchgeführter Reparatur (Gruhn u. Kafarov 1979). In (Frey 1973) wird zwischen den beiden Möglichkeiten – Element ohne und mit Erneuerung – eine weitere angeführt. Diese Möglichkeit enthält die Definition der Elemente mit teilweiser Erneuerung. Dabei kann davon ausgegangen werden, daß diese Elemente während des Betriebes reparabel sind. Die Eigenschaften dieser Elemente sind wie für Elemente ohne Erneuerung mit der Ausnahme, daß bedingt durch die Reparatur bestimmte Zustände mehrmals durchlaufen werden können, bevor das Element ganz ausfällt. Als Beispiel dafür könnten Dichtungen in Armaturen gelten. Diese können mehrmals gewechselt werden, bevor die Armatur ausfällt. Der Unterschied zwischen Element mit teilweiser Erneuerung und Element mit (vollständiger) Erneuerung besteht darin, daß bei teilweiser Erneuerung kein Ausfall der Funktionsaufgabe des Elements bzw. des Systems zulässig ist, wogegen bei (vollständiger) Erneuerung zufällige Ausfälle der Funktionsaufgabe und anschließende Notfallreparatur sowie geplante Betriebsausfälle für die Systemwartung toleriert werden (Frey 1973).

Zur Berechnung der Zuverlässigkeit können die nachfolgend genannten wichtigsten Kenngrößen verwendet werden (s. Tabelle 5.2-1). Für die Grundlagen zur Bestimmung dieser sei auf die ausführlichen Darstellungen u. a. in (Gnedenko et al. 1968; Frey 1973; Barlow u. Proschan 1978; Koslow u. Uschakow 1979; Köchel 1982; Störmer 1983; Beichelt 1988; Beyer et al. 1988b; Kloeppel et al. 1990) verwiesen. Die in den Klammern stehenden Ausdrücke beinhalten die Abkürzungen der entsprechenden englischen Fachtermini (Frey 1973; Schäfer 1979; Kochs 1984; MBB 1986; Reinschke 1989).

Tabelle 5.2-1 Zuverlässigkeitskenngrößen für Elemente ohne, mit teilweiser und mit Erneuerung²

Elemente ohne/mit teilweiser Erneuerung	Elemente mit Erneuerung
– Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$	– Verteilungsfunktion der Reparaturzeit $M(t)$
– Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$	– Erneuerungs- bzw. Reparaturrate $\mu(t)$
– Lebensdauerdichte (kurz: Dichte $f(t)$)	– Dichte der Reparaturzeit $m(t)$
– Ausfallrate $\lambda(t)$	– mittlere Reparaturdauer T_A (MTTR)
– mittlere Lebensdauer T_B (MTTF)	– Erneuerungsfunktion $H(t)$
– gleitende Mittelwerte der Funktionen $F(t)$, $R(t)$, $f(t)$ und $\lambda(t)$	– Erneuerungs-dichte $h(t)$
(Mittelwerte über ein bestimmtes Zeitintervall T (Frey 1973))	– Momentan- und Dauerverfügbarkeit $V(t)$, V
	– mittlerer Ausfallabstand (MTBF)
	– mittlere Betriebszeit (MUT)
	– mittlere Instandsetzungszeit (MDT)

5.2.2.2**Wahrscheinlichkeits- und statistische Definitionen grundlegender Zuverlässigkeitskenngrößen**

Die Zuverlässigkeitskenngrößen werden durch Wahrscheinlichkeiten hinsichtlich der Funktionsfähigkeit bzw. des Ausfalls von Elementen in einem bestimmten Zeitintervall beschrieben. Diese Kenngrößen sind auch empirisch bestimmbar.

Es sei ein Element beobachtet, daß im Zeitpunkt $t = 0$ zu arbeiten beginnt und im Zeitpunkt $t = T$ ausfällt. Die Größe T wird als Lebensdauer des Elements bezeichnet und gibt die Dauer der ausfallfreien Arbeit dieses Elements an. Gewöhnlich ist die Lebensdauer eine Zufallsvariable. Um zu unterstreichen, daß T die Lebensdauer eines Elementes bis zu seinem Ausfall ist, wird die zu T gehörige Verteilungsfunktion als Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilung $F(t)$, im späteren nur noch als Ausfallwahrscheinlichkeit bezeichnet, d. h.

$$F(t) = P\{T \leq t\} \text{ für } t \in [0, \infty). \quad (5.1)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ gibt die Wahrscheinlichkeit P dafür an, daß ein Element im Zeitintervall $[0, t]$ ausfällt, d. h. die Lebensdauer T ist kleiner-gleich als die gewählte Beanspruchungsdauer t .

Empirisch wird die Ausfallwahrscheinlichkeit wie folgt ermittelt

$$\hat{F}(t) = \frac{N(0) - N(t)}{N(0)} \quad (5.2)$$

mit $N(0)$ - Gesamtanzahl zum Zeitpunkt $t = 0$; Anfangsbestand,
 $N(t)$ - Anzahl der noch funktionsfähigen Elemente zum Zeitpunkt t .

Der Übergang von der relativen Häufigkeit zur Wahrscheinlichkeit erfolgt durch die Grenzwertbildung.

² Die englischen Fachtermini bedeuten im einzelnen: MTTR – Mean Time To Repair, MTTF – Mean Time To Failure, MTBF – Mean Time Between Failures, MUT – Mean Up Time, MDT – Mean Down Time = MTTR.

Die Übergangswahrscheinlichkeitsverteilung $R(t)$, als Synonyme gelten auch die Begriffe Überlebenswahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeit oder Intaktwahrscheinlichkeit, gibt die Wahrscheinlichkeit P an, daß ein Element im Zeitintervall $[0, t]$ nicht ausfällt, d. h.

$$R(t) = 1 - F(t) = P\{T > t\} \text{ für } t \in [0, \infty). \quad (5.3)$$

Empirisch wird dabei die Überlebenswahrscheinlichkeit wie folgt ermittelt

$$\hat{R}(t) = \frac{N(t)}{N(0)}. \quad (5.4)$$

Der Übergang von der relativen Häufigkeit zur Wahrscheinlichkeit wird ebenfalls über den Grenzwert gebildet.

Es sei noch zu erwähnen, daß zu jedem Zeitpunkt die Summe aus Überlebens- und Ausfallwahrscheinlichkeit eine konstante Größe ergibt, die gewöhnlich auf 1 oder 100 % normiert wird

$$R(t) + F(t) = 1. \quad (5.5)$$

Da die Verteilungsfunktion $R(t)$ zwischen $R(0) = 1$ und $R(\infty) = 0$ monoton abnimmt, müssen die Werte der Verteilungsfunktion $F(t)$, wie in Abb. 5.2-3 angegeben, zwischen $F(0) = 0$ und $F(\infty) = 1$ monoton zunehmen.

Unter der Voraussetzung, daß $F(t)$ stetig ist, gilt für die Lebensdauerdichte (kurz: Dichte) $f(t)$ der Ausfallwahrscheinlichkeit

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}. \quad (5.6)$$

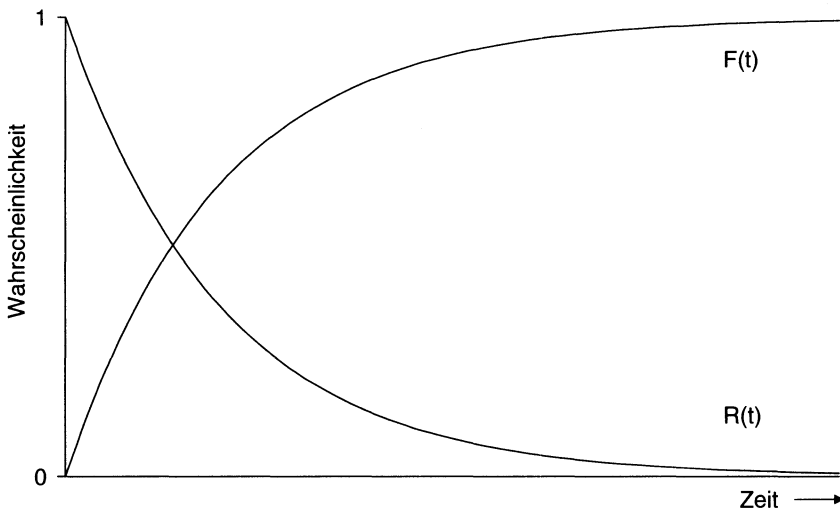


Abb. 5.2-3 Zeitverläufe der Ausfall- und Überlebenswahrscheinlichkeit

Mit dem Ausdruck

$$f(t) \cdot \Delta t = P\{t < T \leq t + \Delta t\} \quad (5.7)$$

beschreibt sie die Wahrscheinlichkeit P dafür, daß ein Element im Zeitintervall $(t, t+\Delta t)$ ausfällt (Beichelt u. Franken 1983). Für die empirische Berechnung der Dichte gilt

$$\hat{f}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(0) \cdot \Delta t} \quad (5.8)$$

mit $N(t+\Delta t)$ - Anzahl funktionsfähiger Elemente zum Zeitpunkt $t+\Delta t$.

Eine weitere wichtige Zuverlässigkeitskenngröße ist die Ausfallrate. Diese wird gebildet aus

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{d}{dt} (\ln R(t)). \quad (5.9)$$

Mit dem Ausdruck

$$\lambda(t) \cdot \Delta t = P\{t < T \leq t + \Delta t \mid T > t\} \quad (5.10)$$

und kleinem Δt ist sie näherungsweise die bedingte Wahrscheinlichkeit P dafür, daß ein bis zum Zeitpunkt t nicht ausgefallenes Element im Beanspruchungsintervall $(t, t+\Delta t)$ ausfällt. Somit ist $\lambda(t)$ ein Maß für die Anfälligkeit eines Elementes vom Alter t (Beichelt u. Franken 1983). Empirisch wird die Ausfallrate bestimmt aus

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}. \quad (5.11)$$

Analysen zahlreicher Störungsstatistiken und statistisch erfaßter Daten über Ausfälle von Elementen verschiedenartigster technischer Systeme ergeben den in Abb. 5.2-4 dargestellten charakteristischen zeitlichen Verlauf für die Ausfallrate. In der Praxis wird dieser Verlauf auch als sogenannte Badewannenkurve bezeichnet. Dieser zeitliche Verlauf teilt sich prinzipiell in 3 Phasen. Die Phase I, auch als Phase der Frühausfälle bezeichnet, kennzeichnet eine mit der Betriebsdauer abnehmende Ausfallrate. Dieses Ausfallverhalten, bei Inbetriebnahme der Elemente zunächst hoch und mit zunehmender Betriebsdauer abnehmend, ist in der Regel auf Fertigungs-, Montage- und Inbetriebnahmefehlern bzw. für den Einsatzzweck falsch dimensionierte Materialien zurückzuführen. In der Phase II bleibt die Ausfallrate nahezu konstant. In diesem Zeitabschnitt treten unterschiedliche Ausfälle auf, die von ihrem Charakter her als Zufallsausfälle bezeichnet werden können, da keine Konzentration bestimmter systematischer Ursachen zu erkennen ist. Dazu zählen auch verspätete Frühausfälle als auch verfrühte Spätausfälle. Gegeben durch die konstante Ausfallrate liegen hier keine altersbedingten Ausfallursachen vor. In der Phase III treten verstärkt Verschleißausfälle auf, die ihre Ursachen in Korrosion, Erosion, Materialermüdung, Verschmutzung usw. haben und eine Erhöhung der Ausfallrate bedingen. Die in dieser sogenannten Verschleißphase

auftretenden Ausfälle sind systematischer Natur und werden als Spätausfälle bezeichnet.

Eine vorbeugende Instandhaltung zur Erhöhung der Zuverlässigkeit ist aufgrund des zeitlichen Verlaufs der Ausfallrate nur in der Phase III sinnvoll, da in den anderen charakteristischen Phasen I und II die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ausfälle bzw. Störungen durch vorbeugende Reparatur oder vorbeugenden Austausch nicht verringert werden können (Gruhn u. Kafarov 1979).

Alle ingenieurtechnischen Bemühungen sollten darauf gerichtet sein, so schnell als möglich die Phase II zu erreichen, welche von langer Zeitdauer ist unter der Restriktion einer niedrigen Ausfallrate, mit dem Ziel, den Beginn der Phase III soweit als möglich hinauszuschieben.

Grundsätzlich kann verallgemeinert bemerkt werden, daß eine Anwendung von konstanten Ausfallraten zur Gewinnung von Zuverlässigkeitsaussagen zulässig ist, solange in einem System Elementenausfälle auftreten, die keine systematischen Ausfallursachen erkennen lassen.

Bei Kenntnis irgendeiner der Funktionen $F(t)$, $R(t)$, $f(t)$ oder $\lambda(t)$, sind die anderen Zuverlässigkeitskenngrößen berechenbar. Einen Überblick über die Beziehungen zwischen den einzelnen Zuverlässigkeitskenngrößen gibt Tabelle 5.2-2.

Für viele Zuverlässigkeitsbetrachtungen ist der Zusammenhang zwischen der Ausfallrate und der Überlebenswahrscheinlichkeit von Interesse. Gesetzt den Fall, die Ausfallrate ist konstant, d. h. $\lambda(t) = \lambda$, dann beträgt die Überlebenswahrscheinlichkeit

$$R(t) = \exp(-\lambda \cdot t). \quad (5.12)$$

Die ausführliche Herleitung ist u. a. in (Kloeppe et al. 1990) aufgezeigt.

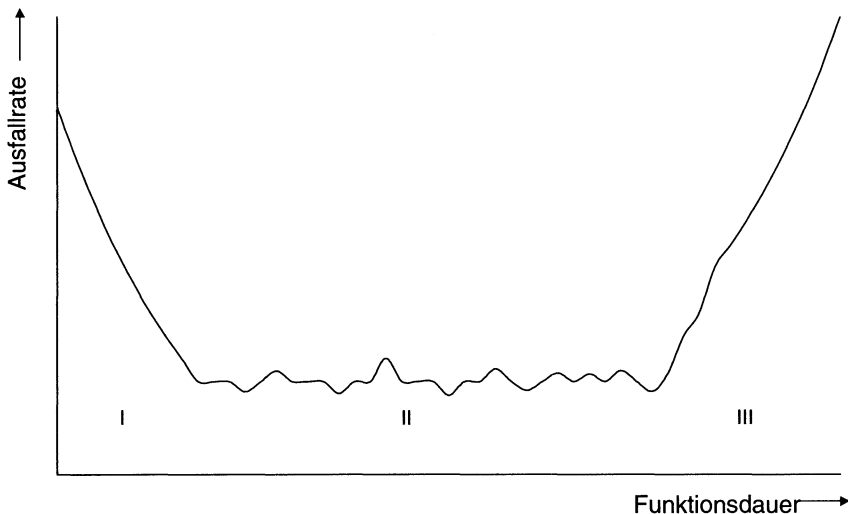


Abb. 5.2-4 Charakteristischer zeitlicher Verlauf der Ausfallrate

Tabelle 5.2-2 Funktionaler Zusammenhang zwischen den Zuverlässigkeitskenngrößen

	Bekannte Funktion R(t)	F(t)	f(t)	$\lambda(t)$
R(t)	R(t)	1-F(t)	$\int_t^\infty f(x)dx$	$\exp\left(-\int_0^t \lambda(x)dx\right)$
F(t)	1-R(t)	F(t)	$\int_0^t f(x)dx$	$1-\exp\left(-\int_0^t \lambda(x)dx\right)$
f(t)	$-\frac{d}{dt}R(t)$	$\frac{d}{dt}F(t)$	f(t)	$\lambda(x) \cdot \exp\left(-\int_0^t \lambda(x)dx\right)$
$\lambda(t)$	$-\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$	$\frac{1}{1-F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(x)dx}$	$\lambda(t)$

Weitere statistische Kenngrößen der Verteilung, wie z. B. der Erwartungswert, die Dispersion bzw. Varianz oder die Standardabweichung können jeweils durch die Momente dieser Verteilung berechnet werden. Die Herleitung dieser Größen ist im nachfolgenden Abschnitt beschrieben. Für den Erwartungswert der Lebensdauer eines Elementes bis zum ersten Ausfall gilt

$$T_B = E(T_B) = \int_0^\infty R(t)dt = \int_0^\infty t \cdot f(t)dt. \quad (5.13)$$

Empirisch läßt sich die mittlere Lebensdauer relativ einfach wie folgt ermitteln

$$\hat{T}_B = \frac{1}{N(0)} \cdot \sum_{i=1}^{N(0)} t_{B,i} \quad (5.14)$$

mit $t_{B,i}$ - Lebensdauer des i-ten Elementes.

Eine weitere charakteristische Zuverlässigkeitskenngröße ist die Dispersion (Streuung) der Lebensdauer,

$$\begin{aligned} D^2(T_B) &= E(T - T_B)^2 = E(T_B)^2 - (E(T_B))^2 = \\ &= \int_0^\infty t^2 \cdot f(t)dt - T_B^2 = 2 \cdot \int_0^\infty t \cdot R(t)dt - T_B^2. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Diese kann empirisch ermittelt werden aus

$$\hat{D}^2(T_B) \approx S^2 = \frac{1}{N(0)-1} \cdot \sum_{i=1}^{N(0)} (t_{B,i} - T_B)^2. \quad (5.16)$$

Die Größe

$$\sigma = \sqrt{D^2(T_B)}, \quad (5.17)$$

die als Standardabweichung bezeichnet wird, gibt die mittlere quadratische Abweichung der zufälligen Betriebszeit von ihrem Mittelwert T_B an.

Unter der Voraussetzung einer konstanten Ausfallrate gilt für die Dispersion

$$D^2(T_B) = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (5.18)$$

Die Effektivität reparierbarer Elemente wird in hohem Maße durch die Stillstandszeiten bestimmt. In der anschließenden Abb. 5.2-5 werden die charakteristischen Zeitabschnitte dargestellt, welche von reparierbaren Elementen durchlaufen werden können.

Der Erneuerungsprozeß basiert auf zwei Arten, zum einen wird das ausgefallene Element durch ein neues gleichartiges ersetzt, zum anderen das ausgefallene Element repariert, wodurch seine ursprüngliche Funktionstüchtigkeit hergestellt wird.

In der Erneuerungstheorie wird gewöhnlich unterschieden zwischen Erneuerungsprozessen (EP), bei denen die Erneuerungszeit vernachlässigbar klein (einfacher EP) oder endlich (alternierender EP) ist. Auf die Ableitungen der Zuverlässigkeitskenngrößen der Erneuerungstheorie wird zugunsten u. a. von Standardwerken (Cox 1966; Köchel 1982; Störmer 1983; Fischer 1984; Kochs 1984; MBB 1986; Schneeweiss 1992) verzichtet.

Eine analoge Kenngröße zur Ausfallrate ist die Erneuerungs- bzw. Reparaturrate $\mu(t)$. Die Erneuerungsrate ist jedoch hinsichtlich ihrer Bedeutung nicht direkt

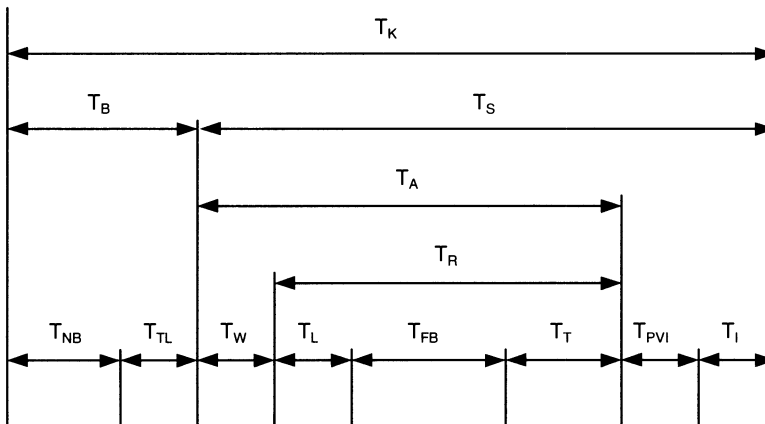


Abb. 5.2-5 Charakteristische Zeitabschnitte im Langzeitverhalten eines reparierbaren technischen Objektes nach (Gruhn u. Kafarov 1979)

T_K Kalenderzeit, T_S Stillstandsdauer, T_R Reparaturdauer, T_{TL} Betriebsdauer im Teillastbereich, T_W Wartedauer bis zur Reparatur, T_L Dauer der Fehlerlokalisierung, T_{FB} Dauer der unmittelbaren Fehlerbehebung, T_B Betriebsdauer, T_A Ausfalldauer, T_{NB} Normalbetriebsdauer, T_T Testdauer, T_{PVI} PVI-Dauer, T_I Inspektionsdauer

mit der Ausfallrate vergleichbar, da die Art des charakteristischen Verlaufes von $\mu(t)$ analog zu $\lambda(t)$ nicht möglich ist. Die Erneuerungsrate ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine bis zum Zeitpunkt t ausgefallene Betrachtungseinheit im Intervall $(t, t+\Delta t)$ funktionsfähig, d. h. repariert bzw. erneuert wird.³

$$\mu(t) \cdot \Delta t = P\{t < T_A \leq t + \Delta t \mid T_A > t\}. \quad (5.19)$$

Sie wird gebildet aus

$$\mu(t) = \frac{1}{1 - M(t)} \cdot \frac{dM(t)}{dt} = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \quad (5.20)$$

mit $M(t)$ - Verteilungsfunktion der Reparaturzeit bzw. Ausfalldauer,
 $m(t)$ - Dichtefunktion von $M(t)$.

Empirisch läßt sich die Reparaturrate wie folgt ermitteln

$$\hat{\mu}(t) = \frac{\Delta N_R(t, \Delta t)}{N_R(t) \cdot \Delta t} \quad (5.21)$$

mit $\Delta N_R(t, \Delta t)$ - Anzahl der Elemente, die im Zeitintervall $(t, \Delta t)$ repariert wurden,
 $N_R(t)$ - Anzahl der Elemente, die bis zum Zeitpunkt t nicht repariert wurden.

Die Verteilungsfunktion der Reparaturzeit bzw. Ausfalldauer $M(t)$ ⁴ gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, daß die ausgefallene Betrachtungseinheit in einer Dauer T_A , die gleich oder kleiner einem vorgegebenen Zeitintervall ist, repariert oder erneuert wird. Es gilt

$$M(t) = P\{T_A \leq t\} \text{ für } t \in [0, \infty), \quad (5.22)$$

wobei unter Annahme konstanter Reparaturraten gilt

$$M(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \mu(x) dx\right). \quad (5.23)$$

Die mittlere Reparaturdauer T_A ist definiert als

$$T_A = \int_0^\infty t \cdot \left(\frac{dM(t)}{dt}\right) dt = \int_0^\infty t \cdot m(t) dt, \quad (5.24)$$

wobei die Größe T_A die eigentliche Stillstandszeit nach Abb. 5.2-5 beinhaltet. Bei konstanter Reparaturrate muß gelten

³ An dieser Stelle sei angemerkt, daß neben den Begriffen „Ausfallrate“ und „Reparaturrate“ auch der Begriff „Betriebsrate“ in verschiedenen Literaturquellen benutzt wird. Dies kommt zustande, weil die Ermittlung der Betriebsrate über die jeweiligen Betriebsdauerabstände zwischen 2 Ausfällen erfolgt. Analog zu den beiden zuvor genannten Begriffen wird dann die Betriebsrate gleich $\lambda(t)$ und die Ausfallrate gleich $\mu(t)$ gesetzt.

⁴ In anderen Literaturquellen wird statt $M(t)$ auch $F_R(t)$ oder $G(t)$ bzw. für $m(t)$ gleich $f_A(t)$ verwendet.

$$T_A = \int_0^{\infty} t \cdot \exp(-\mu \cdot t) dt \text{ bzw. } T_A = \frac{1}{\mu}. \quad (5.25)$$

Empirisch läßt sich die mittlere Reparaturdauer wie folgt ermitteln

$$\hat{T}_A = \frac{1}{N(0)} \cdot \sum_{i=1}^{N(0)} t_{A,i} \quad (5.26)$$

Eine weitere entscheidende Kenngröße, aber im Gegensatz zu den zuvor genannten eher selten bei derartigen zu betrachtenden Systemen verwendete, ist die Erneuerungsfunktion $H(t)$. Sie stellt den Erwartungswert der in einem Zeitintervall aufgetretenen Erneuerungen dar. Die dazugehörige Erneuerungsichte $h(t)$ wird über die erste Ableitung nach der Zeit gebildet. Für kleines Δt gibt $h(t) \cdot \Delta t$ die Wahrscheinlichkeit an, daß im Intervall $(t, t+\Delta t)$ eine Erneuerung stattfindet (Köchel 1982). Die Erneuerungsichte $h(t)$ liegt immer vor, wenn $F(t)$ eine Dichte $f(t)$ aufweist.

Eine der wichtigsten Zuverlässigkeitskenngrößen für reparierfähige Betrachtungseinheiten ist die Verfügbarkeit. In Abhängigkeit von der Spezifik des jeweiligen technischen Systems kann sie im allgemeinen bezogen werden auf die Zeit als charakteristische Größe oder die Kapazität bzw. Produktionsleistung.

Beispielsweise werden u. a. in (Preuß u. Schubert 1982; Birolini 1991) verschiedene Verfügbarkeitsarten definiert, wie

- die momentane Verfügbarkeit,
- die Dauerverfügbarkeit,
- die Intervallverfügbarkeit,
- die „augenblickliche“ Intervallverfügbarkeit,
- die durchschnittliche Verfügbarkeit,
- die Missions-Verfügbarkeit,
- die Arbeitsmissions-Verfügbarkeit sowie
- die Verbund-Verfügbarkeit.

Im folgenden wird nur auf die später in diesem Rahmen verwendeten Verfügbarkeitsarten näher eingegangen.

Die *momentane Verfügbarkeit* $V(t)$ ist die Wahrscheinlichkeit dafür, eine reparierfähige Betrachtungseinheit zu einem vorgegebenen Zeitpunkt in einem arbeitsfähigen Zustand anzutreffen. Diese wird ermittelt über

$$V(t) = R(t) + \int_0^t R(t-x) \cdot h(x) dx. \quad (5.27)$$

Bei nichtkonstanten Ausfall- und Reparaturraten ist im allgemeinen die direkte Gleichungsangabe nicht möglich bzw. mit erheblichem numerischen Aufwand verbunden. Für den speziellen Fall – konstante Ausfall- und Reparaturrate – gilt

$$V(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \exp(-(\lambda + \mu) \cdot t). \quad (5.28)$$

Neben der Ausfall- und Reparaturrate übt die Zeit t einen wesentlichen Einfluß auf die momentane Verfügbarkeit aus. Für ausreichend große Zeiten nähert sich die momentane Verfügbarkeit ihrem stationären Wert. Dieser Wert beinhaltet die sogenannte *Dauerverfügbarkeit*. Sie ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine Betrachtungseinheit, die sich im ständigen Nutzungsprozeß befindet, zu einem willkürlich ausgewählten Zeitpunkt arbeitsfähig ist. Es gilt somit

$$V = \frac{E(T_B)}{E(T_B) + E(T_A)} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (5.29)$$

Diese Dauerverfügbarkeit hängt durch die jeweils gegebene mittlere Lebens- und Erneuerungsdauer nicht von der expliziten Gestalt der Verteilungsfunktionen $F(t)$ und $M(t)$ ab (Beichelt u. Franken 1983). Allerdings ist es für beliebige $F(t)$ und $M(t)$ schwer festzustellen, mit welcher Geschwindigkeit sich die momentane Verfügbarkeit dem Grenzwert der Dauerverfügbarkeit nähert. Im allgemeinen kann davon ausgegangen werden, daß sich bei festen Mittelwerten der Grenzwert langsamer einstellt, je kleiner die Summe der Streuungen von Lebens- und Erneuerungsdauer der Betrachtungseinheit ist. Für verschiedene fiktiv gewählte Ausfall- und Reparaturraten ist dieser Sachverhalt aus Abb. 5.2-6 ersichtlich. Dabei wird insbesondere der Einfluß der Reparaturrate μ deutlich.

Für die in dieser Abhandlung betrachteten Versorgungssysteme ist der stationäre Wert der Verfügbarkeit ausreichend, da in den überwiegenden Fällen die mittlere Betriebsdauer gegenüber der mittleren Ausfalldauer um ein Vielfaches größer ist und somit sich die momentane Verfügbarkeit in einer relativ kurzen Zeit dem stationären Wert nähert.

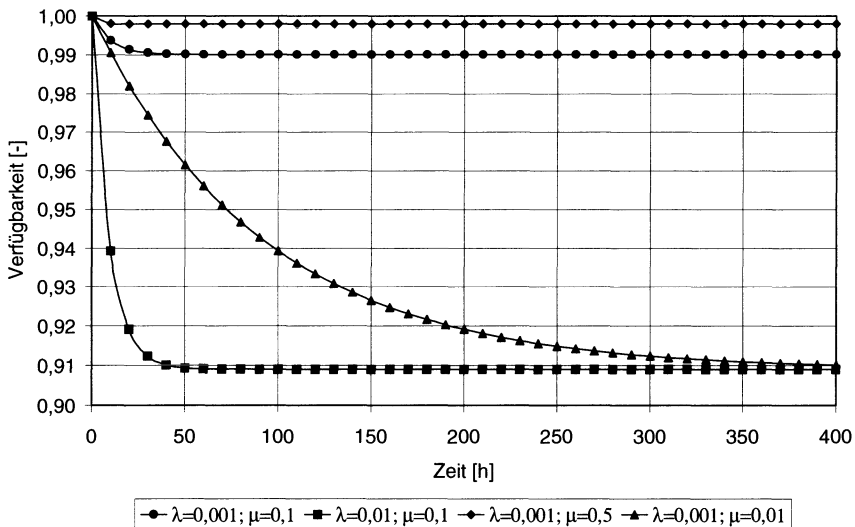


Abb. 5.2-6 Beispielverläufe der momentanen Verfügbarkeit in Abhängigkeit verschiedener Betriebs- und Ausfallraten

Die Intervallverfügbarkeit gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß die Betrachtungseinheit im Intervall $(t, t+\Delta t)$ funktionsfähig ist. Unter der „augenblicklichen“ Intervallverfügbarkeit wird die Intervallverfügbarkeit im nichtstationären Fall verstanden. Die durchschnittliche Verfügbarkeit ist gleich dem erwarteten Prozentsatz der Zeit t , während dem die Betrachtungseinheit funktionsfähig ist.

Die folgenden Verfügbarkeitsarten sind in (Birolini 1991) definiert und ausführlich beschrieben. Dabei ist die *Missions-Verfügbarkeit* gleich der Wahrscheinlichkeit, daß in einer Mission mit der totalen Betriebszeit T_0 kein Ausfall auftreten wird, der nicht innerhalb einer vorgegebenen Zeitdauer t_f repariert werden kann. Die Mission ist bei Versorgungssystemen mit der zu gewährleistenden Versorgungsaufgabe gleichzusetzen. Diese Verfügbarkeitsart kann dort von Bedeutung sein, wo Betriebsunterbrechungen $\leq t_f$ in Kauf genommen werden können. Bei der Berechnung muß u. a. die Restriktion beachtet werden, daß sich die Betrachtungseinheit am Ende der Mission in einem arbeitsfähigen Zustand befindet. Für den speziellen Fall – konstante Ausfall- und Reparaturrate – gilt

$$V_M = \exp(-\lambda \cdot T_0 \cdot \exp(-\mu \cdot t_f)). \quad (5.30)$$

Die Zusammenhänge sind in Abb. 5.2-7 in Abhängigkeit der totalen Betriebsdauer und der maximalen Unterbrechungsdauer dargestellt. Daraus wird ersichtlich, daß mit zunehmender Betriebsdauer bei gleichzeitiger Minimierung der Unterbrechungsdauer die Missions-Verfügbarkeit abfällt. Wird die gewählte Ausfallrate λ von 0,001 auf 0,01 vergrößert, dann fällt die Missions-Verfügbarkeit wesentlich schneller ab.

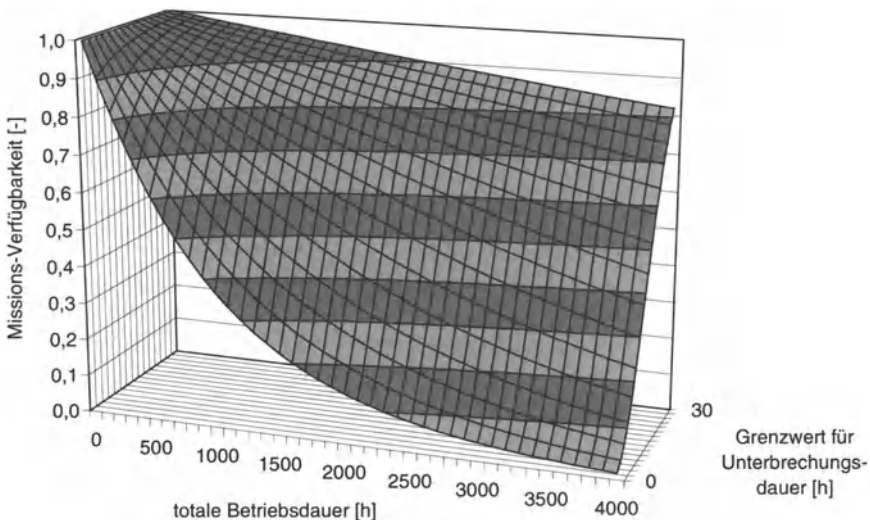


Abb. 5.2-7 Missions-Verfügbarkeit in Abhängigkeit der totalen Betriebsdauer und der maximalen Unterbrechungsdauer mit einer Ausfallrate $\lambda = 0,001$ und einer Reparaturrate $\mu = 0,1$

Ähnlich verhält es sich mit der Arbeitsmissions-Verfügbarkeit. Sie ist gleich der Wahrscheinlichkeit, daß die Summe der Reparaturzeiten aller Ausfälle, die in einer Mission mit der totalen Betriebszeit auftreten, kleiner als eine vorgegebene Zeitdauer ist. Die Verbund-Verfügbarkeit ist gleich der Wahrscheinlichkeit, daß die Betrachtungseinheit zu den beiden Zeitpunkten t und $t+\Delta t$ funktionsfähig ist.

5.2.2.3

Definition der Momente

Theoretische Momente. Für die Beschreibung von Verteilungsfunktionen wird sehr häufig auf die Momente der Zufallsgröße, in diesem Fall steht dafür die Lebensdauer T , zurückgegriffen. Dabei werden unter Momenten Zahlen verstanden, die zur Charakterisierung gewisser Eigenschaften von Zufallsgrößen dienen (Gellert et al. 1979). Das n -te absolute Moment von T ist definiert als

$$E(T - T_0)^n = \int_0^{\infty} (t - T_0)^n \cdot f(t) dt. \quad (5.31)$$

Dabei kann für die Größe $T_0 - T_A$ bzw. T_B eingesetzt werden. Für $T_0 = 0$ gilt für die Anfangsmomente (auch als Nullmomente bezeichnet)

$$m_n = E(T^n) = \int_0^{\infty} t^n \cdot f(t) dt \quad (5.32)$$

mit $m_0=1$. Das Anfangsmoment 1. Ordnung m_1 heißt der Erwartungswert $E(T)$ von T . Der Erwartungswert ist ein Maß für das Zentrum der Verteilung. Für $T_0 = E(T)$ werden mit Gl. (5.31) die zentralen n . Momente $\mu_{(n)}$ erhalten. Von besonderer Bedeutung ist die Varianz $\mu_{(2)}$ (auch Dispersion, Streuung oder mittlere quadratische Abweichung genannt). Sie ist die Maßzahl zur Charakterisierung der Ausbreitung der Verteilung der Zufallsgröße um den Erwartungswert. Zwischen den zentralen Momenten $\mu_{(n)}$ und den Anfangsmomenten m_n besteht für $n = 2, 3, \dots$ folgender Zusammenhang:

– nach (Gellert et al. 1979)

$$\mu_{(n)} = \sum_{k=2}^n (-1)^{n-k} \cdot \left(\frac{n!}{k!(n-k)!} \right) \cdot m_k \cdot m_1^{n-k} + (-1)^{n-1} \cdot (n-1) \cdot m_1^n \quad (5.33)$$

– oder für beliebiges n nach (Rinne 1988; Müller 1991)

$$\begin{aligned} \mu_{(n)} &= \sum_{j=0}^n (-1)^{n-j} \cdot \left(\frac{n!}{j!(n-j)!} \right) \cdot m_j \cdot m_1^{n-j} = \\ &= \sum_{j=0}^n \left(\frac{n!}{j!(n-j)!} \right) \cdot m_{n-j} \cdot (-m_1)^j \end{aligned} \quad (5.34)$$

mit $\mu(0) = 1$ und $\mu(1) = 0$. Insbesondere gilt

$$\mu_{(2)} = D^2(T) = E(T - T_0)^2 = m_2 - m_1^2. \quad (5.35)$$

Die positive Wurzel aus der Varianz mit

$$\sigma = +\sqrt{\mu_{(2)}} \quad (5.36)$$

heißt Streuung oder Standardabweichung und ist somit ein Maß für die Streuung der Verteilung um den Erwartungswert. Mit

$$v = \frac{\sigma}{m_1} \quad (5.37)$$

kann der Variationskoeffizient gebildet werden, welcher als Maßzahl zum Vergleich der Variabilität von Verteilungen benutzt wird. Mit Hilfe des 3. und 4. Momentes werden weitere für die Beschreibung der Verteilung geeignete Maßzahlen definiert, wie die CHARLIERSche Schiefe und der Exzeß (auch Wölbung genannt). Die Schiefe γ_3 (auch mit α_3 bezeichnet) ist eine Maßzahl, die die Asymmetrie einer Verteilung charakterisiert. Der Exzeß γ_4 (auch mit α_4 bezeichnet) ist eine Zahl, die als Maß der Abweichung einer Verteilung von der Normalverteilung mit gleichem Erwartungswert und gleicher Streuung in der Umgebung des Erwartungswertes betrachtet werden kann. Mit

$$\mu_{(3)} = m_3 - 3 \cdot m_2 \cdot m_1 + 2 \cdot m_1^3 \quad (5.38)$$

$$\mu_{(4)} = m_4 - 4 \cdot m_3 \cdot m_1 + 6 \cdot m_2 \cdot m_1^2 - 3 \cdot m_1^4 \quad (5.39)$$

gilt

$$\gamma_3 = \frac{\mu_{(3)}}{\mu_{(2)}^{(3/2)}} \quad (5.40)$$

und

$$\gamma_4 = \left(\frac{\mu_{(4)}}{\mu_{(2)}^2} \right) - 3. \quad (5.41)$$

In (Schaefer 1979 u. Rinne 1988) sind weiterführende Erläuterungen und Darstellungen zur Schiefe und Exzeß enthalten.

Empirische Momente. Neben der empirischen Verteilungsfunktion werden ebenfalls die empirischen Momente betrachtet, um aufgrund der Stichprobe Aussagen über die Zufallsgröße und ihre Verteilungsfunktion zu gewinnen. Für die empirische Momente n. Ordnung bezüglich der reellen Zahl c gilt die Größe

$$\frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m (x_i - c)^n.$$

Speziell für $c = 0$ ergeben sich die empirischen Anfangsmomente

$$\hat{m}_n = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m x_i^n . \quad (5.42)$$

Für $n = 1$ ergibt sich der arithmetische Mittelwert zu

$$\hat{m}_1 = \bar{x} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m x_i . \quad (5.43)$$

Das empirische Moment n . Ordnung bezüglich des arithmetischen Mittels $c = \bar{x}$ heißt empirisches zentrales Moment

$$\hat{\mu}_{(n)} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^n . \quad (5.44)$$

Das Bildungsgesetz zwischen den empirischen Anfangsmomenten und empirischen zentralen Momenten entspricht dem der theoretischen Momente. Weiterhin kann darauf verwiesen werden, daß zur Schätzung der empirischen Streuung die folgende Gleichung nach (Storm 1986)

$$\hat{s}^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.45)$$

verwendet wird. Die Division $(n-1)$ statt n bewirkt, daß $\hat{s}^2$ eine erwartungstreuere Schätzung für die Streuung σ^2 der Grundgesamtheit wird. Der Variationskoeffizient wird dann gebildet aus

$$\hat{v} = \frac{\hat{s}}{\bar{x}} \cdot 100 \% . \quad (5.46)$$

5.2.3

Zuverlässigkeitskenngrößen von verwendeten Verteilungen

5.2.3.1

Allgemeines

Die Ermittlung geeigneter Verteilungsgesetze, die das Ausfallverhalten beschreiben und damit eine Quantifizierung des Zuverlässigkeitsverhaltens der betreffenden Betrachtungseinheit ermöglichen, ist von wesentlicher Bedeutung. Die theoretischen Verteilungen entsprechen allerdings den praktischen meistens nur näherungsweise, wobei durch Modifikation und Kombination dieser Verteilungen jedoch häufig eine gute Approximation praktischer Verteilungen erreicht werden kann. Bei der Analyse der Zuverlässigkeit werden die Verteilungsgesetze bevorzugt, die mit Hilfe einer geringen Anzahl von Zahlenwerten beschrieben werden können. Beispielsweise wird die Exponential-Verteilung nur mit einem Parameter bestimmt; für die WEIBULL-Verteilung werden bereits zwei Parameter benötigt.

Tabelle 5.2-3 Wichtigste angewandte Verteilungstypen in der Zuverlässigkeitstheorie

Verteilungstyp	(Gnedenko et al. 1968)	(Reinschke 1972)	(Frey 1973)	(Singh u. Billinton 1977)	(Barlow u. Proschan 1978)	(Gruhn u. Kafarov 1979)	(Koslow u. Uschakow 1979)	(Köchel 1982)	(Beichelt u. Franken 1983)	(Härtler 1983)	(Kochs 1984)	(MBB 1986)	(Beichelt 1988)	(Kloppel et al. 1990)	(Birolini 1991)
Exponential-Verteilung															
WEIBULL-Verteilung															
Gamma-Verteilung															
ERLANG-Verteilung															
Normalverteilung															
Log-Normalverteilung															
Potenzverteilung															
Gleichverteilung															
Inverse GAUß-Verteilung															
POISSON-Verteilung															

Die ermittelten Verteilungen haben jeweils nur Gültigkeit für den Zeitbereich, für den das Ausfallverhalten aus der Stör- und Schadensstatistik oder experimentell ermittelt wurden. Darauf begründet sind die damit möglichen Aussagen nur bedingt verwendbar und müssen dementsprechend beurteilt werden.

Für die eingeführten Zuverlässigkeitskenngrößen können verschiedene Verteilungen bezüglich der Zufallsgröße T zur Anwendung kommen. Einen Auszug der am wichtigsten Verteilungstypen ist in Tabelle 5.2-3 zusammengestellt.

Im folgenden werden nur die Verteilungen etwas näher betrachtet, die im Zusammenhang mit Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen eine gewisse Bedeutung haben. Dazu zählen in erster Linie die Exponential- und die ERLANG-Verteilung.

5.2.3.2
Exponential-Verteilung

Eine sehr häufig angewendete Verteilung ist die Exponential-Verteilung. Einerseits gehorcht das Ausfallverhalten vieler Betrachtungseinheiten in einem relativ großen Intervall ihres Betriebsalters dieser Verteilung, andererseits erleichtern sich viele mathematische Operationen, insbesondere bei der Berechnung von Zuverlässigkeitskenngrößen komplexer Systeme. Dieser Vorteil darf jedoch nicht unberechtigt wahrgenommen werden, d. h. die Exponential-Verteilung auch dort anzuwenden, wo das nicht gerechtfertigt ist.

Alle weiteren Überlegungen beziehen sich auf die Ausfallrate, gelten aber analog auch für die Reparaturrate. Das vorherrschende Merkmal dieser Verteilung ist

die zeitunabhängige und konstante Ausfallrate. Das bedeutet, daß die vorangegangene Arbeitsfähigkeit einer Betrachtungseinheit deren Ausfallverhalten beeinflußt. Diese wichtige Eigenschaft tritt bei keiner anderen stetigen Verteilung auf, was darin begründet ist, daß die Wahrscheinlichkeit ausfallfreier Arbeit im Intervall $(t, t+\Delta t)$ nur von der Intervall Δt und nicht von der schon abgelaufenen Dauer bis zum Zeitpunkt t abhängt. Dies wird auch als sogenannte Gedächtnislosigkeit bezeichnet. Die Abb. 5.2-8 zeigt den charakteristischen Verlauf der Exponential-Verteilung. In der Tabelle 5.2-4 sind dazu die wichtigsten Zuverlässigkeitskenngrößen zusammengestellt. Hinsichtlich verwandter Verteilungen bestehen Beziehungen u. a. zur Gamma-, ERLANG- und WEIBULL-Verteilung (Rinne 1988).

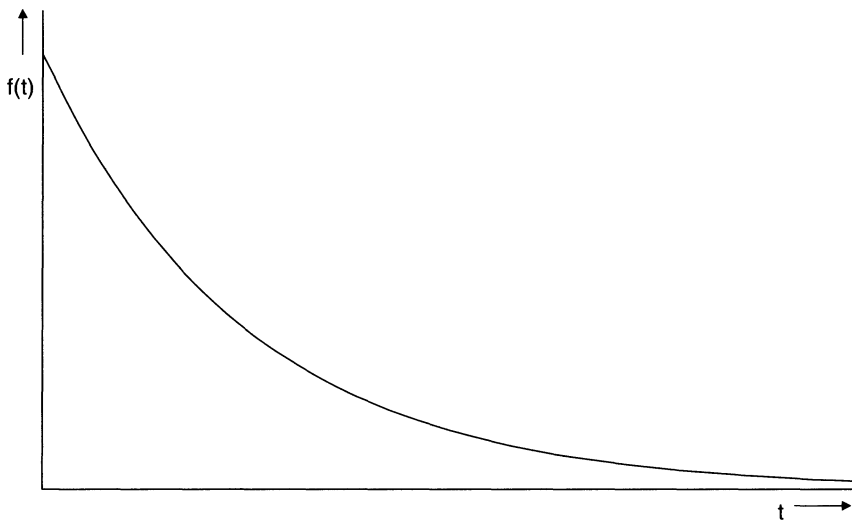


Abb. 5.2-8 Dichte der Exponential-Verteilung

Tabelle 5.2-4 Zuverlässigkeitskenngrößen der Exponential-Verteilung

Kenngröße	Gleichung	
Dichte	$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$ mit $t > 0, \lambda > 0$	(5.47)
Ausfallwahrscheinlichkeit	$F(t) = 1 - \exp(-\lambda \cdot t)$	(5.48)
empirische Momente	$m_n = n! \cdot \frac{1}{\lambda^n}$	(5.49)
zentrale Momente	$\mu_{(n)} = \sum_{j=0}^n \left(\frac{n!}{j!(n-j)!} \right) \cdot (-1)^j \cdot (n-j)! \cdot \frac{1}{\lambda^n}$	(5.50)
Schiefte	$\gamma_3 = 2$	(5.51)
Exzeß	$\gamma_4 = 6$	(5.52)

Tabelle 5.2-5 Zuverlässigkeitskenngrößen der Hyper-Exponential-Verteilung

Kenngröße	Gleichung	
Dichte (Teil i)	$f_i(t) = \lambda_i \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t)$ mit $t > 0, \lambda_i > 0$	(5.53)
Dichte (Gesamt)	$f(t) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot f_i(t)$ mit $a_i > 0, \sum_{i=1}^k a_i = 1$	(5.54)
Ausfallwahrscheinlichkeit (Teil i)	$F_i(t) = 1 - \exp(-\lambda_i \cdot t)$	(5.55)
Ausfallwahrscheinlichkeit (Gesamt)	$F(t) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot F_i(t)$	(5.56)
empirische Momente	$m_n = \sum_{i=1}^k n! a_i \cdot \frac{1}{\lambda_i^n}$	(5.57)

5.2.3.3**Hyper-Exponential-Verteilung**

Die Hyper-Exponential-Verteilung stellt eine Mischung von k Exponential-Verteilungen dar. Gegenüber der einfachen Exponential-Verteilung kann durch diese Mischung eine qualitativ bessere Anpassung an die empirische Funktion realisiert werden. In der Tabelle 5.2-5 sind dazu die wichtigsten Zuverlässigkeitskenngrößen zusammengestellt.

5.2.3.4**ERLANG-Verteilung**

Die ERLANG-Verteilung⁵ hat ihren Ursprung in der Bedienungstheorie und tritt als Verallgemeinerung der Exponential-Verteilung auf. Die ERLANG-Verteilung der Ordnung n mit den Parametern $\lambda > 0$ ergibt sich aus der Gamma-Verteilung für ganzzahlige n . Der Parameter λ wirkt sich auf die Kurvenform der Dichtefunktion in der Weise aus, daß der Erwartungswert steigt und die Kurve flacher verläuft, wenn sich dieser verringert. Der Parameter n beeinflußt dagegen insbesondere die Symmetrie der Verteilungsform. Die Abb. 5.2-9 zeigt verschiedene charakteristische Verläufe der ERLANG-Verteilung. In der Tabelle 5.2-6 sind dazu die wichtigsten Zuverlässigkeitskenngrößen zusammengestellt. Dabei gibt es unterschiedliche Herleitungen für die Momente, wie beispielsweise in (Heinz 1969).

Für $n = 1$ liegt eine Exponential-Verteilung vor. Hinsichtlich verwandter Verteilungen bestehen Beziehungen u. a. zur Gamma-, χ^2 - sowie Normalverteilung (Rinne 1988; Birolini 1991).

⁵ A. K. ERLANG (1878–1929).

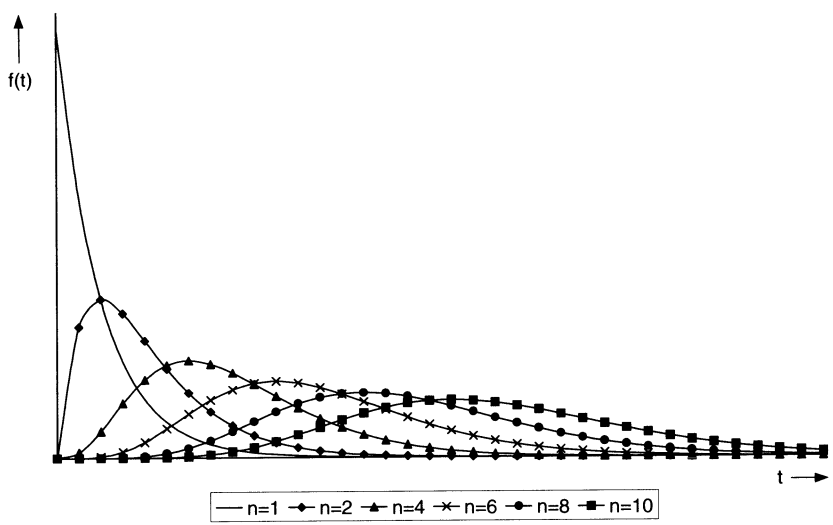


Abb. 5.2-9 Dichte der ERLANG-Verteilung unterschiedlicher Ordnung n

Tabelle 5.2-6 Zuverlässigkeitskenngrößen der ERLANG-Verteilung

Kenngröße	Gleichung	
Dichte	$f(t) = \frac{\lambda^n}{(n-1)!} \cdot t^{(n-1)} \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$ mit $t > 0, \lambda > 0$	(5.58)
Ausfallwahrscheinlichkeit	$F(t) = 1 - \left(\sum_{j=0}^{n-1} \frac{(\lambda \cdot t)^j}{j!} \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \right)$	(5.59)
empirische Momente	$m_k = \left(\prod_{i=1}^k (n + i - 1) \right) \cdot \frac{1}{\lambda^k}$	(5.60)
zentrale Momente	$\mu_{(2)} = \frac{n}{\lambda^2}$	(5.61)
	$\mu_{(3)} = \frac{2 \cdot n}{\lambda^3}$	
	$\mu_{(4)} = \frac{(3 \cdot n \cdot (n + 2))}{\lambda^4}$	
Schiefe	$\gamma_3 = \frac{2}{\sqrt{n}}$	(5.62)
Exzeß	$\gamma_4 = \frac{6}{n}$	(5.63)

Tabelle 5.2-7 Zuverlässigkeitskenngrößen der Hyper-ERLANG-Verteilung

Kenngröße	Gleichung
Dichte (Teil i)	$f_i(t) = \frac{\lambda_i^{n_i}}{(n_i - 1)!} \cdot t^{(n_i - 1)} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t) \text{ mit } t > 0, \lambda_i > 0 \quad (5.64)$
Dichte (Gesamt)	$f(t) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot f_i(t) \text{ mit } a_i > 0, \sum_{i=1}^k a_i = 1 \quad (5.65)$
Ausfallwahrscheinlichkeit (Teil i)	$F_i(t) = 1 - \left(\sum_{j=1}^k \frac{(\lambda_i \cdot t)^j}{j!} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t) \right) \quad (5.66)$
Ausfallwahrscheinlichkeit (Gesamt)	$F(t) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot F_i(t) \quad (5.67)$
empirische Momente	$m_m = \left(\sum_{i=1}^k a_i \cdot \left(\prod_{l=1}^m (n_i + m - l) \right) \right) \cdot \frac{1}{\lambda_i^m} \quad (5.68)$

5.2.3.5

Hyper-ERLANG-Verteilung

Die Hyper-ERLANG-Verteilung stellt eine Mischung von k ERLANG-Verteilungen dar. Gegenüber der einfachen ERLANG-Verteilung kann durch diese Mischung eine qualitativ bessere Anpassung an die empirische Funktion realisiert werden. In der Tabelle 5.2-7 sind dazu die wichtigsten Zuverlässigkeitskenngrößen zusammengestellt.

5.3

Zuverlässigkeit technischer Systeme

5.3.1

Erläuterung zum Systembegriff

Ein technisches System besteht aus einer endlichen Menge von Elementen, deren Verknüpfungen die Struktur des Systems ergeben, die für die Erfüllung der Funktion erforderlich ist.

Die Erfüllung einer geforderten Systemzuverlässigkeit ist durch Redundanzbildung und andere Formen struktureller Änderungen möglich. Im Zusammenhang damit steht die notwendige Quantifizierung der Abhängigkeit der Systemzuverlässigkeit von der Zuverlässigkeit der einzelnen Elemente, deren Anzahl und strukturellem Aufbau. Gegeben durch diese Tatsachen wird es möglich, die Effektivität der einzelnen Maßnahmen der Zuverlässigkeitserhöhung abzuschätzen und das sich daraus der potentiellen Unzuverlässigkeit ergebende Risiko zu prognostizieren.

Die Zuverlässigkeit von Systemen ist im allgemeinen von verschiedenen Einflußfaktoren abhängig, wie u. a. Schaltungsaufbau, Anordnung der Elemente, Alterung. Diese Einflußfaktoren und ihr gegenseitiges Zusammenwirken sind oft

nicht bekannt, so daß in den überwiegenden Fällen nur ungenügend technisch begründete Daten über das Ausfallverhalten der zur Anwendung kommenden Elemente existent sind. Deshalb kann die Zuverlässigkeit komplexer Systeme nur als Orientierungswert ermittelt werden und steht somit nur zum Vergleich alternativer Varianten zur Verfügung.

Aus diesem Grunde sollte über die erforderliche Zuverlässigkeit eines Systems und dessen Elemente nur in Verbindung mit dem konkreten Anwendungsfall entschieden werden, da ein und dasselbe System bzw. Element in unterschiedlichen Betriebsfällen bei dessen Ausfall Schadenskosten verschiedener Größe verursachen kann.

Zur grundsätzlichen Unterscheidung der verschiedenen Systeme hat es sich auf dem Gebiet der Zuverlässigkeitsbetrachtungen als zweckmäßig und notwendig erwiesen, die Begriffe – einfaches und kompliziertes – technisches System einzuführen (Müller 1986). Obwohl gegenwärtig noch keine allgemein verbindlichen, hinreichenden Definitionen dieser Termini existieren, können diese Systeme wie folgt charakterisiert werden. *Einfache Systeme* bestehen aus einer begrenzten Anzahl von Elementen (etwa ≤ 1000) und haben eine einfache, nur gering vermaschte Struktur. Diese werden in den überwiegenden Fällen nur mit den beiden Systemzuständen – Betrieb und Ausfall – beschrieben. *Komplizierte Systeme* haben dagegen eine vermaschte und verzweigte, oft hierarchische Struktur mit einer meist bedeutenden Anzahl von Elementen (> 1000). Die Elemente sind untereinander unterschiedlich verknüpft und weisen in vielen Fällen einen hohen Kopplungsgrad auf. Des weiteren werden komplizierte Systeme durch 3 oder mehr Systemzustände charakterisiert.

Offensichtlich stellen einfache Systeme Sonderfälle komplizierter Systeme dar. Deshalb können die Methoden zur Analyse und Berechnung der Zuverlässigkeit komplizierter Systeme prinzipiell auch für einfache Systeme angewendet werden.

Die Grenze der Elementanzahl ist auf die in diesem Buch betrachteten Versorgungssysteme nicht eindeutig übertragbar. Einen wesentlichen Einfluß darauf übt die Einteilung des Systems in dessen Elemente aus, d. h. das ein System mit weniger als 1000 Elementen und vermaschter Struktur durchaus als kompliziertes System angesehen werden kann.

5.3.2

Systemaufbereitung

Der Ermittlung der Zuverlässigkeit eines Systems ist stets eine Analyse hinsichtlich des Struktur- und Funktionsausfallverhaltens voranzustellen. Das Ziel einer Zuverlässigkeitsanalyse besteht darin, festzustellen, mit welcher Wahrscheinlichkeit das betrachtete System bzw. Element seiner Strukturaufgaben und Funktionen erfüllt bzw. nicht erfüllt.

Der Begriff Struktur wird in der heutigen technischen Fachsprache sehr häufig, aber in recht vielfältiger und teilweise unterschiedlicher Weise verwendet. Ausgehend von der Wortbedeutung ist darunter die Art und Weise des Zusammenfügens der einzelnen Bestandteile zu einem Ganzen zu verstehen, während aber für das Ergebnis des Zusammensetzens meistens der Begriff System verwendet wird.

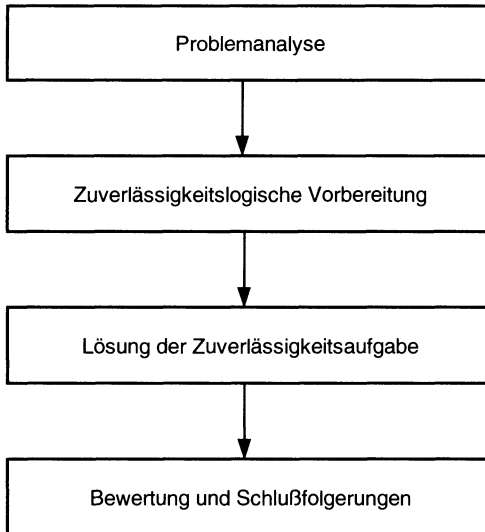


Abb. 5.3-1 Vorgehensweise einer Zuverlässigkeitsanalyse

Die Zuverlässigkeitsstruktur der meisten Systeme ist keineswegs offensichtlich. Diese muß jedoch bekannt sein, um

- Zuverlässigkeitskenngrößen des Systems in Abhängigkeit von den Zuverlässigkeitskenngrößen seiner Elemente diskutieren zu können,
- Schwachstellen des Systems zu analysieren und
- Maßnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeitsstruktur abzuleiten.

Im folgenden einige grundlegende Bemerkungen zur systemanalytischen Beurteilung des zu betrachtenden Systems. Diese Untersuchungen haben das Ziel, die zur Ableitung quantitativer Zuverlässigkeitsforderungen benötigten Ausgangsangaben zu bewerten und begründete Aussagen über die erforderlichen und real möglichen Zuverlässigkeitskennwerte zu erhalten. Die eigentliche Zuverlässigkeitsanalyse eines Systems hat in der Regel folgende Schwerpunkte zum Inhalt (Abb. 5.3-1).

Ausgangspunkt bildet zunächst die Abgrenzung des zu analysierenden Systems sowie dessen Einflußgrößen, um somit Wesentliches vom Unwesentlichen zu trennen. Dabei sind gleichzeitig die Umgebungsbedingungen und das Betriebsverhalten, unter dem der Einfluß von Elementen auf das Verhalten des Systems und damit auf dessen Zuverlässigkeit verstanden werden soll, mit zu berücksichtigen.

Im nächsten Schwerpunkt werden die Elemente des Systems definiert. Diese Festlegung ist für die weiteren Untersuchungen von großer Bedeutung, da die jeweiligen Elemente des Systems entweder als einzelnes Bauteil oder als Baugruppe aufgefaßt werden können. Im realen technischen Schaltbild kann z. B. das Element Rohrleitung der Zuverlässigkeitersatzschaltung aus mehreren Schaltbildelementen, wie dem Rohr selbst, der Isolierung, Kompensatoren, Lagerung, Unterstützung usw. bestehen (s. a. Abb. 5.2-1). Diese Festlegung sowie die der Systemzustände, welche die Betriebs- und Ausfallzustände des Systems umfassen,

sind zum einen von der Unterteilung des Systems in seine Elemente abhängig, zum anderen, inwieweit dafür Ereignisstatistiken existieren oder aus vorhandenen diese gewonnen werden können. Letzteres sollte aber nicht unbedingt von der Aufstellung des Modells abhängig gemacht werden, aber trotzdem Berücksichtigung finden. Der Grund dafür liegt darin, daß, je mehr das Element – beispielsweise eine Armaturo – in seine Bauteile zerlegt und betrachtet wird, genauere Aussagen zur Zuverlässigkeit des jeweils betroffenen Bauteils gemacht werden können, unter der Voraussetzung, daß die dafür notwendigen Daten als Eingangsgrößen zur Verfügung stehen.

Der dritte Schwerpunkt umfaßt das Verfahren zur Lösung der Zuverlässigkeitsaufgabe. Für die Berechnung der Zuverlässigkeit von komplizierten und komplexen Systemen existiert eine Vielzahl mathematischer Modelle und Theorien.

Obwohl bereits in vielen Netzen Maßnahmen im zuverlässigkeitslogischen Sinne realisiert wurden, wie z. B. Parallel- und Maschensysteme, erfolgten bisher keine konkreten Bewertungen dieser Maßnahmen. Erst mittels einer Bewertung des Systems kann eigentlich der Nachweis erfolgen, ob diese Maßnahmen einen Beitrag zur Zuverlässigkeitserhöhung bzw. -stabilisierung leisten.

Der letzte Schwerpunkt der Zuverlässigkeitsanalyse beinhaltet somit einerseits die Bewertung der in Ansatz gebrachten Modelle, andererseits die daraus zu ziehenden Schlußfolgerungen für die Systemgestaltung sowie für die Fahr- und Einsatzweise des Systems. Dabei sollte aber beachtet werden, daß die Aussagekraft der gewonnenen Ergebnisse von Zuverlässigkeitsbewertungen sowohl vom zugrunde gelegten Datenmaterial als auch von der Genauigkeit der Umsetzung des zu betrachtenden Systems in ein Modell abhängt. Deshalb ist hier ein sehr kritischer Rückblick auf alle vorangegangenen Schritte unbedingt erforderlich.

5.3.3 Zuverlässigkeitslogische Grundstrukturen

5.3.3.1 Einleitung

Im vorherigen Abschnitt wurden die Zuverlässigkeitskenngrößen für Elemente ohne und mit Erneuerung bzw. Reparatur behandelt. Im folgenden werden die zu einem System verbundenen Elemente hinsichtlich ihres strukturellen Zusammenwirkens beschrieben. Vom Standpunkt der Zuverlässigkeit werden grundsätzlich 2 Systemstrukturen – Serien-/Reihensystem und Parallelsystem – unterschieden. Es handelt hierbei um reduzierbare Zuverlässigkeitsstrukturen. Andere Strukturen, wie beispielsweise k-von n-Systeme oder Maschensysteme sind stets auf die beiden Systemstrukturen (Serie oder Parallel) direkt oder mit Hilfe von Methoden, wie Minimalweg oder Minimalschnitt, zurückzuführen. Diese werden auch als irreduzierbare Zuverlässigkeitsstrukturen bezeichnet.

Prinzipiell kann eine Struktur mehrere Ein- und Ausgänge besitzen, so daß für ihre Betrachtungen gewisse Vereinfachungen zu treffen sind. Dazu gehört, daß die hier ausgewiesenen Zuverlässigkeitskennwerte stets für einen Ausgang bzw. für einen konkret festzulegenden Bezugspunkt gelten. Bei den Elementenausfällen

handelt es sich um unabhängige Ereignisse, d. h. die Elemente beeinflussen sich untereinander nicht. Für die Fälle, wo sich dieses als nicht richtig erweist, ist das vorhandene System dementsprechend zuverlässigkeitslogisch aufzubereiten.

5.3.3.2

Reduzible Zuverlässigkeitsstrukturen

Seriensystem. Seriensysteme sind Strukturen ohne Redundanz oder Reserve. Ein Seriensystem hinsichtlich der Funktionsfähigkeit ist ein System, welches funktioniert, wenn alle seine Elemente funktionieren, d. h. es wird eine logische UND-Schaltung realisiert (Abb. 5.3-2).

Ein Seriensystem im zuverlässigkeitslogischen Sinne muß keine Serienschaltung von Elementen oder Teilsystemen innerhalb des zu betrachtenden Systems im schaltungstechnischen Sinne sein. Viele technische Systeme, dazu gehören auch die Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme, sind als Systeme ohne Redundanz oder Reserven ausgelegt, so daß sich aus zuverlässigkeitslogischer Sicht sich hier stets Seriensysteme ergeben.

Als erstes wird der einfache Fall betrachtet, daß die im Seriensystem enthaltenen Elemente bei Ausfall nicht erneuert oder repariert werden. Das System ist dabei zum Zeitpunkt $t = 0$ funktionsfähig. Bis zu einem Zeitpunkt $t > 0$ kann es zum Ausfall eines Elementes und damit zum Ausfall des Seriensystems kommen.

Die Wahrscheinlichkeit des Systems S , daß n Elemente funktionstüchtig sind, lautet für $n = 2$ für unabhängige Elemente

$$P(S) = P(E_1 \cap E_2) = P(E_1) \cdot P(E_2) \quad (5.69)$$

und, obwohl bei den zu treffenden Vereinfachungen ausgeschlossen, für abhängige Elemente

$$P(S) = P(E_1 \cap E_2) = P(E_1) \cdot P(E_2 / E_1). \quad (5.70)$$

Die Elemente E_1 und E_2 sind unabhängig, wenn das Eintreten von E_2 ohne Einfluß auf die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von E_1 und umgekehrt ist, d. h.

$$P(E_1 / E_2) = P(E_1) \text{ und } P(E_2 / E_1) = P(E_2). \quad (5.71)$$

Ist die Überlebenswahrscheinlichkeit der einzelnen Elemente $R_1(t)$, $R_2(t)$, ..., $R_n(t)$, dann gilt für Überlebenswahrscheinlichkeit des Seriensystems

$$R_{SS}(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (5.72)$$

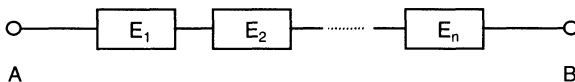


Abb. 5.3-2 Zuverlässigkeitersatzschaltung Seriensystem

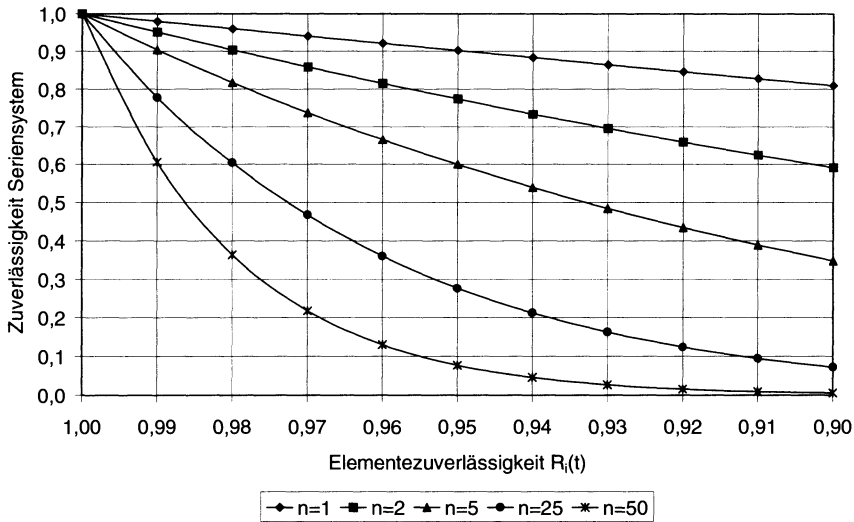


Abb. 5.3-3 Zuverlässigkeit eines Seriensystems in Abhängigkeit von der Anzahl n gleicher Elemente

Die Ausfallwahrscheinlichkeit wird bestimmt über

$$F_{SS}(t) = 1 - R_{SS}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i(t)). \quad (5.73)$$

Die Zuverlässigkeit eines Seriensystems ist stets kleiner als die kleinste Elementezuverlässigkeit, d. h. $R_{SS}(t) \leq R_i(t)$ bzw. $F_{SS}(t) \geq F_i(t)$. Je mehr Elemente sich in einem Seriensystem befinden, desto kleiner wird die Gesamtzuverlässigkeit. Dieser Sachverhalt wird in Abb. 5.3-3 dargestellt.

Daraus kann beispielsweise entnommen werden, daß ein Seriensystem mit 25 Elementen, deren jeweilige Zuverlässigkeit $R_i(t) = 0,94$ beträgt, nur noch eine Systemzuverlässigkeit von $R_{SS}(t) = 0,21$ besitzt. Da alle Elemente die gleiche Zuverlässigkeit haben, dürfte nicht den praktischen Gegebenheiten entsprechen. Hier kann ein einzelnes Element mit einer geringen Zuverlässigkeit erheblich die Zuverlässigkeit des Seriensystems herabsetzen. Sprichwörtlich umgesetzt heißt dies, eine Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied.

Für die Ausfallrate gilt

$$\lambda_{SS}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (5.74)$$

bzw. für den Spezialfall $\lambda_{SS}(t) = \text{konst.}$ (Exponential-Verteilung)

$$\lambda_{SS} = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (5.75)$$

Elemente in Seriensystemen, die nach dem Ausfall erneuert oder repariert werden, sind durch eine Ausfallrate λ_i und eine Reparaturrate μ_i gekennzeichnet. Für den Spezialfall $\lambda_i = \mu_i = \text{konst.}$ und die Gl. (5.75) erfolgt die Berechnung der Reparaturrate des Seriensystems μ_{SS} über den Ansatz der Dauerverfügbarkeit. Ein Seriensystem ist nur dann verfügbar, wenn die einzelnen Elemente des Systems verfügbar sind. Somit gilt für ein Seriensystem mit 2 reparierbaren Elementen

$$V_{SS} = V_{E_1} \cdot V_{E_2} = \frac{\mu_{SS}}{\lambda_{SS} + \mu_{SS}} = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}. \quad (5.76)$$

Diese Gleichung nach μ_{SS} umgestellt ergibt

$$\mu_{SS} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\mu_1 \cdot \mu_2}}.$$

In den überwiegenden praktischen Fällen ist λ sehr viel kleiner als μ , so daß sich die Berechnung der Reparaturrate μ_{SS} erheblich vereinfacht zu

$$\mu_{SS} = \frac{\lambda_{SS}}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}}. \quad (5.77)$$

Parallelsystem. Bei Parallelsystemen wird ein und dieselbe Funktion von mehreren Elementen (Zweigen) erfüllt, so daß offensichtlich mehr Elemente (Zweige) vorhanden sind als zur Erfüllung der Funktion notwendig. Ein Parallelsystem ist hinsichtlich der Funktionsfähigkeit ein System, welches bereits mit einem Element funktioniert, d. h. es wird eine logische ODER-Schaltung realisiert (Abb. 5.3-4). Es wird deshalb auch von redundanten Strukturen oder, im Falle gleicher Elemente (Zweige) von Strukturen mit Reserve gesprochen.

Grundsätzlich müssen Parallelsysteme im zuverlässigkeitslogischen Sinne nicht notwendig mit Parallelschaltungen im eigentlichen Sinne identisch sein. Hier sei ein Beispiel aus der Elektrotechnik angeführt. Seriengeschaltete Relaiskontakte, deren Aufgabe darin besteht, den Stromkreis zu unterbrechen, ergeben vom Standpunkt der Zuverlässigkeit her gesehen ein Parallelsystem.

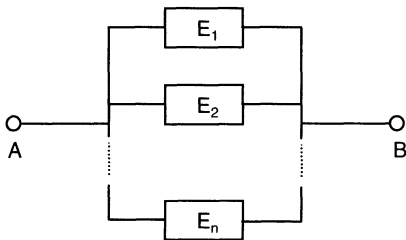


Abb. 5.3-4 Zuverlässigkeitsersatzschaltung Parallelsystem

Als erstes wird wieder der einfache Fall betrachtet, daß die im Parallelsystem enthaltenen Elemente bei Ausfall nicht erneuert oder repariert werden. Das System ist dabei zum Zeitpunkt $t = 0$ funktionsfähig. Bis zu einem Zeitpunkt $t > 0$, der als Bezugspunkt festgelegt wird, können die parallelen Elemente (Zweige) ausgefallen oder funktionsfähig sein.

Die Wahrscheinlichkeit des Systems S , daß mindestens ein Element funktionsfähig ist, lautet für $n = 2$ für unabhängige und abhängige Elemente

$$P(S) = P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2) - P(E_1 \cap E_2). \quad (5.78)$$

Ist die Ausfallwahrscheinlichkeit der einzelnen Elemente $F_1(t)$, $F_2(t)$, ..., $F_n(t)$, dann gilt für die Ausfallwahrscheinlichkeit des Parallelsystems

$$F_{PS}(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_n(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t). \quad (5.79)$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeit wird bestimmt über

$$R_{PS}(t) = 1 - F_{PS}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)). \quad (5.80)$$

Die Zuverlässigkeit eines Parallelsystems ist stets größer als die größte Elementezuverlässigkeit, d. h. $R_{PS}(t) \geq R_i(t)$ bzw. $F_{PS}(t) \leq F_i(t)$. Die Wirkung von Redundanz ist in Abb. 5.3-5 ersichtlich. Je mehr Elemente mit gleicher Zuverlässigkeit $R_i(t)$ betrieben werden, desto größer wird die Zuverlässigkeit des Parallelsystems.

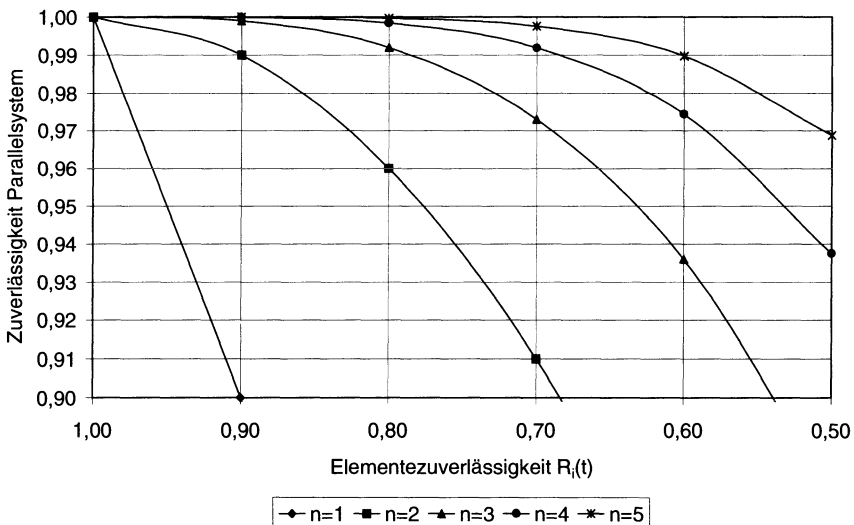


Abb. 5.3-5 Zuverlässigkeit eines Parallelsystems in Abhängigkeit von der Anzahl n gleicher Elemente

Mit

$$R_i(t) \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau\right),$$

eingesetzt in Gl. (5.80) wird ersichtlich, daß die Zuverlässigkeit des Parallelsystems nicht mehr explizit dargestellt werden kann. Dies trifft ebenfalls für die Annahme einer konstanten Ausfallrate zu. Für die Ausfallrate gilt

$$\lambda_{PS}(t) \neq \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (5.81)$$

Die Berechnung der Ausfallrate $\lambda_{PS}(t)$ kann mit

$$\lambda_{PS}(t) = \frac{dR_{PS}(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R_{PS}(t)} \quad (5.82)$$

erfolgen. Für den in der Praxis eher selten auftretenden Fall mit n identischen Elementen und konstanter Ausfallrate λ_i vereinfachen sich die Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit und der Ausfallrate des Parallelsystems zu

$$R_{PS}(t) = 1 - (1 - \exp(-\lambda_i \cdot t))^n \quad (5.83)$$

$$\lambda_{PS}(t) = \frac{n \cdot \lambda_i \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t) \cdot (1 - \exp(-\lambda_i \cdot t))^{n-1}}{1 - (1 - \exp(-\lambda_i \cdot t))^n}. \quad (5.84)$$

Die Strukturgestaltung eines Systems hat großen Einfluß auf die Systemzuverlässigkeit. Entsprechende Beispiele dazu enthalten Abb. 5.3-6 und 5.3-7.

Elemente in Parallelsystemen, die nach dem Ausfall erneuert oder repariert werden, sind durch eine Ausfallrate λ_i und eine Reparaturrate μ_i gekennzeichnet. Die Berechnung der Ausfallrate des Parallelsystems λ_{PS} erfolgt über den Ansatz der Unverfügbarkeit. Ein Parallelsystem ist nicht verfügbar, wenn alle Elemente des Systems nicht verfügbar sind. Somit gilt für ein Parallelsystem mit 2 reparierbaren Elementen

$$U_{PS} = U_{E1} \cdot U_{E2} = \frac{\lambda_{PS}}{\lambda_{PS} + \mu_{PS}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2}. \quad (5.85)$$

Diese Gleichung nach λ_{PS} umgestellt ergibt

$$\lambda_{PS} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2}\right)}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2}}.$$

In den überwiegenden praktischen Fällen ist λ sehr viel kleiner als μ , so daß sich die Berechnung der Ausfallrate λ_{PS} erheblich vereinfacht zu

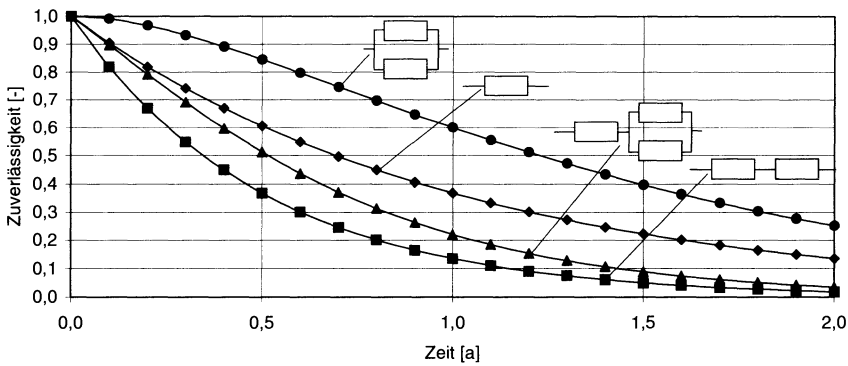


Abb. 5.3-6 Elementeeinfluß auf die Systemzuverlässigkeit ($\lambda = 1,0 \text{ a}^{-1}$ für alle Elemente)

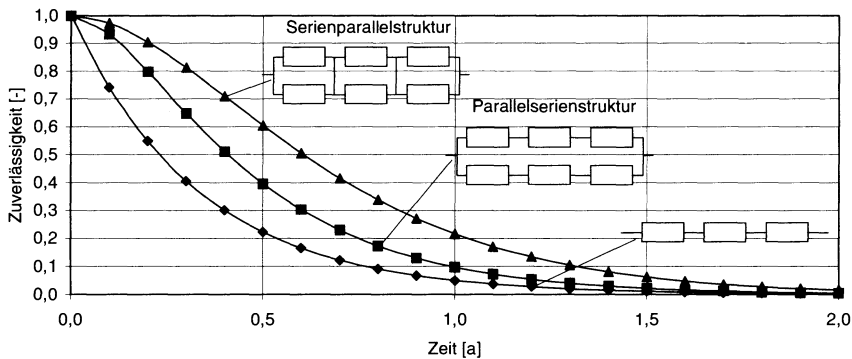


Abb. 5.3-7 Einfluß der Strukturgestaltung auf die Systemzuverlässigkeit ($\lambda = 1,0 \text{ a}^{-1}$ für alle Elemente)

$$\lambda_{PS} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \right). \quad (5.86)$$

Ist die Reparaturrate μ konstant, dann kann die Gl. (5.86) für n-parallele Elemente geschrieben werden

$$\lambda_{PS} = \prod_{i=1}^n \lambda_i. \quad (5.87)$$

Die Reparaturrate μ_{PS} für Parallelsysteme selbst kann aus der Verteilungsfunktion der Ausfalldauer $M(t)$ hergeleitet werden, wobei gilt

$$M_{PS}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - M_i(t)). \quad (5.88)$$

Ausgangspunkt für die Herleitung bildet die Gleichung für 2 Elemente

$$M_{PS}(t) = M_1(t) + M_2(t) - M_1(t) \cdot M_2(t), \quad (5.89)$$

Gl. (5.23) sowie eine konstante Reparaturrate $\mu_i(t) = \text{konst.}$ Nach Einsetzen in die vorherige Gleichung ergibt sich nach der Vereinfachung

$$M_{PS}(t) = 1 - \exp(-(\mu_1 + \mu_2) \cdot t) \quad (5.90)$$

bzw. nach der Verallgemeinerung

$$M_{PS}(t) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot t\right). \quad (5.91)$$

k-von n-System. Dieses System ist eine partielle Parallelstruktur, bei der alle Elemente einer gleichen Belastung unterworfen sind. Hinsichtlich der Funktionsfähigkeit liegt ein redundantes System vor, wenn von n Elementen mindestens k funktionieren (Abb. 5.3-8).

Durch diese Strukturgestaltung kann der Grad der Überdimensionierung von Elementen in Parallelsystemen, allerdings mit einer Verschlechterung der Systemzuverlässigkeit, herabgesetzt werden. Solche Strukturen treten in den seltensten Fällen bei Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen auf.

Die Zuverlässigkeit für solche Systeme, bestehend aus gleichen Elementen mit konstanten Ausfallraten, erfolgt über

$$R_{rS} = \sum_{j=k}^n \left(\frac{n!}{j!(n-j)!} \right) \cdot R^j \cdot (1-R)^{(n-j)} \quad (5.92)$$

oder

$$R_{rS} = \sum_{j=0}^{n-k} \left(\frac{n!}{j!(n-j)!} \right) \cdot R^{(n-j)} \cdot (1-R)^j. \quad (5.93)$$

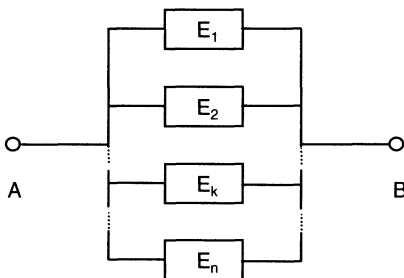


Abb. 5.3-8 Zuverlässigkeitsersatzschaltung k-von n-System

Für reparierbare Elemente kann anstelle der Überlebenswahrscheinlichkeit die Dauerverfügbarkeit und die Nichtverfügbarkeit eingesetzt werden.

Serienparallelsysteme. In der Praxis auftretende Systeme bestehen selten aus reinen Serien- oder reinen Parallelsystemen. Häufig stellen sie sich als gemischte Serienparallelsysteme (s. a. Abb. 5.2-7) dar, die eine beliebige Kombination von Serien- und Parallelsystemen sind. Die Berechnung derartiger gemischter Systeme ist mit den zuvor aufgezeigten Gleichungen möglich. Die Vorgehensweise ist dabei so, daß zuerst die Elemente der Serienstrukturen und danach die Elemente der Parallelstrukturen zu Modulen zusammengefaßt werden. Für das sich dann ergebende Seriensystem, bestehend aus Elementen und Modulen, kann somit die Zuverlässigkeit berechnet werden.

Bei der Zusammenfassung der Serien- und Parallelsysteme ist zu prüfen, ob es eventuell Ursachen für einen gemeinsamen Ausfall, d. h. Abhängigkeiten zwischen den Elementen, gibt. Dabei ist insbesondere zu beachten, daß die vorangegangenen Bemerkungen nur für Elemente mit den beiden Zuständen – Betrieb und Ausfall – zutreffen, was aber eher nur selten den praktischen Gegebenheiten entspricht.

5.3.3.3 Irreduzible Zuverlässigkeitsstrukturen

Irreduzible Systeme sind vermaschte Systeme, d. h. es sind redundante Systeme, bei denen die einzelnen Teilsysteme und Elemente so angeordnet sind, daß das Gesamtsystem eine vermaschte Struktur ergibt. Sie können zuverlässigkeitslogisch durch Serienparallelsysteme ersetzt werden. Es existieren aber auch Systeme, die nicht auf elementare Serienparallelsysteme zurückgeführt werden können. Das am häufigsten verwendete Beispiel ist die Brückenstruktur (Abb. 5.3-9). Es sind dabei Elemente vorhanden, die in mehrere Funktionspfade eingehen.

Zur Analyse und Bewertung solcher vermaschter Strukturen wurden verschiedene Methoden und Verfahren auf der Grundlage des BOOLEschen Zuverlässigkeitsmodells entwickelt, welche im Anschluß kurz beschrieben werden sollen. Ansonsten sei auf die entsprechende Literatur verwiesen.

Jede Zuverlässigkeitersatzschaltung kann durch einen Graphen dargestellt werden. Die Zweige des Graphen entsprechen dabei den Elementen zwischen 2 Knoten, so daß jeder Zweig zwei verschiedene Knoten des Systems verbindet. Die

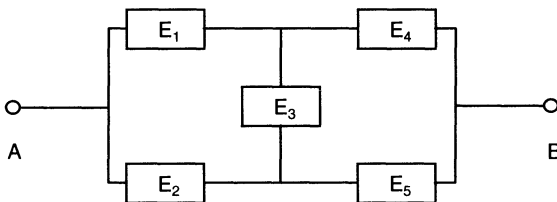


Abb. 5.3-9 Strukturbild eines vermaschten Systems (Brückenstruktur)

Anzahl der Knoten wird durch die Struktur des Systems bestimmt. Jede strukturelle Verbindung vom Eingang zum Ausgang des Graphen wird als Weg bzw. Pfad bezeichnet. Wird dabei innerhalb einer Verbindung (Weg) kein Knoten des Graphen mehr als einmal durchlaufen, dann ist der Weg ein Minimalweg.

Minimalwegmethode. Das Verfahren der Minimalwege beruht im wesentlichen darauf, daß das vermaschte System in eine Ersatzstruktur eines Serienparallelsystems überführt wird. Hinsichtlich der Funktionsfähigkeit läßt sich die Ersatzschaltung äquivalent durch ein Parallelsystem der Ersatzschaltungen sämtlicher Minimalwege ersetzen. Grundsätzlich gibt es zu jeder Aussage über die Funktionsfähigkeit eine gleichwertige Aussage über den Ausfall eines Systems. Jeder Minimalweg besteht aus n Elementen, die entsprechend ihrer konjunktiven Verknüpfung zu Ersatzfunktionen zusammengefaßt werden können, d. h.

$$S_j(\underline{x}) = \bigcap_{i=1}^n x_i = \prod_{i=1}^n x_i. \quad (5.94)$$

Bei Vorhandensein von insgesamt m Minimalwegen ist die Systemfunktion $S(\underline{x}) = 1$, wenn wenigstens einer der fiktiven Minimalwege als Verbindung von A nach B besteht. Die Systemfunktion $S(\underline{x})$ ist durch die BOOLEsche Addition aller $S_j(\underline{x})$ gegeben mit

$$S(\underline{x}) = \bigcup_{w=1}^m S_j(\underline{x}) = 1 - \prod_{w=1}^m \left(1 - \prod_{i=1}^{n_w} x_{w,i} \right). \quad (5.95)$$

Anhand des Beispiels aus Abb. 5.3-9 wird die Vorgehensweise näher beschrieben. Ausgehend davon existieren somit 4 Wege (s. Abb. 5.3-10), welche zuverlässigkeitslogisch aufbereitet Abb. 5.3-11 zeigt.

Bei der Berechnung der Zuverlässigkeit des Systems ist zu beachten, daß gleiche Elemente mehrmalig in der Systemfunktion auftreten und somit ein besonderes Vorgehen notwendig wird. Der Einfachheit halber wird das Element E_i gleich x_i gesetzt. Die Systemfunktion S lautet dazu folgendermaßen

$$S(x_1, \dots, x_5) = 1 - (1 - x_1 x_3 x_5) \cdot (1 - x_2 x_3 x_4) \cdot (1 - x_1 x_4) \cdot (1 - x_2 x_5).$$

Nach Ausmultiplizieren und Zusammenfassen dieser Beziehung sowie der Anwendung des Idempotenz-Axioms BOOLEscher Variablen mit

$$x_i^2 \rightarrow x_i \quad (5.96)$$

ergibt sich für diese vermaschte Struktur in Linearform

$$\begin{aligned} S(x_1, \dots, x_5) &= x_1 x_4 + x_2 x_5 + x_1 x_3 x_5 + x_2 x_3 x_4 - \\ &\quad - x_1 x_2 x_3 x_4 - x_1 x_2 x_3 x_5 - x_1 x_2 x_4 x_5 - x_1 x_3 x_4 x_5 - \\ &\quad - x_2 x_3 x_4 x_5 + 2 \cdot x_1 x_2 x_3 x_4 x_5. \end{aligned}$$

Anstelle der BOOLEschen Variablen x_i können entsprechend die Überlebenswahrscheinlichkeit $R_i(t)$ oder die Verfügbarkeit V_i in die Systemfunktion eingesetzt werden.

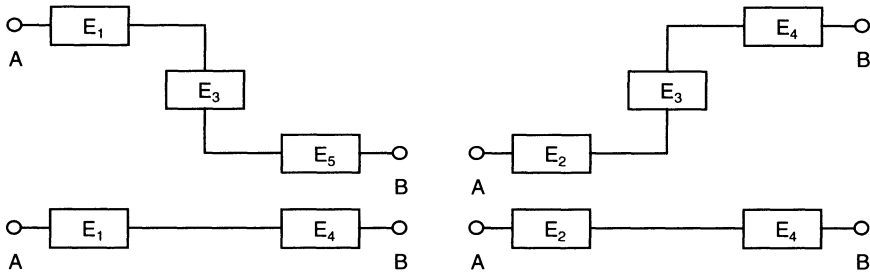


Abb. 5.3-10 4 Wege der Brückenstruktur

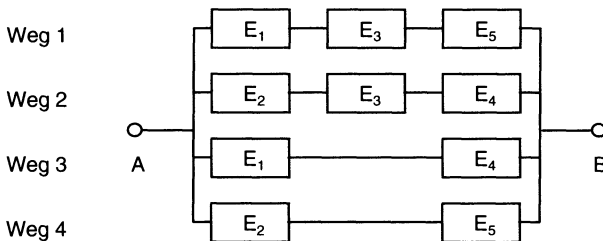


Abb. 5.3-11 Zuverlässigkeitslogische Aufbereitung (Minimalweg) der Brückenstruktur

Übertragen auf Versorgungssysteme würde dies heißen, daß das System funktionsfähig ist, solange mindestens ein Strang (Weg) funktioniert. Diese Herangehensweise kann aber in Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen nicht bzw. nur bedingt angewendet werden, da solche Versorgungssysteme nur funktionieren, solange alle oder mindestens 3 Stränge bei dieser Brückenstruktur funktionieren (in Abhängigkeit des erforderlichen Leistungstransports von A nach B).

Minimalschnittmethode. Bei einem Minimalschnitt werden zwischen dem Eingangs- und Ausgangsknoten eines Graphen gerade soviel Zweige aufgetrennt, daß die Systemfunktion den Wert 0 erhält. Die Systemfunktion geht in den Wert 1 über, wenn ein beliebig geschnittener Zweig i eines Minimalschnittes geschlossen wird. Hinsichtlich der Funktionsfähigkeit läßt sich die Ersatzschaltung äquivalent durch ein Seriensystem der Ersatzschaltungen sämtlicher Minimalschnitte ersetzen. Jeder Minimalschnitt kann zu einer äquivalenten Ersatzfunktion zusammengefaßt werden, d. h.

$$S_j(\underline{x}) = \bigcup_{i=1}^n (1 - x_i) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i). \quad (5.97)$$

Bei Vorhandensein von insgesamt s Minimalschnitten ist die Systemfunktion $S(\underline{x}) = 0$, wenn wenigstens ein $S_j(\underline{x}) = 0$ ist, d. h. keine Verbindung von A nach B besteht. Die Systemfunktion $S(\underline{x})$ ist durch die BOOLEsche Produkt aller $S_j(\underline{x})$ gegeben mit

$$S(\underline{x}) = \bigcap_{s=1}^n S_j(\underline{x}) = \prod_{s=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^{n_s} (1 - x_{s,i}) \right). \quad (5.98)$$

Anhand des Beispiels aus Abb. 5.3-9 wird die Vorgehensweise näher beschrieben. Ausgehend davon existieren somit 4 Schnitte, welche zuverlässigkeitslogisch aufbereitet Abb. 5.3-12 zeigt. Somit gilt für die Systemfunktion

$$S(x_1, \dots, x_5) = (1 - (1 - x_1)(1 - x_2))(1 - (1 - x_4)(1 - x_5)) \times \\ \times (1 - (1 - x_1)(1 - x_3)(1 - x_5))(1 - (1 - x_2)(1 - x_3)(1 - x_4)).$$

Nach Zusammenfassen dieser Beziehung sowie der Anwendung des Idempotenz-Axioms BOOLEscher Variablen ergibt sich für diese vermaschte Struktur in Linearform wieder dasselbe Ergebnis, wie bei der Minimalwegmethode.

Grundsätzlich existieren Vor- und Nachteile für beide zuvor vorgestellten Methoden. Der Aufwand zur Ermittlung der Systemfunktion für vermaschte Systeme kann bei beiden Methoden erheblich sein, insbesondere bei der Minimalschnittmethode, wenn keine Vereinfachungen getroffen werden. Schon bei relativ einfachen Systemstrukturen hat die Systemfunktion in Linearform komplizierte Ausdrücke mit vielen Einzeltermen. Die Minimalwegmethode ist vorzugsweise bei seriell ausgebildeten Strukturen mit wenigen Minimalwegen und die Minimalschnittmethode vorzugsweise bei stärker parallel ausgebildeten Strukturen mit vielen Minimalwegen anzuwenden (Kloepfel et al. 1990). Des weiteren ist die Minimalwegmethode gut geeignet, die Wichtigkeit einzelner Elemente im System zu erkennen. Von Vorteil bei der Minimalschnittmethode ist, daß nur Terme der Minimalschnitte erster, zweiter und eventuell dritte Ordnung bei der Systemfunktion hinsichtlich des Ausfalls berücksichtigt werden brauchen, was im immer kleineren Anteil der höheren Terme an der Systemfunktion begründet liegt. Dies gilt um so mehr, je zuverlässiger die einzelnen Elemente sind. Bei der Minimalwegmethode gibt es diese verkürzte Form nicht. Wesentlich geringer wird der Aufwand auch dann, wenn bei beiden Methoden die Impotenz $x_i \cdot x_i = x_i$ und nicht x_i^2 unbeachtet bleibt und nicht ausmultipliziert wird. Bei der Minimalwegmethode kommen dabei zu große und bei der Minimalschnittmethode zu kleine Werte heraus. Der daraus entstehende Fehler wird mit größer werdender Zuverlässigkeit der einzelnen Elemente immer kleiner und kann somit vernachlässigt werden. Dies ist aber im konkreten Anwendungsfall zu überprüfen.

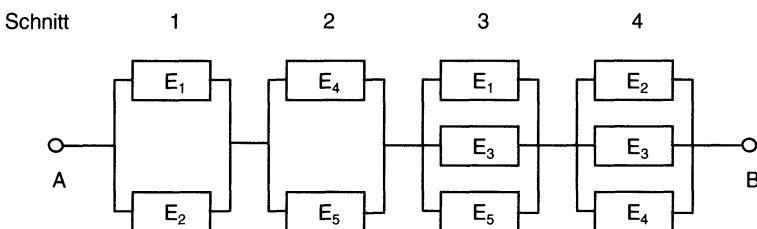


Abb. 5.3-12 Zuverlässigkeitslogische Aufbereitung (Minimalschnitt) der Brückenstruktur

6 Modellauswahl und Modelldefinition

6.1 Allgemeines

Mit den in Kap. 5 gezeigten Grundlagen für die Berechnung der Zuverlässigkeit erfolgt in diesem Kapitel die Modellauswahl und Modelldefinition für Versorgungssysteme, im speziellen Fall der Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme.

Ausgangspunkt bildet zunächst die Abgrenzung des zu untersuchenden Versorgungssystems sowie dessen Einflußgrößen, um somit Wesentliches vom Unwesentlichen zu trennen. Dabei sind gleichzeitig die Umgebungsbedingungen und das Betriebsverhalten, unter dem der Einfluß von Elementen auf das Verhalten des Systems und damit auf deren Zuverlässigkeit verstanden werden soll, mit zu berücksichtigen. Entscheidend ist auch die Definition der Elemente innerhalb des zu betrachtenden Systems. Diese Festlegung ist für die weiteren Untersuchungen von Bedeutung, da die jeweiligen Elemente des Systems entweder als einzelnes Bauteil oder als Baugruppe aufgefaßt werden können. Im realen technischen Schaltbild kann im Fernwärmeversorgungssystem z. B. das Element Rohrleitung der Zuverlässigkeitersatzschaltung aus mehreren Schaltbildelementen, wie dem Rohr selbst, der Isolierung, Kompensatoren, Lagerung usw. oder bei Wasserversorgungssystemen aus unterschiedlichen Rohrwerkstoffen bestehen. Diese Festlegung sowie die der Systemzustände, welche die Betriebs- und Ausfallzustände des Systems umfassen, sind zum einen von der Unterteilung des Systems in seine Elemente abhängig, zum anderen, inwieweit dafür Ereignisstatistiken mit Aufzeichnungen über Störungen, Schäden und Ausfälle existieren oder aus vorhandenen diese gewonnen werden können. Letzteres sollte aber nicht unbedingt von der Aufstellung des Modells abhängig gemacht werden, aber trotzdem Berücksichtigung finden. Der Grund dafür liegt darin, daß, je mehr das Element – beispielsweise eine Armatur – in seine Bauteile zerlegt und betrachtet wird, genauere Aussagen zur Zuverlässigkeit des jeweils betroffenen Bauteils gemacht werden können, unter der Voraussetzung, daß die dafür notwendigen Daten als Eingangsgrößen zur Verfügung stehen.

Hinsichtlich der Lösung der Zuverlässigkeitsaufgabe von komplizierten und komplexen Systemen existiert eine Vielzahl mathematischer Modelle und Theorien. Laut dem Ergebnis der Literaturrecherche können aber keine Modellansätze anderer technischer Systeme auf Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme übertragen werden. Die Gründe dafür liegen in der Spezifik dieser Versorgungssysteme, z. B. muß eine ausgefallene Armatur nicht zum Teil- bzw. Totalausfall des

Systems führen. Obwohl bereits in vielen Netzen Maßnahmen im zuverlässigkeitslogischen Sinne realisiert wurden, wie beispielsweise Parallel- und Maschensysteme, erfolgten bisher keine konkreten Bewertungen dieser Maßnahmen. Erst mit Hilfe einer Bewertung des Systems kann eigentlich der Nachweis erfolgen, ob diese Maßnahmen einen Beitrag zur Zuverlässigkeitserhöhung bzw. -stabilisierung leisten.

Im Anschluß an die Systemanalyse erfolgt einerseits die Bewertung des in Ansatz gebrachten Modells, andererseits die daraus zu ziehenden Schlußfolgerungen für die Systemgestaltung sowie für die Fahr- und Einsatzweise des Systems. Dabei sollte aber beachtet werden, daß die Aussagekraft der gewonnenen Ergebnisse von Zuverlässigkeitsbewertungen sowohl vom zugrunde gelegten Datenmaterial als auch von der Genauigkeit der Umsetzung des zu betrachtenden Systems in ein Modell abhängt. Deshalb ist hier ein sehr kritischer Rückblick auf alle vorangegangenen Schritte unbedingt erforderlich.

Dazu wird es für notwendig erachtet, im folgenden einige Ausführungen zu den verschiedenen mathematischen Modellen zu machen. Bevor die Aufstellung des mathematischen Modells zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme im einzelnen erfolgt, werden eigens dafür Modellbedingungen geschaffen, die dazu dienen sollen, bestehende Systeme ohne Genauigkeitsverlust für die Berechnungen zu vereinfachen. Dazu werden die erforderlichen Schemata für das Aufstellen von Modellen für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen erarbeitet. Unter Anwendung der bisher gewonnenen Erkenntnisse bei der Berechnung der Zuverlässigkeit verschiedener Systeme werden Modelle in Ansatz gebracht, welche das Betriebsverhalten dieser Versorgungssysteme widerspiegeln.

6.2

Mathematische Modelle

Für die Zuverlässigkeitsanalyse von Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen können verschiedene Modelle zur Lösung dieser Aufgabe zur Anwendung kommen. Die Entscheidung auf Anwendung eines bestimmten Modellansatzes hängt in erster Linie auch von den anzustellenden Betrachtungen ab. Diese richten sich vor allem nach

- den technologischen Besonderheiten, insbesondere nach den existierenden Verknüpfungsstrukturen zwischen den Elementen,
- der Art und dem Umfang der vorhandenen Primärdaten über das Ausfallverhalten der einzelnen Elemente,
- der Anzahl der zu berücksichtigenden Funktionszustände der Elemente und folglich des Systems und
- dem Auflösungsgrad des technischen Systems (Anzahl der Elemente).

Die wichtigsten Möglichkeiten der einzelnen analytischen und simulativen Modelle zur Lösung der Zuverlässigkeitsaufgabe sind in Abb. 6.2-1 dargestellt.

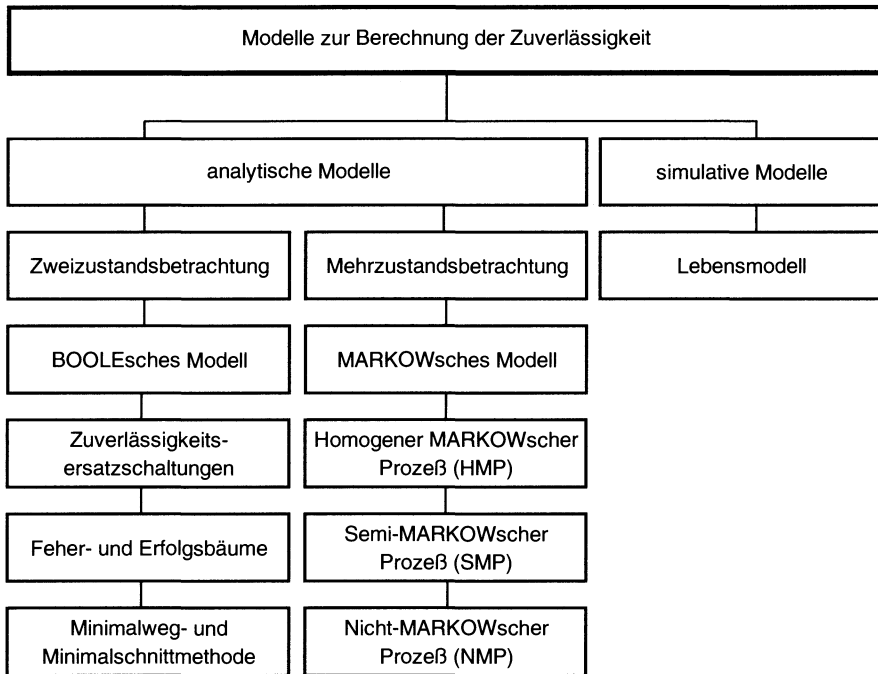


Abb. 6.2-1 Übersicht über die wichtigsten Modelle zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen

Analytische Modelle. Die analytischen Berechnungen sind effektiv und sollten dann verwendet werden, wenn es möglich ist, ein Modell zur Berechnung der Zuverlässigkeit zu entwickeln, das zum einen eine sinnvolle Darstellung des Systems erlaubt, zum anderen mit vertretbarem Aufwand lösbar ist (Singh u. Billinton 1977), heute um so mehr durch die dezentrale Computertechnik.

Die weitere Untergliederung der analytischen Modelle geschieht anhand der festgelegten und möglichen Zustände des zu untersuchenden Systems. Dabei basiert das *BOOLEsche Modell*¹ auf der Berücksichtigung von nur 2 Zuständen für die Elemente und das System – Betrieb oder Ausfall. Dagegen ist die Zustandsanzahl bei MARKOWschen Modellen² unbegrenzt. Die MARKOWschen Modelle schließen aber als Spezialfall die BOOLEschen Modelle mit ein und beide Modelle lassen eine Verknüpfung untereinander zu (Gruhn u. Kafarov 1979).

Die Bezeichnung des BOOLEschen Modells als binäres Zuverlässigkeitsmodell bzw. Zweizustandsmodell ist nicht ganz korrekt (Michler 1977). Das kommt daher, weil zwischen dem Modellsystem, in diesem Fall des Zweizustandsmodell-Systems und dem mathematischen Modell unterschieden werden muß. Somit stellt

¹ G. Boole (1815–1869).

² A. A. Markow (1856–1922); der Name wurde und wird am Ende abwechselnd mit ff, v oder w geschrieben.

das BOOLEsche Modell ein mögliches mathematisches Modell für Zweizustandsmodell-Systeme dar. Dies gilt ebenso für das MARKOWsche Modell.

Die wichtigsten Lösungsmöglichkeiten der BOOLEschen Modelle für die Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemelementen sind aus Abb. 6.2-1 ersichtlich. Die Aufstellung der Zuverlässigkeitersatzschaltungen erfolgt mittels der bekannten Grundstrukturen, wie Serien-, Parallel- und redundanten Strukturen (k - von n -Struktur), welche im einzelnen bereits im vorherigen Kapitel erläutert wurden. Diese Strukturen werden auch reduzierbare Strukturen genannt, d. h. vollständig auflösbar, zerlegbar, wie es bei unvermaschten Systemen der Fall ist. Bei den Fehlerbäumen wird von einem Systemausfall (dem sogenannten Hauptereignis) ausgegangen. Anschließend wird dieses Ereignis zurückgeführt auf die Ausfälle der Elemente (sogenannte Basisereignisse). Somit beschreibt ein Fehlerbaum grafisch die logischen Zusammenhänge (mit den Logiksymbolen UND/ODER) zwischen beiden Ereignissen. Weniger verwendet werden Erfolgsbäume, welche eine Rückführung der Systemarbeitsfähigkeit auf die Elementearbeitsfähigkeiten beinhalten. Somit können Erfolgsbäume ohne großen Aufwand durch Fehlerbäume und umgekehrt ersetzt werden, indem aus einem z. B. gegebenen Fehlerbaum die logischen Verknüpfungssymbole UND durch ODER sowie ODER durch UND und alle vorkommenden Ereignisse jeweils durch ihre Negation ersetzt werden. Geben die Zuverlässigkeitersatzschaltungen nur die zuverlässigkeitslogischen Zusammenhänge zwischen den Elementen im betrachteten System wieder, erlauben dagegen Fehlerbäume, funktions- und umgebungsbedingte Beanspruchungen zu berücksichtigen. Beim Aufstellen von Fehlerbäumen für Systeme muß beachtet werden, daß der totale Fehlerbaum, der alle Ereignisse berücksichtigt, ständig überprüft werden muß, um den subjektiven Faktor eben bei diesen Aufstellungen so gering wie möglich zu halten. Zwar sind Fehlerbäume in ihrer Handhabung einfacher, aber für Variantenrechnungen bei der Gestaltung von Systemen zu aufwendig. Eine umfangreiche Sammlung von Fehlerbäumen, beispielsweise für Kernkraftwerke, sind in (Risikostudie 1981b) dargestellt. Eine sehr häufig angewandte Lösungsmöglichkeit bei BOOLEschen Modellen sind die Minimalweg- und Minimalschnittmethode, welche bei irreduziblen Zuverlässigkeitsstrukturen angewandt werden. Irreduzierbare Strukturen sind vermaschte Systeme, d. h. es sind redundante Systeme, bei denen die einzelnen Elemente so angeordnet sind, daß das System eine vermaschte Struktur ergibt. Diese können zuverlässigkeitslogisch auf Ersatzstrukturen von Serienparallel- oder Parallelseriensystemen zurückgeführt werden. Als Beispiel dafür gilt die sogenannte Brückenstruktur. Die spezielle Vorgehensweise wurde in Kap. 5 näher beschrieben.

Das MARKOWsche Modell zur Berechnung der Zuverlässigkeit ist ein nichtbinäres Modell für Mehrzustandsbetrachtungen, das sich auf spezielle stochastische Prozesse, die MARKOW-Prozesse stützt (Kardos et al. 1986). Der Zustand $Z(t)$ des Systems für einen festen Zeitpunkt $t \geq 0$ wird als Zufallsgröße interpretiert (Reinschke 1972). Ein zufälliger Prozeß $Z(t)$ wird dann als MARKOWscher Prozeß bezeichnet, wenn das Auftreten eines zufälligen Zustandes der Menge $M = \{z_0, z_1, \dots, z_m\}$ nur von unmittelbar davor auftretenden Zuständen abhängt und nicht von weiter zurückliegenden. Diese Eigenschaft wird als Nachwirkungsfreiheit oder als MARKOW-Eigenschaft bezeichnet.

Tabelle 6.2-1 Klassifizierung der prinzipiell möglichen Prozeßtypen nach (Kochs 1984)

Prozeßtyp	Zustandsbedingung	Zeitbedingung
Homogener MARKOWscher Prozeß	wird automatisch durch die Zeitbedingung erfüllt	erfüllt
Semi-MARKOWscher Prozeß	erfüllt	nicht erfüllt
Nicht-MARKOWscher Prozeß	nicht erfüllt	wird automatisch durch die Zustandsbedingung nicht erfüllt

Die dabei in Abb. 6.2-1 angegebene Klassifizierung der möglichen Prozeßtypen kann anhand der beiden nachfolgenden Bedingungen vorgenommen werden (Tabelle 6.2-1). Dabei besagt die MARKOWsche Zustandsbedingung, daß ein Übergang von einem Zustand z_i in einen anderen z_{i+1} nur vom letzten Zustand z_i und nicht von den Zuständen davor, d. h. von Zuständen z_k mit $k < i$ abhängt. Dagegen besagt die MARKOWsche Zeitbedingung, daß ein Zustandsübergang im ausreichend kleinem Zeitintervall $(t, t+dt)$ nur von dem Zeitpunkt t und nicht von weiter zurückliegenden Zeitpunkten $x < t$ abhängt.

Simulative Modelle. Bei diesen Modellen ist das Spektrum vollständig lösbarer Probleme größer als bei analytischen Modellverfahren. Die Funktionsweise des Verfahrens beruht darauf, daß die Zuverlässigkeit des Systems durch wiederholte Simulation von Betriebsperioden oder Ausfallabständen berechnet wird. Hierbei werden Ausfälle von Elementen mit Hilfe eines Zufallsgenerators simuliert und ihre Auswirkungen auf das System untersucht. Eine effektive Möglichkeit der Auswertung dieses Zeitverhaltens eines Systems besteht darin, eine Statistik durch häufige Wiederholung dieses Vorganges über die Systemausfälle zu erstellen, die Schätzwerte und/oder Vertrauensbereiche für die Systemzuverlässigkeit liefert (Gruhn u. Kafarov 1979; MBB 1986). Die simulativen Modelle sind gegenüber den analytischen Modellen einfacher in der Theorie und bei der Programmierung (MBB 1986). Weiterhin ist es möglich, beliebige Effekte mit zu berücksichtigen.

Werden die analytischen und die simulativen Modelle miteinander verglichen, so zeigt sich, daß zwar mit Hilfe der simulativen Modelle komplizierte Systeme mit relativ geringem Aufwand simuliert werden können, diese aber gleichfalls zum Nachweis des Zuverlässigkeitsverhaltens extrem zuverlässiger Systeme (Elektroenergie-, Nachrichten- oder Raumfahrtssysteme) nur bedingt oder gar nicht geeignet sind, da zur Ermittlung des charakteristischen Ereignisses – Ausfall – eine große Anzahl von Simulationen erforderlich ist (Gruhn u. Kafarov 1979; Kochs 1984; MBB 1986). Dagegen bieten die analytischen Modelle, wenn sie überhaupt anwendbar sind, die Vorteile der Transparenz des Rechenweges, der einfachen sowie schnellen Rechenausführung und sie liefern im Rahmen der Rechengenauigkeit und der eventuell verwendeten Näherungen exakte Ergebnisse. Jedoch ist das Spektrum der exakt lösbaren Probleme kleiner. Auch hier ist ebenfalls die Bearbeitung von komplizierten Systemen beschränkt. Eine weitere quantitative Aussage, hinsichtlich der Begrenzung der Anzahl von Elementen, ist in (Frey 1988) enthalten.

Für beide Modelle existieren verschiedene Computerprogramme. Bei der Beurteilung solcher Programme hat sich gezeigt, daß die Fähigkeiten – z. B. hinsichtlich der maximal verarbeitbaren Logikdiagramme – oft nicht sehr wesentlich über das hinausgehen, was ein geschickter Bearbeiter manuell in Form von Näherungslösungen leisten kann.

6.3

Auswahl des mathematischen Modells

Im vorherigen Abschnitt wurden die wichtigsten Modelle für die Berechnung der Zuverlässigkeit für verschiedenartige technische Systeme, wie z. B. der Elektro-, der Luft- und Raumfahrt-, der Kernkraftwerks-, der Verfahrens-, der Militär-, Nachrichtentechnik dargestellt.

Was unter Zuverlässigkeit bzw. für reparable Systeme Verfügbarkeit verstanden wird, wurde bereits in Kap. 5 definiert. Es ist im allgemeinen die Eigenschaft einer Betrachtungseinheit, während einer festgelegten Zeitdauer eine geforderte Funktion unter vorgegebenen Arbeitsbedingungen ausfallfrei zu gewährleisten. Die geforderten Funktionen können bei Fernwärmesystemen verschiedenartig sein, wie beispielsweise die Betriebszeit, die Wärmeleistung, die Temperatur, der Druck, die Druckdifferenz beim Abnehmer usw. Gleiches gilt für Wasserversorgungssysteme. Hier spielen die Betriebszeit, die Menge, der Druck und die Wasserqualität eine wesentliche Rolle.

Anhand der Vorteile, wie der Möglichkeit des sinnvollen Überführens des Systems in ein Modell, Transparenz des Rechenweges sowie einfache und schnelle Rechenausführung wird für die weiteren Zuverlässigkeitsuntersuchungen von Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen die Gruppe der analytischen Modelle ausgewählt.

Die *BOOLEschen Modelle* gestatten die Berücksichtigung von 2 Zuständen für die Elemente und das System. Dabei müssen folgende Bedingungen für die Anwendbarkeit dieses Modells erfüllt sein:

- Das System besteht aus einer endlichen Anzahl von Elementen.
- Jedes Element und das System können nur 2 Funktionszustände einnehmen, Betrieb oder Ausfall.
- Ein nicht betriebsfähiges System wird durch den weiteren Ausfall von Elementen bzw. Teilsystemen nicht wieder betriebsfähig, bzw. ein System, das bei einer bestimmten Anzahl von Elementen gleichfalls betriebsfähig ist, verliert diesen Zustand nicht, nachdem weitere Elemente wieder betriebsfähig geworden sind (Monotonieeigenschaft).

Diesen BOOLEschen Modellen sind Grenzen in der Anwendbarkeit gesetzt (Müller 1986; Bär et al. 1987; Reinschke u. Usakov 1987), welche anhand spezifischer Charakteristika der betrachteten Versorgungssysteme im folgenden näher erläutert werden sollen.

Für die Zuverlässigkeitsanalyse der hier betrachteten Versorgungssysteme sind die erwähnten 2 Zustände – betriebsfähig und ausgefallen – unzureichend, da ein

Elementeausfall, wie beispielsweise eine undichte oder nicht vollständig schließende Armatur, nicht bedingt zum Systemausfall führen muß. Des weiteren wird vorausgesetzt, daß das betroffene Element sofort – ohne Wartezeit – repariert werden kann. Dieser Fakt trifft ebenfalls nicht für solche Systeme zu, da z. B. mehrere notwendige Reparaturen, begrenzt durch vorhandenes Reparaturpersonal, nicht gleichzeitig durchgeführt werden können. Andererseits ist es für solche Systeme typisch, mit einem ausgefallenen Element zunächst weiter zu versorgen, vor allem dann, wenn die Reparatur dieses Elements die Außerbetriebnahme des Systems erfordert. Bei Fernwärmesystemen wird deshalb nicht selten erst nach der Heizperiode die Reparatur durchgeführt, um somit den Versorgungsausfall für den Abnehmer so gering wie möglich zu halten. Weiterhin können für jedes Element, unabhängig von der Unterteilung innerhalb des Systems, mehrere Ausfallarten gelten, was natürlich voraussetzt, daß solche Ausfallarten aus Ereignisstatistiken gewonnen werden können. Derartige verschiedene Ausfallarten lassen sich bei BOOLEschen Modellen nur berücksichtigen, indem den gleichen Elementen mehrere Unterelemente zuwiesen werden, was aber bei komplexen Systemstrukturen schnell unübersichtlich wird. Außerdem trifft für mehrere Ausfallarten die Problematik der stochastischen Unabhängigkeit meistens nicht mehr zu.

Diese hier aufgezählten Nachteile führen zur Auswahl neuer Lösungsansätze für Probleme der Zuverlässigkeitsbewertung von Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen, wie Mehrzustandsmodelle, d. h. MARKOWscher Modelle.

Der Vorteil des *MARKOWschen Modells* besteht insbesondere darin, daß es nicht an die Beschränkung auf eine bestimmte Anzahl von Zuständen gebunden ist, obwohl im konkreten Fall allerdings aus Gründen des mathematischen Aufwandes eine Beschränkung der Zustandsanzahl erfolgen wird (Kochs 1984). Voraussetzung für die praktische Anwendung MARKOWscher Modelle ist die Existenz eindeutig voneinander abgrenzbarer Zustände und entsprechender Übergangswahrscheinlichkeiten.

Die Auswahl einer geeigneten Methode zur Ermittlung der Zustandswahrscheinlichkeiten ist im allgemeinen eine komplizierte Aufgabe. Diese Auswahl ist abhängig u. a.:

- vom Typ des Systems und seiner Struktur,
- der Einsatz- und Instandsetzungsstrategie,
- den Einsatzbedingungen und weiteren Faktoren, die sich auf das Funktionsverhalten des Systems und seiner Elemente auswirken.

Die Auswahl der am besten geeigneten Methode erfordert eine sorgfältige systemanalytische Arbeit. Bedingungen dafür sind (Müller 1986):

- die Definition der möglichen und notwendig zu betrachtenden Systemzustände,
- die Beschreibung der Bedingung, unter denen die verschiedenen Systemzustände eintreten können und
- die Kenntnis der Verteilungsfunktionen, die zur Beschreibung des Funktionsverhaltens der Systemelemente dienen.

In (Müller 1986) wird weiterhin darauf hingewiesen, daß zwar einerseits gegenwärtig verschiedene analytische und numerische Verfahren zur Ermittlung der

Zustandswahrscheinlichkeiten existieren, andererseits aber bestimmte Probleme, wie beispielsweise bei komplizierten Systemen mit einer großen Anzahl von Systemelementen mit beliebigen Verteilungsfunktionen ihres Funktionsverhaltens, noch nicht, oder nur zum Teil, gelöst sind.

6.4

Schaffung von Modellbedingungen

6.4.1

Fernwärmeversorgungssysteme

Für das Modell zur Zuverlässigkeitsberechnung werden Bedingungen getroffen, welche eine Vereinfachung der zu betrachtenden komplexen Fernwärmesysteme ermöglichen sollen. Diese Modellbedingungen bilden die eigentliche Grundlage für alle weiteren Zuverlässigkeitsanalysen.

Die Zusammensetzung und das Zusammenspiel der verschiedenartigsten Anlagenbaugruppen eines Fernwärmeversorgungssystems wurden im Kapitel 2 ausführlich abgehandelt. Dabei sind hinsichtlich der Anzahl der Erzeuger- und Abnehmeranlagen, der Größe und Ausbreitung sowie der Gestaltung des Netzes in Form von Strahlen- und/oder Maschensystemen keine Grenzen gesetzt. Dies gilt auch für die Parameter und die Betriebsfahrweise. Des weiteren muß unterschieden werden in die beiden Medien – Heizwasser und Dampf.

Als eine erste Strukturierung der vielfältigen und vielzähligen Anlagenbaugruppen wird das Heizwassersystem zerlegt in ein Gesamt- und Teilsystem. Das *Gesamtsystem* umfaßt die Erzeugeranlagen, Wärmeübertragerstationen, Hausanschlußstationen, Druckhaltesysteme, Speicher, Beimisch- und Druckerhöhungstationen sowie das *Teilsystem* Netz, welches nur die nennweitenabhängigen Elemente, wie beispielsweise Rohrleitung in Abhängigkeit des Verlegeverfahrens, Armaturen usw. einschließt. Dazu gehören auch, falls vorhanden, entsprechende Bauwerke.

Bei Dampfsystemen umfaßt das Gesamtsystem die Erzeugeranlagen, Wärmeübertragerstationen, Speicher und Hausanschlußstationen, und das Teilsystem Netz, welches wiederum unterteilt wird in die eigentlichen Rohrleitungssysteme für Dampf und Kondensat. Beide Rohrleitungssysteme lassen sich ebenso in nennweitenabhängige Elemente zerlegen. Prinzipiell ist es aber auch möglich, Dampf und Kondensat jeweils als ein getrenntes Teilsystem zu betrachten.

In dem Gesamtsystem fallen für die anschließenden Betrachtungen die vorhandenen Erzeugeranlagen heraus. Dies liegt in der Tatsache begründet, daß in den überwiegenden Fällen die unplanmäßigen Ereignisse in Fernwärmesystemen direkt nur durch das Teilsystem Netz hervorgerufen werden, zumal Erzeugeranlagen eine wesentlich höhere Redundanz innerhalb der Anlagen aufweisen. Die verschiedenen möglichen Varianten eines Fernwärmesystems zeigt Abb. 6.4-1.

Für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen im Teilsystem Netz werden die Abnehmer nicht mit betrachtet. Dies ist darin begründet, daß ein Ausfall eines einzelnen Abnehmers nur in den seltensten Fällen gleichzeitig einen Systemausfall ver-

ursacht. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, daß die Ausfallwahrscheinlichkeit für einen gemeinsamen Ausfall aller Abnehmer gleich 0 ist. Somit können die Abnehmer und damit die Hausanschlußstationen aus den anzustellenden Betrachtungen ausgeschlossen werden. An dieser Stelle sei aber darauf hingewiesen, daß im letzteren Fall ein gleichzeitiger Ausfall aller Abnehmer in kleineren Fernwärmesystemen hervorgerufen werden kann durch die äußere Einwirkung eines totalen Stromausfalles.

Wärmeübertragerstationen, Druckhaltesysteme, Speicher, Druckerhöhungs- und Beimischstationen werden, soweit diese im Fernwärmesystem enthalten sind, separat betrachtet, was u. a. in deren komplexem Anlagenaufbau begründet liegt.

Mit den oben aufgestellten Modellbedingungen wird aus dem Fernwärmesystem das für die weiteren Untersuchungen benötigte Teilsystem Netz erhalten.

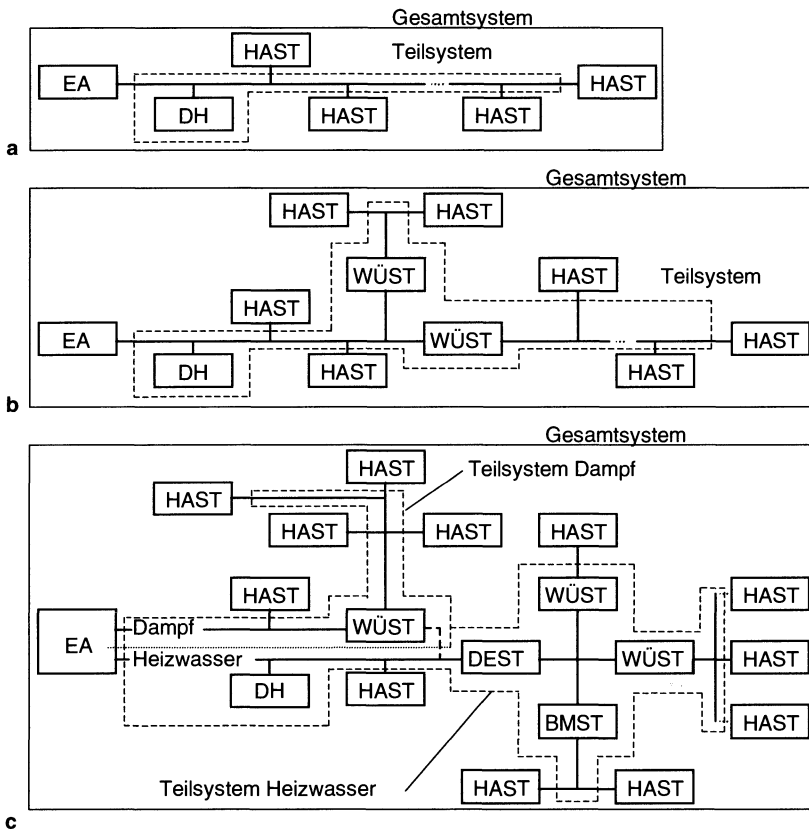


Abb. 6.4-1 Varianten eines Fernwärmesystems

a einfache Variante eines Fernwärmesystems, **b** Variante mit Primär- und Sekundärsystem, **c** Variante eines größeren Fernwärmesystems mit beiden Wärmemedien

EA Erzeugeranlage, DH Druckhaltung, HAST Hausanschlußstation, WÜST Wärmeübertragerstation, BMST Beimischstation, DEST Druckerhöhungsstation

Für Heizwassersysteme, die symmetrisch aufgebaut sind, d. h. die Stränge der Vorlauf- und Rücklaufleitungen stimmen annähernd sowohl im Nenndurchmesser als auch in ihrer Anzahl überein, kann das Teilsystem Netz in ein Vorlauf- und Rücklaufteilsystem aufgetrennt werden. Werden weiterhin für diese beiden Teilsysteme dieselben Einflußfaktoren und Beanspruchungen vorausgesetzt, ist es möglich, nur eines der beiden Teilsysteme weiter zu untersuchen. Aus zuverlässigkeitslogischer Sicht liegt dann ein Seriensystem beider Teilsysteme vor. Der Vorteil dieser vereinfachenden Bedingung liegt insbesondere bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen großer Heizwassersysteme.

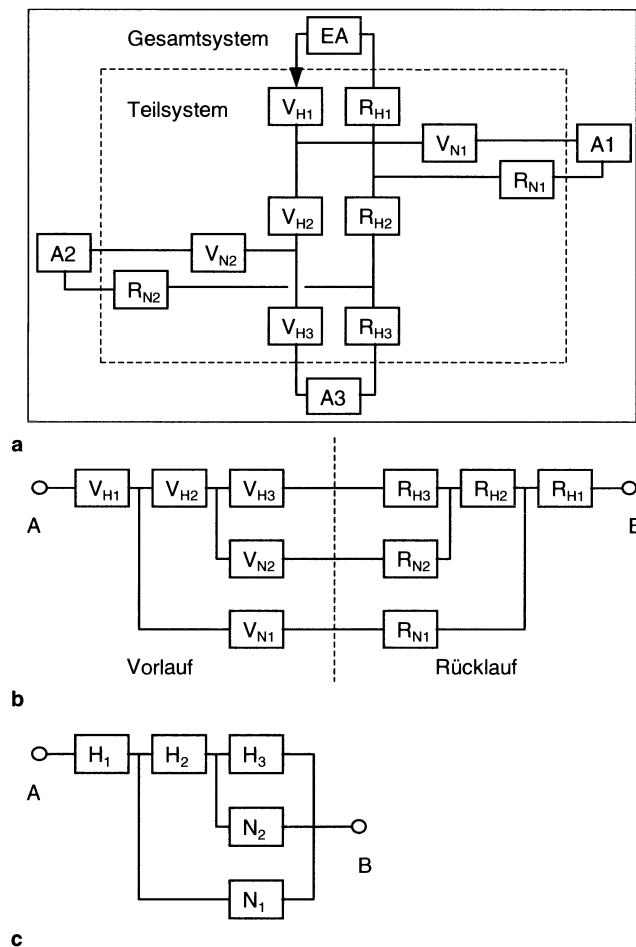


Abb. 6.4-2 Zuverlässigkeitslogische Betrachtung eines symmetrischen Heizwassersystems
a Strukturbild des Systems, **b** Strukturbild des Teilsystems Netz, **c** vereinfachtes Strukturbild
 EA Erzeugeranlage, V Vorlauf, R Rücklauf, H_i Element Hauptstrang, N_i Element Nebenstrang, A_i Abnehmer

In bestimmten Fällen, gerade bei den Verlegeverfahren der Kunststoff- und Stahlmantelrohrsysteme, ist der Vorlauf gegenüber dem Rücklauf aus Kostengründen verschieden ausgelegt. Dann ist diese Bedingung nicht mehr gegeben. Gleiches gilt auch für Heizwassersysteme, die als 3-Leiter-System ausgeführt sind. Hierbei sollte dann eine getrennte Betrachtung der Leitersysteme erfolgen. In Abb. 6.4-2 wird die mögliche Vorgehensweise der Umsetzung eines symmetrischen Heizwassersystems in ein entsprechendes zuverlässigkeitslogisches Strukturbild aufgezeigt.

Alle weiteren Bedingungen bauen auf der zuvor aufgestellten Bedingung auf. Bei Ausfall eines Nebenstranges N_i , kann trotzdem ein Wärmetransport über die Hauptstränge H_i gewährleistet werden, d. h. das Teilsystem funktioniert weiter. Dabei müssen aber zwei Fälle unterschieden werden, einmal der Nebenstrang N_i funktioniert und der Abnehmer selbst ist ausgefallen oder der Nebenstrang N_i ist ausgefallen und somit fällt auch der dazugehörige Abnehmer (abhängiges Ereignis) mit aus. Fällt dagegen ein Hauptstrang H_i aus, dann fällt auch das Teilsystem aus. Das gleichzeitig mehrere bzw. alle Nebenstränge ausfallen, ohne daß die Hauptstränge davon berührt werden, stellt einen eher theoretischen Fall dar, weshalb dieser ausgeschlossen wird.

Dabei gilt aber der Aspekt, daß der Ort des Ausfalles innerhalb einer bestimmten Zeitspanne entdeckt wird. Die Beherrschbarkeit des eingetretenen Lecks in Heizwassersystemen wird in erster Linie durch das Druckhaltesystem und die zur Verfügung stehenden Wasseraufbereitungskapazitäten bestimmt.

Gleichzeitig muß aber beachtet werden, daß ein Ausfall eines großen Nebenstranges das Teilsystem so gefährden kann, daß es ebenfalls ausfällt (abhängiges Ereignis). Das betrifft insbesondere Nebenstränge, wo mehrere große Abnehmergruppen angeschlossen sind. Um solche Fälle auszuschließen, sollten diese betreffenden Nebenstränge als Hauptstränge betrachtet werden. Die Umsetzung der letztgenannten Bedingung zeigt Abb. 6.4-3.

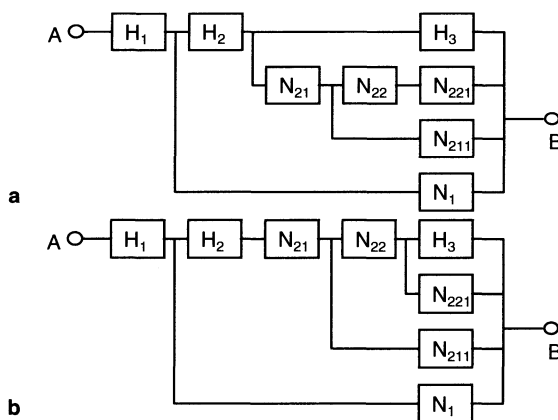


Abb. 6.4-3 Integration wichtiger Nebenstränge als Hauptstrang

a Ausgangsvariante, **b** Umsetzung der Modellbedingung

H_i Element Hauptstrang, N_i Element Nebenstrang

6.4.2

Wasserversorgungssysteme

Das Modell der Zuverlässigkeitsberechnung von Wasserversorgungssystemen erfolgt analog zu Fernwärmeversorgungssystemen. Die Zusammensetzung und das Zusammenspiel der verschiedenartigsten Anlagenbaugruppen eines Wasserversorgungssystems wurden in Kap. 3 ausführlich abgehandelt. Dabei sind hinsichtlich der Anzahl der einzelnen Anlagen, der Größe und Ausbreitung sowie der Gestaltung des Netzes in Form von Strahlen- und/oder Maschensystemen keine Grenzen gesetzt. Dies gilt auch für die Parameter.

Als eine erste Strukturierung der vielfältigen und vielzähligen Anlagenbaugruppen wird das Wasserversorgungssystem zerlegt in ein Gesamt- und Teilsystem. Das *Gesamtsystem* umfaßt die Anlagen für die Wassergewinnung, Wasseraufbereitung, Wasserspeicherung Druckerhöhung und Druckminderung sowie das *Teilsystem* Netz, welches nur die nennweitenabhängigen Elemente, wie beispielsweise Rohrleitung in Abhängigkeit des Verlegeverfahrens, Armaturen usw. einschließt. Dazu gehören auch die entsprechenden Bauwerke und Schächte.

In dem Gesamtsystem fallen für die anschließenden Betrachtungen die vorhandenen Anlagen für die Wassergewinnung, Wasseraufbereitung und Wasserspeicherung heraus. Dies liegt in der Tatsache begründet, daß in den überwiegenden Fällen die unplanmäßigen Ereignisse in Wasserversorgungssystemen direkt nur durch das Teilsystem Netz hervorgerufen werden. Eine entsprechende Variante eines Wasserversorgungssystems zeigt Abb. 6.4-4.

Für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen im Teilsystem Netz werden die Verbraucher nicht mit betrachtet. Dies ist darin begründet, daß ein Ausfall eines einzelnen Verbrauchers nur in den seltensten Fällen gleichzeitig einen Systemausfall verursacht. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, daß die Ausfallwahrscheinlichkeit für einen gemeinsamen Ausfall aller Verbraucher gleich 0 ist. Somit

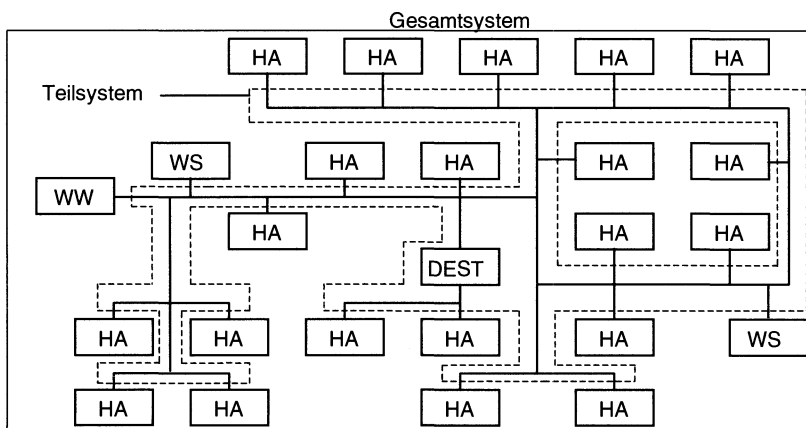


Abb. 6.4-4 Variante eines Wasserversorgungssystems

WW Wasserwerk, WS Wasserspeicher, HA Hausanschluß, DEST Druckerhöhungsstation

können die Verbraucher und damit die Hausanschlüsse aus den anzustellenden Betrachtungen ausgeschlossen werden.

Anlagen zur Druckerhöhung und Druckminderung werden, soweit diese im Wasserversorgungssystem enthalten sind, separat betrachtet, was u. a. in deren komplexem Anlagenaufbau begründet liegt.

Mit den oben aufgestellten Modellbedingungen wird aus dem Wasserversorgungssystem das für die weiteren Untersuchungen benötigte Teilsystem Netz erhalten.

Da es sich bei dem Wasserversorgungssystem und somit bei dem Teilsystem um ein sogenanntes 1-Leiter-System handelt, erübrigt sich die Aufstellung von vereinfachenden Bedingungen. Prinzipiell kann bei Ausfall eines Nebenstranges (Hausanschlußleitung) die Versorgung über die Hauptstränge (Versorgungsleitung, Hauptleitung) gewährleistet werden, d. h. das Teilsystem funktioniert weiter. Fällt dagegen ein Hauptstrang aus, dann kann auch das Teilsystem, in Abhängigkeit der Größe, Ausbreitung und Gestaltung des Netzes, ausfallen. Das gleichzeitig mehrere bzw. alle Nebenstränge ausfallen, ohne daß die Hauptstränge davon berührt werden, stellt einen eher theoretischen Fall dar, weshalb dieser ausgeschlossen wird.

Dabei gilt aber der Aspekt, daß der Ort des Ausfalles innerhalb einer bestimmten Zeitspanne geortet wird. Die Beherrschbarkeit des eingetretenen Lecks in Wasserversorgungssystemen wird in erster Linie durch die zur Verfügung stehenden Wasserspeicherkapazitäten und Wasseraufbereitungskapazitäten bestimmt.

6.4.3 Gemeinsamkeiten und Unterschiede beider Versorgungssysteme

Bei beiden Systemen handelt es sich um rohrleitungsgebundene Versorgungssysteme. In der Tabelle 6.4-1 sind die wichtigsten Unterschiede beider Versorgungssysteme gegenübergestellt.

Tabelle 6.4-1 Unterschiede beider Versorgungssysteme

Merkmal	Fernwärmeversorgungssystem	Wasserversorgungssystem
– Anschlußgrad	mäßig bis mittel ausgeprägt	fast 100 %
– Systemform	Inselsystem	offenes System
– Einspeisung	territorial gebunden	territorial ungebunden
– Leiteranzahl	2-, 3- oder 4-Leiter-System	1-Leiter-System
– Verlegeverfahren	frei-, kanal- und erdverlegt	fast ausschließlich erdverlegt
– Wärmedämmung	immer erforderlich	nur in seltenen Fällen erforderlich
– Vermaschung	niedrig ausgebildet	hoch ausgebildet
– Temperaturbelastung	hoch, in Abhängigkeit des Wärmemediums	gering durch relativ konstante Wassertemperatur
– Druckbelastung	bis PN 40	bis PN 16 (Wasserverteilung)
– Anlagenaufwand	hoch	niedrig
– Hausanschluß		
– Wasserverluste	niedrig	hoch
– Alternativen beim Ausfall	keine	transportable Notversorgung möglich (Tankwagen)

6.5 MARKOWsches Modell

6.5.1 Theorie der MARKOWschen Modelle

6.5.1.1 *Homogene MARKOWsche Modelle*

Für die Vorgehensweise zum Aufstellen der Modelle wird im folgenden die mathematische Theorie kurz erläutert. Ausgangspunkt bilden die wichtigsten Definitionen des homogenen MARKOWschen Prozesses, welche gleichzeitig als Grundlage für den Semi-MARKOWschen Prozeß dienen. Auf den Nicht-MARKOWschen Prozeß wird nicht weiter eingegangen.

Definitionen. Bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen ist es üblich, Systeme zu betrachten, die aus einer endlichen Anzahl von Elementen bestehen. Dabei kann davon ausgegangen werden, daß unter einem Element die kleinste Betrachtungseinheit des Systems verstanden wird, dessen detailliertere Untersuchung für den vorliegenden Zweck nicht notwendig ist. Der einfachste Fall und somit gleichzeitig der Spezialfall der MARKOWschen Modelle ist das BOOLEsche Modell, welches nur 2 Zustände des Systems – Betrieb und Ausfall – aufweist. Für ein System, bestehend aus n Elementen, gäbe es somit 2^n verschiedene Realisierungen (des Elementezustandsvektors). Daher kann der Systemzustand $Z(t)$ als zeitabhängiger Prozeß aufgefaßt werden. Jeder dieser eingetretenen Realisierungen definiert jetzt eine Realisierung des Systemzustandes.

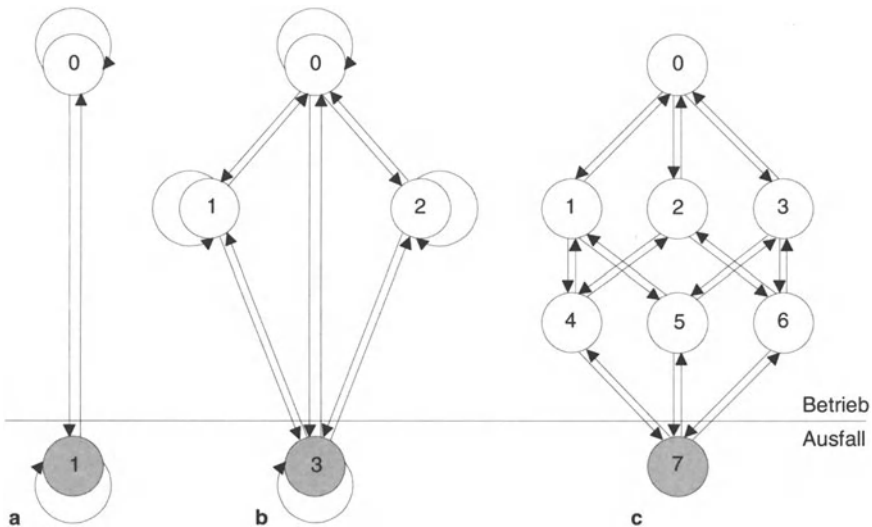


Abb. 6.5-1 Übergangsgraphen für ein System aus $n = 1, 2, 3$ Elementen mit 2 Zuständen

Den entsprechenden Zustandsübergangsgraphen, im späteren nur noch Übergangsgraph genannt, für ein System aus $n = 1$ Element zeigt Abb. 6.5-1a. Die beiden Systemzustände werden auf 2 Knoten abgebildet, die Übergangsmöglichkeiten durch gerichtete Zweige darstellen. Dabei erfolgt die Zustandsnumerierung der Einfachheit halber nur mit i , $i = 0, 1, \dots, k$, wobei die grau gekennzeichneten Zustände den jeweiligen ausgefallenen Systemzustand umfassen. Der gerichtete Zweig, welcher von einer niedrigeren zu einer höheren Zustandsnummer verläuft, kennzeichnet den Ausfall des jeweiligen Elements bzw. Systems, umgekehrt die Wiederherstellung der Arbeitsfähigkeit des zuvor ausgefallenen Elements bzw. Systems. Die Selbstschleifen können zweckmäßig sein, wenn beispielsweise nach den Übergängen in vorgegebenen Zeitabständen gefragt wird. Das Verweilen im gleichen Zustand läßt sich dann als das Durchlaufen einer Selbstschleife ansehen.

Die Übergangsmöglichkeiten für ein System aus $n = 2$ Elementen sind in Abb. 6.5-1b dargestellt. Jedes Element beinhaltet die Zustände – Betrieb oder Ausfall. Daraus folgen 4 mögliche Systemzustände:

- 0: beide Elemente arbeitsfähig,
- 1: erstes Element ausgefallen, zweites Element arbeitsfähig,
- 2: erstes Element arbeitsfähig, zweites Element ausgefallen,
- 3: beide Elemente ausgefallen.

Der direkte Übergang von '0' auf '3' ist als gleichzeitiger Ausfall beider Elemente, der direkte Übergang von '3' auf '0' als gleichzeitige Erneuerung beider Elemente zu deuten.

Besteht ein System aus $n = 3$ Elementen (Abb. 6.5-1c) sind bereits $2^3 = 8$ Zustände zu unterscheiden. Um die Darstellung übersichtlich zu halten, wurden nur die praktisch wichtigsten Zustandsübergänge eingetragen. Die Möglichkeit der gleichzeitigen Erneuerung oder des gleichzeitigen Ausfalls mehrerer Elemente kann oft ausgeschlossen werden. Außerdem wurden nur Übergänge zwischen unterschiedlichen Zuständen vorgesehen.

Für gleiche Elemente werden die Übergangsgraphen einfacher. Da aber dieser besondere Fall in Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen nicht auftritt, wird darauf nicht weiter eingegangen.

Für das Wesen dieser Methode stellen sich zwei Fakten als wesentlich heraus. Zum einen muß das zeitliche Verhalten des zu untersuchenden Systems sich durch eine endliche Anzahl wohl unterscheidbarer Systemzustände eindeutig charakterisieren lassen. Zum anderen müssen für den Übergangsgraphen alle notwendigen Möglichkeiten des direkten Übergangs zwischen den Zuständen bekannt sein (Reinschke u. Usakov 1987).

Der Zustand $Z(t)$ des Prozesses wird für jeden festen Zeitpunkt t , $t \geq 0$, als Zufallsgröße interpretiert, die einen Wert aus der Zustandsmenge $M = \{z_0, z_1, \dots, z_m\}$ annimmt. Als *Zustandswahrscheinlichkeit* $p_i(t)$ wird die Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet, daß der Prozeß $Z(t)$ zum Zeitpunkt t den Zustand z_i annimmt. Es gilt:

$$P\{Z(t) = z_i\} = p_i(t). \quad (6.1)$$

Da einer der Zustände aus der Zustandsmenge M zu jedem Zeitpunkt mit Sicherheit angenommen wird gilt

$$\sum_{i=0}^n p_i(t) = 1 \quad (6.2)$$

für beliebige t . Für zwei beliebige Zeitpunkte t_n, t_{n+1} mit $t_{n+1} > t_n$ wird als *Übergangswahrscheinlichkeit* vom Zustand z_i in den Zustand z_j im Intervall (t_n, t_{n+1}) die bedingte Wahrscheinlichkeit erklärt mit

$$P\{Z(t_{n+1}) = z_j \mid Z(t_n) = z_i\} = p_{ji}(t_{n+1}, t_n). \quad (6.3)$$

Es lassen sich die Zustandswahrscheinlichkeiten zum Endzeitpunkt t_{n+1} berechnen, wenn für ein gegebenes Zeitintervall (t_n, t_{n+1}) die Übergangs- und Zustandswahrscheinlichkeiten zum Anfangszeitpunkt t_0 bekannt sind. Somit gilt

$$p_j(t_{n+1}) = \sum_{i=0}^m p_{ji}(t_{n+1}, t_n) \cdot p_i(t_n) \text{ für } j = 0, \dots, m. \quad (6.4)$$

Die Herleitung dieser Gl. (6.4) ist in (Reinschke u. Usakov 1987) zu finden. Aus den Gln. (6.2) und (6.4) folgen Zwangsbedingungen an die Übergangswahrscheinlichkeiten:

$$\sum_{i=0}^m p_{ji}(t_{n+1}, t_n) = 1 \text{ für alle } i \in \{0, \dots, m\} \text{ mit } t_{n+1} > t_n. \quad (6.5)$$

Die Übergangswahrscheinlichkeiten geben eine zeitlich globale Auskunft. Was während des Zeitintervalls (t_n, t_{n+1}) , das beliebig lang sein kann, im einzelnen geschieht, bleibt verborgen. Bei Zuverlässigkeitsberechnungen wird häufiger von einer zeitlich lokalen Beschreibung der Übergangschancen ausgegangen, um die zeitliche Entwicklung der Prozeßzustände zu ermitteln. Dazu werden Übergangsraten anstelle der Übergangswahrscheinlichkeiten benutzt.

Die *Übergangsrate* $\lambda_{ji}(t)$ ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit, daß – unter der Bedingung, zur Zeit t liegt der Zustand z_i vor – der Übergang in den Zustand z_j im infinitesimalen Intervall $(t, t+dt)$ erfolgt, dividiert durch die Intervalllänge dt . In mathematischer Kurzschrift schreibt sich diese Aussage so:

$$\begin{aligned} \lambda_{ji}(t) &= \frac{1}{dt} \left(P\{Z(t+dt) = z_j \mid Z(t) = z_i\} \right) = \\ &= \frac{1}{dt} \left(p_{ji}(t+dt, t) \right) \text{ für } i \neq j \in \{0, 1, \dots, m\}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Dabei wird vorausgesetzt, daß die Verweildauern in den Prozeßzuständen stetige positive Zufallsgrößen sind. Dann ist gesichert, daß sich Übergangsraten als wohldefinierte nichtnegative Zielfunktionen ergeben. Dabei ist es nicht sinnvoll, eine Übergangsrate vom Zustand z_i in den gleichen Zustand z_i einführen zu wollen, da die Gl. (6.6) den Wert ∞ liefern würde (Reinschke u. Usakov 1987).

Existieren Übergangsraten, so genügen die Zustandswahrscheinlichkeiten einem Differentialgleichungssystem (DGS)

$$\frac{d}{dt}(p_j(t)) = \sum_{i=0}^m a_{ji}(t) \cdot p_i(t) \text{ für } j = 0, 1, \dots, m, \quad (6.7)$$

das auch in Vektorschreibweise notiert werden kann,

$$\frac{d}{dt}(\vec{p}(t)) = \underline{A}(t) \cdot \vec{p}(t). \quad (6.8)$$

Für die Nichtdiagonalelemente der Matrix $\underline{A}(t)$ gilt

$$a_{ji}(t) = \lambda_{ji}(t) \text{ für } j \neq i \quad (6.9a)$$

und für die Diagonalelemente

$$a_{ii}(t) = - \sum_{j=0}^m \lambda_{ji}(t) \text{ für } j \neq i. \quad (6.9b)$$

Der Beweis der Gln. (6.7) und (6.9) befindet sich in (Reinschke u. Usakov 1987). Das DGS (6.7) bestimmt den vollständigen zeitlichen Verlauf der Zustandswahrscheinlichkeiten. Sind die Anfangswerte zu einem beliebigen Zeitpunkt bekannt, der bei $t = 0$ festgesetzt werden kann, also bei bekanntem Anfangsvektor $\vec{p}(0)$, läßt sich aus Gl. (6.7) der Zustandsvektor $\vec{p}(t)$ für alle $t > 0$ grundsätzlich berechnen. Mathematisch handelt es sich um die Lösung eines Anfangswertproblems, d. h. ein gewöhnliches DGS 1. Ordnung mit zeitabhängigen Koeffizienten.

Matrixaufstellung. Für die Aufstellung der Matrix $\underline{A}(t)$ gibt es verschiedene Verfahren, welche u. a. in (Reinschke u. Usakov 1987; Müller 1986) beschrieben sind. Grundlage bildet der gewichtete Übergangsgraph, der keine Selbstschleifen besitzt. Die Übergangsrate $\lambda_{ji}(t)$ wird als Zweiggewicht an den Zweig, der vom Knoten i zum Knoten j führt, notiert. Aus diesem gewichteten Graphen kann das DGS (6.7) unmittelbar abgelesen werden. Die VASILEVSche Regel besagt dabei, daß in der ersten Zeile der Matrix $\underline{A}(t)$ die Übergangsraten $\lambda_{ji}(t)$ notiert werden, die vom ersten Systemzustand, in der Regel wird dies der Zustand '0' sein, aus ihm wegführen bzw. in diesen hineinführen. Die wegführenden Übergangsraten kommen in die Hauptdiagonale, die in den ersten Systemzustand hineinführenden Übergangsraten werden so eingetragen, daß sie unter dem entsprechenden Ausgangszustand (Spalte) stehen. In der zweiten Zeile der Matrix werden dann nach der gleichen Methode die heraus- bzw. hineinführenden Übergangsraten des zweiten Systemzustandes geschrieben usw. Führt kein Zweig vom Knoten i zum Knoten j , so wird die Übergangsrate $\lambda_{ji}(t) = 0$ gesetzt. Alle in der Hauptdiagonalen stehenden Übergangsraten als Summe werden, unter Anwendung der Gl. (6.9b), mit einem negativen Vorzeichen versehen.

Da die Summe aller Zustandswahrscheinlichkeiten zu jedem Zeitpunkt t stets gleich 1 sein muß, vgl. Gl. (6.2), bedingt die Tatsache, daß sich die Summe aller Übergangsraten jeder Spalte zu 0 ergänzen,

$$\sum_{i=0}^m a_{ji}(t) = 0. \quad (6.10)$$

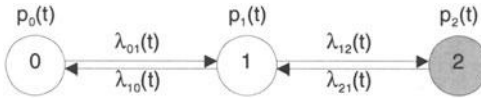


Abb. 6.5-2 Übergangsgraph für ein gewähltes Beispiel

Wird dagegen das DGS (6.7) zeilenweise betrachtet, so läßt sich jede Zeile j als Bilanzrelation für die entsprechende Zustandswahrscheinlichkeit $p_i(t)$ ansehen.

Als Beispiel möge ein Graph mit den 3 Zuständen – Betrieb, Teilausfall und Ausfall – dienen (Abb. 6.5-2). Unter Anwendung der aufgestellten Regel folgt das Differentialgleichungssystem

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ p_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_{01}(t) & \lambda_{10}(t) & 0 \\ \lambda_{01}(t) & -(\lambda_{10}(t) + \lambda_{12}(t)) & \lambda_{21}(t) \\ 0 & \lambda_{12}(t) & -\lambda_{21}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ p_2(t) \end{bmatrix}. \quad (I)$$

Befindet sich der Prozeß zum Zeitpunkt t_0 im Zustand '0', so wird $\vec{p}(0) = [1 \ 0 \ 0]^T$.

In der Zuverlässigkeitspraxis wird meistens davon ausgegangen, daß die Übergangsraten zeitlich konstant sind (Reinschke u. Usakov 1987). Ob diese These auch für Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme gilt, soll derzeitig noch unbeantwortet bleiben. Unter dieser Bedingung vereinfacht sich das DGS (6.7) erheblich, da dessen Koeffizienten nicht mehr von der Zeit abhängen:

$$\frac{d}{dt} (\vec{p}(t)) = \underline{A} \cdot \vec{p}(t), \vec{p}(0) \text{ bekannt.} \quad (6.11)$$

Die Lösung läßt sich sogar in geschlossener Form darstellen:

$$\vec{p}(t) = \exp(\underline{A} \cdot t) \cdot \vec{p}(0). \quad (6.12)$$

Das DGS (I) des in Abb. 6.5-2 dargestellten Übergangsgraphen vereinfacht sich somit wie folgt:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ p_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_{01} & \lambda_{10} & 0 \\ \lambda_{01} & -(\lambda_{10} + \lambda_{12}) & \lambda_{21} \\ 0 & \lambda_{12} & -\lambda_{21} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ p_2(t) \end{bmatrix}. \quad (II)$$

Lösung der Matrix. Zur Lösung der abgeleiteten Differentialgleichungen (DGI) mit konstanten Koeffizienten findet häufig die LAPLACE-Transformation Anwendung. Dabei werden die aus dem Übergangsgraphen hergeleiteten DGI in algebraische Gleichungen (Bildfunktionen) überführt, diese Gleichungen gelöst und die dazugehörigen Originalfunktionen durch Rücktransformation bestimmt.

Dabei heißt eine komplexe Funktion $f(t)$ der reellen Variablen t transformierbar, wenn sie für $t \geq 0$ definiert und über $[0, \infty)$ integrierbar ist sowie einer exponentiellen Wachstumsbeschränkung unterliegt, d. h. $f(t) \leq k \cdot \exp(c \cdot t)$. Die Funktion

$$F(s) = L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} (\exp(-s \cdot t) \cdot f(t)) dt \quad (6.13)$$

wird als LAPLACE-Transformierte von $f(t)$ mit der komplexen Veränderlichen s (Transformationsvariable) bezeichnet.

Besonders wichtig für die Lösung der DGL mit der LAPLACE-Transformation sind der Additionssatz

$$L\left\{\sum_{i=0}^n a_i \cdot p_i(t)\right\} = \sum_{i=0}^n a_i \cdot L\{p_i(t)\} \quad (6.14)$$

und der Differentiationssatz

$$L\left\{\frac{d}{dt}(p(t))\right\} = -p(0) + s \cdot L\{p(t)\}. \quad (6.15)$$

Die wichtigsten LAPLACE-Transformierten und Eigenschaften zur Transformation können für diese speziellen Anwendungsfälle u. a. beispielsweise in (Fischer 1984; Birolini 1985) nachgeschlagen werden. Des weiteren befindet sich eine umfangreiche Korrespondenztabelle in (Bronstein u. Semendjajew 1987).

Wird die LAPLACE-Transformation auf das DGL (II) angewendet, so ergibt sich in Matrixschreibweise

$$\begin{bmatrix} p_0(0) \\ p_1(0) \\ p_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s + \lambda_{01} & -\lambda_{10} & 0 \\ -\lambda_{01} & s + \lambda_{10} + \lambda_{12} & -\lambda_{21} \\ 0 & -\lambda_{12} & s + \lambda_{21} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L\{p_0(t)\} \\ L\{p_1(t)\} \\ L\{p_2(t)\} \end{bmatrix}. \quad (III)$$

Der Vergleich der beiden Koeffizientenmatrizen (II) und (III) zeigt, daß die Matrix (III) erhalten wird aus der Matrix (II), indem alle Vorzeichen aller Koeffizienten der Matrix geändert sowie die Transformationsvariable s zu den Koeffizienten der Hauptdiagonale dazu addiert werden. Daraus wird ersichtlich, daß der Zwischenschritt – Aufstellung des DGS (6.7) – ohne größere Probleme übergangen werden kann (Müller 1986).

Die LAPLACE-Transformierten der Zustandswahrscheinlichkeiten $p_i(s)$ können für solche Gleichungssysteme (III) nach der CRAMERSchen³ Regel ermittelt werden. Danach definiert (Müller 1986) die Wahrscheinlichkeit der Transformierten, mit der sich das System im i -ten Zustand befindet mit

$$L\{p_i(t)\} = p_i(s) = \frac{\Delta_i(s)}{\Delta(s)}, \quad (6.16)$$

mit $\Delta(s)$ - Systemdeterminante,

$\Delta_i(s)$ - Zählerdeterminante, die aus der Systemdeterminante durch Austausch der i -ten Matrixspalte mit dem Anfangsvektor $\vec{p}(0)$ erhalten wird.

³ Ist die Determinante D der Koeffizienten eines linearen Gleichungssystems mit n Gleichungen und n Variablen ungleich 0, so ist $x_i = D_i/D$ für $i = 1, 2, \dots, n$ die einzige Lösung des Gleichungssystems.

Für den in Abb. 6.5-2 dargestellten Übergangsgraphen ergibt sich somit folgende Lösung:

$$\Delta(s) = s^3 + a \cdot s^2 + b \cdot s,$$

$$\Delta_0(s) = s^2 + c \cdot s + d,$$

$$\Delta_1(s) = \lambda_{01} \cdot (s \cdot \lambda_{21}),$$

$$\Delta_2(s) = \lambda_{01} \cdot \lambda_{12}$$

$$\begin{aligned} \text{mit} \quad a &= \lambda_{01} + \lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{21}, \\ b &= \lambda_{01} \cdot \lambda_{12} + \lambda_{01} \cdot \lambda_{21} + \lambda_{10} \cdot \lambda_{21}, \\ c &= \lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{21}, \\ d &= \lambda_{10} \cdot \lambda_{21}. \end{aligned}$$

Die Rücktransformation der LAPLACE-Transformierten in die Originalfunktion geschieht über den Zwischenschritt der Zerlegung in die anzutreffenden Partialbrüche. Die Rücktransformation ergibt dabei folgende Ergebnisse:

$$p_0(t) = \frac{d}{b} + \frac{\exp(x_2 \cdot t) \cdot (x_2 + c) - \exp(x_1 \cdot t) \cdot (x_1 + c)}{(x_2 - x_1)} + d \cdot (C_1 + C_2),$$

$$p_1(t) = \frac{\lambda_{01} \cdot \lambda_{21}}{b} + \lambda_{01} \cdot (x_1 + \lambda_{21}) \cdot C_1 + \lambda_{01} \cdot (x_2 + \lambda_{21}) \cdot C_2,$$

$$p_2(t) = \lambda_{01} \cdot \lambda_{12} \cdot \left(\frac{1}{b} + C_1 + C_2 \right)$$

$$\begin{aligned} \text{mit} \quad x_{1/2} &= -\frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}, \\ C_1 &= \frac{\exp(x_1 \cdot t)}{(x_1^2 - b)}, \\ C_2 &= \frac{\exp(x_2 \cdot t)}{(x_2^2 - b)}. \end{aligned}$$

Vereinfachungen. Daraus wird unschwer ersichtlich, wie komplex diese Lösung für den angeführten Übergangsgraphen ist. Deshalb wird es für solche komplizierten Lösungen als notwendig erachtet, soweit möglich, Proben durchzuführen und zwar

- bei $t = 0$; damit müssen sich die Anfangsvektoren $\vec{p}(0)$, bestätigen oder/und
- bei $t \rightarrow \infty$; wobei dabei gelten muß $\sum_{i=0}^n p_i(\infty) = 1$.

Die jeweiligen berechneten Zustandswahrscheinlichkeiten können in zwei Zustandsteilgruppen geteilt werden, zum einen in die Zustandsteilgruppe, wo das Element bzw. System betriebsfähig ist, zum anderen in die Zustandsteilgruppe, wo das Element bzw. System ausgefallen ist. Die erste Zustandsteilgruppe beinhaltet

nichts anderes als die Verfügbarkeit, die zweite dementsprechend die Nichtverfügbarkeit. Zu jedem Zeitpunkt t , $t \geq 0$ gilt

$$V(t) + N(t) = 1 \quad (6.17)$$

bzw. speziell für das errechnete Beispiel nach Abb. 6.5-2

$$V(t) = p_0(t) + p_1(t)$$

und

$$N(t) = p_2(t).$$

Um die aufwendigen Schritte zur Lösung der Aufgabe zum Teil zu umgehen, reicht es oftmals aus, nur die Nichtverfügbarkeit $N(t)$ zu berechnen. Die Begründung liegt darin, daß es bei solchen Systemen meistens nur einen Ausfallzustand gibt. Des weiteren wird natürlich vorausgesetzt, daß die einzelnen Teilverfügbarkeiten des Elements bzw. des Systems uninteressant für den Betrachter sind.

Die gezeigte Aufstellung der Matrizen nach der letztbeschriebenen Methode, Umgehung des eigentlichen DGS (6.7), ist schnell erlernbar und vereinfacht die Arbeit wesentlich. Natürlich können sich auch hier, besonders bei großer Zustandsanzahl und komplizierten Übergangsgraphen, zum Teil erhebliche Schwierigkeiten ergeben. Insbesondere gilt dies einerseits für die Rücktransformation der LAPLACE-Transformierten in die Originalfunktion (Müller 1986), andererseits dem Schritt davor, nämlich der Berechnung der System- und Zählerdeterminante, vor allem dann, wenn allgemeingültige Formeln aufgestellt werden sollen. Für das Beispiel aus Abb. 6.5-2 müssen Determinanten 3. Ordnung berechnet werden. Mittels der SARRUSSchen Regel ist das relativ problemlos. Schwieriger wird es für die allgemeine Berechnung von Determinanten höherer Ordnung. Folgendes Verfahren kann dafür angewendet werden.

Die Matrix $\underline{A}$, zur besseren Erläuterung jetzt mit $\underline{H}$ bezeichnet, kann als eine Matrix definiert werden, deren Elemente selbst wieder Matrizen sind, sogenannte Untermatrizen. Die Matrix $\underline{H}$ wird dann als Über- bzw. Hypermatrix bezeichnet (Dietrich u. Stahl 1977). Dabei gilt

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{(m,m)} & \underline{B}_{(m,n)} \\ \underline{C}_{(n,m)} & \underline{D}_{(n,n)} \end{bmatrix}. \quad (6.18)$$

Dann gilt für die Berechnung der Determinante $\det \underline{H}$:

$$\det \underline{H} = \det \underline{A} \cdot \det (\underline{D} - \underline{C} \cdot \underline{A}^{-1} \cdot \underline{B}). \quad (6.19)$$

Der Vorteil dieser Gl. (6.19) besteht darin, daß die Ordnung der zu berechnenden Matrix reduziert wird. Eine weitere Methode zur Vereinfachung der Ableitung von Berechnungsformeln für instationäre Zustände reparierbarer Systeme ist in (Müller 1986) angegeben.

Für bestimmte komplexe Systeme, welche im Langzeitbetrieb arbeiten, würde es vollkommen ausreichen, nur die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten zu ermitteln. Dabei wird unter *Langzeitbetrieb* verstanden, daß sich der Zustand des Systems im Verlauf seines Einsatzes mit großer Wahrscheinlichkeit verändern und

für $t \rightarrow \infty$ einem stationären Wert zustreben wird. Die Begründung liegt darin, daß sich der Prozeß des Einschwingens auf den stationären Wert der Zustandswahrscheinlichkeit in relativ kurzer Zeit gegenüber der Betriebsdauer des Systems vollzieht. Somit wird

$$\frac{d}{dt}(p_i(t)) = 0. \quad (6.20)$$

Das DGS (II) vereinfacht sich wie folgt:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_{01} & \lambda_{10} & 0 \\ \lambda_{01} & -(\lambda_{10} + \lambda_{12}) & \lambda_{21} \\ 0 & \lambda_{12} & -\lambda_{21} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (IV)$$

$$\text{mit } \sum_{i=0}^2 p_i(t) = 1.$$

Daraus können das algebraische Gleichungssystem abgeleitet und die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten berechnet werden. Die Ergebnisse stimmen mit den bereits ermittelten instationären Lösungen für $t \rightarrow \infty$ überein.

Somit vereinfacht sich für komplexe und komplizierte Systeme die Ermittlung der Zustandswahrscheinlichkeiten. Werden die bisher gewonnenen Erkenntnisse von MARKOWschen Modellen zusammengefaßt, so kann festgestellt werden, daß die Gln. (6.4) und (6.7) prinzipiell stets anwendbar sind.

Für die Beschreibung des Prozesses mit Hilfe von Übergangsraten muß für die Anwendung der Gl. (6.7) folgendes bekannt sein:

1. die Zustandswahrscheinlichkeiten $p_i(0)$ für $i \in \{0, 1, \dots, m\}$,
2. die Matrizen $\underline{A}(t)$ mit den Koeffizienten gemäß Gln. (6.9a) und (6.9b) für alle $t > 0$ und
3. ein Berechnungsverfahren zur Lösung des Anfangswertproblems

$$\frac{d}{dt}(p(t)) = \underline{A}(t) \cdot \vec{p}(t) \text{ bei vorgegebenem } \vec{p}(0).$$

Die 2. Bedingung ist bei größeren, praktisch interessierenden Prozessen problematisch, weil sich dieses Datenmaterial nicht beschaffen läßt. Dabei hat der Fall der zeitlich periodischen Übergangsraten in der Zuverlässigkeitspraxis bisher keine Bedeutung. Lediglich im bereits diskutierten speziellen Fall zeitlich konstanter Übergangsraten nach Gln. (6.11) bzw. (6.12), d. h.

$$\underline{A}(t) = A \quad (6.21)$$

kann eine geschlossene Lösung angegeben werden. Dabei wird häufig der propagierte Ansatz Gl. (6.21) für die Berechnungen der Zuverlässigkeit zugrunde gelegt. Als Ausgangsdaten werden dann nur die von 0 verschiedenen Koeffizienten der Matrix $\underline{A}$ und der Anfangsvektor $\vec{p}(0)$ benötigt.

6.5.1.2

Semi-MARKOWsche Modelle

Im folgenden wird eine weitere Methode vorgestellt, welche zu dem Spezialfall des Semi-MARKOWschen Prozesses zählt, ohne dabei näher auf die komplizierte mathematische Herleitung dieses Prozesses eingehen zu wollen. Es wurde bereits erläutert, daß der Semi-MARKOWsche Prozeß nur die MARKOWsche Zustandsbedingung erfüllt.

Diese Methode beinhaltet die Möglichkeit der Rückführung auf homogene MARKOWsche Prozesse von Systemen mit zeitabhängigen Koeffizienten, d. h. mit nichtexponentialverteilten Verweildauern. Dabei handelt es sich um die auf ERLANG⁴ zurückgehende Methodik des Einführens fiktiver Hilfszustände der sogenannten ERLANGschen Phasenmethode (auch mit Verfahren der Zustandsstufen bezeichnet).

Der Grundgedanke dieser sogenannten Phasenmethode stammt von ERLANG, welcher als erster stochastische Bedienungssysteme behandelte und beispielsweise die Schlängellänge eines solchen Systems betrachtete. Dabei konnte er auf relativ einfache Weise zu Resultaten gelangen, wenn er annahm, daß die Bedienungszeiten der Kunden exponentiell verteilte Zufallsgrößen waren. In den von ihm betrachteten Fällen führte dies dazu, daß die Anzahl der im System vorhandenen Kunden ein MARKOW-Prozeß war. Wenn zu irgendeinem Zeitpunkt Wahrscheinlichkeiten über den künftigen Verlauf der Schlängellänge zu berechnen waren, mußten die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der zu dieser Zeit bestehenden restlichen Bedienungszeiten bekannt sein. Dies ist aber nur mit der Exponential-Verteilung möglich. Nun brachten aber statistische Beobachtungen hervor, daß exponentiell verteilte Bedienungszeiten nicht den Regelfall darstellten. Die Annahme anders verteilter Zeiten war geboten und somit wurden die MARKOWschen Gesetze nicht mehr erfüllt, womit die Methoden von ERLANG vorerst versagten.

ERLANG brachte folgende Lösung zum Ansatz, indem er die Bedienung eines Kunden als einen Vorgang betrachtete, der sich in mehreren aufeinanderfolgenden Phasen abspielte. Jede Bedienungszeit sei also die Summe von n unabhängigen, identisch exponentiell verteilten Phasenzeiten.

Grundlage dieser ERLANGschen Phasenmethode ist also der mathematisch beweisbare Satz, daß sich eine beliebige Verteilung darstellen läßt durch eine gewählte Anzahl fiktiver Hilfszustände, deren Verteilungen ausschließlich exponentiell sind und die je nach der Ausgangsverteilung seriell oder parallel zufällig durchlaufen werden können (Fersch 1964; Schassberger 1973; Singh u. Billinton 1977; Traeder 1977; Gnedenko u. König 1983; Kohlas 1987).

Durch den Approximationsansatz für die ERLANGsche Verteilungsdichte in der Form

$$f(t) = \sum_{i=1}^k a_i \cdot c_i \cdot t^{(n_i-1)} \cdot \exp(-n_i \cdot \mu_i \cdot t) \quad (6.22)$$

⁴ A. K. Erlang (1878–1929).

und

$$c_i = \frac{(\mu_i \cdot n_i)^{n_i}}{(n_i - 1)!} \quad (6.23)$$

und den Bedingungen: $t \geq 0$, $\mu_i \geq 0$, $a_i \geq 0$ und $k, n_i = 1, 2, \dots$ kann eine sehr gute Anpassung an die empirisch gewonnenen Daten erzielt werden. Abgesehen vom Gewichtungsfaktor a_i mit der Normierungsbedingung

$$\sum_{i=1}^k a_i = 1 \quad (6.24)$$

sind die Summanden in der Gl. (6.23)

$$f_i(t) = c_i \cdot t^{(n_i-1)} \cdot \exp(-n_i \cdot \mu_i \cdot t) \text{ für } t \geq 0 \quad (6.25)$$

selbst Dichtefunktionen. Diese Funktionen lassen sich als Verteilungen der Summe von n_i unabhängigen, jeweils mit dem Parameter μ_i exponentialverteilten Zufallsgrößen deuten.

In Abb. 6.5-3 sind Zustandsstufen in Serie dargestellt, wobei die Stufen für den Betrieb vorerst in Stufe '0' zusammengefaßt wurden. Die zufälligen Zeiten in den Stufen 1 bis k sind voneinander unabhängig und exponentialverteilt mit den Übergangsraten μ_1 bis μ_k . Für die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung einer Stufe gilt

$$f_i(t) = \mu_i \cdot \exp(-\mu_i \cdot t). \quad (6.26)$$

Die gesamte Ausfallzeit T_A ist die Summe der Zeiten in den Stufen 1 bis k . Die Herleitung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausfallzeit kann in (Traeder 1977) nachgeschlagen werden. Das Ergebnis lautet

$$f(t) = \sum_{i=1}^k A_i \cdot \mu_i \cdot \exp(-\mu_i \cdot t) \quad (6.27)$$

mit dem Erwartungswert

$$E(T_A) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\mu_i} \quad (6.28)$$

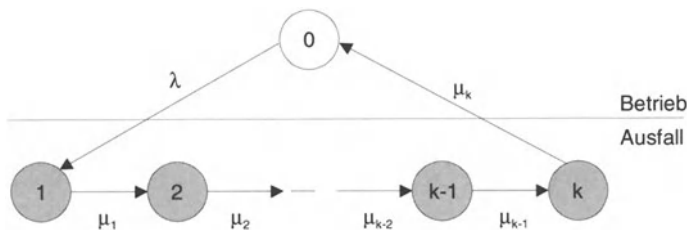


Abb. 6.5-3 Zustandsstufen in Serie

und dem Koeffizienten der Streuung

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{\mu_i} \right)^2}{E(T_A)}}. \quad (6.29)$$

Dabei ist zu beachten, daß für A_i gilt

$$A_i = \bigcap_{j \neq i} \frac{\mu_i}{\mu_j - \mu_i}. \quad (6.30)$$

Diese Werte sind keine Wahrscheinlichkeiten, d. h. sie müssen nicht unbedingt in dem Zahlenbereich $0 \leq A_i \leq 1$ liegen.

Werden $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = n \cdot \mu$ gesetzt, so gilt die Gl. (6.25). Der Koeffizient der Streuung vereinfacht sich dabei zu

$$r = \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (6.31)$$

Diese Gleichung macht deutlich, daß mit einer Schaltung der Zustandsstufen in Serie nur solche Verteilungen beschrieben werden können, deren Streuung kleiner als ihr Mittelwert ist (Traeder 1977).

Die zweite Möglichkeit sind die parallelen Zustandsstufen (Abb. 6.5-4). Hierbei sind ebenfalls die Stufen für den Betrieb in Stufe '0' zusammengefaßt.

Dabei ist ω_i die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Zufallsvariable – Ausfallzeit T_A – genau in den Zustand i fällt. Für jede Realisation eines Ausfalles wird also nur eine Stufe benötigt, die Gesamtzahl der Realisationen exponentialverteilter Stufenzeiten ergibt, jeweils gewichtet mit ω_i die tatsächliche Ausfalldauerverteilung (Edwin u. Traeder 1978). Nach der Regel für die totale Wahrscheinlichkeit muß für die Dichteverteilung gelten

$$f(t) = \sum_{i=1}^k \omega_i \cdot f_i(t) = \sum_{i=1}^k \omega_i \cdot \mu_i \cdot \exp(-\mu_i \cdot t) \quad (6.32)$$

$$\text{mit } \sum_{i=1}^k \omega_i = 1, 0 \leq \omega_i \leq 1$$

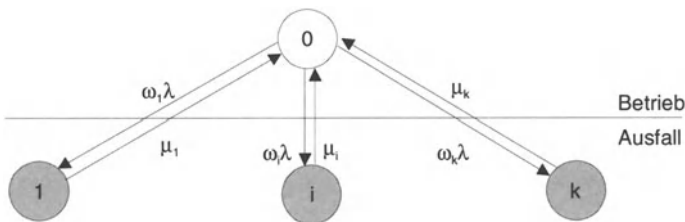


Abb. 6.5-4 Parallele Zustandsstufen

und

$$E(T_A) = \sum_{i=1}^k \frac{\omega_i}{\mu_i} . \quad (6.33)$$

Mit Hilfe der parallelen Zustandsstufen läßt sich für den Koeffizienten der Streuung r jeder Wert ≥ 1 realisieren und somit auch sehr gestreckte Verteilungen nachbilden (Edwin u. Traeder 1978).

Dabei sei noch zu bemerken, daß jede parallele Zustandsstufe i wiederum eine Serienschaltung beinhalten kann. Konkrete Anwendungsbeispiele können u. a. in (Traeder 1977; Edwin u. Traeder 1978; Gnedenko u. König 1983; Ulbrich 1987) nachgeschlagen werden. Für die Gewinnung der Funktionen bzw. deren Parameter aus vorhandenem Datenmaterial können verschiedene Verfahren angewendet werden, welche z. B. in (Beresin u. Shidkow 1970; Traeder 1977) beschrieben sind. Abschließend soll anhand eines konkreten Beispiels – Betriebsverhalten von Braunkohlenkraftwerken – aus (Edwin u. Traeder 1978) die ERLANGsche Phasenmethode kurz erläutert werden.

Beispiel. Gegeben sind eine Ausfalldauerdichte $\hat{m}(t)$ und eine Betriebsdauerdichte $\hat{f}(t)$ mit folgenden Parametern:

$$\hat{m}(t) = \sum_{i=1}^3 \omega_i \cdot c_i \cdot t^{(n_i-1)} \cdot \exp(-n_i \cdot \mu_i \cdot t)$$

mit $\omega_1=0,1$	$\mu_1=1/2,5$	$n_1=1$
$\omega_2=0,8$	$\mu_2=1/24$	$n_2=12$
$\omega_3=0,1$	$\mu_3=1/48$	$n_3=24$

$$\hat{f}(t) = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \cdot d_i \cdot t^{(n_i-1)} \cdot \exp(-n_i \cdot \lambda_i \cdot t)$$

mit $\alpha_1=0,1$	$\lambda_1=1/20$	$n_1=1$
$\alpha_2=0,9$	$\lambda_2=1/250$	$n_2=1$

und

$$d_i = \frac{(\lambda_i \cdot n_i)^{n_i}}{(n_i - 1)!} \quad (6.34)$$

Die beiden Abb. 6.5-5 und 6.5-6 zeigen die jeweils dazugehörigen Teilfunktionen sowie die gewichtete Gesamtfunktion der Ausfall- und Betriebsdauerdichte. Dabei wurden die beiden 1. Teilfunktionen beschnitten, um das Ergebnis deutlicher darstellen zu können.

Werden die beiden Wahrscheinlichkeitsverteilungen interpretiert, so umfaßt die Ausfalldauerdichte die Summe dreier ERLANG-Verteilungen von der Ordnung $n_1 = 1$, $n_2 = 12$ und $n_3 = 24$. Diese Summe wird häufig auch als Hyper-ERLANG-Verteilung bezeichnet. Ist $n_1 = 1$ kann diese Funktion gleichgesetzt werden mit einer Exponential-Verteilung. Somit beinhaltet die Betriebsdauerdichte eine Hyper-Exponential-Verteilung, da $n_1 = n_2 = 1$ ist. Dabei handelt es sich bei diesem Beispiel um einen zweistufigen MARKOWschen Prozeß mit den Stufen Betrieb ('0' und '1') und Ausfall ('2', '3' und '4'). Der Übergangsgraph hat folgendes Aussehen (s. Abb.6.5-7).

Somit gibt es 2 fiktive Betriebszustände und 37 fiktive Ausfallzustände. Dies führt zu einem Differentialgleichungssystem der Ordnung 39, welches mit Hilfe z. B. des RUNGE-KUTTA-Verfahrens numerisch gelöst werden kann, da eine analytische Auflösung dieses aufgeblähten Zustandsraumes zu umfangreich wäre.

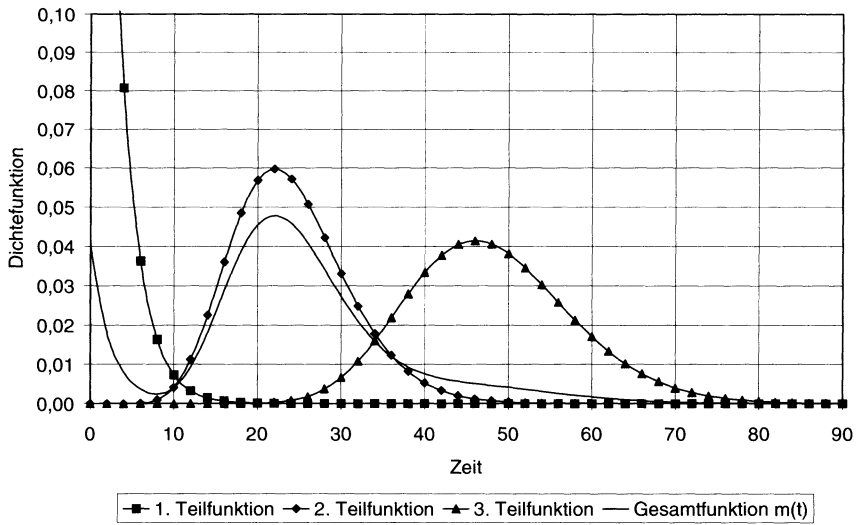


Abb. 6.5-5 Beispiel der einzelnen Teilfunktionen und der Gesamtfunktion einer Ausfalldauer-dichte

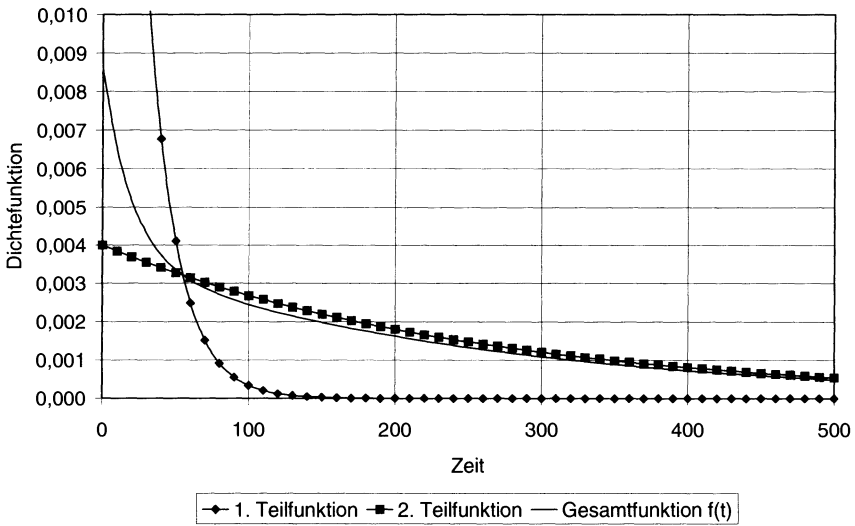


Abb. 6.5-6 Beispiel der einzelnen Teilfunktionen und der Gesamtfunktion einer Betriebsdauer-dichte

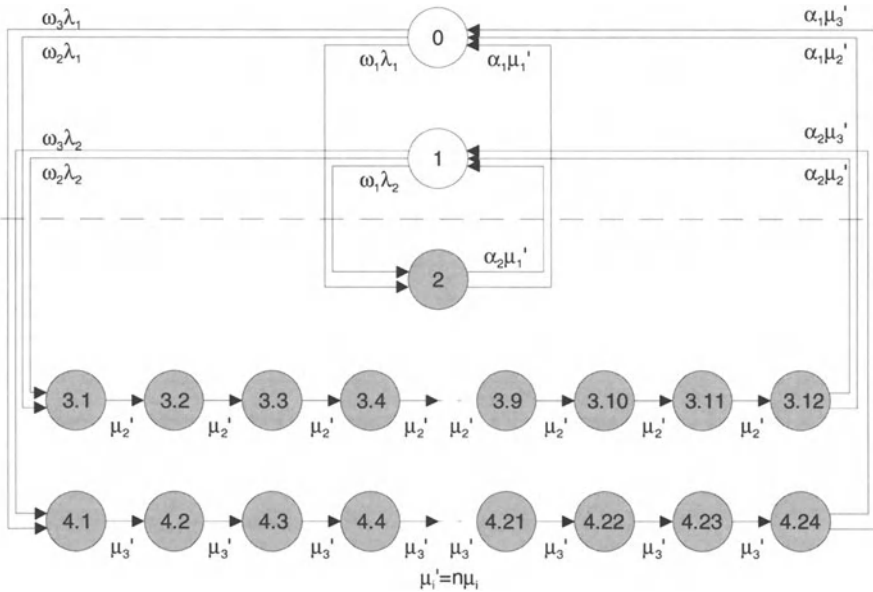


Abb. 6.5-7 Übergangsgraph des Anwendungsbeispiels aus (Edwin u. Traeder 1978)

6.5.2

Aufstellung der MARKOWschen Modellgruppen I und II

In (Nitsch u. Röttsch 1990; Röttsch 1994a) wurden bereits Modellansätze zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Heizwassersystemen mittels MARKOWscher Modelle vorgestellt. Erste erfolgte Auswertungen vorhandener Stör- und Schadensstatistiken zeigten aber, daß nur ein geringer Teil an Ausfällen konkret den beiden definierten Elementen – Rohrleitung und Armatur – zugewiesen werden kann. Aus diesem Grund machte es sich erforderlich, diese Modellansätze hinsichtlich der Anwendung zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen weiter zu konkretisieren.

Im folgenden werden zwei verschiedene Möglichkeiten der Definition von MARKOWschen Modellen für Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme aufgezeigt:

- Modellgruppe I für konstante Betriebs- und Ausfallraten (homogener MARKOWscher Prozeß) – hierbei erfolgte eine nochmalige Unterteilung, zum einen in Modell I.1 ohne –, zum anderen in Modell I.2 mit Vorinformation über einen zukünftigen Ausfall,
- Modellgruppe II für nichtkonstante Betriebs- und Ausfallraten (Semi-MARKOWscher Prozeß)

Während die Modellgruppe I nur für Heizwassersysteme gilt, kann die Modellgruppe II sowohl für Fernwärmeversorgungssysteme – Heizwasser und Dampf – als auch für Wasserversorgungssysteme angewendet werden. Ebenso ist es durch-

aus möglich, die Modellgruppe I an die Bedingungen der Wasserversorgungssysteme anzupassen, wobei die Wasserverluste und dessen Einstufung in die verschiedenen Kategorien dabei das entscheidende Kriterium wären.

Modell I.1. Das mathematische Modell beruht auf der Grundidee der Definition der Begriffe – kleines, mittleres und großes Leck in einem Heizwassersystem. Dabei wird davon ausgegangen, daß bei einem eingetretenen Störereignis im Teilsystem Netz die Wasserverluste durch ein Zu- und Nachspeisen kompensiert werden müssen. Unter *Zuspeisen* sollen dabei die Volumenströme verstanden werden, die aus den zur Verfügung stehenden Wasseraufbereitungsanlagen der Erzeugerwerke kommen und unter *Nachspeisen* die Volumenströme, die aus Vorratsbehältern der Druckhaltenanlagen bereit gestellt werden können. Die maximale Zuspeisekapazität $\dot{V}_Z$ und Nachspeisekapazität $\dot{V}_N$ sind abhängig von der Leistung der Anlagen. Werden die beiden Größen ins Verhältnis zu dem Leckvolumen $\dot{V}_L$ gesetzt, ergibt sich die Leckquote zu

$$Lq = \frac{\dot{V}_Z + \dot{V}_N}{\dot{V}_L}. \quad (6.35)$$

Die Beherrschung des Lecks ist solange unproblematisch, solange diese Leckquote $Lq > 1$ ist (Abb. 6.5-8). Dieser dargestellte Funktionsverlauf entstand aus einer Analyse verschiedener Heizwassersysteme.

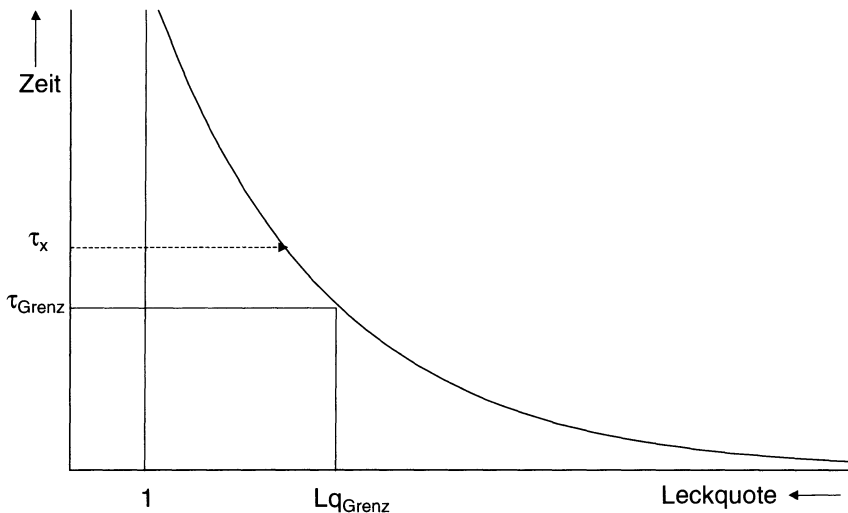


Abb. 6.5-8 Zeit τ der Beherrschung eines Lecks in Abhängigkeit der Leckquote Lq

Beispiel. Ausgangspunkt für diese Ermittlung bildet eine ausgeführte Druckhalteanlage und deren Möglichkeiten des Heizkraftwerkes. Es handelt sich dabei um eine dynamische Mitteldruckhaltung mit einem Ruhedruck von etwa 8,3 bar. Für die Nachspeisung stehen 2 Druckdiktierpumpen mit je 24 m³/h sowie 2 Netznotfüllpumpen mit je 90 m³/h zur Verfügung. Für die normalen Betriebsvorgänge im Heizwassersystem ist nur eine Druckdiktierpumpe vorgesehen. Bei Unregelmäßigkeiten im Heizwassersystem, z. B. verursacht durch ein Leck, schaltet die zweite Druckdiktierpumpe und anschließend eine der beiden Netznotfüllpumpen automatisch zu, um somit den erforderlichen Mitteldruck zu halten bzw. zu stabilisieren. Wie oben bereits definiert, handelt es sich bei dem Nachspeisevolumen um die Volumenströme, die aus den Vorratsbehältern der Druckhalteanlagen bereit gestellt werden können. Dieser Volumenstrom ist begrenzt durch die Summe der einzelnen Volumenströme von den 2 Druckdiktier- und den 2 Netznotfüllpumpen und beträgt in diesem Fall etwa 230 m³/h.

Das Leckvolumen wird über die allgemein angewandte Ausflußgleichung berechnet

$$\dot{V}_L = \eta \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (6.36)$$

mit η - Ausflußfaktor (scharfe Kanten 0,59–0,62; abgerundete Kanten 0,97–0,99) [–],
 A - Leckfläche [m²],
 p_1 - Innendruck [Pa],
 p_2 - Außendruck (Luftdruck) [Pa],
 ρ - Dichte [kg/m³].

Werden in diese Gleichung verschiedene Druckdifferenzen von 6–10 bar sowie eine Vorlauftemperatur von 130 °C für die Dichte eingesetzt, so ergibt sich in Abhängigkeit der einzelnen Nenndurchmesser das in Abb. 6.5-9 dargestellte Ergebnis der Berechnung der Leckquote nach Gl. (6.35).

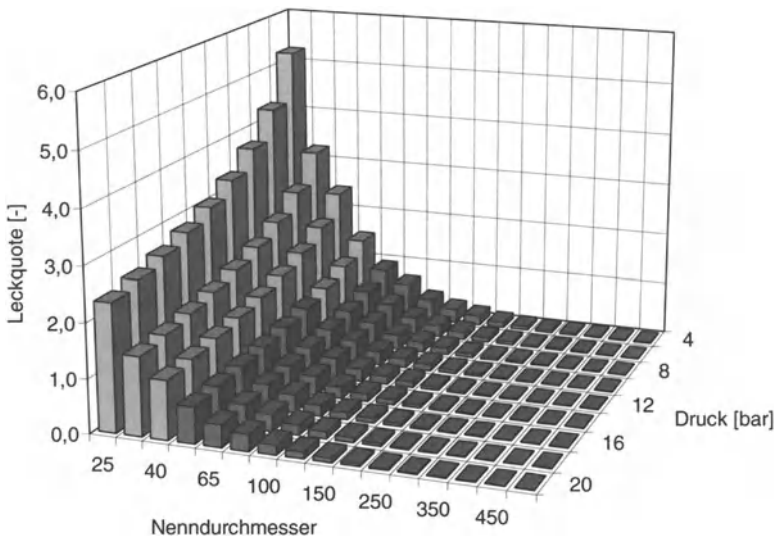


Abb. 6.5-9 Leckquote in Abhängigkeit des Nenndurchmessers und des Innendruckes (Ansatz: scharfe Kanten: $\eta = 0,6$)

Wird die Leckquote kleiner 1, dargestellt als dunkle Säulen, wird das Leck mit der in diesem Fall vorhandenen Druckhalteanlage nicht mehr beherrscht. Dabei wird in einem ersten Berechnungsansatz das Zuspisevolumen 0 gesetzt.

Die Auswertung dieser Darstellung zeigt, daß ein Leck bei einem Druck bis etwa 10 bar in der Größe einer Rohrleitung DN 65 nicht mehr beherrscht wird. Die Leckfläche liegt bei etwa 4000 mm². Diese Leckfläche muß aber nicht unbedingt kreisrund sein; ein Aufreißen einer Leitung mit 10 mm erfüllt dieses Kriterium der Nichtbeherrschbarkeit bereits bei einer Länge von etwa 400 mm. Bei einer Rohrleitung DN 350 ist diese bei 1/3 des Rohrumfanges gegeben. Für höhere Drücke trifft dies bereits für DN 50 bzw. für eine Leckfläche von etwa 2500 mm² zu.

Dabei muß aber angemerkt werden, daß selbst ein plötzliches Abreißen einer Rohrleitung DN 50 zwar rechnerisch beherrscht werden kann, aber die ebenfalls gleichzeitig eintretenden Druck-, Temperatur- und Volumenänderungen zum Teil so groß sind, daß diese nicht mehr durch die Regelung der Druckhaltung und der Umwälzpumpen beherrscht werden können. Diese Fälle lassen sich bei Einstellung der Regelkreise nicht bzw. sehr selten simulieren.

Aus der Darstellung ist weiterhin ersichtlich, daß der Druck keinen wesentlichen Einfluß auf die Leckquote bei Heizwassersystemen hat.

Bei Nichtverfügbarkeit einer der beiden Netznotfüllpumpen im Störfall ist das Beherrschen eines Lecks in der Größenordnung eines Nenndurchmessers DN 40 bzw. einer Leckfläche von 1500 mm² bei einem Druck bis etwa 14 bar bereits kritisch. Bei höheren Drücken verringert sich die Leckfläche auf 1100 mm², was etwa DN 32 entspricht.

Entscheidend weiterhin für die Beherrschung eines Lecks ist das Zuspisevolumen aus Wasseraufbereitungsanlagen. Ist diese ebenfalls in ihrer Leistung begrenzt, so wirkt sich dies bei einem Leck negativ aus, insbesondere dann, wenn das Leck erst lokalisiert werden muß. Nicht selten nimmt dies eine längere Zeit in Anspruch, hervorgerufen durch entsprechende Schaltvorgänge innerhalb des Systems.

Für die Definition der Begriffe – kleines, mittleres und großes Leck, werden folgende Festlegungen getroffen. *Kleine Lecks* werden nur durch die vorhandenen Zuspiseanlagen gedeckt, ohne aus den Vorratsbehältern nachzuspeisen. Liegt die Zeit der Beherrschung eines Lecks $\tau_x > \tau_{\text{Grenz}}$, dann kann von einem *mittleren Leck* gesprochen werden. Für die Kompensation des mittleren Lecks wird zu- und nachgespeist. Wird die vorgegebene Zeit τ_x überschritten, da die Vorratsbehältervolumina begrenzt sind, oder ist $\tau_x < \tau_{\text{Grenz}}$, so handelt es sich um ein *großes Leck*. Die Grenzzeit τ_{Grenz} beinhaltet die minimale Zeit gesehen vom Standpunkt des Organisationsaufwandes zur Beherrschung eines Lecks.

Zusammenfassend können dabei entsprechend 4 Bereiche (Tabelle 6.5-1) definiert werden, wobei die Bedingungen gelten: Für $L_q > 1$ geht $\tau \rightarrow \infty$ und für $1 \geq L_q > 0$ geht $\tau \rightarrow 0$. Mit diesen Definitionen kann daraus das mathematische vierstufige MARKOWsche Modell I.1 entwickelt werden (s. Abb. 6.5-10). Dieses Modell kann sowohl für stationäre als auch für instationäre Leckvolumen eingesetzt werden (ohne/mit dem gerichteten Zweig λ_{12}).

Tabelle 6.5-1 Definition der 4 möglichen Bereiche

Bereich	Leckquote	Bemerkung
1	$L_q \rightarrow \infty \quad \dot{V}_L \approx 0$	Betrieb
2	$\infty > L_q \geq 1$	kleines Leck
3	$1 > L_q \geq L_{q\text{Grenz}}$	mittleres Leck
4	$L_{q\text{Grenz}} > L_q \geq 0$	großes Leck (Totalausfall)

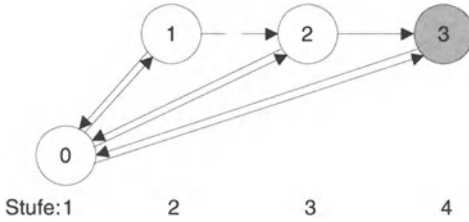


Abb. 6.5-10 Übergangsgraph des Modells I.1

Für die Aufstellung des Übergangsgraphen gelten folgende Bedingungen:

- Es wird grundsätzlich nur zum Zustand '0' repariert.
- Zwei oder mehrere aufeinanderfolgende Lecks führen bei Überschreitung des definierten Bereiches in die darauf folgende Stufe des Modells.
- Während in den Zuständen '0' und '1' eine unbegrenzte Zeit der Beherrschung eines Lecks vorliegen darf (diese wird ja erwünscht), ist die Zeit τ_x im Zustand '2' stark begrenzt bzw. im Zustand '3' ist $\tau_x < \tau_{\text{Grenz}}$. Wird die Verweilzeit im Zustand '2' also überschritten, erfolgt der Übergang vom mittleren zum großen Leck.
- Für die Interpretation der Zustandsübergänge mittels Ausfallarten können gelten: '0' → '1', '0' → '2', '0' → '3' kennzeichnen Sprungausfälle und '0' → '1', '1' → '2', '2' → '3' Driftausfälle; der Ausfall von '1' → '3' erfolgt als plötzlicher Sprungausfall von '1' → '2' → '3', ohne in '2' zu verweilen.

Für die Gewinnung der einzelnen Ausfallraten können Vereinfachungen getroffen werden, welche es ermöglichen, nur mit einer gemeinsamen Ausfallrate λ zu rechnen. Jeder Übergang vom Zustand '0' zu den Zuständen '1', '2' und '3' wird durch eine relative Häufigkeit q_i , im Sinne von empirischen Wahrscheinlichkeiten, entsprechend ihres Auftretens gewichtet. Dabei gibt es für die Zustände '2' und '3' wiederum jeweils zwei Möglichkeiten ihres Eintretens, nämlich entweder vom Zustand '0' oder vom nächstniedrigeren Zustand. Werden ebenfalls diese beiden Möglichkeiten durch relative Häufigkeiten x_{ik} gewichtet, so gilt

$$\lambda_{01} = q_1 \cdot \lambda ; \quad (6.37)$$

$$\lambda_{02} = q_2 \cdot x_{21} \cdot \lambda \text{ und } \lambda_{12} = q_2 \cdot x_{22} \cdot \lambda ; \quad (6.38a,b)$$

$$\lambda_{03} = q_3 \cdot x_{31} \cdot \lambda \text{ und } \lambda_{23} = q_3 \cdot x_{32} \cdot \lambda \quad (6.39a,b)$$

mit der Normierungsbedingung

$$q_1 + \sum_{i=2}^3 q_i \cdot (x_{i1} + x_{i2}) = 1 . \quad (6.40)$$

Auch die Reparaturrate μ_{ij} läßt sich auf diese ähnliche Weise vereinfachen, so daß auch hier eine gemeinsame Reparaturrate μ zur Anwendung kommen kann. Es gilt

$$\mu_{i0} = k_i \cdot \mu , \quad (6.41)$$

wobei aber für die Konstanten k_i keine Normierungsbedingungen gelten.

Die Aufstellung der speziellen Matrix $\underline{A}^{(I,1)}$ und der allgemeinen Matrix $\underline{H}^{(I,1)}$ erfolgt mittels des Übergangsgraphen (s. Abb. 6.5-10) und dem oben beschriebenen Verfahren. Für das instationäre Modell (mit λ_{12}) hätten diese beiden Matrizen folgendes Aussehen:

$$\underline{A}^{(I,1)} = \begin{vmatrix} s + \lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03} & -\mu_{10} & -\mu_{20} & -\mu_{30} \\ & -\lambda_{01} & s + \mu_{10} + \lambda_{12} & 0 \\ & -\lambda_{02} & -\lambda_{12} & s + \mu_{20} + \lambda_{23} \\ & -\lambda_{03} & 0 & -\lambda_{23} & s + \mu_{30} \end{vmatrix}$$

$$\underline{H}^{(I,1)} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{33} & 0 \\ a_{41} & 0 & \dots & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}$$

mit dem Anfangsvektor z. B. $\vec{p}(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. Für die Verfügbarkeit gilt nach Gl. (6.17)

$$V(t) = p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) = 1 - p_3(t).$$

Mit Gl. (6.19) ergibt sich für die Determinante $\det \underline{H}^{(I,1)}$ allgemein

$$\det \underline{H}^{(I,1)} = a_{33} \cdot (a_{44} \cdot (a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}) - a_{14} \cdot a_{22} \cdot a_{41}) + \\ + (a_{31} \cdot a_{22} - a_{32} \cdot a_{21}) \cdot (a_{14} \cdot a_{43} - a_{13} \cdot a_{44}).$$

Für die Unterdeterminante $\det \underline{H}_3^{(I,1)}$ mit eingesetztem Anfangsvektor, d. h. $a_{14} = 1$ und $a_{44} = 0$, gilt dann

$$\det \underline{H}_3^{(I,1)} = -a_{22} \cdot a_{33} \cdot a_{41} + a_{43} \cdot (a_{22} \cdot a_{31} - a_{21} \cdot a_{32}).$$

Trotz der relativ einfachen allgemeinen Determinantenaufösungen entsteht durch das Einsetzen der Terme aus der speziellen Matrix $\underline{A}^{(I,1)}$ ein hoher analytischer Aufwand. Nach Zusammenfassen der einzelnen Terme ergeben sich für die beiden Determinanten:

$$\det \underline{H}^{(I,1)} = s^4 + C_1 \cdot s^3 + C_2 \cdot s^2 + C_3 \cdot s$$

$$\begin{aligned} \text{mit } C_1 &= \lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03} + \mu_{10} + \lambda_{12} + \mu_{20} + \lambda_{23} + \mu_{30}, \\ C_2 &= (\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03}) \cdot (\mu_{10} + \lambda_{12} + \mu_{20} + \lambda_{23} + \mu_{30}) - (\lambda_{01} \cdot \mu_{10} + \lambda_{02} \cdot \mu_{20} + \lambda_{03} \cdot \mu_{30}) + \\ &\quad + \mu_{30} \cdot (\mu_{10} + \lambda_{12}) + (\mu_{10} + \lambda_{12} + \mu_{30}) \cdot (\mu_{20} + \lambda_{23}), \\ C_3 &= (\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03}) \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} + \lambda_{12} \cdot (\mu_{30} \cdot (\lambda_{01} + \lambda_{02}) + \lambda_{03} \cdot \mu_{20}) + \\ &\quad + \lambda_{23} \cdot (\mu_{30} \cdot (\lambda_{01} + \lambda_{03}) + \lambda_{02} \cdot \mu_{10}) + \lambda_{01} \cdot \mu_{20} \cdot \mu_{30} + \\ &\quad + \mu_{10} \cdot (\lambda_{02} \cdot \mu_{30} + \lambda_{03} \cdot \mu_{20}) + \mu_{30} \cdot (\mu_{10} + \lambda_{12}) \cdot (\mu_{20} + \lambda_{23}) \end{aligned}$$

sowie

$$\det \underline{H}_3^{(I.1)} = \lambda_{03} \cdot s^2 + C_4 \cdot s + C_5$$

$$\begin{aligned} \text{mit } C_4 &= \lambda_{03} \cdot (\mu_{10} + \lambda_{12} + \mu_{20}) + (\lambda_{02} + \lambda_{03}) \cdot \lambda_{23}, \\ C_5 &= (\mu_{10} + \lambda_{12}) \cdot (\lambda_{03} \cdot (\mu_{20} + \lambda_{23}) + \lambda_{02} \cdot \lambda_{23}) + \lambda_{01} \cdot \lambda_{12} \cdot \lambda_{23}. \end{aligned}$$

Um nicht weiter diese Terme zu verkomplizieren, wurden die Vereinfachungen nach den Gln. (6.37)–(6.41) vorerst nicht eingearbeitet. Somit gilt für die Lösung von $p_3(t)$ mittels LAPLACE-Transformation

$$L\{p_3(t)\} = p_3(s) = \frac{\det \underline{H}_3^{(I.1)}}{\det \underline{H}^{(I.1)}}.$$

Die Rücktransformation von $p_3(s)$ ist aber mit der angegebenen Gleichung nicht möglich. Der Nenner muß in seine Linearfaktoren zerlegt werden. Eine allgemein analytische Auflösung, wie es z. B. bei der quadratischen Gleichung möglich ist, kann bei kubischen Gleichungen nicht mehr angegeben werden. Lösungsmöglichkeiten werden in (Bronstein u. Semendjajew 1987; Autorenkollektiv 1983) beschrieben. Zur Lösung dieser kubischen Gleichung kommt die CARDANische Formel zur Anwendung. Da die Bedingung gilt $C_1 \gg C_2 \gg C_3$ kann der Nenner in seine Linearfaktoren $(s - x_1)$, $(s - x_2)$ und $(s - x_3)$ aufgespalten werden. Die Lösung der Rücktransformation erfolgt über die Partialbruchzerlegung. Sie lautet

$$p_3(t) = \frac{C_5}{C_3} = \frac{\sum_{i=1}^3 \left((\lambda_{03} \cdot x_i^2 + C_4 \cdot x_i + C_5) \cdot \exp(x_i \cdot t) \right)}{\prod_{j=1}^3 (x_i \cdot (x_i - x_j))}.$$

Eine weitere Lösungsmöglichkeit solcher Differentialgleichungssysteme stellt das numerische RUNGE-KUTTA-Verfahren dar.

Das stationäre Modell I.1 läßt sich relativ unproblematisch entwickeln, indem λ_{12} in der speziellen Matrix $\underline{A}^{(I.1)}$ gleich 0 gesetzt wird. Die stationäre Verfügbarkeit

$$V = p_0 + p_1 + p_2 = 1 - p_3$$

kann ebenfalls über die Matrix $\underline{A}^{(I.1)}$ hergeleitet werden, indem die jeweiligen 1. Ableitungen der Zustandswahrscheinlichkeiten

$$\frac{d}{dt}(p_i(t)) = 0$$

gesetzt werden. Unter Anwendung der Vereinfachungen der Gln. (6.37)–(6.41) ergibt sich das folgende Ergebnis (Rötsch 1990a):

$$p_1 = \frac{q_1 \cdot \lambda}{k_1 \cdot \mu + q_2 \cdot x_{22} \cdot \lambda} \cdot p_0, \quad (6.42a)$$

$$p_2 = \frac{q_2 \cdot \lambda}{k_2 \cdot \mu + q_3 \cdot x_{32} \cdot \lambda} \cdot (p_0 + p_1), \quad (6.42b)$$

$$p_3 = \frac{q_3 \cdot \lambda}{k_3 \cdot \mu} \cdot (p_0 + p_2), \quad (6.42c)$$

$$p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1. \quad (6.42d)$$

Das Maximum der oberen Grenze der Verfügbarkeit wird in jedem Fall der Idealwert $V_o = 1$ sein (Schubert 1981). Für die eigentliche Analyse eines Elements bzw. Systems ist aber nicht dieser obere, sondern der untere Wert von Bedeutung bzw. vielmehr das Konfidenzintervall der Verfügbarkeit. Dieses Konfidenzintervall bringt ja zum Ausdruck, daß sich mit einer Wahrscheinlichkeit – beispielsweise 95 % – der wahre Wert innerhalb des Intervalls befindet. Die Angabe des Konfidenzintervalles der Verfügbarkeit kann somit mit $V_u \leq V \leq 1$ angegeben werden, wenn die Voraussetzung, V_o liegt nahe bei 1, erfüllt ist. Weitere Ausführungen zur Herleitung der Berechnung des Konfidenzintervalles sind dazu in Abschn. – Statistische Aufbereitung des Datenmaterials – zu finden.

Für die Ermittlung der unteren Grenze der Verfügbarkeit V_u werden die Grenzen der unteren Betriebsdauer $T_{B,u}$ und der oberen Ausfalldauer $T_{A,o}$, für die obere Grenze der Verfügbarkeit dagegen die der oberen Betriebsdauer $T_{B,o}$ und der unteren Ausfalldauer $T_{A,u}$ benötigt. Die entsprechenden Betriebs- und Ausfallraten lassen sich über die Beziehungen

$$\lambda = \frac{1}{T_B} \text{ bzw. } \mu = \frac{1}{T_A}$$

ermitteln. Ob und welchen Einfluß dagegen die Wahl der Hilfsgrößen q_i , x_{ik} und k_i auf die Verfügbarkeit im einzelnen hat, wird in Kap. 7 im Detail untersucht.

Modell I.2. Das vorhandene Modell I.1 für Heizwassersysteme kann, unter Beibehaltung der 4 Stufen, um einen Zustand erweitert werden. Dieser zusätzliche Zustand beinhaltet bestimmte Vorinformationen von Ereignissen, welche nicht die 1. Stufe verlassen. Als Beispiel dafür könnte folgender Sachverhalt gelten: Es geht eine Vorinformation über eine nicht mehr schließende Armatur ein. Diese wird nur benötigt, wenn bei einem anderen unplanmäßigen Ereignis das Teilsystem Netz z. B. aufgetrennt werden müßte. Erst dann wird diese Vorinformation zum eigentlichen unplanmäßigen Ereignis. Der Übergangsgraph dazu hätte folgendes Aussehen (s. Abb. 6.5-11).

Für die Aufstellung des Übergangsgraphen gelten folgende Bedingungen:

- Es wird grundsätzlich nur zum Zustand '0' repariert.
- Zwei oder mehrere aufeinanderfolgende Lecks führen bei Überschreitung des definierten Bereiches in die darauf folgende Stufe des Modells.
- Während in den Zuständen '0', '1' und '2' eine unbegrenzte Zeit der Beherrschung eines Lecks vorliegen darf, ist die Zeit τ_x im Zustand '3' stark begrenzt bzw. im Zustand '4' existiert keine. Wird die Verweilzeit im Zustand '3' überschritten, erfolgt der Übergang vom mittleren zum großen Leck.

- Für die Interpretation der Zustandsübergänge mittels Ausfallarten gilt: '0' → '2', '0' → '3', '0' → '4', '1' → '2', '1' → '3', '1' → '4' kennzeichnen Sprungausfälle und '0' → '2', '1' → '2', '2' → '3', '3' → '4' Driftausfälle; der Ausfall von '2' → '4' erfolgt als plötzlicher Sprungausfall von '2' → '3' → '4', ohne in '3' zu verweilen.

Für die Gewinnung der einzelnen Ausfallraten können ebenfalls Vereinfachungen getroffen werden, welche es ermöglichen, nur mit einer Ausfallrate λ (außer λ_{01}) zu rechnen. Das Prinzip der Wichtung entspricht dem des voran beschriebenen Modells I.1. Es gilt

$$\lambda_{02} = q_2 \cdot x_{21} \cdot \lambda \quad \text{und} \quad \lambda_{12} = q_2 \cdot x_{22} \cdot \lambda ; \quad (6.43a,b)$$

$$\lambda_{03} = q_3 \cdot x_{31} \cdot \lambda, \quad \lambda_{13} = q_3 \cdot x_{32} \cdot \lambda \quad \text{und} \quad \lambda_{23} = q_3 \cdot x_{33} \cdot \lambda ; \quad (6.44a-c)$$

$$\lambda_{04} = q_4 \cdot x_{41} \cdot \lambda, \quad \lambda_{14} = q_4 \cdot x_{42} \cdot \lambda \quad \text{und} \quad \lambda_{34} = q_4 \cdot x_{43} \cdot \lambda \quad (6.45a-c)$$

mit der Normierungsbedingung

$$q_2 \cdot (x_{21} + x_{22}) + \sum_{i=3}^4 q_i \cdot \sum_{k=1}^3 x_{ik} = 1. \quad (6.46)$$

Für die Reparaturrate μ_{ij} kann ebenfalls die Gl. (6.41) verwendet werden, wobei auch hier für die Konstanten k_i keine Normierungsbedingung gelten.

Die spezielle Matrix $\underline{A}^{(1,2)}$ lautet für den Übergangsgraphen (Abb. 6.5-11):

$$\underline{A}^{(1,2)} = \begin{vmatrix} s + \lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03} + \lambda_{04} & -\mu_{10} & -\mu_{20} & -\mu_{30} & -\mu_{40} \\ -\lambda_{01} & s + \mu_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda_{02} & -\lambda_{12} & s + \mu_{20} + \lambda_{23} & 0 & 0 \\ -\lambda_{03} & -\lambda_{13} & -\lambda_{23} & s + \mu_{30} + \lambda_{34} & 0 \\ -\lambda_{04} & -\lambda_{14} & 0 & -\lambda_{34} & s + \mu_{40} \end{vmatrix}$$

Für dieses Differentialgleichungssystem kann keine allgemeingültige, analytische Lösung mehr angegeben werden. Wird die Ausfallrate $\lambda_{23} = 0$ gesetzt, wird der stationäre Fall des Modells I.2 erhalten.

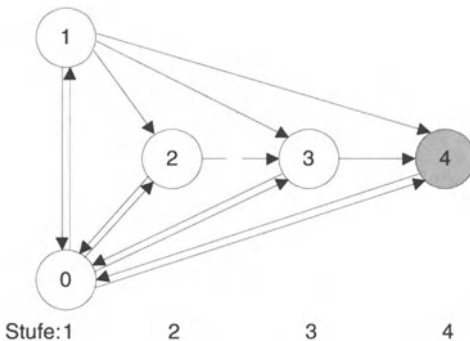


Abb. 6.5-11 Übergangsgraph des Modells I.2

Die Herleitung der stationären Verfügbarkeit erfolgt analog des Modells I.1. Ausgehend von der aufgestellten Matrix $\underline{A}^{(1,2)}$ werden die 1. Ableitungen nach den einzelnen Zustandswahrscheinlichkeiten

$$\frac{d}{dt}(p_i(t)) = 0$$

gesetzt. Nach entsprechenden mathematischen Umformungen ergeben sich folgende Ergebnisse für die einzelnen Zustandswahrscheinlichkeiten:

$$p_1 = \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}} \cdot p_0, \quad (6.47a)$$

$$p_2 = \frac{\lambda_{02} \cdot p_0 + \lambda_{12} \cdot p_1}{\mu_{20} + \lambda_{23}}, \quad (6.47b)$$

$$p_3 = \frac{\lambda_{03} \cdot p_0 + \lambda_{13} \cdot p_1 + \lambda_{23} \cdot p_2}{\mu_{30} + \lambda_{34}}, \quad (6.47c)$$

$$p_4 = \frac{\lambda_{04} \cdot p_0 + \lambda_{14} \cdot p_1 + \lambda_{34} \cdot p_3}{\mu_{40}}, \quad (6.47d)$$

$$p_0 + p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1. \quad (6.47e)$$

Die stationäre Verfügbarkeit kann dann über die Gleichung

$$V = p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1 - p_4$$

ermittelt werden. Das Problem der Bestimmung der Hilfsgrößen kann, wie auch bei Modell I.1, nur anhand der konkret vorliegenden Daten diskutiert werden.

Modell II. Für den Fall, daß keine konstanten Übergangsraten vorliegen bzw. eine Approximation dazu einen zu großen Fehler liefern würde und um gleichzeitig den mathematischen Aufwand nicht unnötig zu vergrößern, kann das folgende Modell verwendet werden. Dieses Modell beinhaltet die Anwendung der bereits beschriebenen ERLANGschen Phasenmethode.

Die Anzahl der zu wählenden parallelen Stufen k ist dabei abhängig von den auftretenden Maxima der empirischen Dichtefunktion. Die Abb. 6.5-12 zeigt einen Vergleich von verschiedenen Dichtefunktionen. Die seriellen Stufen n_i spiegeln sich in den jeweiligen Höhen der Maxima wider (Abb. 6.5-13).

Um eine mathematische Transparenz des Modells zu gewährleisten, gelten für die Dichtefunktionen der Ausfall- und Betriebsdauer folgende Bedingungen:

- Für beide Dichten gilt $k = 2$, d. h. die Dichtefunktionen setzen sich jeweils aus 2 ERLANG-Dichtefunktionen der Ordnung n_1 und n_2 zusammen.
- Aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen der vorhandenen Stör- und Schadensstatistiken kann davon ausgegangen werden, daß für beide Dichtefunktionen weiterhin $n_1 = 1$ gilt. Somit ist lediglich die Ordnung n_2 ein frei wählbarer Parameter.

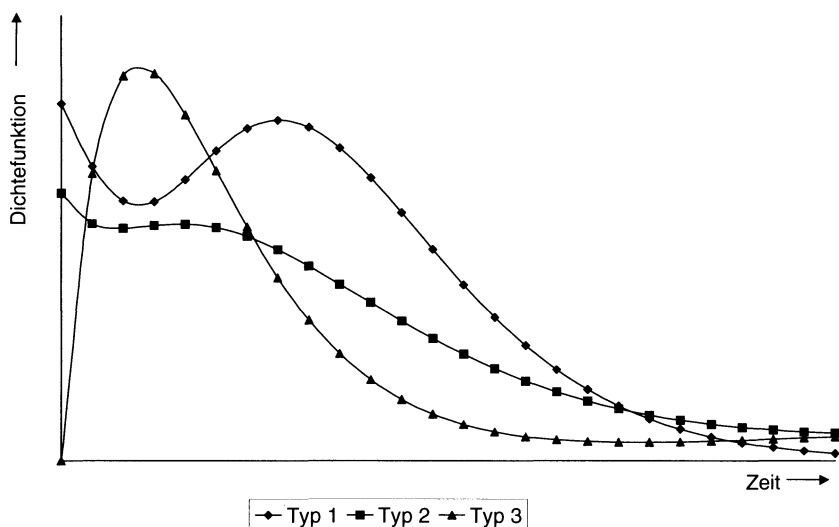


Abb. 6.5-12 Vergleich verschiedener ERLANG-Dichtefunktionen

Typ 1 Dichtefunktion mit den Ordnungen $n_1 = 1$ und $n_2 = \text{variabel}$, *Typ 2* Dichtefunktion mit den Ordnungen $n_1 = 1$ und $n_2 = n_3 = \text{variabel}$, *Typ 3* Dichtefunktion mit den Ordnungen $n_1 = n_2 = \text{variabel}$,

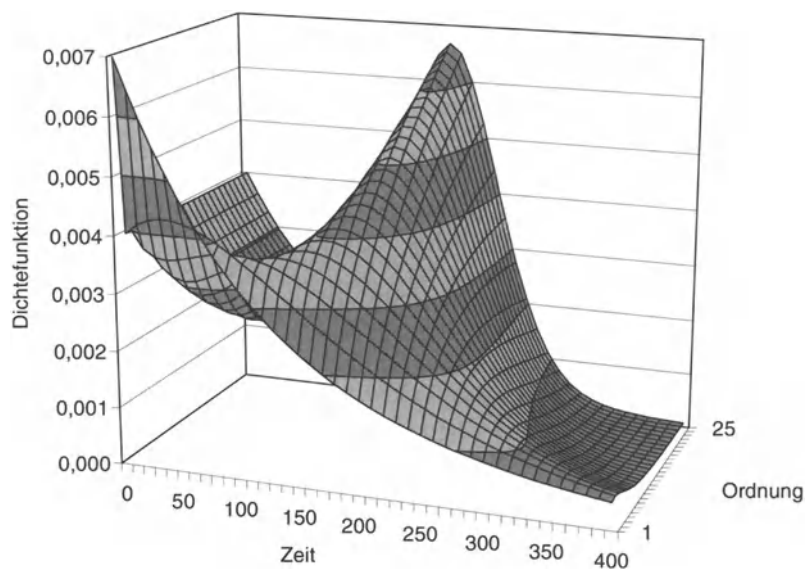


Abb. 6.5-13 Einfluß der Ordnung auf den Verlauf der ERLANG-Dichtefunktion

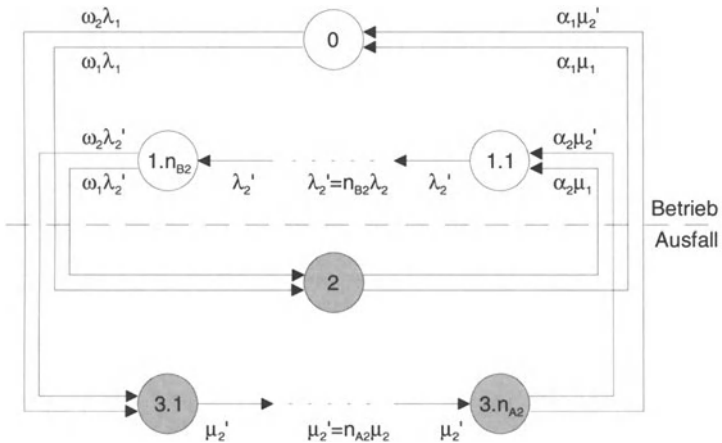


Abb. 6.5-14 Übergangsgraph des Modells II

Einen solchen Typ stellt die Dichtefunktion Typ 1 in der Abb. 6.5-12 dar. Somit gilt für die Ausfalldauerdichte

$$\begin{aligned} \hat{m}(t) = & \omega_1 \cdot \mu_1 \cdot \exp(-\mu_1 \cdot t) + \\ & + (1 - \omega_1) \cdot \frac{(n_{A2} \cdot \mu_2)^{n_{A2}}}{(n_{A2} - 1)!} \cdot t^{(n_{A2}-1)} \cdot \exp(-n_{A2} \cdot \mu_2 \cdot t) \end{aligned} \quad (6.48)$$

und für die Betriebsdauerdichte

$$\begin{aligned} \hat{f}(t) = & \alpha_1 \cdot \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) + \\ & + (1 - \alpha_1) \cdot \frac{(n_{B2} \cdot \lambda_2)^{n_{B2}}}{(n_{B2} - 1)!} \cdot t^{(n_{B2}-1)} \cdot \exp(-n_{B2} \cdot \lambda_2 \cdot t). \end{aligned} \quad (6.49)$$

Aus den beiden Gln. (6.48) und (6.49) wird ersichtlich, daß es sich bei diesem Modell um einen zweistufigen homogenen MARKOWschen Prozeß mit den Stufen Betrieb ('0' und '1') und Ausfall ('2' und '3') handelt. Die Gewinnung der speziellen Matrix $\underline{A}^{(iii)}$ erfolgt anhand des Übergangsgraphen (Abb. 6.5-14). Zur besseren Übersicht wird diese spezielle Matrix in eine Tabellenform überführt (s. Tabelle 6.5-2).

Für die Berechnung der stationären Zustandswahrscheinlichkeiten kann aus der speziellen Matrix $\underline{A}^{(iii)}$ das algebraische Gleichungssystem abgeleitet werden. Es gilt z. B. für $n_{B2} = n_{A2} = 2$ (aber nicht Bedingung)

- 1: $\lambda_1 \cdot p_0 = \alpha_1 \cdot \mu_1 \cdot p_2 + \alpha_1 \cdot \mu_2' \cdot p_{3,2}$
- 2: $\lambda_2' \cdot p_{1,1} = \alpha_2 \cdot \mu_1 \cdot p_2 + \alpha_2 \cdot \mu_2' \cdot p_{3,2}$
- 3: $\lambda_2' \cdot p_{1,2} = \lambda_2' \cdot p_{1,1}$

$$4: \mu_1 \cdot p_2 = \omega_1 \cdot \lambda_1 \cdot p_0 + \omega_1 \cdot \lambda_2' \cdot p_{1,2}$$

$$5: \mu_2' \cdot p_{3,1} = \omega_2 \cdot \lambda_1 \cdot p_0 + \omega_2 \cdot \lambda_2' \cdot p_{1,2}$$

$$6: \mu_2' \cdot p_{3,2} = \mu_2' \cdot p_{3,1}$$

mit den Ergebnissen in Abhängigkeit von p_0

$$p_{1,1} = p_{1,2} = \frac{\alpha_2 \cdot \lambda_1}{\alpha_1 \cdot \lambda_2'} \cdot p_0, \quad (6.50)$$

$$p_2 = \frac{\omega_1 \cdot \lambda_1}{\alpha_1 \cdot \mu_1} \cdot p_0, \quad (6.51)$$

$$p_{3,1} = p_{3,2} = \frac{\omega_2 \cdot \lambda_1}{\alpha_1 \cdot \mu_2'} \cdot p_0. \quad (6.52)$$

Für die Ermittlung von p_0 gilt allgemein

$$p_0 + \sum_{i=1}^{n_{B2}} p_{1,i} + p_2 + \sum_{j=1}^{n_{A2}} p_{3,j} = p_0 + n_{B2} \cdot p_{1,1} + p_2 + n_{A2} \cdot p_{3,1} = 1. \quad (6.53)$$

Bei diesem zweistufigen MARKOWschen Modell wird die stationäre Verfügbarkeit entweder über

$$V = p_0 + n_{B2} \cdot p_{1,1} \quad (6.54)$$

oder

$$V = \frac{E(T_B)}{E(T_B) + E(T_A)} \quad (6.55)$$

Tabelle 6.5-2 Spezielle Matrix $\underline{A}^{(II)}$

Zustand	0	1.1	1.2	...	1.n _{B2} -1	1.n _{B2}	2	3.1	3.2	...	3.n _{A2} -1	3.n _{A2}
0	s+(ω ₁ + +ω ₂)λ ₁	0	0	...	0	0	-α ₁ μ ₁	0	0	...	0	-α ₁ μ ₂ '
1.1	0	s+λ ₂ '	0	...	0	0	-α ₂ μ ₁	0	0	...	0	-α ₂ μ ₂ '
1.2	0	-λ ₂ '	s+λ ₂ '	...	0	0	0	0	0	...	0	0
1.n _{B2} -1	0	0	0	...	s+λ ₂ '	0	0	0	0	...	0	0
1.n _{B2}	0	0	0	...	-λ ₂ '	s+(ω ₁ + +ω ₂)λ ₂ '	0	0	0	...	0	0
2	-ω ₁ λ ₁	0	0	...	0	-ω ₁ λ ₂ '	s+(α ₁ + +α ₂)μ ₁	0	0	...	0	0
3.1	-ω ₂ λ ₁	0	0	...	0	-ω ₂ λ ₂ '	0	s+μ ₂ '	0	...	0	0
3.2	0	0	0	...	0	0	0	-μ ₂ '	s+μ ₂ '	...	0	0
3.n _{A2} -1	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	s+μ ₂ '	0
3.n _{A2}	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	-μ ₂ '	s+(α ₁ + +α ₂)μ ₂ '

berechnet. Da bereits für die jeweiligen Betriebs- und Ausfalldauerdichten sowohl die Erwartungswerte als auch das Konfidenzintervall des Erwartungswertes berechnet werden, kann ebenfalls mit der Gl. (6.55) durch entsprechendes Einsetzen der unteren bzw. oberen Grenze der Erwartungswerte ein Konfidenzintervall der Verfügbarkeit ermittelt werden. Dabei gelten:

$$V_u = \frac{E(T_{B,u})}{E(T_{B,u}) + E(T_{A,o})}, \quad (6.56)$$

$$V_o = \frac{E(T_{B,o})}{E(T_{B,o}) + E(T_{A,u})}. \quad (6.57)$$

Die Ermittlung der instationären Verfügbarkeit kann bei $n_{B2} > 1$ und $n_{A2} > 1$ z. B. über das numerische RUNGE-KUTTA-Verfahren erfolgen.

6.6 Ergebnisse zur Modellauswahl

Zur Untersuchung der Zuverlässigkeit von Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen wird das MARKOWsche Modell ausgewählt. Hauptgrund für diese Auswahl ist, daß zum einen die Bedingungen des BOOLEschen Modells nicht erfüllt werden, zum anderen reichen die beiden Zustände – Betrieb und Ausfall – nicht für eine Beschreibung der Vorgänge in solchen Versorgungssystemen aus. Die im Anschluß daran formulierten Modellbedingungen stellen Handlungsweisen für die Überführung der komplexen Versorgungssysteme in ein Modell, entsprechend ihrer Spezifik, für die weiteren Zuverlässigkeitsuntersuchungen dar.

Für die Berechnung der Zuverlässigkeit werden 2 Modellgruppen in Ansatz gebracht, einerseits für konstante, andererseits für nichtkonstante Betriebs- und Ausfallraten. Während die Modellgruppe I nur für Heizwasser- und Wassersysteme gilt, kann die Modellgruppe II für alle zu betrachtenden Versorgungssysteme angewendet werden.

Grundlage für die Modellgruppe I bilden die zu analysierenden Zustände des Systems. Bei Heizwassersystemen sind dies die Zustände – Betrieb, kleines, mittleres und großes Leck, welche anhand der Kapazitäten der Druckhaltung und der Wasseraufbereitung definiert werden. Ähnliche Ansätze können bei Wasserversorgungssystemen zur Anwendung kommen, wobei die Zustände anhand der Kapazitäten der Wasserbereitstellung und -aufbereitung sowie der Wasserspeicherung zu bestimmen sind. Dagegen ist die Anwendung der Modellgruppe I auf Dampfsysteme nur möglich, wenn sinnvolle Kriterien für die Zustände gebildet werden können. Insgesamt ist anzumerken, daß mit größer werdender Anzahl der zu analysierenden Zustände auch der Berechnungsaufwand enorm steigt.

In einem ersten Ansatz wird für Heizwassersysteme von einem homogenen MARKOWschen Prozeß unter Verwendung von konstanten Übergangsraten ausgegangen, wobei die Grundidee auf der Anwendung der Systemzustände – Betrieb, kleines, mittleres und großes Leck – zum einen ohne, zum anderen mit

Vorinformationen über einen zukünftigen Ausfall beruht. Der einzige Unterschied zwischen beiden Modellen – I.1 und I.2 – liegt lediglich darin, daß bei dem Modell I.2 eine genauere Zustandsbeschreibung des Teilsystems Netz erfolgt.

Die Anwendung der Modellgruppe II – Semi-MARKOWscher-Prozeß – ist für alle zu betrachtenden Versorgungssysteme möglich. Vorteilhaft gegenüber der Modellgruppe I ist, daß zuvor keine Zustände definiert werden müssen. Bei der Modellgruppe II kommt die sogenannte ERLANGsche Phasenmethode zur Anwendung, welche eine Rückführung auf homogene MARKOWsche Prozesse von Systemen mit zeitabhängigen Koeffizienten, d. h. mit nichtexponentialverteilten Verweildauern ermöglicht. Grundlage dabei ist der mathematisch beweisbare Satz, daß sich die beliebige nichtexponentialverteilte Verteilung durch eine gewählte Anzahl fiktiver Hilfszustände darstellen läßt, deren Verteilungen ausschließlich exponentiell sind und die je nach der Ausgangsverteilung seriell oder parallel zufällig durchlaufen werden können. Die Beschreibung der zu approximierenden Funktion erfolgt mittels der ERLANG-Verteilung. Für die Berechnungen wurde das Modell modifiziert, d. h. für die Stufen Betrieb und Ausfall gelten als erster Ansatz jeweils 2 parallele Stufen, wobei die zweite parallele Stufe n serielle Stufen zuläßt. Dadurch bedingt werden gute Anpassungen zwischen der empirischen und der approximierten Dichtefunktion erreicht.

Die entsprechende Vorgehensweise zur Berechnung der Zuverlässigkeit mit Hilfe beider Modellgruppen sowie anschließender Diskussion erfolgt anhand von praktischen Beispielen in Kap. 7.

6.7

Algorithmus zur statistischen Aufbereitung des Datenmaterials

Abschließend wird ein Algorithmus vorgestellt, welcher dazu dient, die Betriebs- und Ausfallraten aus den Datenmaterial von beliebig vorliegenden Stör- und Schadensstatistiken zu gewinnen. Die Schrittfolge 1–10 ist in Abb. 6.7-1 dargestellt. Da die mathematisch-statistischen Verfahren im allgemeinen bekannt bzw. eine Vielzahl von Literaturquellen darüber existent sind, werden nur die wichtigsten Schritte des Algorithmus zur besseren Nachvollziehbarkeit im folgenden näher erläutert.

Der *Schritt 1* umfaßt die Betriebsdauerabstände $t_{B,i}$ und die Ausfalldauerabstände $t_{A,i}$ des zu betrachtenden Zeitraumes. Alle weiteren Schritte sind für beide Dichtefunktionen identisch.

Im *Schritt 3* erfolgt die Überprüfung auf statistische Ausreißer nach DIXON. Dieser Schritt ist wichtig, da unter den Zeitabständen $t_1, \dots, t_n$ manchmal einzelne extrem hohe oder niedrige Werte auftreten, die weitere Berechnungen beeinflussen können. Dies gilt besonders bei kleinen Stichprobenumfängen. Diese Extremwerte oder Ausreißer sollten daher von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden. Als Ausreißer x^* wird ein extrem hoher oder niedriger Wert bezeichnet, wenn durch einen sogenannten Ausreißertest die Hypothese, daß x^* ein Stichprobenwert aus der vorliegenden Grundgesamtheit ist, abgelehnt wird (Storm 1986).

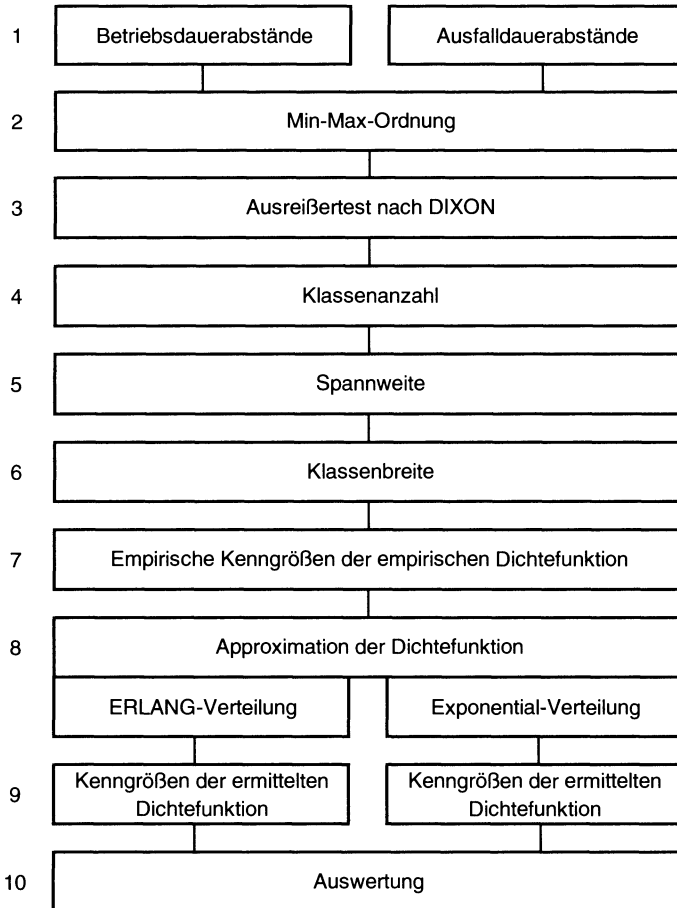


Abb. 6.7-1 Algorithmus zur Gewinnung der Übergangsraten

Mit einem Ausreißertest wird die Nullhypothese H_0 , daß alle n Werte einer Stichprobe aus der gleichen Grundgesamtheit stammen, geprüft. Der Test eignet sich nur für das Erkennen eines Ausreißers. Treten mehrere extreme Werte auf, kann der Test auch mehrmals angewendet werden. Es wurde der Ausreißertest nach DIXON gewählt, weil dieser auch andere Verteilungen als die Normalverteilung gestattet.

Für den Ausreißertest werden die größtenmäßig geordneten Werte der Stichprobe vom Umfang n benötigt. Es gilt die Prüfung, ob $x_{(n)} = x_{\max}$ ⁵ ein Ausreißer ist

$$t = \frac{x_{(n)} - x_{(n-1)}}{x_{(n)} - x_{(1)}}. \quad (6.58)$$

⁵ Zur besseren Übersicht wurde die Größe $x_{(i)}$ als Synonym von t_i verwendet.

Ist dagegen $x_{(1)} = x_{\min}$ auf Ausreißer zu untersuchen, gilt

$$t = \frac{x_{(2)} - x_{(1)}}{x_{(n)} - x_{(1)}}. \quad (6.59)$$

Die Hypothese H_0 wird abgelehnt, wenn $t \geq \tau_{n;\alpha}$ ist.

Die kritischen Werte $\tau_{n;\alpha}$ sind in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang für $n = 3, 4, \dots, 29, 30$ und von der Irrtumswahrscheinlichkeit für $\alpha = 0,01; 0,05; 0,1$ z. B. in (Storm 1986) tabelliert.

Die Irrtumswahrscheinlichkeit α mißt, wie wahrscheinlich es ist, ein Intervall zu erhalten, das den unbekannten Parameter nicht einschließt. Dabei kann davon ausgegangen werden, daß für technische Prozesse im allgemeinen eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % angesetzt wird (Rötsch 1987). Die kritischen Werte gelten dabei nur für die einseitige Fragestellung, für die zweiseitige Fragestellung beträgt die Irrtumswahrscheinlichkeit $2 \cdot \alpha$.

Für die Zeitabstände ist nur erstere Prüfung Gl. (6.58) interessant. Wird $t = \tau_{n;0,05}$ gesetzt und diese Gleichung nach $x_{(n)}$ aufgelöst, gilt

$$x_{(n)} \leq \frac{\tau_{n;0,05} \cdot x_{(1)} - x_{(n-1)}}{\tau_{n;0,05} - 1} = x_{\max}. \quad (6.60)$$

Die Funktion $\tau_{n;0,05}$ konnte mit Hilfe verschiedener Regressionsfunktionen gut approximiert werden, wobei die Werte für $n > 50$ gegen 0,25 tendieren.

Für die exponentielle Regression gilt die Gleichung

$$\tau_{n;0,05} = a + b \cdot \exp(-c \cdot n) \quad (6.61)$$

mit $a = 0,25$, $b = 0,73186$ und $c = 0,13671$

bei einer Korrelation $R = 0,9942$ und einem Standardschätzfehler $s = 0,1235$. Für einen Stichprobenumfang $n > 15$ kann diese Näherungsfunktion angewendet werden. Für den gesamten Geltungsbereich $3 \leq n \leq 30$ konnte durch polynomiale Regression 8. Ordnung eine sehr gute Näherungsfunktion ermittelt werden. Es gilt

$$\tau_{n;0,05} = \sum_{i=0}^8 a_i \cdot n^i \quad (6.62)$$

mit $a_0 = 2,2260938250$, $a_1 = -7,2785045058 \cdot 10^{-01}$, $a_2 = 1,3819569325 \cdot 10^{-01}$,
 $a_3 = -1,5679210786 \cdot 10^{-02}$, $a_4 = 1,1171138955 \cdot 10^{-03}$, $a_5 = -5,0439733861 \cdot 10^{-05}$,
 $a_6 = 1,4008826957 \cdot 10^{-06}$, $a_7 = -2,1825204970 \cdot 10^{-08}$, $a_8 = 1,4590674224 \cdot 10^{-10}$

bei einer Korrelation $R = 1,0$ und einem Standardschätzfehler $s = 0,0006$. Es wurde die 8. Ordnung gewählt, da durch diese die besten Ergebnisse erzielt wurden.

Der *Schritt 4* beinhaltet die Ermittlung der Klassenanzahl k . In Abhängigkeit von der Klassenbreite d gibt (Storm 1986) den Hinweis, die Klassenanzahl innerhalb des Intervalls $6 \leq k \leq 20$ zu wählen. Die Begründung dieser Intervallgrenzen liegt darin, daß eine zu kleine Klassenanzahl die Berechnungen verfälschen kann bzw. eine zu große Klassenanzahl unnötig den Arbeitsaufwand vergrößert. Aus der Tabelle 6.7-1 kann die Klassenanzahl k als erster Richtwert ermittelt werden.

Tabelle 6.7-1 Richtwerte für die Klassenanzahl k (Rasch et al. 1978)

n	k	n	k	n	k
> 16	6	> 150	11	> 1500	16
> 25	7	> 250	12	> 2500	17
> 40	8	> 400	13	> 4000	18
> 65	9	> 600	14	> 6000	19
> 100	10	> 1000	15	> 10000	20

Für diese Richtwerte gilt die Gleichung

$$k \leq 5 \cdot \lg(n). \quad (6.63)$$

In (Storm 1986) wird noch eine weitere Gleichung im Sinne einer Faustregel für die Ermittlung von k angegeben

$$k \approx \sqrt{n}. \quad (6.64)$$

Im *Schritt 5* wird die Spannweite R , auch als Variationsbreite bezeichnet, mittels folgender Gleichung berechnet

$$R = x_{(n)} - x_{(1)}. \quad (6.65)$$

Der *Schritt 6* umfaßt die Ermittlung der Klassenbreite d , entweder über

$$d = \frac{R}{k} \quad (6.66)$$

als Richtwert oder über die genaue Beziehung (Storm 1986)

$$d = \frac{R}{1 + 3,32 \cdot \lg(n)}. \quad (6.67)$$

Dabei ist zu beachten, daß die Klassenbreite d innerhalb einer Stichprobe als konstante Größe aufzufassen ist.

Im *Schritt 7* werden die wichtigsten empirischen Kenngrößen der empirischen Dichtefunktion berechnet, wie

- Mittelwert,
- Streuung/Varianz,
- Standardabweichung,
- Variationskoeffizient,
- Schiefe sowie
- Exzeß.

Die Gleichungen für die Ermittlung dieser Kenngrößen können in Kap. 5 nachgeschlagen werden.

Des weiteren wird, wie bei der Berechnung der Verfügbarkeit der einzelnen Modelle bereits erwähnt, für die Mittelwerte das Konfidenzintervall x_u, x_o bestimmt. Die Konfidenzschätzung ist die Angabe eines zufälligen Intervalls, das den unbekannten Parameter mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit, die nahe 100 % liegt, überdeckt. Neben der Punktschätzung, die aus jeder vorgelegten

Stichprobe einen Schätzwert des betreffenden Parameters liefert, gibt die Konfidenzschätzung Angaben über die Genauigkeit und die Sicherheit der Schätzung. Wurde eine Stichprobe entnommen, so liefert die Realisierung der Konfidenzschätzung ein Intervall, das Konfidenzintervall oder Vertrauensintervall genannt wird (Rötsch 1987). Der Ausdruck $1-\alpha$ wird dabei als Konfidenzniveau bezeichnet, welches von der Größe der Irrtumswahrscheinlichkeit α abhängig ist. Der Sachverhalt, daß eine Vergrößerung des Konfidenzniveaus (d. h. eine Verkleinerung der Irrtumswahrscheinlichkeit) eine Vergrößerung des Schätzintervalls zur Folge hat und somit zu einer „vergrößerten“ Schätzung führt, sollte immer mit beachtet werden (Bamberg et al. 1985).

Liegt keine Normalverteilung für die Schätzwerte zugrunde, so ist die Bestimmung von Konfidenzintervallen im allgemeinen mit einem größeren Aufwand verbunden. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß bei beliebiger Verteilung der Mittelwert $\bar{x}$ näherungsweise einer Normalverteilung gleich kommt, so daß für das Intervall (x_u, x_o) gilt (Bruhn 1986)

$$x_{o,u} = \bar{x} \pm z_{\alpha/2} \cdot \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}}. \quad (6.68)$$

Dabei bedeutet $z_{\alpha/2}$ das Quantil der t-Verteilung bei $n-1$ Freiheitsgraden. Die dazugehörigen Werte der Quantile sind in jeder einschlägigen Literatur zu finden. In (Bruhn 1986) dagegen ist ein Näherungsalgorithmus für die Berechnung der $z_{\alpha/2}$ -Werte in Abhängigkeit von der Irrtumswahrscheinlichkeit und des Stichprobenumfangs n dargestellt. Im folgenden wird der Näherungsalgorithmus im einzelnen dargestellt. Dabei wird zuerst die Hilfsvariable

$$x = z - \frac{\sum_{i=0}^2 c_i \cdot z^i}{\sum_{i=0}^3 d_i \cdot z^i} \quad (6.69)$$

$$\text{mit } z = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{\left(\frac{\alpha}{2} \right)^2} \right)}, \quad (6.69a)$$

$$\begin{aligned} c_0 &= 2,515517, & c_1 &= 0,802853, & c_2 &= 0,010328, \\ d_0 &= 1,000000, & d_1 &= 1,432788, & d_2 &= 0,189269, & d_3 &= 0,001308 \end{aligned}$$

für einen Geltungsbereich der Irrtumswahrscheinlichkeit von $0 < (\alpha/2) \leq 0,5$ gebildet. Anschließend können die $z_{\alpha/2}$ -Werte in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs über

$$z_{\alpha/2} = x + \sum_{i=1}^4 \frac{g_i}{(n-1)^i} \quad (6.70)$$

$$\text{mit } g_1 = (x^2 + 1) \cdot \frac{x}{4}, \quad (6.70a)$$

$$g_2 = ((5 \cdot x^2 + 16) \cdot x^2 + 3) \cdot \frac{x}{96}, \quad (6.70b)$$

$$g_3 = (((3 \cdot x^2 + 19) \cdot x^2 + 17) \cdot x^2 - 15) \cdot \frac{x}{384}, \quad (6.70c)$$

$$g_4 = (((((79 \cdot x^2 + 776) \cdot x^2 + 1482) \cdot x^2 - 1920) \cdot x^2 - 945) \cdot \frac{x}{92160} \quad (6.70d)$$

bestimmt werden. Wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$ für die weiteren Berechnungen konstant bleibt, vereinfacht sich die Gl. (6.65) zu

$$z_{\alpha/2} = 1,96 + \sum_{i=1}^4 \frac{g_i}{(n-1)^i}. \quad (6.71)$$

Die dazugehörigen Konstanten g_1 – g_4 lassen sich aus den Hilfsgleichungen (6.70a)–(6.70d) für $x = 1,96$ ermitteln.

Die Anwendung der zuvor gemachten Aussagen hinsichtlich der Berechnung von Konfidenzintervallen soll anhand der Zuverlässigkeitskenngröße – Erwartungswert – näher erläutert werden.

Alle hier ermittelten Werte der Verfügbarkeiten, insbesondere der Konfidenzintervalle, geben ein Intervall $V_u \leq V \leq V_o$ an. Dieses Verfügbarkeitsintervall wird über die einzelnen Erwartungswerte der Betriebs- und Ausfalldauer berechnet. Der Erwartungswert wird wiederum beeinflusst durch die Faktoren, wie

- den Stichprobenumfang n ,
- die Irrtumswahrscheinlichkeit α und
- die Standardabweichung der einzelnen zur Verfügung stehenden Datenreihen.

Werden die für die Berechnung des Intervalls benötigten Größen näher betrachtet, so kann festgestellt werden, daß alle diese Größen vom Stichprobenumfang abhängig sind, d. h.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i,$$

$$\hat{s} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

$$z_{\alpha/2} = 1,96 + \sum_{j=1}^4 \frac{g_j}{(n-1)^j},$$

$$x_{o,u} = \bar{x} + z_{\alpha/2} \cdot \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}}.$$

Mit Konstanthalten der Mittelwerte/Erwartungswerte und Standardabweichungen einschließlich der Irrtumswahrscheinlichkeit für $\alpha = 5 \%$ ergibt sich für die

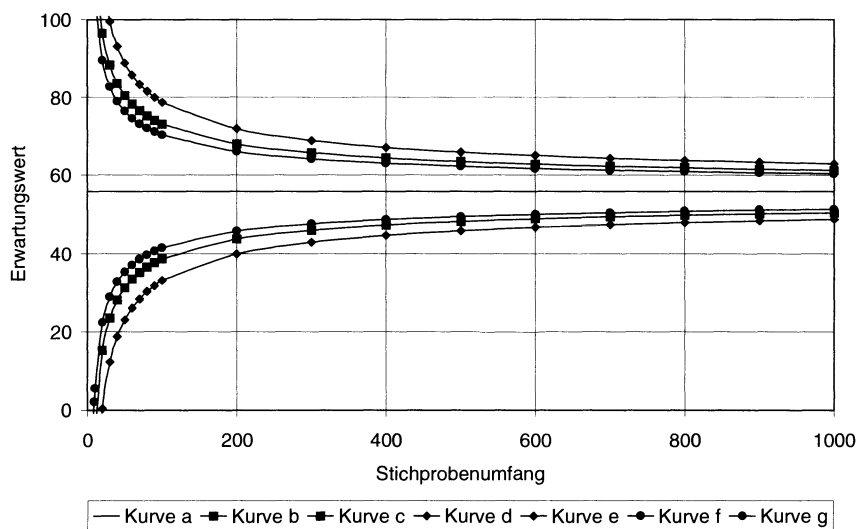


Abb. 6.7-2 Konfidenzintervall des Erwartungswertes für die Ausfalldauer in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang und der Irrtumswahrscheinlichkeit
a stationärer Erwartungswert, **b, c** untere und obere Grenze des Erwartungswertes bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %, **d, e** ...bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 %, **f, g** ...bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 %

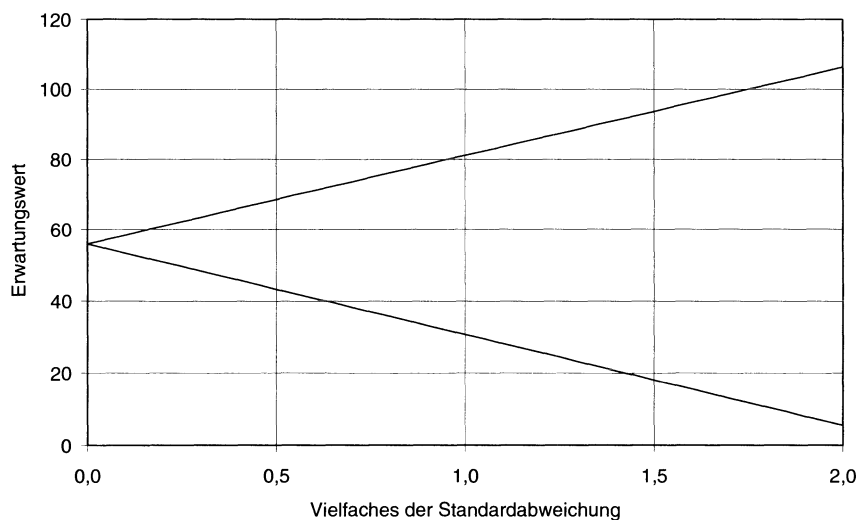


Abb. 6.7-3 Konfidenzintervall des Erwartungswertes für die Ausfalldauer in Abhängigkeit des Vielfachen der Standardabweichung

Berechnung des Konfidenzintervalles die in Abb. 6.7-2 dargestellte Abhängigkeit des Stichprobenumfanges. Der Erwartungswert und die Standardabweichung werden dabei über die Anfangsmomente nach Gl. (5.32) berechnet.

Aus Abb. 6.7-2 wird ersichtlich, daß mit größer werdendem Stichprobenumfang das Konfidenzintervall kleiner wird. Für $n \rightarrow \infty$ streben beide Intervallgrenzen dem stationären Wert zu, was aber anhand der vorhandenen Daten in der Praxis von vornherein indiskutabel sein dürfte.

Des weiteren wird gleichzeitig der zweite Einflußfaktor, die Irrtumswahrscheinlichkeit, mit 10, 5 und 1 % dargestellt. Dabei ist eindeutig zu erkennen, daß eine Verkleinerung der Irrtumswahrscheinlichkeit eine Vergrößerung des Konfidenzintervalles zur Folge hat und somit zu einer „vergrößerten“ Schätzung führt. Dieser Sachverhalt gilt insbesondere für kleine Stichprobenumfänge.

Für den dritten Einflußfaktor – Standardabweichung – ergibt sich für den konstanten Erwartungswert, Stichprobenumfang und Irrtumswahrscheinlichkeit die in Abb. 6.7-3 dargestellte Abhängigkeit. Ausgangspunkt bildet dabei das Vielfache der ermittelten Standardabweichung. Aus dieser Darstellung ist erkennbar, daß mit Verringerung der Streuung der vorliegenden Daten das Konfidenzintervall des Erwartungswertes kleiner und somit die Aussage genauer wird.

Der *Schritt 8* umfaßt die Approximation der Dichtefunktion. Ausgangspunkt bildet die Betriebsdauerdichte nach Gl. (6.49)

$$f(t) = \alpha_1 \cdot \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) + \\ + (1 - \alpha_1) \cdot \frac{(n_{B2} \cdot \lambda_2)^{n_{B2}}}{(n_{B2} - 1)!} \cdot t^{(n_{B2}-1)} \cdot \exp(-n_{B2} \cdot \lambda_2 \cdot t).$$

Dabei soll n_{B2} ganzzahlig sein und als bekannt vorausgesetzt werden. Somit gibt es 3 unbekannte Parameter in der Betriebsdauerdichtefunktion, nämlich α_1 , λ_1 und λ_2 . Der dazugehörige Ablauf der Approximation ist in Abb. 6.7-4 dargestellt.

Als Voraussetzung dazu werden die entsprechenden partiellen Ableitungen nach den unbekannten Parametern benötigt. Nach der Zusammenfassung ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\frac{\partial f(t)}{\partial \alpha_1} = \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) - \frac{(n_{B2} \cdot \lambda_2)^{n_{B2}}}{(n_{B2} - 1)!} \cdot t^{(n_{B2}-1)} \cdot \exp(-n_{B2} \cdot \lambda_2 \cdot t), \quad (6.72a)$$

$$\frac{\partial f(t)}{\partial \lambda_1} = \alpha_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) \cdot (1 - \lambda_1 \cdot t), \quad (6.72b)$$

$$\frac{\partial f(t)}{\partial \lambda_2} = (1 - \alpha_1) \cdot n_{B2}^2 \cdot \frac{(n_{B2} \cdot \lambda_2)^{(n_{B2}-1)}}{(n_{B2} - 1)!} \cdot t^{(n_{B2}-1)} \times \\ \times \exp(-n_{B2} \cdot \lambda_2 \cdot t) \cdot (1 - \lambda_2 \cdot t). \quad (6.72c)$$

Für die Ausfalldauerdichtefunktion brauchen nur α_1 , λ_1 , λ_2 und n_{B2} mit ω_1 , μ_1 , μ_2 und n_{A2} ausgetauscht werden.

Die im *Schritt 8.1* benötigten Startwerte λ_1 , λ_2 und n_{B2} lassen sich relativ unproblematisch schätzen. Dabei sollte der λ_1 -Wert etwas größer sein als der Funk-

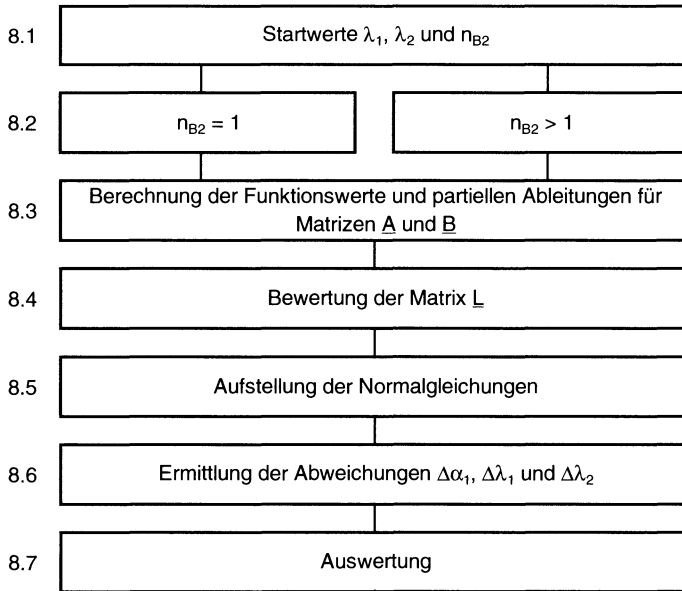


Abb. 6.7-4 Algorithmus für die Approximation der ERLANG-Dichtefunktion

tionswert der Betriebsdauerdichte an der Stelle $\hat{f}(t=0)$. Die beiden anderen Werte λ_2 und n_{B2} werden erhalten, indem die Gleichung für die zweite parallele Zustandsstufe

$$f_2(t) = (1 - \alpha_1) \cdot \frac{(n_{B2} \cdot \lambda_2)^{n_{B2}}}{(n_{B2} - 1)!} \cdot t^{(n_{B2}-1)} \cdot \exp(-n_{B2} \cdot \lambda_2 \cdot t) \quad (6.73)$$

nach t differenziert und 0 gesetzt wird. Das Maximum der zweiten parallelen Zustandsstufe ergibt sich dann zu

$$t = \frac{n_{B2} - 1}{n_{B2} \cdot \lambda_2} \quad (6.74)$$

Da bei allen Dichteverteilungen ungefähr 60–75 % der Fläche unter der Kurve im Bereich von $E(T_B) \pm \delta$ liegen, kann mit Hilfe des Koeffizienten der Streuung

$$r_2 = \frac{\delta}{E(T_{B2})} = \frac{\left(\frac{\sqrt{n_{B2}}}{\lambda_2} \right)}{\left(\frac{n_{B2}}{\lambda_2} \right)} = \frac{1}{\sqrt{n_{B2}}} \quad (6.75)$$

der Gl. (6.74) und

$$\lambda_2 = \frac{1}{E(T_{B2})}$$

n_{B2} gut geschätzt werden (Traeder 1977).

Im *Schritt 8.2* wird der Wichtungsfaktor α_1 in Abhängigkeit von der Größe des n_{B2} -Wertes berechnet, wobei für $n_{B2} = 1$

$$\alpha_1 = \frac{\hat{f}(t=0) - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (6.76a)$$

bzw. für $n_{B2} > 1$

$$\alpha_1 = \frac{\hat{f}(t=0)}{\lambda_1} \quad (6.76b)$$

gilt.

Anschließend werden im *Schritt 8.3* die Elemente für die Matrix $\underline{A}_{(3,1\dots k)}$ und $\underline{B}_{(1\dots k,3)}$ mittels der partiellen Ableitungen nach den Gln. (6.72a)–(6.72c) mit den eingesetzten Startwerten wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned} a_{(1,i)} &= b_{(i,1)} = \frac{\partial f_i(t)}{\partial \alpha_1}, \\ a_{(2,i)} &= b_{(i,2)} = \frac{\partial f_i(t)}{\partial \lambda_1}, \\ a_{(3,i)} &= b_{(i,3)} = \frac{\partial f_i(t)}{\partial \lambda_2}. \end{aligned}$$

Der *Schritt 8.4* umfaßt die Ermittlung des absoluten Fehlers zwischen dem berechneten und dem wahren Funktionswert

$$l_i(t) = \hat{f}_i(t) - f_i(t) \quad (6.77)$$

des i -ten Elements der Matrix $\underline{L}_{(1\dots k,1)}$.

Somit können im *Schritt 8.5* die Normalgleichungen mit Hilfe der berechneten Matrizen aufgestellt werden. Es gilt

$$\underline{A} \cdot \underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{L}. \quad (6.78)$$

Die durch die Normalgleichungen entstandene neue Matrix $\underline{C}_{(3,4)}$ wird im *Schritt 8.6* mit Hilfe des GAUßschen Algorithmus invertiert. Als Ergebnis werden die 3 Abweichungen der Parameter $\Delta\alpha_1$, $\Delta\lambda_1$ und $\Delta\lambda_2$ erhalten.

Den Schlußpunkt setzt die im *Schritt 8.7* durchzuführende Auswertung dieser Ergebnisse. Dabei können folgende Möglichkeiten existent sein:

1. Die erhaltenen Werte α_1 , λ_1 und λ_2 bei n_{B2} stellen das Endergebnis dar, d. h. die Summe der absoluten Fehlerquadrate der jeweiligen Funktionswerte hat ihr Minimum erreicht. Es gilt also

$$S_a = \sum_{i=1}^k l_i(t)^2 \rightarrow \text{Minimum} . \quad (6.79)$$

2. Das Minimum der Fehlerquadrate ist durch die erhaltenen Ergebnisse noch nicht erreicht worden. Diese Werte können dann aber gleichzeitig als Startwerte (Schritt 8.1) für eine nochmalige Iteration des Verfahrens verwendet werden, mit der Bedingung, daß n_{B2} konstant bleibt. Die neuen Werte werden berechnet über

$$\Delta\lambda_1 = \lambda_{1\text{neu}} - \lambda_{1\text{alt}} , \quad (6.80a)$$

$$\Delta\lambda_2 = \lambda_{2\text{neu}} - \lambda_{2\text{alt}} , \quad (6.80b)$$

$$\Delta\alpha_1 = \alpha_{1\text{neu}} - \alpha_{1\text{alt}} . \quad (6.80c)$$

3. Es können aber auch die beiden Fälle eintreten, daß mit diesen Startwerten entweder ein zu schlechtes Endergebnis erreicht wurde, oder keine Konvergenz des Verfahrens vorliegt. Beide Fälle können zum Abbruch des Verfahrens führen. Es ist aber durchaus möglich, erneut mit veränderten Eingabewerten zu starten.

Für die qualitative Bewertung der Dichtefunktion zählt dabei nicht nur die Minimierung der Fehlerquadrate S_a , sondern auch die zusätzliche Bedingung (für $n_{B2} > 1$)

$$f_{2\text{max}}(t) \leq \hat{f}_{2\text{max}}(t) ,$$

- d. h. das Maximum der zweiten parallelen Zustandsstufe der ermittelten Dichtefunktion sollte nicht größer sein, als das Maximum der empirischen Funktion.

Bei der Approximation der Dichtefunktion durch die Exponential-Verteilung vereinfacht sich gegenüber der ERLANG-Verteilung der mathematische Aufwand erheblich. Ausgangspunkt bildet wieder die Betriebsdauerdichte

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t) . \quad (6.81)$$

In Abb. 6.7-5 ist der Ablauf des Algorithmus dargestellt. Als Voraussetzung dazu wird noch die partielle Ableitung nach benötigt. Sie lautet

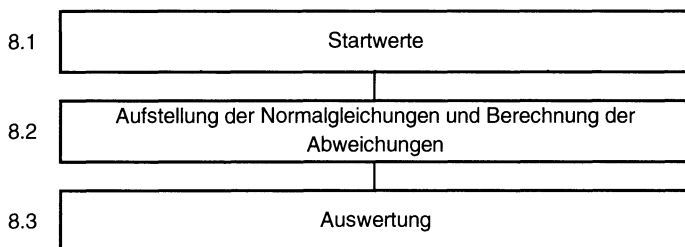


Abb. 6.7-5 Algorithmus für die Approximation der Exponential-Dichtefunktion

$$\frac{\partial f(t)}{\partial \lambda} = \exp(-\lambda \cdot t) \cdot (1 - \lambda \cdot t). \quad (6.82)$$

Für die Ausfalldauerdichtefunktion braucht nur λ durch μ ersetzt werden.

Der im *Schritt 8.1* benötigte Startwert λ läßt sich relativ unproblematisch schätzen, indem der Wert $\hat{f}(t=0)$ dafür eingesetzt wird.

Der *Schritt 8.2* umfaßt die Aufstellung der Normalgleichung. Die dazu benötigten Elemente für die Matrizen $\underline{A}_{(1,1 \dots k)}$ und $\underline{B}_{(1 \dots k,1)}$ werden wie folgt bestimmt:

$$a_{(1,i)} = b_{(i,1)} = \frac{\partial f_i(t)}{\partial \lambda}.$$

Für die Berechnung des absoluten Fehlers gilt ebenfalls die Gl. (6.77). Somit kann die Normalgleichung mit Hilfe der berechneten Matrizen und der Gl. (6.78) aufgestellt werden. Da beide Matrizen $\underline{A}$ und $\underline{B}$ eigentlich nur eindimensional sind, kann die Gl. (6.78) vereinfacht werden zu

$$\sum_{i=1}^k a_{(i)}^2 = \sum_{i=1}^k a_{(i)} \cdot l_{(i)}. \quad (6.83)$$

Die Ermittlung der Abweichung $\Delta\lambda$ wird berechnet über

$$\Delta\lambda = \frac{\sum_{i=1}^k a_{(i)} \cdot l_{(i)}}{\sum_{i=1}^k a_{(i)}^2}. \quad (6.84)$$

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt im *Schritt 8.3*. Dabei können ebenfalls, wie bei dem Algorithmus der Approximation der ERLANG-Dichtefunktion, folgende Möglichkeiten existent sein:

1. Der erhaltene Wert λ stellt das Endergebnis dar, d. h. die Summe der absoluten Fehlerquadrate nach Gl. (6.79) hat ihr Minimum erreicht.
2. Das Minimum der Fehlerquadrate ist durch das erhaltene Ergebnis noch nicht erreicht worden. Dieser Wert kann dann aber gleichzeitig als Startwert (*Schritt 8.1*) für eine nochmalige Iteration des Verfahrens verwendet werden. Dabei gilt

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{neu}} - \lambda_{\text{alt}}. \quad (6.85)$$

Um eine weitere Bewertung der ausgewählten Dichtefunktion vornehmen zu können, werden im *Schritt 9* die entsprechenden Kenngrößen wie im *Schritt 7* für die empirischen Kenngrößen berechnet. Dabei wird die Auswertung der Dichtefunktion nicht nur im Intervall $[0, \infty)$ vorgenommen, sondern auch im Berechnungsintervall $[0, t_k]$. Während bei der Berechnung der Anfangsmomente für das erste Intervall die Lösungen bereits angegeben sind, ist für das Berechnungsintervall die analytische Ermittlung, insbesondere für die ERLANG-Verteilung, bedeutend umfangreicher, da diese entscheidend von n_{B2} abhängt.

Der *Schritt 10* umfaßt die Auswertung des gesamten Algorithmus einschließlich der Bewertung der ERLANG- und Exponential-Verteilungen der Betriebs- und Ausfalldauerdichte untereinander. Als weitere Hilfsmittel, außer der bisher ermittelten Kenngrößen, dienen dafür einerseits die grafischen Darstellungen der Dichtefunktionen, andererseits das Bestimmtheitsmaß B , welches die Güte der Approximation widerspiegelt. Es gilt

$$B = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (f_i(t) - \hat{f}_i(t))^2}{\sum_{i=1}^k (f_i(t) - \bar{f})^2} = 1 - \frac{S_a}{\sum_{i=1}^k (f_i(t) - \bar{f})^2} \quad (6.86)$$

$$\text{mit } \bar{f} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k f_i(t). \quad (6.87)$$

Aus dieser Gleichung wird ersichtlich, daß für $S_a \rightarrow 0$ das Bestimmtheitsmaß $B \rightarrow 1$ geht und somit die qualitativ beste Approximation der Dichtefunktion aufweist.

Obwohl sich die mathematische Theorie für die Aufstellung der Modelle der beiden Modellgruppen recht kompliziert gestaltet, reduziert sich die Nutzbarkeit auf ein paar wenige Punkte. Voraussetzung für die Berechnung der Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit bildet die Mindestanforderung an das Datenmaterial, nämlich die Bereitstellung der Daten – Betriebs- und Ausfalldauerabstand. Als nützlich erweisen sich weiterhin die Angaben über die Auswirkungen des unplanmäßigen Ereignisses auf das System sowie über das betroffene Element, welche ja insbesondere für die Modellgruppe I für die Festlegung der Zustände benötigt werden. Für die Berechnung der Verfügbarkeit des Teilsystems Netz oder einzelner Elemente bildet die Gewinnung der jeweiligen Betriebs- und Ausfallraten der beiden Dichtefunktionen (Exponential- und ERLANG-Verteilung) den eigentlichen Hauptschwerpunkt des statistischen Algorithmus. Zur Aufbereitung des Datenmaterials und Bildung der Häufigkeitsklassen dienen der Ausreißertest sowie die einfach zu berechnenden statistischen Größen Klassenanzahl, Spannweite und Klassenbreite. Der Vergleich der empirischen und der berechneten Dichtefunktion erfolgt anhand der wichtigen statistischen Kenngrößen, wie dem Mittelwert, der Standardabweichung und der Varianz. Als weitere Entscheidungskriterien für die Wahl der Dichtefunktion werden das Bestimmtheitsmaß und der bildliche Funktionsverlauf herangezogen.

Die entsprechende Vorgehensweise erfolgt anhand von praktischen Beispielen in Kap. 7.

7 Praktische Anwendung

7.1

Handlungsschema

Nachdem für die konstanten und nichtkonstanten Betriebs- und Ausfallraten die jeweiligen Modelle aufgestellt und theoretisch erläutert wurden, folgt nun ein allgemeines Handlungsschema für die praktische Anwendung. Dieses Handlungsschema ist für jedes beliebige Fernwärme- und Wasserversorgungssystem anwendbar. Ziel ist es, ein Handlungsschema aufzustellen, das mit Hilfe der spezifischen Verfügbarkeiten des betrachteten Systems die Voraussetzungen für eine Schwachstellenanalyse schaffen soll, um daraus zuverlässigkeitserhöhende Maßnahmen und Instandhaltungsstrategien abzuleiten. Mittels dieser Maßnahmen wird es möglich werden, direkten Einfluß auf die Schadensausfallkostenfunktion auszuüben. Dieser allgemeine Zusammenhang wird in Abb. 7.1-1 nochmals verdeutlicht.

Aufgabe jedes Versorgungsunternehmens ist die Gewährleistung und Sicherung einer hohen Versorgungszuverlässigkeit des Abnehmers bzw. Verbrauchers. Diese Versorgungszuverlässigkeit ist unmittelbar verknüpft mit der Zuverlässigkeit des betrachteten Systems. Um diese Zuverlässigkeit berechnen zu können, werden als Voraussetzungen zum einen die Daten aus vorhandenen Ereignisstatistiken – mit Aufzeichnungen über Störungen, Schäden, Ausfälle und Unregelmäßigkeiten – sowie Netzstatistiken, zum anderen die definierten mathematischen Modelle benötigt (3. Säule). Dabei gilt der Grundsatz, daß je mehr Erfassungsmerkmale, wie Ereignisbeginn und -ende, Ereignisort, betroffenes Element, Reparaturzeit und Instandhaltungsmaßnahme sowie Ursachenforschung vorliegen, desto qualitativer können die Zuverlässigkeitsaussagen zum betrachteten Systems getroffen werden.

7.2

Statistiken

7.2.1

Allgemeines

Bevor speziell der Aufbau von Statistiken für unplanmäßige Ereignisse näher erläutert wird, zunächst einige allgemeine Ausführungen zu dieser Thematik.

Die Hauptaufgabe einer Stör- und Schadensstatistik, oder verallgemeinert einer Statistik für unplanmäßige Ereignisse, sichert den Informationsfluß über Störun-

gen, Schäden, Ausfälle und Unregelmäßigkeiten eines Systems. Genauer definiert sichern diese Statistiken eher den Informationsrückfluß. Mit diesen Statistiken kann die Summe der Auswirkungen (Erfolg oder Mißerfolg) eingeleiteter und durchgeführter Maßnahmen analysiert werden. Hieraus ergeben sich folgende Hauptschwerpunkte:

1. Sammeln und Speichern aller Informationen über unplanmäßige Ereignisse während des Dauerbetriebes des betrachteten Versorgungssystems,
2. Verdichten der Informationen,
3. Auswerten der Informationen sowie Erkennen von Gesetzmäßigkeiten,
4. Weitervermittlung der Erkenntnisse zur Erarbeitung und Einführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Ökonomie des betrachteten Versorgungssystems sowie
5. Erfahrungsübermittlungen.

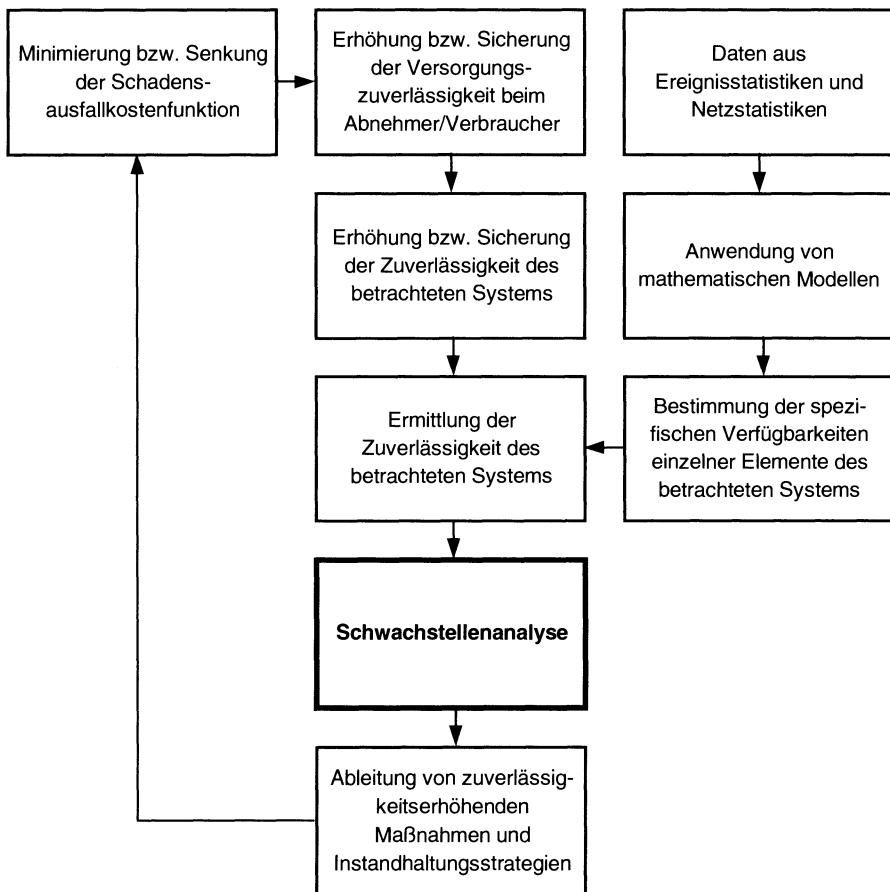


Abb. 7.1-1 Vorgehensweise des Handlungsschemas

Jedes unplanmäßige Ereignis muß nach gründlicher Aufklärung der Ursachen und Anlässe nach vorgegebenem System mit allen technischen und betriebswirtschaftlichen Werten erfaßt und klassifiziert werden. Dabei sind auch sämtliche sich aus diesem unplanmäßigen Ereignis ergebenden Folgeschäden ebenfalls mit zu erfassen.

Zur besseren Übersichtlichkeit erfolgt eine geeignete Zusammenfassung der unplanmäßigen Ereignisse, welche gleichzeitig die Grundlage für die Berechnung der Zuverlässigkeit, mit Hilfe definierter mathematischer Modelle, des betrachteten Systems darstellt. Durch sogenannte Feinalysen und gesonderte Untersuchungen werden erkannte Stör- und Schadensschwerpunkte näher analysiert. Dazu gehören unter Umständen auch gründliche Untersuchungen an Schadensobjekten vor Ort.

Ziel dieser gesammelten Informationen ist es, aus der Analyse des Stör- und Schadensgeschehens Schlußfolgerungen für die Verbesserung der Organisation der Betriebsführung, Wartung und Instandhaltung, die Durchführung des in manchen Fällen notwendigen Antihavarietrainings und für die Gestaltung des Vorschriftenwerkes abzuleiten. Bei folgenschweren Störungen oder bei akuten, gefährlichen Schadenshäufigkeiten sind Informationen z. B. für entsprechende Verbände und Organisationen zu erarbeiten, um ähnliche Vorkommnisse zu vermeiden oder in ihren Auswirkungen einzuschränken.

Letztendlich muß für eine Vergleichbarkeit der Versorgungssysteme verschiedener Versorgungsgebiete angestrebt werden, gleiche Erfassungsmerkmale zu gewährleisten. Dabei ist die vollständige und exakte Erfassung in einem genau abgegrenzten Erfassungsbereich unbedingt notwendig. Der Bereich darf jedoch nicht zu eng gewählt werden, damit auch bei Auswertung relativ seltener Ereignisse eine statistisch ausreichende Anzahl von Meldungen vorliegt.

Um zu qualitativ besseren und sicheren Aussagen zur Zuverlässigkeit der betrachteten Versorgungssystemen zu kommen, ist die Erfassung von unplanmäßigen Ereignissen zu überdenken bzw. bei sporadisch geführten Statistiken diese sogar neu zu organisieren. Dabei sollten die Informationen zu den unplanmäßigen Ereignissen die Kriterien der

- Objektivität,
- Vollständigkeit,
- Übereinstimmung,
- Kontinuität,
- Kürze,
- Folgerichtigkeit und
- Repräsentanz

erfüllen. Aufgrund der Unterstützung der Notwendigkeit von solchen Informationen stehen heutzutage in den meisten Fällen nur relativ unbeständige Angaben für eine qualitative Zuverlässigkeitsbewertung zur Verfügung. Die Entwicklung der Zuverlässigkeit, insbesondere bei den Fernwärmesystemen mit praktischer Bedeutung für die Zukunft der Fernwärmeversorgung, ist nur nach einer guten Organisation der Einholung von Informationen über diese Systeme während ihres langjährigen Betriebes möglich. Dies gilt auch im begrenztem Maße für Wasser-

versorgungssysteme, wobei hier keine anderen Alternativen in der Versorgung mit Trinkwasser existieren.

Größtenteils wurde aber auch festgestellt, daß fast alle benötigten Daten dezentralisiert erfaßt werden. Es handelt sich somit auch um ein rein organisatorisches Problem. Wichtig erscheint auch der Aspekt, daß je länger eine Statistik für unplanmäßige Ereignisse geführt wurde, um so genauere Aussagen zur Zuverlässigkeit des Versorgungssystems gemacht werden können. Der Aufwand, der für die Führung von Statistiken benötigt wird, ist dabei nicht zu unterschätzen.

Trotz Erfassung einer großen Datenmenge sind die Möglichkeiten der Statistik begrenzt und werden häufig verkannt. Prinzipiell muß sich die Auswertung der Statistik auf Fakten und Zusammenhänge beschränken, die bei der Vorbereitung und Erfassung formuliert wurden. Dabei bereitet bereits die Formulierung eindeutiger Kriterien in vielen Fällen Schwierigkeiten, wenn sie nicht gar unmöglich ist. Da zudem die tatsächlichen Ereignisse nicht komplex und meist nicht eindeutig reproduzierbar sind, ist eine definitive Entscheidung bei der Erfassung unmöglich. Damit begrenzen die mit der Erfassung gegebenen Möglichkeiten die Aussagefähigkeit der Statistik. Jedoch ist darin nicht unbedingt ein Nachteil der Statistiken zu sehen, da die Ursache hierfür in der Sache selbst zu suchen ist.

Die wichtigsten Erfassungsmerkmale für eine Ereignisstatistik zeigt Abb. 7.2-1. Diese Erfassungsmerkmale stellen gleichzeitig die Mindestanforderungen an die notwendigen Daten über das Stör- und Ausfallverhalten für die Berechnung der Zuverlässigkeit der betrachteten Versorgungssysteme dar.

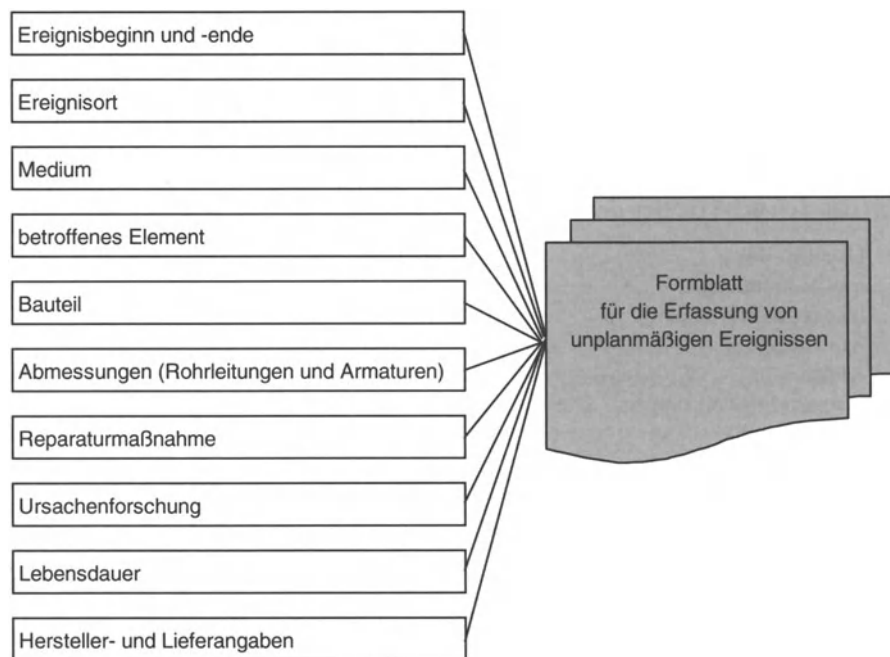


Abb. 7.2-1 Mindestanforderungen an eine Stör- und Schadensstatistik

Bei der Auswertung vorhandener Stör- und Schadensstatistiken konnte festgestellt werden, daß größtenteils nur die unbedingt notwendigen Daten und Bemerkungen geführt wurden und werden. Dabei sind aber nicht nur die Aufzeichnungen von Ereignisbeginn und -ende wichtig, sondern auch, welche Art von Reparatur- und Wartungsarbeiten eingeleitet und durchgeführt wurden, d. h. ob das betroffene Element instandgesetzt, einzelne Baugruppen ausgetauscht oder sogar alles komplett gewechselt wurde. Bei einer ordnungsgemäßen Aufzeichnung kann so die Lebensdauer des betroffenen Elementes ausgewiesen werden, die wiederum Rückschlüsse z. B. auf die Herstellerqualität, richtige Einbauweise und Notwendigkeit erlauben würde. Dies schließt gleichzeitig die Untersuchungen nach der Ausfallursache des betroffenen Elementes bzw. Bauteils mit ein.

7.2.2

Fernwärmeversorgungssysteme

Wenn von speziellen Einzellösungen verschiedener Fernwärmeunternehmen abgesehen wird, existiert nur eine Handvoll Softwarelösungen zur Erfassung von unplanmäßigen Ereignissen. Dazu zählen insbesondere die Programme

- Zuverlässigkeit von Fernwärmesystemen ZVFW98[®] sowie
- KMR-Schadensstatistik der AGFW¹.

Während bei dem Programm ZVFW98 die Erfassung unplanmäßiger Ereignisse nur einen Teil der Softwarelösung darstellt, ist das Programm der AGFW vorerst nur auf die Erfassung von unplanmäßigen Ereignissen des Verlegeverfahrens Kunststoffmantelrohr (KMR) ausgerichtet. Im folgenden werden beide Programme hinsichtlich der Erfassung kurz vorgestellt, wobei zukünftig eine Vereinheitlichung angestrebt wird.

Grundlage für die Erfassung von unplanmäßigen Ereignissen im Programm ZVFW98 sind die im Anhang 6 enthaltenen Datenblätter, wobei die Elementspezifika entsprechend den gegebenen Bedingungen erweitert werden können. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die bereits in Überarbeitung befindliche Version des Programmes, wobei sich die Datenerfassungsblätter lediglich durch eine detailliertere Spezifizierung der Elemente unterscheiden (s. Anhang 7). Hinsichtlich der Berechnung der Zuverlässigkeit gibt es keine gravierenden Veränderungen im Algorithmus.

In diesem Programm können verschiedene Medien erfaßt werden, wie Heizwasser², Dampf und das dazugehörige Kondensat. Die neue Version wird zusätzlich um das Medium Kälte erweitert. Weiterhin werden Angaben zu Ereignisinhalt, Leitungsart, Leiterart, Ereignisentdeckung und System, bei dem das Ereignis auftrat, benötigt (s. Anhang 7). Den wichtigsten Part stellt die Unterteilung des Fernwärmeversorgungssystems in seine Hauptelemente dar (s. Abb. 7.2-2). Im Anhang 7 sind auszugsweise die wichtigsten Spezifika der einzelnen Elemente

¹ Dieses Programm wurde gemeinsam erstellt von den Stadtwerken Kiel AG und der Fa. Reese GmbH & Co.

² Der Begriff Heizwasser dient in diesem Fall als Sammelbegriff für die Medien Warmwasser und Heißwasser, stellt aber keine Restriktion im Bedarfsfall dar.

nach Abb. 7.2-2 zusammengestellt. Diese richtet sich derzeit nach den gesammelten Erfahrungen hinsichtlich vorhandener Stör- und Schadensstatistiken. In den überwiegenden Fällen geht diese Unterteilung konform mit bereits vorhandenen Statistiken. Im Gegensatz zum Programm der AGFW erfolgt, aufgrund der enormen Vielfalt der möglichen Zuordnungen der einzelnen Bauteile der jeweiligen Hauptelemente, im Programm ZVFW98 keine Zuordnung der Mängel. Entscheidend ist auch die Angabe des korrekten Nenndurchmessers bei den beiden Elementen Rohrleitung und Armatur. Weiterhin wird eine Unterscheidung nach

- Dauer der Leckortung,
- Wartezeit auf Reparatur,
- Dauer der Außerbetriebnahme,
- Reparaturdauer und
- Dauer der Inbetriebnahme

für notwendig erachtet, um somit konkrete Maßnahmen zur Minimierung dieser bzw. zur Optimierung von Instandhaltungskapazitäten ableiten zu können. Voraussetzung dafür ist, daß die einzelnen Zeitabschnitte bekannt sind. Von wesentlicher Bedeutung ist weiterhin, soweit eine konkrete Abschätzung möglich ist, die Angabe des Versorgungsausfalles bei den betroffenen Abnehmern sowie der Kosten für die Schadensbehebung. Diese Zahlen werden für die Berechnung der Schadensausfallkostenfunktion des betroffenen Fernwärmesystems benötigt.

Neben diesen Angaben sind auch die der eingeleiteten bzw. durchgeführten Reparatur- und Wartungsarbeiten von Interesse, d. h. wurde das betroffene Element instandgesetzt, einzelne Bauteile bzw. -gruppen ausgetauscht oder sogar komplett gewechselt. Nicht selten trat der Fall auf, daß das betroffene Element total eliminiert wurde (z. B. Entwässerung bzw. Entleerung), weil es keine Funktion mehr für die weitere Betriebsfahrweise des Fernwärmesystems hatte. Bei einer ordnungsgemäßen Aufzeichnung kann so die Lebensdauer des betroffenen Elementes ausgewiesen werden, die wiederum Rückschlüsse z. B. auf die Herstellerqualität, richtige Einbauweise und Notwendigkeit erlauben würde. Dies schließt gleichzeitig die Untersuchungen nach der Ursache des Ereignisses mit ein. Wichtig erscheint auch, alle anfallenden Reparatur- und Wartungsarbeiten zu erfassen, die im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung durchgeführt werden, um somit diese als zukünftige Störquellen auszuschließen.

In dem Programm ZVFW98 wurde speziell für jedes Element ein eigenes Erfassungsblatt realisiert, um somit eine eindeutige Zuweisung des unplanmäßigen Ereignisses gewährleisten zu können. Für ein konkretes Fernwärmeunternehmen ist in Abb. 7.2-3 das Erfassungsblatt für das Element Rohrleitung dargestellt.

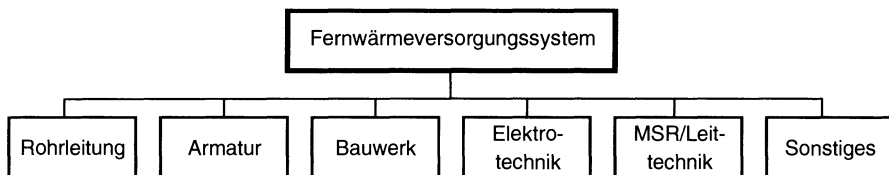


Abb. 7.2-2 Spezifika für betroffenes Element eines Fernwärmeversorgungssystems

Datenerfassungsblatt Störstatistik für das betroffene Element - Rohrleitung

Ausfallbeginn: 07 01 1998 12 40		Elementspezifika: 1. Ausfallort: ☒ nicht spezifiziert ☐ Primärnetz ☐ Druckerhöhungsst. ☐ Beimischstation ☐ Wärmeübertragerst. ☐ Sekundärnetz ☐ Verteileranlagen ☐ Hausanschlußst.
Ausfallende: 07 01 1998 19 10		
Ausfallort: Blumenstraße, Bauwerk FW21		
Medium: ☒ Heizwasser ☐ Dampf ☐ Kondensat		
Ausfallentdeckung: ☒ 1-nicht spezifiziert ☐ 2-Leckverlust ☐ 3-Meldung ☐ 4-Leckwarnsystem ☐ 5-Thermovisionskamera ☐ 6-vorbeugende Instandhaltung ☐ 7-...		Nenndurchmesser: 100 ↑ ↓
Leckortungszeit: 0 Reparaturzeit: 0 IBN-Zeit: 0		
Versorgungsausfall: ☐ Ja?		
Reparaturmaßnahme: Ausfallursachenforschung: Lebensdauer: Hersteller/Lieferer:		
<input checked="" type="button" value="OK"/>		2. Verlegeart: ☒ nicht spezifiziert ☐ konventionell ☐ KMR ☐ SMR ☐ Sockel/Stütze ☐ Kanal ☐ Lebit ☐ GFK ☐ Flex...
		3. Bauteil: ☒ Rohr ☐ Bogen/Formstück ☐ Kompensator ☐ Schweißnaht ☐ Mantelrohr ☐ Muffe/Schaum
<input checked="" type="button" value="OK"/>		<input checked="" type="button" value="Abbruch"/>

Abb. 7.2-3 Erfassungsblatt für das Element Rohrleitung

Das Programm KMR-Schadensstatistik der AGFW ist vorerst nur für das Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr zugeschnitten³. Es dient neben der Erfassung der unplanmäßigen Ereignisse in dem jeweiligen Fernwärmeversorgungsunternehmen auch für die überregionale Zusammenfassung innerhalb der AGFW. Eine erstmalige Erhebung fand für 1996 statt (AGFW 1997b). Dabei wurden die Angaben von 90 Unternehmen, die Kunststoff-Mantelrohrnetze mit einer Gesamtlänge von ca. 2900 km betreiben, ausgewertet. Somit sind laut AGFW etwa 80 % der in Deutschland verlegten Kunststoff-Mantelrohrnetze erfaßt. Dieser Anteil ist nach Meinung der AGFW sicher ausreichend, um Trends bei der Schadensentwicklung zu erkennen. Die Erhebung für 1997 ist in (AGFW 1999b) enthalten.

Ziel bei der Erhebung mit Hilfe dieses Programmes war und ist, daß die benötigten Angaben mit vertretbarem Aufwand recherchiert werden können, um insbesondere diejenigen Unternehmen, die derzeit keine Schadensstatistik führen, bei der Beantwortung der einzelnen Fragen zeitlich nicht übermäßig zu belasten.

In einer ersten Auswertung muß allerdings festgestellt werden, daß diese Schadenserhebung und -auswertung in Form einer gestrafften Zusammenfassung keine differenzierten Betrachtungen zu Schadensursachen und -kosten zulassen. Wichtige Fakten, wie Baujahr der schadhaften Leitungen, Nenndurchmesser, Gesamtzahlen der verschiedenen Muffentypen, Hersteller der Systeme sowie Aussagen

³ Die vorliegende Version befindet sich derzeit in Überarbeitung.

über Qualitätsüberwachung während der Bauzeit, stehen derzeit für die Auswertung nicht zur Verfügung. Diese und andere Faktoren werden in weiteren Versionen mit integriert.

Das Programm ist unterteilt in die Schadens- und die Hilfsdatenerfassung (Abb. 7.2-4), abgesehen von den unternehmensspezifischen Angaben, wie u. a.

- der Länge des Kunststoff-Mantelrohrnetzes,
- der davon überwachten Länge bzw. Länge der Dauerüberwachung,
- dem Nenndurchmesserbereich,
- Angaben, seit wann sich das Kunststoffmantelrohr im Einsatz befindet sowie
- Angaben zum Beginn der Führung der Statistik.

Bei der Schadenserfassung ist zu beachten, daß es sich um einen Hauptschaden handeln muß. Dabei wird unter einem Hauptschaden der Schaden verstanden, der als ursächlich für den betreffenden Schaden zu erkennen ist. Die Einordnung ist deshalb wichtig, da ein Hauptschaden mehrere Folgeschäden und somit eine Vielzahl von Aktionen haben kann. Die Schadensnummer bei den Folgeschäden und Aktionen ist gleich die des Hauptschadens.

Der Aufbau der Schadenserfassung ist aus Abb. 7.2-5 ersichtlich. Hauptschwerpunkte bilden die Eingabe der Auswahllisten Schadenskategorie, Bauteil, Mangel, Ursachenkategorie und Ursache (s. Tabelle 7.2-1). Schadenskategorie und Bauteil sind miteinander verknüpft, so daß für eine bestimmte Schadenskategorie nur eine Auswahl an Bauteilen zur Verfügung steht. Gleiches gilt für Bauteil und Mangel sowie Ursachenkategorie und Ursache. Die Definition dieser Merkmale erfolgt bei der Hilfsdatenerfassung.

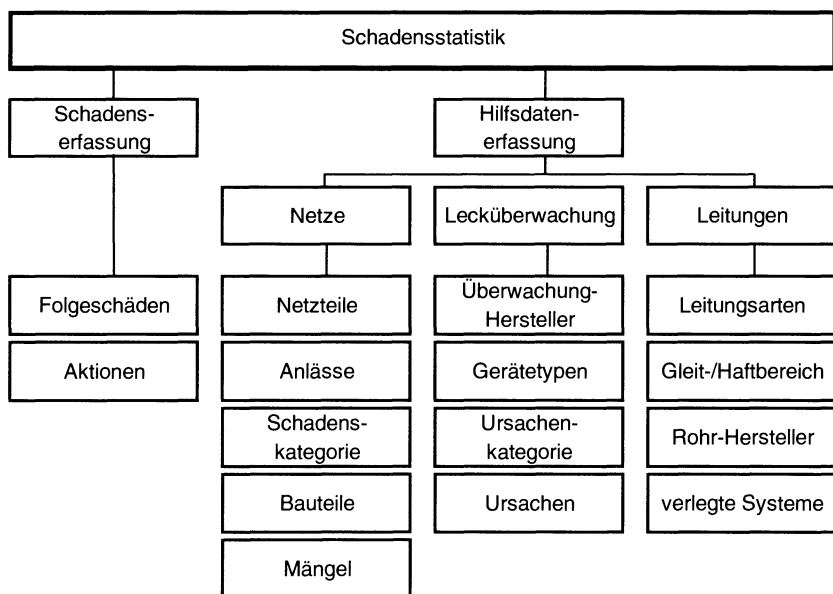


Abb. 7.2-4 Datenbankstruktur des Programmes AGFW

Abb. 7.2-5 Schadens Erfassung im Programm der AGFW

Tabelle 7.2-1 Auswahllisten für Schadens Erfassung (Auszug)

Schadens- kategorie	Bauteil	Mangel	Ursachen- kategorie	Ursache/ Fehler
– keine	– Abzweig	– aufgeplatzt	– baulicher	– Auslegung
– Muffenschaden	– Dehnungsbogen	– Außenkorrosion	Einfluß	– Herstellung
– Rohrschaden	– Dehnungszone	– Baufeuchte	– betrieblicher	– Montage
– Überwachungs- system	– Erdarmatur	– beschädigt	Art	– Werkstoff
usw.	– Festpunkt	– Blasenbildung	– Fremdeinfluß	– Beanspruchung
	– Isolierung	– Bruch	– keine	– Verschleiß
	– Kompensator	– durchfeuchtet	usw.	– Beschädigung
	– Mediumrohr	– falsch verdrahtet		– Betrieb
	– PE-Mantel	– Innenkorrosion		– Bauarbeiten
	– PE-Schweißnaht	– Kurzschluß		– Sonstiges
	– Schweißnaht	– PE-Mantel		usw.
	– Rohrbogen	beschädigt		
	usw.	usw.		

Unter Aktionen werden die Reparatur- und Austauschmaßnahmen für die betroffenen Elemente im einzelnen verstanden.

Schlußfolgernd kann dazu bemerkt werden, daß das Ziel bei der Erfassung von unplanmäßigen Ereignissen darin bestehen sollte, einheitliche Erfassungsmerkmale transparent zu definieren. Dabei ist unbedingt zu berücksichtigen, daß der

Detaillierungsgrad nicht zu hoch gewählt wird, um somit den Erfassungsaufwand nicht unnötig zu verkomplizieren. Es macht keinen Sinn, erst detailliert zu erfassen, um für eine Auswertung aufgrund fehlender Ereignisse doch wieder zusammenzufassen. Hinsichtlich des Erfassungsaufwandes ist eine Optimierung durchzuführen, da ansonsten die dadurch entstehenden zusätzlichen Kosten in keiner Relevanz zum erwarteten Ergebnis stehen. Erfahrungsgemäß muß weiterhin beachtet werden, daß die reine Ereignisbearbeitung der Netzmeister oder sogar der Netzmonteur vornimmt, d. h. die Erfassung darf keine Zweideutigkeiten enthalten und muß außerdem einfach sowie übersichtlich gestaltet werden. In vielen Fällen erfolgt erst eine Aufschreibung, bevor eine Eingabe per Computer geschieht.

Um die Zuverlässigkeit von Elementen bzw. Fernwärmeversorgungssystemen berechnen zu können, insbesondere für die Ermittlung spezifischer Kenngrößen, wird des weiteren eine Netzstatistik benötigt. Erfahrungsgemäß gestaltet sich die Erfassung der Netzstatistik wesentlich komplizierter. Auf Erfahrungswerten aufbauend reicht hier das Spektrum von sehr detailliert über sporadisch bis zu keiner geführten Statistik. In den neuen Bundesländern liegt dies vor allem darin begründet, daß die Sekundär- und Verteilersysteme durch die jeweiligen Stadtwerke ohne entsprechend ausreichend vorhandene Unterlagen mit übernommen wurden.

Insbesondere für diese Fälle werden durch das Programm ZVFW98 nur alle Rohrleitungsmeter und die Anzahl der eingesetzten Armaturen in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser, aber unabhängig vom Verlegeverfahren erfaßt. Dies reicht bei den kleineren bis mittleren Fernwärmeunternehmen erfahrungsgemäß aus. Natürlich ermöglicht eine detaillierte Erfassung aller Verlegeverfahren in einem betrachteten Fernwärmesystem wesentlich gezieltere Aussagen zur Zuverlässigkeit der Elemente.

7.2.3

Wasserversorgungssysteme

Auch für Wasserversorgungssysteme existieren nur spezielle Einzellösungen verschiedener Wasserversorgungsunternehmen zur Erfassung unplanmäßiger Ereignisse, wobei seitens des DVGW eigens dazu das Merkblatt W 395 – Schadenstatistik für Wasserrohrnetze – mit Stand 1998 erarbeitet wurde.

Im DVGW-Merkblatt W 395 sind neben den Definitionen zu den Begriffen – Schaden, Schadensstelle, Schadensort, Schadenart, Schadensursache, Schadensrate und Schwachstelle – auch entsprechende Beispiele für Datenerfassungsblätter, Schadensauflistung und -auswertung enthalten. Des weiteren werden Hinweise zu den Formblättern der Schadensstatistik Wasser des DVGW gegeben. Diese 3 Formblätter

- W1: Rohre und Rohrverbindungen,
- W2: Hausanschlußleitungen und
- W3: Armaturen

dienen der Erfassung aller Undichtheiten und Schäden am Rohrnetz. Hierbei wird der Schaden als ein unplanmäßiges Ereignis mit Wasseraustritt definiert. In den Formblättern W1 und W2 sind die Leitungslängen bzw. die Anzahl der Hausan-

schlüsse für die Ermittlung der jährlichen Schadensrate sowie die Undichtheiten/Schäden nach Nenndurchmesser und nach den Leitungsmaterialien unterteilt anzugeben. In dem Formblatt W3 erfolgen die Angaben der Armaturenanzahl sowie der Undichtheiten/Schäden in Abhängigkeit nach den einzelnen Bauarten. Für die Formblätter W1 und W2 sind dabei die Undichtheiten und Schäden den gemeinsamen Ursachenkategorien – mechanische Fremdeinwirkung, Bodenbewegung, Korrosion, defekte Rohrverbindung sowie Mängel an Leitungen und Zubehör – dagegen bei Armaturen den Ursachenkategorien – mechanische Fremdeinwirkung, Bodenbewegung, Korrosion, Undichtheiten sowie Funktionsuntüchtigkeiten – zuzuordnen.

Da hinsichtlich des Aufbaus zwischen Fernwärme- und Wasserversorgungssystemen viele Gemeinsamkeiten bestehen, ist es möglich, das Programm ZVFW98⁴ zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärmesystemen mit einer entsprechenden Anpassung ebenso für Wasserversorgungssysteme, unter Nutzung der im DVGW-Merkblatt W 395 gegebenen Hinweise, anzuwenden⁴.

Grundlage folgender Erläuterungen bildet das Datenerfassungsblatt für Wasserversorgungsunternehmen sowie die detaillierte Spezifizierung der Elemente eines Wasserversorgungssystems (s. Anhang 8). Für die Berechnung der Zuverlässigkeit gilt der gleiche Algorithmus wie bei Fernwärmeversorgungssystemen. Neben den allgemeinen Daten für ein unplanmäßiges Ereignis, wie Ereignisanfang, -ende und -ort, werden Angaben zum Ereignisinhalt, Leitungsart, Ereignisentdeckung und System, bei dem das Ereignis auftrat, benötigt (s. Anhang 8). Des weiteren sind Aussagen über die Art des Innen- und Außenkorrosionsschutzes zu treffen. Den wichtigsten Part stellt die Unterteilung des Wasserversorgungssystems in seine Hauptelemente dar (s. Abb. 7.2-6). Im Anhang 8 sind auszugsweise die wichtigsten Spezifika der einzelnen Elemente nach Abb. 7.2-6 zusammengestellt. Diese richtet sich derzeit nach den gesammelten Erfahrungen hinsichtlich vorhandener Stör- und Schadensstatistiken. In den überwiegenden Fällen geht diese Unterteilung konform mit bereits vorhandenen Statistiken. Entscheidend ist auch die Angabe des korrekten Nenndurchmessers bei den beiden Elementen Rohrleitung und Armatur. Weiterhin wird eine Unterscheidung nach

- Dauer der Leckortung,
- Wartezeit auf Reparatur,
- Dauer der Außerbetriebnahme,
- Reparaturdauer und
- Dauer der Inbetriebnahme

für notwendig erachtet, um somit konkrete Maßnahmen zur Minimierung dieser bzw. zur Optimierung von Instandhaltungskapazitäten ableiten zu können. Voraussetzung dafür ist, daß die einzelnen Zeitabschnitte bekannt sind. Von wesentlicher Bedeutung ist weiterhin, soweit eine konkrete Abschätzung möglich ist, die Angabe des Versorgungsausfalles bei den betroffenen Verbrauchern sowie der Kosten für die Schadensbehebung. Diese Zahlen werden für die Berechnung der Schadensausfallkostenfunktion benötigt.

⁴ Eine Version (ZVW) zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Wasserversorgungssystemen wird derzeit erarbeitet.

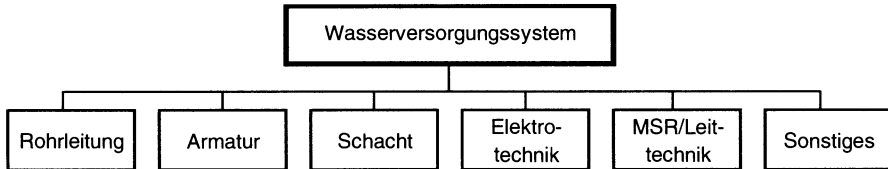


Abb. 7.2-6 Spezifika für betroffenes Element eines Wasserversorgungssystems

Neben diesen Angaben sind auch die der eingeleiteten bzw. durchgeführten Arbeiten von Interesse, d. h. wurde das betroffene Element instandgesetzt, saniert oder sogar erneuert. Dies gilt insbesondere für das Element Rohrleitung. Das wiederum bedeutet, daß mit einer gut geführten Ereignisstatistik sowie der Berechnung der Zuverlässigkeit des Wasserversorgungssystems bzw. einzelner Teilsysteme Aussagen zu Rehabilitationsmaßnahmen getroffen werden können. Des weiteren kann bei einer ordnungsgemäßen Aufzeichnung so die Lebensdauer des betroffenen Elementes ausgewiesen werden, die wiederum Rückschlüsse z. B. auf die Herstellerqualität, richtige Einbauweise und Notwendigkeit erlauben würde. Dies schließt gleichzeitig die Untersuchungen nach der Ursache des Ereignisses mit ein. Wichtig erscheint auch, alle anfallenden Reparatur- und Wartungsarbeiten zu erfassen, die im Rahmen der vorbeugenden Instandhaltung durchgeführt werden, um somit diese als zukünftige Störquellen auszuschließen.

Um die Zuverlässigkeit von Elementen bzw. Wasserversorgungssystemen berechnen zu können, insbesondere für die Ermittlung spezifischer Kenngrößen, wird des weiteren eine Netzstatistik benötigt. Erfahrungsgemäß gestaltet sich die Erfassung der Netzstatistik wesentlich komplizierter. Auf Erfahrungswerten aufbauend reicht hier das Spektrum von sehr detailliert bis sporadisch geführten Statistik. Insbesondere für diese Fälle werden nur alle Rohrleitungsmeter und die Anzahl der eingesetzten Armaturen in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser und in Abhängigkeit vom Verlegeverfahren erfaßt.

7.3

Anwendung der mathematischen Modelle

7.3.1

Aufbereitung der Daten

Ausgangspunkt für die Berechnung der Zuverlässigkeit des zu betrachtenden Versorgungssystems bildet die in Abb. 7.3-1 dargestellte Vorgehensweise, welche im folgenden anhand praktischer Beispiele näher erläutert werden soll.

Der eigentliche erste Schritt der Berechnung der Betriebsdauer- und Ausfalldauerdichtefunktion umfaßt die Aufbereitung der Daten der vorhandenen Statistik über die unplanmäßigen Ereignisse. Hierbei wird von einer Statistik für unplanmäßige Ereignisse ausgegangen, welche neben den Störungen, Schäden und Aus-

fällen auch Meldungen über Unregelmäßigkeiten enthalten kann⁵. Dabei ist zu bemerken, daß je größer der Betrachtungszeitraum für die Analyse des Ereignisgeschehens gewählt wird, desto genauer Aussagen über das Stör- und Ausfallverhalten und den Zustand des betrachteten Versorgungssystems und seiner Elemente gemacht werden können. Die Betriebsdauerzeitabstände lassen sich relativ leicht ermitteln. Notwendig dafür sind immer die beiden Daten, zum einen Datum und Uhrzeit des folgenden Ereignisses, zum anderen die der Wiederaufnahme des reparierten Elements. Die Differenz zwischen diesen beiden Daten ergibt die jeweilige Betriebsdauer. Aus dieser Betrachtungsweise ergeben sich zwei verschiedene Möglichkeiten der Aufbereitung der Daten:

- Nennweitenunabhängig: In diesem Fall werden die Betriebs- und Ausfalldauerabstände in chronologischer Reihenfolge des eingetretenen Ereignisses betrachtet, oder
- Nennweitenabhängig: In diesem Fall werden die Betriebs- und Ausfalldauerabstände innerhalb eines konkreten Nenndurchmessers betrachtet.

Während die nennweitenabhängige Betrachtungsweise Untersuchungen eines konkret vorgegebenen Nenndurchmessers erlaubt (eine weitere Spezifikation z. B. hinsichtlich bestimmter Nenndurchmesser, Rohrleitungen, Armaturen, Bauwerke, Verlegeverfahren, Lebensdauer usw. ist ebenfalls möglich), gestattet die nennweitenunabhängige Betrachtungsweise Aussagen über das Stör- und Ausfallverhalten des gesamten Versorgungssystems.

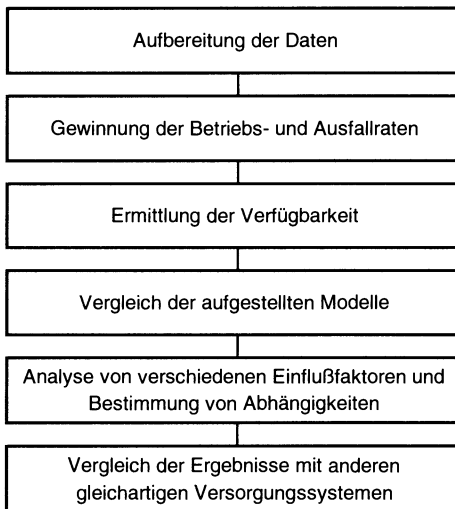


Abb. 7.3-1 Vorgehensweise für die Anwendung

⁵ Anders formuliert stellt eine Stör- und Schadensstatistik eine Teilmenge der Statistik für unplanmäßige Ereignisse dar. Bei einer Berechnung der Zuverlässigkeit ist deshalb immer mit anzugeben, welche Basis für die Ermittlung der Betriebsdauer- und Ausfalldauerdichtefunktion gewählt wurde bzw. zur Verfügung stand.

Tabelle 7.3-1 Zusammengefaßte Darstellung einer Stör- und Schadensstatistik (Auszug)

Datum	Nenndurchmesser											Ausfall- dauer [h]
	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	
11.01.1995												5
09.04.1995								x				—
14.07.1995						x						—
15.08.1995		x										6
02.09.1995	x											4
10.09.1995	x											5
11.09.1995			x									2
30.09.1995					x							10
02.10.1995									x			12
03.11.1995		x										—
12.12.1995				x								6
15.12.1995										x		10

Für die Gewinnung der einzelnen Ausfalldauerabstände trifft die analoge Vorgehensweise zu.

In verschiedenen Auswertungen bereits vorhandener Statistiken stellte sich heraus, daß eine nennweitenabhängige Betrachtungsweise meistens anhand von zu wenig Daten innerhalb eines Nenndurchmessers nicht bzw. nur in seltenen Fällen möglich ist. Es ist somit im konkreten Fall zu prüfen, welche Verfahrensweise ein brauchbares Ergebnis zur Bewertung der Zuverlässigkeit des entsprechenden Versorgungssystems liefert.

Beispiel. Die beiden Betrachtungsweisen – nennweitenabhängig und nennweitenunabhängig – sollen anhand einer vorhandenen Stör- und Schadensstatistik näher erläutert werden. Ausgangspunkt bildet dazu die zusammengefaßte Darstellung der Statistik eines Fernwärmesystems (Tabelle 7.3-1).

Bei der nennweitenunabhängigen Betrachtungsweise werden die Betriebsdauerabstände in chronologischer Reihenfolge notiert. Laut Tabelle 7.3-1 sind dies somit die folgenden Nenn-durchmesser: ?, 150, 100, 40, 32, 32, 50, 80, 200, 40, 65, 250. Dabei kann in diesem Beispiel der erste Eintrag in der Statistik nicht mit ausgewertet werden, da kein Nenndurchmesser eingetragen wurde. Selbst eine entsprechende Recherche dazu brachte nicht den nötigen Erfolg.

Um die erste Betriebsdauer mit auswerten zu können, gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten. Entweder es wird ein fiktives Datum, z. B. Beginn der Störstatistik (01.10.1995), oder bei zuvor vorhandener Statistik, das letzte Ereignis zu Hilfe genommen.

Bei der nennweitenabhängigen Betrachtungsweise werden die Betriebsdauerabstände innerhalb der jeweiligen Nenndurchmesser bzw. eines fiktiv angesetzten Bereiches notiert. Bei der Analyse der eingesetzten Nenndurchmesser werden also spaltenweise die jeweiligen Betriebsdauerabstände berechnet. Ebenso ist es möglich, beispielsweise nur den Bereich der kleineren Nenndurchmesser von DN 32–100 näher zu analysieren. In diesem Falle handelt es sich um eine quasi nennweitenunabhängige Betrachtungsweise, d. h. es gilt: 40, 32, 32, 50, 80, 40, 65.

Eine mögliche Interpretationsweise für die Ereignis- und Ausfalldauer eines Fernwärmesystems zeigt Abb. 7.3-2. Dabei ist der Begriff Ausfalldauer selbsterklärend. Dagegen berücksichtigt die Ereignisdauer die Summe der Zeiten für die eventuell notwendige Leckortung, die Außerbetriebnahme des betroffenen Elements bzw. Systems, die sich daraus ergebende Reparatur und die Wiederinbetriebnahme.

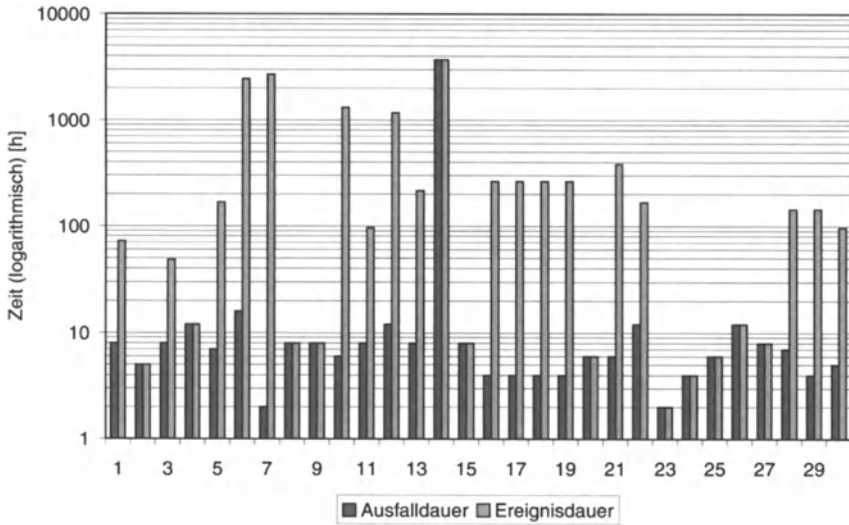


Abb. 7.3-2 Interpretation Ausfalldauer – Ereignisdauer

Oft ist es erforderlich, daß die Reparaturen der Schäden in Fernwärmeversorgungssystemen zu einem späteren Zeitpunkt, beispielsweise bei geplanten Netzstillständen außerhalb der Heizperiode, behoben werden. Entscheidend dafür ist die Größe des Schadens und der zu erwartende Versorgungsausfall. Handelt es sich sogar um einen Gewährleistungsfall, so verzögert sich die Reparatur in den überwiegenden Fällen erheblich. Der Grund dafür liegt größtenteils in der zum Teil recht komplizierten Nachweisführung des Verursacherprinzips. Der Schaden Nr. 14 des ausgewählten Beispiels betrifft eine Armatur mit gleichzeitiger Versorgungsunterbrechung. Der Abnehmer wurde für die gesamte Zeitdauer bis zu einem geplanten Netzstillstand über ein Provisorium teilversorgt. Eine sofortige Reparatur hätte einen größeren Stillstand eines Netzabschnittes mit mehreren sensiblen Abnehmern bedeutet.

Ähnliche Analogien treffen auch für Schäden in Wasserversorgungssystemen zu, wobei hier die Größe des Wasserverlustes eine nicht unerhebliche Rolle spielt. Da es in solchen Systemen keine längeren geplanten Netzstillstände geben kann, sind in diesen Fälle schnellere Entscheidungen zur Behebung des Schadens erforderlich.

7.3.2

Gewinnung der Betriebs- und Ausfallraten

Nach der Ermittlung der Betriebs- und Ausfalldauerzeitabstände folgt als zweiter Schritt die Gewinnung der Betriebs- und Ausfallraten. Durch die Aufstellung der beiden Modellgruppen I und II kommen nur die Exponential- und die ERLANG-Verteilung zur Anwendung. Grundlage für die weitere Vorgehensweise bildet der in Kap. 6 beschriebene Algorithmus zur Gewinnung der Übergangsraten.

Aus der Ermittlung der entsprechenden Betriebs- und Ausfalldauerabstände ergibt sich eine bestimmte endliche Datenanzahl n , welche größenmäßig geordnet wird. Als nächstes werden folgende statistische Kenngrößen berechnet, wie

- die Testgröße $\tau_{(n,\alpha)}$,
- der größtmögliche Wert $x_{\max}$,
- die Klassenanzahl k ,
- die Spannweite R ,
- die Klassenbreite d sowie
- die Testgröße $z_{(\alpha/2)}$.

Befinden sich statistische Ausreißer in der vorgegebenen Datenreihe, so muß die Datenausgangsanzahl n um die Anzahl der Ausreißer korrigiert werden. Im Anschluß daran werden die empirischen Kenngrößen ermittelt, welche für den späteren Vergleich mit den berechneten Kenngrößen benötigt werden. Die Berechnung der empirischen Dichteverteilung erfolgt nach der allgemein gültigen Gleichung

$$\hat{f}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t} \quad (7.1)$$

Werden die angewendeten Kenngrößen in diese Gleichung transformiert, so gilt für die zugeschnittene Gleichung

$$f_i(t) = \frac{n_i}{n \cdot d} \quad (7.2)$$

mit der Klassenanzahl $i = 1, \dots, k$. Somit brauchen die geordneten Daten nur noch den entsprechenden Klassen zugeordnet und deren Häufigkeit innerhalb der Klasse notiert werden.

Unter Verwendung des beschriebenen Approximationsverfahrens werden die Ergebnisse für beide Verteilungsfunktionen erhalten. Kriterium für die Optimierung ist die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate der berechneten Dichtefunktion. Gleichzeitig ist es möglich, die Güte der Approximation einerseits über das Bestimmtheitsmaß, andererseits über die Darstellung der beiden Verteilungsfunktionen sowie der wahren Werte vorzunehmen. Dabei gilt, daß je höher das Bestimmtheitsmaß, desto besser ist die Approximation der Dichtefunktion. Dabei kann für das Bestimmtheitsmaß ein maximaler Wert von 1 erreicht werden.

Im folgenden wird aus vorhandenen Ereignisstatistiken die Vorgehensweise bei der Gewinnung der Betriebs- und Ausfallrate der Exponential- und der ERLANG-Verteilung erläutert.

In einem ersten Beispiel wies am Ende des Betrachtungszeitraumes das Fernwärmesystem eine längenmäßige Ausbreitung von etwa 122 km auf. Bei diesem Fernwärmesystem kommt als Heizmedium Heißwasser zur Anwendung. Bei der Auswertung der konkret vorliegenden Stör- und Schadensstatistik war zu beachten, daß mit Beginn der Statistik sogenannte Nenndurchmesserbereiche, wie $DN < 150$, $150 \leq DN \leq 400$ und $DN > 400$ zugeordnet wurden. Für diese Einteilung sind die aufgestellten Modellgruppen nur bedingt nutzbar. Deshalb wurde versucht, mit Hilfe einer Recherche durch Befragung, die eingetretenen unplanmäßigen Ereignisse konkret dem jeweiligen Nenndurchmesser zuzuordnen.

Tabelle 7.3-2 Nennweitenabhängige Betriebsdauerabstände

DN	Betriebsdauerabstände [Tage]
125	814
150	1254, 805, 1512, 515, 247
200	814, 1383, 528, 207
250	3467
300	488, 2, 1584, 815, 1844
350	194, 153, 519, 924, 443, 7, 1253, 171, 725, 28
400	548, 33, 4468
500	98, 328, 275, 299, 643, 80, 18, 17, 294, 29, 244, 34, 23, 42, 13, 210, 6, 4, 14, 345, 923, 20, 58, 124
600	2372, 2206
700	547, 2612
800	40, 556, 1599

Für eine *nennweitenabhängige Betrachtungsweise* kann die jeweilige Betriebsdauer zwischen zwei unplanmäßigen Ereignissen innerhalb des zu betrachtenden Nenndurchmessers aus der Statistik abgelesen werden.

Beispiel. Aus der Statistik werden für einen bestimmten Nenndurchmesser die Ereignisdaten 01.01.1995, 14.07.1995, 14.12.1995, usw. ausgelesen. Zwischen den beiden ersten Ereignissen sind 194 Tage vergangen, was der ersten Betriebsdauer entspricht. Die nächstfolgende Betriebsdauer ergibt 153 Tage usw. Damit ergeben sich die in Tabelle 7.3-2 aufgezeigten nennweitenabhängigen Betriebsdauerabstände, hier für einen Erfassungszeitraum von 13 Jahren.

Ein entscheidendes Kriterium für die Approximation der Dichtefunktion ist die Bereitstellung der Mindestanzahl von auswertbaren Daten. Nach vielen bereits durchgeführten Berechnungen ist die Mindestanzahl auf 25 Datensätze begrenzt. Die Gründe dafür liegen einerseits in dem angewendeten Approximationsverfahren, andererseits in der zu erreichenden Approximationsgüte, um somit interpretationsfähige Ergebnisse zu erhalten.

In Auswertung mehrerer Ereignisstatistiken wurde festgestellt, daß eine nennweitenabhängige Betrachtungsweise den eher seltenen Fall darstellt.

Neben der eigentlichen nennweitenabhängigen Betrachtungsweise kann quasi auch nach anderen Kriterien das zu betrachtende System analysiert werden. Dazu zählen beispielsweise Verlegeverfahren bzw. Rohrwerkstoffe – insbesondere bei Wasserversorgungssystemen – Armaturen, Bauwerke, Lebensdauer usw. Voraussetzung dazu bildet die Erfassung dieser Merkmale in der Ereignisstatistik.

Für eine *nennweitenunabhängige Betrachtungsweise* kann die jeweilige Betriebsdauer zwischen zwei unplanmäßigen Ereignissen aus der chronologischen Reihenfolge aus der Statistik abgelesen werden. Das folgende Beispiel zeigt die Vorgehensweise der Berechnung sowie entsprechende zu beachtende Hinweise.

Beispiel. Aus der Statistik werden die Ereignisdaten chronologisch ausgelesen und die sich jeweils ergebenden Betriebsdauerabstände nach der Vorgehensweise Tabelle 7.3-1 notiert. Größtmäßig geordnet ergibt sich daraus die Reihenfolge in Tagen:

2	2	2	4	6	7	10	10	13	13
13	14	14	16	18	18	22	23	28	31
33	36	42	43	48	51	52	56	58	58
60	61	64	74	76	84	87	92	93	96
99	113	113	116	118	127	134	148	153	144
155	157	161	224	253	254	261	319	389	

Insgesamt standen 68 Daten zur Verfügung, von denen 59 Daten für eine konkrete Auswertung verwendet werden konnten. Der Rest der Daten konnte keinem direkten Nenndurchmesser zugeordnet werden. Daraus ergibt sich ein relativ niedriges Auswerteverhältnis von 86,8 %. Anhand dieses Beispiels ist zu erkennen, welche Bedeutung einer exakten Aufschreibung der Ereignisse zukommt.⁶

Für die geordneten Daten ergeben sich folgende statistische Ausgangswerte (Tabelle 7.3-3).

Für die Approximation der Dichtefunktion werden die Klassenanzahl auf 8 ab- und die Klassenbreite auf $d = 57$ Tage aufgerundet. Damit können die geordneten Daten den entsprechenden Klassen zugeordnet und mit Hilfe der Gl. (7.2) die empirische Dichtefunktion berechnet werden (Tabelle 7.3-4). Da bei der empirischen Dichtefunktion ein zweites Maximum bei $t = 229$ auftritt, muß ebenfalls $n_{B2} > 1$ gewählt werden.

Tabelle 7.3-3 Statistische Ausgangswerte

Kenngröße	nach Gl.	Ergebnis
Testgröße $\tau_{(n,0,05)}$	(6.61)	0,2502
größtmöglicher Wert $x_{\max}$	(6.60)	424,8
Klassenanzahl k	(6.63)	8,85
Spannweite R	(6.65)	389
Klassenbreite d	(6.67)	56,5
Testgröße $z_{(0,05/2)}$	(6.70)	2,0018

Tabelle 7.3-4 Berechnung der empirische Dichtefunktion

	Klassenbreite	Häufigkeit	Zeit	empirische Werte
i	d	h(i)	t	$\hat{f}(t)$
1	0– 57	28	0	0,0083258995
2	58–114	15	58	0,0044603033
3	115–171	10	115	0,0029735355
4	172–228	1	172	0,0002973536
5	229–287	3	229	0,0008920607
6	286–342	1	286	0,0002973536
7	343–399	1	343	0,0002973536
8	400–	0	400	0,0000000000

⁶ Da sich die Berechnung und deren Diskussionen über mehrere Seiten erstreckt, wird anhand der Übersichtlichkeit auf die Anwendung des Kleindruckes verzichtet.

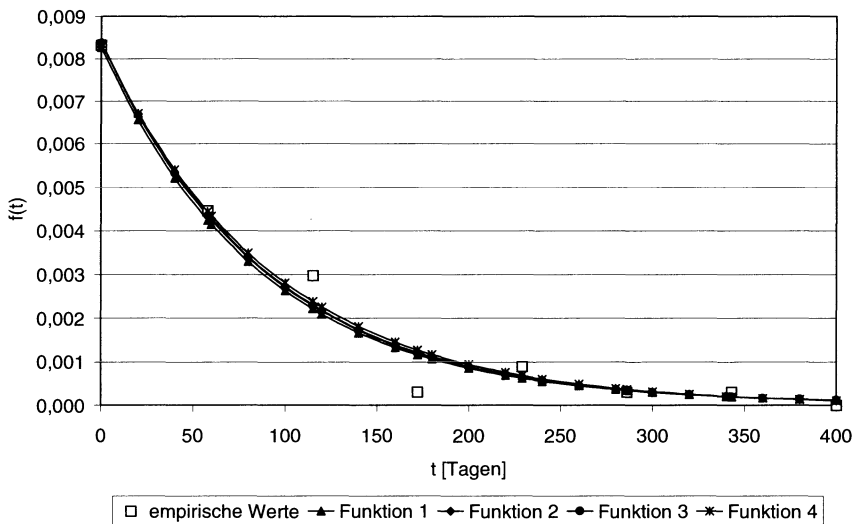


Abb. 7.3-3 Approximation der ERLANG-Dichtefunktion für $k = 8$ und $d = 57$ Tage

Funktion	n_{B2}	α_1	λ_1	λ_2	B	S_a
1	1	0,70862	0,01159	0,00016	0,97360	0,0000014844
2	2	0,74430	0,01127	0,00023	0,97604	0,0000013950
3	3	0,73969	0,01133	0,00046	0,97576	0,0000014053
4	4	0,76528	0,01093	0,00016	0,97615	0,0000013821

Unter Einhaltung der Bedingung

$$f_{2\max}(t) \leq \hat{f}_{2\max}(t)$$

können dann für steigende n_{B2} , beginnend mit $n_{B2} = 2$, die Parameter der ERLANG-Dichtefunktion ermittelt werden. Kriterium ist dabei die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate S_a .

Die erhaltenen Ergebnisse für verschiedene Ansätze der Approximation der ERLANG-Dichtefunktion bei konstanter Klassenanzahl k und Klassenbreite d sind mit den empirischen Werten gemeinsam in Abb. 7.3-3 dargestellt. Wie daraus ersichtlich wird, liegen die approximierten Dichtefunktionen sehr nah beieinander. Die Kriterien dazu sind das Bestimmtheitsmaß B und die der Fehler S_a . Selbst eine Erhöhung von n_{B2} auf 10 bringt keine Verbesserung hinsichtlich der Approximation. In Auswertung dieser Ergebnisse reicht es aus, die Funktion 1 auszuwählen. Es handelt sich dabei um eine Dichtefunktion der reinen Hyper-Exponential-Verteilung mit folgendem Aussehen

$$f(t) = \alpha_1 \cdot \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) + (1 - \alpha_1) \cdot \lambda_2 \cdot \exp(-\lambda_2 \cdot t).$$

Eine wichtige Begründung für diese Wahl liegt auch darin, nicht unnötig den Rechenaufwand zu vergrößern, zumal bei diesem Approximationsverfahren auch einige Schätzgrößen verwendet werden.

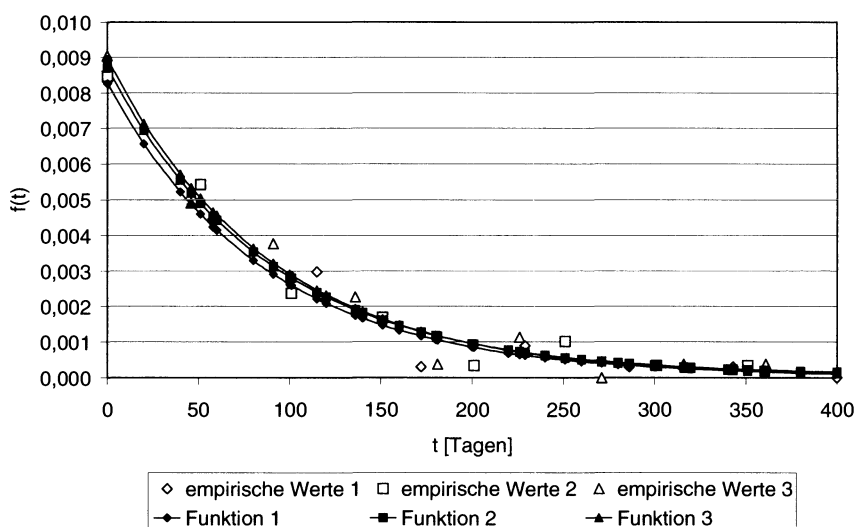


Abb. 7.3-4 Approximation der ERLANG-Dichtefunktion für variable Kassenanzahl k und Klassenbreite d

Funktion	k	d	n_{B2}	α_1	λ_1	λ_2	B	S_a
1	8	57	1	0,70862	0,01159	0,00016	0,97360	0,0000014844
2	8	50	1	0,75054	0,01140	0,00033	0,98175	0,0000010968
3	9	45	1	0,79472	0,01125	0,00005	0,97636	0,0000016585

Die Analyse der Sensibilität der Klassenanzahl und der sich daraus ergebenden Klassenbreite ist in Abb. 7.3-4 dargestellt. Dabei sollte aber immer beachtet werden, daß keine zu großen Abweichungen von der eigentlich berechneten Klassenanzahl und -breite zugelassen werden, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Diese Sensibilitätsanalyse zeigt, daß sich mit Verringerung der Klassenbreite bei gleicher Klassenanzahl das Ergebnis der Approximation etwas verbessert. Das Bestimmtheitsmaß steigt von 0,97360 auf 0,98175. Ziel sollte bei der Approximation sein, die berechneten statistischen Ausgangswerte unverändert zu lassen.

Aus diesen Betrachtungen wird ersichtlich, daß die Eingangsdaten, wie

- die Datenfolge,
- die Klassenanzahl,
- die Klassenbreite,
- die empirischen Kenngrößen,
- die empirischen Werte (Histogramm),
- die empirische Dichtefunktion sowie
- die Wahl der Parameter für die Approximation der Dichtefunktion

stets variabel sind. Für diese Fälle bietet das Programm ZVFW98 ein integriertes, eigens dafür entwickeltes, Expertensystem an, welches mit Zunahme der Varianten und der durchgeführten Berechnungen lernt. Momentan sind fast 900 Varien-

ten implementiert. Damit wären rein theoretisch über 250.000 Berechnungen für die Findung der besten Approximation möglich. Außerdem hat dies den Vorteil, daß der Anwender nicht über das vollständige mathematische Hintergrundwissen verfügen muß.

Abschließend erfolgt der Vergleich der empirischen und der wahren Kenngrößen (Tabelle 7.3-5). Für die entsprechenden Gleichungen wird auf das Kap. 6 verwiesen.

Für die Modellgruppe I wird die Exponential-Dichtefunktion benötigt. Die Approximation vereinfacht sich wesentlich gegenüber die der ERLANG-Dichtefunktion. Ausgangspunkt bilden die in der Tabelle 7.3-4 enthaltenen empirischen Werte. Das Ergebnis der Approximation ist mit der ERLANG-Dichtefunktion und den empirischen Werten gemeinsam in Abb. 7.3-5 dargestellt. Bei der Approxima-

Tabelle 7.3-5 Vergleich der empirischen und wahren Kenngrößen in den Grenzen (0;400 Tage) des berechneten Beispiels

Kenngröße	empirisch	wahr
Mittel-/Erwartungswert	84,373	63,010
Streuung/Varianz	7108,479	6016,180
Standardabweichung	84,312	77,564
Variationskoeffizient [%]	99,928	123,098
Schiefe	1,551	1,631
Exzeß	2,334	2,513
unteres Konfidenzintervall zum Mittel-/Erwartungswert	62,401	42,796
oberes Konfidenzintervall zum Mittel-/Erwartungswert	106,345	83,223

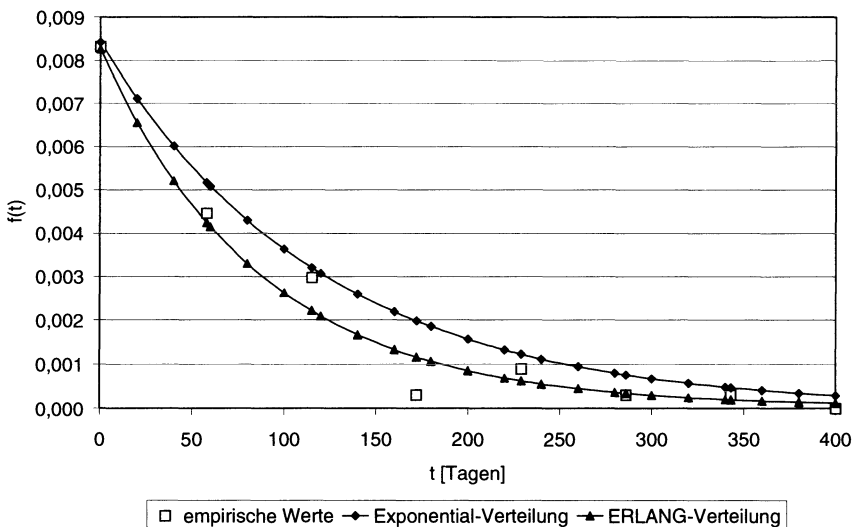


Abb. 7.3-5 Approximation der Exponential-Dichtefunktion sowie Vergleich mit der ERLANG-Dichtefunktion

tion der Exponential-Dichtefunktion ergibt sich ein Fehler $S_a = 0,0000038204$ und ein Bestimmtheitsmaß $B = 0,93241$. Gegenüber der ERLANG-Dichtefunktion paßt sich diese Funktion schlechter an die vorgegebenen empirischen Werte an.

Die Vorgehensweise zur Approximation der Dichtefunktion für die Ausfalldauerabstände erfolgt analog die der Betriebsdauerabstände.

Das folgende Beispiel zeigt die Anpassungsfähigkeit der Dichtefunktion einer ERLANG-Verteilung gegenüber einer Exponential-Verteilung.

Beispiel. Gegeben ist eine Stör- und Schadensstatistik für den Zeitraum eines Betriebsjahres mit 30 Ereignissen in einem Fernwärmesystem. Größenmäßig geordnet ergibt sich daraus die Reihenfolge für die Betriebsdauerabstände in Tagen:

1	1	1	2	4	5	7	8	9	10
11	11	11	11	15	15	16	16	17	19
20	25	25	30	60					

Insgesamt standen 29 Daten zur Verfügung, von denen 25 Daten für eine konkrete Auswertung verwendet werden konnten. Der letzte Wert stellt dabei einen statistischen Ausreißer dar. Der Rest der Daten konnte keinem direkten Nenndurchmesser zugeordnet werden. Daraus ergibt sich ein relatives Auswerteverhältnis von 86,21 %. Auch bei diesem Beispiel muß bestätigt werden, welche Bedeutung einer exakten Aufschreibung der Ereignisse zukommt. Die Ergebnisse der Approximationen für beide Dichtefunktionen sind mit den empirischen Werten gemeinsam in Abb. 7.3-6 dargestellt.

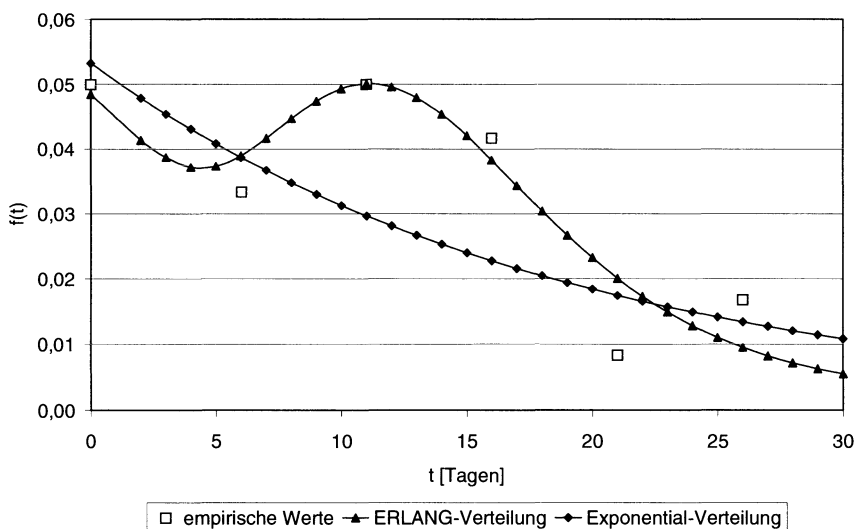


Abb. 7.3-6 Approximationen beider Dichtefunktionen für die Betriebsdauer

Funktion	n_{B2}	α_1	λ_1	λ_2	B	S_a
ERLANG	7	0,60120	0,08061	0,06964	0,82036	0,0002346745
Exponential			0,05326		0,17793	0,0009061748

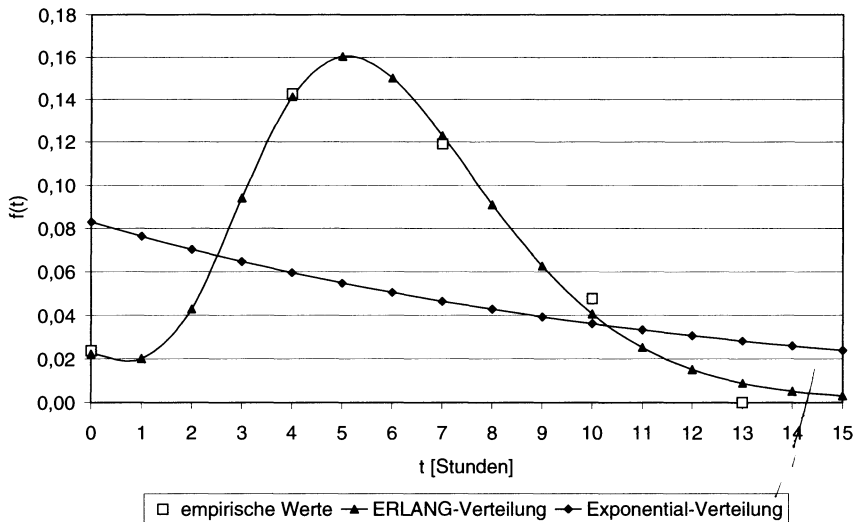


Abb. 7.3-7 Approximationen beider Dichtefunktionen für die Ausfalldauer

Funktion	n_{B2}	α_1	λ_1	λ_2	B	S_a
ERLANG	6	0,09780	0,22846	0,16167	0,99000	0,0001471867
Exponential			0,08299		–	0,0166444042

Für die Ausfalldauerabstände in Stunden ergibt sich die folgende größenmäßig geordnete Reihenfolge:

2	2	4	4	4	4	4	4	5	5
6	6	6	6	7	7	8	8	8	8
8	8	8	8	12	12	12	12	16	3720

Insgesamt standen 30 Daten zur Verfügung, die alle für eine konkrete Auswertung verwendet werden konnten. Bei den beiden letzten Werten handelte es sich um statistische Ausreißer. Die Ergebnisse der Approximationen für beide Dichtefunktionen sind mit den empirischen Werten gemeinsam in Abb. 7.3-7 dargestellt.

Aus diesem Beispiel wird ersichtlich, daß in diesem Falle die Approximation der einfachen Exponential-Verteilung versagt. Es ist aber auch anzumerken, daß es Fälle gibt, wo sogar die Approximation der ERLANG-Verteilung scheitert bzw. schlechte Ergebnisse erzielt.

Im Ergebnis liegen somit für die weiteren Betrachtungen die Betriebs- und Ausfallrate, entsprechend der gewählten Restriktionen, vor.

7.3.3
Ermittlung der Verfügbarkeit

Mit den oben ermittelten Betriebs- und Ausfallraten können nun die jeweiligen Zustandswahrscheinlichkeiten bzw. die stationären Verfügbarkeiten entsprechend

der in Kap. 6 aufgestellten Modellgruppen I und II bestimmt werden. Die Bewertungen der einzelnen Modelle erfolgen anhand von praktischen Beispielen aus Fernwärmeversorgungssystemen.

Modell I.1. Der Übergangsgraph des Modells I.1 wurde in Abb. 6.5-10 dargestellt. Für die Ermittlung der stationären Verfügbarkeiten sind die einzelnen Faktoren bzw. Hilfsgrößen q_i , x_{ik} und k_i der Gln. (6.37)–(6.41) entscheidend. Ausgangspunkt dazu bildet die Analyse des Ereignisgeschehens des betrachteten Versorgungssystems nach Totalausfällen. Diese ins Verhältnis mit der Gesamtausfallanzahl n gesetzt, ergibt die relative Häufigkeit q_3 , d. h. die empirische Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Totalausfällen. Die beiden anderen Häufigkeiten q_1 und q_2 dagegen lassen sich aus der Randbedingung

$$\sum_{i=1}^3 q_i = 1$$

ermitteln, wobei aber anhand praktischer Erfahrungen $q_1 \geq q_2$ gelten sollte. Um überhaupt den Einfluß der 4 relativen Häufigkeiten x_{ik} bewerten zu können, werden diese vorerst frei gewählt unter Berücksichtigung nach Gl. (6.40). Gleiches gilt natürlich für die Konstanten k_i der Reparaturraten. Dabei wird davon ausgegangen, daß diese Konstanten mit dem Verhältnis $k_1 \geq k_2 \geq k_3$ gewählt werden sollten, da bekanntlich die Reparatur eines größeren Schadens länger dauern kann, als eine Reparatur kleineren oder mittleren Umfangs.

Die Konfidenzintervalle der Erwartungswerte werden über die in Kap. 6 beschriebenen Gleichungen erhalten. Die stationäre Verfügbarkeit kann hergeleitet werden, indem die jeweiligen 1. Ableitungen der Zustandswahrscheinlichkeiten

$$\frac{d}{dt}(p_i(t)) = 0$$

gesetzt werden. Die entsprechenden Ergebnisse sind in den Gln. (6.42) dargestellt. Für die Ermittlung der unteren Verfügbarkeitsgrenze V_u werden die untere Betriebsdauergrenze $T_{B,u}$ und die obere Ausfallgrenze $T_{A,o}$, für die obere Verfügbarkeitsgrenze V_o dagegen die obere Betriebsdauergrenze $T_{B,o}$ und die untere Ausfalldauergrenze $T_{A,u}$ benötigt. Die entsprechenden Betriebs- und Ausfallraten lassen sich ermitteln über die Beziehungen

$$\lambda = \frac{1}{T_B} \quad \text{bzw.} \quad \mu = \frac{1}{T_A}.$$

Ob und welchen Einfluß die Wahl der Hilfsgrößen auf die Verfügbarkeit im einzelnen hat, kann durch Variieren der Hilfsgrößen q_i , x_{ik} und k_i unter Voraussetzung obiger Bedingungen überprüft werden. Dazu das folgende Beispiel.

Beispiel. Gegeben sind die Konfidenzintervalle der Erwartungswerte für die Betriebsdauer- und Ausfalldauerabstände für die Integralgrenzen $[0, t_k]$ der einzelnen Dichtefunktionen der Exponential-Verteilung, wobei t_k dem oberen Wert der letzten Häufigkeitsklasse entspricht. Innerhalb des ausgewerteten Betrachtungszeitraumes traten 3 Ausfälle auf, die zum Totalausfall des Versorgungssystems führten. Somit gilt mit einer Gesamtausfallanzahl von $n = 60$ (ausgehend von

den Betriebsdauerabständen) für $q_3 = 3/60 = 0,05$. Alle anderen Hilfsgrößen wurden vorerst frei gewählt unter Einhaltung der vorgegebenen Restriktionen.

$$\begin{array}{llll} q_1 = 0,75 & x_{21} = 0,5 & x_{31} = 0,5 & k_1 = 3 \\ q_2 = 0,20 & x_{22} = 0,5 & x_{32} = 0,5 & k_2 = 2 \\ q_3 = 0,05 & & & k_3 = 1. \end{array}$$

Die Tabelle 7.3-6 beinhaltet dazu alle Ergebnisse. Ob und welchen Einfluß die Wahl der Hilfsgrößen auf die Verfügbarkeit im einzelnen hat, zeigt die Tabelle 7.3-7. Dabei wurden nur die jeweils geänderten Werte der Hilfsgrößen und der unteren Verfügbarkeitsgrenze eingetragen. Auch hier wird ersichtlich, daß die Hilfsgrößen insgesamt keinen wesentlichen Einfluß auf die Verfügbarkeit haben. Selbst wenn die relative Häufigkeit q_3 (Eintritt eines großen Lecks) größere Werte als 0,05 annehmen würde (Spalte 4 und 5), verändert sich die Verfügbarkeit nur geringfügig. Ursache für die zu geringe Einflußnahme der Hilfsgrößen bei der Berechnung der Verfügbarkeit ist das Verhältnis λ zu μ . In diesem konkreten Beispiel ist dies der Faktor 24, allein gegeben durch die Umrechnung der Betriebsdauerabstände in Stunden.

Modell I.2. Das Modell I.1 kann unter Beibehaltung der 4 Stufen, wie bereits beschrieben, um einen Zustand erweitert werden. Dieser zusätzliche Zustand umfaßt bestimmte Vorinformationen von Ereignissen, welche nicht die 1. Stufe verlassen. Der dazugehörige Übergangsgraph des Modells I.2 wurde in Abb. 6.5-11 dargestellt. Die Herleitung der stationären Verfügbarkeit erfolgt analog des Modells I.1. Die Konfidenzintervalle der Erwartungswerte werden über die in Kap. 6 beschriebenen Gleichungen erhalten. Die stationäre Verfügbarkeit kann hergeleitet werden, indem die 1. Ableitungen der Zustandswahrscheinlichkeiten

$$\frac{d}{dt}(p_i(t))=0$$

Tabelle 7.3-6 Konfidenzintervalle der Dichtefunktion der Exponential-Verteilung

Kenngröße	unteres Konfidenzintervall	oberes Konfidenzintervall
Betriebsdauerdichte T_B	75,9 Tage	122,2 Tage
Ausfalldauerdichte T_A	46,1 Stunden	80,7 Stunden
Verfügbarkeit V	0,99781	0,99922

Tabelle 7.3-7 Einfluß der Hilfsgrößen auf die Verfügbarkeit

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
q_1	0,75	0,50	0,85	0,50	0,33				
q_2	0,20	0,45	0,10	0,30	0,33				
x_{21}	0,50							0,00	0,25
x_{22}	0,50							1,00	0,75
q_3	0,05			0,20	0,33				
x_{31}	0,50							0,00	0,25
x_{32}	0,50							1,00	0,75
k_1	3,00					1,00	1,00		
k_2	2,00					1,00	0,50		
k_3	1,00					1,00	0,10		
V_u	0,99781	0,99781	0,99782	0,99128	0,99566	0,99786	0,99900	0,99781	0,99781

Tabelle 7.3-10 Konfidenzintervalle der Dichtefunktion der ERLANG-Verteilung

Kenngröße	unteres Konfidenzintervall	oberes Konfidenzintervall
Betriebsdauerdichte T_B	42,8 Tage	83,2 Tage
Ausfalldauerdichte T_A	31,0 Stunden	81,3 Stunden
Verfügbarkeit V	0,92666	0,98471

Die Tabelle 7.3-8 beinhaltet dazu alle Ergebnisse. Ob und welchen Einfluß die Wahl der Hilfsgrößen auf die Verfügbarkeit im einzelnen hat, zeigt die Tabelle 7.3-9. Dabei wurden nur die jeweils geänderten Werte der Hilfsgrößen und der unteren Verfügbarkeitsgrenze eingetragen.

Auch hier wird ersichtlich, daß die Hilfsgrößen insgesamt keinen wesentlichen Einfluß auf die Verfügbarkeit haben. Interessant dagegen ist der Einfluß der Vorinformationsrate λ_{01} (Spalte 1–5). Während die stationäre Verfügbarkeit und die Zustandswahrscheinlichkeiten p_2 , p_3 und p_4 bei Festhalten aller Hilfsgrößen konstant bleiben, ändern dagegen p_0 und p_1 mit steigender Vorinformationsrate ihre Werte, so daß stets gilt:

$$p_0 = 0,99233 - p_1.$$

Modell II. Bei der Modellgruppe II lassen sich mit Hilfe der ermittelten Übergangsraten der ERLANG-Verteilungen der jeweiligen Betriebs- und Ausfalldauer die Verfügbarkeiten entweder über die einzelnen Zustandswahrscheinlichkeiten nach den Gln. (6.50)–(6.53) und somit über Gl. (6.54) oder mit den jeweiligen Erwartungswerten nach Gl. (6.55) ermitteln.

Da bereits für die Dichtefunktionen der jeweiligen Betriebs- und Ausfalldauerabstände sowohl die Erwartungswerte als auch das Konfidenzintervall des Erwartungswertes berechnet wurden, kann ebenfalls mit dieser Gleichung, durch entsprechendes Einsetzen der unteren bzw. oberen Grenze der Erwartungswerte, sofort ein Konfidenzintervall der Verfügbarkeit berechnet werden. Dafür gelten die Gln. (6.56) und (6.57). Dazu das folgende Beispiel.

Beispiel. Gegeben sind die Konfidenzintervalle der Erwartungswerte für die Betriebsdauer- und Ausfalldauerabstände für die Integralgrenzen $[0, t_k]$ der einzelnen Dichtefunktionen der ERLANG-Verteilung, wobei t_k dem oberen Wert der letzten Häufigkeitsklasse entspricht. Die Tabelle 7.3-10 beinhaltet dazu alle Ergebnisse.

7.3.4

Vergleich beider Modellgruppen

Bei der Auswertung beider Modellgruppen sollte beachtet werden, daß nicht nur die jeweiligen Bestimmtheitsmaße und approximierten Funktionsverläufe ausschlaggebend sind, sondern auch die anderen ermittelten statistischen Kenngrößen. Ein Vergleich der Verfügbarkeit mittels der empirischen Werte des Konfidenzintervalls des Mittelwertes kann ebenfalls zu Rate gezogen werden. Weiterhin kann festgestellt werden, daß das Berechnungsintervall $[0, t_k]$ wesentlich bessere Anhaltswerte gegenüber dem Intervall $[0, \infty)$ für die Auswertung liefert.

Innerhalb der Modellgruppe I werden relativ sehr kleine Verfügbarkeitsintervalle erhalten, wobei in den meisten Fällen die untere Grenze nahe bei 1 liegt. Ein wichtiger Grund dafür ist in der schlechten Anpassungsfähigkeit des realen Betriebs- und Ausfallverhaltens derartiger Versorgungssysteme durch die Exponen-

tial-Verteilung zu suchen. Somit bestehen derzeit kaum bzw. keine weiteren Möglichkeiten der Diskussion der Ergebnisse. Die Anwendbarkeit der Modellgruppe I sowie möglicherweise deren Modifizierung kann nur durch weitere Analysen vorhandener, derartiger Versorgungssysteme erfolgen und bewiesen werden.

Im Gegensatz zur Modellgruppe I paßt sich die Modellgruppe II dem realen Betriebsverhalten an. Den Beweis dazu liefern u. a. der Vergleich zwischen den empirischen und statistischen Kenngrößen, die Bestimmtheitsmaße sowie die grafischen Gegenüberstellung der hier vorgestellten konkreten Beispiele der beiden Verteilungen.

Werden die beiden Modellgruppen untereinander verglichen, so zeigen sich erhebliche Verfügbarkeitsunterschiede ($\Delta V \approx 8\text{--}10\%$). Im Gegensatz zu den erweiterten Auswahlkriterien innerhalb einer Verteilungsfunktion reicht hier zur Wahl einer der beiden Verteilungsfunktionen im wesentlichen das Bestimmtheitsmaß aus. Im Ergebnis dieser Wahl muß derzeit der ERLANG-Verteilung gegenüber der Exponential-Verteilung der Vorzug gegeben werden. Die Praktikabilität der Modellansätze ist das Ziel weiterer Untersuchungen von derartigen Versorgungssystemen.

Für Wasserversorgungssysteme liegen derzeit nur einzelne Ergebnisse vor, die aber noch keinen gesicherten Rückschluß erlauben.

Zusammenfassend kann für das betrachtete Versorgungssystem ein Verfügbarkeitsintervall $V_u \leq V \leq V_o$ angegeben werden. Das Maximum der oberen Verfügbarkeitsgrenze wird in jedem Fall der Idealwert $V_o = 1$ sein. Für die eigentliche Analyse eines Versorgungssystems bzw. Elements ist aber nicht dieser obere Wert von Bedeutung, sondern der untere Wert bzw. vielmehr das Konfidenzintervall der Verfügbarkeit.

7.3.5

Abhängigkeitsuntersuchungen

7.3.5.1

Spezifische Verfügbarkeit

Da die Verfügbarkeit der untersuchten Versorgungssysteme als absoluter Wert bzw. Intervall kaum oder keine Vergleiche mit Systemen anderer Versorgungsunternehmen zuläßt, werden eigens dafür neue Kenngrößen gebildet. Dazu zählt die spezifische Verfügbarkeit pro Rohrleitungslänge.

Die Herangehensweise erfolgt anhand der Fernwärmeversorgungssysteme, ist aber größtenteils ebenso gültig für Wasserversorgungssysteme, wobei im letzterem Fall speziell die spezifische Verfügbarkeit pro Rohrleitungslänge in Abhängigkeit des Verlegeverfahrens bzw. Rohrwerkstoffes zum Ansatz kommt.

Während bei Elektroenergienetzen die Maschen als Parallelstrukturen aufgefaßt werden, gilt dagegen für existierende Maschen in einem Fernwärmeversorgungssystem dieser Sachverhalt gar nicht oder nur in den seltensten Fällen. Meistens wurden solche Systeme so realisiert, daß im Auslegungsfall z. B. bei einer Außentemperatur von $t_{a,m} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ die vorgegebene Erzeugerleistung restriktionsfrei übertragen werden konnte. Wird, vorerst als Vereinfachung, das System

als ein Seriensystem von verschiedenen Elementen aufgefaßt (abhängig von Nenndurchmesser, Rohrleitungslänge und Armaturenanzahl), kann die Verfügbarkeit als Produkt der einzelnen Verfügbarkeiten der Elemente bestimmt werden. Es gilt

$$V = \bigcap_{i=1}^n V_i \quad (7.3)$$

Wird dagegen für die Elementeanzahl i die Rohrleitungslänge l eingesetzt, so kann daraus die spezifische Verfügbarkeit pro Längeneinheit mit

$$v = \sqrt[n]{V} \quad (7.4)$$

ermittelt werden. Mit Substitution der Länge l durch das Verhältnis l_B / l_i , wobei l_B eine entsprechend gewählte Bezugslänge (z. B. die Netzlänge des betrachteten Systems) und l_i einen Abschnitt innerhalb der Bezugslänge (z. B. die Gesamtlänge der Rohrleitung DN 200) bedeuten, wird aus der Gl. (7.4) die spezifische Verfügbarkeit pro Längeneinheit erhalten. Hierbei ist es auch möglich, die Bezugslänge beispielsweise auf die Gesamtlänge eines Verlegeverfahrens bzw. Rohrwerkstoffes des Versorgungssystems zu beziehen. Durch diese spezifische Verfügbarkeit wird es möglich, auch Untersuchungen von bestimmten Teilstrukturen des gesamten Versorgungssystems anzustellen.

Je nach Betrachtungsansatz ist das Ziel dieser Berechnung, z. B. den Nenndurchmesser mit der schlechtesten Verfügbarkeit auszuweisen. Weiterhin bedeutet das aber nicht, die Schlußfolgerung daraus zu ziehen, Rohrleitungen mit der schlechtesten Verfügbarkeit nicht mehr zu bauen, sondern jetzt müssen weitere detailliertere Untersuchungen einschließlich Diagnostik darüber Aufschluß geben, warum dies der Fall ist. Diese Untersuchungen sollten u. a. Betrachtungen nach der Lebensdauer, dem Verlegeverfahren, der Qualität der Bauausführung, des derzeitigen Zustands der betroffenen Rohrleitungen sowie der Betriebs- und Einsatzweise einschließen.

Für die Berechnung der spezifischen Verfügbarkeit ist die Betrachtungsweise der Betriebs- und Ausfalldauerabstände entscheidend. Bei der nennweitenunabhängigen Betrachtungsweise werden die Ereignisse in chronologischer Reihenfolge betrachtet, d. h. also unabhängig von dem jeweiligen Nenndurchmesser. Es besteht auch die Möglichkeit, diese Betrachtung eingeschränkt auf ein bestimmtes Verlegeverfahren bzw. Rohrwerkstoff anzuwenden. Die spezifischen Verfügbarkeiten in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser können zwar mit der Gl. (7.4) ermittelt werden, welche aber bei genauerer Betrachtung nur von der jeweiligen Rohrleitungslänge abhängen. Mit der Summe

$$l_{\text{System}} = \sum_{i=1}^n l_{\text{DN},i} \quad (7.5)$$

gilt somit, unter Voraussetzung eines reinen Seriensystems

$$V_{\text{System}} = \bigcap_{i=1}^n v_{\text{DN},i} \quad (7.6)$$

Tabelle 7.3-11 Verlegte Rohrleitungslängen eines Fernwärmesystems

DN	Länge [m]	DN	Länge [m]	DN	Länge [m]	DN	Länge [m]
50	154	125	1485	300	9244	500	32922
65	374	150	10017	350	8038	600	17708
80	1518	200	10640	400	9770	700	24866
100	1188	250	8601	450	0	800	3106

Beispiel. Gegeben ist ein Fernwärmeversorgungssystem mit den in der Tabelle 7.3-11 verlegten Rohrleitungslängen in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser mit einem Verfügbarkeitsintervall $0,92666 \leq v_{\text{System}} \leq 0,98471$. Die Gesamtlänge des betrachteten Systems beträgt 139.631 m. Unter Anwendung der Gl. (7.4) ergibt sich für die spezifische Verfügbarkeit beispielsweise für DN 150:

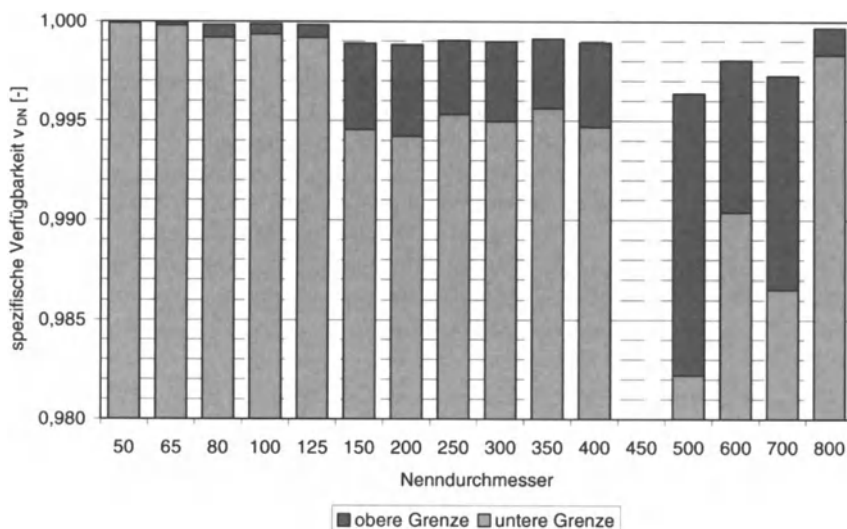
$$v_{\text{DN 150,u}} = \frac{l_B}{l_i} \sqrt[10.017]{v_{\text{System,u}}} = \frac{139.631}{10.017} \sqrt[10.017]{0,92666} = 0,99455.$$

Die Ergebnisse des Beispiels 1 sind dazu in Abb. 7.3-8 dargestellt. Das Produkt der einzelnen spezifischen Verfügbarkeiten ergibt die Verfügbarkeit des Systems. Eine Berechnung der spezifischen Verfügbarkeit pro Längeneinheit ist nicht sinnvoll, da im Endeffekt bei der nennweitenunabhängigen Betrachtungsweise alle Nenndurchmesser den gleichen Wert aufweisen, d. h.

$$v_{\text{DN 150,u}} = \frac{10.017}{1.000} \sqrt[10.000]{0,99455} = 0,99945$$

$$v_{\text{System,u}} = \frac{139.631}{1.000} \sqrt[10.000]{0,92666} = 0,99945.$$

Welche Auswirkungen auf die Ergebnisse bei gleicher Basis des Verfügbarkeitsintervalles des Systems, aber mit einer anderen Netzstatistik haben kann, zeigt Beispiel 2 in Abb. 7.3-9.

**Abb. 7.3-8** Verfügbarkeitsintervalle in Abhängigkeit des Nenndurchmessers (Beispiel 1)

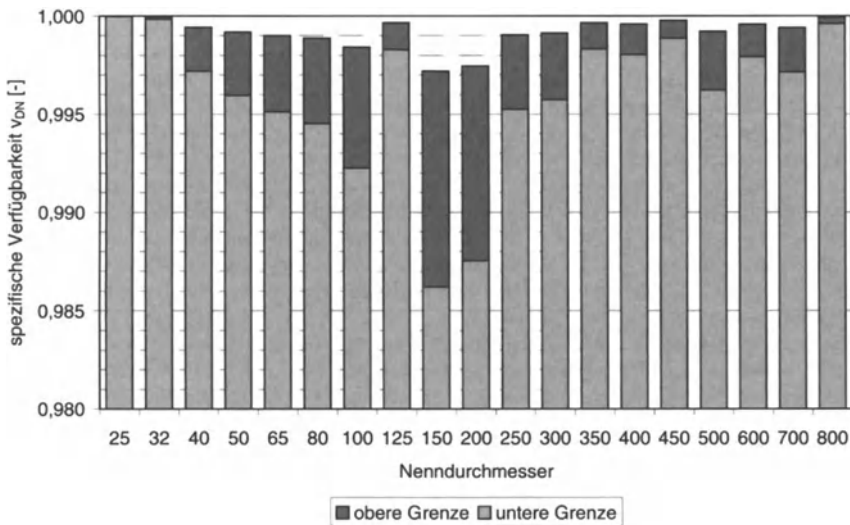


Abb. 7.3-9 Verfügbarkeitsintervalle in Abhängigkeit des Nenndurchmessers (Beispiel 2)

Bei der nennweitenunabhängigen Betrachtungsweise besteht somit die Möglichkeit, daß neben der Verfügbarkeit des betrachteten Versorgungssystems auch die spezifische Verfügbarkeit in einer gewählten Längeneinheit zur Bewertung herangezogen werden kann. Diese spezifische Verfügbarkeit stellt ein wichtiges Kriterium zum Vergleich mit Systemen anderer Versorgungsunternehmen bei ähnlicher Bezugsbasis dar. Die ähnliche Bezugsbasis bezieht sich dabei insbesondere auf die Parameter sowie die Betriebsweise der betrachteten Versorgungssysteme. Dazu zählt bei Fernwärmeversorgungssystemen u. a. auch die Kennziffer: Übertragene Leistung pro Längeneinheit, beispielsweise Trassenkilometer. Zu dieser Bezugsbasis gehört ferner, ob Ereignisdauer- oder Ausfalldauerabstände analysiert und ausgewertet wurden.

Letztendlich ist eine Aussage zum konkreten Stör- und Ausfallverhaltens eines Nenndurchmessers bei der nennweitenunabhängigen Betrachtungsweise nicht möglich. Einen Ausweg dazu bietet die nennweitenabhängige Betrachtungsweise, die aber in Auswertung verschiedenster Ereignisstatistiken in fast allen Fällen ausscheidet. Begründet ist dies insbesondere durch die Tatsache der benötigten Datenmenge ($n \geq 25$) für die Gewinnung der Dichtefunktion. Dies trifft aber in erster Linie nur für Fernwärmeversorgungssysteme zu, da Wasserversorgungssysteme ein wesentlich größeres Stör- und Ausfallverhalten ausweisen.

In diesem speziellen Fall kann versucht werden, solche Abhängigkeiten zumindest für Nenndurchmesserbereiche (z. B. $125 \leq DN \leq 400$) zu ermitteln. Die Einteilung der Nenndurchmesserbereiche kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen, wie die Rohrleitungslänge, Armaturenanzahl oder Ausfallhäufigkeit der einzelnen Nenndurchmesser. Die Zerlegung ist somit keine grundsätzliche Festlegung. Dazu das folgende Beispiel.

Beispiel. Ausgangspunkt bilden die gewählten Nenndurchmesserbereiche eines Fernwärmeversorgungssystems. Der erste Bereich $25 \leq DN \leq 50$ umfaßt hauptsächlich die Hausanschlußleitungen, während die anderen Bereiche sowohl im Sekundär- als auch Primärsystem anzutreffen sind, ohne eine genaue Grenze ziehen zu können. Die Ausgangswerte und Ergebnisse dieser gewissermaßen nennweitenabhängigen Betrachtungsweise sind in Tabelle 7.3-12 enthalten.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse in Abb. 7.3-10 zwischen der Verfügbarkeit und der spezifischen Verfügbarkeit des jeweiligen Nenndurchmesserbereiches zeigt den nicht unwesentlichen Einfluß der Rohrleitungslängen. So ist eine steigende Tendenz zwischen den Bereichen erkennbar, mit dem Ergebnis, daß die Hausanschlußleitungen die schlechteste Verfügbarkeit aufweisen. Gründe dafür sind u. a. in der Schweißnahtausführung und deren Qualität zu suchen. Mit Berechnung der spezifischen Verfügbarkeit pro Rohrleitungslänge, in diesem Fall pro Kilometer, zeigt sich, daß der dritte Bereich den höchsten Wert aufweist und das trotz größerer Rohrleitungslänge als im vierten Bereich.

In dem Fall, daß es sich bei dem betrachteten Versorgungssystem um ein reines Seriensystem handelt, kann aus dem Produkt der 4 Bereichsverfügbarkeiten die Verfügbarkeit des Systems berechnet werden. Sobald sich Maschen in diesem System befinden, die nicht nur die hydraulischen, sondern auch die zuverlässigkeitslogischen Restriktionen erfüllen, kann diese Berechnungsvorschrift nicht mehr angewendet werden.

Tabelle 7.3-12 Ausgangswerte und Ergebnisse der gewählten Nenndurchmesserbereiche

Nenndurchmesserbereich	Länge l_B [km]	Verfügbarkeit V_{DNB} [-]	spezifische Verfügbarkeit V_{DNB} [1/km]
25– 50	61,164	0,9452	0,99908
65–150	293,634	0,9715	0,99990
200–450	228,867	0,9871	0,99994
500–800	79,102	0,9938	0,99992

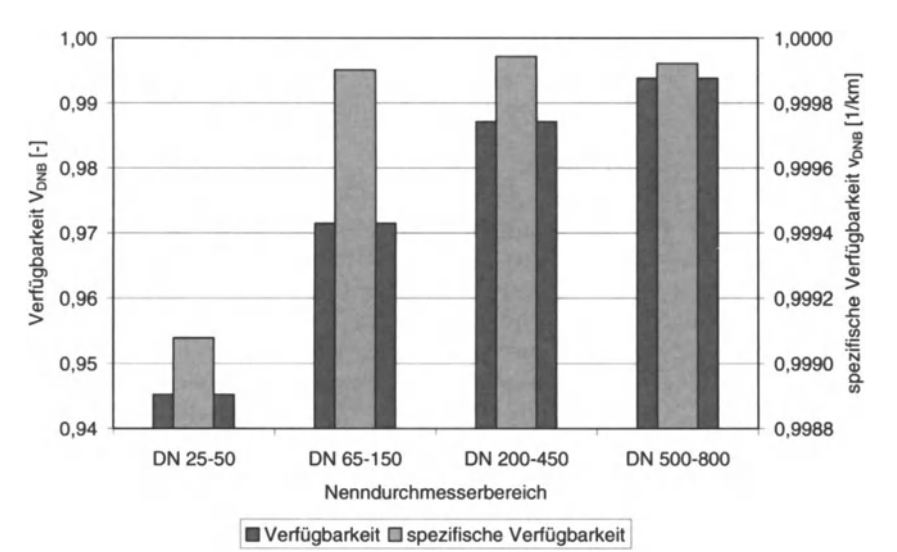


Abb. 7.3-10 Verfügbarkeitsintervalle in Abhängigkeit gewählter Nenndurchmesserbereiche

Im folgenden werden verschiedene Einflußfaktoren auf die Verfügbarkeit analysiert und diskutiert, um somit Rückschlüsse auf das zu betrachtende Versorgungssystem ziehen zu können. Dazu zählen im einzelnen:

- Abhängigkeit der spezifischen Verfügbarkeit von der Nenndurchmesserlänge,
- Abhängigkeit der spezifischen Verfügbarkeit von der Ausfallhäufigkeit,
- Abhängigkeit der Armaturenanzahl von der Nenndurchmesserlänge,
- Verhältnis Armatur zur Nenndurchmesserlänge in Abhängigkeit vom jeweiligen Nenndurchmesser,
- Betrachtungszeitraum Verfügbarkeit,
- Betrachtungszeitraum spezifische Verfügbarkeit,
- Abhängigkeit der Summenausfalldauer vom Betrachtungszeitraum,
- Abhängigkeit der Summenausfalldauer von der Systemlänge,
- Abhängigkeit der Verfügbarkeit von der Summenausfalldauer,
- Berechnung der Störkennzahl (Störungen pro Rohrleitungslänge).

Die Diskussionen erfolgen anhand praktischer Beispiele aus Fernwärmeversorgungssystemen, wobei entsprechende Hinweise für Wasserversorgungssysteme gegeben werden.

7.3.5.2

Einflußfaktoren Nenndurchmesserlänge und Ereignishäufigkeit

Diese Analyse ist nur mit den Ergebnissen der nennweitenabhängigen Betrachtungsweise der Betriebs- und Ausfalldauern möglich. Der Grund dafür liegt darin, daß sich durch die zuvor nachgewiesene direkte Abhängigkeit zwischen der Nenndurchmesserlänge und der spezifischen Verfügbarkeit bei der nennweitenunabhängigen Betrachtungsweise in logischer Konsequenz eine Trendgerade mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 1$ ergibt. Der Nachweis kann mit den Daten aus der Tabelle 7.3-11 erfolgen.

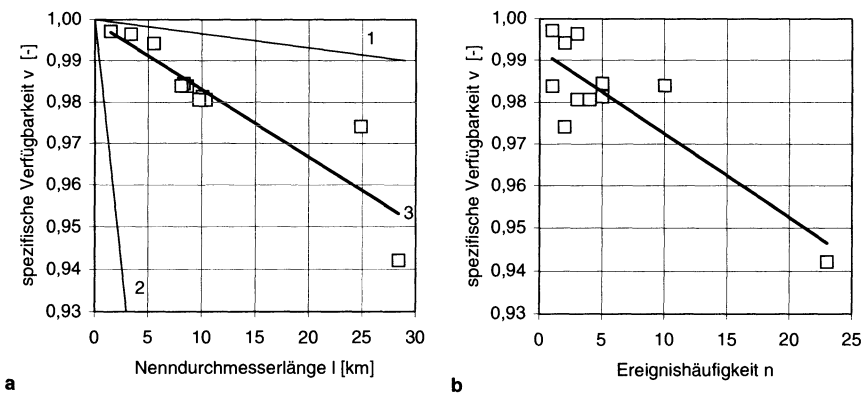


Abb. 7.3-11 Abhängigkeiten zwischen der spezifischen Verfügbarkeit und
a der Nenndurchmesserlänge, **b** der Ereignishäufigkeit

Den zu erwartenden Trend der spezifischen Verfügbarkeit (untere Grenze) in Abhängigkeit der Nenndurchmesserlänge zeigt Abb. 7.3-11a anhand von konkreten Werten. Die Eindeutigkeit des Einflusses der Nenndurchmesserlänge spiegelt sich in der dazu berechneten Trendgerade (3) wider, die ein Bestimmtheitsmaß von $B = 0,82$ aufweist.

Daraus resultiert, daß mit größer werdender Länge eines Nenndurchmessers auch dessen spezifische Verfügbarkeit sinkt. Dies liegt vor allem in den wachsenden Störeinflußmöglichkeiten begründet. Wird der Funktionsverlauf interpretiert, so spiegelt eine niedrige spezifische Verfügbarkeit und kleine Nenndurchmesserlänge ein hohes Ereignisgeschehen (1), eine hohe spezifische Verfügbarkeit und große Nenndurchmesserlänge dagegen ein niedriges Ereignisgeschehen (2) wider.

In der zweiten Abhängigkeitsbetrachtung wird der Einfluß der Ereignishäufigkeit gegenüber der spezifischen Verfügbarkeit (untere Grenze) untersucht (Abb. 7.3-11b). Diese Abhängigkeit kann erkennen lassen, ob die Aussage – eine niedrige spezifische Verfügbarkeit entspricht einer hohen Ereignishäufigkeit, auch in bezug auf große Nenndurchmesserlängen – mit der oben gemachten Aussage übereinstimmt.

Obwohl kein eindeutiger Zusammenhang zwischen beiden Größen bei diesen konkreten Werten zu erkennen ist (Punktwolke), konnte trotzdem eine Trendgerade mit einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0,72$ ermittelt werden. Sie zeigt fast dieselbe Tendenz wie bei der vorherigen Abhängigkeit.

Bei der Berechnung der spezifischen Verfügbarkeit von Wasserversorgungssystemen ist die Berücksichtigung der Abhängigkeit vom Verlegeverfahren bzw. Rohrwerkstoff durchaus sinnvoll.

Beide Abhängigkeitsbetrachtungen können ebenfalls zum Vergleich mit Systemen anderer Versorgungsunternehmen bei gleicher Bezugsbasis herangezogen werden.

7.3.5.3 ***Einfluß bestimmter Elemente***

Hierbei geht es darum, bestimmte Kenngrößen und -ziffern zu gewinnen, welche zum einen Störeinflußmöglichkeiten widerspiegeln, zum anderen eine Vergleichbarkeit mit Systemen anderer Versorgungsunternehmen hinsichtlich der Systemstruktur und somit des Ausrüstungszustandes gestatten. Als wichtig werden dabei beispielsweise, einerseits die Anzahl der eingebauten Armaturen oder der Formstücke, wie Rohrbogen und Rohrleitungsabgänge, andererseits die Anzahl der Bauwerke bzw. Schächte oder die angewendeten Verlegeverfahren bzw. Rohrwerkstoffe angesehen. Während Armaturen und Formstücke in erheblichem Maße die inneren Betriebsverhältnisse des Systems beeinflussen, prägen Bauwerke bzw. Schächte und Verlegeverfahren bzw. Rohrwerkstoffe in erster Linie vor allem die Wirtschaftlichkeit, verursacht durch die entsprechenden Investitionskosten. Entscheidende Voraussetzung für diese Analysen bildet die Bereitstellung der dazu benötigten Datenbasis.

Die wichtigste Störeinflußgröße ist die Armaturenanzahl. Der Anteil an Ereignissen, die verursacht werden durch Armaturen, kann nach Auswertung verschie-

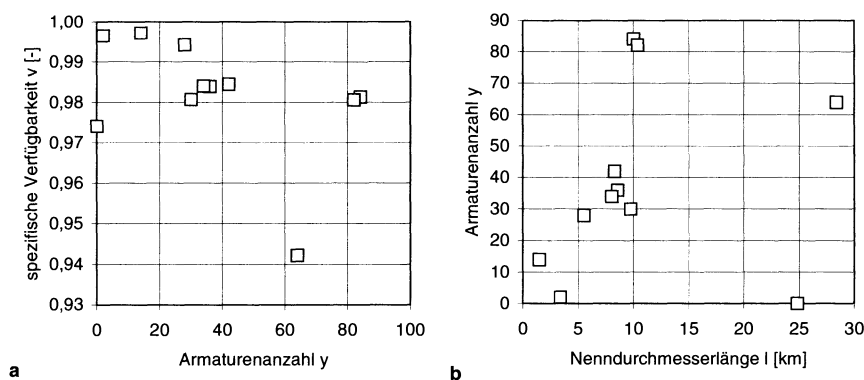
denster Ereignisstatistiken bei Fernwärmeversorgungssystemen mit etwa 20–30 % angegeben werden. Bei Wasserversorgungssystemen liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Die Ermittlung eines Zusammenhanges zwischen der spezifischen Verfügbarkeit und der Armaturenanzahl brachte bisher keine verwertbaren Ergebnisse. Ein entsprechendes Beispiel aus einer Auswahl verschiedener Analysen zeigt Abb. 7.3-12a. Dasselbe trifft auch für die Auswertung zwischen den beiden Größen Armaturenanzahl und Nenndurchmesserlänge zu (s. Abb. 7.3-12b).

Interessant dagegen ist die Bildung des Verhältnisses Armaturenanzahl y_{DN} mit der jeweiligen dazugehörigen Nenndurchmesserlänge l_{DN} . Wird dieses Verhältnis als Funktion über den Nenndurchmesser aufgetragen, ergeben sich die in Abb. 7.3-13 dargestellten Punktfolgen zweier konkreter Beispiele. Dieser Funktionsverlauf gestattet Aussagen darüber, ob beispielsweise Armaturen eines bestimmten Nenndurchmessers überdurchschnittlich im betrachteten System eingesetzt sind. Ein weiterer Vergleich zur Ereignishäufigkeit des Nenndurchmessers läßt somit, in Verbindung mit einer Auswertung der Schadensursachen, Rückschlüsse auf den Verfügbarkeitseinfluß zu. Für die ausgewählten Beispiele eines Fernwärmesystems des Nenndurchmesserbereiches DN 125–800 wurde für die jeweilige Trendfunktion ein Bestimmtheitsmaß für Beispiel 1 von $B = 0,83$ sowie für Beispiel 2 von $B = 0,84$ berechnet. Eine Angabe des Trends ist dagegen für die kleineren Nenndurchmesser in den überwiegenden konkreten Fällen kaum noch möglich, wie aus Abb. 7.3-13b ersichtlich ist. Dies liegt vor allem darin begründet, daß wesentlich mehr Armaturen pro Rohrleitungslänge eingebaut werden, allein gegeben durch die Vielzahl von Absperrarmaturen in den Hausanschlußleitungen. Dies trifft ebenfalls für Hausanschlußleitungen in Wasserversorgungssystemen zu.

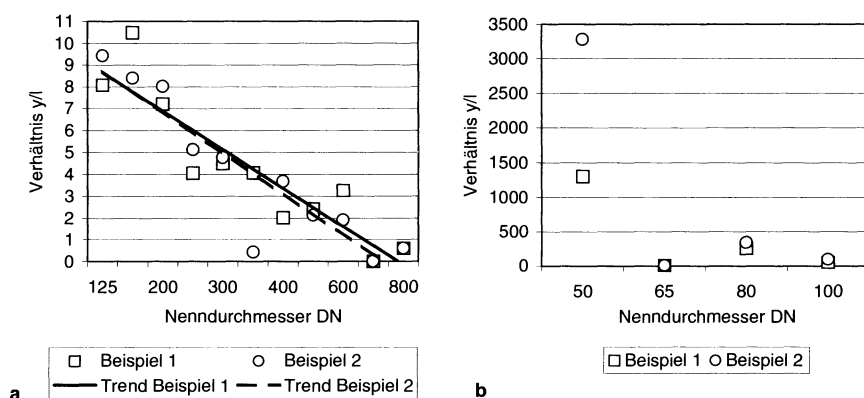
Der Einfluß der Armaturenanzahl weist zwei verschiedene Seiten auf. Einerseits beeinflusst sie unmittelbar die Zuverlässigkeit des Versorgungssystems, hervorgerufen durch die zum Teil niedrigen Einzelzuverlässigkeiten, andererseits wird dazu übergegangen, in Hinsicht der Gewährleistung einer hohen Versorgungszuverlässigkeit des Abnehmers, die Unterbrechungsdauer bei Ausfällen zu verkürzen. Insbesondere bei Fernwärmeversorgungssystemen spielt dies eine wesentliche Rolle beim Entleeren und Füllen des betroffenen Abschnittes. Nicht selten wirkt sich ein Schaden bei einem Abnehmer, gegeben durch die Situation vorhandenen Absperrarmaturen, auf weitaus mehrere Abnehmer aus. Neben dem Versorgungsausfall und somit Erlösausfall erhöhen sich dadurch auch noch zusätzlich die Betriebskosten für die Außer- und Wiederinbetriebnahme des betroffenen Versorgungsabschnittes.

Das wiederum heißt, daß es sich hier um ein reines empirisches Optimierungsproblem handelt, denn eine Maximallösung, beispielsweise jeden Abgang separat durch Absperrarmaturen zu sichern, wäre sehr kostenintensiv und würde sich außerdem auf die Bereitstellungspreise des Wärmemediums und somit auf den Abnehmer negativ auswirken.

Die Festlegung eines optimalen Bereiches dieser gewonnenen Kenngröße kann, wie bereits erläutert, erst nach Analyse mehrerer Systeme verschiedener Versorgungsunternehmen vorgenommen werden.

**Abb. 7.3-12** Abhängigkeiten

a spezifische Verfügbarkeit von der Armaturenanzahl, **b** Armaturenanzahl von der Nenndurchmesserlänge

**Abb. 7.3-13** Funktionelle Abhängigkeit der Armaturenanzahl als Verhältnis y_{DN} / l_{DN} von dem Nenndurchmesser

a Nenndurchmesserbereich DN 125–800, **b** Nenndurchmesserbereich DN 50–100

In Fernwärmeversorgungssystemen ist des weiteren davon unmittelbar die Gegenüberstellung Bauwerk für Armaturen und erdverlegte Armaturen betroffen. Hier spielen auch die Kosten eine nicht unerhebliche Rolle bei der Entscheidungsfindung.

Analog kann zu den anderen Störeinflußgrößen verfahren werden. Die Festlegung eines optimalen Bereiches dieser Kenngrößen kann aber ebenfalls erst nach Analyse mehrerer Systeme erfolgen. Ob und inwieweit dann konkrete Abhängigkeiten zur spezifischen Verfügbarkeit bestehen, muß jeweils im einzelnen untersucht werden.

7.3.5.4

Einfluß der Zeit

Unter dem Sammelbegriff Zeit wird zum einen das Baujahr bzw. die Lebensdauer und das Betriebsjahr, zum anderen der Betrachtungszeitraum für die Berechnung der Verfügbarkeit des betrachteten Versorgungssystems bzw. seiner Elemente verstanden. Die Ansätze für die Analysen können dabei verschiedenster Art sein. Für die Merkmale Baujahr, Lebensdauer und Betriebsjahr reichen vorerst die Ereignis- und Netzstatistik für eine erste Analyse aus. An dieser Stelle sollen die verschiedenen Aussagen absoluter und relativer Ereignishäufigkeiten gegenübergestellt und diskutiert werden. Eine Gegenüberstellung hinsichtlich des Baujahres zeigt Abb. 7.3-14 anhand eines konkreten Beispiels eines Fernwärmesystems, speziell das Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr mit 234 notierten Ereignissen.

Hieraus wird eindeutig ersichtlich, daß nur die auf die verlegte Rohrleitungslänge bezogene Ereignishäufigkeit für eine Bewertung des Kunststoffmantelrohres herangezogen werden kann, ansonsten kommt es unweigerlich zu einer Fehlinterpretation.

Auch die in der Abb. 7.3-15a sehr detailliert auf den Nenndurchmesser dargestellte Ereignishäufigkeit, basierend auf dem vorherigen Beispiel, kann somit nur für eine erste Auswertung herangezogen werden.

Die gleichen Erkenntnisse gelten ebenso für die Auswertung nach dem Betriebsjahr. Auch hier kann nur die relative Ereignishäufigkeit herangezogen werden, denn selbst die detaillierte Auswertung der absoluten Ereignishäufigkeit, wie Abb. 7.3-15b zeigt, ist nur bedingt aussagekräftig. Dabei ist jedoch unstrittig, daß beide Auswertungen einen wesentlich höheren Informationsgehalt über das Ereignisverhalten besitzen.

Alle bisher berechneten Verfügbarkeiten bzw. spezifischen Verfügbarkeiten sind stationäre Werte für einen bestimmten Betrachtungszeitraum, beispielsweise für einen Zeitraum von 5 Jahren bzw. (1990–1995). Diese ermittelten Werte ge-

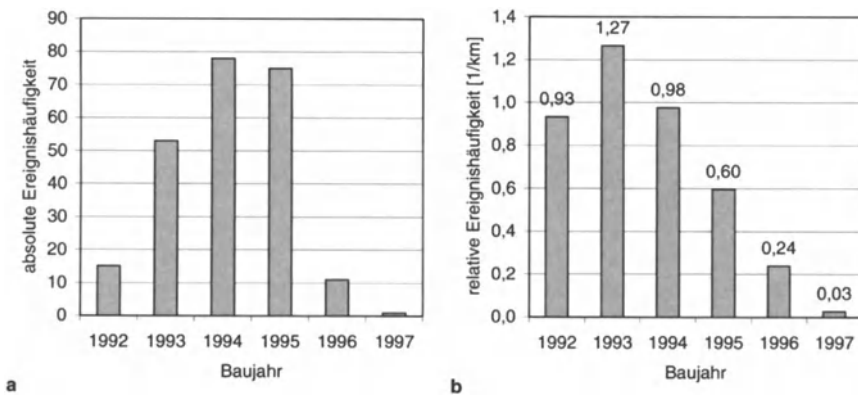


Abb. 7.3-14 Ereignishäufigkeit des Verlegeverfahrens Kunststoffmantelrohr in einem Fernwärmesystem bezogen auf das Baujahr (1997 nicht vollständig erfaßt)

a absolut, **b** relativ, bezogen auf verlegte Rohrleitungslänge

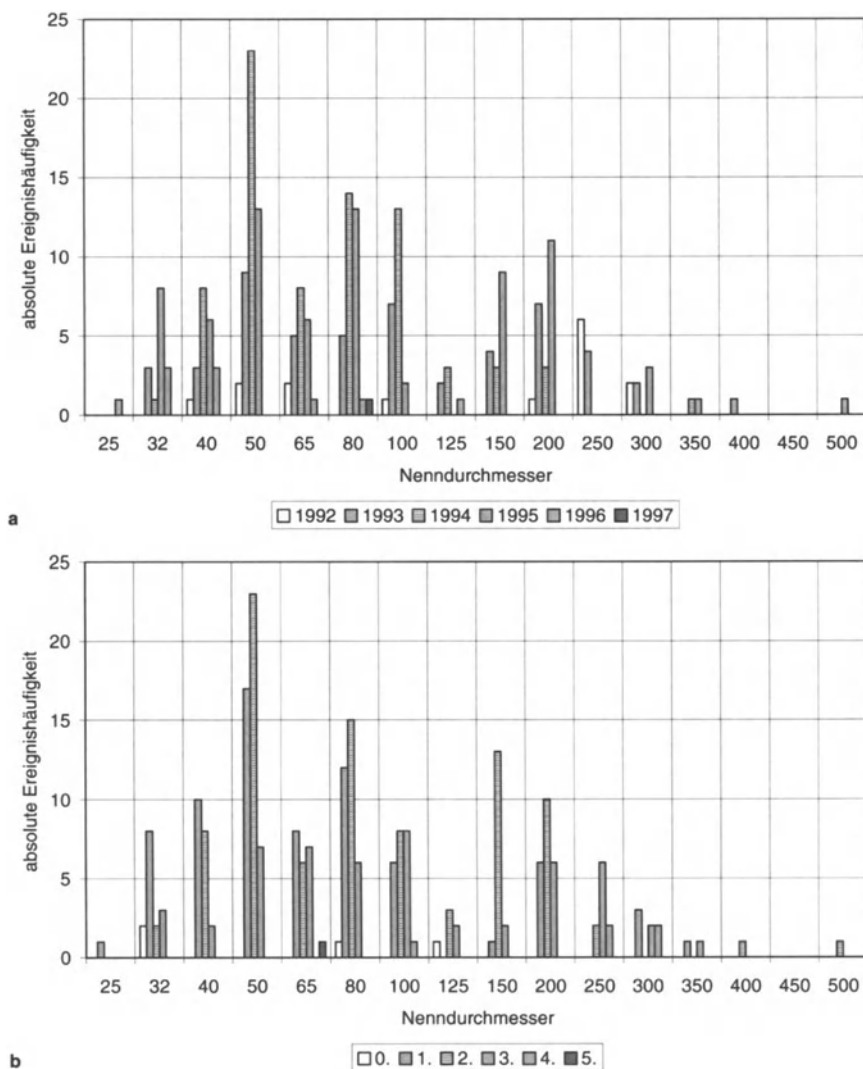


Abb. 7.3-15 Absolute Ereignishäufigkeit in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser bezogen auf **a** das Baujahr, **b** das Betriebsjahr

ben die Wahrscheinlichkeit dafür an, daß sich entweder das betrachtete Versorgungssystem oder ein bestimmter Nenndurchmesserbereich zu einem gegebenen Zeitpunkt im arbeitsfähigen Zustand befinden und daß dieser Zustand über einen sehr langen Zeitabschnitt erhalten bleibt. Daraus schlußfolgernd wäre natürlich die Fragestellung nach einer jährlichen Betrachtung der Verfügbarkeit sowie deren Änderungen interessant, die aber von vornherein, anhand der zu wenig vorhandenen Daten aus Ereignisstatistiken, meistens ausscheidet. Um aber die Zeit als eine

weitere Beeinflussungsgröße mit zu integrieren, wird eine Auswertung, abhängig von der Größe eines Betrachtungszeitraumes, wie beispielsweise 1990–1997, 1990–1996, 1990–1995, ... bzw. 7, 6, 5 Jahre, ..., vorgeschlagen.

Die entsprechenden Ausgangswerte für diese Berechnungen lassen sich relativ einfach aus der aufbereiteten Ereignisstatistik für die nennweitenunabhängige Betrachtungsweise gewinnen. Für die nennweitenabhängige Betrachtungsweise gelten die zuvor gemachten Aussagen der anderen Einflußgrößen. Aus der Zusammenstellung der erhaltenen Ergebnisse ist dann der Verlauf der Verfügbarkeit bzw. spezifischen Verfügbarkeit über den Betrachtungszeitraum sowie dessen Trend erkennbar (Abb. 7.3-16).

Weitere aussagekräftige Analysen zwischen der Verfügbarkeit und den Betriebs- bzw. Baujahren konnten bisher nicht gewonnen werden.

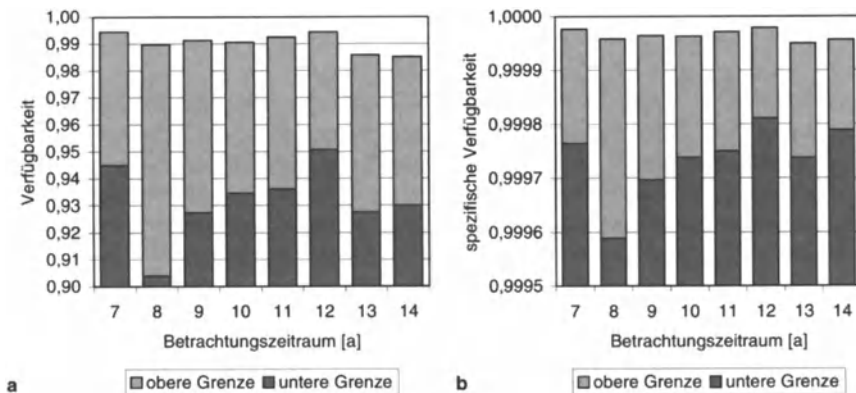


Abb. 7.3-16 Abhängigkeit zwischen dem Betrachtungszeitraum und
a der Verfügbarkeit V_{System} , **b** der spezifischen Verfügbarkeit v_{System}

7.3.5.5

Einfluß der Summenereignisdauer

Die Summenereignisdauer ΣT_A enthält die Summation der Ereignisstunden über den jeweils gültigen Zeitraum der Berechnung. Die zu erwartenden Trendverläufe der Summenereignisdauer in Abhängigkeit des Betrachtungszeitraumes bzw. der Systemgröße zeigt Abb. 7.3-17. Hierbei gelten folgende Anmerkungen:

- Abb. 7.3-17a: Je steiler der Funktionsverlauf der Summenausfalldauer ist, desto niedriger wird die Verfügbarkeit des betrachteten Versorgungssystems sein (1). Um also den maximalen Wert der Verfügbarkeit $V_0 = 1$ zu erreichen, muß der Zuwachs des Funktionsverlaufes und somit der Summenereignisdauer gegen 0 gehen (2). Dies wäre gleichzeitig ein Kriterium für die zuverlässigkeitserhöhenden Maßnahmen bzw. systembezogene Instandhaltung, da sich diese Maßnahmen in der Größe des Zuwachses widerspiegeln müßten.

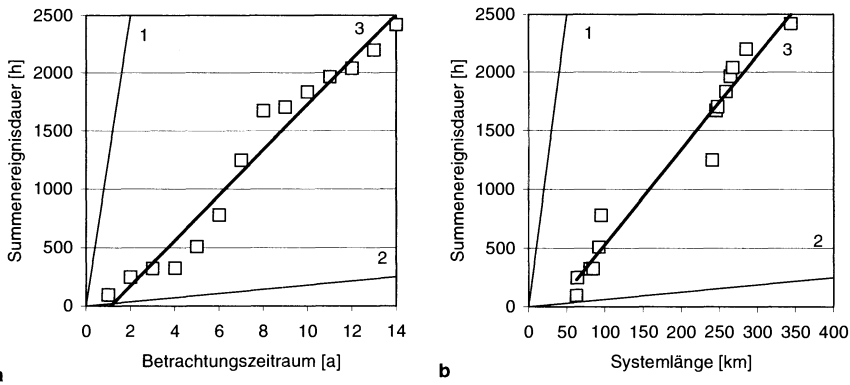


Abb. 7.3-17 Abhängigkeit zwischen der Summenereignisdauer und
a dem Betrachtungszeitraum, **b** der Systemlänge

- Abb. 7.3-17b: Hierbei geht es lediglich darum, die folgende Fragestellung zu überprüfen: Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem jährlichen Zuwachs der Summenereignisdauer und der Systemlänge? Ein steiler Funktionsverlauf bringt eine niedrige Verfügbarkeit mit sich, d. h. es liegen noch andere Ursachen, welche die Verfügbarkeit beeinflussen, vor (1). Ein flacher Funktionsverlauf dagegen kann eine höhere Verfügbarkeit aufweisen, muß aber nicht, da bei größeren Netzerweiterungen das Stör- und Ausfallgeschehen "vertuscht" wird (2). Diese Aussage dient also lediglich dazu, den Zustand eines zu untersuchenden Versorgungssystems im Zusammenhang mit den anderen erhaltenen Ergebnissen zu verdeutlichen.

Die dargestellten Werte und Trendgeraden unterstreichen nochmals die oben genannten Aussagen anhand eines konkreten Beispiels. Für beide Trendgeraden (3) kann ein Bestimmtheitsmaß von $B = 0,96$ ausgewiesen werden. Der dargestellte Zusammenhang in Abb. 7.3-17b verdeutlicht nochmals den praktischen Sachverhalt, daß mit zunehmender Systemlänge auch die Summe der Ereignisdauer steigt.

Direkte Abhängigkeiten zwischen der Verfügbarkeit und der Summenereignisdauer konnten aus den bisherigen Analysen noch nicht konkret nachgewiesen werden.

7.3.6

Vergleich der Ergebnisse und Auswertung

7.3.6.1

Vorbemerkungen

Nach erfolgter Berechnung der Zuverlässigkeit des betrachteten Versorgungssystems sowie dessen Analyse kann ein entsprechendes Intervall der Verfügbarkeit bzw. der spezifischen Verfügbarkeit angegeben werden. Entscheidend für den weiteren Vergleich mit Systemen anderer Versorgungsunternehmen ist die Be-

zugsbasis, welche bereits des öfteren entsprechend genannt wurden. Dazu zählen im einzelnen u. a.

- die Betrachtungsweise (nennweitenabhängig oder nennweitenunabhängig),
- die Betriebsparameter,
- die Fahrweise des Systems,
- die zur Anwendung gekommenen Verlegeverfahren bzw. Rohrwerkstoffe,
- die Lebensdauer der eingesetzten Elemente des Systems usw.

Ziel des Vergleiches ist das Herausfinden von bestimmten Analogien des Systemsverhaltens sowie das Analysieren von Schwachstellen. Weitere Ausführungen zur Schwachstellenanalyse werden im nachfolgenden Kapitel vorgenommen.

Derzeitig kann an dieser Stelle bemerkt werden, daß es für Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme kaum veröffentlichte Daten über das Betriebs- und Ausfallverhalten einzelner Elemente oder sogar der entsprechenden Systeme gibt, was letztendlich regionalübergreifende Systemanalysen momentan unmöglich macht.

Im folgenden werden bekannte spezifische Detailanalysen aus der Literatur als eine Art erster Ansatz näher aufgeführt und diskutiert. Entsprechende Werte zu Betriebs- und Ausfallverhalten einzelner Elemente bzw. Fernwärmeversorgungssystemen sowie deren Randbedingungen sind im Anhang 9 zu finden. In (Balfanz 1973; Hömke 1975; Gruhn et al. 1987) sind dagegen Ausfallraten von verschiedenartigsten Elementen aufgeführt, die jedoch anderen Randbedingungen unterliegen. Dazu zählen technische Anlagen aus den Gebieten der Kernkraftwerkstechnik, der konventionellen Kraftwerkstechnik sowie der chemischen Industrie. Zweck dieser Datensammlungen ist die vergleichende Wirkung und somit Abwägung der Sensibilität der berechneten Ausfallraten der Elemente verschiedener Systeme. Die Schaffung einer Datensammlung für die Elemente der Fernwärme- und Wasserversorgungssysteme sollte hier das Ziel sein.

7.3.6.2

Fernwärmeversorgungssysteme

Im Rahmen der Erhöhung der Sicherheit von Wärmeversorgungsanlagen beschäftigte sich (Takaisvili u. Chasilov 1972) in Rußland mit dieser Problematik. Hier wurde für die gewonnenen Zuverlässigkeitskennwerte eine exponentielle Verteilungsfunktion zugrunde gelegt. Der Nachweis für die Anwendbarkeit der Exponential-Verteilung bezieht sich nur auf das territorial bezogene Beispiel und kann nicht verallgemeinert werden, begründet durch die fehlende Daten- und Bezugsbasis. Außerdem wurde die längenbezogene Ausfallrate für das Element Rohrleitung zusätzlich über einen unbekannten Faktor, welche die Verlegungsgüte beinhaltet, gewichtet. Weitere Ansätze und Analysen zum zuverlässigkeitsorientierten Systemverhalten von Fernwärmenetzen, insbesondere in bezug auf die Systemauslegung, liegen durch die Arbeit von (Klee 1976) vor. Auch in diesem Fall bildete die Exponential-Verteilung mit den beiden Zuständen – Betrieb und Ausfall – die Basis für die durchgeführten Zuverlässigkeitsanalysen. In dieser Arbeit lag ein besonderes Gewicht auf der Analyse der Systemauslegung.

Eine Weiterführung zu Zuverlässigkeitsanalysenmethoden für einzelne Elemente des Fernwärmesystems erfolgte bis Mitte der 80iger Jahre nur vereinzelt. In (Andersson 1981) wurde über die verschiedenen Rohrleitungssysteme (Betonkanal-, Asbestzementmantelrohr-, Kunststoffmantelrohr-, Stahlmantelrohrsysteme usw.) mit einer Trassenlänge von 2730 km und deren Schäden in schwedischen Fernwärmesystemen während der Jahre 1968–1978 in Form einer Auswertung der Schadensstatistik ein Überblick gegeben. Diese Schadensstatistik wurde weiterführend in (Thunström 1983) für das Jahr 1980, für 314 aufgetretene Ereignisse bei 3727 km Trassenlänge, ausgewertet und diskutiert.

In (Schuschulov 1980, 1985; Batov u. Schuschulov 1986) wurde eine Methode zur Kennzeichnung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Netzabschnitten vorgestellt. Ausgehend von der Analyse einer großen Zahl von Untersuchungen in Bulgarien und in anderen Ländern kann hinsichtlich der Faktoren, die Einfluß auf den technischen Zustand von unterirdisch verlegten Rohrleitungen haben, Schlußfolgerungen gezogen werden. Zu diesen Faktoren zählen im einzelnen:

- die Betriebsdauer,
- die mittlere jährliche Temperatur des Rohres,
- die Abmessungen des Rohres, wie Durchmesser und Wandstärke,
- das angewendete Verlegeverfahren,
- die hydrogeologischen Bedingungen sowie
- die Rohrleitungslänge.

Hierfür wurde die zweiparametrige Ausfallrate der WEIBULL-Verteilung mit folgender Gleichung zum Ansatz gebracht

$$\lambda(t) = a \cdot \frac{d}{s} \cdot l \cdot t^{b-1} \quad (7.7)$$

- mit
- a - Koeffizient, abhängig von dem Verlegeverfahren,
 - b - Parameter des Zeitverlaufes bei der WEIBULL-Verteilung, der das instationäre Regime des Auftretens der Ausfälle bestimmt,
 - d - Durchmesser des Rohres,
 - l - Rohrleitungslänge,
 - s - Wandstärke des Rohres.

Laut Angabe können gegenwärtig die Koeffizienten a und b nur auf Basis regressiver Informationen von betriebenen Fernwärmesystemen oder durch eine Expertenschätzung bestimmt werden. Die langjährigen Untersuchungen eines Teilsystems erlaubten, verallgemeinerte, auf Erfahrung beruhende Abhängigkeiten für den Einfluß der grundlegenden Faktoren auf die Ausfallrate festzulegen. Dabei wurden hauptsächlich die Verlegeverfahren Kanal und Mantelrohr mit Schaumbetonisolierung analysiert.

Für das Fernwärmesystem in Sofia wurde für eine Trassenlänge von 600 km für 1983 eine Störkennzahl von etwa 1 Schaden pro Trassenkilometer und Jahr für die oben genannten Verlegeverfahren angegeben.

Interessant dabei ist auch die Aussage, daß zu 90-95 % aller eingetretenen Schäden allein die Vorlaufleitungen der analysierten Verlegeverfahren betraf. Als Ursache dafür wurde Korrosion von außen genannt, bedingt durch die konstruktivi-

ve Ausführung der Rohrleitungen, insbesondere der Wärmedämmung. Die überwiegenden damals zum Einsatz gekommenen Wärmedämmungen ermöglichten keinen ausreichenden Schutz vor Eindringen von Feuchtigkeit. In diesen konkreten Fällen wurden Korrosionsgeschwindigkeiten in den Grenzen zwischen 0,1–1,0 mm/Jahr in Abhängigkeit von den Innen- und Außenbedingungen nachgewiesen. Laut durchgeführten Untersuchungen stellten dabei die Heizwassertemperatur in den Rohrleitungen einen wesentlichen Einflußfaktor dar. Dabei wurde die Aussage herausgearbeitet, daß Temperaturen von 70–85 °C eine maximale Korrosionsgeschwindigkeit ermöglichen, d. h. eine Verschiebung dieses Temperaturintervalles – gleich in welcher Richtung – verringert spürbar die Korrosionsgefahr.

Die erwähnte Störkennzahl⁷ beinhaltet allgemein definiert das spezifische Verhältnis der Ereignisanzahl zur betrachteten Rohrleitungslänge. Diese Störkennzahl ermöglicht einen begrenzten Vergleich von betrachteten Systemen untereinander.

Einen ersten Überblick über die Anzahl und Art der bisher aufgetretenen Schäden in Mannheim des Verlegeverfahrens Kunststoffmantelrohr für den Zeitraum 1977–1982 wurde durch (Winkens 1984) gegeben. Als Basis für diese Auswertung dienten etwa 242 km Rohrleitungslänge. Die Angaben sind in 5 Fehlerursachen aufgeteilt (Tabelle 7.3-13). Hierbei wurde bei der Auswertung festgestellt, daß trotz durchgeführten Dichtheitsprüfungen mit Luft (0,5 bar), mit Wasser (13 bar) und Durchstrahlungsprüfung (10–30 % der Schweißnähte) 110 Fehler an bauseitigen Schweißnähten bei rund 40.000 Schweißnähten auftraten und zwar überwiegend im Vorlauf bzw. im Gleitbereich der Leitungen.

Diese Auswertung des Verlegeverfahrens Kunststoffmantelrohr wurde in (Hoffmann et al. 1988) weitergeführt und hinsichtlich der Fehlerursachen detaillierter spezifiziert. Die Tabelle 7.3-14 enthält die Zusammenstellung der Ereignismerkmale für einen Zeitraum von 1977–1987 bei einer betrachteten Rohrleitungslänge von etwa 425 km, die Abb. 7.3-18 die Anzahl der durchgeführten Reparaturen getrennt nach Vorlauf und Rücklauf in Abhängigkeit der Betriebsdauer.

Interessant dabei ist auch die Auswertung der Sensibilität in bezug auf die verlegten Rohrleitungslängen pro Jahr anhand der Störkennzahl über den gesamten Zeitraum.

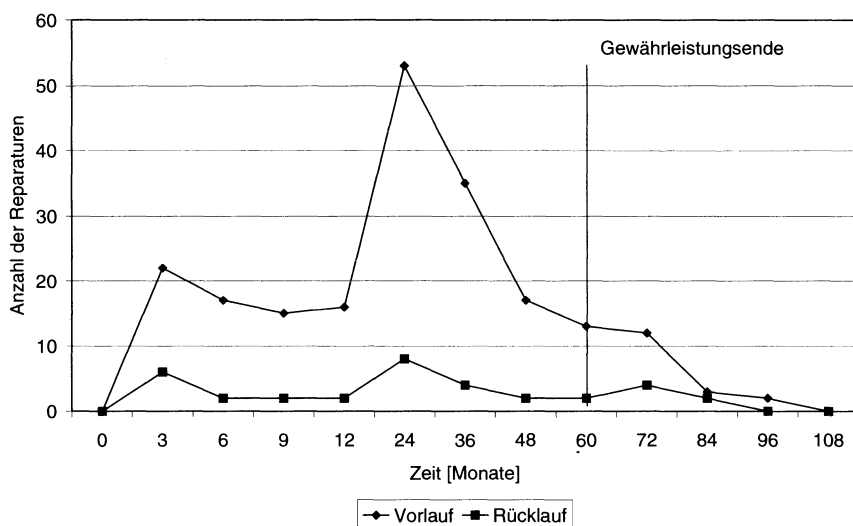
Tabelle 7.3-13 Auswertung Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr nach (Winkens 1984)

	1977	1978	1979	1980	1981	1982	Summe
Schweißnahtfehler	1	3	11	26	30	39	110
Montagefehler	1	12	5	9	7	6	40
Materialfehler	–	–	–	5	10	2	17
Fremdeinwirkung	–	–	1	1	4	0	6
Folgeschäden	–	–	1	4	2	0	7
Summe	2	15	18	45	53	47	180

⁷ Erstmals erwähnt in (Autorenkollektiv 1968); wird auch als Schadensfaktor (AGFW) bezeichnet.

Tabelle 7.3-14 Auswertung Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr nach (Hoffmann et al. 1988)

	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
– Schweißfehler	1	3	11	26	30	35	25	28	17	12	24
– Längsnahtfehler	–	–	–	5	10	5	4	3	–	4	6
– Montagefehler	1	12	4	3	5	14	3	2	7	1	6
– mechanische Beschädigung	–	–	1	2	4	–	1	–	6	4	4
– Systemfehler	–	–	–	–	–	1	–	2	7	2	5
– chemische Beschädigung	–	–	–	–	–	3	3	5	16	6	6
– Folgeschäden	–	–	1	4	2	2	1	1	–	2	2
Summe	2	15	17	40	51	60	37	41	53	31	53
Rohrleitungslänge [km]	7,5	19,3	49,0	70,3	69,5	41,3	22,3	60,6	25,5	19,8	39,4
Störkennzahl [1/km]	0,27	0,78	0,35	0,57	0,73	1,45	1,66	0,68	2,08	1,56	1,34

**Abb. 7.3-18** Anzahl der Reparaturen bezogen auf Vorlauf und Rücklauf

Weitere Ansätze und Ergebnisse in Form von (Batov u. Schuschulov 1986) lieferte auch (Soucek 1988), wobei aber die darin enthaltenen Ergebnisse nur als Anhaltswerte verwendet werden können, da eine Beschreibung der Randbedingungen nicht erfolgte.

Umfangreiche Analysen, speziell für kanal- und freiverlegte Fernwärmeleitungen, beinhalten die Arbeiten (Hausdorf 1989; Maruschky 1989 u. Werner et al. 1989b). Hierbei wurden vor allem Fernwärmesysteme der neuen Bundesländer

analysiert. Mit Stand von 1987 wiesen die neuen Bundesländer 133 technische Systeme der sogenannten öffentlichen Wärmeversorgung auf. Die verschieden anzutreffenden Nutzungsdauern sind in Tabelle 7.3-15 zusammengestellt.

Für diese Systeme konnte eine jährliche Ereigniszahl von 35 Ereignissen pro 100 km Trassenlänge, im Gegensatz zu den alten Bundesländern von 14 Ereignissen pro 100 km Trassenlänge, ausgewiesen werden. In der damaligen Sowjetunion zeigten die durchgeführten Analysen etwa gleiche Häufigkeiten wie in den neuen Bundesländern. In Abb. 7.3-19 ist erkennbar, daß die aufgetretenen Störungsdauern in einem sehr breiten Spektrum gestreut sind. Zwar liegen etwa 85 % der Störungen unter dem festgelegten maximalen Grenzwert der Unterbrechungsdauer der Wärmeversorgung (24 h), doch hatten etwa 15 % der Störungen Versorgungsausfallzeiten zur Folge. Diese waren zum Teil weit über diesem Grenzwert einzuordnen und beinhalteten somit erhebliche Konsequenzen für die Versorgungszuverlässigkeit. Die eingezeichnete Trendfunktion trägt einen potentiellen Charakter und weist ein Bestimmtheitsmaß von $B = 0,87$ auf.

Des weiteren werden für kanal- und freiverlegte Rohrleitungssysteme zeitbezogene mittlere Ausfallwahrscheinlichkeiten sowie durchschnittliche Ausfallraten in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser für das betrachtete System sowie der Elemente Rohrleitung und Armaturen ausgewiesen. Interessant sind dabei die jähr-

Tabelle 7.3-15 Aufteilung der Nutzungsdauern von Fernwärmesystemen der neuen Bundesländer mit Stand 1987

Nutzungsdauer	Anzahl
< 10 Jahre	28
10–20 Jahre	27
20–30 Jahre	28
> 40 Jahre	20

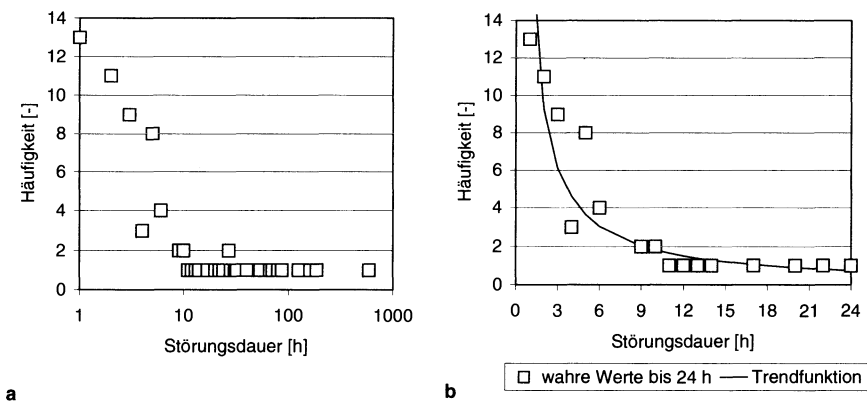


Abb. 7.3-19 Ausgewertete Häufigkeit von Störungsdauern
a gesamter Zeitbereich, **b** Zeitbereich von 0–24 h

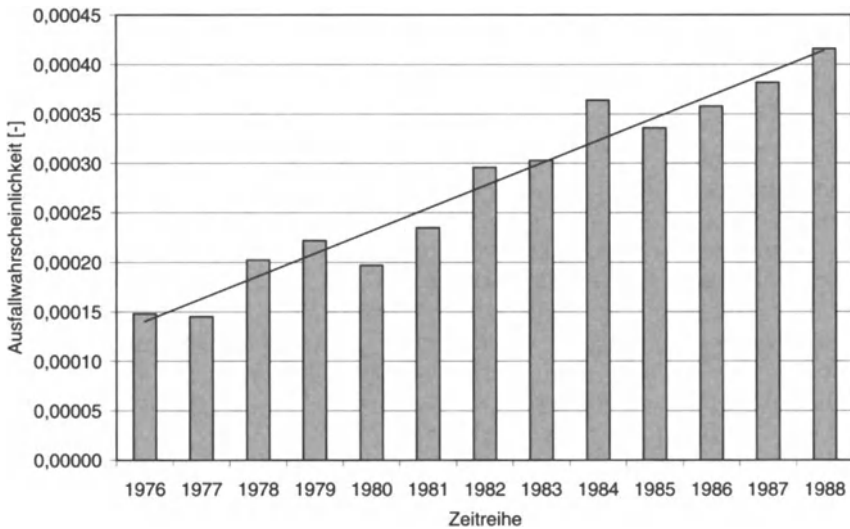


Abb. 7.3-20 Jährliche Ausfallwahrscheinlichkeit eines konkreten Beispiels

lichen Ausfallwahrscheinlichkeiten eines konkreten Systems in Abb. 7.3-20, vor allem der Nachweis der Einflußgröße Zeit bzw. Lebensdauer des Systems. Als Grundlage für die Gewinnung der Ausfallraten wurde die Exponential-Verteilung zum Ansatz gebracht.

In (Beinling et al. 1988) sind für den Zeitraum von 1977–1987 die spezifische Störungs- und Ausfallentwicklung von Fernwärmesystemen der neuen Bundesländer enthalten. Diese bis dahin jährlich erscheinende Statistik trägt nur einen informativen Charakter, da auch hier die erforderliche Datenbasis nicht zur Verfügung steht. Aus der Abb. 7.3-21 sind verschiedene Ergebnisse erkennbar. Zum einen bleibt die Summe der Ereignisse (Störungen plus Ausfälle) über die Jahre relativ konstant, obwohl die Trassenlänge von 952 km im Jahr 1977 auf 1715 km im Jahr 1987 steigt. Dies spiegelt sich auch in der Ereigniskennzahl wider, die im Laufe des Betrachtungszeitraumes fällt. Zum anderen erhöht sich mit steigender Trassenlänge der Anteil der Ausfälle, die nur das Element Rohrleitung betreffen.

Weitere Arbeiten auf dem Gebiet der Berechnung der Zuverlässigkeit folgten. Dazu zählt (Sura u. Gutknecht 1989), die sich mit Aspekten der Versorgungszuverlässigkeit bei der Auslegung von Fernwärmesystemen beim Wärmetransport über große Entfernungen beschäftigten. In (Klee u. Teicher 1989) dagegen wurden Betrachtungen hinsichtlich des Einflusses der Verfügbarkeit der Elemente und der Unterbrechungsdauer bei Störungen auf die Versorgungszuverlässigkeit angestellt. Erste Bewertungen der Betriebssicherheit der in Fernwärmeanlagen eingesetzten Druckhalteverfahren waren Ziel in (Schulz u. Caspar 1989). Dabei wurden die Hauptelemente der Druckhaltung sowie die zum Einsatz kommenden Druckhalteverfahren auf der Grundlage der Exponential-Verteilung betrachtet. Über einzelne Zustandsbetrachtungen, wie

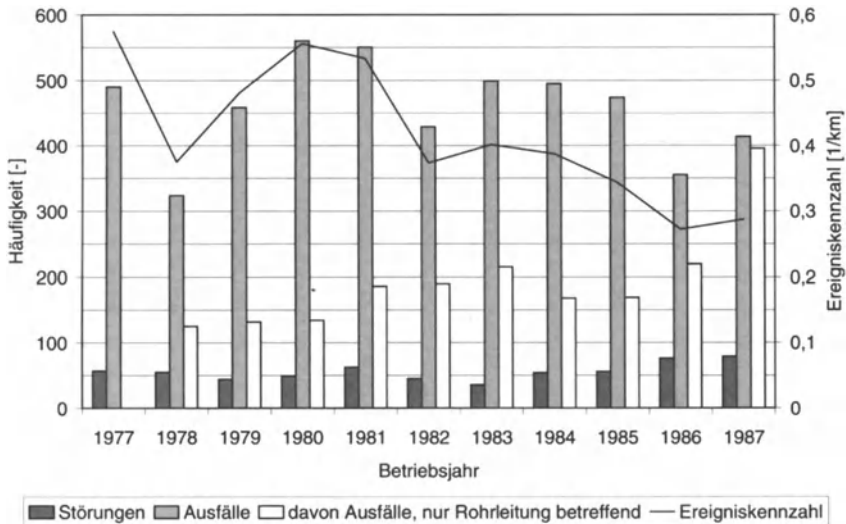


Abb. 7.3-21 Jährliche Betrachtungsweise der Ereigniskennzahl nach (Beinling et al. 1988)

- normaler Betriebszustand (Kompensation der Leckverluste sowie temperaturgeregelte Fahrweise),
- Ausfall der Umwälzung und
- Ausfall der Aufwärmung und Weiterbetrieb der Umwälzung, kurzfristige Zu- und Abschaltung von Abnehmern, Überspeisung in Sekundärnetze

einerseits sowie fiktiv gewählter Ausfallraten verschiedener Elemente ohne praktischen Bezug andererseits wurden im Ergebnis verschiedene Aussagen getroffen. Das wichtigste Ergebnis dabei war, daß eine dynamische Mitteldruckhaltung eine höhere Zuverlässigkeit als die der statischen Verfahren aufweist.

In (Brandes 1992) wurden die zur Anwendung kommenden Überwachungssysteme kritisch betrachtet. Die Analyse bezog sich dabei auf eine Ereignisstatistik der AGFW aus dem Jahre 1989. Neben der dort geführten Diskussion über das Für und Wider der Überwachungssysteme sowie der Auswertung der vorliegenden Ereignisstatistik wurde auch die Schadensentwicklung in Schweden analysiert. Dabei ist der Verlauf der Schadenskenzahl in Abhängigkeit der Betriebsjahre von besonderem Interesse, welcher in Abb. 7.3-22 abgebildet ist. Im Ergebnis dazu wurde festgestellt, daß der Höhepunkt der Schadenshäufigkeit zwischen 5 und 10 Jahren charakteristisch für schlechte Arbeit während der Realisierungsphase ist, was wiederum Korrosion und Leakage zur Folge hat. Die meisten Schäden werden nach Aussage durch Eindringen von Regen- und Grundwasser in die Isolation verursacht.

Grundlage für diese Abhandlung bildet die Arbeit (Rötsch 1993). Ab diesem Zeitpunkt bis heute erfolgte immer wieder eine ständige Präzisierung anhand durchgeführter Analysen bestehender Fernwärmeversorgungssysteme, welche in verschiedenen Beiträgen vorgestellt wurden.

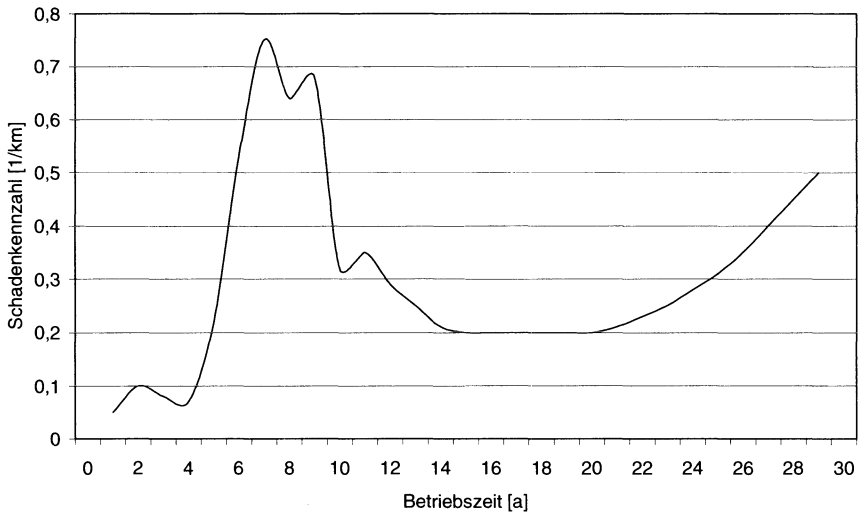


Abb. 7.3-22 Verlauf der Schadenskenzahl in Schweden

In den letzten 2–3 Jahren beziehen sich die Aussagen zum Betriebs- und Ausfallverhalten weniger auf die zur Anwendung gekommenen Elemente in Fernwärmeversorgungssystemen, sondern vielmehr auf das Verlegeverfahren Kunststoffmantelrohr. Der Beitrag in (Besier 1996) untersucht insbesondere die Rohrverbindungen an Kunststoffmantelrohren im Rahmen der Verlegung. Die letzte Schadensstatistik für die alten Bundesländer wurde durch die AGFW 1989 erhoben. Mit (AGFW 1997b) wurde der Grundstein für eine jährliche Schadensstatistik gelegt, mit dem späteren Ziel, diese auf alle Verlegeverfahren anzuwenden. An der Umfrage für 1996 beteiligten sich 90 Fernwärmeversorgungsunternehmen, die eine Gesamttrassenlänge an Kunststoffmantelrohr von etwa 2.900 km betreiben. Laut Aussage der AGFW sind somit etwa 80 % der in Deutschland verlegten Kunststoff-Mantelrohrnetze erfaßt. Dieser Anteil ist sicher ausreichend, um Trends bei der Schadensentwicklung zu erkennen. An der Umfrage für 1997 beteiligten sich dagegen 86 Fernwärmeversorgungsunternehmen, aus Deutschland, Österreich und der Schweiz, mit einer betrachteten Gesamtlänge an Kunststoffmantelrohr von etwa 3.866 km (AGFW 1999b). In Auswertung dieser Schadensstatistiken wurde seitens der AGFW festgestellt, daß diese Art und Form der Schadenserhebung und Schadensauswertung keine differenzierten Betrachtungen zu Schadensursachen und Schadenskosten zulassen. Dazu standen die Daten und Fakten, wie beispielsweise das Baujahr, die Nenndurchmesser, der eingesetzte Muffentyp, der Hersteller der Systeme sowie Aussagen zur Qualitätsüberwachung während der Verlegung für eine detailliertere Auswertung nicht zur Verfügung. Des weiteren können keine Aussagen hinsichtlich Systemgröße der einzelnen Versorgungsunternehmen gemacht werden, d. h. sind die Schäden anteilig in kleineren, mittleren oder großen Systemen anzutreffen. Eins steht aber fest, je größer

das System ist, desto detaillierter und präziser ist erfahrungsgemäß die Vorgehensweise bei Neubau einer Fernwärmeleitung.

Insgesamt wurden 1111 Schäden in 1996 und 809 Schäden in 1997 registriert, wovon 1179 (mit Berücksichtigung der Schäden durch Fremdeinwirkung) bzw. 730 (ohne Berücksichtigung) über Leckwarnsysteme festgestellt wurden. Die Anzahl der Schäden durch Fremdeinwirkung betrugen in den beiden Jahren 171 bzw. 167. Dabei liegt mit 72 % bzw. 61 % der überwiegende Anteil innerhalb der Gewährleistung. Das ergibt eine Schadenskenzahl für 1996 bzw. 1997 von 0,44 bzw. 0,25 Schäden pro Trassenkilometer und Jahr. Die Schadensverteilung sowie die Art der Schadensfeststellung sind aus Abb. 7.3-23a und 7.3-23b ersichtlich. Bei den aufgetretenen Schäden nehmen die Muffenschäden (573 in 1996; 256 in 1997) den höchsten Anteil ein. Eine detailliertere Bewertung der verschiedenen Muffentypen, als in Abb. 7.3-23c, ist nicht möglich, da die Anzahl der insgesamt eingebauten Muffentypen in dieser Schadensstatistik fehlt. Es handelt sich hierbei also um dieselbe Problematik, wie bei der zuvor erläuterten Berechnung von spezifischen Kenngrößen einzelner Elemente. Allerdings läßt sich daraus erkennen, daß die Schiebemuffen den eigentlichen Schwerpunkt bilden. Die AGFW schlägt vor, daß grundsätzlich vor Ablauf der Gewährleistung die Muffen nochmals sorgfältig überprüft werden sollten, um somit insbesondere Schäden im Muffenbereich rechtzeitig zu erkennen. Dazu ist es erforderlich, auch die Lebensdauer bzw. das Baujahr zu erfassen. Den geringsten Anteil in den beiden Statistiken nehmen die Schäden am PE-Mantel und der Isolierung ein (41 in 1996; 45 in 1997). Eine detailliertere Bewertung zeigt Abb. 7.3-23d. Die einzelnen Schäden an Mediumrohren (272 in 1996; 229 in 1997) sind in Abb. 7.3-23e dargestellt. Daraus ist erkennbar, daß nach wie vor den größten Anteil die Baustellenschweißnähte einnehmen. Das sind immerhin 19,4 % bzw. 21,6 % der registrierten Gesamtfehler. Diese Fehlerquote kann durch geeignete Maßnahmen, wie sorgfältige Auswahl der ausführenden Firmen und somit der Schweißer sowie durch Qualitätskontrollen, erheblich reduziert werden. Laut AGFW läßt sich die sorgfältige Auswahl der ausführenden Firmen auch durch die stark voneinander abweichenden Schadenszahlen bei den einzelnen Versorgungsunternehmen belegen, deren Aufwand zur Qualitätssicherung offensichtlich ebenso stark divergiert. Dabei spielt auch in diesen Fällen die Größe des Versorgungsunternehmens eine wesentliche Rolle. Des weiteren kann erfahrungsgemäß bei selbst sorgfältiger Auswahl der ausführende Firma der „gute“ Schweißer einen „schlechten“ Tag erwischen. Die 56 bzw. 54 Schäden am Mediumrohr und Werksschweißnähten machen immerhin etwa 5 % bzw. 6,7 % der registrierten Gesamtfehler aus. Hier sind die Hersteller gefordert, dieser Fehlerquote entgegen zu wirken. Die Auswertung hat gezeigt, daß nach wie vor die Schäden an den Leckwarnsystemen selbst einen hohen Anteil annehmen (171 in 1996; 168 in 1997). Da auch hier die Angaben über die Lebensdauer bzw. Baujahre sowie über einzelne Elemente des Leckwarnsystems fehlen, ist eine Bewertung schwierig (Abb. 7.3-24f).

Durch weitere Schadenserhebungen der AGFW wird es später möglich werden, daraus resultierende Trends für das Stör- und Ausfallverhalten einzelner Elemente abzuleiten, um wiederum entsprechende Rückschlüsse für den Bau und Betrieb ziehen bzw. bestimmte Entwicklungen entgegen wirken zu können.

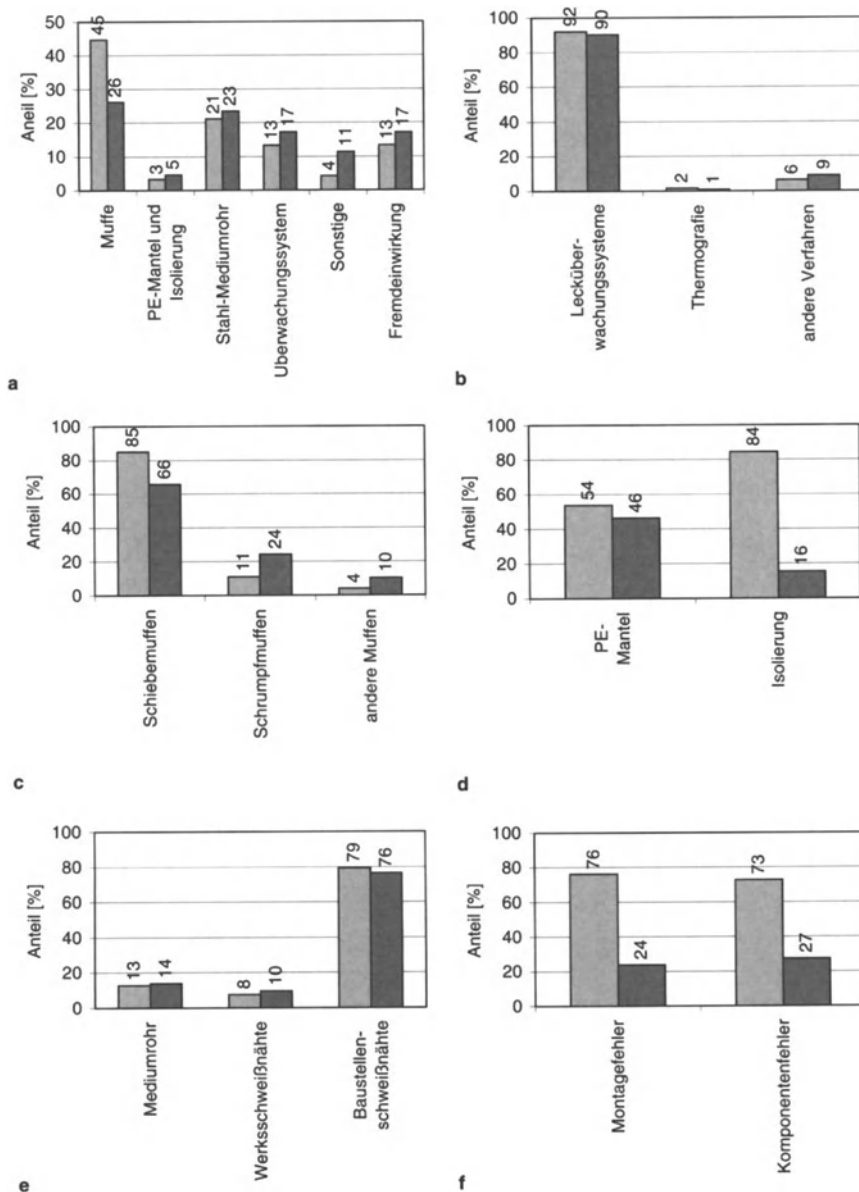


Abb. 7.3-23 Schadensstatistik Kunststoffmantelrohr 1996 (hellgraue Flächen) und 1997 (dunkelgraue Flächen)

a Schadensverteilung, **b** Art der Schadensfeststellung, **c** Muffenschäden, **d** Schäden am PE-Mantel und Isolierung, **e** Schäden am Stahl-Mediumrohr, **f** Schäden am Überwachungssystem

Tabelle 7.3-16 Statistische Angaben der in Finnland zur Anwendung gekommenen Verlegeverfahren 1996

Verlegeverfahren	Länge [km]	Schadenshäufigkeit [–]	Schadenskennzahl [1/km]
vorisolierte Rohrleitung (Mpuk) ^a	210	10	0,05
vorisolierte Rohrleitung (2Mpuk) ^b	3195	248	0,08
PE/PUR-Kanal (Mpul, 2Mpul) ^c	1120	247	0,22
Betonkanal (Emv, Epu, Epuk, Wmv) ^d	855	85	0,10
andere Verlegeverfahren	810	107	0,13
Summe	6190	697	0,11

^a Mpuk – preinsulated twin pipes.^b 2Mpuk – preinsulated single pipes.^c Mpul, 2Mpul – PE/PUR ducts (sliding system).^d Emv, Epu, Epuk, Wmv – prefabricated concrete channels.

Welche Möglichkeiten bestehen, wenn eine ausreichende Datenmenge über einen Zeitraum von aufgetretenen Ereignissen vorliegt, zeigt (Sirola 1998). Der finnische Fernwärmeverband erstellt seit 1967 Schadensstatistiken, die seit 1987 jährlich durchgeführt werden. Die vorliegende Statistik von 1996 basiert auf einer Auswertung von etwa 50 % aller Mitgliedsunternehmen. Damit konnten 6190 km Fernwärmeleitungen erfaßt werden (Tabelle 7.3-16); das sind 82 % der gesamten Fernwärmeleitungen in Finnland.

Weiterhin sind aus dieser Tabelle die Aufteilung in die einzelnen Verlegeverfahren, deren Schadenshäufigkeit sowie die sich daraus ergebende Schadenskenzahl ersichtlich. Die Schadenskenzahl für 1996 beträgt für alle betrachteten Verlegeverfahren 0,11 Schäden pro Leitungskilometer. Es wird gleichzeitig die Aussage gemacht, daß sich während der letzten 12 Jahre die Anzahl der Schäden relativ in einem engen Korridor von jährlich 600–800 bewegte. Für die wichtigsten Verlegeverfahren sind in Abb. 7.3-24 für den Zeitraum 1982–1996 die jeweiligen Schadenskenzahlen dargestellt.

Interessant ist auch die Untersuchung der Schadenskenzahl in Abhängigkeit der Lebensdauer, hier speziell für die vorisolierten Rohrleitungen, sowie des gesamten Rohrleitungsbestandes (s. Abb. 7.3-25). Es wird deutlich, daß die Schadenskenzahl der am längsten in Betrieb befindlichen vorisolierten Rohrleitungen immer noch verhältnismäßig niedrig ist. Rohrleitungen, die eine Lebensdauer von größer 21 Jahren aufweisen, wurden in Finnland in Betonkanälen (Emv, Epu, Epuk, Wmv) oder PE/PUR-Kanälen (Mpul, 2Mpul) verlegt. Die Schadenskenzahl dieser Rohrleitungen liegt bei nur 0,2 Schäden pro Leitungskilometer. Bei den vorisolierten Rohrleitungen (Mpuk, 2Mpuk) beschränken sich die Schäden im wesentlichen auf Rohre, die eine Lebensdauer von größer 10 Jahren aufweisen. Verbesserungen der Systeme sowie Erhöhung der Qualitätssicherung bei der Verlegung in den letzten Jahren wirken sich positiv auf die Schadenskenzahl aus.

In (Sirola 1998) werden außerdem interessante Aussagen hinsichtlich der Erneuerungen von Rohrleitungen gemacht. In dem Jahr 1996 wurden 9,7 km Rohrleitung repariert oder erneuert; dies sind bezogen auf die betrachtete Gesamtlänge nicht mal 0,2 %. Diese Länge hat sich seit Ende der 80iger Jahre verringert, wobei

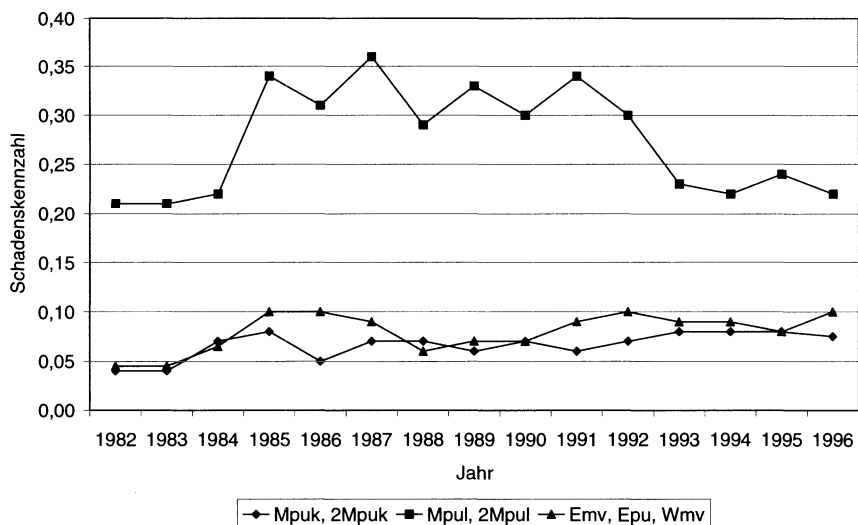


Abb. 7.3-24 Schadenskenzahlen pro Leitungskilometer verschiedener Verlegeverfahren

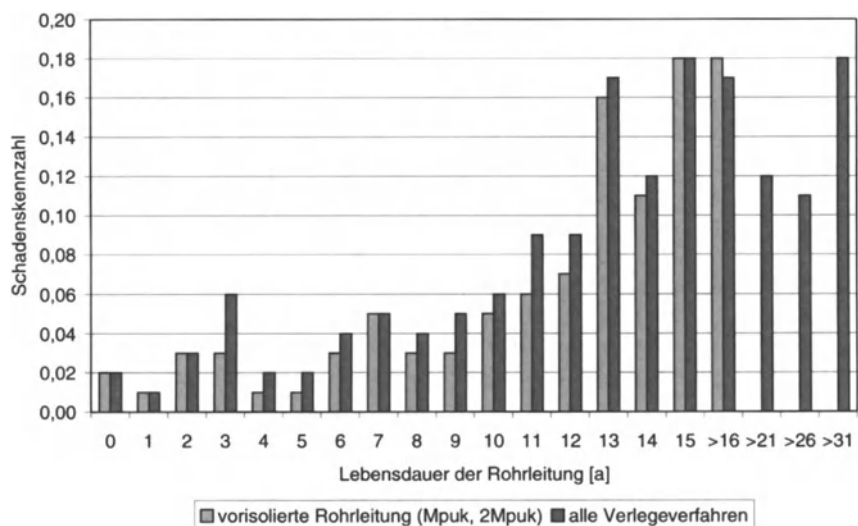


Abb. 7.3-25 Schadenskenzahlen pro Leitungskilometer in Abhängigkeit der Lebensdauer

der maximale Wert etwa bei 25 km lag. Diese hohe Zahl ist in dem partiellen Austausch von geschädigten kanalverlegten Rohrleitungen begründet. Eine systematische Erneuerung der alten Rohrleitungen wurde und wird im allgemeinen in naher Zukunft nicht durchgeführt, da dies auch unter Berücksichtigung der verbesserten Dämmeigenschaften neuer Rohrleitungen unwirtschaftlich ist. Weiterhin

wird erwähnt, daß die Reparaturen an vorisolierten Rohrleitungen durchschnittlich auf wenige Meter beschränkt sind; bei Kanalverlegung beträgt die entsprechende Länge etwa 15 m und bei PE/PUR-Kanalverlegung etwa 35 m.

Hinsichtlich der Schadensarten und Schadensursachen ist zu bemerken, daß es sich bei etwa 90 % der gemeldeten Schäden um Leckagen handelt. Der Rest wird durch Korrosion ohne Leckage oder defekte Ummantelungen und/oder Isolierung verursacht, die hauptsächlich durch nachlässige Parallelaufgrabungen in der Nähe der Rohrleitungen entstehen. Im Vergleich mit anderen Aussagen hinsichtlich der betroffenen Rohrleitungen, tritt die Hälfte dieser Schäden im Vorlauf, ein Drittel im Vor- und Rücklauf und nur etwa 15 % nur im Rücklauf auf. In Abb. 7.3-26 ist für die vorisolierten Rohrleitungen die Schadensverteilung zusammengestellt.

Des weiteren werden auch Aussagen hinsichtlich der Betriebsunterbrechungen und Verfügbarkeit gemacht. Die durchschnittliche Ausfallzeit betrug 4 h für vorisolierte Rohrleitungen und 8 h bei Betonkanälen, wobei für die dabei verursachte Unterbrechungsdauer der Versorgung, hier auch als Netzwerkstörung bezeichnet, etwa 1,03 h pro Abnehmer ausgewiesen wurde. Dies bedeutet, daß die Verfügbarkeit der Fernwärme bezogen auf Netzwerkstörungen bei 99,988 % lag. Dieser Wert kann nicht weiter interpretiert werden, aufgrund fehlender Berechnungsgrundlage.

Grundsätzlich ist festzustellen, daß in bezug auf die vorisolierten Rohrleitungen, abgesehen von einigen Ausnahmen, keine schlechten Erfahrungen in den letzten 10 Jahren gesammelt wurden. In Finnland werden die Rohrleitungen dieses Verlegeverfahrens fast ausschließlich reibungsfest und vorgewärmt sowie ohne Überwachungssysteme verlegt. Wegen der relativ niedrigen Reparaturkosten und Schadenskennzahlen besteht aus Sicht der finnischen Fernwärmeversorgungsunternehmen kein Anlaß, Überwachungssysteme zu installieren. Dadurch werden alle diesbezüglichen Investitionskosten und Betriebskosten, sowie insbesondere die Kosten, die durch fehlerhafte Überwachungssysteme und unnötige Ausgrabungsarbeiten wegen Fehlalarm verursacht werden, vermieden. Andererseits wären mit Überwachungssystemen entsprechende Schäden früher erkannt worden. Abschließend wird dazu bemerkt, daß der Gesamtvorteil von Überwachungssystemen nach wie vor strittig ist, wenn alle diesbezüglichen Kosten sowie die bekannten Daten aus den Ereignisstatistiken in Betracht gezogen werden.

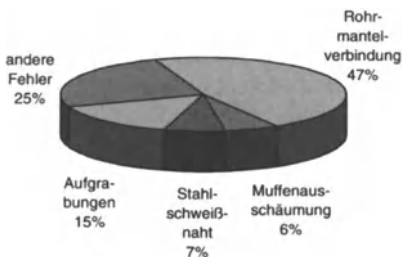


Abb. 7.3-26 Schadensverteilung vorisolierte Rohrleitungen in Finnland 1996

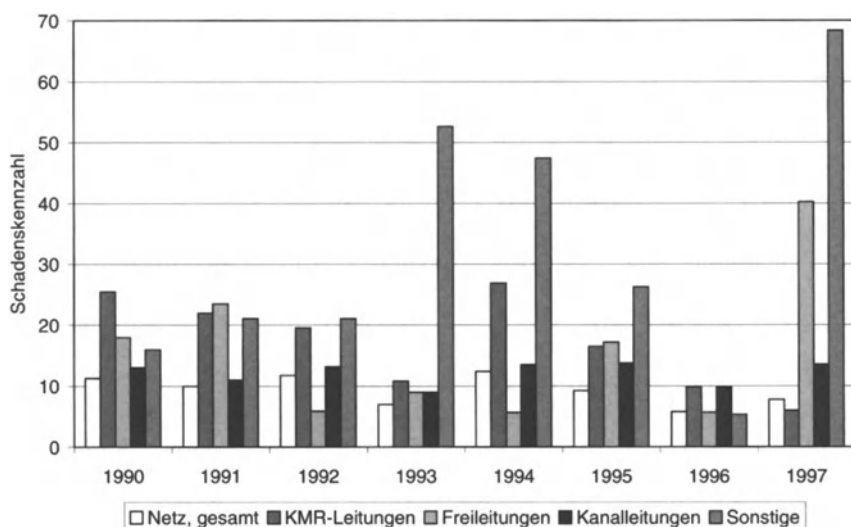


Abb. 7.3-27 Schadenskenzahl pro 100 Leitungskilometer eines konkreten Fernwärmesystems

Im Ergebnis daraus besteht das eigentliche Hauptaugenmerk in einer höheren Qualitätssicherung bei der Planung und Verlegung von Fernwärmeleitungen.

Abschließend soll mit der Abb. 7.3-27 verdeutlicht werden, daß erst mit Führung einer Ereignisstatistik über einen längeren Zeitraum entsprechende Rückschlüsse auf den Betrieb gezogen werden können. Das Festlegen von Maßnahmen zur Instandhaltung – egal ob schadens-, zeit oder zustandsbezogen – aus geführten Ereignisstatistiken über 1, 2 oder 3 Jahre kann schnell zu falschen Entscheidungen führen, was auch bei nur oberflächlich oder „geschönt“ geführten Statistiken zutrifft. Letztendlich wirkt dies gegen Fernwärmeversorgungssysteme.

Im folgenden werden einige konkrete Fallbeispiele näher erläutert. Ein Großteil der Ergebnisse basiert auf der Anwendung des Programmes ZVFW98 zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärmeversorgungssystemen.

Die erste Auswertung bezieht sich auf eine Analyse von 234 eingetretenen Ereignissen des Verlegeverfahrens Kunststoffmantelrohr mit einer geschätzten Trassenlänge von 286 km. Eine genauere Auflistung der jährlichen Aufteilung der verlegten Nenn Durchmesser stand nicht zur Verfügung. Die Betrachtung erfolgte für einen Zeitraum von etwa 5 Jahren; 1992 und 1997 sind keine vollständigen Betriebsjahre. Die Schadensverteilung ist aus der Abb. 7.3-28a ersichtlich, wobei in Abb. 7.3-28b für den Vergleich mit der Schadensstatistik AGFW die Schäden und Ereignisse zusammengefaßt wurden. Ereignisse deshalb, weil es sich bei einer Fehlmessung um keinen Schaden handelt. Aus diesen Darstellungen wird ersichtlich, daß entgegen der Schadensstatistik AGFW zwar weniger Muffenschäden zu verzeichnen, aber dafür große Anteile an Schäden bei Schweißnähten und am Überwachungssystem aufgetreten sind. Der Anteil an Fehlmessungen unterstreicht den zuvor genannten Konflikt in der Auswertung der finnischen Statistik.

Für diese Betrachtung konnte eine Ereigniskennzahl von etwa 0,81 Ereignis pro Trassenkilometer ausgewiesen werden. Die jährliche Ereigniskennzahl wurde gemeinsam mit der verlegten Trassenlänge in Abb. 7.3-29 gegenübergestellt. Hierbei ist relativ einfach erkennbar, daß eine hohe Ereigniskennzahl nicht mit einer großen Trassenlänge übereinstimmen muß (Gegenüberstellung der Jahre 1993 und 1995).

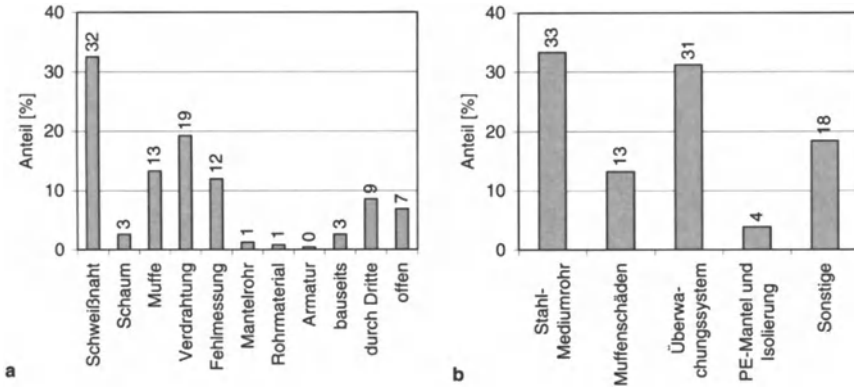


Abb. 7.3-28 Schadensverteilung Kunststoffmantelrohr
a detaillierte Analyse, **b** Zusammenfassung für Vergleich mit der Schadensstatistik AGFW

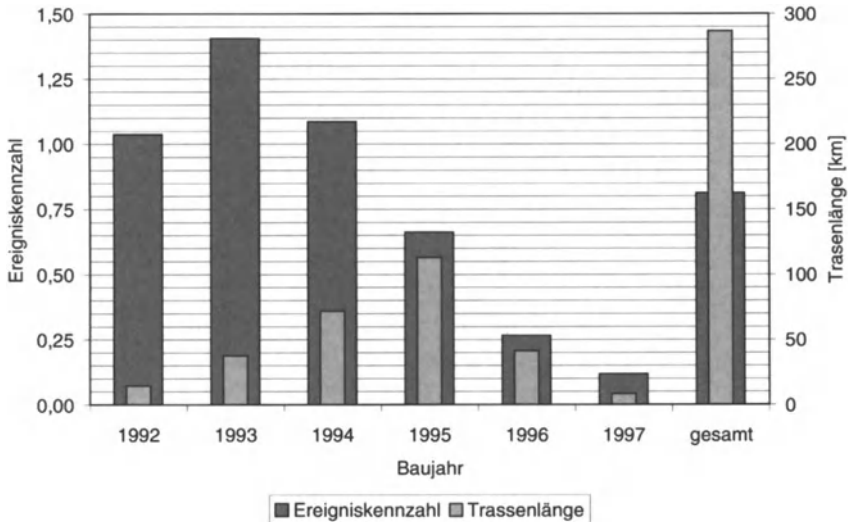


Abb. 7.3-29 Gegenüberstellung der Ereigniskennzahl pro Trassenkilometer und der Trassenlänge

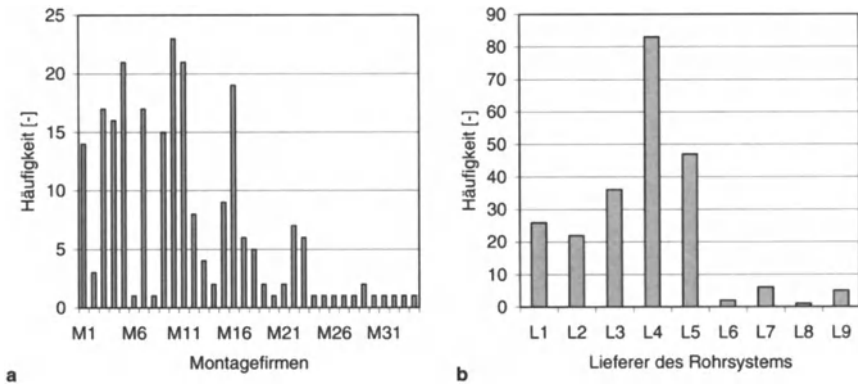


Abb. 7.3-30 Absolute Häufigkeit an Ereignissen bezogen auf
a ausführende Montagefirmen, **b** Lieferer des Rohrsystems

Wird die Ereigniskennzahl auf den betrachteten Zeitraum bezogen, tritt etwa im Mittel aller 7–8 Tage ein Ereignis auf. Ob dieser Wert als hoch oder niedrig eingeschätzt werden kann, ist derzeit durch fehlende Vergleichsuntersuchungen nicht möglich.

Die in der Abb. 7.3-30 dargestellten Auswertungen enthalten nur einen informativen Charakter, da die Zuordnung zur verlegten Trassenlänge fehlt. In diesem konkreten Fall war eine Aufarbeitung nicht mehr möglich, da die realisierten Bauvorhaben über Rahmenverträge zentral, unabhängig vom Vorhaben, abgewickelt wurden. Die Begründung dafür ist mehrmals genannt worden, siehe Auswertung der Ereigniskennzahlen.

Die Auswertung der Ereignisse hinsichtlich der Abhängigkeit des Betriebsjahres für dieses Beispiel wurde bereits in der Abb. 7.3-15 aufgezeigt und diskutiert. Hierbei handelt es sich nur um absolute Werte, da eine entsprechende Netzstatistik mit den jährlich verlegten Rohrleitungen in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser nicht zur Verfügung stand. Mit Ablauf der Gewährleistungsfrist von 5 Jahren sind die jeweiligen Nenndurchmesser aus dieser Darstellung ersichtlich, die einer detaillierten Überprüfung unterzogen werden sollten. Letztendlich sind damit auch Kosten für diese Überprüfung verbunden.

Die Betrachtung über den gesamten Zeitraum ist in Abb. 7.3-31 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß die meisten Ereignisse im 2. Betriebsjahr auftreten. Inwieweit sich dieser Trend bestätigt, kann nur anhand von Vergleichen mit Analysen anderer Fernwärmeversorgungs-systeme erfolgen. Unter der Annahme, daß für jede Schadensbeseitigung im Mittel mindestens 10.000 DM aufgewendet werden müssen, entstehen bei dieser Betrachtung die ebenso in dieser Darstellung gezeigten jährlichen Kosten. Neben dieser Kostenposition spielen bei einer notwendigen Abschaltung des betroffenen Netzabschnittes selbst in einem Gewährleistungsfall die Betriebs- und Personalkosten für die Außerbetriebnahme, das Ablassen bzw. Umpumpen des Heizwassers, die Überwachung der Schadensbeseitigung, das Füllen mit Heizwasser sowie die Wiederinbetriebnahme eine we-

sentliche Rolle. Statistisch gesicherte Werte liegen derzeit noch nicht vor. Weiterhin ist bei dieser Betrachtung der Erlösausfall bei Versorgungsunterbrechung mit zu berücksichtigen.

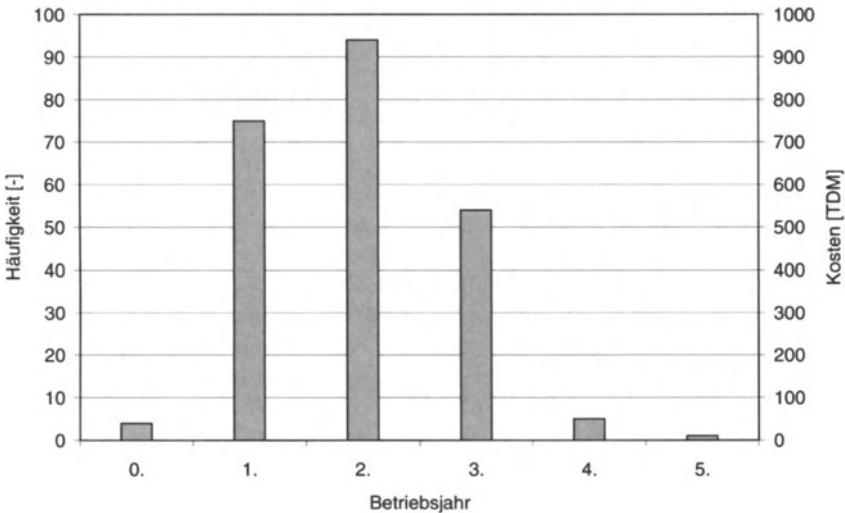


Abb. 7.3-31 Ereignishäufigkeit sowie die damit verbundenen Kosten in Abhängigkeit vom Betriebsjahr (Kostenansatz: 10.000 DM pro Schaden)

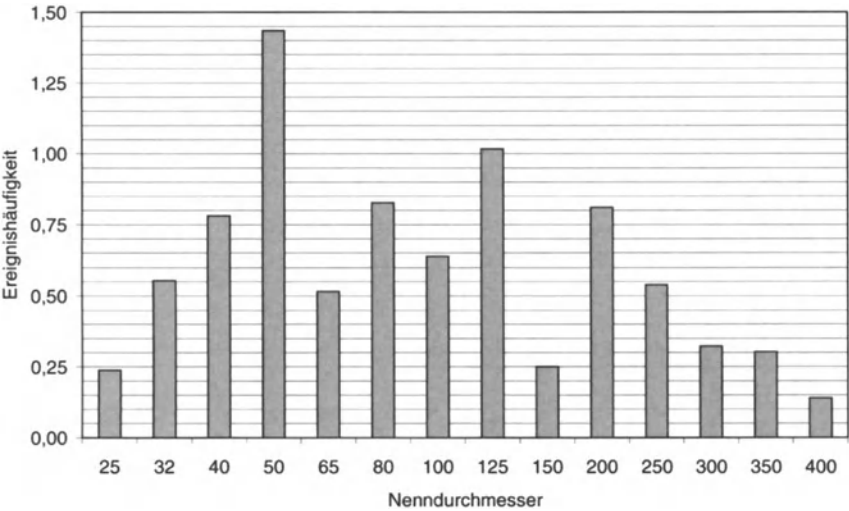


Abb. 7.3-32 Ereigniskennzahl pro Trassenkilometer in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser für einen Zeitraum von 5 Jahren

Wird die Gesamtlänge innerhalb dieses betrachteten Zeitraumes auf die jeweiligen Teillängen der Nenndurchmesser aufgeteilt, ergibt sich die in Abb. 7.3-32 dargestellte spezifische Ereigniskennzahl pro Trassenkilometer und Nenndurchmesser. Hieraus lassen sich keine detaillierten Rückschlüsse ziehen. Anhand fehlender Unterlagen ist die hohe Ereigniskennzahl nicht eindeutig begründbar.

Eine Verfügbarkeit innerhalb dieser Betrachtung konnte wegen fehlender Daten für die Reparaturdauer nicht berechnet werden. Diese Reparaturdauern waren auch nicht rückwirkend ermittelbar, da es sich überwiegend um Gewährleistungsfälle handelte und darüber keine Aufzeichnungen über den genauen Zeitpunkt existent waren.

In einem weiteren Beispiel wurde die Ereignisstatistik eines Fernwärmeversorgungssystem für den Zeitraum von einem Jahr untersucht. In diesem System kommt sowohl Dampf als auch Heißwasser zu Einsatz. Auch hier war es nicht möglich, spezifische Zuverlässigkeitskenngrößen zu berechnen, da eine nennweitenabhängige Netzstatistik nicht geführt wurde. Lediglich die Gesamtlänge lag als Schätzgröße mit etwa 66 km Trassenlänge vor. In diesem Zeitraum traten insgesamt 30 Ereignisse auf, was somit zu einer Ereigniskennzahl von 0,45 pro Trassenkilometer führt. Bei getrennter Betrachtung hinsichtlich des Wärmemediums kann festgestellt werden, daß von den 30 Ereignissen lediglich ein Ereignis auf das Dampfsystem kam. In dem Heizwassersystem kamen überwiegend die Verlegeverfahren Kanal, Freiverlegung und Kunststoffmantelrohr zur Anwendung, wobei davon das Kunststoffmantelrohr allein von den verbleibenden 29 Ereignissen 25 mal betroffen war.

Die Schadensverteilung ist aus der Abb. 7.3-33a ersichtlich. Daraus wird ersichtlich, daß die Anteile aus Muffenschäden und Schweißnahtfehlern über 60 % der gesamten Ereignisse ausmachen. Obwohl das Versorgungsunternehmen für die Rohrleitungsverlegung eine Prüfung der Schweißnähte von 100 % vorschreibt, ist der ausgewiesene Anteil von 34 % sehr hoch. Durch fehlende Unterlagen war

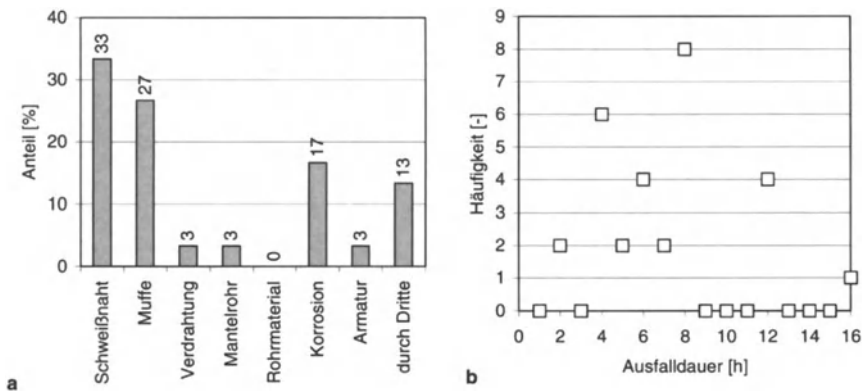


Abb. 7.3-33 Analyse eines Fernwärmesystems für einen Zeitraum von einem Jahr

a Schadensverteilung, **b** Ausfalldauer bezüglich Häufigkeit

auch hier in diesem konkreten Fall nur eine begrenzte Ursachenforschung möglich, die momentan nur zu Vermutungen führt. Durch die Weiterführung der Ereignisstatistik sowie unter Voraussetzung der Anwendung der vorgestellten detaillierten Datenerfassung sind genauere Aussagen zu einzelnen Fehlern zu erwarten. Dazu gehört auch die Prüfung der Qualitätssicherung der ausführenden Firmen hinsichtlich der Ausführung. Einen weiteren und besonderen Schwerpunkt stellen die Schäden durch Korrosion dar. Als Ursache hierfür konnten die nicht ordnungsgemäßen Ausführungen zwischen Endkappe am Kunststoffmantelrohr und der sich anschließenden Armaturn im Entleerungsbauwerk analysiert werden.

In Abb. 7.3-33b sind die einzelnen Ausfalldauern hinsichtlich ihrer Zeitdauer und Häufigkeit sowie deren Verteilung dargestellt. Die durchschnittliche Ausfalldauer beträgt etwa 12,8 h, wobei der Anteil der Zeiten für die Außerbetriebnahme, Entleeren, Füllen und Inbetriebnahme des betroffenen Abschnittes mit 40–60 % eingeschätzt werden kann.

Die absolute Ereignishäufigkeit der jeweils betroffenen Nenndurchmesser in diesem Zeitraum ist in Abb. 7.3-34a dargestellt. Auch hieraus wird wiederum ersichtlich, daß der Nenndurchmesser DN 50 davon den größten Anteil aufweist. Der relativ hohe Anteil des Nenndurchmessers DN 350 ist auf mehrere undichte Muffen zurückzuführen. Die Berechnung der Ereigniskennzahl pro Längeneinheit war hierbei nicht möglich, da – wie bereits erwähnt wurde – eine entsprechende Netzstatistik mit den jährlich verlegten Rohrleitungen in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser nicht zur Verfügung stand. Die gleiche Aussage trifft auch für die in Abb. 7.3-34b gezeigte absolute Häufigkeit bezogen auf das Baujahr zu. Diese beiden Darstellungen tragen somit nur einen informativen Charakter. Des weiteren stellen hier in diesem Fall die nicht konkret zuordenbaren Ereignisse einen hohen Ungenauigkeitsfaktor hinsichtlich des Betriebs- und Ausfallverhaltens des betrachteten Systems dar.

Bei 19 Schäden wurden die dazu entsprechenden Kosten ohne die zusätzlichen Betriebskosten ausgewiesen. Die durchschnittliche Schadenssumme beläuft sich auf etwa 11.800 DM pro Schaden.

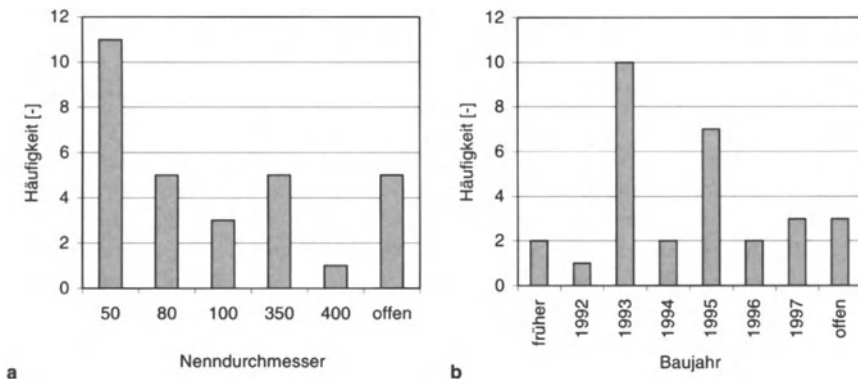


Abb. 7.3-34 Absolute Ereignishäufigkeit bezogen
a auf die betroffenen Nenndurchmesser, **b** auf das Baujahr

Die Zuverlässigkeit des betrachteten Fernwärmeversorgungssystems erfolgte mit dem Programm ZVFW98. Dabei wurden zwei verschiedene Betrachtungsweisen durchgeführt. Ausgangspunkt bildet dazu die in Abb. 7.3-2 gezeigte Interpretation der Ausfalldauer und der Ereignisdauer. Wird nur die Ausfalldauer betrachtet, so ergibt sich ein Verfügbarkeitsintervall von 96,1–98,5 % mit einem Mittelwert von 97,7 %, bezogen auf die Versorgungsunterbrechung partieller Teile des gesamten Systems. Für die spezifische Verfügbarkeit kann 99,96 % pro Trassenkilometer ausgewiesen werden. Finden dagegen die Ereignisdauern Berücksichtigung, d. h. die Zeitdauer von der Entdeckung bis zur Behebung, so ergibt sich ein wesentlich geringeres Verfügbarkeitsintervall von 28,2–100 % mit einem Mittelwert von 53,2 %, bezogen auf die Ereignisdauer partieller Teile des gesamten Systems. Die Aussage kann auch so formuliert werden: Das Fernwärmeversorgungssystem befand sich in dem betrachteten Betriebsjahr nur mit 53,2 % in einem störungsfreien Zustand. Diese wesentlich niedrigere Verfügbarkeit kommt zustande, weil entdeckte Störungen nicht sofort behoben werden, sondern meist aus Gewährleistungsfällen erst zu einem späteren Zeitpunkt oder bei geplanten Netzstillständen außerhalb der Heizperiode.

Für das betrachtete Versorgungssystem kann somit ein Verfügbarkeitsintervall $V_u \leq V \leq V_o$ angegeben werden, wobei als Maximum für die obere Verfügbarkeitsgrenze der Idealwert $V_o = 1$ angesehen wurde. Die Verfügbarkeit gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, daß sich das Versorgungssystem – unter Berücksichtigung seiner Zuverlässigkeit und Instandhaltung – zu einem gegebenen Zeitpunkt im arbeitsfähigen Zustand befindet und daß dieser Zustand über einen sehr langen Zeitraum erhalten bleibt. Der wahre Wert befindet sich, bei einer hier zum Ansatz gebrachten Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %, innerhalb des angegebenen Verfügbarkeitsintervalles.

Da die Verfügbarkeit eines Versorgungssystems als absoluter Wert bzw. Intervall kaum oder keine Vergleiche mit gleichen Systemen anderer Versorgungsunternehmen zuläßt, wurden eigens dafür neue Kenngrößen, wie beispielsweise die spezifische Verfügbarkeit, gebildet. Mit dieser Kenngröße wird der Nenndurchmesser mit der schlechtesten Verfügbarkeit ausgewiesen, unter Beachtung, daß jetzt detailliertere Untersuchungen einschließlich Diagnostik stattfinden müssen, die Aufschluß über die möglichen Schadensursachen geben. Weiterhin wurden verschiedene Untersuchungen hinsichtlich bestimmter Abhängigkeiten der Kenngröße Verfügbarkeit und solchen Größen wie beispielsweise Rohrleitungs- bzw. Trassenlänge, Anzahl der eingetretenen Ereignisse, Betrachtungszeitraum oder Summenereignisdauer vorgenommen. Des weiteren wurde die Abhängigkeit der Armaturenanzahl je Längeneinheit und Nenndurchmesser analysiert mit dem Ziel, eine charakteristische Kenngröße zu gewinnen, die einen Vergleich hinsichtlich des Ausrüstungszustandes des betrachteten Versorgungssystems gestattet. Ebenso ist es möglich, andere netzspezifische Elemente in diese Betrachtungen einzubeziehen, wie z. B. Formstücke, Bauwerke oder die angewendeten Verlegeverfahren.

Mit Hilfe der gewonnenen Kenngrößen können Verfügbarkeitsbetrachtungen zur Gegenwart und Zukunft eines Versorgungssystems gemacht werden, um daraus schlußfolgernd die erforderlichen Instandhaltungsstrategien abzuleiten. Weiterhin ist ebenfalls ein unmittelbarer Vergleich mit anderen Systemen gegeben.

Gleichzeitig wurde ein Programm für die Berechnung der Zuverlässigkeit vorgestellt. Grundvoraussetzungen bildeten dazu die Ereignis- und Netzstatistik. Aus diesen Daten werden die jeweiligen Betriebs- und Ausfalldauern ermittelt. Darauf aufbauend erfolgt die Berechnung der Betriebs- und Ausfallrate sowie der Verfügbarkeit des Systems bzw. der betrachteten Elemente.

Die gezeigten Beispiele sollten nochmals die Wichtigkeit der Ereignis- und Netzstatistik und vor allem deren detaillierte Datenerfassung verdeutlichen.

Letztendlich kann festgestellt werden, daß mit dem Programm zur Berechnung der Zuverlässigkeit u. a. Entscheidungen hinsichtlich

- der Projektierung und Ausführung von Neubau und Erweiterungen des Systems,
- der zum Einsatz kommenden Armaturenbauarten,
- der angewendeten Verlegeverfahren,
- der Instandhaltung,
- der Minimierung der Ereignis- und Ausfallzeiten sowie deren verursachenden Kosten usw.

getroffen werden können.

7.3.6.3

Wasserversorgungssysteme

Aussagen und Daten hinsichtlich der Zuverlässigkeit von Wasserversorgungssystemen gibt es nur sporadisch. In den meisten Fällen handelt es sich um nicht veröffentlichtes Zahlenmaterial.

Entsprechende Aussagen über die Ursachen von Rohrbrüchen in Versorgungsleitungen werden in (Kottmann 1978) gemacht. Hierbei ging es um die möglichen Einflüsse auf das Bruchgeschehen an Rohrleitungen aus Grauguß, wie

- Mängel im Gefüge des Werkstoffs,
- temperaturbedingte Veränderungen der Werkstoffeigenschaften,
- Korrosion,
- Innendruck und dessen Schwankungen,
- Temperaturänderungen des Mediums,
- Verkehrsbelastungen,
- Veränderungen der Lufttemperatur sowie
- Veränderungen der Bodentemperatur und -feuchtigkeit in Abhängigkeit verschiedener Tiefen.

Ein deutlicher Einfluß wurde nachgewiesen bei der Bodentemperatur im Winter und der Bodenfeuchtigkeit.

In (Brussig 1990) werden am Beispiel des Störgeschehens des Bezirkes Dresden die rohrleitungswerkstoffspezifischen Langzeiterfahrungen ausgewertet, gestützt mit Zahlen aus der Schadensstatistik. Gleichzeitig werden die Ursachen für die seit längerer Zeit steigende Störungshäufigkeit analysiert und die Möglichkeiten für Abhilfemaßnahmen diskutiert. In Dresden traten 1988 etwa 8.400 Schäden in einem Rohrleitungsnetz von etwa 9.500 km auf. Das ergibt eine Schadens-

rate von immerhin 0,88 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr. Besonders hoch sind die Störungen an Anschlußleitungen, welche u. a. zu 73 % aus Stahl und 23 % aus PE bestehen. Ihr Anteil am Rohrleitungsnetz beträgt nur 20 %, der Anteil an den Schäden aber 49 %. Insgesamt ist hier die Schadensrate in den letzten 10 Jahren von 1,16 auf 2,17 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr gestiegen. Bei der Betrachtung innerhalb verschiedener Versorgungsgebiete traten 1988 Unterschiede in der Schadensrate von 0,8–5,7, ja sogar bis zu 8 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr auf und die hohen Werte zum Teil in Versorgungsgebieten, in den vor allem Stahlrohrleitungen mit Bitumenschutz liegen, welche erst ein Alter von 10–20 Jahren aufweisen. In der Altbausubstanz, die teilweise auch bergbau- und kriegsgeschädigt ist und deren Rohrleitungen 60–120 Jahre alt sind, werden dagegen nur selten Schadensraten bis zu 1 Schaden pro Leitungskilometer und Jahr erreicht. Bei den Versorgungs-, Haupt- und Fernleitungen ist in dem gesamten Bezirk die Tendenz der Schadensrate nahezu linear steigend. Sie hat sich seit 1965 mehr als verdoppelt und lag 1988 bei 0,57 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr. Dabei sind bei diesen Rohrleitungen u. a. die Werkstoffe Grauguß (40 %), Stahl (39 %) Asbestzement (8,5 %) und PVC (7 %) zum Einsatz gekommen. In der Abb. 7.3-35 sind für das Jahr 1988 die einzelnen Schadensraten in Abhängigkeit des Werkstoffes dargestellt.

Interessant sind auch die Anmerkungen, daß aufgetretene Schäden immer unter Zeitdruck behoben werden. Besonders an Rohrleitungen aus Grauguß, Asbestzement und älterer Plaste, die nicht wie der Stahl zusätzlich eingetragene Spannungen durch Fließen abbauen können, treten teilweise schon nach wenigen Monaten unmittelbar neben der reparierten Schadstelle neue Schäden auf. Hierbei handelt es sich überwiegend um Risse oder Schalenbrüche, die auf Bodenbewegungen infolge ungenügender Bodenverdichtung und Unterstopfung zurückzuführen sind. Des weiteren sind bei Rohrleitungen aus Stahl mit Bitumenauskleidung immer neue Schäden vorprogrammiert, da bei Reparaturen fast immer der Korrosionsschutz im Rohrrinneren örtlich zerstört wird. Oft wird die eigentliche Schadensursache, der Stromaustritt vom Stahlrohr in das Erdreich, bei der Reparatur nicht beseitigt. Die Zeitspanne bis zum nächsten Schaden in unmittelbarer Nähe der reparierten Stelle beträgt in solchen Fällen nur Monate bis wenige Jahre. Die Beseitigung der Schadensursache selbst ist nur mit einem kathodischen Korrosionsschutz möglich.

Als Ursachen für das hohe Störgeschehen werden abschließend genannt:

- häufig falscher Werkstoffeinsatz,
- ungenügender Korrosionsschutz,
- Fehler bei Transport und Lagerung, der Montage, dem Korrosionsschutz auf der Baustelle und der Verlegung,
- fehlende, ungenügende oder zu kurzlebige kathodische Korrosionsschutzmaßnahmen,
- Erhöhung der Rohrleitungsbeanspruchung durch zunehmende Bodenaggressivität, Verkehrslasten und Schäden im Rohrnetz und deren Beseitigung sowie
- nicht ausreichend qualifiziertes Baustellenpersonal und Qualitätskontrolle durch den späteren Betreiber des Rohrleitungsnetzes.

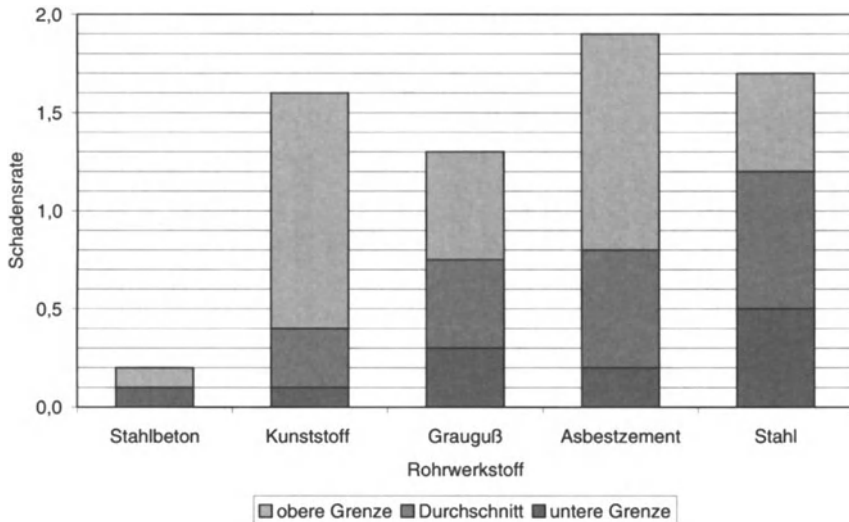


Abb. 7.3-35 Schadensraten pro Leitungskilometer und Jahr in Abhängigkeit verschiedener Rohrwerkstoffe

Zur Frage der Zuverlässigkeit im Rohrleitungsbau, dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung, werden in (Naber 1990) allgemeine Bemerkungen zur betriebssicheren Gestaltung, auch zum Zweck einer intensiven Überwachung und Wartung, diskutiert. Hierbei wird bemerkt, daß die Zuverlässigkeit im Rohrleitungsbau nicht nur vom gewählten Typ des Rohres und einer sorgfältigen Verlegung, sondern auch von der Gesamtkonzeption eines System abhängig ist. Dazu zählen insbesondere die Betriebseinrichtungen in einer Rohrleitung. Eine Unterteilung von Rohrsystemen mit Armaturen ist immer vorteilhaft und daher erforderlich, wobei diese Armaturen durchaus auch als selbsttätig ansprechende Rohrbruchsicherungen konzipiert werden können. Zum sicheren Betrieb einer Rohrleitung gehören auch die sorgfältige Überwachung und Wartung. Die Messung von Wasserströmen, Drücken, Wasserständen und deren Auswertung vermag die Zuverlässigkeit wesentlich zu erhöhen. Grundsatz muß aber sein, die notwendige Zuverlässigkeit der Rohrleitung in die Konstruktion zu legen und nicht etwa den Einrichtungen der Überwachung zuzuweisen. Immerhin müssen aber das Ansprechen der Sicherheitseinrichtungen, wie beispielsweise der Rohrbruchsicherungen, laufend kontrolliert werden, was hier in diesem Beispiel in einem vierteljährlichen Rhythmus geschieht. Gleiches gilt für Verschleißteile.

Umfangreiche Untersuchungen zu Quer- und Berstbrüchen wurden in (Kottmann u. Schmitt 1980; Kottmann 1984, 1990) ausführlich abgehandelt. Während hohe Biegemomente Querbrüche verursachen, führt ein hoher Innendruck zu Berstbrüchen. Mit Hilfe von statistisch nachgewiesener Erkenntnis über mehrere Jahre in Abhängigkeit von Jahreszeit und Bodentemperatur wurde bewiesen, daß sich Berstbrüche (Längsrisse und Schalenbrüche) überwiegend im Spätsommer, Querbrüche überwiegend im Winter ereignen (s. Abb. 7.3-36).

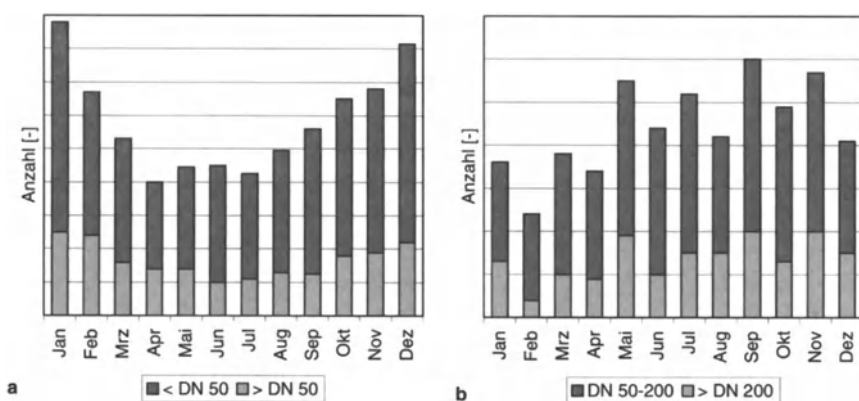


Abb. 7.3-36 Rohrbrüche an Leitungen aus Grauguß für einen Betrachtungszeitraum von 16 Jahren nach (Kottmann 1990)

a Querbrüche, **b** Berstbrüche

In (Hirner u. Poß 1992) werden die Ziele, Ergebnisse und Konsequenzen aus zehnjähriger Tätigkeit in der Erneuerung von Rohrnetzen diskutiert. Ausgangspunkt bildeten dazu die gestiegenen Wassertrübungen in Teilbereichen des Verteilungsnetzes in Nürnberg. Darauf aufbauend wird ein Konzept für die planmäßige Netzerneuerung vorgestellt, wobei im Mittel jährlich etwa 2 % der Netzlänge und 1,5 % der Hausanschlußleitungen erneuert wurden. Mit erreichtem Ziel – nahezu vollständige Beseitigung der Wassertrübungen – wird aus den vorliegenden Erfahrungen mit einer langfristig angelegten, vorbeugenden Instandhaltung ein Konzept für die Fortführung der Netzerneuerung aufgezeigt.

Als Hauptschwachpunkte in Wasserverteilungsnetzen werden genannt:

- metallische Leitungen ohne Zementmörtelauskleidung,
- metallische Leitungen ohne oder mit nicht ausreichendem Außenkorrosionsschutz sowie
- Armaturen älterer Bauart.

Dabei ergeben sich die örtlich unterschiedlichen, netzspezifischen Schwachstellen aus einer differenzierten Zustands- und Schadensanalyse. Daraus können Maßnahmen zur gezielten vorbeugenden Instandhaltung mit einer langfristig angelegten Erneuerung von Netzen abgeleitet werden, wobei die Schadens- und Reparaturnhäufigkeit, die einwandfreie Wasserbeschaffenheit, der erforderliche Wasserdruck, die begrenzte Höhe der Wasserverluste sowie äußere Einflüsse die einzelnen Kriterien darstellen. Im Ergebnis führt dies langfristig zu einer weiteren Reduzierung des Aufwandes für Inspektion, Wartung und Reparatur des Netzes, wobei in den nächsten 10 Jahren eine Schadensrate von etwa 0,15 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr angestrebt werden soll, um damit die Versorgungszuverlässigkeit des Netzes weiter zu verbessern.

Weitere Aspekte zur Instandsetzung und Erneuerung von Rohrleitungen werden in (Beyer 1995) aufgeführt. Hierin ging es darum, nach welchen technischen

und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine Instandsetzung oder eine Erneuerung vorzuziehen ist. Neben den bereits genannten Schadensursachen aufgrund von vorhandenen Rohrwerkstoffen sowie den Kriterien, die Schäden an Rohrleitungen beeinflussen, wird auch auf die Wirkung von Schäden eingegangen. Schäden, die mit Wasserverlusten verbunden sind, verursachen oft auch die größten Folgeschäden. Sie sind zurückzuführen auf Korrosion, auf Rohrbrüche, aber auch auf undichte Rohrverbindungen. Die zweite Schadensgruppe sind Druckmangelerscheinungen, die durch Inkrustationen mit der damit verbundenen Verkleinerung des Rohrquerschnitts ausgelöst werden können. Folge ist eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit des Wassers, wodurch Ablagerungen an den Wandungen abgelöst und aufgewirbelt werden können, die letztendlich bis zum Verbraucher gelangen, wo sie sich u. a. als Wassertrübungen bemerkbar machen. In diesem Beitrag werden die einzelnen Verfahren zur Reinigung, Sanierung und Erneuerung sowie deren Anwendung beschrieben.

In (Moser 1995) werden aufbauend auf (Hirner u. Poß 1992) neben dem Komplex – Erneuerung von Rohrnetzen – auch verschiedene Schadensraten der Wasserverteilung von Nürnberg genannt. Die Rohrnetzlänge des betrachteten Systems betrug 1.340 km. Insgesamt wurden 440 Schäden pro Jahr registriert, was eine Schadensrate von 0,33 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr ergibt. Allein Rohrleitungen aus Grauguß waren davon mit 52 Schäden pro Jahr bzw. 0,07 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr betroffen; etwa 90 % davon an Leitungen bis DN 150. Des weiteren wurden genannt:

- 8 Schäden pro Jahr durch Fremdeinwirkung,
- 32 Schäden pro Jahr an Leitungen/Verbindungen,
- 62 Schäden an Armaturen,
- 14 Schäden an Hydranten⁸ und
- 270 Schäden pro Jahr an Hausanschlußleitungen, was einer Schadensrate von 0,4 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr entspricht.

Bei den Armaturen sind insbesondere ältere, bis Mitte der 70er Jahre eingebaute Keilschieber betroffen, die bei Bewegung zu erhöhten Aufwendungen für Spülungen und Reinigung verschmutzter Hausfilter in der Umgebung führten. Die primären Schwachstellen in diesem Wasserversorgungssystem waren und sind, wie auch in anderen Systemen, die Hausanschlußleitungen. Deren Anteil liegt, gemessen an den 440 Gesamtschäden im Netz, über 60 %. Durchgeführte Untersuchungen an über 2.000 ausgewechselten Hausanschlußleitungen mit Verlegung vor 1960 (80 % vor 1945) ergaben Inkrustationen im Mittel bei 3,4 mm, Rostnarben von 1–3 mm Tiefe sowie pro Leitung im Mittel 3 durchgehende Löcher je m², d. h. ein durchgehendes Loch je 3 m Länge.

Im Ergebnis zur Problematik der Rehabilitation werden folgende Punkte zusammenfassend genannt:

1. Grundlage für eine gezielte Rehabilitation bildet die genaue Zustands- und Schwachstellenanalyse des betrachteten Systems.

⁸ Bei Hydranten wird der Schaden auch durch nicht mehr ausreichende Entleerungszeiten definiert.

2. Priorität für die Rehabilitation haben die Versorgungssicherheit nach Qualität und Quantität sowie die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.
3. Die Kosten der Rehabilitation lassen sich ganz oder teilweise aus rückläufigen Instandhaltungskosten erwirtschaften. Voraussetzung dazu ist ein langfristig angelegtes Konzept mit Vorgabe von Zielwerten, eine planmäßige Durchführung sowie die laufende Kontrolle der erreichten Ergebnisse.
4. Der Umfang der Rehabilitation richtet sich in erster Linie nach dem Zustand des Rohrnetzes und den Versorgungszielen und nicht alleinig nach dem Rohrnetzalter.
5. Die Rehabilitationsrate in über 100 Jahren gewachsenen Rohrnetzen sollte nicht unter 1,5 % des Anlagenbestandes liegen, wobei diese nach erfolgter Modernisierung wieder reduziert werden kann.

Weitere Ausführungen zur Planung der Rehabilitation von Rohrnetzen werden in (Mayr 1996) gemacht. Dabei werden, ausgehend von einer Netzanalyse (Schadensstatistik, Netzdokumentation, Schadensrate), die Systematik der Instandhaltung dargelegt und die Einflüsse auf ein Rohrnetz diskutiert. Unter Berücksichtigung der spezifischen örtlichen Erfahrungen (Nutzungsdauer, durchschnittlicher Netzzustand) werden Bewertungslisten und Kriterienkataloge zur schrittweisen Erarbeitung von Aktions- und Jahresplänen angeboten und anhand von praktischen Beispielen erläutert. Des weiteren werden Voraussetzungen für die sinnvolle Anwendung von Zementmörtelauskleidung und grabenlose Verfahren sowie Hinweise auf die Kosten von Rehabilitationsmaßnahmen gegeben.

In diesem Rahmen werden ebenso verschiedene Schadensraten diskutiert. Dabei wird angemerkt, daß es keine generelle Festlegung einer zulässigen Schadensrate gibt. Eine internationale Übersicht von 1988 zur Schadensrate großer europäischer Städte zeigte Werte zwischen 0,09 und 0,92 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr auf. Viele große Wasserversorgungsunternehmen streben Schadensraten unter 0,1 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr an (s. Abb. 7.3-37). Eine Anfrage des DVGW von 1994 ergab bei größeren Wasserversorgungsunternehmen Schadensraten von 0,1–0,3. Ein sicherer Anlaß hinsichtlich der Entscheidung von Rehabilitationsmaßnahmen ist eine Schadensrate von 0,5 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr.

In (Lenz 1997) sind verschiedene Beiträge zu Auswirkungen von Betriebserfahrungen auf die Planung und den Bau von Rohrleitungen zusammengestellt. Speziell werden 30 Jahre Betriebserfahrungen mit duktilen Gußrohren anhand ihres Schadenverhaltens diskutiert. Hohe Beanspruchungen, hervorgerufen durch Bergsenkungen und aggressive Böden, treten im besonderen Maße im Ruhrgebiet auf, in dem wesentliche Bereiche des Gelsenwasser-Versorgungsgebietes liegen. In diesen Bereichen werden die Ortsnetze mit Betriebsdrücken bis zu 16 bar gefahren. Als Ergebnis dieser Einwirkungen liegt die mittlere Schadensrate bei Gelsenwasser bei etwa 0,16 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr, wobei die häufigste Schadensursache die Korrosion ist bzw. in Bergbaustädten bergbauliche Einwirkungen sind. Dabei wird darauf aufmerksam gemacht, daß eine Auswertung der Schadenshäufigkeit nach dem jeweiligen Rohrwerkstoffen ein „schiefes“ Bild ergibt, da Rohrleitungen und Werkstoffe mit unterschiedlichem Einbaualter verglichen werden (s. Abb. 7.3-38). Trotzdem fällt auf, daß duktile Gußrohre die

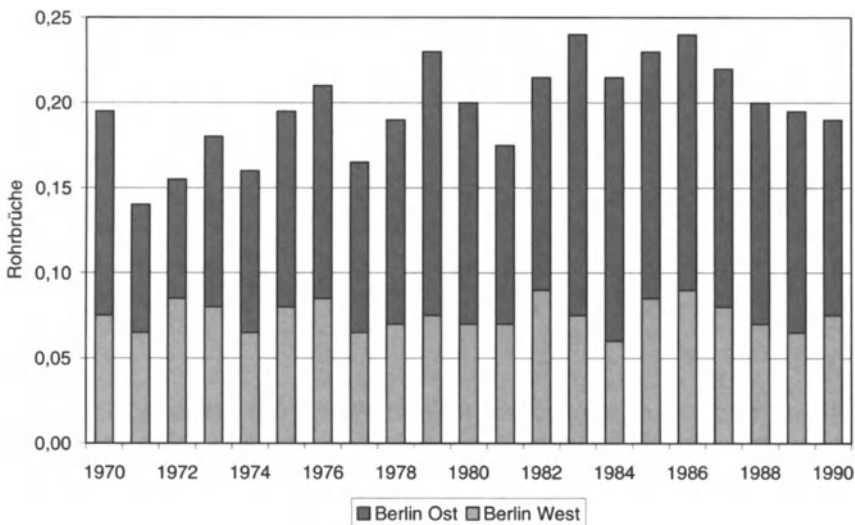


Abb. 7.3-37 Entwicklung der Rohrbruchrate (Schadensrate) pro Leitungskilometer und Jahr nach (Mayr 1996)

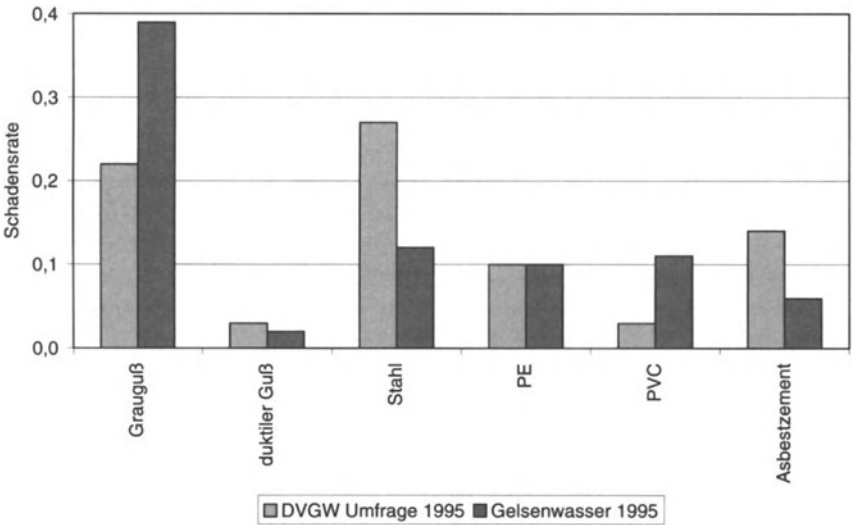


Abb. 7.3-38 Schadensrate pro Leitungskilometer und Jahr in Abhängigkeit vom Rohrwerkstoff

geringste Schadensrate aufweisen. Rohre aus Grauguß sind deutlich älter, während dagegen das mittlere Alter von Rohren aus PVC und PE jedoch im Bereich der duktilen Gußrohre liegt. Daß Rohre aus duktilem Gußeisen eine wesentlich gerin-

gere Schadensrate gegenüber Graugußrohren aufweisen, liegt ursächlich nicht nur in den besseren mechanischen Eigenschaften, sondern auch im besseren Korrosionsschutz begründet. Der Korrosionsanteil von über 60 % bei 30 Jahre alten Graugußrohren (Schadensrate 0,123 Schäden je Leitungskilometer und Jahr) zeigt deutlich, daß auch dieser Rohrwerkstoff korrosionsanfällig ist. Obwohl die Korrosionsschäden an umhüllten duktilen Gußrohren immer noch 45 % ausmachen (Schadensrate 0,009 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr), beschränken diese sich jedoch auf fehlerhafte Nachisolierung der Rohrverbindungen bzw. auf unentdeckte Beschädigungen bei Tiefbauarbeiten.

Im Wasserversorgungssystem Berlin wird die derzeitige Schadenshäufigkeit im Schnitt mit 3,1 Schäden pro Tag⁹ angegeben. Bei einer Rohrnetzlänge von 7.705 km ergibt dies eine Schadensrate von 0,15 Schäden pro Leitungskilometer und Jahr.

Konkrete Berechnungen zur Zuverlässigkeit von Wasserversorgungssystemen mit dem hier vorgestellten Algorithmus werden derzeit durchgeführt, wobei auch hier, wie bereits bei den Fernwärmeversorgungssystemen diskutiert, die Probleme in der Qualität der Datenbereitstellung bestehen. Gesicherte Ergebnisse liegen daher nur vereinzelt vor (Abb. 7.3-39) und können deshalb weder verallgemeinert, noch zum Vergleich mit Systemen anderer Wasserversorgungsunternehmen herangezogen werden. Prinzipiell kann aber angemerkt werden, daß die Vorgehensweise und Diskussion der verschiedenen Einflußfaktoren analog zu Fernwärmeversorgungssystemen ist.

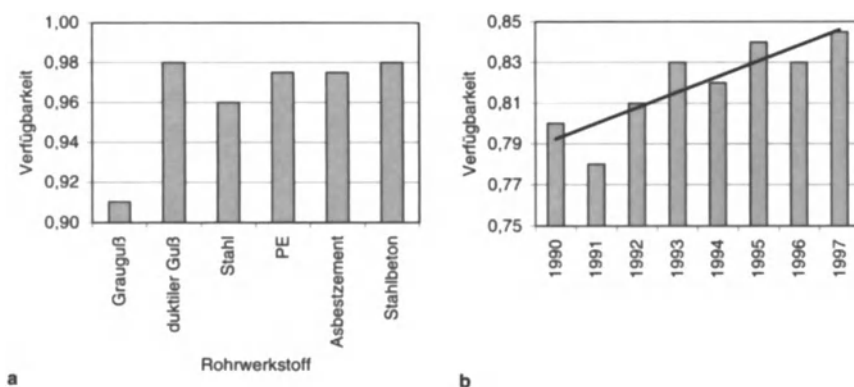


Abb. 7.3-39 Verfügbarkeit eines Wasserversorgungssystems in Abhängigkeit
a vom Rohrwerkstoff, **b** von der Zeit

⁹ Aus Zeitschrift für kommunale Wirtschaft (Februar 1999) anlässlich eines Schadens einer Rohrleitung DN 800 aus Grauguß, Baujahr 1960, am 14.01.1999.

8 Schwachstellenanalyse

8.1

Inhalt und Definition

Die Schwachstellenforschung ist eng gekoppelt an die Schadensforschung. Diese versteht sich dabei in erster Linie als die Disziplin zur Untersuchung und Erforschung von Schäden, Analyse von Schadensabläufen und Erarbeitung von Maßnahmen zur Vermeidung solcher Schäden. Laut (Mexis u. Hennig 1994) besitzt die Schadensforschung zwei wichtige Charakteristika, einerseits den eigentlichen Bauteilschaden, der durch innere oder äußere Einwirkungen entstanden ist, andererseits die zeitliche Endgültigkeit des Schadensereignisses. Bei einem Schaden handelt es sich um ein bereits vorliegendes Ereignis, wobei die Folgen jedoch noch andauern können. Diesbezüglich weist der Schaden zwei weitere Untercharakteristika auf, erstens den Schadenszeitpunkt und zweitens die zeitliche Unwiederholbarkeit. Letzteres klingt logisch, da der gleiche Schaden erst dann wieder auftreten kann, wenn der bereits aufgetretene Schaden behoben ist und wenn die Ursachen, die zu dem ersten Schaden geführt haben, nicht behoben wurden.

Die Schadensforschung behandelt somit schon aufgetretene Schäden, die die Schwachstellenforschung analysiert dagegen mögliche sowie lokalisierte Schwachstellen. Das wiederum heißt, daß die Schwachstellenforschung zeitlich und untersuchungsbezogen der Schadensforschung vorgelagert ist. Zwischen der Schadensforschung und der Schwachstellenforschung lassen sich folgende Unterschiede und Gemeinsamkeiten herausstellen:

- *Betrachtungseinheit*: Die Schwachstellenforschung untersucht nicht nur Bauteil-Schwachstellen, sondern auch veränderte Zustände, die sich als Schwachstelle auswirken. Dazu zählen u. a. veränderte Funktionszustände sowie darüber hinaus Veränderungen von Bauteilen, wie beispielsweise die Veränderung der Lagerung einer freiverlegten Leitung oder die durch eine Parallelaufgrabung verursachte Verschiebung einer erdverlegten Rohrleitung.
- *Zeitfaktor*: Der Zeitfaktor einer Schwachstelle ist meist nicht immer objektiv, sondern oft subjektiv, d. h. er muß zusammen mit einem zeitlichen Fortschrittsstadium definiert werden.
- *Wiederholbarkeit*: Im Gegensatz zum Schaden kann eine Schwachstelle sich als Ereignis zeitlich wiederholen. Beispielsweise kann es sich bei Unterstützungskonstruktionen einer freiverlegten Leitung um eine Schwachstelle hinsichtlich der technischen Ausführung handeln, welche an jeder Lagerstelle zeitlich verschieden einzeln zum Schaden führen kann, aber nicht unbedingt

muß. Das gleiche kann auch z. B. auf spezifische Elemente des Systems, wie erdverlegte Armaturen einer bestimmten Baureihe zutreffen.

- *Ursachendifferenz*: Die Schwachstellenursache muß nicht unbedingt die Schadensursache sein. Beispielsweise kann der Ausfall einer Klappe infolge eines Verklemmens der Klappenscheibe (Schadenstelle) und somit Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit bei Schalthandlungen durch Verschmutzung des Mediums (Schwachstellenursache) verursacht worden sein. Gleiches trifft bei Deformation eines zwangsgeführten Gleitlagers, Zerstörung der Feder einer Federstütze oder Zerstörung eines Widerlagers zu, wobei hier die konstruktiv ungünstige Ausführung die eigentliche Schwachstellenursache darstellen kann.
- *Ortsdifferenz zwischen Ursache und Ergebnis*: Der Ort der Schwachstellenursache muß nicht identisch mit dem Erscheinungsort der Schwachstelle sein, während die Schadensursache am Schadensort liegen wird. Die Verschmutzung in Wasserversorgungssystemen kann an einem anderen Ort der zuvor durchströmten Rohrleitung verursacht worden sein, z. B. durch Wiederinbetriebnahme eines Rohrleitungsabschnittes oder durch Inbetriebnahme einer neu verlegten Rohrleitung. Bei Fernwärmesystemen kann der Ausfall der Filteranlage die Ursache der steigenden Verschmutzung sein. Da es sich im allgemeinen bei solchen Systemen um Kreislaufsysteme handelt, kann der Ort der Verschmutzung auch nach dem Schadensort liegen.
- *Differenzierung zwischen Schadensteil und schwachen Teil*: Während es sich bei dem betroffenen Bauteil um das Schadensteil handelt, ist das als Schwachstelle auftretende Bauteil nicht unbedingt oder überhaupt das schwache Teil. So ist der Motor infolge eines Bruches des Scherstiftes zwischen Motor und Armatur das Schadensteil, während beim Auftreten des Motors als Schwachstelle in Verbindung mit der Armatur nur das Klemmen der Klappenscheibe bzw. des Schieberkeiles das eigentliche schwache Teil darstellt.
- *Vorbeugungscharakter*: Der vielleicht wichtigste Unterschied zwischen Schadensforschung und Schwachstellenforschung liegt darin, daß die Schwachstellenforschung Methoden entwickelt hat, die sowohl Ereignisse (Schwachstellen) als auch Schwachstellenursachen analysiert und das, bevor diese eine Störung bzw. Ausfall verursachen. Damit hat die Schwachstellenforschung gegenüber der Schadensforschung einen vorbeugenden Charakter.

Aus diesen aufgezeigten Unterschieden geht eindeutig hervor, daß die Schwachstellenforschung Gebiete bearbeitet, die die Schadensforschung nur tangieren. Zu den Gemeinsamkeiten zählen u. a. die Betrachtungen der Schäden, der Schadensarten, der Schadensursachen, der Schadensmechanismen sowie der werkstofflichen Betrachtungen.

Im weiteren einige Bemerkungen zum Begriff Schwachstelle. Für die Schwachstelle gibt es verschiedenartigste Definitionen. Bis heute wird versucht, diesen Begriff nach spezifischen Gesichtspunkten der eigenen Betrachtungsweise zu definieren, was durchaus nicht falsch ist, aber eben nur für ein spezifisches Betrachtungsfeld Gültigkeit besitzt. Dies führt logischerweise dazu, daß die Schwachstelle für Gebiete, wie beispielsweise Instandhaltung, Konstruktion und Projektierung, Verfahrenstechnik usw. verschieden interpretiert wird. Die Definition der Schwachstelle sollte laut (Mexis u. Hennig 1994) anhand von Parametern

erfolgen, die objektiv sind und z. B. physikalischen, chemischen, werkstofflichen Prinzipien folgen. Somit lassen sich drei wichtige Grundsätze der Schwachstellenforschung aufstellen, wie

- Nichtidentität: Eine Schadenstelle ist eine Schwachstelle, eine Schwachstelle ist nicht unbedingt eine Schadenstelle.
- Zeitdifferenz: Eine Schadenstelle ist ein zeitlich fixiertes Endergebnis, eine Schwachstelle kann ein zeitlich wiederholbares Ereignis sein, solange diese nicht zur Schadenstelle geworden ist.
- Ortsdifferenz: Eine Schadenstelle ist der Ort der werkstofflichen Schadensursachen, eine Schwachstelle ist nicht unbedingt der Ort der Schwachstellenursachen (Ursachenort und Ereignisort sind nicht identisch).

Solange diese drei Grundsätze nicht verletzt werden, kann die bisher verwendete Definition durchaus Gültigkeit besitzen. Selbst bei einer Verletzung wäre es unsinnig, bereits existierende Begriffe deswegen neu zu definieren. Oftmals wird der Begriff Schwachstelle auch für Bezeichnungen verwendet, die gar keine Schwachstellen sind. Ziel sollte aber immer eine einheitlich interpretierbare und in sich geschlossene sowie logische Definition sein.

In bezug auf die Instandhaltungsnorm DIN 31051 ist die *Schwachstelle* definiert als die durch die Nutzung bedingte Ausfallstelle oder ausfallverdächtige Stelle, die mit technisch möglichen und wirtschaftlich vertretbaren Mitteln so verändert werden kann, daß sich die Ausfallhäufigkeit und die Abnutzung verringern. Diese Definition ist rein aus instandhaltungstechnischen Gesichtspunkten entstanden und kann somit logischerweise nicht allumfassend für alle Fachgebiete gelten. Beispielsweise wird aus Instandhaltungssicht die Möglichkeit einer Korrektur der Schwachstelle zugelassen, d. h. es wird dann eine Schwachstelle behoben, wenn dies mit vertretbaren Mitteln möglich ist bzw. sinnvoll erscheint. Schon die Tatsache, daß diese Vertretbarkeit bei den betrachteten Systemen von sehr verschiedenen Faktoren, wie Baujahr, Auslastungsgrad, Zustand, Verlegeverfahren, Kosten usw. abhängt, zeigt die Abgrenzung der Definition. Aus Sicht der Schwachstellenforschung ist es aber notwendig, sich auch mit solchen Schwachstellen zu befassen, die nicht behoben werden können. Ansonsten entsteht das in (Mexis u. Hennig 1994) formulierte Paradoxon, daß nur eine bestimmte Anzahl von Schwachstellen untersucht wird, nämlich die, die mit vertretbaren Mitteln behoben werden können, diese analysiert und wahrscheinlich beim nächsten Fall vermeidet und eine Anzahl von Schwachstellen nicht berücksichtigt und näher analysiert und deswegen im nächsten Fall wieder einbaut, weil diese im ersten Fall als mit wirtschaftlich vertretbaren Mitteln nicht behebbare waren. Dies führt unweigerlich dazu, daß Schwachstellenkategorien nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten entstehen, was durchaus richtig ist, nicht aber auch nach anderen Gesichtspunkten, was zusätzlich notwendig ist.

Eine diesbezüglich verallgemeinerte Definition wird in (Mexis u. Hennig 1994) genannt. Dabei wird die *Schwachstelle* definiert als der kausale Ereignisort der Ursachenauswirkung in technischen Konstruktionen. Mit dieser Definition können sämtliche Schwachstellen erfaßt werden, wobei der Sinn dieser Definition nicht sofort erkennbar ist. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, den Begriff der

Schwachstelle für die Instandhaltung zu reservieren und den Begriff des sogenannten Schwachpunktes oder Funktionsmangels für alle funktionalen und sonstigen Problemen, wie sie bei Produktions- und Fertigungslinien zu beobachten sind. Demnach ist ein *Schwachpunkt* die Stelle der Auswirkung von Ursachen funktionaler Art.

Die Schwachstellenanalyse wird inhaltlich unterschiedlich verstanden. Einerseits wird sie als die Vorgehensweise zur Analyse von Fehlern und Mängeln eines Elementes oder Systems verstanden, andererseits als eine Methode zur Auffindung von Schwachstellen innerhalb eines Systems. Es gibt verschiedene Arten der Schwachstellenanalyse, die teils sinnvoll, teils aber nur eine sprachliche Erweiterung darstellen. Dazu zählen

- die technische Schwachstellenanalyse – diese umfaßt die Ursachenanalyse hinsichtlich Eigenschaften, Verhalten, Größen (von z. B. Funktion, Konstruktion, Werkstoffen, Verlegung) und Betrieb der verschiedenen technischen Konstruktionen,
- die instandhaltungstechnische Schwachstellenanalyse – diese umfaßt die Analyse der Veränderungs- und Zustandsvorgänge,
- die organisatorische Schwachstellenanalyse – diese umfaßt die Analyse aller jener betriebstechnischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Faktoren, die einerseits mit der technischen Konstruktion und Verlegung zusammenhängen, andererseits maßgebend zum Betrieb und zur Funktion des Elementes bzw. Systems beitragen.

In der Literatur sind weitere Bezeichnungen, wie beispielsweise technologische, konstruktive, funktionale Schwachstellenanalysen zu finden, die aber im eigentlichen Sinne alle den gleichen Bezug haben.

Im allgemeinen kann die *Schwachstellenanalyse* somit definiert werden als die Vorgehensweise zur Analyse von Ursachen, zur Klärung ihrer Einwirkungsweise und zur Ermittlung ihrer Auswirkungen an technischen Konstruktionen. Für technische Konstruktionen stehen Elemente eines Systems, aber auch einzelne Bauteile sowie das System selbst.

Eine Schwachstelle wird sich irgendwann bemerkbar machen. Dieser Zeitpunkt hängt von den inneren und äußeren Einflußfaktoren ab. Der Schwachstellenausbruch wird demnach durch ein unplanmäßiges Ereignis eingeleitet. Dies kann sich verschiedenartig äußern, wie beispielsweise

- optisch in Form einer Undichtheit (undichte Armatur oder Rohrverbindungen) oder Verformung (verschobenes Gleitlager vom Auflager),
- akustisch in Form von Geräuschen (undichte Armatur, Rohrbruch, Lagerschaden einer Pumpe),
- meßbar in Form eines Temperatur- oder Druckabfalls (Pumpenausfall) oder
- mechanisch in Form eines Leistungsabfalles (Blockierung einer Armatur).

Im Gegensatz zu anderen Betrachtungsweisen von in sich geschlossenen Systemen läßt sich der Zeitpunkt für einen Schwachstellenausbruch nur schwer bzw. gar nicht bestimmen. Dies kommt daher zustande, daß bei Rohrleitungssystemen, insbesondere erdverlegten, kaum physikalisch meßbare Größen zu Hilfe gezogen

werden können, die den Zeitpunkt des Schwachstellenausbruches irgendeines Elementes innerhalb des Systems vorher bestimmen lassen. Dies ist beispielsweise bei Pumpen oder sich drehenden Aggregaten einfacher, denn da können meßbare Größen, wie Temperatur oder Schwingungen verwendet werden. Weitere Ausführungen sind dazu in (Mexis u. Hennig 1994) zu finden.

Die Arten von Schwachstellen werden in der Literatur und Praxis unterschiedlich eingeteilt und bezeichnet, wobei stets Verwechslungen zwischen Art, Ort und Ursache einer Schwachstelle anzutreffen sind. Anhand des Beispiels – Rohrleitung ist undicht – soll dies diskutiert werden. Zunächst ist nicht die Rohrleitung undicht, sondern nur eine Stelle, z. B. eine Stelle mit einem Riß in der Rohrleitung selbst, eine Rohrverbindung oder eine Schweißnaht. Des weiteren ist die Undichtigkeit nicht die Ursache für die Schwachstelle, sondern die Auswirkung. Die Ursachen können Korrosion, Material-, Montage- oder Verlegefehler sein.

Für die eindeutige Einteilung und spezielle Differenzierung nach der Schwachstellenursache werden somit ausreichende Kenntnisse über die technischen Zusammenhänge benötigt. Im folgenden werden einige Einteilungskriterien nach besonderen Gesichtspunkten andiskutiert.

Während der Herstellung und Verlegung von Rohrleitungen können Fehler vorkommen, die sich irgendwann auswirken und eine Schwachstelle verursachen. Schwachstellen, die unabhängig vom Betrieb sowie dessen Belastungen erscheinen, werden als *selbstausbrechende Schwachstellen* bezeichnet. Sie verursachen unplanmäßige Ereignisse, ohne den Zeitpunkt des Ausbruches zu kennen. Zu diesen Schwachstellen zählen bei Rohrleitungssystemen in erster Linie Material-, Montage- aber auch Verlegefehler.

Verschiedene Schwachstellen haben Fehler, die aber allein nicht ausreichen, um ein unplanmäßiges Ereignis zu erzeugen. Solche Schwachstellen kommen dann zum Ausbruch, wenn sich die Fehlerkette durch dieses unplanmäßige Ereignis schließt. Die Beeinflussungen, die dieses Ereignis verursachen, können dabei verschiedenartig sein, wie z. B. Betriebs- oder Instandhaltungsfehler. Dazu zählen aber auch Überbelastungen des Systems sowie äußere Beeinflussungen. Diese Art wird als *aktivierungsbedürftige Schwachstelle* bezeichnet, weil sie ansonsten nicht auftreten, d. h. sie müssen erst durch einen oder mehrere Faktoren von außen aktiviert werden. Dazu ein Beispiel. Bei der Verlegung eines Rohrleitungssystems aus Kunststoffmantelrohr im Grundwasserbereich wurden eine hohe Anzahl von Muffen bei der Verfüllung beschädigt und zwar so, daß jederzeit Feuchtigkeit eindringen konnte. Diese Schwachstellen kamen erst dann zum Vorschein, nachdem der abgesenkte Grundwasserspiegel wieder den normalen Stand erreicht hatte.

Prinzipiell erfährt eine technische Konstruktion im Betrieb oft Veränderungen, Ergänzungen, Instandhaltungseinflüsse, wie Austausch oder Instandsetzung von Bauteilen. Bei solchen Tätigkeiten können Fehler vorgenommen werden, die erst aus dem Bauteil oder dem Element eine Schwachstelle hervorbringen. Das wiederum heißt, daß diese Schwachstellen nicht herstellungsbedingt sind, sondern erst in der Betriebsphase eingebaut werden, es handelt sich also hier um *erzeugbare Schwachstellen*. Als allgemeine Beispiele seien u. a. Instandhaltungs-, Montage- oder Materialauswahlfehler oder speziell die falsche Auswahl bei Lagertausch genannt.

Zu den Einteilungskriterien gehören im weiteren *instandhaltungstechnische Schwachstellen*. Dies ist darin begründet, daß Bauteile und Elemente einen definierten Abnutzungsvorrat besitzen, wobei dieser an sich nicht die Schwachstellenursache darstellt. Es wird oftmals die Frage aufgeworfen, ob der vorgesehene Abnutzungsvorrat ausreichend ist, richtig bemessen und vorgesehen oder zweckentsprechend gewählt wurde. Als Beispiel möge hier insbesondere die richtige Materialauswahl bei der Sanierung und Erneuerung von Rohrleitungen gelten.

Verschiedene Bauteile und Elemente können einzelne oder kombinierte Fehler aufweisen, die jedoch nicht zum Ausbruch kommen, weil der auslösende Faktor fehlt. Als Beispiel kann ein zu schwach dimensioniertes Schutzrohr für eine Durchörterung unter Vorgabe einer Oberflächenbelastung, welche aber nicht erreicht wird, genannt werden. Weiterhin können Schwachstellen vorhanden sein, die nicht bemerkt werden, weil diese nicht als solche betrachtet werden, wie beispielsweise überdimensionierte Elemente aus unzuweckmäßigen Werkstoffen. Oft wird die Tatsache, daß viele Konstruktionen überdimensioniert werden und somit mehr Kosten verursachen, nicht als Schwachstelle betrachtet, weil die Überdimensionierung entweder als solche nicht erkannt oder aber nicht nachgewiesen werden kann. Solche Schwachstellen, die nicht direkt auftreten, aber indirekt nachweisbar sind, werden als indirekte Schwachstelle bezeichnet.

Grundsätzlich werden technische Konstruktionen nach bestimmten Sicherheitskriterien ausgelegt und gefertigt. Dies gilt auch für Rohrleitungssysteme und insbesondere deren Elemente. Die Auslegung basiert auf den vorgegebenen Berechnungsparametern. Es ist schon entscheidend, ob bei einem Heizwassersystem die Berechnungstemperatur auf 150 °C festgelegt wird, aber im Betrieb technisch nur maximal 80 °C erreicht werden können. Dies gilt insbesondere für Armaturen oder Kompensatoren. Gleiches gilt auch bei der Festlegung der Nennleistung, weil diese einen wesentlichen Einfluß auf die zu wählenden Abmessungen hat. Bei falscher Festlegung der Nennleistung kann dadurch später eine Schwachstelle entstehen, wenn die geforderte Leistung überschritten wird. In besonders ungünstigen Fällen können sogar mehrere Schwachstellen auftreten. Dies gilt um so mehr, je länger die überhöhte Leistung gefahren wird. Alle diese Schwachstellen werden auch als *leistungskompensierbare Schwachstellen* bezeichnet. Des weiteren sind solche Schwachstellen schlecht eingrenzbar. Wird das betrachtete Element oder System nur unter Teillast betrieben, so können diese nicht auftreten, werden also auch nicht vorbeugend erkannt. Arbeitet dagegen das Element oder System unter Vollast, aber für eine Zeitdauer, die kleiner ist als die zum Ausbruch der Schwachstelle notwendige Zeitdauer, so wird die Schwachstelle nicht entdeckt, obwohl sie noch vorhanden ist.

Schwachstellen können kausalitätsmäßig nur dann vorkommen, wenn mindestens eine Ursache vorliegt und zwar unabhängig davon, ob diese Ursache durch einen Fehler oder äußeren Einflußfaktor hervorgerufen wurde. Wichtig ist hier die Feststellung, daß eine Schwachstelle die Existenz einer Schwachstellenursache bedingt. Diese Ursachen können entsprechend unterteilt werden. Allerdings sind dabei die folgenden wichtigen Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

Grundsätzlich können viele Schwachstellen mehrere Ursachen haben. Hier erscheint es als wichtig, eine Unterscheidung hinsichtlich primärer und sekundärer

Ursachen vorzunehmen, gleichwohl es in vielen Fällen schwierig sein wird, die genaue Zuordnung dafür zu finden. Hier spielt auch die Schadensanalyse eine bedeutende Rolle. Dann gibt es Schwachstellen, die gleichzeitig sowohl durch Fehler im Bauteil als auch durch Einflußfaktoren verursacht werden. Auch hier wird zu unterscheiden sein, welche Ursache primär war. Schwachstellen, die einen sogenannten Doppelzustand aufweisen, bilden in den hier betrachteten Systemen eher eine Ausnahme. In solchen Fällen wird ebenfalls zu entscheiden sein, welche Ursache die maßgebende ist, die Ursache, welche die Schwachstelle hervorbringt oder die Ursache, welche aus der Schwachstelle einen Schaden erzeugt.

Demnach ergibt sich, daß eine Einteilung der Schwachstellen nach Schwachstellenursachen möglich ist, wenn wichtige Kriterien berücksichtigt werden. Dabei sollte zwischen konstruktiven, werkstofflichen, fertigungstechnischen, technischen, technologischen, verfahrens- und prozeßtechnischen und organisatorischen Ursachen unterschieden werden.

Als technisch-technologische Schwachstellenursachen werden Ursachen angesehen, die im engen Zusammenhang mit Begriffen wie z. B. Leistung, Verfügbarkeit, Betriebs- und Ausfallverhalten stehen. Diese Schwachstellenursachen können durchaus konstruktiver, fertigungstechnischer oder werkstofflicher Art sein und sind zusätzlich technisch-technologisch begründet. Während technische Ursachen im wesentlichen von den Anforderungen an die technische Konstruktion abhängen, können verschiedene technologische Ursachen nicht vermieden werden, weil der Stand der Technologie keine optimale Lösung ermöglicht.

Die Einflußfaktoren auf die technischen Schwachstellenursachen können verschiedenartig sein. Für die Herstellung und Verlegung einer Rohrleitung gibt es zunächst Anforderungen, die sowohl vom Hersteller als auch vom Betreiber bzw. von dessen Planer aufgestellt werden. Diese können in erheblichem Maße u. a. die Leistung, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit entscheidend bestimmen. Als Beispiel sei hier vor allem Forderungen nach Wirtschaftlichkeit und nach hoher Leistung näher betrachtet. Die Wirtschaftlichkeitsforderung kann dazu führen, daß beispielsweise vereinfachte und nicht optimierte Lösungen, minderwertige Werkstoffe, falsche Auswahl von Elementen, unvollständige Qualitätskontrolle insbesondere bei der Realisierung, unzureichende Serviceleistungen usw. angewandt bzw. angeboten werden. Dies kann dazu führen, daß zwar dieses Kriterium erfüllt wird, aber das Element oder System auf die Dauer letztendlich nur eine niedrige Verfügbarkeit aufweist. Vor allem die Begriffe Wirtschaftlichkeit und Leistung werden als gegensinnige Faktoren nicht optimal berücksichtigt. Im weiteren werden die beiden Begriffe störungsfrei und ausfallfrei betrachtet. Während die Forderung nach einem ausfallfreien Element kleine Störungen ohne Ausfall zuläßt, läßt die Forderung nach einem störungsfreien Element nicht einmal kleine Störungen zu. Hinsichtlich der zu gewährleistenden Versorgungszuverlässigkeit in den hier betrachteten Versorgungssystemen sind störungsfreie Elemente eine unverzichtbare Voraussetzung.

Die Einflußfaktoren auf die technologischen Schwachstellenursachen können ebenfalls verschiedenartig sein. Dies liegt in der Unvollkommenheit der angewendeten Technologie begründet und wird dort sichtbar, wo neue Entwicklungen entstehen. Ungenaue Berechnungsverfahren, neue und noch nicht voll beherrsch-

bare Herstellungs- und Verlegeverfahren, neuartige Werkstoffe, neue Elemente oder einzelne Bauteile (beispielsweise Abdichtsystem bei Armaturen) sind einige der Faktoren, die zu technologischen Schwachstellenursachen führen können. Diese Ursachen können aber nicht verhindert werden und dienen vor allem dazu, das Verhalten dieser Schwachstellen zu analysieren, um Erkenntnisse für weitere Entwicklungen zu ziehen. Hier spielt auch die Instandhaltungstechnische Schwachstellenanalyse eine bedeutende Rolle. Leider muß aber auch bemerkt werden, daß die Informationen von bekannten Schwachstellen des öfteren durch die Hersteller ignoriert werden. Als Beispiel sei dazu die Schwachstelle an eingeschweißten Klappen mittleren und großen Durchmessers zur nachträglichen Kontrolle des Zustandes vom Abdichtsystem genannt.

Auf die organisatorischen Schwachstellenursachen, die während des Betriebes hervorgerufen werden sowie auf die verfahrens- und prozeßtechnischen Schwachstellenursachen soll hier in diesem Rahmen nicht weiter eingegangen werden.

Wie bereits schon erwähnt, können Schwachstellen nur existieren, wenn Schwachstellenursachen vorhanden sind. Diese Feststellung hat eine besondere Bedeutung, welche im Unterschied der Erfassungsmöglichkeit liegt. Schwachstellen zeigen sich durch unplanmäßige Ereignisse, sind also z. B. sichtbar, hörbar bzw. meßbar. Bei Ursachen trifft dies nicht mehr zu und erfordert somit andere Methoden und Verfahren zu ihrer Feststellung. Bei diesen Methoden kommt es vorwiegend darauf an, Merkmale der Ursachen zu erkennen, um sie so besser zu lokalisieren. Das wiederum heißt, daß Ursachen ohne Merkmale im technischen Sinne nicht möglich sind. Somit gilt es, die Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen einer Ursache und ihrer Ausbruchsart herauszufinden. Werden diese Merkmale gefunden, so ist es möglich, Schwachstellen zu entdecken, bevor diese ein unplanmäßiges Ereignis verursachen.

Bei der Analyse von unplanmäßigen Ereignissen wird festzustellen sein, daß diese unterschiedliche Merkmale aufweisen, sei es hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens, der Zeitdauer, der Folgen usw. Es läßt sich eindeutig belegen, daß oftmals unplanmäßige Ereignisse und Ursachen verschiedene Orte aufweisen. Eine Schwachstellenanalyse wird hier die Aufgabe haben, Zusammenhänge zu ergründen und Abläufe zu rekonstruieren.

Von der Schwachstellenforschung ist der Begriff der Schadenskette bekannt. Prinzipiell bilden Schadensursachen verschiedener Art Zusammenhänge, die in ihren Endauswirkungen einen Schaden erzeugen. Dieser Schaden kann auch die Ursache für einen Folgeschaden sein und somit der Auslöser für eine neue Schadenskette. Laut Aussage von (Mexis u. Hennig 1994) müssen nach der Schadensforschung auch die Art und Strukturen der Schwachstellenketten betrachtet werden. Dies liegt u. a. darin begründet, daß in vielen Fällen keine Unterschiede zwischen Schwachstellen- und Schadensketten bestehen.

Schwachstellen werden verschiedenen Kriterien zugeordnet. Grundsätzlich sind sowohl häufig auftretende, als auch langfristig wirkende sowie folgenschwere Schwachstellen von Bedeutung. Wichtig erscheint dabei auch die primäre und sekundäre Zuordnung von Schwachstellen. Dies sollte anhand des Kriteriums der Funktionsfähigkeit des Elements bzw. System erfolgen. Dabei gilt die Aussage: Während eine Schadenstelle die Funktion verhindert, kann eine Schwachstelle die

Funktion nur behindern. Daraus schlußfolgernd muß die Definition einer primären Schwachstelle an die der Funktionsfähigkeit geknüpft werden. Somit handelt es sich um eine *primäre Schwachstelle*, wenn vorrangig die Funktion behindert oder das Element selbst ausfällt und somit die Funktion verhindert. Als sekundäre Schwachstelle werden alle diejenigen bezeichnet, die an zweiter oder späterer Reihe die Funktion behindern. Die Kriterien der Entscheidung hinsichtlich der Zuordnung sind verschiedenartig und sollen anhand von praktischen Beispielen kurz erläutert werden.

Bei häufig auftretenden Schwachstellen wird auch die Funktion häufig unterbrochen, wobei die Häufigkeit allein nicht als entscheidendes Kriterium herangezogen werden sollte. Vor allem darf die Häufigkeit nicht als Maß der Gefährlichkeit einer Schwachstelle angesehen werden, denn eine einmalig auftretende Schwachstelle als Schaden kann durchaus größere Folgen nach sich ziehen. Das Kriterium der Zeitdauer kann insoweit eine primäre Zuordnung haben, wenn gleichzeitig eine primäre Funktion oder ein primäres Bauteil betroffen ist. Allein kann auch die Zeitdauer nicht ein Entscheidungskriterium sein. Die Folgen des Ausbruches einer Schwachstelle sind sehr wichtig, denn diese können sehr umfangreich sein. Für die hier betrachteten Versorgungssysteme liegen kaum gesicherte Angaben über Folgekosten vor und selbst wenn, so können diese Angaben nicht verallgemeinert werden, gegeben durch die jeweilige Spezifik des Systems.

8.2 Sinn der Schwachstellenanalyse

Im folgenden sollen Sinn und Notwendigkeit einer Schwachstellenanalyse anhand von Beispielen aus Fernwärmeversorgungssystemen näher erläutert werden. Die Vorgehensweise bei Wasserversorgungssystemen ist grundsätzlich analog, jedoch liegt derzeit für diese Systeme noch keine ausreichend gesicherte Datenbasis vor.

Nach wie vor unterliegt die Fernwärmeversorgung einem ständigen Zuwachs und das nicht nur in der Bundesrepublik Deutschland. In Auswertung des jährlich erscheinenden Hauptbericht zur Fernwärmeversorgung der AGFW (Kröhner u. Ruppert 1993, 1994; Ruppert 1995, 1996; Schmitz 1997a, 1997b, 1998) ist dieser Sachverhalt aus Abb. 8.2-1 erkennbar. Werden diese Angaben mit denen des Statistischen Bundesamtes verglichen, so sind bei der AGFW durchschnittlich etwa 85 % der Trassenlängen erfaßt. Die Begründung dafür liegt darin, daß nicht jedes Fernwärmeversorgungsunternehmen Mitglied bei der AGFW ist.

Die Zuwachsrate zwischen 1990 und 1997 beträgt immerhin 5.260 km Trassenlänge. Das bedeutet eine Bauleistung von 2,06 km Trassenlänge pro Tag, wenn davon abgesehen wird, daß die Mitgliederanzahl einer leichten Schwankung unterliegt. Selbst in Auswertung der Angaben des Statistischen Bundesamtes für den Zeitraum 1991–1995 erhöht sich diese Bauleistung auf etwa 2,65 km Trassenlänge pro Tag.

Dieses rasante Wachstum wiederum birgt Probleme bei der Realisierung in sich. Zum einen sind dies Mängel, die während der Bauzeit auftreten, zum anderen verdeckte Mängel, die dem Betreiber erst später Schwierigkeiten bereiten. Zu

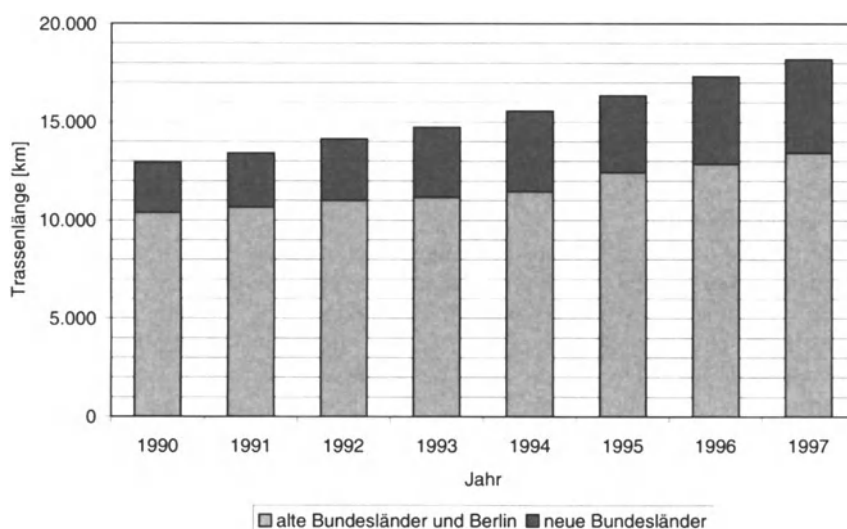


Abb. 8.2-1 Fernwärmetrassenausbau in Deutschland laut Netzstatistik der AGFW¹

diesen Mängeln zählen beispielsweise:

- kein Verlegen von Trassenwarnbändern,
- falsche Materialauswahl bei Armaturen,
- keine Straßenkappen für Erdarmaturen,
- Vergessen von Rohrleitungsendkappen bei Abnehmersträngen, welche zu einem späteren Zeitpunkt erst angeschlossen werden sollen,
- nicht ordnungsgemäße Ausführung von Übergängen Kunststoffmantelrohr zu schwarz verlegter Rohrleitung,
- undichte Bauwerks- und Mauerdurchführungen,
- ungenügende Sicherungen bei Durchfahrten von Rohrleitungsbrücken sowie entlang von Straßen,
- falsche Inbetriebnahme (passierte insbesondere dann, wenn die Rohrleitung des Vor- und Rücklaufes für unterschiedliche Heizwassertemperaturen ausgelegt wurden),
- falsche Einbauweise und Auslegung von Kompensatoren,
- Überschreiten des maximalen Biegewinkels beim Verlegen von Kunststoffmantelrohrleitungen,
- falsche Wahl des Verlegeverfahrens bzw. ungenügende Berücksichtigung der Vor-Ort-Bedingungen (beispielsweise hoher Grundwasserspiegel),
- Nichtkontrollieren des Inneren der Rohrleitung vor Einbau der Rohrleitung,
- ungenügende Qualitätssicherung bei der Verlegung der Rohrleitungen,

¹ Ab 1995 wurden die Trassenlängen von Berlin (Ost) der Kategorie alte Bundesländer einschließlich Berlin (West) zugeschlagen.

welche Schwachstellen darstellen und mehr oder weniger Schäden hervorrufen können. Ebenso zählt die Problematik des richtigen Funktionierens der eingebauten Leckwarnsysteme mit dazu. Diese Aufzählung ließe sich fortführen.

Ein Teil dieser Mängel ist ohne großen Kosteneinsatz behebbar. Andere Mängel, welche sich erst zu einem späteren Zeitpunkt während des Betriebes bemerkbar machen, verursachen wesentlich höhere Kosten und gefährden außerdem auch die zu sichernde Versorgungszuverlässigkeit.

Die Schwachstellenanalyse dient dazu, einerseits zuverlässigkeitserhöhende Maßnahmen für die Instandhaltung und den laufenden Betrieb abzuleiten, andererseits Hinweise für die Projektierung zu geben. Für die zuverlässigkeitserhöhenden Maßnahmen stehen insbesondere die Ausfallursachenforschung und Diagnostik im Vordergrund, welche ihrerseits Auskünfte über den jeweiligen Schaden hinsichtlich der Verlegeart, der Bauausführung, der Betriebs- und Einsatzweise der Elemente im Fernwärmesystem geben sollen. In der Projektierung gilt es jedoch, die bei der Schadensforschung gewonnenen Erfahrungen umzusetzen. Dabei geht es im einzelnen nicht nur um die Minimierung bzw. um den Ausschluß oben genannter Mängel, sondern bei Fernwärmeversorgungssystemen auch u. a. um folgende Sachverhalte:

- Analyse der Netzstrukturen hinsichtlich des Einflusses der Unterbrechungsdauer bei Schäden,
- Untersuchungen der Zuverlässigkeit der Hauptstränge und die Möglichkeit deren Stabilisierung durch Mehrleiter-Systeme,
- Gewährleistung der Versorgungszuverlässigkeit von Maschensystemen bei Ausfall eines Elements innerhalb dieser Systeme,
- Untersuchungen des notwendigen Abstandes von Armaturen in Rohrleitungsabschnitten für Stör- und Revisionsfälle,
- Untersuchungen bezüglich erdverlegter Armaturen und deren zu gewährleistenden Garantie der Funktionsfähigkeit als Ersatz der kostenintensiven Bauwerke,
- Untersuchungen hinsichtlich des möglichen Wegfalles von Entlüftungen und Entleerungen zwischen Bauwerken,
- Analyse des Standes der Technik bezüglich der Leckwarnsysteme.

Die daraus entstehenden Maßnahmen begrenzen einerseits das Risiko des Eintretens eines Schadens, andererseits stehen dafür zum Teil die erforderlichen Kosten als Nachteil gegenüber. Gleichzeitig gilt der wichtige Grundsatz, keine Komplizierung des Fernwärmeversorgungssystems zuzulassen, wenn dafür andere wichtige Erwägungen nicht vorliegen. Es darf nicht vergessen werden, daß sich die aus dem vorgestellten mathematischen Modellansatz gewonnenen spezifischen Verfügbarkeiten stets auf eine Längeneinheit beziehen. Auf diese Weise wird jedes unbegründet verlegte Meter Rohrleitung oder jede zusätzlich installierte Armatur nur zu einer geringeren Verfügbarkeit des Fernwärmeversorgungssystems führen.

Da Wasserversorgungssysteme viele Gemeinsamkeiten mit Fernwärmeversorgungssystemen besitzen, können die zuvor genannten Betrachtungen, unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften, zum Ansatz kommen. In Wasserversorgungssystemen ist der Zuwachs an neuen Leitungen eher begrenzt, da der

Anschlußgrad in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland bereits bei etwa 98 % liegt. Trotzdem sind auch hier Probleme bei der Montage und Verlegung vorhanden, die sowohl während der Bauzeit als auch erst zu einem späteren Zeitpunkt, in Form eines verdeckten Mangels, auftreten und somit dem Betreiber früher oder später Schwierigkeiten bereiten. Dazu zählen beispielsweise Mängel wie

- kein Verlegen von Trassenwarnbändern,
- nicht ordnungsgemäße Ausführung des Korrosionsschutzes, insbesondere bei Nachisolierungen,
- falsche Materialauswahl bei Armaturen,
- undichte Rohrverbindungen wegen fehlender Berücksichtigung der Rohrleitungsbeanspruchungen,
- nicht ordnungsgemäße Ausführung von Übergängen von Rohrleitungen aus unterschiedlichen Werkstoffen,
- undichte Bauwerks- und Mauerdurchführungen,
- falsche Einbauweise und Auslegung von Kompensatoren,
- falsche Materialwahl bzw. ungenügende Berücksichtigung der Vor-Ort-Bedingungen,
- Nichtkontrollieren des Inneren der Rohrleitung vor Einbau der Rohrleitung,
- ungenügende Qualitätssicherung bei der Verlegung der Rohrleitungen,

welche Schwachstellen darstellen und mehr oder weniger Schäden hervorrufen können. Diese Aufzählung ließe sich fortführen.

Ein Teil dieser Mängel ist ohne großen Kosteneinsatz behebbar. Andere Mängel, welche sich erst zu einem späteren Zeitpunkt während des Betriebes bemerkbar machen, verursachen wesentlich höhere Kosten und gefährden außerdem auch die zu sichernde Versorgungszuverlässigkeit.

Die Schwachstellenanalyse dient dazu, einerseits zuverlässigkeitserhöhende Maßnahmen für die Instandhaltung, insbesondere der Rehabilitation, und den laufenden Betrieb abzuleiten, andererseits Hinweise für die Projektierung zu geben. Für die zuverlässigkeitserhöhenden Maßnahmen steht vorwiegend die Ausfallursachenforschung zur Verfügung, welche ihrerseits Auskünfte über den jeweiligen Schaden hinsichtlich des Materialeinsatzes und somit Verlegeverfahren, der Montage und Verlegung der Elemente im Wasserversorgungssystem geben sollen. In der Projektierung gilt es jedoch, die bei der Schadensforschung gewonnenen Erfahrungen umzusetzen. Dabei geht es im einzelnen nicht nur um die Minimierung bzw. um den Ausschluß oben genannter Mängel, sondern bei Wasserversorgungssystemen auch u. a. um folgende Sachverhalte:

- Analyse der Netzstrukturen hinsichtlich des Einflusses der Unterbrechungsdauer bei Schäden,
- Untersuchungen der Zuverlässigkeit der Hauptstränge und die Möglichkeit derer Stabilisierung durch Maschensysteme,
- Gewährleistung der Versorgungszuverlässigkeit von Maschensystemen bei Ausfall eines Elements innerhalb dieser Systeme,
- Untersuchungen des notwendigen Abstandes von Armaturen in Rohrleitungsabschnitten für Stör- und Revisionsfälle.

Die daraus entstehenden Maßnahmen begrenzen einerseits das Risiko des Eintretens eines Schadens, andererseits stehen dafür zum Teil die erforderlichen Kosten als Nachteil gegenüber. Gleichzeitig gilt der wichtige Grundsatz, keine Komplizierung des Wasserversorgungssystems zuzulassen, wenn dafür andere wichtige Erwägungen nicht vorliegen. Es darf nicht vergessen werden, daß sich die aus dem vorgestellten mathematischen Modellansatz gewonnenen spezifischen Verfügbarkeiten stets auf eine Längeneinheit beziehen. Auf diese Weise wird jedes un begründet verlegte Meter Rohrleitung oder jede zusätzlich installierte Armatur nur zu einer geringeren Verfügbarkeit des Wasserversorgungssystems führen.

8.3 Vorgehensweise

Im folgenden soll nun die Vorgehensweise einer Schwachstellenanalyse eines Fernwärmeversorgungssystems auf Basis der berechneten Verfügbarkeiten einzelner Elemente erläutert werden. Gleichzeitig wird ein Teil der oben genannten Sachverhalte mit andiskutiert.

Grundlage einer Schwachstellenanalyse bilden die Ergebnisse der Auswertungen einer vorliegenden Ereignisstatistik. Somit liegen die Gesamtverfügbarkeit und im günstigsten Fall mit einer detaillierten Datenerfassung die spezifischen Verfügbarkeiten pro Nenndurchmesser und Längeneinheit des betrachteten Systems vor (s. a. Abb. 7.3-10). Ein Vergleich mit Werten anderer Fernwärmeversorgungssysteme ist somit jederzeit gegeben. Dabei sollte aber den dazugehörigen Betriebsparametern und Fahrweisen Aufmerksamkeit geschenkt werden. Weiterhin ist es möglich, bestimmte Netzstrukturen, wie Maschen- und Mehrleiter-Systeme, näher zu analysieren.

Ausgangspunkt für dieses konkrete Beispiel bildet der in Abb. 8.3-1 dargestellte Netzabschnitt sowie das dazugehörige Strukturbild. Um die Verfügbarkeit der großen Masche (E_1, E_2, E_3, E_4) zu ermitteln, muß das gesamte Maschensystem betrachtet werden. Die dazugehörigen Abnehmerstränge wurden mit in den jeweiligen Maschenelementen berücksichtigt, was durchaus für praktische Belange ausreicht. Für die Berechnungen werden die einzelnen Verfügbarkeiten der Maschenelemente benötigt. Dabei ist zu beachten, daß sich die Elemente aus verschiedenen Nenndurchmessern und entsprechenden Rohrleitungslängen zusammensetzen. Es wurden folgende Verfügbarkeiten ermittelt:

$$\begin{array}{llll} V_{E1} = 0,991 & V_{E2} = 0,980 & V_{E3} = 0,989 & V_{E4} = 0,975 \\ V_{E5} = 0,985 & V_{E6} = 0,990 & V_{E7} = 0,998 & V_{E8} = 0,995. \end{array}$$

Aus zuverlässigkeitslogischer Sicht liegt in der Grundbetrachtung ein Seriensystem vor, d. h. um alle Abnehmer zwischen den beiden Punkten A und B mit Wärme zu versorgen, werden alle Elemente benötigt. Damit ergibt sich die Verfügbarkeit dieses Maschensystems M_{123} als Serie nach Gl. (5.72)

$$V_{SS} = \bigcap_{i=1}^8 V_{E,i} = 0,9068 = 90,68 \% .$$

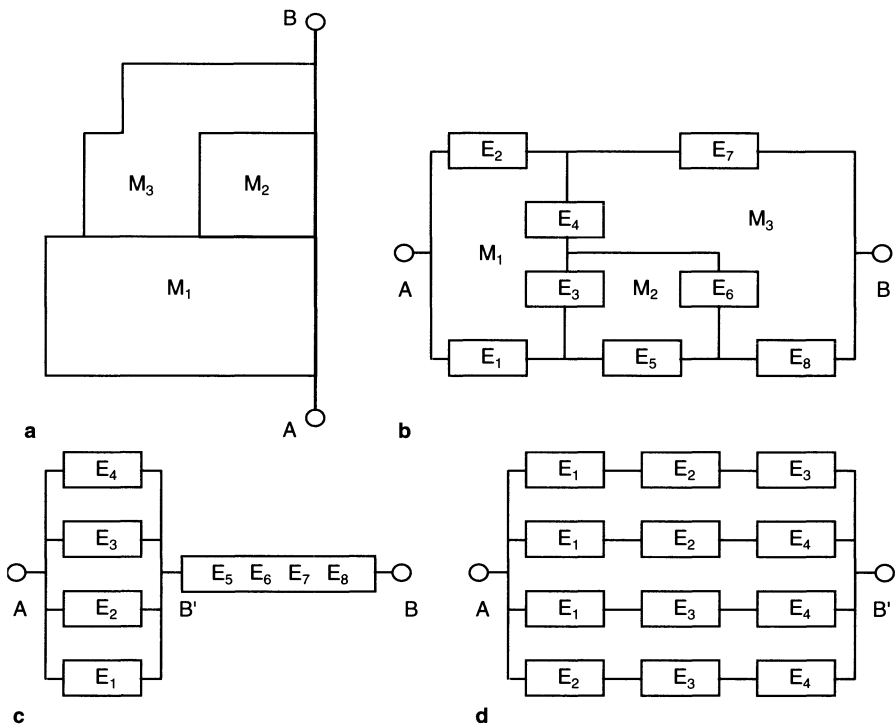


Abb. 8.3-1 Schwachstellenanalyse eines Maschensystems

a Trassenverlauf, **b** Strukturbild, **c** Betrachtungsansatz für Masche M_1 , **d** Zuverlässigkeitslogische Aufbereitung der Masche M_1 (Wege)

Unter der vereinfachenden Bedingung, daß ein Elementausfall den Ausfall eines kompletten Stranges zwischen zwei Knoten bedeutet (in Wirklichkeit reicht der Ausfall eines Teilstückes innerhalb des Elementes aus), wurden die Ausfälle der Elemente E_1, E_2, E_3 und E_4 der Masche M_1 näher untersucht.

Diese Masche soll aus zuverlässigkeitslogischer Sicht dahingehend untersucht werden, ob der Ausfall eines beliebigen Elementes innerhalb dieser Masche hydraulischer Sicht toleriert, d. h. beherrscht wird. Bei Ausfall eines Elementes würde sich somit das vorliegende Maschensystem entsprechend aufspalten. Den dazu gehörigen Betrachtungsansatz zeigt Abb. 8.3-1c, wobei die Elemente E_5 – E_8 als Seriensystem vorerst zur Vereinfachung zusammengefaßt wurden. Dabei wird bei dem zwischen den Punkten A und B' abgebildeten Strukturbild nicht von einem Parallelsystem, sondern vielmehr von einem k-von n-System gesprochen. Hier handelt es sich um eine partielle Parallelstruktur, bei der alle Elemente einer gleichen Belastung unterworfen sind. Dies trifft auf Fernwärmeversorgungssysteme nur begrenzt zu. Hinsichtlich der Funktionsfähigkeit liegt somit ein redundantes System vor, wenn von n Elementen mindestens k – in diesem konkreten Fall, wenn immer 3 von 4 Elementen – der Masche funktionieren. Da für die Elemente

verschiedene Verfügbarkeiten gelten, können die Gln. (5.92) und (5.93) nicht angewendet werden. Deshalb wird hier auf die Minimalwegmethode zurückgegriffen. Dieses Verfahren wurde bereits in Kap. 5 beschrieben. Die zuverlässigkeitslogische Aufbereitung der Masche M_1 in die sich daraus ergebenden Wege ohne die Elemente E_5 – E_8 sind aus Abb. 8.3-1d erkennbar.

Unter der Vereinfachung der Symbole E_i gleich x_i lautet die Systemfunktion dazu folgendermaßen:

$$S(x_1, \dots, x_4) = 1 - (1 - x_1 x_2 x_3) \cdot (1 - x_1 x_2 x_4) \cdot (1 - x_1 x_3 x_4) \cdot (1 - x_2 x_3 x_4).$$

Nach Ausmultiplizieren und Zusammenfassen dieser Beziehung sowie der Anwendung des Idempotenz-Axioms BOOLEscher Variablen nach Gl. (5.96) ergibt sich für dieses 3-von-4-System in Linearform

$$S(x_1, \dots, x_4) = x_1 x_2 x_4 + x_1 x_2 x_3 + x_2 x_3 x_4 + x_1 x_3 x_4 - 3 \cdot x_1 x_2 x_3 x_4.$$

Unter Verwendung der gegebenen Verfügbarkeiten ergibt sich für die betrachtete Masche, resultierend aus der berechneten Systemfunktion, eine Verfügbarkeit von $V_{M,1} = 0,9985 = 99,85\%$. Diese Verfügbarkeit gilt nur unter der Voraussetzung, daß jeder Ausfall eines Elementes hydraulisch beherrscht wird. Als reines Seriensystem dagegen betrachtet, beträgt die Verfügbarkeit

$$V_{SS(M,1)} = \bigcap_{i=1}^4 V_{E,i} = 0,9365 = 93,65\%,$$

was letztendlich immerhin eine Verfügbarkeitsdifferenz gegenüber der Masche aus zuverlässigkeitslogischer Sicht von etwa 6,2 % ausmacht.

Die jeweilige Verfügbarkeitserhöhung, die jedes Element mit sich bringt, kann über die zugeschnittene Beziehung

$$\Delta V_{E,i} = V_{SS(M,1)} \cdot \frac{(1 - V_{E,i})}{V_{E,i}} \quad (8.1)$$

ermittelt werden, wobei in diesem speziellen Fall mit

$$V_{M,1} = V_{SS(M,1)} + \sum_{i=1}^4 \Delta V_{E,i} \quad (8.2)$$

das gleiche Ergebnis erhalten wird, wie mit der oben aufgestellten Systemfunktion. Für andere Betrachtungen müssen diese beiden Gleichungen entsprechend angepaßt werden.

Zurück zum Beispiel. Der Ausfall des Elements E_1 führt unweigerlich zum Ausfall des Maschensystems, im ungünstigsten Fall sogar zum Totalausfall des gesamten Fernwärmeversorgungssystems. Ursache dafür ist das Überschreiten der maximalen Strömungsgeschwindigkeit in den einzelnen Rohrleitungsabschnitten des Elements E_2 . Dies ist aber auch vom Belastungsgrad des Fernwärmeversorgungssystems abhängig. Alle anderen Ausfälle, wie der Elemente E_2 , E_3 oder E_4 , werden hydraulisch beherrscht und von der Masche M_1 toleriert. Damit bringen

diese 3 Elemente Verfügbarkeitserhöhungen mit sich, die über die Gl. (8.2) ermittelt werden können. Es ergibt sich somit für

$$\Delta V_2 = 0,01911$$

$$\Delta V_3 = 0,01042$$

$$\Delta V_4 = 0,02401$$

und in Summe $\Delta V_{2,3,4} = 0,05354$. Für das gesamte System (E_1 – E_8) erhöht sich dadurch die berechnete Verfügbarkeit um 5,35% auf 96,03 %, wobei das betrachtete Maschensystem im zuverlässigkeitslogischen Sinne keine Masche darstellt, da der Elementeausfall E_1 nicht toleriert wird.

Aus der Gl. (8.1) ist des weiteren erkennbar, daß die Verfügbarkeitserhöhung ΔV_i gegen null geht, je höher die Verfügbarkeit des Elementes ist.

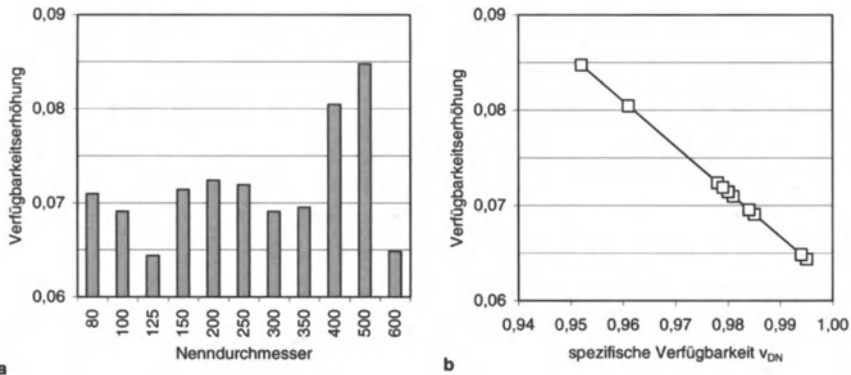
Die Tolerierung des Elementeausfalls E_1 in der Masche M_1 kann nur erfolgen, wenn die im Element E_2 vorhandenen Restriktionen beseitigt werden. Eine genaue Untersuchung des Elements E_2 ergibt, daß es sich hier um insgesamt 530 m Rohrleitung der Nenndurchmesser DN 300 und 350 handelt. Die Beseitigung dieser Restriktionen könnte beispielsweise mit Hilfe einer Durchmesserergrößerung bzw. einer parallelverlegten Rohrleitung DN 400 erfolgen. Dabei geht es im letzteren Fall um kein Mehrleiter-System im zuverlässigkeitslogischen Sinne, sondern lediglich um ein Seriensystem zweier parallelverlegter Leitungen. Die hydraulische Nachrechnung ergibt einen Nenndurchmesser von etwa DN 500. Dieser Lösungsansatz senkt den Druckverlust mit dem Ergebnis, daß der Ausfall des Elements E_1 nun toleriert werden kann. Die Verfügbarkeitserhöhung durch das Element E_1 beträgt nach Gl. (8.1) $\Delta V_1 = 0,00850$. Durch diese Nennweiten-erweiterung liegt ein Maschensystem vor, welches sowohl hydraulischerseits als auch hinsichtlich der zuverlässigkeitslogischen Grundstruktur alle gestellten Bedingungen erfüllt. Die Verfügbarkeit des betrachteten gesamten Systems erhöht sich somit von 90,68 % auf 96,88 %.

Maschen in einem Fernwärmeversorgungssystem sind nur dann sinnvoll, wenn entweder der Druckverlust in diesem betreffenden Netzabschnitt zu hoch oder weitere Abnehmer angeschlossen werden sollen, aber die Grenze der Auslastung der vorhandenen Stränge fast erreicht ist. Wie dieses Lösungsbeispiel zeigt, sind bei einer Maschenauslegung nicht nur die Aspekte der Hydraulik im Fernwärmeversorgungssystem, sondern auch die Analyse hinsichtlich der Zuverlässigkeit gefragt, speziell der Versorgungszuverlässigkeit.

Nachfolgend sollen nun einzelne Abhängigkeiten analysiert werden. Werden die Verfügbarkeitserhöhungen zunächst unabhängig von der Netzhydraulik des Fernwärmeversorgungssystems betrachtet, ergeben sich für die einzelnen Nenndurchmesser folgende Resultate (Tabelle 8.3-1). In Auswertung dieser Tabelle ist in Abb. 8.3-2 die interessante Abhängigkeit zwischen der spezifischen Verfügbarkeit und der Verfügbarkeitserhöhung des jeweiligen Nenndurchmessers dargestellt. Daraus wird ersichtlich, daß mit steigender spezifischer Verfügbarkeit der Gewinn an Verfügbarkeitserhöhung kleiner wird, d. h. für eine spezifische Verfügbarkeit von 1 ist die Verfügbarkeitserhöhung gleich 0. Oder anders formuliert: Ein Ersetzen oder Verstärken eines schlechten Elements im Fernwärmeversorgungssystem zieht eine Verfügbarkeitserhöhung nach sich.

Tabelle 8.3-1 Verfügbarkeitserhöhungen abhängig von der spezifischen Verfügbarkeit je Nenndurchmesser

DN	80	100	125	150	200	250	300	350	400	500	600
v_{DN}	0,981	0,985	0,995	0,980	0,978	0,979	0,985	0,984	0,961	0,952	0,994
$\Delta v_{1,2,3,4}$	0,071	0,069	0,064	0,071	0,072	0,072	0,069	0,070	0,080	0,085	0,065

**Abb. 8.3-2** Verschiedene Betrachtungen der Verfügbarkeitserhöhungen $\Delta v_{1,2,3,4}$ in Abhängigkeit **a** vom Nenndurchmesser, **b** von der spezifischen Verfügbarkeit

Als vereinfachender Ansatz wird hier mit den spezifischen Verfügbarkeiten unabhängig von dem Baujahr gerechnet, d. h. die Verfügbarkeit einer neu gebauten Rohrleitung wird mit der durchschnittlich zu erwartenden Dauerverfügbarkeit der bereits gebauten Rohrleitung gleichgesetzt. Dies liegt in der ungenügend zur Verfügung stehenden Datenbasis für diese spezielle Berechnung begründet.

Für die Wahl einer entsprechenden Rohrleitung reicht aber die gewonnene Kenngröße – Verfügbarkeitserhöhung – in dieser Abhängigkeitsbetrachtung nicht als endgültiges Entscheidungskriterium aus. Da sich die Maßnahme einer oder mehrerer Verfügbarkeitserhöhungen direkt in den verursachenden Kosten der Ausfälle widerspiegelt, wäre es interessant, diese beiden Größen gegenüberzustellen. Gegenwärtig kann aber diese Abhängigkeit nicht analysiert werden, da kaum oder nur wenige Informationen über diese Ausfallkostenfunktion vorliegen. Deshalb wird folgende Ausweglösung vorgeschlagen: Wird die jeweils ausgewiesene Verfügbarkeitserhöhung auf die Kosten der neu zu verlegenden Rohrleitung (in diesem Fall auf 530 m Länge) bezogen und über die einzelnen Nenndurchmesser aufgetragen, so entsteht in diesem konkreten Beispiel der in Abb. 8.3-3 gezeigte Verlauf.

Aus dieser Darstellung ist folgende Feststellung erkennbar: Je größer der Funktionswert ist, um so höher ist der Effekt hinsichtlich der Verfügbarkeitserhöhung und der Kosten. In diesem speziellen Fall trifft das auf den Nenndurchmesser DN 80 zu. Durch die wichtige Restriktion, hervorgerufen durch die Netzhydraulik des betrachteten Systems, verschiebt sich dieser Punkt auf DN 400.

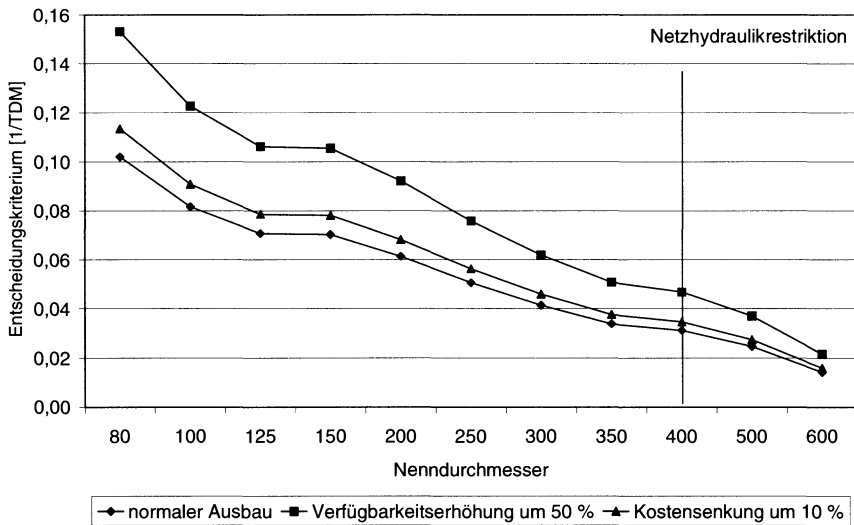


Abb. 8.3-3 Verfügbarkeitserhöhungen bezogen auf die jeweiligen Verlegekosten abhängig vom Nenndurchmesser

Wird diese Restriktion weiter zugunsten der Vergrößerung des Durchmessers der Rohrleitung verschoben, verringert sich zwar der maximale Druckverlust in dem zu untersuchenden Maschensystem, aber die Kosten für die entsprechend neu zu verlegende Rohrleitung steigen dementsprechend. Statt der Rohrleitung DN 400 könnten ebenso auch entsprechende Rohrleitungen mit kleinerem Nenn-durchmesser, beispielsweise $2 \times \text{DN } 300$, gewählt werden. Diese müssen aber wegen der gegebenen hydraulischen Restriktion als Mehrleiter-System ausgeführt werden, ohne dabei die Anforderung eines Parallelsystems aus zuverlässigkeitslogischer Sicht zu erfüllen. Durch die höheren Verlegekosten verschlechtert sich aber das Entscheidungskriterium zu Ungunsten der Variante DN 400. Gleiche Aussagen treffen auch für Parallelsysteme des Nenn-durchmessers größer DN 400 zu, allein gegeben durch die höheren Verlegekosten und das trotz der weiteren Verfügbarkeitserhöhung durch das Parallelsystem. Solche aufgezeigten Maßnahmen können nur über die Ausfallkostenfunktion weiter bewertet werden. Außerdem wäre es unsinnig, die Verfügbarkeit auf dem 530 m langen Rohrleitungsabschnitt auf 1 zu erhöhen, wenn der Rest des Maschensystems im alten Zustand verbleibt.

Des Weiteren wurde die Maßnahme untersucht, die alten Rohrleitungen (DN 300 und 350) zu entfernen und durch neue zu ersetzen. Damit verschiebt sich die hydraulische Restriktionsgrenze auf den Nenn-durchmesser DN 500, bringt aber in diesem konkreten Fall keinen wesentlichen Vorteil gegenüber den oben genannten Lösungsvorschlägen.

Interessant dagegen sind auch die beiden Sensibilitätsbetrachtungen, zum einen mit dem Ansatz einer 50 % höheren Verfügbarkeitserhöhung bei gleichbleibenden

Kosten, zum anderen dem Ansatz einer Minderung der Kosten um 10 % bei gleichbleibenden Verfügbarkeitserhöhungen. Damit wird ersichtlich, welchen unmittelbaren Einfluß die Verfügbarkeitserhöhungen und die Verlegekosten, unabhängig vom Nenndurchmesser, auf das Entscheidungskriterium haben. Speziell diese Aussage wird in Abb. 8.3-4 nochmals für das Beispiel DN 400 verdeutlicht. Hieraus ist erkennbar, daß der Einfluß einer Verfügbarkeitserhöhung auf das Entscheidungskriterium wesentlich geringer ist, als die der Verlegekosten.

Gleichzeitig muß noch bemerkt werden, daß dieser spezielle Funktionsverlauf nur im Zusammenhang mit dem Beispiel Maschensystem zu betrachten ist. Dies wiederum bedeutet, daß bei konstant gehaltenen spezifischen Kosten der Funktionsverlauf im wesentlichen durch die nennweitenabhängigen Verfügbarkeitserhöhungen und diese wiederum durch die einzelnen Verfügbarkeiten beeinflusst wird. Weitere wichtige Einflußgrößen für die Umsetzung dieses Entscheidungskriteriums sind zum einen die Lebensdauer der einzelnen Elemente des Fernwärmeversorgungssystems, zum anderen das zur Anwendung kommende Verlegeverfahren.

Während gegenwärtig vorhandene und neu zu konzipierende Netzstrukturen, insbesondere Maschen- und Mehrleiter-Systeme, nur unter Beachtung der hydraulischen Druckverhältnisse ausgelegt werden, kann nun mit Hilfe der Verfügbarkeitsdaten einzelner Elemente eine Betrachtung hinsichtlich des zuverlässigkeitslogischen Aufbaus dieser Netzstrukturen erfolgen, denn bei einem hydraulischen Maschensystem, wie in diesem Beispiel, muß es sich nicht gleichzeitig um ein Maschensystem im zuverlässigkeitslogischen Sinne handeln. Bei der Zuverlässigkeitsanalyse wurde davon ausgegangen, daß bei Maschen- und Mehrleiter-Systemen der einfache Ereignisfall – Ausfall eines Elements innerhalb dieser Netzstruktur – toleriert und beherrscht wird.

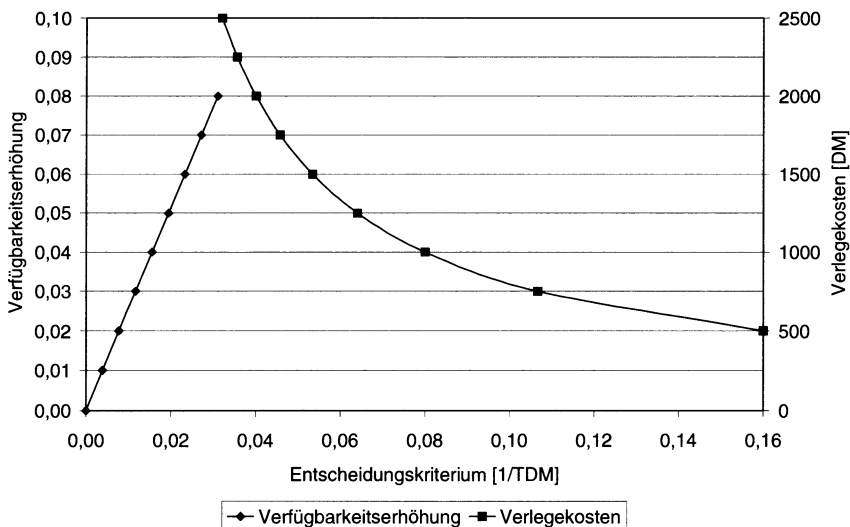


Abb. 8.3-4 Einfluß der Verfügbarkeitserhöhung bzw. der Verlegekosten auf das Entscheidungskriterium

Gleichzeitig wurde versucht, den Sinn einer Schwachstellenanalyse anhand von praktischen Fällen, welche bei verschiedenen Fernwärmeversorgungsunternehmen auftraten, herauszustellen. Mit Hilfe eines konkreten Anwendungsbeispiels wurden Möglichkeiten der Herangehensweise in bezug auf die Schwachstellenanalyse diskutiert. Es wurde weiterhin aufgezeigt, wie mit einem neu gebildeten Kriterium, unter der Maßgabe des Fehlens einer konkreten Ausfallkostenfunktion, eine Entscheidung hinsichtlich einer zuverlässigkeitserhöhenden Maßnahme bewertet werden kann.

Die Notwendigkeit einer Schwachstellenanalyse dagegen muß jedes einzelne Fernwärmeversorgungsunternehmen selbst abschätzen. Ziel jedes Unternehmens muß die Gewährleistung einer hohen und stabilen Versorgungszuverlässigkeit des Kunden mit Wärme sein.

In Wasserversorgungssystemen gibt es ähnlich zu betrachtende Fälle, insbesondere hinsichtlich der Maschenausbildung. Grundlage bilden auch hier die spezifischen Verfügbarkeiten pro Nenndurchmesser und Längeneinheit in Abhängigkeit des Rohrwerkstoffes, welche aber derzeit noch nicht als gesicherte Daten vorliegen. Während in Fernwärmeversorgungssystemen in den überwiegenden Fällen nur vereinzelte und groß ausgebildete Maschensysteme realisiert wurden und werden, ist der Vermaschungsgrad bei Wasserversorgungssystemen um eine Vielfaches höher. Inwieweit diese Maschensysteme sowohl hydraulischerseits als auch hinsichtlich der zuverlässigkeitslogischen Grundstruktur alle gestellten Bedingungen erfüllen, muß im einzelnen überprüft werden.

Für die Berechnung der einzelnen Verfügbarkeitserhöhungen in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser (und sinnvoller Weise auch vom Rohrwerkstoff) kann der gleiche Ansatz wie bei Fernwärmeversorgungssystemen gewählt werden. Mit Hilfe eines neu gebildeten Kriteriums, unter der Maßgabe des Fehlens einer konkreten Ausfallkostenfunktion, können Entscheidungen hinsichtlich zuverlässigkeitserhöhender Maßnahmen bewertet werden. Durch die wesentlich geringeren Verlegekosten fällt das Entscheidungskriterium höher aus. Auch in diesem Fall wird bei konstant gehaltenen spezifischen Kosten der Funktionsverlauf des Entscheidungskriteriums im wesentlichen durch die nennweitenabhängigen Verfügbarkeitserhöhungen und diese wiederum durch die einzelnen Verfügbarkeiten beeinflusst.

Während gegenwärtig vorhandene und neu zu konzipierende Netzstrukturen nur unter Beachtung der hydraulischen Druckverhältnisse ausgelegt werden, kann nun mit Hilfe der Verfügbarkeitsdaten einzelner Elemente eine Betrachtung hinsichtlich des zuverlässigkeitslogischen Aufbaus dieser Netzstrukturen erfolgen. Bei der Zuverlässigkeitsanalyse wurde davon ausgegangen, daß bei Maschensystemen der einfache Ereignisfall – Ausfall eines Elements innerhalb dieser Netzstruktur – toleriert und beherrscht wird.

Die Notwendigkeit einer Schwachstellenanalyse dagegen muß jedes einzelne Wasserversorgungsunternehmen selbst abschätzen. Ziel jedes Unternehmens muß die Gewährleistung einer hohen und stabilen Versorgungszuverlässigkeit des Verbrauchers mit Wasser sein.

Anhang 1: Näherungsgleichungen

Approximationsgleichung	Maß- einheit	Gültigkeitsbereich	Quelle	Fehler %
Sättigungsdruck Gl. (A1.1):				
$p_S = 0,0981 \cdot \left(\frac{t}{100} \right)^{4,5-0,0054 \cdot t}$	[MPa]	110 °C ≤ t ≤ 130 °C	(Glück 1985)	0,6
Sättigungsdruck Gl. (A1.2):				
$p_S = 0,0981 \cdot \left(\frac{t}{100} \right)^{3,6+0,002 \cdot t}$	[MPa]	130 °C ≤ t ≤ 190 °C	(Glück 1985)	0,5
Sättigungsdruck Gl. (A1.3):				
$p_S = \sum_{n=0}^6 a_n \cdot t_i$	[bar]	20 °C ≤ t ≤ 200 °C		0,1
mit $a_0 = 6,07243556 \cdot 10^{-03}$				
$a_1 = 4,67733100 \cdot 10^{-04}$				
$a_2 = 1,15160989 \cdot 10^{-05}$				
$a_3 = 3,83683251 \cdot 10^{-07}$				
$a_4 = 5,82609699 \cdot 10^{-10}$				
$a_5 = 4,63186749 \cdot 10^{-11}$				
$a_6 = -5,99256442 \cdot 10^{-14}$				
Dichte des Wassers Gl. (A1.4):				
$\rho = 1006 - 0,26 \cdot t - 0,0022 \cdot t^2$	[kg/m ³]	10 °C ≤ t ≤ 200 °C	(Glück 1985)	0,3
Spezifische Wärmekapazität des Wassers Gl. (A1.5):				
$c_p = 4,1991 - 1,0621 \cdot 10^{-03} \cdot t + 1,2038 \cdot 10^{-05} \cdot t^2$	[kJ/kg K]	1 bar ≤ p ≤ 20 bar 10 °C ≤ t ≤ 200 °C		0,2
Spezifisches Volumen des Wassers Gl. (A1.6):				
$v = \frac{1}{1000} \cdot (0,9973 + 9,9 \cdot 10^{-05} \cdot t + 3,444 \cdot 10^{-06} \cdot t^2)$	[m ³ /kg]	10 °C ≤ t ≤ 200 °C	(Glück 1985)	0,1

Approximationsgleichung	Maß- einheit	Gültigkeitsbereich	Quelle	Fehler %
Enthalpie des Dampfes Gl. (A1.7):¹				
$h = 2449,52 + 1,8422 \cdot t + 0,00272 \cdot t^2 - 5943 \cdot \frac{P}{T^{3,1}} - 2,9145E09 \cdot \frac{P^3}{T^{13,5}}$	[kJ/kg]			
mit $P = \frac{p}{10,197}$ und $T = \frac{(t + 273,15)}{100}$ p - Druck [bar], t - Temperatur [°C]				
Spezifisches Volumen des Dampfes Gl. (A1.8):²				
$v = 47,1 \cdot \left[\frac{(t + 273)}{p} \cdot \frac{1}{10000} \right] - 0,016$	[m³/kg]			
Kinematische Viskosität des Wassers Gl. (A1.9a):				
$\nu = 10^{-06} \cdot \exp(0,498 - 0,0236 \cdot t)$	[m²/s]	10 °C ≤ t ≤ 40 °C	(Glück 1985)	3,0
Kinematische Viskosität des Wassers Gl. (A1.9b):				
$\nu = 10^{-06} \cdot (1,6377 - 0,0368 \cdot t + 0,0003 \cdot t^2)$	[m²/s]	4 °C ≤ t ≤ 30 °C		0,9
Kinematische Viskosität des Wassers Gl. (A1.9c):				
$\nu = 19,8 \cdot 10^{-06} \cdot t^{-0,915}$	[m²/s]	40 °C ≤ t ≤ 200 °C	(Glück 1985)	3,0
Dynamische Viskosität des Wassers Gl. (A1.10a):				
$\eta = 9,81 \cdot 10^{-06} \cdot \exp(5,09 - 0,023 \cdot t)$	[Pa s]	10 °C ≤ t ≤ 40 °C	(Glück 1985)	3,0
Dynamische Viskosität des Wassers Gl. (A1.10b):				
$\eta = 0,027415 \cdot t^{-1,0}$	[Pa s]	45 °C ≤ t ≤ 200 °C	(Glück 1985)	4,0
Dynamische Viskosität des Wassers Gl. (A1.10c):				
$\eta = 0,018393 \cdot t^{-0,9}$	[Pa s]	40 °C ≤ t ≤ 100 °C	(Glück 1985)	3,0

¹ Die Quelle ist dem Verfasser nicht bekannt.² Dem Verfasser ist diese zugeschnittene Größengleichung ohne Quellenangabe bekannt.

Approximationsgleichung	Maß- einheit	Gültigkeitsbereich	Quelle	Fehler %
Dynamische Viskosität des Dampfes Gl. (A1.11):				
$\eta = 8,17 \cdot 10^{-06} \cdot \left[\frac{1 + \left(\frac{961}{273} \right)}{1 + \left(\frac{961}{t + 273} \right)} \cdot \sqrt{\frac{t + 273}{273}} \right] \cdot \xi$	[Pa s]		(Wukalowitsch 1954)	
mit $\xi = \frac{1}{\left(1 - \frac{b}{v} \right)^2}$ (Faktor für Druckabhängigkeit) und $b = 2,1 \cdot (t - 120) \cdot 10^{-06}$,				
b - Konstante ³ ,				
v - spezifisches Volumen [kg/m],				
t - Temperatur [°C]				
Ausdehnungskoeffizient des Wassers Gl. (A1.12):				
$\alpha_W = \left(4,5 + 0,916 \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2} \right) - 1,9 \cdot 10^{-03} \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{2} \right)^2 \right) \cdot 10^{-05}$	[1/K]	30 °C ≤ t ≤ 150 °C	(Glück 1985)	3
Elastizitätsmodul des Wassers Gl. (A1.13):				
$E_W = 2484 - 3,76 \cdot t - 0,0148 \cdot t^2$	[MPa]	50 °C ≤ t ≤ 200 °C	(Glück 1985)	3
Elastizitätsmodul des Stahlrohres Gl. (A1.14):				
$E_R = E_{\text{Stahl}} = 207800 - 84,08 \cdot t \text{ [MPa]}$		50 °C ≤ t ≤ 200 °C	(Glück 1985)	
Elastizitätsmodul des Stahlrohres (Ferrit) Gl. (A1.15a):				
$E_R = E_{\text{Stahl}} = 215336 - 82,747 \cdot t$	[MPa]	20 °C ≤ t ≤ 600 °C		0,9
Elastizitätsmodul des Stahlrohres (Martensit) Gl. (A1.15b):				
$E_R = E_{\text{Stahl}} = 220850 - 85,767 \cdot t$	[MPa]	20 °C ≤ t ≤ 700 °C		1,7
Elastizitätsmodul des Stahlrohres (Austenit) Gl. (A1.15c):				
$E_R = E_{\text{Stahl}} = 198622 - 80,998 \cdot t$	[MPa]	20 °C ≤ t ≤ 800 °C		0,02

³ Die Konstante b wurde empirisch ermittelt.

Anhang 2: Rohrleitungsmaßnormen nach DIN

Tabelle A2-1 Auszug aus den Maßnormen der nahtlosen Stahlrohre nach DIN 2448

Rohr-Außendurchmesser [mm] Reihe			Normal- Wand- dicke mm																								
1	2	3		1,6	1,8	2,0	2,3	2,6	2,9	3,2	3,6	4,0	4,5	5,0	5,6	6,3	7,1	8,0	8,8	10,0	11,0	12,5	14,2	16,0			
10,2			1,6																								
13,5			1,8																								
	16,0		1,8																								
17,2			1,8																								
	19,0		2,0																								
	20,0		2,0																								
21,3			2,0																								
	25,0		2,0																								
		25,4	2,0																								
26,9			2,3																								
		30,0	2,6																								
	31,8		2,6																								
33,7			2,6																								
	38,0		2,6																								
42,4			2,6																								
		44,5	2,6																								
48,3			2,6																								
	51,0		2,6																								
		54,0	2,6																								
	57,0		2,6																								
60,3			2,9																								
	63,5		2,9																								
	70,0		2,9																								
		73,0	2,9																								
76,1			2,9																								
		82,5	3,2																								
88,9			3,2																								
	101,6		3,6																								
		108,0	3,6																								
114,3			3,6																								
	127,0		4,0																								
	133,0		4,0																								
139,7			4,0																								
		152,4	4,5																								
		159,0	4,5																								
168,3			4,5																								
		177,8	5,0																								
		193,7	5,6																								
219,1			6,3																								
		244,5	6,3																								
273,0			6,3																								
323,9			7,1																								
355,6			8,0																								
406,4			8,8																								
457,0			10,0																								
508,0			11,0																								
		559,0	12,5																								
610,0			12,5																								
		660,0	14,2																								

Anhang 3: Rohrleitungsmaßnormen nach TGL⁴

Material	Ausführung	Rohr- Außendurchmesser mm	Wandstärke mm									
			2,6	2,9	4,0	4,5	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	
St35b, St35-5	nahtlos	31,8										
		38,0										
		44,5										
		57,0										
		76,0										
		89,0										
		108,0										
		133,0										
		159,0										
St38b-2	spiralgeschweißt	219,0										
		273,0										
		325,0										
		377,0										
		426,0										
		530,0										
		620,0										
		720,0										
		820,0										
Mb16	längsgeschweißt	1020,0										
		219,0										
		273,0										
		325,0										
		377,0										
		426,0										
		530,0										
		620,0										
		720,0										
820,0												
1020,0												

⁴ Standard der nicht mehr gültigen Normen aus der ehemaligen DDR, die aber in den neuen Bundesländern noch anzutreffen sind.

Anhang 4: Rohrrauigkeitswerte

Werkstoff	Zustand	Rauhigkeit k [mm]
Stahlrohre, gezogen	neu	0,03–0,05
	angerostet	0,10–0,30
	bitumiert	0,04
Stahlrohre, nahtlos	neu	0,01–0,05
	bitumiert	0,05–0,06
	Walzhaut	0,02–0,06
	gebeizt	0,03–0,04
	verzinkt	0,07–0,16
Stahlrohre, schmelzgeschweißt	neu	0,04–0,10
Stahlrohre	verzinkt	0,125
	schmiedeeisern	0,05
	isoliert	0,05
	unisoliert	0,04
Stahlrohre mit Auskleidung	mit Bitumen	0,05
	bitumiert	0,02–0,20
	mit Zementmörtelauskleidung	0,18
Stahlrohre in längerer Benutzung	mäßig verrostet/leicht verkrustet	0,15–0,20
	leicht verkrustet, geringe Ablagerungen	1,50
	stark verkrustet	2,00–4,00
	bitumiert, Bitumen teilweise gelöst,	
	Roststellen	0,10
	Mittelwerte für Kaltwasserleitungen	0,40–1,20
	Kaltwasserleitungen, verkrustet, Rostwarzen	1,50–3,00
	Wasser- und Dampfleitungen, mehrjährig	
	in Betrieb	0,04
	mit Rostnarben ohne Ablagerungen	1,00–0,60
	mäßig korrodiert, geringe Ablagerungen	0,40
	Heißdampf- und Heißwasserleitungen	0,20–0,40
	Sattdampf- und Warmwasserleitungen	0,20
	Kondensatleitungen, periodisch, ohne	
	Reinigung	1,00
Gußrohre	neu, nicht bitumiert und bitumiert	0,10–0,15
	gebraucht, geringe Ablagerungen	1,00–1,50
	gebraucht, nach 5–10 Jahren Betrieb	3,00–4,50
	unisoliert	0,25
Schleudergußrohre Rohre	isoliert	0,125
	isoliert	0,05
	mit Zementisolierung, geschleudert	0,01
	mit Bitumenisolierung, geschleudert	0,01
	mit Zementnachisolierung	0,5

Werkstoff	Zustand	Rauhigkeit k [mm]
Asbestzementrohr	unisoliert, ungestrichen	0,025
	isoliert	0,01
Spannbetonrohr		0,04–0,25
Betonrohr	neu, handelsüblich gestrichen	0,30–0,80
	handelsüblich, mittelrauh	1,00–2,00
	handelsüblich, rau	2,00–3,00
	Stahlbeton, sorgfältig geglättet	0,10–0,15
	Schleuderbeton, ohne Verputz	0,20–0,80
	Schleuderbeton, mit glattem Verputz	0,10–0,15
	gebraucht, glatter Verputz, mehrjähriger	
	Betrieb mit Wasser	0,20–0,30
	gebraucht, Rohrstrecken ohne Stöße (Mittelwert)	0,20
	gebraucht, Rohrstrecken mit Stößen (Mittelwert)	2,00
Faserzementrohr	DN 50	0,016
	DN 100	0,015
	DN 150	0,013
	DN 200	0,010
	DN 300	0,030
Kupfer, Messing	gebraucht	0,03
Epoxidharzrohre	glasfaserverstärkt	bis 0,0285
	Fabrikat EPOGARD	0,0105
Rohre aus PE und PVC-H	neu, ohne Berücksichtigung der	
	Verbindungen	0,007
	gebraucht	0,003
Rohre aus PVC und PE		0,01
Rohre aus Kunststoff	neu	bis 0,02
	gebraucht	bis 0,03
Rohre aus UP-GF		0,01

Anhang 5: Bestimmung Rohrreibungsbeiwert

hydraulisch glatte Rohre	hydraulisch raue Rohre	Rohre im Übergangsgebiet
Bedingung: $\text{Re} \cdot \frac{k}{d} < 65$	Bedingung: $\text{Re} \cdot \frac{k}{d} > 1300$	Bedingung: $65 < \text{Re} \cdot \frac{k}{d} < 1300$
– von BLAUSIUS für $2320 < \text{Re} < 100000$	– von NIKURADSE	– von PRANDTL- COLEBROOCK
$\lambda = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg\left(\frac{d}{k}\right) + 1,14$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg\left[\frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{d} \cdot 0,269\right]$
– von NIKURADSE für $100000 < \text{Re} < 5000000$	– von MOODY	
$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot \text{Re}^{-0,237}$	$\lambda = 0,0055 + 0,15 \cdot \left(\frac{k}{d}\right)^{1/3}$	
– von PRANDTL und v. KARMAN für $\text{Re} > 1000000$	– von SCHIFFRINSON für $\text{Re} \cdot \frac{k}{d} > 1700$	
$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg(\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda} - 0,8)$	$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k}{d}\right)^{0,25}$	
	– nach (Fratzscher et al. 1982)	
	$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k}{d} + \frac{68}{\text{Re}}\right)^{0,25}$	

Anmerkungen: Unter Einhaltung eines kleineren Fehlers im gesamten Bereich der turbulenten Strömung kann nach (Munser 1980) iterativ über eine Gleichung der Rohrreibungsbeiwert berechnet werden. Ebenfalls gilt nach (KSB 1989) für die turbulente Strömung im Bereich $2320 < \text{Re} < 10^8$ die empirische Gleichung von ECK mit

$$\lambda = \frac{0,309}{\left(\lg\left(\frac{\text{Re}}{7}\right)\right)^2}.$$

Unterschrift/Datum:
 Leiter Bearbeiter

Elementspezifika:

Rohrleitung:	Verlegeart	Bauteil	
	- nicht spezifiziert	☐ Rohr	☐
	- konventionell	☐ Bogen/Formstück	☐
	- Kunststoffmantelrohr	☐ Kompensator	☐
	- Stahlmantelrohr	☐ Schweißnaht	☐
	- Sockel/Stütze	☐ Mantelrohr	☐
	- Kanal	☐ Muffe	☐
	- Flex ...	☐ Schaum	☐
	- Lebit	☐	
	- GFK	☐	

Armatur:	Armaturenbauart	Einbauort	
	- Armatur allgemein	☐ Bauwerk	☐
	- Klappe	☐ Station	☐
	- Ventil	☐ Erdreich	☐
	- Schieber	☐ Strecke	☐
	- Hahn	☐	
	- Regelarmatur	☐	
	- Entleerung	☐	
	- Entlüftung	☐	
	- Entwässerung	☐	

Bauwerk:	Ausfallgegenstand:	
	- nicht spezifiziert	☐
		☐
		☐
		☐

Elektrotechnik:	Ausfallgegenstand:	
	- nicht spezifiziert	☐
		☐
		☐
		☐

MSR/Leittechnik:	Ausfallgegenstand:	
	- nicht spezifiziert	☐
	- Druckmeßgeräte	☐
	- Temperaturmeßgeräte	☐
	- Wärmezähler	☐
	- Leckwarnsystem	☐
	- Fehlortungen	☐
	- Falscheinstellungen	☐
	- Übertragungsleitung	☐
		☐

Sonstiges:	Ausfallgegenstand:	
	- nicht spezifiziert	☐
	- Pumpen	☐
	- Wärmeübertrager	☐
	- Behälter	☐
		☐
		☐
		☐

Anhang 7: Erfassung von unplanmäßigen Ereignissen – Fernwärme (II)

Fernwärmeversorgungsunternehmen

....., d.

Ereignisprotokoll Nr. /

1.	Ereignis festgestellt am:, ... Uhr durch:			
	Ereignis gemeldet am:, ... Uhr an:			
	Ereignisende am:, ... Uhr			
2.	Ereignisort:			
	Netz-Nr.		Kartenblatt-Nr.	
3.	Ereignisinhalt:			
	Störung ☐	Ausfall ☐	Schaden ☐	Unregelmäßigkeit ☐
4.	Medium:			
	Heizwasser ☐	Dampf ☐	Kondensat ☐	Kälte ☐
5.	Leitungsart:			
	Hauptleitung ☐	Entwässerung/ Entleerung ☐	Be-/Entlüftung ☐	Nebenleitung (z. B. Meßleitung) ☐
6.	Leiterart bezogen auf Medium:	Heizwasser: Vorlauf ☐ Rücklauf ☐ Konstant ☐ alle Leitungen ☐	Dampf: Dampf1 ☐ Dampf2 ☐ Kondensat ☐ alle Leitungen ☐	Kälte: Vorlauf ☐ Rücklauf ☐ alle Leitungen ☐
7.	Auslegungsparameter:			Baujahr:
	DN	PN	Temperatur	
8.	Ereignisentdeckung:			
	nicht spezifiziert ☐	Meldung ☐	Leckverlust ☐	
	Leckwarnsystem ☐	Thermovisionskamera ☐	vorbeug. Instandhaltung ☐	
9.	System:			
	nicht spezifiziert ☐	Primärnetz ☐	Sekundärnetz ☐	
	Druckerhöhungsstation ☐	Beimischstation ☐	Wärmeübertragerstation ☐	
	Verteileranlage ☐	Hausanschlußstation ☐	Gebäudeleitungen ☐	
10.	Ereigniszeiten in Stunden für		Wartezeit auf Reparatur:	
	Außerbetriebnahme:		Inbetriebnahme:	
11.	Versorgungsunterbrechung:			
	Ja ☐	Nein ☐	Zeitraum:	Bereich:
12.	Art der Schadensbehebung:			
	Schadenshöhe:			
	Arbeitskräfteanzahl und -stunden:			
	Schaden durch Dritte:			
13.	verbale Ereignisbeschreibung:			

Unterschrift/Datum:

Leiter

Bearbeiter

Tabelle A7-1 Spezifika für betroffenes Element Rohrleitung

Verlegeart	Bauteil
– nicht spezifiziert	– nicht spezifiziert
– Haubenkanal	– Mediumrohrleitung
– U-Kanal	– PE-Mantel
– Sammelkanal	– Stahlmantelrohr
– Freileitung	...
– Gebäudeleitung	– Formteile
– Stahlmantelrohr	– Flansch
– Asbestzementrohr	...
– Kunststoffmantelrohr	– Dehnungsbögen
– Schaum- oder Zellbetonsysteme	– Kompensatoren
– Lebit	– Entlaster
– Schüttssysteme	...
– Sonstige Systeme	– Schweißnähte
	– Dichtungen
	...
	– Muffen
	...
	– Ausschäumung
	– Isolierung mit Blechmantel
	– Stahlmantelrohr-Isolierung
	...
	– Lager
	...

Tabelle A7-2 Spezifika für betroffenes Element Armatur

Bauart	Funktion	Einbauort	Bauteil
– Armatur allgemein	– Absperr-/Stell-	– Bauwerk/Schacht	– nicht spezifiziert
– Klappe	– Regel-	– Gebäude	– Gehäusedichtung
– Ventil	– Rückschlag-	– Station	– Gehäuse
– Schieber	– Drossel-	– Erdreich	– Spindel/Welle
– Hahn	– Sicherheits-		– Stopfbuchse/-packung
– Kondensomat	– Druckminder-		– Abdichtung (innen)
	– Magnet-		– Getriebe

Tabelle A7-3 Spezifika für betroffenes Element Bauwerk

Gegenstand	Bauteil
– nicht spezifiziert	– nicht spezifiziert
– Bauwerk/Schacht	– Decke
– Rohrbrücke	– Wand
– Stütze	– Boden
– Sockel	– Einstieg
– Kanalbauteil	– Zu-/Abluftschacht
	– Abdichtung/Sperrung
	– Leiter/Treppe
	– Auflager
	– Verfüllung

Tabelle A7-4 Spezifika für betroffenes Element Elektrotechnik

Gegenstand	Bauteil
– nicht spezifiziert	– nicht spezifiziert
– Spannungsverteilung	– Gehäuse
– Kabel	– Leitungseinführung
– Schutzeinrichtung	– Klemmstelle
– Transformator	– Schiene
– Motor	– Schalter
– Antrieb	...
	– Isolation
	– Muffe
	...
	– Überspannungsschutz
	– Erdungsanlage
	...
	– Wicklung
	– Kern
	...
	– Statorwicklung
	– Rotorwicklung mit Welle
	...
	– Getriebe
	– Lager
	...

Tabelle A7-5 Spezifika für betroffenes Element MSR/Leittechnik

Gegenstand	Bauteil
– nicht spezifiziert	– nicht spezifiziert
– Druckmeßgerät	– Impulsentnahme
– Temperaturmeßgerät	– Gehäuse
– Mengenmeßgerät	– Ferngeber, Kontakteinrichtung
– Wärmezähler	– Übertragungsleitung
– Leckwarnsystem	– Netzteil
– Antrieb	– Dauerüberwachungsgerät
– Meßkarte	– Erdkabel
– Computer	– Indikator Kupfer
	– Indikator Messing
	– Meßdose
	– Meßleitung
	– Ortungsschalter
	– Schachtindikator
	– T-Adapter
	...
	– Stellungsanzeige
	– Endlagenschalter
	– Wegschalter
	– Drehmomentenschalter
	...
	– Computer
	...

Tabelle A7-6 Spezifika für betroffenes Element Sonstiges

Gegenstand	Bauteil
– Behälter	– nicht spezifiziert
– Pumpen	– Flansch
– Wärmeübertrager	– Boden/Deckel
– Schlammtopf	– Mantel
	– Schweißnaht
	– Dichtung
	– Pumpenwelle
	– Pumpenlaufrad
	– Kupplung
	– Stopfbuchse
	– Gleitringdichtung
	– Gehäuse
	...
	– Plattentauscherelement
	– Rohrbündel
	...

Anhang 8: Erfassung von unplanmäßigen Ereignissen – Wasser

Wasserversorgungsunternehmen

....., d.

Ereignisprotokoll Nr. /

1.	Ereignis festgestellt am: Uhr durch: Ereignis gemeldet am: Uhr an: Ereignisende am: Uhr																				
2.	Ereignisort: Netz-Nr. <table border="1" style="display: inline-table; width: 100px; height: 15px;"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table> Kartenblatt-Nr. <table border="1" style="display: inline-table; width: 100px; height: 15px;"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>																				
3.	Ereignisinhalt: Störung ☐ Ausfall ☐ Schaden ☐ Unregelmäßigkeit ☐																				
4.	Leitungsart: Hauptleitung ☐ Entleerung ☐ Be-/Entlüftung ☐ Nebenleitung (z. B. Meßleitung) ☐																				
5.	Auslegungsparameter: DN <table border="1" style="display: inline-table; width: 100px; height: 15px;"></table> PN <table border="1" style="display: inline-table; width: 100px; height: 15px;"></table> Baujahr: <table border="1" style="display: inline-table; width: 100px; height: 15px;"></table>																				
6.	Ereignisentdeckung: nicht spezifiziert ☐ Meldung ☐ Wasserverlust ☐ Wasseraustritt ☐ vorbeug. Instandhaltung ☐																				
7.	System: nicht spezifiziert ☐ Fernleitung ☐ Zubringerleitung ☐ Hauptleitung ☐ Versorgungsleitung ☐ Anschlußleitung ☐ Druckerhöhungsstation ☐ Druckminderstation ☐																				
8.	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"> Innenkorrosionsschutz: ohne Innenschutz ☐ Zink ☐ Bitumen getaucht ☐ Emaille ☐ Bitumen beschichtet ☐ Zementmörtel ☐ Kunststoff ☐ </td> <td style="width: 50%;"> Außenkorrosionsschutz: ohne Außenschutz ☐ Zink mit Bitumen getaucht ☐ Deckbeschichtung ☐ Bitumen beschichtet ☐ Anstrich ☐ Zementmörtel ☐ Emaillierung ☐ Kunststoff ☐ </td> </tr> </table>	Innenkorrosionsschutz: ohne Innenschutz ☐ Zink ☐ Bitumen getaucht ☐ Emaille ☐ Bitumen beschichtet ☐ Zementmörtel ☐ Kunststoff ☐	Außenkorrosionsschutz: ohne Außenschutz ☐ Zink mit Bitumen getaucht ☐ Deckbeschichtung ☐ Bitumen beschichtet ☐ Anstrich ☐ Zementmörtel ☐ Emaillierung ☐ Kunststoff ☐																		
Innenkorrosionsschutz: ohne Innenschutz ☐ Zink ☐ Bitumen getaucht ☐ Emaille ☐ Bitumen beschichtet ☐ Zementmörtel ☐ Kunststoff ☐	Außenkorrosionsschutz: ohne Außenschutz ☐ Zink mit Bitumen getaucht ☐ Deckbeschichtung ☐ Bitumen beschichtet ☐ Anstrich ☐ Zementmörtel ☐ Emaillierung ☐ Kunststoff ☐																				
9.	Ereigniszeiten in Stunden für Leckortung: Wartezeit auf Reparatur: Außerbetriebnahme: Reparatur: Inbetriebnahme:																				
10.	Versorgungsunterbrechung: Ja ☐ Nein ☐ Zeitraum: Bereich:																				
11.	Art der Schadensbehebung: Schadenshöhe: Arbeitskräfteanzahl und -stunden: Schaden durch Dritte:																				
12.	verbale Ereignisbeschreibung:																				

Unterschrift/Datum:

.....
Leiter

.....
Bearbeiter

Tabelle A8-1 Spezifika für betroffenes Element Rohrleitung

Verlegeverfahren	Bauteil
– nicht spezifiziert	– nicht spezifiziert
– Grauguß	– Mediumrohrleitung
– duktiles Guß	– Formteile
– Stahl	– Dehnungsbögen
– Asbestzement	– Kompensatoren
– Spannbeton	– Schweißverbindung
– Stahlbeton	– Flanschverbindung
– PVC-U	– Steckmuffe
– PVC-C	– Schraubmuffe
– PE-HD	– Stopfbuchsmuffe
– PE-LD	– Stemmuffe
– Sonstige (Kupfer, Blei, PP)	– Reka-Kupplung
	– Glockenmuffe
	– Schweißmuffe
	– Klemmverbindung
	– Klebeverbindung
	– ...
	– Lager
	– ...

Tabelle A8-2 Spezifika für betroffenes Element Armatur

Bauart	Funktion	Einbauort	Bauteil
– Armatur allgemein	– Absperr-/Stell-	– Bauwerk/Schacht	– nicht spezifiziert
– Klappe	– Regel-	– Gebäude	– Gehäusedichtung
– Ventil	– Rückschlag-	– Station	– Gehäuse
– Schieber	– Drossel-	– Erdreich	– Spindel/Welle
– Hahn	– Sicherheits-		– Stopfbuchse/-packung
– Membranarmatur	– Druckminder-		– Abdichtung (innen)
– Ringkolbenventil			– Getriebe
– Anbohrarmatur			
– Hydrant			

Tabelle A8-3 Spezifika für betroffenes Element Schacht

Gegenstand	Bauteil
– nicht spezifiziert	– nicht spezifiziert
– Bauwerk/Schacht	– Decke
– Rohrbrücke	– Wand
	– Boden
	– Einstieg
	– Zu-/Abluftschacht
	– Abdichtung/Sperrung
	– Leiter/Treppe
	– Auflager
	– Verfüllung

Tabelle A8-4 Spezifika für betroffenes Element Elektrotechnik

Gegenstand	Bauteil
– nicht spezifiziert	– nicht spezifiziert
– Spannungsverteilung	– Gehäuse
– Kabel	– Leitungseinführung
– Schutzeinrichtung	– Schalter
– Motor	...
– Antrieb	– Überspannungsschutz
	– Erdungsanlage
	...
	– Statorwicklung
	– Rotorwicklung mit Welle
	...
	– Getriebe
	– Lager
	...

Tabelle A8-5 Spezifika für betroffenes Element MSR/Leittechnik

Gegenstand	Bauteil
– nicht spezifiziert	– nicht spezifiziert
– Druckmeßgerät	– Impulsentnahme
– Temperaturmeßgerät	– Gehäuse
– Mengenmeßgerät	– Ferngeber, Kontakteinrichtung
– Wasserzähler	– Übertragungsleitung
– Antrieb	– Netzteil
– Meßkarte	– Schachtindikator
– Computer	...
	– Stellungsanzeige
	– Endlagenschalter
	– Wegschalter
	– Drehmomentenschalter
	...

Tabelle A8-6 Spezifika für betroffenes Element Sonstiges

Gegenstand	Bauteil
– Behälter	– nicht spezifiziert
– Pumpen	– Flansch
	– Boden/Deckel
	– Mantel
	– Schweißnaht
	– Dichtung
	– Pumpenwelle
	– Pumpenlaufrad
	– Kupplung
	– Stopfbuchse
	– Gleitringdichtung
	– Gehäuse
	...

Anhang 9: Betriebs- und Ausfallraten für Elemente von Fernwärmesystemen

Tabelle A9-1 Ausfallraten einzelner Elemente nach (Takaisvili u. Chasilov 1972)

Element	Ausfallrate λ [10^{-6} h^{-1}]
Abschnittsschieber	0,15– 1,50
Pumpenanlagen	3,00–30,00
Wärmetauscher	2,00–20,00
Druck- und Durchsatzregler	1,00– 5,00

Tabelle A9-2 Näherungswerte für Ausfallcharakteristika für die Elemente Rohrleitung (bezogen auf 1 km) und Armatur nach (Klee 1976)

DN	Ausfallrate λ		Ausfalldauer T_A			
	[1/a]		[h]			
	Rohrleitung	Armatur	Rohrleitung		Armatur	
			Kanal	Sockel/Stütze	Kanal	Sockel/Stütze
200	0,10	0,010	50	20	12	12
400	0,02	0,005	50	20	20	15
600	0,01	0,005	100	50	30	20
800	0,01	0,002	150	70	50	40

Tabelle A9-3 Ausfallratenansätze entsprechend Verlegeart nach (Soucek 1988)

Verlegeart	Ansatz	Näherungswerte [$10^{-6} \text{ km}^{-1} \text{ h}^{-1}$]
freiverlegt	$\lambda = \frac{a \cdot D}{\Delta \cdot l}$	$0,59 \leq a \leq 0,70$
kanalverlegt	$\lambda = b \cdot l$	$43 \leq b \leq 45$

D Außendurchmesser [mm], Δ Wandstärke [mm], l Rohrleitungslänge [km]

Tabelle A9-4 Angaben zu einzelnen Ausfallraten nach (Soucek 1988)

Element	Ausfallrate λ [10^{-6} h^{-1}]
Armaturen CSFR	$1,9 \leq \lambda \leq 4,6$
Armaturen (GUS-Staaten)	$1,0 \leq \lambda \leq 1,5$
Pumpen	$3,0 \leq \lambda \leq 30,0$
Wärmeübertrager	$2,0 \leq \lambda \leq 20,0$

Tabelle A9-5 Betriebs- und Ausfallzeiten ausgewählter Elemente nach (Hausdorf 1989)

Element	Betriebszeit T_B [h/100 km]	Ausfallzeit T_A [h]
Rohrleitung	1800	20
Meßeinrichtung	5000	5
Armatur	5000	15
Pumpe	5000	15

Tabelle A9-6 Ausfallraten eines analysierten Fernwärmesystems nach (Maruschky 1989)

Trasse	untersuchte Länge [m]	Ausfallrate λ [1/(a km)]	
		Rohrleitung	Armatur
Teilsystem 1	11605	0,015	0,001
Teilsystem 2	3829	0,021	0,001

Tabelle A9-7 Angaben einzelner Ausfallraten nach (Werner et al. 1989b)

Element	Ausfallrate λ	Maßeinheit
Rohrleitungen (DN 300–1200)	0,12	$10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Schieber	0,228	a^{-1}
Sicherheitsventil	0,88	10^{-2} a^{-1}
Rohrleitung $\geq$ DN 800	0,5	$10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Rohrleitung Heißwasser (DN 200–600)	0,356	$10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Schieber Heißwasser (DN 50–800)	0,4344	10^{-2} a^{-1}
Rohrleitung Heißwasser (DN 50–800)	0,477	$10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Rohrleitung Dampf (DN 50–700)	0,2743	$10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Schieber Heißwasser (DN 50–800)	0,7134	10^{-3} a^{-1}
Schieber Dampf (DN 50–700)	0,5804	10^{-3} a^{-1}
Rohrleitung	0,1182	$10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Schieber	0,1879	10^{-2} a^{-1}
Rohrleitung Heißwasser	0,402	$10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Schieber Heißwasser	0,253	10^{-2} a^{-1}

Tabelle A9-8 Ausfallraten für einen Zeitraum von 13 Jahren nach (Werner et al. 1989b)

DN	Ausfallraten für System	Schieber	Rohrleitung
50	0,00012626	0	0,000667
80	0,00003637	0	0,000070
100	0,00021505	0,00061	0,001306
125	0,00008528	0	0,000315
150	0,00015654	0,00127	0,001185
200	0,00011561	0,00140	0,000703
250	0,00001126	0,00694	0,000060
300	0,00003693	0,00320	0,000357
350	0,00001599	0,00115	0,000125
400	0,00005165	0,06250	0,000223
500	0,00002254	0,00138	0,000140

Literatur

- AGFW (1986) Hausanschlüsse an Fernwärmenetze. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt
- AGFW (1989) Richtlinien für die Festigkeitsberechnung von Fernwärmeleitungen. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt
- AGFW (1993a) Bau von Fernwärmenetzen. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt
- AGFW (1993b) AGFW-Rohrnetzstatistik 1991. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt
- AGFW (1997a) Arbeitsblatt FW 401: Verlegung und Statik von KMR für Fernwärmenetze (Gelbdruck). Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt
- AGFW (1997b) Hinweis FW 439: KMR-Schadensstatistik 1996. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt
- AGFW (1998) Neuartige Techniken und Bauweisen für die Fernwärmeverteilung unter Ausnutzung statischer Grenzbereiche, neue Werkstoffe und verbesserter Verlegetechnik. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt
- AGFW (1999a) Arbeitsblatt FW 401: Verlegung und Statik von KMR für Fernwärmenetze (Weißdruck). Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt
- AGFW (1999b) KMR-Schadensstatistik 1997. Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH, Frankfurt
- Ahlers M et al. (1993) Daten und Informationen zu Wasserinhaltsstoffen. Vulkan-Verlag, Essen
- Albring W (1978) Angewandte Strömungslehre. Akademie-Verlag, Berlin
- Altenbrand E (1998) Armaturen in der Wasserversorgung. Verlag Moderne Industrie
- Andersson StG (1981) Fernheizrohrleitungen und Schäden in schwedischen Fernheizleitungen zwischen 1968 und 1978. 3R international 20:603–608
- Autorenkollektiv (1968) Störungsstatistik in der Energieversorgung – Aufgaben, Methodik und Auswertung. Energietechnik 18:342–349
- Autorenkollektiv (1983) Kleine Enzyklopädie – Mathematik. VEB Bibliographisches Institut, Leipzig
- Autorenkollektiv (1986) Darstellung einer neuen, wassersparenden Entleerungstechnologie für Heißwassernetze. Energietechnik 36:55–58
- Baeckmann v W et al. (1989) Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. Theorie und Praxis der elektrochemischen Schutzverfahren. VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim Basel Cambridge New York
- Baeckmann v W (1996) Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. Vulkan-Verlag, Essen
- Baeckmann v W, Jacob R (1995) Korrosionsschutz von Gas- und Wasserleitungen. Vulkan-Verlag, Essen
- Bär M et al. (1987) Leistungsfähigkeit, Qualität, Zuverlässigkeit. VEB Verlag für Verkehrswesen transpress, Berlin
- Balfanz HP (1971) Bestimmung von Ausfallraten und Ausfallarten mechanischer und elektrischer Bauteile mit der Fehlerbaummethode und der Ausfalleffektanalyse. Kerntechnik 13: 392–399
- Balfanz HP (1973) Ausfallratensammlung. Institut für Reaktorsicherheit. IRS-W-8

- Bamberg G et al. (1985) Statistik. Oldenbourg-Verlag, München Wien
- Barlow R, Proschan F (1978) Statistische Theorie der Zuverlässigkeit – Wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle. Akademie-Verlag, Berlin
- Bartholomé G et al. (1996) Leck-vor-Bruch-Verhalten von Rohrleitungen. Technische Überwachung 37:44–49
- Batov S, Schuschulov K (1986) Modellierung der Zuverlässigkeit von Fernwärmenetzen. Energietechnik 36:7–9
- Bauch H (1981) Zur numerischen Bewertung der Zuverlässigkeit von Elektroenergiesystemen und Netzen. Energietechnik 31:1–5
- Bauer H (1975) Die Gefährdung unter Berücksichtigung der Fehlerbereitschaft. Energietechnik 25:551–556
- Beckmann G (1976) Zuverlässigkeits- und Instandhaltungsmodelle für Systeme mit weibullverteilter Funktionsdauer. Akademie der Wissenschaften, Berlin
- Beckmann G, Marx D (1988) Instandhaltung von Anlagen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- Behrens H-J et al. (1999) Rohrleitungstechnik. Vulkan-Verlag, Essen
- Beichelt F, Franken P (1983) Zuverlässigkeit und Instandhaltung. VEB Verlag Technik, Berlin
- Beichelt F (1988) Zuverlässigkeit strukturierter Systeme. Reihe Automatisierungstechnik 229. VEB Verlag Technik, Berlin
- Beinling D et al. (1988) Analyse des Störungs- und Ausfallgeschehen in den Elektroenergieerzeugungs- und Wärmeversorgungsanlagen des VEB Energiekombinate und im Bereich nichtöffentlicher Wärmeversorgung 1987 (72-0059-(1988)BE). VEB Ingenieurbetrieb der Energieversorgung, Berlin
- Beneke H (1992) Lexikon der Korrosion und des Korrosionsschutzes. Vulkan-Verlag, Essen
- Beresin IS, Shidkow NP (1970) Numerische Methoden I. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin
- Bernhardt K (1972) Beitrag zur Aufbereitung und Auswertung statistischer Daten der Störungs- und Schadensstatistik eines Elektroenergiesystems. Dissertation TU Dresden
- Bernhardt K (1974) Zur Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren in der Störungstatistik. Energietechnik 24:358–363
- Bernhardt K (1980) Die Störungstatistik der Elektroenergieversorgung als Datenrückmeldesystem – Grundlagen, Grenzen und Erfahrungen. Energietechnik 30:151–156
- Bernstein W et al. (1988) Wärmetransport über große Entfernungen durch verzweigte Heißwasser-Transitsysteme in der DDR. Energietechnik 38:361–369
- Bertsche B, Lechner G (1990) Zuverlässigkeit im Maschinenbau – Ermittlung von Bauteil- und Systemzuverlässigkeit. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Besier R (1996) Rohrverbindungen an Kunststoff-Mantelrohren im Rahmen des Baus von Fernwärmanlagen. Jahrbuch Euroheat & Power Fernwärme international 82–88
- Besier R (1998) Schäden an Fernwärmeleitungen und Maßnahmen zu deren Vermeidung. 3R international 37:197–201
- Beyer K (1995) Instandsetzung und Erneuerung von Rohrleitungen – technische und wirtschaftliche Aspekte. 3R international 34:29–34
- Beyer O (1966) Über ein Modell zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Systemen. Dissertation TU Magdeburg
- Beyer O et al. (1988a) Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik. Reihe Mathematik für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Ökonomen und Landwirte 17. BSB B G Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig
- Beyer O et al. (1988b) Stochastische Prozesse und Modelle. Reihe Mathematik für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Ökonomen und Landwirte 19/1. BSB B G Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig
- Birolini A (1985) Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo

- Birolini A (1991) Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest
- Bode W (1974) Störungen in der Druckhaltung von Heizwassernetzen. *Energietechnik* 23:39–42
- Böhm A (1993) Betrieb, Instandhaltung und Erneuerung von Wasserleitungen. Vulkan-Verlag, Essen
- Böhme A et al. (1996) Handbuch für Rohrnetzmeister. Oldenbourg-Verlag, München Wien
- Böhmer P, Elsner N (1971) Ein Beitrag zur optimalen Dimensionierung unvermischter Rohrnetze. *Energietechnik* 21:222–228
- Bohl W (1984) Technische Strömungslehre. VEB Fachbuchverlag, Leipzig
- Bonfig KW (1986) Technische Durchflußmessung. Vulkan-Verlag, Essen
- Bornschein M et al. (1977) Beitrag zur Erfassung, Bewertung und Beeinflussung der Zuverlässigkeit in der chemischen Industrie. Dissertation TU Magdeburg
- Brandes B (1992) Trau, schau, wem. *Energiespektrum* 26–33
- Brandes B (1994) Sicherheit durch Entscheidungsfreiheit. *Fernwärme international* 23:689–695
- Bretthauer G (1985) Einfluß der Teilausfälle auf die Ausfallwahrscheinlichkeit von Kraftwerksblöcken. *Messen-Steuern-Regeln* 28:152–154
- Bronstein IN, Semendjajew KA (1987) Taschenbuch der Mathematik. Verlag Nauka und BSB B G Teubner Verlagsgesellschaft, Moskau Leipzig
- Bruhn J (1986) Statistische Verfahren – Datenanalyse mit BASIC-Programmen. Vieweg-Verlag, Braunschweig Wiesbaden
- Brune W (1975) Die Interpretation der Verfügbarkeit von Kraftwerksanlagen als Wahrscheinlichkeit. *Energietechnik* 25:546–550
- Brussig P (1990) Betriebserfahrungen mit erdverlegten Wasserleitungen im Bezirk Dresden. *3R international* 29:19–24
- Buch A (1983) Fernwärme – Stand und Entwicklungsaussichten in der Bundesrepublik Deutschland. Resch-Verlag, Gräfelfing/München
- Castell-Exner et al. (1998) Taschenbuch der Wassergewinnung. Vulkan-Verlag, Essen
- Cox DR (1966) Erneuerungsprozesse. Oldenbourg-Verlag, München Wien
- D'Ans Lax (1967) Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Dhillon BS (1988) Zuverlässigkeitstechnik – Einfluß des Menschen. VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim
- Dierich P (1976) Ein Näherungsansatz zur Bestimmung von Ausfallcharakteristiken für komplexe Baugruppen und Anlagen. Dissertation IH Zittau
- Dietrich G, Stahl H (1977) Matrizen und Determinanten und ihre Anwendung in der Technik und Ökonomie. VEB Fachbuchverlag, Leipzig
- DIN TB 9 (1998) DIN-Taschenbuch. Gußrohrleitungen. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 12 (1995) DIN-Taschenbuch. Wasserversorgung 1. Wassergewinnung, Wasseruntersuchung, Wasseraufbereitung. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 15 (1994) DIN-Taschenbuch. Stahlrohrleitungen 1: Maße und technische Lieferbedingungen. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 62 (1997) DIN-Taschenbuch. Wasserversorgung 2. Faserzement-, Stahlbeton- und Stahlrohre für Wasserleitungen. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 63 (1993) DIN-Taschenbuch. Wasserversorgung 3. Rohrnetz und Zubehör. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 141 (1996) DIN-Taschenbuch. Stahlrohrleitungen 2: Planung und Konstruktion. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 142 (1996) DIN-Taschenbuch. Stahlrohrleitungen 3: Zubehör und Prüfungen. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 143 (1995) DIN-Taschenbuch. Korrosionsschutz von Stahl durch Beschichtungen und Überzüge 1. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 160 (1997) DIN-Taschenbuch. Wasserversorgung 4. Rohre, Formstücke und Zubehör für Wasserleitungen. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich

- DIN TB 168 (1995) DIN-Taschenbuch. Korrosionsschutz von Stahl durch Beschichtungen und Überzüge 2. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 182 (1998) DIN-Taschenbuch. Industriearmaturen. Grundnormen. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 211 (1996) DIN-Taschenbuch. Wasserwesen, Begriffe. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 219 (1995) DIN-Taschenbuch. Korrosion und Korrosionsschutz. Beurteilung, Prüfung, Schutzmaßnahmen. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 266 (1997) DIN-Taschenbuch. Korrosionsschutz von Stahl durch Beschichtungen und Überzüge 3. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 271 (1997) DIN-Taschenbuch. Heiztechnik 8: Fernwärme, Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 281 (1997) DIN-Taschenbuch. Heiztechnik 9: Fernwärme, Anschluß- und Kundenanlagen, Wärmeverrechnung. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- DIN TB 288 (1998) DIN-Taschenbuch. Industriearmaturen. Bauart- und Gebrauchstauglichkeitsnormen. Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- Dötsch C et al. (1998) Leitfaden Nahwärme. UMSICHT-Schriftenreihe 6. Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart
- Dressler E et al. (1975) Ergebnisse einer Zuverlässigkeitsanalyse bei der Verwendung unterschiedlicher Ausfallraten. Atomwirtschaft 20:294–295
- Dudlik A, Schlüter S (1998) Druckstöße und Kavitationsschläge infolge schnell schließender Armaturen. Industriearmaturen 6:195–200
- DVGW (1996) Wassergewinnung und Wasserwirtschaft, Bd. 1. Vulkan-Verlag, Essen
- DVGW (1998) Wassertransport und -verteilung. Vulkan-Verlag, Essen
- Edwin KW, Nachtkamp J (1975) Ein Beitrag zur statistischen Ermittlung des Betriebsverhaltens wichtiger Komponenten der elektrischen Energieversorgung. ETZ-A 96:543–548
- Edwin KW, Traeder G (1978) Zuverlässigkeitsberechnungen für Systeme und Komponenten der elektrischen Energieversorgung mit nichtkonstanten Ausfall- und Instandsetzungsraten. ETZ-A 99:471–475
- Edwin KW (1986) Zuverlässigkeitsberechnungen elektrischer Energieversorgungssysteme. Forschungsbericht des BMFT, T86-185
- Effenberger H, Schäfer W (1971) Ein mathematisches Modell zur Bestimmung einer optimalen Verfügbarkeit für einen Kraftwerksblock bzw. für ein Kraftwerk. Energietechnik 21:9–14
- Elsner N et al. (1982) Thermophysikalische Stoffeigenschaften von Wasser. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- Enkel P, Garms J (1997) Druckstoßanalysen unter Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung. 3R international 36:446–451
- Esslinger J (1996) Untersuchungen zum Einsatz von GuD-Anlagen in Einwellenausführung im unteren Leistungsbereich. Diplomarbeit, TH Zittau
- Etzold A (1964) Technische Zuverlässigkeit in Einzeldarstellungen. Oldenbourg-Verlag, München
- Falk D, Harms W (1998) Beschreibung zur Anwendung – Fernwärme-Rohrnetzschadensstatistik. Stadtwerke Kiel AG
- Fellmann W (1992) Darstellung der komplexen Instandhaltungsstrategie des Fernwärmenetzes Berlin-Ost unter den Bedingungen des Zweileiter-Systems
- Fersch F (1964) Zufallsabhängige Wirtschaftsprozesse – Grundlagen und Anwendungen der Theorie der Wartesysteme. Physica-Verlag, Wien Würzburg
- Fisch NM, Kübler (1991) Wärmespeicher. Verlag TÜV Rheinland, Köln
- Fischer K (1984) Zuverlässigkeits- und Instandhaltungstheorie. VEB Verlag für Verkehrswesen, transpress, Berlin
- Fratzscher W et al. (1982) Energiewirtschaft für Verfahrenstechniker. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

- Franke K (1983) Einordnung industrieller Elektroenergieabnehmeranlagen in Zuverlässigkeitsgrade. *Energietechnik* 33:384–387
- Frey H (1973) Computerorientierte Methodik der Systemzuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse angewandt auf komplexe, technische Systeme. Dissertation, ETH Zürich
- Frey H (1988) Zuverlässigkeitsplanung am Beispiel von Leitsystemen. *Qualität und Zuverlässigkeit* 33:241–246
- Fuchs HV, Frommhold W (1988) Senkung der Wasserverluste durch wirkungsvolle Leckortung. *Technische Überwachung* 29:328–332
- FWT (1992) FW-Fernwärme-Technik GmbH, Isernhagen
- Gaede KW (1977) Zuverlässigkeit – Mathematische Modelle. Carl Hanser Verlag, München
- Gellert W et al. (1979) Lexikon der Mathematik. VEB Bibliographisches Institut, Leipzig
- GF (1996) Georg-Fischer-Rohrleitungssysteme für Industrie und Versorgung. Anwendungstechnik
- Glück B (1978) Druckverlusttabellen – Wasserheizungsanlagen. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- Glück B (1985) Heizwassernetze für Wohn- und Industriegebiete. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- Glück B (1988) Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung. Druckverluste. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- Gnedenko BW et al. (1968) Mathematische Methoden der Zuverlässigkeitstheorie I. Akademie-Verlag, Berlin
- Gnedenko BW, König D (1983) Handbuch der Bedienungstheorie I – Grundlagen und Methoden. Akademie-Verlag, Berlin
- Goldstein W (1963) Dampfspeicheranlagen. Springer-Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg
- Grombach P et al. (1998) Handbuch der Wasseraufbereitungstechnik. Vulkan-Verlag, Essen
- Groth L (1985) Kondensat. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- Gruhn G, Kafarov VV (1979) Zuverlässigkeit von Chemieanlagen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- Gruhn G et al. (1987) Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden, Teil 6: Verfahren und Anlagen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- Guérhard v HW (1977) Monte-Carlo-Simulation technischer Zuverlässigkeit. *Qualität und Zuverlässigkeit* 22:121–124
- Hacker W (1986) Menschliche Zuverlässigkeit durch mehr oder durch weniger Automatisierung? *Energietechnik* 36:241–244
- Härtler G (1983) Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse. VEB Verlag Technik, Berlin
- Hammer F (1996) Long Distance Transmission of District Heat. *Euroheat & Power Fernwärme international* 25:655–658
- Hampel H (1972) Rohrleitungsstatik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Harders V (1993) Das Stahlmantelrohrsystem in der Fernwärmeverversorgung. *Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule Architektur und Bauwesen Weimar* 39:63–72
- Hausdorf M (1989) Analytische Untersuchungen zur Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie auf das technische System Wärmefortleitung. Diplomarbeit HAB Weimar
- Heidmann K (1997) Zuverlässigkeitsbewertung technischer Systeme. Teubner-Verlag, Stuttgart
- Heinrich G (1993) Zuverlässigkeit komplexer Systeme. Dissertation, Uni Hohenheim
- Heinz K (1969) Mathematisch-statistische Untersuchungen über die ERLANG-Verteilung. Westdeutscher Verlag, Köln Opladen
- Herbrik R (1993) Energie- und Wärmetechnik. Teubner-Verlag, Stuttgart
- Hergarten A et al. (1997) Mobile Lecksuche mit gelösten Tracern ohne Versorgungsunterbrechung. *3R international* 36:290–294
- HEW (1988) Hamburgs größte Fernwärme-Transportleitung. Hamburg
- Hirner W, Poß C (1992) Ziele, Ergebnisse und Konsequenzen aus zehnjähriger Tätigkeit in der Erneuerung von Rohrnetzen. *3R international* 31:39–45

- Hoch W (1986) Zuflußanalyse in großen Wasserversorgungssystemen. 3R international 25:56–64
- Hofer P (1994) Planung der langfristigen Erneuerung von Wasserrohrnetzen. 3R international 33:19–25
- Hoffmann HW et al. (1988) Schadensanalyse und Reparaturtechniken für Fernwärmenetze. 3R international 27:655–663
- Hömig HE (1991) Metall + Wasser. Eine Einführung in die Korrosionskunde. Vulkan-Verlag, Essen
- Hömke P (1975) Der Modellfall IRS-RWE zur Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen im praktischen Betrieb, Bericht 16. Institut für Reaktorsicherheit des TÜV, Köln
- Hollan J (1980) Untersuchungen der Zuverlässigkeit und Elastizität von Kraftwerksbaugruppen. Dissertation TU Dresden
- Hrabák J (1980) Ausnutzung von Zuverlässigkeitskennwerten von Kraftwerksblöcken zur Kontrolle der Reserveleistung und der geplanten Reparaturen. Energietechnik 30:325–329
- Hrsg (1987) Fernwärmeleitung Mannheim-Heidelberg
- Hünerberg K (1963) Das Asbestzementdruckrohr. Springer-Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg
- Ibañez J M (1997) Absperrarmaturen in der Wasserversorgung: Gestern, heute und morgen. 3R international 36:100–115
- Irle H-J, Wehr R (1990) Systematische Reduzierung von Wasserverlusten. gwf-Wasser/Abwasser 131:286–292
- Isphording U (1968) Methoden zur Berechnung von Zuverlässigkeitskenngrößen redundant komplexer Systeme. Archiv der elektrischen Übertragung 22:337–342
- Jekel M et al. (1998) Wasseraufbereitungstechnik für Ingenieure. Vulkan-Verlag, Essen
- Jonas K (1986) Fernwärmeauskopplung aus Großkraftwerken über Transportentfernungen größer 50 km. Energietechnik 36:45–48
- Jürgenson v H (1953) Elastizität und Festigkeit im Rohrleitungsbau. Springer-Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg
- Kahle H (1987) Dehnungsinduzierte Rißkorrosion (ϵ -iK) im primären Vorlauf eines Fernwärmenetzes. Energietechnik 37:338–342
- Kamarinopoulos L (1972) Direkte und gewichtete Simulationsmethoden zur Zuverlässigkeitsuntersuchung technischer Systeme. Dissertation TU Berlin
- Kardos J et al. (1986) Zuverlässigkeit und Sicherheit in der Luft- und Kältetechnik. Reihe Luft- und Kältetechnik. VEB Verlag Technik, Berlin
- Kecke H-J et al. (1994) Industrie-Rohrleitungsarmaturen. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Kieselbach G (1998) Die Mechanik der unterirdisch eingebauten Rohrleitung. Vulkan-Verlag, Essen
- Kipping W (1996) Fernwärmeklappen mit formelastischen Dichtungen – Grundlagen und Erfahrungen. 3R international 35:342–353
- Klee H (1976) Ein Beitrag zur Berechnung und Bewertung der Versorgungszuverlässigkeit als Kriterium für die Auslegung von Fernwärmesystemen. Dissertation TU Dresden
- Klee H, Teicher P (1989) Betrachtungen zum Einfluß der Verfügbarkeit der Elemente des Fernwärmeversorgungssystems und der Unterbrechungsdauer bei Störungen auf die Versorgungszuverlässigkeit. Energietechnik 39:352–355
- Kleiser K, Bayer H-J (1996) Der grabenlose Leitungsbau. Vulkan-Verlag, Essen
- Klingner M (1989) Methode zur Berechnung Semi-Markovscher Zuverlässigkeitsmodelle. Messen-Steuern-Regeln 32:397–401
- Kloppel FW (1964) Berechnungsverfahren für die Bestimmung der Versorgungssicherheit in elektrischen Energienetzen. Energietechnik 14:289–296
- Kloppel FW, Rodeck D (1966) Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von elektrischen Energiesystemen. Energietechnik 16:549–552
- Kloppel FW, Schaller D (1968) Schadensorientiertes Verfahren zur Berechnung der Zuverlässigkeit der Elektroenergieversorgung. Energietechnik 18:357–361

- Kloeppe FW, Adler G (1981) Die Versorgungszuverlässigkeit beim Entwurf von Umspannwerken in Abnehmernähe. *Energietechnik* 31:128–136
- Kloeppe FW, Illing F (1988) Zuverlässigkeitsarbeit in Industrienetzen mit PC-gestütztem Zuverlässigkeitsdokument. *Energietechnik* 38: 417–421
- Kloeppe FW et al. (1990) Zuverlässigkeit von Elektroenergiesystemen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie und Verlagsvereinigung Wysschaja Schkola, Leipzig und Kiew
- Kochs HD (1984) Zuverlässigkeit elektrotechnischer Anlagen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo
- Köchel P (1982) Zuverlässigkeit technischer Systeme. VEB Fachbuchverlag, Leipzig
- Köhler R (1995) Tiefbauarbeiten für Rohrleitungen. Müller-Verlag, Köln
- Kohlas J (1987) Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Studienbücher Mathematik 55. Teubner-Verlag, Stuttgart
- Koslow BA, Uschakow IA (1979) Handbuch zur Berechnung der Zuverlässigkeit für Ingenieure. Hanser-Verlag, München Wien
- Kottmann A (1978) Über die Ursachen von Rohrbrüchen in Versorgungsleitungen. Dissertation Uni Stuttgart
- Kottmann A, Schmitt C (1980) Unerklärliche Rohrbrüche – Mögliche Zusammenhänge zwischen Luftblasen, Fließgeschwindigkeit und Rohrbrüchen in Wasserrohrleitungen. *3R international* 19:54–61
- Kottmann A (1984) Luftblasen als Ursache von Rohrbrüchen. *3R international* 23:45–53
- Kottmann A (1990) Wasserwalzen in Rohrleitungen als Ursache für Berstbrüche. *3R international* 29:45–53
- Kottmann A (1992) Druckstoßermittlung in der Wasserversorgung. Vulkan-Verlag, Essen
- Kottmann A (1997) Rohre und Rohrwerkstoffe. Vulkan-Verlag, Essen
- Kraft G (1981) Lehrbuch der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik. Band 1: Heizungstechnik. VEB Verlag Technik, Berlin
- Kröhner P, Ruppert K (1993) Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 1991. *Fernwärme international* 22:323–335
- Kröhner P, Ruppert K (1994) Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 1992. *Fernwärme international* 23:323–332
- KRV (1997) Kunststoffrohr-Handbuch. Vulkan-Verlag, Essen
- KSB (1989) Lexikon Kreiselpumpen. KSB AG, Frankenthal
- Langrock P, Jahn W (1979) Einführung in die Theorie der MARKOWschen Ketten und ihre Anwendungen. BSB B G Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig
- Lauenstein G (1988) Optimierung der zustandsabhängigen Instandhaltung auf der Grundlage der Technischen Diagnostik – aktuelle praktische und theoretische Aufgaben. *Energietechnik* 38:333–337
- LENTJES (1993) Tabellenbuch für den Rohrleitungsbau. LENTJES Anlagen- und Rohrleitungsbau, Ratingen
- Lenz J (1993) Kreuzungstechnik. Vulkan-Verlag, Essen
- Lenz J (1994) Rohrleitungen für das nächste Jahrhundert – Sanierung oder Erneuerung? Vulkan-Verlag, Essen
- Lenz J (1995) Ortung. Vulkan-Verlag, Essen
- Lenz J, John H-J (1996) Ertüchtigung, Sanierung und Erneuerung von Druckrohrleitungen. Vulkan-Verlag, Essen
- Lenz J (1997) Auswirkungen von Betriebserfahrungen auf die Planung und den Bau von Rohrleitungen. Vulkan-Verlag, Essen
- Lévai A (1959) Wärmekraftwerke, Band I: Wirtschaftlichkeitsplanung, Wärmeschaltplan. VEB Verlag Technik, Berlin
- Lindner H (1968) Ökonomische Bewertung der Zuverlässigkeit der Elektroenergieversorgung von Industriebetrieben. *Energietechnik* 18:361–365
- Lindner H (1975) Globalanalyse der Entwicklung der Versorgungszuverlässigkeit von Mittelspannungsnetzen. *Energietechnik* 25:557–563

- Lingnau P (1988) Auswahl von Anlagen, Systemen und Gebäuden mit sicherheitstechnischer Relevanz für Kernheizwerke auf der Grundlage rechnergestützter Zuverlässigkeitsberechnungen. Diplomarbeit TH Zittau
- Loose P (1993) Teillastverhalten von hydraulischen Ringen. *Fernwärme international* 22:24–31
- Ludwig H (1973) Die Verfügbarkeit von Kraftwerksanlagen als zufällig veränderliche Größe. *Energietechnik* 23:511–515
- Maruschky U (1989) Untersuchungen zur Zuverlässigkeit (Stör- und Ausfallgeschehen) von Wärmeversorgungsleitungen des Bezirkes Leipzig. Praktikumsarbeit HAB Weimar
- Mathes K (1998) Erstellung einer Wärmeabsatzprognose für ein städtisches Fernwärmenetz. Diplomarbeit HTWK Leipzig
- Mayr H (1996) Ein Beitrag zur Planung der Rehabilitation von Rohrnetzen. *3R international* 25:71–77
- MBB (1986) Technische Zuverlässigkeit. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Mexis ND, Hennig J (1994) Handbuch Schwachstellenanalyse und -beseitigung. Verlag TÜV Rheinland, Köln
- Michler E (1977) Über die Modellierung der Zuverlässigkeit von Systemen unter besonderer Berücksichtigung technischer Systeme. Dissertation TU Dresden
- Mock R (1994) Auswertung von Betriebserfahrungen deutscher Hochtemperaturreaktoren zur Schätzung von Zuverlässigkeitskenngrößen für Armaturen. Dissertation, Uni Wuppertal
- Mock R (1995) Methoden zur Datenhandhabung in Zuverlässigkeitsanalysen. Hochschulverlag, ETH Zürich
- Moser H (1995) Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik. Band 1: Rohrnetztechnik. Vulkan-Verlag, Essen
- Müller KH (1986) Zuverlässigkeit und Funktionseffektivität komplizierter technischer Systeme. Beiträge zur Forschungstechnologie 12. Akademie-Verlag, Berlin
- Müller PH (1991) Wahrscheinlichkeitsrechnung und Mathematische Statistik. Akademie-Verlag, Berlin
- Munser H (1980) Fernwärmeversorgung. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- Mutschmann J et al. (1997) Taschenbuch der Wasserversorgung. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig/Wiesbaden
- Naber G (1990) Zur Frage der Zuverlässigkeit im Rohrleitungsbau – dargestellt am Beispiel der Bodensee-Wasserversorgung. *3R international* 29:37–44
- Nitsch R, Röttsch D (1990) Beitrag zur Berechnung der Zuverlässigkeit für Fernwärmesysteme. *Energietechnik* 40:126–129
- Nitsch R et al. (1991) Zuverlässigkeitsuntersuchungen des Fernwärmesystems Leipzig (tschechisch). *Energetika* 212–216, Prag
- Obst U et al. (1990) Biotechnologie in der Wasseraufbereitung. Vulkan-Verlag, Essen
- O'Connor PDT (1990) Zuverlässigkeitstechnik – Grundlagen und Anwendung. VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim
- Oelschlägel D et al. (1988) Numerische Methoden. Reihe Mathematik für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Ökonomen und Landwirte 18. BSB B G Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig
- Oude-Hengel HH (1978) Rohrleitungen in Kraftwerken. Verlag TÜV Rheinland, Köln
- Palic M (1998) Nahwärme – ein erfolgversprechendes Geschäftsfeld für Energiedienstleistungsunternehmen? *Euroheat & Power Fernwärme international* 27:36–38
- Pauer W, Munser H (1970) Grundlagen der Kraft- und Wärmewirtschaft. Verlag Theodor Steinkopff, Dresden
- Peters H (1979) Streuung der Zuverlässigkeit von elektrischen Energieversorgungsnetzen. *etw Archiv* 315–319
- Pollvogt U (1988) Instationäre Betriebsverhältnisse in Fernwärmesystemen – Systembelastungen aus Betriebstransienten. Bericht IV.3.8-1/1670-2.88, Rheinisch-Westfälischer TÜV, Essen

- Pollvogt U, Engel C (1989) Thermofluiddynamische Berechnungen instationäre Betriebsverhältnisse in Fernwärmesystemen. Bericht 3.3.5-4/2.1-1/89, Rheinisch-Westfälischer TÜV, Essen
- Preuß W, Schubert H (1982) Praktische Berechnung der augenblicklichen Intervallverfügbarkeit bei nicht exponentiell verteilten Funktions- und Erneuerungszeiten. Messen-Steuern-Regeln 25:190–193
- Profos P, Pfeifer T (1994) Handbuch der industriellen Messtechnik. Vulkan-Verlag, Essen
- Randløv P (1997) Fernwärmehandbuch. European District Heating Pipe Manufactures Association (EuHP), Dänemark
- Rasch D et al. (1978) Verfahrensbibliothek – Versuchsplanung und –auswertung. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin
- Rau V (1995) Qualitätssicherung bei erdverlegten Fernwärmerohrleitungen. Rohrbau-Mitteilung 3:77–80
- Raue M (1990) Bewertung der Strukturzuverlässigkeit industrieller Elektroenergiesysteme mit dem PC-Programm ZUVP. Energietechnik 40:411–415
- Reichl A (1996) Mittel- und Westeuropas größte und längste Fernwärmetransportleitung in Tschechien eröffnet. Euroheat & Power Fernwärme international 25:122–126
- Reinschke K (1972) Zuverlässigkeit von Systemen. Band 1: Systeme mit endlichen Zuständen. VEB Verlag Technik, Berlin
- Reinschke K, Usakov IA (1987) Zuverlässigkeitsstrukturen. VEB Verlag Technik, Berlin
- Reinschke K (1989) Funktionseffektivität und mehrwertige Zuverlässigkeitsmodellierung – Grundkonzepte im Vergleich. 9. Zuverlässigkeitstagung 11./12.05.1989, Leipzig
- Rinne H (1988) Statistische Formelsammlung. Verlag Die Wirtschaft, Berlin
- Risikostudie (1980) Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke 3: Zuverlässigkeitskenngrößen und Betriebserfahrungen. Verlag TÜV Rheinland, Köln
- Risikostudie (1981a) Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke 2: Zuverlässigkeitsanalyse. Verlag TÜV Rheinland, Köln
- Risikostudie (1981b) Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke 2/11; Zuverlässigkeitsanalyse. Verlag TÜV Rheinland, Köln
- Risikostudie (1990) Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke – Phase B. Verlag TÜV Rheinland, Köln
- Rizkallah V et al. (1995) Herstellen und schließen von Leitungsgräben unter Beachtung der Forderungen der ZTV A. Euroheat & Power Fernwärme international 24:643–650
- Rjabinin I (1976) Reliability of Engineering Systems. Mir Publishers, Moscow
- Rötsch D (1987) Die Einbeziehung von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen in die Wärmeleistungsbilanzierung und deren Auswirkungen auf das System Kraftwerk-Fernwärmeleitung. Diplomarbeit TH Zittau
- Rötsch D (1990a) Aufstellung mathematischer Modelle zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärmesystemen. Energietechnik 40:457–460
- Rötsch D (1990b) Auswertung von Störstatistiken für die Gewinnung von Zuverlässigkeitsaussagen in Fernwärmesystemen. Studie WESAG, Leipzig
- Rötsch D (1990c) Berechnung und Bewertung der Verfügbarkeit von Elementen in Fernwärmesystemen. Studie WESAG, Leipzig
- Rötsch D (1992) Beitrag zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärmesystemen. Wissenschaftliche Berichte der TH Zittau 1364/33
- Rötsch D (1993) Beitrag zur Analyse der Zuverlässigkeit in großen Fernwärmesystemen am Beispiel Leipzig. Dissertation TU Dresden
- Rötsch D (1994a) Beitrag zur Analyse der Zuverlässigkeit in Fernwärmesystemen. Fernwärme international 23:476–482
- Rötsch D (1994b) Auswahl und Gegenüberstellung von Modellansätzen zur Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärmesystemen. Fernwärme international 23:602–611
- Rötsch D (1995a) Gewinnung von Daten für die Berechnung der Zuverlässigkeit von Fernwärmesystemen. Fernwärme international 24:56–62

- Rötsch D (1995b) Diskussion von verschiedenen Einflußfaktoren auf die Verfügbarkeit von Fernwärmesystemen. *Fernwärme international* 24:296–305
- Rötsch D (1996) Schwachstellenanalyse für ein Fernwärmesystem – Sinn und Notwendigkeit. *Euroheat & Power Fernwärme international* 25:524–530
- Rötsch D (1997) Berechnung der Verfügbarkeit von Fernwärmesystemen mit dem Programm ZVFW. *Euroheat & Power Fernwärme international* 26:574–582
- Ruppert K (1995) Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 1993. *Euroheat & Power Fernwärme international* 24:380–388
- Ruppert K (1996) Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 1994. *Euroheat & Power Fernwärme international* 25:450–458
- Rypinski P (1995) Ein Stahlmantelrohr-Düker für die Querung der Großwasserstraße Amsterdam-Rijnkanal. *Euroheat & Power Fernwärme international* 24:371–375
- Schaefer E (1979) Vergleich mathematischer Verteilungen. *Qualität und Zuverlässigkeit* 24:201–208
- Schaefer H et al. (1994) VDI-Lexikon Energietechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Schäfer E (1979) Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit in der Elektronik. Vogel-Verlag, Würzburg
- Schäfer K (1993) Einsatz von Edelstahlrohren in der Versorgungswirtschaft. *3R international* 32:115–118
- Schaller D, Müller H-G (1971) Verfahren für die Ermittlung der Versorgungszuverlässigkeit in elektrischen Systemen. *Energietechnik* 21:391–394
- Schassberger R (1973) Warteschlangen. Springer-Verlag, Wien New York
- Schleicher L (1989) Zuverlässigkeitsbewertung von Systemen – Beispiele zur Modellbildung und Optimierung. In: Symposium Zuverlässigkeit von Komponenten technischer Systeme – Analyse und Nachweisführung. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Schmidt D, Lumpe H-J (1988) Steinmüller Taschenbuch-Rohrleitungstechnik. Vulkan-Verlag, Essen
- Schmidt T, Danda R (1996) Errichtung und Betrieb eines Fernwärmespeichers. *Euroheat & Power Fernwärme international* 25:363–367
- Schmitz K (1997a) Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 1995. *Euroheat & Power Fernwärme international* 26:250–258
- Schmitz K (1997b) Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 1996. AGFW, Frankfurt a. M.
- Schmitz K (1998) Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 1997. *Euroheat & Power Fernwärme international* 27, H12:14–20
- Schmitz KW, Koch G (1996) Kraft-Wärme-Kopplung. VDI Verlag, Düsseldorf
- Schneeweiss WG (1973) Zuverlässigkeitstheorie, eine Einführung über Mittelwerte von binären Zufallsprozessen. Springer-Verlag, Berlin
- Schneeweiss WG (1992) Zuverlässigkeitstechnik – von den Komponenten zum System 1–2. Datakontext-Verlag, Köln
- Schneider H (1988) Die Wassererschließung. Vulkan-Verlag, Essen
- Schubert H (1981) Ein Beitrag zur Berechnung der Verfügbarkeit technischer Systeme. Dissertation IHS Wismar
- Schüngel G (1995) Fernwirktechnik. Vulkan-Verlag, Essen
- Schulz A, Caspar J (1989) Bewertung der Betriebssicherheit der in Fernwärmeanlagen der DDR eingesetzten Druckhalteverfahren. *Energietechnik* 39:355–358
- Schuschulov K (1980) Untersuchung der Zuverlässigkeit eines Fernwärmeversorgungssystems. *Energietechnik* 30:213–214
- Schuschulov K (1985) Zuverlässigkeit der Wärmeversorgungssysteme. Staatsverlag Technika, Sofia (bulgarisch)
- Schwaigerer S (1986) Rohrleitungen – Theorie und Praxis. Reprint. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- Singh C, Billinton R (1977) System Reliability Modelling and Evaluation. Hutchinson & Co (Pub) Ltd., London

- Sirola V-P (1998) Statistics on DH network failures in Finnland 1996. Euroheat & Power Fernwärme international 27:20–24
- Smidt D (1979) Reaktor-Sicherheitstechnik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Smidt DH (1998) Round robin test for measuring of thermal conductivity in preinsulated pipes. Euroheat & Power Fernwärme international 27:36–38
- Smirnow NW, Dunin-Barkowski IW (1963) Mathematische Statistik in der Technik. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin
- Soucek V (1988) Vypocet provozni spolehlivosti tepelnych siti ve vztahu k zabezpeceni nutnych dodavek tepla (Berechnung der Betriebszuverlässigkeit von Wärmenetzen in bezug auf die Sicherung der notwendigen Wärmeleistung). In: VII. Internationale Fernwärmekonferenz, III:900–906, Prag
- Stecher K (1989) Methoden und Werkzeuge zur Zuverlässigkeitsberechnung komplexer technischer Systeme. In: Symposium Zuverlässigkeit von Komponenten technischer Systeme – Analyse und Nachweisführung. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Storm R (1986) Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle. VEB Fachbuchverlag, Leipzig
- Störmer H (1970) Semi-Markoff-Prozesse mit endlich vielen Zuständen. Reihe: Lecture Notes in Operations Research and Mathematical Systems 34. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Störmer H (1983) Mathematische Theorie der Zuverlässigkeit – Einführung und Anwendung. Akademie-Verlag, Berlin
- Strauß K (1992) Kraftwerkstechnik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Sturm A (1996) Zustandswissen für Betriebsführung und Instandhaltung. Verlag VGB-Kraftwerkstechnik, Essen
- SULZER (1990) Kreiselpumpen-Handbuch. Vulkan-Verlag, Essen
- Sura W, Gutknecht B (1989) Aspekte der Versorgungszuverlässigkeit bei der Auslegung von Fernwärmesystemen beim Wärmetransport über große Entfernungen. Energietechnik 39:348–351
- Suttor K-H, Suttor W (1991) Handbuch Kraft-Wärme-Kopplung. Verlag C. F. Müller, Karlsruhe
- Szemerey Z (1969) Berechnung der Zuverlässigkeit elektrischer Netze. Energietechnik 19:119–122
- Takaisvili MK, Chasilov VJ (1972) Über die Grundlagen zur Berechnung der Sicherheit und der Reservehaltung in Fernheiznetzen. Archiv für Energiewirtschaft 26:619–632
- Thier B (1989) Prozeßrohrleitungen. Vulkan-Verlag, Essen
- Thier B (1993) Rohrleitungen in verfahrenstechnischen Anlagen. Vulkan-Verlag, Essen
- Thier B (1996) Sicherheit in der Rohrleitungstechnik. Vulkan-Verlag, Essen
- Thier B (1997) Industriearmaturen. Vulkan-Verlag, Essen
- Thunström B (1983) Betriebssicherheit – Schadensstatistik aus internationaler Sicht. 3R international 22:344–350
- Timm K (1996) Nachumhüllen von erdverlegten Gas- und Wasserrohrleitungen. Vulkan-Verlag, Essen
- Traeder G (1977) Kurzzeitzuverlässigkeitsberechnungen zur Überwachung der schnellen Leistungsreserve von Elektrizitätsversorgungsunternehmen im Verbundbetrieb. Dissertation RWTH Aachen
- Trautmann K (1972) Die Verfügbarkeit von elektrischen Energie-Erzeugungsanlagen – Ein Beitrag zu einigen Problemen. Dissertation TH Darmstadt
- Trautmann K (1976) Rechnerische Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung von Betriebs- und Ausfallzeiten bei Maschinenaggregaten als Grundlage der Zuverlässigkeitsanalyse. Qualität und Zuverlässigkeit 21:2–6
- TÜV (1974) Ausfallwahrscheinlichkeit von Heißdampfbauteilen. Forschungsbericht 99/74
- Ulbrich P (1987) Beitrag zur Zuverlässigkeitsanalyse redundanter Systeme mit Präventivwartung bei nicht exponentiell verteilten Parametern. Dissertation TU Dresden

- Uhlemann KH (1983) Berechnung der Entwurfszuverlässigkeit elektrischer Eigenbedarfsysteme in konventionellen Kraftwerken. Dissertation TU Dresden
- Uhlemann KH (1984) Zur Berechnung von Zuverlässigkeitskennwerten für technische Systeme nach dem BOOLEschen Modell. *Elektrie* 38:431–433
- VDI 986 (1992) Fernwärme in Ost-Deutschland. Tagung Leipzig, 11./12.11.92. VDI-Verlag, Düsseldorf
- VDI (1988) VDI-Wärmeatlas. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Vetter H (1973) Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeits-Probleme im Kraftwerksbetrieb. *Energietechnik* 23:107–114
- Vetterkind D (1977) Graphentheoretische Modelle zur Berechnung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Kraftwerksanlagen. Dissertation RWTH Aachen
- VGB-M 410 N (1994) Qualitätsanforderungen an Fernheizwasser. VGB-Merkblatt, VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e. V., Essen
- Vieheweger G (1979) Möglichkeiten der ökonomischen Bewertung von Anlagenausfällen bei Störungen in der Energieversorgung. *Energietechnik* 29:390–392
- Vogel L (1991) Optimale Gestaltung von Fernwärmesystemen. *Energietechnik* 41:261–266
- WABAG (1996) Handbuch Wasser. Vulkan-Verlag, Essen
- Wagner W (1991a) Rohrleitungstechnik. Vogel-Verlag, Würzburg
- Wagner W (1991b) Festigkeitsberechnungen in Apparate- und Rohrleitungsbau. Vogel-Verlag, Würzburg
- Wagner W (1996) Rohrleitungstechnik. Vogel-Verlag, Würzburg
- Wagner W (1998) Properties of Water and Steam – Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Wehr R (1993) Methoden der quantitativen Erfassung von Wasserverlusten. *3R international* 32:345–351
- Weimer D (1993) Lecksuche – Einsatzbereiche und Grenzen. *3R international* 32:339–344
- Werner D (1987) Strenge Zuverlässigkeitsanforderungen an die Wärmetransportleitung Mellach-Graz/Österreich. *Energietechnik* 37:374–377
- Werner D et al. (1989a) Ein neuartiges Mantelrohrsystem für die unterirdische Verlegung von Wärmeversorgungsleitung. *Energietechnik* 39:98–102
- Werner D et al. (1989b) Technische Zuverlässigkeit des Systems Wärmeleitung. Studie HAB Weimar
- Werner D (1990) Alterung, Verschleiß, Sanierung und Erneuerung von Rohrleitungen – ein Statusbericht. *3R international* 29:12–18
- Wernitz L et al. (1979) Beitrag zur Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit von langzeitbeanspruchten Bauteilen in Abhängigkeit vom Werkstoffeinsatz. *Energietechnik* 29:185–189
- Wieland G (1990) Steinmüller Taschenbuch-Wasserchemie. Vulkan-Verlag, Essen
- Winkens HP (1984) Neuere Entwicklungen im Fernheizungsleitungsbau in Mannheim. *3R international* 23:95–107
- Winkler G, Baier P (1988) Die statistische Bewertung der Elektroenergiequalität. *Energietechnik* 38:102–104
- Wittig K-H (1996) Schieber für Wasser und Abwasser. *3R international* 35:113–117
- WITZENMANN (1990) Kompensatoren. Labhard-Verlag, Konstanz
- Wossog G et al. (1990) Handbuch für den Rohrleitungsbau. VEB Verlag Technik, Berlin
- Wossog G et al. (1998) Handbuch Rohrleitungsbau. 2 Bände. Vulkan-Verlag, Essen
- Wukalowitsch MP (1954, 1958) Thermodynamische Eigenschaften des Wassers und des Wasserdampfes. VEB Verlag Technik, Berlin
- Zabka G, Kirstein B-M (1986) Zuverlässigkeitsuntersuchungen von technischen Systemen. *Energietechnik* 36:257–260
- Zabelt K (1980) Ermittlung von Abnutzungsnormativen an langzeitbeanspruchten Bauteilen. *Energietechnik* 30:100–103

Sachverzeichnis

- Abhitzekessel 13–20
- Abspeiseeinrichtungen 45
- Abspeiseleitungen 39
- Abspeiseströme 38, 166
- Abspeiseventil 38–43
- Abspeisevolumen 192
- Abströmregler 34, 41
- Abströmventil 43
- AfK-Empfehlung 304
- AGFW
 - Arbeitsblatt 117
 - Merkblatt 185
 - Regelwerk 196
 - Richtlinie 186
- Aktivierungsenergie 86, 88
- Analogiestrecke 38–45
- Anbohrarmaturen 262, 277
- Anschlußleitung 224
- Arbeitsmissions-Verfügbarkeit 348, 351
- Arbeitsraumbreiten 190
- Armaturenbauarten 113, 271, 317, 487
 - Fernwärmeversorgungssysteme 104
 - Wasserversorgungssysteme 259
- Arrheniusgleichung 86
- Aufgrabungsarbeiten 237
- Aufgrabungsmethode 186, 310
- Auflastung 38
- Ausdehnungsgefäß 40
- Ausdehnungsvolumen 166
- Ausdehnungsvolumenstrom 45
- Ausfall 119, 123, 130, 169, 214, 297,
333–390, 398, 400, 404, 408–414, 440,
467, 473, 496, 501–514
- Ausfalldauerabstand 414, 426, 439–459,
485, 487
- Ausfalldauerdichte 398, 411, 426, 451
- Ausfalldauerdichtefunktion 421, 425, 438
- Ausfalldauerverteilung 397
- Ausfallkostenfunktion 511–514
- Ausfallursachenforschung 505
- Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilung 341
- Ausgleichsmassenstrom 33
- Ausgleichsvolumenströme 39
- Auskühlzeit 295
- Ausreißertest 414, 426
- Außenlufttemperatur 7, 9, 125, 129, 138,
158, 162, 186, 308, 329
- Badewannenkurve 343
- Bauteilschaden 495
- Bauteil-Schwachstellen 495
- Beimischregelung 126
- Beimischstation 11, 46, 119, 135, 169,
175, 381
- Bereichsverfügbarkeiten 458
- Berstbrüche 489
- Beschichtung 230, 236, 243, 245, 262
- Bestimmtheitsmaß 453
- Betonwiderlager 235, 257
- Betrachtungseinheit 331–339, 347–355,
378, 386, 495
- Betriebsdauerabstand 347, 414, 439–452
- Betriebsdauerdichte 398, 411, 421–423,
451–453
- Betriebsdauerdichtefunktion 421
- Bitumenauskleidung 290, 308, 488
- Bitumenüberzug 237, 240, 243
- Bitumenumhüllung 96
- BOOLEsches Modell 369–379, 386, 413,
509
- Bypassregelung 132
- Dämmdicke 64, 85, 88, 90, 153, 156, 295
- Dämmstoff 64–67, 157–160
- Dämmwert 160
- Dampfsystem 46, 115
- Dampfversorgung 130
- Datenerfassungsblatt 431, 436
- Dauerbetriebstemperatur 72, 86, 88, 96–
100
- Dauerüberwachungsgeräte 193
- Dauerverfügbarkeit 349
- DC-Kupplung 252
- Deckbeschichtung 236
- Dehnungsausgleich 58, 70
- Dichtheitskontrolle 96

- Dichtigkeit 186, 196, 234, 323
- Dichtigkeitsprüfung 185, 318–322, 469
- Doppelrohrsystem 91
- Dreileiter-System 50
- Driftausfall 334, 404, 408
- Druckerhöhungsanlage
 - Fernwärmeversorgungssystem 221
 - Wasserversorgungssystem 280
- Druckerhöhungsstation
 - Fernwärmeversorgungssystem 11, 118, 124, 135, 174
 - Wasserversorgungssystem 206, 220
- Druckhalteanlage 32–43, 124, 166–174, 401–403
- Druckhaltesystem 33, 39, 44, 121, 140, 169, 380–383
- Druckhöhenverlust 287–295
- Druckminderstation 207, 219–222
- Druckrohrleitung 224
- Druckstoßberechnung 299
- Druckstoßsicherung 272
- Druckunterbrecherbehälter 216, 222
- Druckverläufe 33, 140, 282
- Druckverlaufsschaubild 139, 283
- Druckverlust 144, 285
- Druckverlustberechnungen 145–152, 287–292
- Druckwellengeschwindigkeit 171–174, 297–299
- Druckwindkessel 221
- Düker 98, 103, 164, 185, 224, 241
- duktils Gußeisen 229–236, 265–269, 308, 316, 492
- Durchbiegung 63, 255
- Durchfeuchtung 64, 66, 96, 435
- Durchlaufbehälter 219
- Durchörterung 98, 103, 164, 185, 500
- Durchstrahlungsprüfung 469
- DVGW
 - Arbeitsblatt 106, 186, 215, 230, 232, 244, 247, 261, 277, 279, 285, 289, 318
 - Hinweis 319–323, 326
 - Merkblatt 97, 219, 257, 276, 283, 300, 311, 318, 326, 436
 - Regelwerk 230
- EBERT-Schaltung 40–42
- Eigenbedarf 201, 317
- einfaches System 359
- Einfriergefahr 274
- Einleiter-System 50
- Einpaßmuffe 80
- Einsteckmuffe 247
- Einsteckschweißmuffe 239
- Elastizitätsmodul 101, 166, 172, 254, 297–299, 322
- Elektroschweißmuffe 250
- Element 60, 254, 331, 335–346, 359–365, 370, 373, 378, 382, 386, 392, 426–433, 438, 467, 472, 499–503, 509
- Elementeausfall 344, 379, 508, 510
- Elementefehler 335
- Emaillierung 262
- Enddruckhaltung 32, 41, 45
- Entlüfter 283, 308
- erdverlegte Systeme 70, 100, 102, 116, 158, 177, 182, 186, 193–196, 230–233, 248, 252, 257, 282, 295, 310, 323, 462, 495, 498, 505
- Ereignis 215, 217, 327, 333–337, 361, 376, 380–384, 407, 427–444, 448, 455, 461, 463, 468, 472, 480–487, 495–502
- Ereignisdauer 486
- Ereignishäufigkeit 460
- ERLANG-Dichtefunktion 409, 422, 425, 445–448
- ERLANGsche Methode 395, 398, 409, 414
- ERLANG-Verteilung 354–358, 398, 414, 424–426, 441, 448, 453
- Erneuerung 324
- Erneuerungsprozesse 346
- Erwartungswert 419
- Exponential-Verteilung 353–356, 363, 395, 398, 424, 426, 447–454, 467, 472
- Fahrweise Fernwärmeversorgungssystem 125
- Fehler 335
- Fehlerlokalisierung 346
- Fehlerortungssystem 73
- Fernwasserleitung 224
- Fernwirktechnik 134, 281
- Fertigteilschacht 117, 279
- Festpunkt-konstruktion 70, 78, 83, 91, 94, 105, 117, 260
- Feuchteinbruch 89
- Fittingsmuffe 250
- Flanschanschluß 236, 250, 254
- Flanschenden 105, 261
- Flanschverbindungen 69, 96, 236, 238, 248, 250, 257
- Freispiegelleitung 224, 236, 288
- freiverlegte Systeme 193, 470, 495
- Fremdstromschutzverfahren 232
- Frequenzmultiplex-Verfahren 134, 281
- Frostschutzdämmung 253

- Funktionszuverlässigkeit 333
- FWC-Kupplung 252
- Gasturbinenanlage 13, 16, 23
- gebäudeverlegte Leitungen 147
- Gesamtsystem 380, 384
- Gewindeverbindung 239
- Gibault-Kupplung 242
- Gleichzeitigkeitsfaktor
 - Fernwärmeversorgungssystem 141, 153
 - Wasserversorgungssystem 284, 293
- Gleitbereichslänge 165
- Gleitreibungsbeiwert 62
- Glockenmuffe 244
- GÖPFERT-Schaltung 40
- Grabenbreite 98, 186, 310
- grabenlose Verfahren 492
- Gradientenkriterium 193
- Graugußrohre 494
- GuD-Prozeß 16–18
- Haftreibungsbeiwert 62
- Halterungszubehör 59
- Hauptleitung 48, 224
- Hausanschlußleitung 385, 436, 458, 461, 490
 - Fernwärmeversorgungssystem 48–50, 124, 185
 - Wasserversorgungssystem 206, 228, 242, 277, 280, 283
- Hausanschlußstation 11, 46, 124, 135, 139, 175, 380
- Heizelement-Schweißmuffe 250
- Heizwassernetz 5, 113, 170, 192
- Heizwassersystem 7, 8, 25, 41, 43, 46, 50, 60, 64, 121, 124, 126, 132, 135–140, 149, 160, 166, 171, 192, 195, 380–385, 400–403, 407, 413, 484, 500
- Hochbehälter 216
- hydraulische Bedingung 510, 514
- Hydrophon 321
- Hyper-ERLANG-Verteilung 358, 398
- Hyper-Exponential-Verteilung 356, 398, 445
- Idempotenz-Axiom 370, 372, 509
- Impuls-Laufzeit-Meßverfahren 89
- Inertgaspolster 43
- inkompressible Strömung 144, 285
- Inkrustation 240, 243, 259, 263, 289, 317, 326, 491
- Innendruckprüfung 186, 307–309
- Instandhaltung 320
 - instandhaltungstechnische Maßnahmen 335, 497–502
 - Instandsetzungen 185
 - Intervallverfügbarkeit 348, 350
 - irreduzible Strukturen 369
 - Irrtumwahrscheinlichkeit 419
 - Jahresdauerlinie 9, 86, 203
 - Jahresganglinie 9
 - Jahreswasserabgabe 203
 - k- von n-System 368
 - Kaltvorspannung 94
 - kanalverlegte Systeme 100, 102, 478
 - Kanalformen 68
 - kathodischen Schutz 96–99, 230–232, 488
 - Kavitation 115, 262
 - Kehlnahtschweißung 81
 - Keilplattenschieber 106, 263
 - Klappenart 112, 268
 - KMR-Schadensstatistik 431, 433
 - Kompaktstation 124, 175
 - Kompensator 46, 54–58, 61, 70, 82, 94, 101, 175, 184, 194, 224, 253, 360, 373, 435, 500, 504, 506
 - kompliziertes System 359
 - kompressible Strömung 33, 34, 37, 144, 285
 - Kondensat 24, 63, 69, 105, 115, 123, 130, 141, 156, 380, 431
 - Kondensatableiter 115
 - Kondensatqualität 53, 194
 - Kondensatrückförderung 130
 - Konfidenzintervall 407, 413, 417–421, 447, 450–454
 - Konfidenzschätzung 417
 - Körperschallmikrophon 320
 - Korrelationsmeßverfahren 320
 - Korrosionsschutz 230
 - Korrosionsschutzaufgaben 110
 - Korrosionsschutzbinden 95
 - Korrosionsschutzeinrichtungen 99
 - Kraft-Wärme-Kopplung 5, 12–16, 22–25, 132–137
 - KTW
 - Empfehlungen 263
 - Richtlinien 262
 - Kunststoff 245–251
 - Kunststoffmantelrohr 71, 90, 95–101, 119, 138, 159, 161, 165, 175–188, 192–194, 303, 431–434, 463, 468–470, 474, 476, 480–485, 499, 504

- Lagerstelle 58
- laminare Strömung 148, 290
- Langzeitbetrieb 393
- Laufzeitdifferenzmessung 321
- Lebensdauerdichte 341
- Lebensdauererwartung 88
- Leck 321, 383, 385, 401–407, 451
- Leckage 473, 479
- Leckfläche 402
- Leckgeräusch 320
- Leckmengenströme 167
- Leckortung 88, 319–321, 432, 437, 440
- Leckquote 401–403
- Leckrate 96, 106, 108, 261
- Leckstelle 218, 320
- Lecksuche 206, 320
- Leckverluste 26, 134, 166–171, 174, 192, 319, 473
- Leckvolumen 401–403
- Leckvolumenstrom 169, 192
- Leckwarnsystem 53, 181, 475, 505
-
- Magnani-Kupplung 242
- Mantelrohrsysteme 52, 71, 98, 177
- Mantelrohrtemperatur 84
- MARKOW-Eigenschaft 376
- MARKOWsches Modell 375–379, 386, 394, 398, 400, 403, 411–414
- Massestrom 130, 140–143, 146, 148–153, 161, 168, 290, 292
- Materialauswahlfehler 499
- Mediumrohr 45, 70–75, 78, 85, 88–101, 177, 193, 435, 475
- Mehrleiter-System 46, 329, 505–513
- Mehrzustandsbetrachtungen 376
- Mehrzustandsmodell 379
- Membraneophon 320
- Mindestabstände 178, 303
- Mindestbetriebsdruck 26
- Mindestdifferenzdruck 128
- Minstdurchsatzmenge 170
- Mindestisolerdicke 158
- Mindestschichtdicke 262
- Mindestspülwassermenge 313
- Mindestversorgungsdruck 280
- Mindestvolumenstrom 170
- Mindest-Wanddicke 75
- Mineraldämmstoffe 65
- Minimalschnittmethode 371, 376
- Minimalwegmethode 370, 372, 509
- Missions-Verfügbarkeit 348, 350
- Mitteldruckbildung 40
- Mitteldruckhaltung 32, 41–45, 402, 473
-
- molchen 263, 271
- momentane Verfügbarkeit 348
- Monotonieeigenschaft 378
- Muffenarten 81
- Muffenhohlraum 80
- Muffenmontage 193
- Muffenschaden 435, 475, 480, 484
- Muffenschäume 194
- Muffentechniken 79
- Muffentyp 433, 474
- Muffenverbindung 74, 80, 99, 102, 231, 235, 238, 258
-
- Nachisolierung 238
- Nachspeisevolumen 193, 401
- Nachtmindestverbrauchsmessung 318
- Näherungsgleichung 26, 29, 141, 147, 166, 172, 288, 298, 416
- Näherungslösungen 378
- Nahwärmesysteme 6
- Nenndurchmesserlänge 459–461
- nennweitenabhängig 73, 91, 237, 240, 380, 383, 439, 443, 457–459, 465, 467, 484, 513
- nennweitenunabhängig 439, 443, 455–459, 465, 467
- Netzformen 49, 226
- Netzinhaltswasser 166
- Netzschwachpunkt 118
- nichtbindige Böden 187, 311
- Nicht-MARKOWsches Modell 377, 386
- Niederdruckdampfheizung 130
- NPSH-Wert 26
- Nullverbrauchsmessung 319
-
- ODER-Schaltung 364
-
- Parallelaufgrabung 479, 495
- parallelgeschaltete Systeme 23
- parallelliegende Leitungen 194
- Parallelsystem 364
- Parallelseriensystem 376
- parallelverlegte Systeme 50, 510
- PE-HD-Schweißung 80
- PE-Mantel 76, 97, 435, 475
- PE-Mantelrohr 75, 91
- PE-Schweißnaht 435
- PE-Umhüllung 95, 231
- Platten-Wärmeübertrager 121
- Polyamid 61, 70
- Polyäthylen 102, 245, 308
- Polyethylen 82, 90, 92, 178, 229, 236, 240, 245, 298, 308

-
- Polyurethan 65, 85, 262
 - primärseitig 45, 120, 128
 - Prüfdauer 308
 - PUR-Hartschaum 65–67, 73, 76, 85–88, 91, 97, 101, 185, 193
 - Quantil 418
 - Querkontraktion 172, 298
 - Quetschgummidichtung 244
 - Rauhigkeit 101, 147, 150, 288, 291
 - Recyclingmaterialen 187
 - Redundanzausbildung 338
 - reduzible Strukturen 362
 - Regelgrabentiefe 311
 - Regelverlegetiefe 310
 - Reibungsbeiwert 62
 - Reinigung 323
 - Reka-Kupplung 241
 - Reparaturdauer 484
 - Reynolds-Zahl 147–151, 288–291
 - Ringkolbenventil 114, 171, 223, 272, 297
 - Ringkolbenzähler 281
 - Ringnetz 50, 225
 - Rohrbruchsicherung 114, 262, 272, 489
 - Rohrgrabenabmessung 186, 188, 310
 - Rohrhalterung 46, 52, 59, 68, 70, 224, 252–256
 - Rohrleitungsbeanspruchung 488
 - Rohrleitungsgefälle 274
 - Rohrleitungskräfte 58, 108, 259, 265
 - Rohrnetzalter 492
 - Rohrnetzstatistik 52, 72, 177
 - Rohrreibungsbeiwert 147–154, 288–292
 - Rücksauggefahr 198
 - Rückschlagklappe 105, 113, 119, 260, 270, 272
 - Rückschlagventil 37
 - Ruhedruckauflastung 119
 - Ruhedrucklinie 220
 - Ruhedruckniveau 129
 - Ruhedruckverhältnisse 120
 - Sandrauhigkeiten 147, 289
 - Sanierung 323
 - Saugdruckhaltung 32
 - Schaden 88, 90, 99, 182, 192, 218, 316, 320, 333, 335, 337, 434–436, 441, 450, 461, 468, 477–480, 483, 485, 488–495, 502–507
 - Schadenerscheinung 337
 - Schadensablauf 337, 495
 - Schadensanalyse 337, 490, 501
 - Schadensart 192, 316, 321, 337, 436, 479, 496
 - Schadensausfallkostenfunktion 427, 432, 437
 - Schadensausmaß 328
 - Schadensbefund 337
 - Schadensbegünstigung 337
 - Schadensbehebung 193, 432, 437
 - Schadensbeseitigung 482
 - Schadensbild 337
 - Schadensdynamik 320
 - Schadensentwicklung 433, 473
 - Schadensereignis 495
 - Schadenserfassung 434
 - Schadensfaktor 469
 - Schadensfolgen 335
 - Schadensforschung 335–338, 495, 502, 505
 - Schadensgeschehen 429
 - Schadensgruppe 491
 - Schadenshäufigkeit 429, 473, 477, 492, 494
 - Schadenskategorie 434
 - Schadenskennzahl 473–480
 - Schadenskette 502
 - Schadenskosten 359, 474
 - Schadensmechanismen 496
 - Schadensobjekte 429
 - Schadensort 337, 436, 496
 - Schadensortung 193
 - Schadensrate 326, 436, 487–494
 - Schadensschwerpunkte 429
 - Schadensstatistik 319, 326, 354, 400, 409, 414, 427, 430–433, 436, 439, 442, 448, 468, 474–477, 480, 487, 492
 - Schadensstelle 89, 193, 318, 321, 337, 436, 496, 501
 - Schadenssumme 485
 - Schadensteil 335, 337, 496
 - Schadensverteilung 475, 479–481, 484
 - Schadenszeitpunkt 495
 - Schadenuntersuchung 337
 - Schadestelle 488
 - Schäumvorgang 85
 - Schalenmuffe 81
 - Schieberbauarten (s. Armaturenbauarten)
 - Schiebersack 263, 317
 - Schraubmuffe 234, 235
 - Schrumpfmuffe 81
 - Schwachpunkt 498
 - Schwachstelle 335, 436, 495–503
 - Schwachstellenanalyse 335, 427, 467, 491, 495, 498, 502, 503, 505–508, 514

- Schwachstellenausbruch 498
Schwachstellenforschung 495–497, 502
Schwachstellenkategorien 497
Schwachstellenketten 502
Schwachstellenursache 335, 496–502
Schweißnahtausführung 184, 307, 458
Schweißnahtfehler 469, 484
Schweißnahtprüfung 185, 191, 307
Schweißnahtqualität 180
sekundärseitig 120, 123, 128, 131
Semi-MARKOWsches Modell 377, 386, 395, 400
Sensibilitätsanalyse 332, 446, 512
Seriensystem 362
Serienparallelsystem 369
Simplex-Kupplung 242
Spannbetonrohre 298
Spitzenden 265
Spitzenverbrauchswerte 209, 217
Spitzenverbrauchszeiten 284
Stahlbetonsockel 53
Stahlbetonstützen 53
Stahlmantelrohr 71, 92–98, 160, 162, 177, 193
Stahlmantelrohrsysteme 71, 92, 95, 97, 383, 468
Steckmuffe 235, 239, 265
Stemmuffe 236
Stichprobenumfang 414, 416, 418–421
Stopfbuchsenmuffe 234
Störfall 171, 297, 337
Störung 128, 328, 333, 496
Störungsdauer 471
Strahlennetz 48
Strömungsgeschwindigkeit 104, 142, 145, 147, 221, 259, 273, 274, 275, 283, 284, 288, 289, 313, 491, 509
Strukturzuverlässigkeit 333
Stützenabstand 53
Stützweite 63, 255
Stützweitenberechnung 58
Stumpfschweißung 238
Summenausfalldauer 459, 465
Summenereignisdauer 465, 486
System 20, 33, 48, 50, 54, 57, 61, 88, 92, 97–100, 130, 217, 222, 235, 296, 327, 331–340, 358–365, 368–378, 385–395, 426, 429, 431, 437, 443, 454, 458, 461, 471, 475, 484, 489, 498–502, 508, 510
Tagesausgleichsvolumen 217
Tagesganglinie 8
Tagesspitzenverbrauch 217
Tageszeit 9
Teilsystem 380, 384
Thermographie 192, 194
Tiefbehälter 216
Tracergas-Technik 320
Transportleitung 224
TYTON-System 235
Überdeckungshöhe 165, 234
Überflurhydrant 276
Übergangsrate 388
Übergangswahrscheinlichkeit 388
Überschieber 244, 248
Überschiebmuffe 80, 241
Überströmeinrichtung 44
Überströmregler 37, 170
Überwachungssystem 193
Umlaufnetz 225
UND-Schaltung 362
unplanmäßige Ereignisse 193, 214–217, 327, 333, 380, 384, 407, 426–443, 498, 502
Unterflurhydrant 276
Unterstützungskonstruktion 59, 495
Unverfügbarkeit 366
unvermaschte Systeme 153, 165, 293, 296, 376
Urethan 85
Ventilbauarten 109, 266
Verästelungsnetz 225
Verbaumethoden 187, 311
Verbrauchsleitung 224
Verbund-Verfügbarkeit 348, 351
Verfügbarkeit 333, 419, 427, 449–456, 463, 505, 507, 509, 511, 513
Verfügbarkeitsintervall 456, 486
Verfüllmaterial 187–190, 312
Verfüllzone 187, 312
Verlegefehler 316, 499
Verlegemethode 73, 82–84, 91, 95, 184
Verlegetiefe 159, 180, 186, 194, 310–312
vermaschte Systeme 153, 164, 225, 293, 299, 359, 369–372, 376
Vermaschung 118, 226, 290, 385
Vermaschungsgrad 50, 152, 292, 514
Versorgungsausfallzeiten 471
Versorgungsleitung 48, 224
Versorgungssicherheit 38, 88, 121–124, 180, 194, 216, 219, 300, 330, 492
Versorgungszuverlässigkeit 11, 49–51, 132, 134, 192, 206, 281, 315, 323, 328, 332, 427, 461, 471, 490, 501, 505, 510, 514

-
- Vierleiter-System 50
 - Volumenausgleichsstrom 167–169
 - Volumenexpansion 169
 - Volumenkontraktion 26, 37, 43, 121, 169–171
 - Wärmeabstrahlung 194
 - Wärmeausdehnungskoeffizient 166, 246
 - Wärmedämmmaterialien 72
 - Wärmedämmeigenschaften 73, 80, 86, 194
 - Wärmedämmung 11, 45, 52, 57, 63–69, 72, 73, 76, 85, 88–97, 101, 145, 147, 158, 165, 177, 189, 194, 295, 385, 469
 - Wärmedurchgangskoeffizient 156–163
 - Wärmedurchgangswiderstand 65
 - Wärmedurchgangszahl 87
 - Wärmehöchstlast 141
 - Wärmeleitfähigkeit 65, 157
 - Wärmeleitkoeffizient 159
 - Wärmeleitwiderstand 157
 - Wärmeübergangskoeffizient 157, 159
 - Wärmeübergangswiderstand 157, 159
 - Wärmeübertrager 44, 121–132, 194
 - Wärmeübertragerstation 11, 46–48, 115, 118, 121–123, 380
 - Wärmeverlustkoeffizient 159
 - Wärmeverlustkosten 154
 - wartungsarm 109, 266
 - wartungsfrei 54, 58, 70, 253, 262, 264
 - Wartungsintervalle 196
 - Wasserabgabe 201–206, 215, 284
 - Wasseranschlußleitung 283
 - Wasseraufbereitung 207, 211
 - Wasseraufbereitungsanlagen 213–216, 401, 403
 - Wasseraufbereitungskapazitäten 383, 385
 - Wasseraufkommen 201
 - Wasseraustrittsstelle 99
 - Wasserbedarf 201, 209
 - Wasserbereitstellung 201, 413
 - Wasserdargebot 201, 209
 - Wasserdruckprüfung 186
 - Wasserförderung 207
 - Wassergewinnung 207
 - Wassergewinnungsanlage 209, 223
 - Wasserschallaufnehmer 321
 - Wasserspeicherung 207
 - Wasserspeicheranlagen 217
 - Wasserverlust 201, 202, 218, 226, 281, 307, 316–323, 326, 385, 401, 490
 - Wasserverteilung 207
 - Wasserwerke 201, 209, 210, 213, 217
 - Wechselstrombahnanlagen 304
 - WEIBULL-Verteilung 353–355, 468
 - Wetter 7
 - Wickelmuffe 81
 - Widerlager 101, 257, 258, 306, 496
 - Widerstandsbeiwert 148–152, 268, 271, 290
 - Widerstands-Meßverfahren 89
 - Widerstands-Vergleichs-Meßverfahren 90
 - Wochenganglinie 9
 - Woltmannzähler 281
 - Zählerschacht 280
 - Zeitmultiplex-Verfahren 134, 281
 - Zementmörtelauskleidung 229–231, 234, 236–238, 240, 298, 308, 490, 492
 - Zubringerleitung 224
 - Zuspeisen 401
 - Zuspeiseströme 38, 166, 169
 - Zuspeisevolumen 401, 403
 - Zuspeisevolumenstrom 40
 - Zustandsübergangsgraphen 387
 - Zustandswahrscheinlichkeit 379, 387, 390, 394
 - Zuverlässigkeit 331
 - Zuverlässigkeitsanalysenmethoden 468
 - Zuverlässigkeitsarbeit 329
 - Zuverlässigkeitsaufgabe 373
 - Zuverlässigkeitsaussagen 344, 427
 - Zuverlässigkeitsbewertung 379, 429
 - zuverlässigkeitserhöhende Maßnahmen 329, 427, 465, 505, 514
 - Zuverlässigkeitserhöhung 358, 361, 374
 - Zuverlässigkeitersatzschaltung 360, 362, 364, 368, 369, 373, 376
 - Zuverlässigkeitskenngröße 340–346, 348, 353–361, 419, 484
 - Zuverlässigkeitskennwerte 338, 360, 467
 - zuverlässigkeitslogische Bedingung 361–364, 371–374, 376, 382, 458, 507–514
 - Zuverlässigkeitsmodell 375
 - Zuverlässigkeitsnachweis 332
 - Zuverlässigkeitsstrukturen 361, 369, 376
 - Zweileiter-System 50
 - Zweizustandsmodell 375
 - Zwischendruckhaltung 32