

Technische Zustandsbewertung metallischer Wasserversorgungsleitungen als Beitrag zur Rehabilitationsplanung

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Hans-Christian Sorge

aus Erfurt

Gutachter: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Harald Roscher
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jörg Kranawetterer
4. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Merkel

Erfurt / Weimar; 30. Oktober 2006

Danksagung

Mein besonderer Dank richtet sich an meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Harald Roscher, der mir den Grundgedanken des Promotionsthemas anvertraute und mir während der gesamten Promotion mit fachlicher Unterstützung zur Verfügung stand. Seine Vorgehensweise, mich selbstständig arbeiten zu lassen aber in entscheidenden Phasen mit konstruktiven Diskussionen gegebenenfalls zu korrigieren, trug maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Vor allem für seine fortwährende Motivation, mit eigenen Vorträgen an entsprechenden Tagungen teilzunehmen, möchte ich mich ganz besonders bedanken.

Die vorliegende Arbeit entstand innerhalb einer kooperativen Promotion zwischen der Fachhochschule Erfurt und der Bauhaus-Universität Weimar. Daher möchte ich mich weiterhin bei der Fachhochschule Erfurt und dem dazugehörigen Fachbereich Bauingenieurwesen für die Bereitstellung des Arbeitsplatzes im von Prof. Roscher eingerichteten Untersuchungslabor bedanken. Besonders erwähnen möchte ich das hervorragende Arbeitsklima bei den Kollegen in den Laboren der Werner-Seelenbinder-Straße.

Die Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen ermöglichte mir die Erlangung der Voraussetzungen zur Promotion und die Durchführung des Promotionsverfahrens. Besonderer Dank richtet sich hierbei an Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong von der Professur Siedlungswasserwirtschaft und seinen Mitarbeitern.

Für die Begutachtung der Arbeit möchte ich mich außerdem bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jörg Kranawetterer und vor allem bei Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Merkel bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei den Stadtwerken Erfurt, dem Wasserversorgungszweckverband Weimar und Herrn Busch vom Zweckverband Gruppenwasserwerk Dieburg für die Bereitstellung von Rohrproben bedanken, ohne die eine Durchführung der materialtechnischen Zustandsuntersuchungen nicht möglich gewesen wären.

Mein Dank gebührt weiterhin Herrn Chem.-Ing. Jürgen Ahrens, Büro für Rohrnetzanalysen in Neuenhagen und Herrn Dipl.-Ing. Udo Müller, Keulahütte Krauschwitz für ihre hilfreichen Bemerkungen zu Inhalten der Arbeit.

Letztendlich möchte ich meiner Familie danken, die mir in passenden Augenblicken half, auch mal einen nötigen Abstand zur Arbeit zu gewinnen.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Erfurt, 30. Oktober 2006

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Symbole	I
I. Problemstellung und Motivation	1
II. Zielstellungen	6
III. Abgrenzung des Themengebiets	8
1. Verfügbarer Wissensstand zu relevanten Bereichen der Arbeit	10
1.1 Rehabilitationsplanungen mittels Auswertung der Schadensstatistik und Netzbestandsdaten	11
1.2 Rehabilitationsplanungen mittels Auswertung der Schadensstatistik, Netzbestandsdaten und Einbeziehung von Bodenkennwerten	11
1.3 Ansätze und Methoden zur technischen Zustandsbeurteilung erdverlegter Druckrohrleitungen	12
1.3.1 Zustandsbeurteilung nach Brussig	12
1.3.2 Zustandsbeurteilung nach Böhm	14
1.3.3 Zustandsbeurteilung nach Kottmann	15
1.3.4 Weitere Techniken und Beurteilungskriterien zur Zustandserfassung	16
1.4 Methoden zur Berechnung der statischen Resttragfähigkeit	17
1.4.1 Berechnung nach ASME B31G	17
1.4.2 Berechnungsempfehlungen von Falter und Veenker	17
1.4.3 Berechnung aufnehmbarer Biegemomente an korrodierten Rohren	20
1.4.4 Berechnung aufnehmbarer Längsbiegemomente	20
1.5 Gegenwärtige Forschungsvorhaben zur Problematik der Rohrnetz- rehabilitation auf Grundlage des technischen Rohrzustands (Auswahl)	21
1.5.1 Forschungsvorhaben des Instituts für Forschung im Bauwesen (IRC) Kanada ..	21
1.5.2 Forschungsvorhaben des Lehrstuhl Stadtbauwesen der TU Dresden	21
2. Strukturierung der Arbeit und Lösungsfindung	22
3. Definition und Wichtung von Einflussfaktoren	26
3.1 Festigkeits- und Werkstoffeigenschaften	26
3.2 Herstellungs- und Werkstofffehler	26
3.3 Aktiver und passiver Korrosionsschutz	26
3.4 Bodeneigenschaften und Bodenaggressivität	27
3.5 Verlegebedingungen, Montage- und Bettungsfehler, Lage der Leitung	27
3.6 Verkehrs- und Erdlasten, Belastungen aus Bodenbewegungen	27
3.7 Rohrgeometrie und Rohralter	28
3.8 Wasserparameter, Hydraulik und Betriebsregime	28
3.9 Witterungseinflüsse	28
4. Metallische Rohrwerkstoffe	29
4.1 Zu berücksichtigende Merkmale und Eigenschaften	29
4.2 Rohrleitungen aus Grauguss mit Lamellengraphit (GGL)	30
4.2.1 Allgemeine Angaben	30
4.2.2 Graugussrohre in Sandformen gegossen	31
4.2.3 Graugussrohre in Schleuderformen (Kokillen) gegossen	35
4.3 Graugussrohre mit Kugelgraphit bzw. Duktulgussrohre (GGG)	38
4.4 Stahlrohre	38
4.5 Entwicklung des Korrosionsschutzes von metallischen Trinkwasserleitungen ..	40

4.5.1	Korrosionsschutz von Graugussrohren	40
4.5.2	Korrosionsschutz von Duktulgussrohren	42
4.5.3	Korrosionsschutz von Stahlrohren	44
4.6	Entwicklung der Verbindungstechnik von Trinkwasserleitungen	46
4.6.1	Verbindungssysteme von Graugussrohren	46
4.6.2	Verbindungssysteme von Duktulgussrohren	50
4.6.3	Verbindungssysteme von Stahlrohren	51
4.6.4	Muffensignaturen an Graugussrohren	52
4.7	Metallographie – Ausbildung der mikroskopischen Kornstruktur	53
4.7.1	Metallographie der Graugussrohre	53
4.7.2	Metallographie der Duktulgussrohre	62
4.7.3	Metallographie der Stahlrohre	64
4.8	Werkstoffeigenschaften metallischer Trinkwasserleitungen	67
4.8.1	Übersicht relevanter Regelwerke	67
4.8.2	Werkstoffeigenschaften von Graugussrohren	68
4.8.3	Werkstoffeigenschaften von Duktulgussrohren	70
4.8.4	Werkstoffeigenschaften von Stahlrohren	71
4.8.5	Ermittlung von Sicherheitsbeiwerten bezüglich statischer Berechnungen	72
4.9	Schadensbeurteilung zur Charakterisierung erdverlegter metallischer Trinkwasserleitungen	74
4.9.1	Schadensarten und Schadensursachen	74
4.9.2	Korrosionsarten	79
4.9.3	Charakterisierung relevanter Korrosionsarten und deren Entstehung	83
4.9.4	Inkrustierungen in metallischen Trinkwasserleitungen	87
4.10	Einteilung in Rohrgenerationen	89
4.10.1	Charakterisierung der Rohrgenerationen Grauguss mit Lamellengraphit	90
4.10.2	Charakterisierung der Rohrgenerationen Grauguss mit Kugelgraphit	92
4.10.3	Charakterisierung der Rohrgenerationen Stahl	93
4.10.4	Werkstoffspezifische Eigenschaften innerhalb der Rohrgenerationen	96
5.	Ermittlung der mittleren statistischen Lebensdauer	98
5.1	Allgemeine Annahmen	98
5.2	Datengrundlage	99
5.3	Berechnungsgrundlagen	99
5.4	Ermittlung der mittleren Lebenserwartung	102
5.5	Ermittlung und Korrektur der statistischen Restlebensdauer und mittleren Lebenserwartung	104
6.	Durchführung der vereinfachten materialtechnischen Zustandsuntersuchung	111
6.1	Rohrprobenbeschaffung	111
6.2	Begutachtung der Probe im Labor	113
6.3	Erfassung von Korrosionsschutz und Inkrustierungen bzw. Ablagerungen	114
6.4	Aufbereitung der Rohrprobe	116
6.5	Erfassung von Schadensart, Korrosionsart und Rohrherstellungsverfahren	117
7.	Durchführung der präzisierten materialtechnischen Zustandsuntersuchung	119
7.1	Metallographische Untersuchungen	119
7.2	Ermittlung der Zugfestigkeit an Rohrproben	120
7.2.1	Ermittlung der Zugfestigkeit an Grauguss-Rohrproben	120

7.2.2	Ermittlung der Zugfestigkeit an Duktilguss- und Stahlrohrproben.....	125
7.3	Ermittlung der Brinellhärte an Rohrproben	127
8.	Auswertung der einfachen materialtechnischen Zustandsuntersuchung	128
8.1	Untersuchungsumfang.....	128
8.2	Verteilung von Schadensursachen und Schadens- bzw. Korrosionsarten.....	131
8.3	Restwanddicke und Schädigungszahlen.....	139
8.3.1	Empirische Restwanddicke RWD und Schädigungszahl SZ_R	139
8.3.2	Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K	144
8.3.3	Zusätzliche Betrachtungen bei der Ermittlung von RWD_r für weitere statische Berechnungen	155
9.	Auswertung der statischen Versuche	159
9.1	Zugfestigkeit.....	159
9.2	E-Modul	162
9.3	Bruchdehnung	165
9.4	Brinellhärte.....	167
10.	Berechnung der Resttragfähigkeit erdverlegter metallischer Trinkwasser- leitungen auf Grundlage der empirischen Restwanddicke	171
10.1	Fixe Eingangsdaten zur Berechnung der Tragfähigkeit nach ATV A 127	172
10.1.1	Sicherheiten.....	172
10.1.2	Einbaubedingungen.....	172
10.1.3	Boden	173
10.1.4	Belastungen	174
10.2	Tragfähige Mindestwanddicke	175
11.	Bestimmung der technischen Nutzungsdauer auf Grundlage des festgestellten Ist-Zustands an Rohrproben	181
11.1	Annahmen und Berechnungsvoraussetzungen.....	181
11.2	Mathematische Formulierung der Berechnungen zur technischen Nutzungsdauer.....	186
11.3	Berechnungsbeispiele.....	189
12.	Bodenuntersuchungen zur Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit	193
12.1	Abtragungsrichtung.....	193
12.1.1	Flächenkorrosion.....	194
12.1.2	Muldenkorrosion	195
12.1.3	Loch- und Narbenkorrosion	197
12.1.4	Graphitierung	198
12.2	Abtragungsgeschwindigkeit.....	199
12.2.1	Festlegung der Abtragungsgeschwindigkeit bei fehlenden Untersuchs- ergebnissen zur Bodenaggressivität	199
12.2.2	Festlegung der Abtragungsgeschwindigkeit bei vorhandenen Untersuchs- ergebnissen zur Bodenaggressivität	200
12.2.3	Korrosionsversuche.....	201
12.3	Ermittlung der Bodenaggressivität im Rahmen der materialtechnischen Zustandsuntersuchung.....	205
12.4	Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit bei innerer Korrosions- belastung durch Trinkwasser.....	212

13.	Beurteilung der Querbruchgefahr von Graugussrohren	213
13.1	Auswahl eines passenden statischen Modells	214
13.2	Ermittlung der Bettungskonstante k	216
13.3	Berechnung der Biegemomente aus Längsbiegung bei punktförmiger Auflagerung.....	219
13.4	Berechnung der Biegemomente aus Längsbiegung bei teilweise fehlender Auflagerung / Bettung.....	220
13.5	Nachweis der Tragfähigkeit erdverlegter Graugussrohre bei Längsbiege- beanspruchung.....	221
14.	Anwendbarkeit des Prognoseverfahrens	225
14.1	Übertragbarkeit.....	225
14.2	Aussagefähigkeit	226
14.3	Nutzen und Wirtschaftlichkeit	228
14.4	Anwendungsbeispiel	229
14.4.1	Eingangsdaten / Probenbegleitschein.....	229
14.4.2	Berechnung der Zwischenergebnisse zur Ermittlung der technischen Nutzungsdauer.....	233
14.4.3	Prognose der technischen Nutzungsdauer.....	235
15.	Schlussfolgerungen.....	238
15.1	Erkenntnisse und Ergebnisse der Arbeit	238
15.2	Ausblick	241
15.3	Zusammenfassung.....	242
	Anhang A – Auflistung geometrischer Abmessungen, geordnet nach Rohrgenerationen.....	245
	Literaturverzeichnis.....	254

Abkürzungen und Symbole

a	mm	Probendicke; Rohrwanddicke
A	mm ²	wirksamer Querschnitt
A _c	%	Bruchdehnung
AK	%	Anteil der Korrosionsfläche zur gesamten Rohroberfläche
AQ	-	Anionen-Quotient
b	mm	Probenbreite
B	mm	Probenkopfbreite
b	m	Rohrauflegerbreite
B ₀ ; B ₁ ; B _E	-	Bewertungssummenzahl
b _{aus}	-	Anstieg der progressiven Zustandsverschlechterung bis zum Ausfallzeitpunkt
β	°	Böschungswinkel des Rohrgrabens
β _{BZ}	N/mm ²	Biegezugfestigkeit
c	mol/m ³	Konzentration
C	%	technischer Ausgangszustand einer neuerlegten Rohrleitung (i. d. R. 100 %)
$c(Ca^{2+})$	mol/m ³	Konzentration an Calcium-Ionen
$c(Cl^-)$	mol/m ³	Konzentration an Chlorid-Ionen
$c(O_2)$	g/m ³	Sauerstoffkonzentration
$c(SO_4^{2-})$	mol/m ³	Konzentration an Sulfat-Ionen
D	mm	Kugeldurchmesser; Rohraußendurchmesser
d	mm	Restwanddicke des Rohres
d _a	m	Rohraußendurchmesser
d _i	m	Rohrinnendurchmesser
DM	mm	maximaler Durchmesser der Korrosionsstelle, maximale Breite bei Narbenkorrosion
DM _i	mm	idealer Durchmesser der Korrosionsstelle
DM _o	mm	oberer Durchmesser der Korrosionsstelle
DM _u	mm	unterer Durchmesser der Korrosionsstelle
DN	-	Nennweite (Diameter Nominal)
D _L	mm	Bohrungsdurchmesser
D _{Pr}	%	Verdichtungsgrad (Proctordichte)
Δd	mm	Abnahme der Wanddicke
Δm	g/cm ³	flächenbezogener Masseverlust
E	N/mm ²	E-Modul
E ₁	N/mm ²	Verformungsmodul der Überschüttung über dem Rohrscheitel
E ₂ ; E ₂₀	N/mm ²	Verformungsmodul der Leitungszone seitlich des Rohres bzw. des anstehenden Bodens neben dem Graben
E ₃	N/mm ²	Verformungsmodul des eingebauten Bodens neben der Leitungszone
E ₄	N/mm ²	Verformungsmodul des Bodens unter dem Rohr (Baugrund)
E _B	N/mm ²	Verformungsmodul des Bodens (allgemein)
E _S	kN/m ²	Steifemodul des Rohrauflegers
$E(\hat{R}_t)$	(Jahre)	Bedingter Erwartungswert der restlichen Lebensdauer

E(t)	(Jahre)	Erwartungswert der Lebensdauer (allgemein)
E(τ /t)	(Jahre)	Funktion der Restlebensdauer (nach Herz)
F	N	Höchstzugkraft; Zugkraft bzw. Prüfkraft allgemein
f	-	Setzungsbeiwert nach KANY
FEM		Finite-Elemente-Methode
G ₁ bis G ₄		Bodengruppe nach ATV A 127
GGG		Grauguss mit Kugelgraphit; Duktulguss (Grauguss globular)
GGL		Grauguss mit Lamellengraphit (Grauguss lamellar)
γ	-	Sicherheitsbeiwert
γ_{Rohr}	kN/m ³	Wichte des Rohrwerkstoffes
γ_{w}	kN/m ³	Wichte des Wassers
h	mm	Probenkopfhöhe
HBW	(N/mm ²)	Brinellhärte
HNO ₃		Salpetersäure
I	mm ⁴	Trägheitsmoment (hier der Kreisringfläche des Rohres)
k; k _{s;m}	kN/m ³	Bettungskonstante
K _{B7,0}	mmol/kg	Basekapazität
K _{S4,3}	mmol/kg	Säurekapazität
KKS		Kathodischer Korrosionsschutz
KS		Korrosionsschutz
κ	-	Korrekturbeiwert für die Bodenart
l	m	freiliegende Länge des Rohres
L ₀	mm	Anfangsmesslänge
L _c	mm	Versuchslänge
l _{krit}	m	kritische freiliegende Länge des Rohres
l _{max}	mm	maximale Angriffstiefe bei Korrosion
l _n	mm	Länge der Dehnungsmessvorrichtung
l _o	mm	Dehnlänge am oberen Messpunkt der Probe
L _t	mm	Gesamtprobenlänge
L _u	mm	Messlänge nach dem Bruch der Probe
l _u	mm	Dehnlänge am unteren Messpunkt der Probe
λ	m	Hilfswert bzw. elastische Länge
M	kNm	Feldmoment; Einspannmoment; Biegemoment
m _{aus}		Anstieg der linearen Zustandsverschlechterung bis zum Ausfallzeitpunkt
m _B		Anstieg der linearen Zustandsverschlechterung zum Zeitpunkt der Untersuchung
MTTF		mean time to failure (mittlere Lebensdauer technischer Anlagen)
μ		Erwartungswert (allgemein)
N	kN	Normalkraft
N _{ki}	kN	Knicklast
N(0)		Gesamtanzahl von Elementen zum Zeitpunkt t = 0
N(t)		Anzahl der noch funktionsfähigen Elemente zum Zeitpunkt t

v	$g / cm^3 h$	flächenbezogene Masseverlustrate
ν	-	Querdehnzahl
OND		Optimale Nutzungsdauer (technischer Anlagen)
ω	mm/Jahr	Abtragungsgeschwindigkeit
ω_{int}	mm/Jahr	integrale Abtragsrate
ω_{lmax}	mm/Jahr	Eindringgeschwindigkeit
$max\omega$	m	Verschiebung; Setzung
P_i	[bar]	Innendruck
PAK		polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
q'	kN/m	vertikale Gesamtlastlast
q_v	kN/m ²	vertikale Gleichlast
Q_{max}	kN	maximale Querkraft am Schnittufer
R	mm	Probenkopfradius
\hat{R}		empirische Überlebenswahrscheinlichkeit (allgemein)
R_{el}	N/mm ²	untere Streckgrenze
R_m	N/mm	Zugfestigkeit
R_p	N/mm ²	technische Streckgrenze
$R_{p0,01}$	N/mm ²	technische Streckgrenze bei 0,01 % bleibender Dehnung
$R_{p0,2}$	N/mm ²	technische Streckgrenze bei 0,2 % bleibender Dehnung
RH	-	relative Härte
RWD	mm	empirische Restwanddicke
RWD_R	mm	resultierende empirische Restwanddicke
s	mm	Korrosionstiefe
S		Standardabweichung
S_m	mm	mittlere Setzung
$minS$	mm	Mindestwanddicke
S_0	mm	Anfangsquerschnitt innerhalb der Versuchlänge des Probekörpers
S_{PK}	mm ²	Querschnitt Probenkopf
St		Stahl
SLW 60		Schwerlastwagen; Belastung 600 kN
SZ_K	-	Schädigungszahl Korrosionsschutz
SZ_{Ka}	-	Schädigungszahl Korrosionsschutz außen
SZ_{Ki}	-	Schädigungszahl Korrosionsschutz innen
SZ_R	-	Schädigungszahl Rohr
σ	N/mm ²	Spannung allgemein
σ^2	(Jahre)	Streuung um den Mittelwert der Lebensdauer
$\sigma_{0,m}$	kN/m ²	mittlere Sohldruckpressung
$vorh\sigma_{LBZ}$	N/mm ²	vorhandene Längsbiegespannung
$zul\sigma_{LBZ}$	N/mm ²	Rechenwert der Biegezugfestigkeit
σ_{zul}	N/mm ²	zulässige Längsbiegespannung
σ_r	N/mm ²	Spannungen in Radialrichtung
σ_x	N/mm ²	Längsspannung.
σ_φ	N/mm ²	Umfangsspannung

t	mm	Rohrwanddicke
t	Jahre	Betrachtungszeitraum; Rohralter
t _{FK}	Jahre	Restzeit bei Flächenkorrosion
t _{max}	mm	ursprüngliche maximale Rohrwanddicke
t _{min}	mm	tragfähige Mindestwanddicke
t _{MK}	Jahre	Restzeit bei Muldenkorrosion
T _N	Jahre	mittleres Rohrnetzalter
t _{LK;NK}	Jahre	Restzeit bei Loch- oder Narbenkorrosion
t _{ZM}	mm	Minstdicke der Zementmörtelschicht
TW		Trinkwasser
W	mm ³	Widerstandsmoment (Kreisringfläche bzw. Rechteckfläche)
W _E	-	Bewertungssummenzahl
WVN		Wasserversorgungsnetz
WVU		Wasserversorgungsunternehmen
X ₀	Jahre	Zeitpunkt der Rohrverlegung
X _{Aus}	Jahre	Zeitpunkt des Ausfalls
X _{Ist}	Jahre	Zeitpunkt der Untersuchung
X _{Aus-neu}	Jahre	korrigierter Zeitpunkt des Ausfalls
\bar{X}	Jahre	variabler Teilbetrag der Verschiebung des Ausfallzeitpunkts
\bar{x}		Mittelwert (allgemein)
Y ₀	%	technischer Ausgangszustand (i. d. R. = C = 100 %)
Y _{Aus}	%	technischer Mindestzustand
Y _{Ist}	%	technischer Ist-Zustand
z	m	Dicke der setzungsverursachenden Schicht (Dicke des Rohraufagers)

I. Problemstellung und Motivation

Mitte des 19. Jahrhunderts wurde in deutschen Städten mit dem Aufbau einheitlicher und zentraler Wasserversorgungsnetze begonnen. Im Laufe der Zeit wuchsen die Netze im Verhältnis zum Stadtwachstum und dem Anstieg der Einwohnerzahlen beständig. Verschiedenste Rohrwerkstoffe mit jeweils sehr unterschiedlichen Eigenschaften (Herstellungsverfahren, Korrosionsschutz usw.) kamen entsprechend der technologischen Weiterentwicklung über einen Zeitraum von bis zu 150 Jahren zum Einsatz. Während im 19. Jahrhundert die Rohrnetze zum größten Teil mit Graugussleitungen aufgebaut wurden, sind die Netze im Verlauf des 20. Jahrhunderts mit einer großen Anzahl weiterer Rohrwerkstoffe weiter ausgebaut worden. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts war der Auf- und Ausbau der städtischen Wasserversorgungsnetze weitestgehend abgeschlossen. Die Historie städtischer Trinkwassernetze lässt sich in drei Epochen einteilen [1; 7]:

19. Jahrhundert	→	Aufbau der Rohrnetze
20. Jahrhundert	→	Ausbau der Rohrnetze
21. Jahrhundert	→	Instandhaltung der Rohrnetze

Teile der Rohrnetze (besonders im Stadtkerngebiet) weisen inzwischen eine Betriebszeit von mehr als 100 Jahren auf. Dies trifft insbesondere für metallische Rohrleitungen zu. Die Wasserversorgungsnetze bestehen in Deutschland zu

- ca. 57 % aus Gussrohrleitungen (Grauguss und Duktulguss) und zu
- ca. 7 % aus Stahlrohrleitungen [5; 15].

Rund zwei Drittel des deutschen Trinkwassernetzes bestehen demzufolge aus metallischen Rohrwerkstoffen. Daraus ergab sich der Untersuchungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit und richtet sich auf die metallischen Rohrwerkstoffe Gusseisen und Stahl. Das Rohrnetzalter muss jedoch nicht in direktem Zusammenhang mit dem technischen Verschleiß bzw. der Zustandsverschlechterung stehen

Die Aufgabe der Netzeigentümer (im folgenden Wasserversorgungsunternehmen WVU genannt) ist die Sicherstellung der Versorgung der Bevölkerung mit hygienisch einwandfreiem Trinkwasser in ausreichender Menge. Da das Rohrleitungsnetz der Teil mit dem größten Anlagevermögen eines WVU ist, bestimmen der Zustand und die Nutzungsdauer des Netzes maßgeblich dessen Qualität und Wirtschaftlichkeit. Eine sichere und wirtschaftliche Versorgung mit Trinkwasser setzt demzufolge eine gezielte Instandhaltung der Netze und somit die Kenntnis über dessen Zustand voraus [2; 4].

Eine allgemeine Zustandsverschlechterung an Leitungen und Armaturen der städtischen Wasserversorgungsnetze verursacht steigende Schadensraten und reduziert die technische sowie wirtschaftliche Nutzungsdauer und somit die Funktionsfähigkeit der Netze [1; 3; 5]. Maßnahmen zur Erhaltung bzw. Verbesserung der Funktionsfähigkeit der Netze sind entsprechende Rehabilitationsplanungen als eine Option der Instandsetzung (Reinigung, Sanierung und Erneuerung) entsprechend den Empfehlungen in DVGW-Arbeitsblatt W 400-3 und DVGW-Hinweis W 401 [8; 9].

Die Ergebnisse der Arbeit sollen zur Verbesserung der Planung und Durchführung von Sanierungs- und Erneuerungsmaßnahmen beitragen.

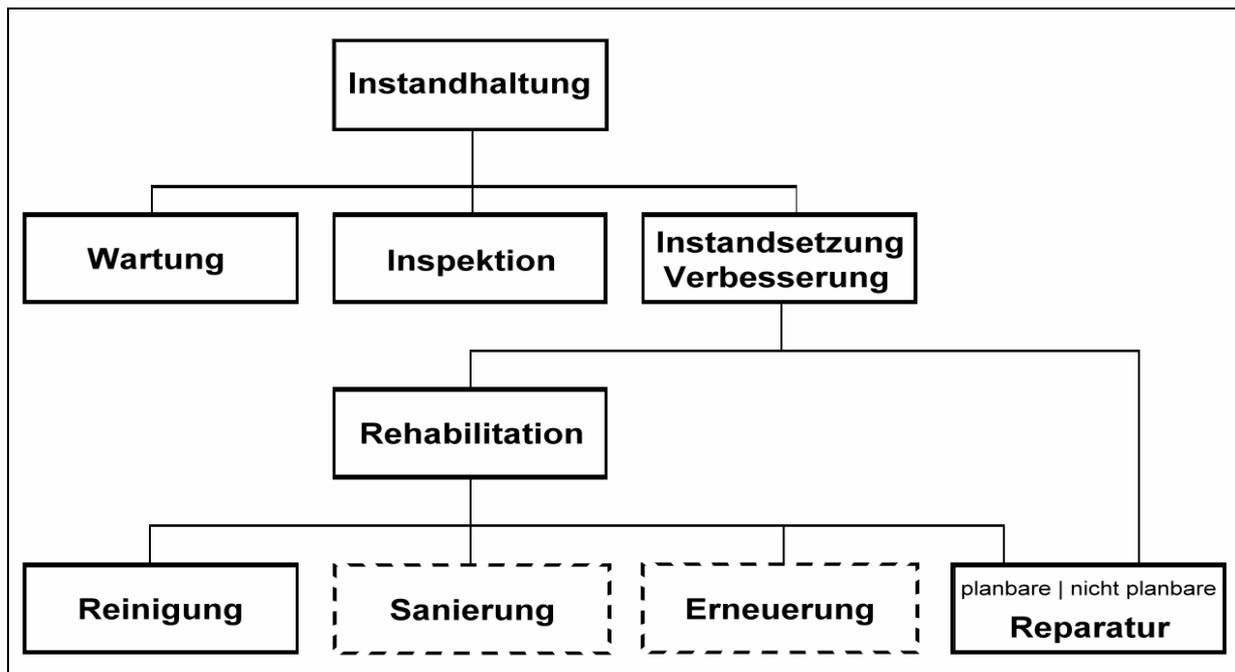


Abbildung 1: Bestandteile der Instandhaltung [8]

Eine weitere Option der Instandsetzung ist die Reparatur als Zwischenlösung. Bevorzugte Instandsetzungsmaßnahme ist häufig die Reparatur von Rohrschäden mittels Rohrschellen. Der Netzzustand wird jedoch durch Reparaturen - gleichgültig ob planbar oder nicht planbar - nicht verbessert [3].

Die Planung von Instandhaltungsmaßnahmen (Wartung, Reparatur, Instandsetzung) der Netze stützt sich derzeit auf die sog. Schadensstatistik. Mit Hilfe der Schadensstatistik werden verfügbare Daten zum Leitungsnetz gespeichert, hauptsächlich Daten zu Baujahr, Leitungslänge, Nennweite, Lage der Leitung und Rohrwerkstoff. Zusätzlich wird jeder aufgetretene Schaden mit Schadensdatum und möglicher Ursache in der Statistik registriert (DVGW-Merkblatt W 395 [10]).

In Kapitel 1 sind die dem Stand der Technik entsprechenden Methoden und Massnahmen zur Planung von Instandhaltungsmaßnahmen (Rehabilitationsplanung und -durchführung) aufgeführt.

Die Schadensstatistik enthält zwar notwendige Daten zur Zustandsbeurteilung erdverlegter metallischer Trinkwasserleitungen, diese Daten sind aber bei weitem nicht ausreichend, da der Zustand von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird (Abbildung 2).

In DVGW-Hinweis W 401 werden unter anderem als Grundlage für notwendige Rehabilitationsplanungen detaillierte Kenntnisse über den Zustand und Bestand der Rohrleitungen im Versorgungsnetz verlangt. Der Leitungszustand hat Einfluss auf die Entwicklung der Schadensrate und der technischen Nutzungsdauer.

Der Schadensstatistik als Grundlage für Rehabilitationsplanungen sind jedoch Grenzen gesetzt, da die Daten der Statistik keine hinreichende Auskunft über den tatsächlichen materialtechnischen Zustand entsprechender Rohrleitungen geben. Erschwerend kommt hinzu, dass oftmals eine mangelhaft geführte Schadenserfassung eine Auswertung durch die Statistik bzw. Zustandsbeurteilung der Rohrstränge unmöglich macht.

Eine Wichtung der in Abbildung 2 genannten Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf den Leitungszustand erfolgt in Kapitel 3.



Abbildung 2: Einflussfaktoren auf den technischen Zustand einer Rohrleitung [2; 16 - 21]

Weiterhin werden bei der Auswertung der Schadensstatistik die Weiterentwicklung der Rohrherstellungsverfahren und damit zusammenhängende Werkstoffeigenschaften nur teilweise berücksichtigt. In DVGW-Hinweis W 401 erfolgt dies über grob eingeteilte Leitungsgruppen, die nur zum Teil der tatsächlichen Weiterentwicklung entsprechen (wie etwa Herstellungsverfahren). Als ein Hauptbestandteil dieser Arbeit erfolgen in Kapitel 4 zu dieser Problematik genauere Untersuchungen.

Eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung des Rohrzustands, welche nicht aus der Schadensstatistik ableitbar ist, ist die statische Resttragfähigkeit. Sie gibt Auskunft darüber, bis zu welcher Belastung (Spannungen) der Rohrquerschnitt noch tragfähig ist. Die Kenntnis der statischen Resttragfähigkeit ist ferner notwendig, um über die Sanierungsfähigkeit einer Leitung im Zuge von Rehabilitationsmaßnahmen zu urteilen.

Bisher ist das Abschätzen der statischen Resttragfähigkeit eine Ermessensfrage, da keine einheitlichen Regelungen existieren. Ein Verfahren zur Ermittlung der statischen Resttragfähigkeit, verbunden mit der Ermittlung des technischen Zustands eines Leitungsabschnitts, wird in Kapitel 10 erläutert.

Die Notwendigkeit, dass sich die vorliegende Arbeit mit der Lösung der Problematik der Zustandserfassung von erdverlegter Trinkwasserleitungen beschäftigt, soll zusätzlich durch folgende Stichpunkte veranschaulicht werden:

Gegenwärtige Situation

- Teile der städtischen Rohrnetze besitzen eine über 100jährige Betriebszeit, insbesondere metallische Leitungen [6]
- ca. 40 % aller Leitungen sind älter als 60 Jahre [6]
- Rohrnetze mit hohem Verschleißgrad (verschlechterter Zustand) stellen hohe Investitionsanforderungen [21]

- die Versorgungsqualität wird vom Zustand bzw. der Zustandsentwicklung der Rohrstränge bestimmt
- Zustands- und Schadensentwicklung bestimmen erforderliche Instandsetzungsmaßnahmen unter Beachtung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Interessen (z.B. Finanzmitteleinsatz, Verkehrsumleitung im Zuge von Baumaßnahmen am Netz)
- seit den 70er Jahren können Schadensdaten in der Schadensstatistik mittels EDV-Technik ausgewertet werden, so ist auch ein Trend der Schadensraten erkennbar
- oftmals werden bei der rechnergestützten Auswertung von Schadensstatistiken bei einer wiederholten Berechnung bereits reparierte, sanierte oder erneuerte Leitungen weiterhin als schadhafte Leitungen geführt und die Veränderung (u. U. Verbesserung) des Leitungs- bzw. Netzabschnitts nicht berücksichtigt; die Schadensraten werden verfälscht
- bevorzugte Instandsetzungsmaßnahme in den WVU ist die bereits erwähnte Reparatur mit Rohrschellen o. ä. an ersichtlichen Schadensstellen, der Verschleiß des Rohrnetzes wird dadurch nur kurzfristig und punktuell unterbunden
- die technische und wirtschaftliche Nutzungsdauer des Netzes wird durch Reparaturen nicht verlängert, da mit der punktuellen Reparatur der schlechtesten Netzelemente der Zustand des Netzes nicht verbessert wird (trotz Reparatur ist mit weiteren Schäden an der entsprechenden Leitung zu rechnen)
- längerfristig wird ein sog. Rehabilitationsstau verursacht, da die Sanierung bzw. Erneuerung des Rohrnetzes hinausgezögert wird
- vermeidbare Folgeschäden an Rohrleitung und Straßenkörper durch fehlerhafte Wiederverfüllung der Leitungsgräben entstehen hauptsächlich bei der Reparatur oder der Erneuerung der Leitungen in offener Bauweise
- Arbeiten in offener Bauweise (gleichgültig ob für Reparaturen oder Erneuerungen) sind eine zusätzliche Belastung für Verkehr und Anwohner
- bei hinreichender Kenntnis über den technischen Rohrzustand (Resttragfähigkeit) kann u. U. eine Sanierung die Erneuerung in offener Bauweise ersetzen

Rohrwerkstoff

- die verschiedensten Rohrwerkstoffe kamen und kommen beim Auf- und Ausbau des Rohrnetzes zum Einsatz; dies führt zu einem Materialmix mit nicht vorhersehbaren Materialeigenschaften und einer inhomogenen Netzstruktur (werkstoffbezogen)
- die Weiterentwicklung der Rohrherstellungsverfahren, Verbindungstechnik und der Ausführung des Korrosionsschutzes führen zu Unterschieden in der Zustandsverschlechterung (z. B. Verschleiß, Korrosionsrate) und sind durch die Einteilung in Rohrgenerationen zu berücksichtigen [206]
- die Zusammenhänge zwischen Wassergüteparametern, Betriebsregime und Rohrwerkstoff sollten bekannt sein bzw. erkannt werden (Trübungen, Inkrustationen, Rücklösungen, Korrosion an der Rohrwand, Biofilme), erst damit können Zustände und Schadenswahrscheinlichkeiten bei bestimmten Verlegebedingungen und Rohrwerkstoffen prognostiziert werden [9]
- die Unterschiede in der Tragfähigkeit und der Korrosionsbeständigkeit zwischen den Rohrwerkstoffen (E-Modul; Zugfestigkeit, Korrosionsschutz) bei bereits verlegten Rohrleitungen und neu verlegten Rohrwerkstoffen müssen ermittelt und bei der Rehabilitationsplanung genutzt werden, da das Alter allein nicht zur Beurteilung des Rohrleitungszustands herangezogen werden kann [20; 25]

- durch das Rohralter sind jedoch der Verlegezeitpunkt und der Herstellungszeitraum feststellbar und somit Hinweise auf Herstellungsverfahren und den damit zusammenhängenden Materialeigenschaften gegeben (Kapitel 4)
- Einflussfaktoren wie Lasten, Streuströme, Bodeneigenschaften (allg. Verlegebedingungen) müssen erkannt, interpretiert und in eine Rehabilitationsplanung einbezogen werden
- die Auswertung der erfassten Daten in der Schadensstatistik lässt eine hinreichende Beurteilung der vorgenannten Einflussfaktoren nicht zu, da diese Daten unzureichend genau oder erst gar nicht erfasst werden

Wirtschaftlichkeit

- auf dem Markt werden unterschiedliche Computerprogramme zur Rohrnetzberechnung und –bewertung angeboten mit denen es möglich sein soll, verschiedene Strategien der Netz- und Leitungsrehabilitation zu planen bzw. abzuwägen und eine Auswahl der zu rehabilitierenden Netzabschnitte zu treffen [22] (Kapitel 1)
- zum überwiegenden Teil basieren diese Computerprogramme bisher auf der Auswertung der Daten der Schadensstatistik, deren Grenzen oben genannt wurden; auf eine Verbesserung der Auswertungsqualität durch exakte messtechnisch erfasste Daten zum materialtechnischen Rohrleitungszustand (z.B. statische Resttragfähigkeit) wird bisher verzichtet
- die Auswahl von wirtschaftlich alternativen Rehabilitationsmaßnahmen ist auf Grundlage der Schadensstatistik ohne die Kenntnis über den technischen Rohrleitungszustand nicht möglich; Kosteneinsparpotenziale bei der Instandhaltung von städtischen Trinkwasserleitungen werden dadurch verschenkt [23; 24]
- die Bestimmung und Erhaltung sanierungsfähiger Leitungen sollte über die Ermittlung des technischen Rohrleitungszustands erfolgen
- der Vorteil gegenüber einer Rehabilitationsplanung mittels Auswertung der Schadensstatistik entsprechend dem DVGW-Hinweis W 401 liegt bei einer Rehabilitationsplanung über die Bewertung des technischen Zustands (materialtechnische Zustandsuntersuchung) von Rohrleitungsabschnitten anhand gesicherter Untersuchungsergebnisse [9]

II. Zielstellung

Im 21. Jahrhundert steht die Rehabilitation (als eine Option der Instandhaltung) der städtischen Trinkwasserrohrnetze im Vordergrund [1]. Das bedeutet die Wiederherstellung eines funktionierenden und wirtschaftlichen Wasserversorgungsnetzes, welches den Anforderungen eines Rohrnetzes des 21. Jahrhunderts entspricht. Dazu zählt die Schaffung einer homogenen Netzstruktur, wobei das Rohrnetz aus wenigen Rohrwerkstoffen, ausgewählt nach Funktion der Leitung (Wasseranschluss-, Versorgungs- oder Zubringerleitung nach DVGW-Arbeitsblatt W 400-1 bestehen sollte [26]. So können Aussagen über Verhaltensweisen des Rohrwerkstoffs wie Ausfallwahrscheinlichkeiten oder Restnutzungsdauer über größere Stranglängen oder Teilgebiete getroffen werden. Dies erhöht die Effektivität einer Rehabilitationsplanung unter Verwendung langlebiger Rohrmaterialien. Zusätzlich bleibt die Qualität des eingespeisten Trinkwassers erhalten (z.B. durch Vermeidung von Rostwasser) und die Versorgungsqualität (Fließgeschwindigkeit; Inkrustationen) wird verbessert. Längerfristig werden die Schadensrate und somit Wasserverluste und nicht planbare Reparaturkosten gesenkt. Unter Beachtung der o. g. Aspekte hat die vorliegende Arbeit deshalb hinsichtlich der Zielstellungen zwei Schwerpunkte.

Erster Schwerpunkt – Einteilung in Rohrgenerationen

Hierzu wird eine einheitliche Definition und Bewertung der metallischen Rohrleitungsgruppen auf weiterentwickelter Grundlage von Roscher [1] und DVGW-Hinweis W 401 [9] (im folgendem Rohrgenerationen genannt, siehe Kapitel 4) und eine Definition und Wichtung der in Abbildung 2 gezeigten Einflussfaktoren vorgenommen (Kapitel 3). Dadurch ist eine differenzierte Charakterisierung des Netz- und Leitungszustands bereits auf Grundlage der Schadensstatistik ohne weitere Kenntnis zum technischen Rohrleitungszustand möglich. Der Einfluss weiterentwickelter Verfahren bei der Rohrherstellung, der Rohrverbindungstechnik, der Ausführung des Korrosionsschutzes und unterschiedliche Werkstoffeigenschaften werden so bereits berücksichtigt.

Zweiter Schwerpunkt – Prognose der technischen Nutzungsdauer

Der zweite Teil der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich unter Einbeziehung der in Abbildung 2 gezeigten Einflussfaktoren mit der Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung des technischen Rohrleitungszustands und der damit verbundenen Ableitung der statischen Resttragfähigkeit, der technischen Abnutzungsreserve und der technischen Restnutzungsdauer der Rohrleitung.

Die materialtechnische Zustandsuntersuchung ist hierfür das notwendige Werkzeug.

Den Versorgungsunternehmen, Rohrnetzbetreibern und Ingenieurbüros werden mit der statischen Resttragfähigkeit und der Restnutzungsdauer einer Rohrleitung zwei wichtige Hauptkennzahlen für eine Rohrleitungsbewertung und Nutzungsdauerprognose als Grundlage der Rohrnetzbewertung und der Rehabilitationsplanung geliefert.

Die Aussagequalität EDV-gestützter Verfahren zur Rohrnetzbewertung und die Treffsicherheit der Vorhersage von Restnutzungsdauer und Schadensrate (Zustandsbewertungsverfahren) sollte unter Einbeziehung der gesicherten Ergebnisse der materialtechnischen Zustandsuntersuchung erhöht werden.

Materialtechnische Zustandsuntersuchungen erfolgen an Einzelproben ausgewählter Rohrstränge. Zur Bewertung größerer Netzabschnitte ist es deshalb notwendig, die

vorhandenen Untersuchungsergebnisse auf Rohrstränge mit annähernd gleichen Einflussfaktoren zu übertragen. Diese Vorgehensweise wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit geprüft (Kapitel 14).

Zusammengefasste Ziele der Dissertation:

- Entwicklung von möglichst einfachen Methoden zur Erkennung, Ermittlung, Interpretation und Wichtung der Einflussfaktoren auf den Rohrwerkstoff (Kapitel 3, Kapitel 4; Kapitel 6; Kapitel 7)
- Entwicklung eines Prognosekonzepts zur Beurteilung des künftigen technischen Rohrzustands (Resttragfähigkeit, Abnutzungsreserve, technische Restnutzungsdauer) (Kapitel 5; Kapitel 8 - Kapitel 11)
- Einbeziehung von Untersuchungsergebnissen zur Bodenaggressivität für eine Präzisierung des Prognosekonzepts (Kapitel 12)
- Erarbeitung eines Konzepts zur Beurteilung der Querbruchgefahr von Graugussrohren (Kapitel 13)
- Verwendung der Untersuchungsergebnisse und des Prognosekonzepts zur Unterstützung und Durchführung einer empfohlenen vorbeugenden und zustandsorientierten Instandhaltung (Rehabilitationsplanungen) (Kapitel 14, Kapitel 15)
- Verbesserung technischer Zustandsbewertungen und Erhöhung der Aussagekraft anhand gesicherter Untersuchungsergebnisse (Kapitel 15)

III. Abgrenzung des Themengebiets

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Zustandsuntersuchung an städtischen metallischen Trinkwasserleitungen (siehe Kapitel I).

Zum überwiegenden Teil fanden im Rahmen der Arbeit materialtechnische Zustandsuntersuchungen an Versorgungsleitungen der Nennweiten DN 80 bis DN 300 statt (grüner Bereich in Abbildung 3), da Versorgungsleitungen den Grossteil des städtischen Wasserversorgungsnetzes ausmachen und mit der genannten Nennweitenbegrenzung die typischen Abmessungen erfasst werden (Abbildung 4). Zur Gewinnung von Vergleichswerten wurde der Untersuchungsbereich auf Nennweiten zwischen DN 63 und DN 350 erweitert (gelber Bereich in Abbildung 3)

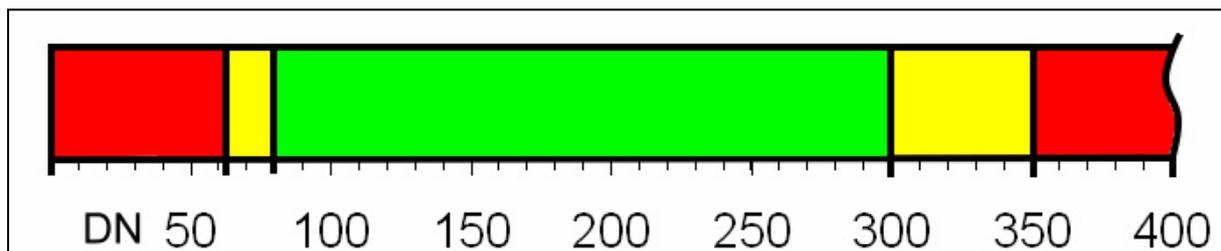


Abbildung 3: Abgrenzung der relevanten Rohrnennweiten für die materialtechnische Zustandsuntersuchung

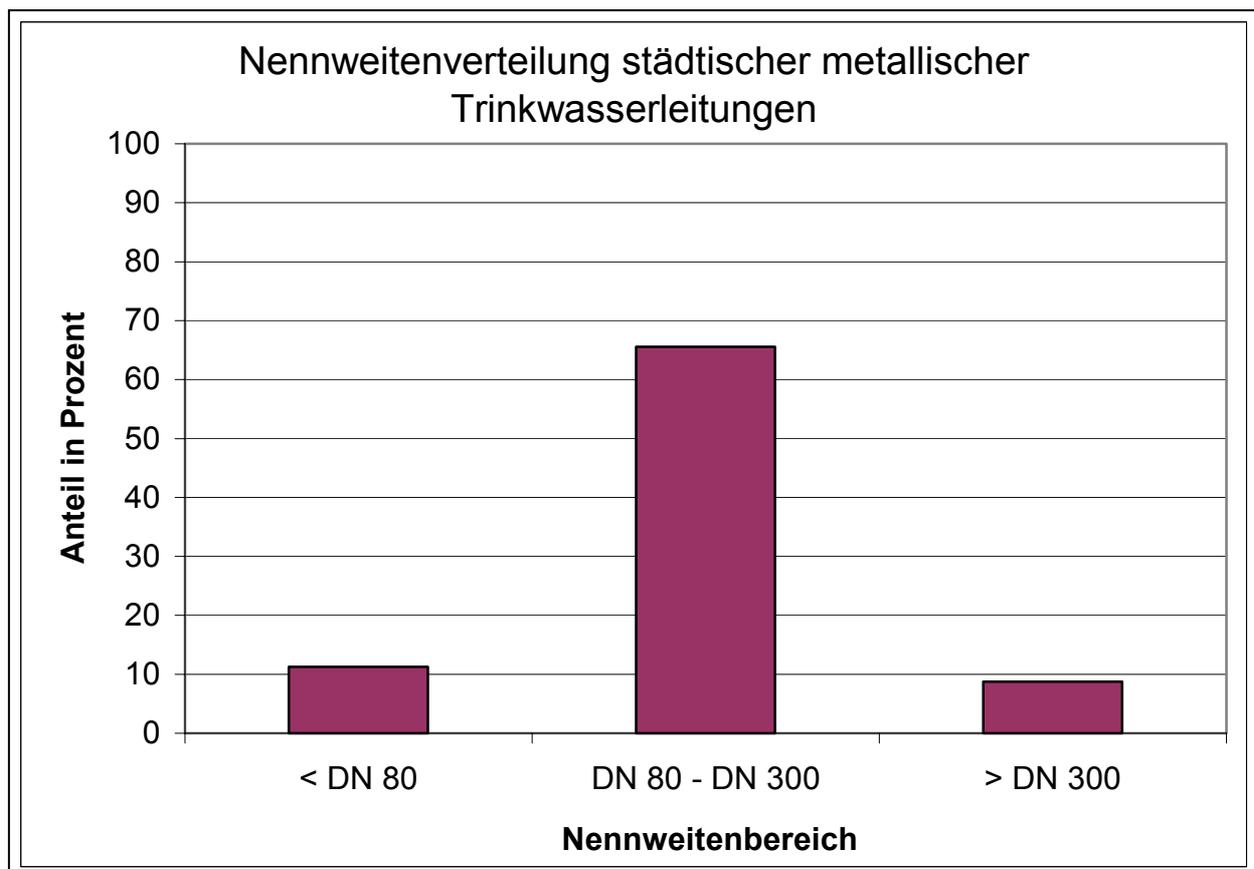


Abbildung 4: Nennweitenverteilung städtischer metallischer Trinkwasserleitungen, die restlichen Prozente verteilen sich auf nichtmetallische Leitungen [6]

Als Rohrwerkstoffe für metallische Trinkwasser-Versorgungsleitungen wurden und werden ausschließlich Grauguss mit Lamellengraphit, Duktulguss und Stahl verwendet [27 - 28]. Diese Werkstoffe sind deshalb Untersuchungsbestandteil.

Laut Definition in DVGW-Arbeitsblatt W 400-3 ist das Ende der technischen Nutzungsdauer eines Rohrleitungsstrangs dann erreicht, „...wenn die tatsächliche Schadensrate die zulässige Schadensrate dauerhaft überschreitet“ [8]. Die Arbeit präzisiert dagegen wie folgt: das Ende der technischen Nutzungsdauer ist erreicht, wenn die Tragfähigkeit der Leitung unterschritten wird. Die Tragfähigkeit wird durch Verschleiß, hauptsächlich Korrosion, beeinträchtigt.

Absicht der vorliegenden Arbeit ist es, mit Hilfe der materialtechnischen Zustandsuntersuchung die technische Restnutzungsdauer für eine qualitativ verbesserte Rohrnetzbewertung zu bestimmen. Je genauer die technische Restnutzungsdauer eines Rohrleitungsabschnitts bestimmt werden kann, umso genauer ist die Bestimmung des Ausfallzeitpunktes. Dadurch lässt sich der Einsatz von Investitionsmitteln (z.B. bei Rohrerneuerung) bestimmen. Weitere Untersuchungen zum Investitionsbedarf von Rehabilitationsmaßnahmen (wirtschaftliche Restnutzungsdauer) sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Neben den Ergebnissen der materialtechnischen Zustandsuntersuchung sind dazu betriebswirtschaftliche Faktoren erforderlich, die aufgrund spezifischer unternehmensinterner Ziele in den WVU über die allgemeinen Annahmen in der Arbeit nicht erfasst werden können. Während der praktischen Anwendung der materialtechnischen Zustandsuntersuchung zur Bestimmung der technischen Restnutzungsdauer erfolgt zusätzlich die Einbeziehung der jeweiligen betriebswirtschaftlichen Faktoren (Abschnitt 4.4 in DVGW-Arbeitsblatt W 400-3 [8]). Das heißt, die Planung des Investitionsbedarfs für Rehabilitationsmaßnahmen erfolgt unter Abgleich der technischen und wirtschaftlichen Restnutzungsdauer (Diagramm 64). Die technische Restnutzungsdauer soll demzufolge als Grundlage für eine weitere Rohrnetzbewertung und Rehabilitationsplanung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten herangezogen werden. Ohne die Kenntnis über den technischen Ist-Zustand eines Rohrnetzes und dessen künftige Entwicklung ist eine wirtschaftliche Bewertung und Planung nicht möglich.

Zurzeit erfolgt die Bestimmung von Restnutzungsdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit größtenteils auf Grundlage wahrscheinlichkeitstheoretischer Prognosen (z. B. über die sog. Herzverteilung) [31]. Es ist nicht Ziel der Arbeit, neue wahrscheinlichkeitstheoretische Prognoseverfahren zu entwickeln (Kapitel 1). Die Aussagequalität existierender Prognoseverfahren wird dagegen unter Berücksichtigung der Ergebnisse der materialtechnischen Zustandsuntersuchung verbessert.

Die möglichst einfache Bestimmung des technischen Zustands einer Rohrleitung steht in der Arbeit im Vordergrund. Auf komplexe Prüfverfahren wird deswegen, wenn möglich, verzichtet (vgl. mit Kapitel 2).

Der Untersuchungsschwerpunkt der Arbeit richtet sich auf Rohrleitungen. Andere Netzbestandteile wie Armaturen werden aufgrund ihrer anderen Nutzungseigenschaften und Funktion nicht berücksichtigt.

1.1 Rehabilitationsplanungen mittels Auswertung der Schadensstatistik und Netzbestandsdaten

Die Prognose von Schadensrate, Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. Restnutzungsdauer und die Rehabilitationsplanung bzw. Rohrnetzbewertung erfolgt zum überwiegenden Teil nach oben genanntem Ansatz C unter Zuhilfenahme verschiedener Alterungsfunktionen bzw. Trendfunktionen [9; 20; 22; 34 - 37]. Es handelt sich hierbei um modifizierte quadratische, potenzielle oder exponentielle Trendfunktionen des Rohralters mit progressivem Anstieg [38]. Über Konstanten und Änderung des Anstiegs der Trendfunktionen ist es zumindest bei Ahrens möglich, neben Rohralter und Schadensquotienten zustandsbeeinflussende Faktoren im Ansatz zu berücksichtigen [37].

Die statische Resttragfähigkeit des einzelnen Rohres und damit verbunden der technische Abnutzungsvorrat als Kennwerte des technischen Zustands werden in den o. g. Trendfunktionen zurzeit nicht berücksichtigt. Grund hierfür ist, dass die Trendfunktionen sich auf die Gesamnetzstruktur bzw. Teilabschnitte beziehen und Kennwerte des technischen Zustands meist nur für einzelne Rohrstränge vorhanden sind.

1.2 Rehabilitationsplanungen mittels Auswertung der Schadensstatistik, Netzbestandsdaten und Einbeziehung von Bodenkennwerten

Nach Kleiner und Rajani ist die Auswertung der Schadensstatistik bzw. die Auswertung von Schadensraten an Rohrleitungsgruppen wirtschaftlicher als die vollständige Zustandsuntersuchung des ganzen Rohrleitungsnetzes [17]. Bei der Auswertung der Statistik soll auf folgende Parameter Wert gelegt werden:

- Erneuerungs- bzw. Auswechselrate
- Betriebsregime
- Rohrumgebung mit
 - Temperatur (zeitabhängig, Frost-Index)
 - Bodenfeuchtigkeit (zeitabhängig, Niederschlagsdefizit)
 - Kathodischer Korrosionsschutz KKS (zeitabhängig)
 - zeitunabhängige Faktoren wie Rohrtyp und Bodenart
- innerer Zustand Rohrleitung

Der Zusammenhang zwischen Bodenfeuchtigkeit und jahreszeitlichen Temperaturschwankungen soll dabei berücksichtigt werden. Dazu gehört das Schrumpfungsverhalten des Bodens bei Trockenperioden nach Schlechtwetterperioden und die Frosteindringtiefe nach einem kaltem Winter mit darauf folgenden trockenen Sommer und Herbst (vgl. mit Kottmann [19]).

1.3 Ansätze und Methoden zur technischen Zustandsbeurteilung an erdverlegten Druckrohrleitungen

1.3.1 Zustandsbeurteilung nach Brussig [14; 39]

Beurteilt wird der Rohrleitungszustand als Grundlage für Rehabilitationsplanungen und Maßnahmen (Sanierung oder Erneuerung) am Rohrleitungsbestand. Durch stichprobenartige Untersuchungen wird eine ausreichende Menge an Informationen über den Rohrleitungszustand ermittelt. Der Untersuchungsumfang beträgt ca. 5 % der Rohrleitungslänge, bei Leitungslängen > 200 m sind mehrere Untersuchungsstellen notwendig.

Insbesondere an Stahlleitungen bzw. älteren Graugussleitungen sollten die Rohrverbindungen mit untersucht werden, da sie die Schwachstellen der Rohrleitung sind.

Neben Schadensart bzw. Schadensursache (z.B. Wasserverluste) und dem hydraulischen Zustand ist die Wanddickenreserve am Rohr das wichtigste Beurteilungskriterium.

Aus der vorhandenen Wanddickenreserve wird ein Abnutzungsvorrat abgeleitet, indem die vorhandene Wanddicke einer erforderlichen statischen Mindestwanddicke (materialabhängig) gegenübergestellt wird. Beim Aufbrauch der vorhandenen Wanddickenreserve über den Zeitraum der Restnutzungsdauer wird eine lineare Abnutzungsgeschwindigkeit angenommen. Im Entscheidungs- und Berechnungsalgorithmus ist nicht erkennbar, auf welcher Datengrundlage die eingesetzte Nutzungsdauer in Abhängigkeit der Restwanddicke basiert. Im Rahmen der Untersuchung nach Brussig erfolgt keine Bestimmung und Überprüfung werkstoffspezifischer Eigenschaften wie Zug- oder Druckfestigkeiten.

Die vorhandene Wanddickenreserve ist definiert als Differenz zwischen der gemessene mittleren tragenden Restwanddicke und einer erforderlichen statischen Mindestwanddicke.

Für eine Zustandsbewertung nach Brussig sind nachstehende Faktoren entscheidend.

- Grenzwertüberschreitung nach entsprechender Trinkwasserverordnung bei erhöhtem Eisengehalt (Eintrag durch Korrosionsprodukte > 0,2mg/l)
- Unzureichende hydraulische Leistung durch Korrosions- und Inkrustationsprodukte
- Wanddickenreserve als Entscheidungsgrundlage über Sanierung oder Erneuerung unter Beachtung von DVGW-Arbeitsblatt W 343 [40]; (vgl. Tabelle 1.1)
- ausreichende Tragfähigkeit trotz Perforierung, z. B. bei Lochkorrosion an Stahlleitungen; bezüglich Lochkorrosion ist eine differenzierte Untersuchung notwendig; die statische Restwanddicke ist nur eine Randbedingung

Tabelle 1.1: Hauptentscheidungsfälle der Zustandsbeurteilung nach Brussig:

Entscheidungsfall	Material	Mindestwanddicke
Wanddickenreserve gering	Grauguss	> 2 mm
	Duktilguss	> 2 mm
	Stahl	> 1 mm
Leitung stark zugesetzt	→	baldige Sanierung nach DVGW W 343
Leitung schwach zugesetzt	→	Sanierungsempfehlung
Wanddickenreserve vorhanden	Grauguss	1 – 2 mm
	Duktilguss	1 – 2 mm
	Stahl	0,5 – 1 mm
Außenkorrosion dominant	→	baldige Auswechslung oder Erneuerung
Innenkorrosion dominant	→	baldige Sanierung nach DVGW W 343
Wanddickenreserve sehr gering	Grauguss	0,5 – 1 mm
	Duktilguss	0,5 – 1 mm
	Stahl	0,3 – 0,5 mm
Außen- und Innenkorrosion	→	sofortige Auswechslung oder Erneuerung
keine Außenkorrosion und bisher kaum Korrosionsschäden an Leitung	→	sofortige Sanierung nach DVGW W 343

Bei Außenkorrosion veranschlagt Brussig eine Wanddickenreserve für 50 Jahre weiterer Nutzungsdauer (rechnerischer Abrostzuschlag, bestimmt anhand von Messungen der Korrosionsgeschwindigkeit) oder empfiehlt einen kathodischen Korrosionsschutz (KKS), wenn dieser möglich ist.

Nach Brussig ist eine um 40 % bis 60 % geschwächte Sollwanddicke (vgl. Anhang A) im Allgemeinen für eine Sanierung nach DVGW-Arbeitsblatt W 343 mittels Zementmörtelauskleidung ausreichend. Die Erfassung der vorhandenen Wanddickenreserve erfolgt über Messung der vorhandenen restlichen Wanddicke und des Umfangs der Innen- und Außenkorrosion über Tiefe, Länge, Breite und Flächenanteil an begrenzter Rohroberfläche (siehe Abbildung 5). Die materialtechnische Zustandsuntersuchung wird sich im Rahmen dieser Arbeit an dem Erfassungsalgorithmus von Brussig orientieren.

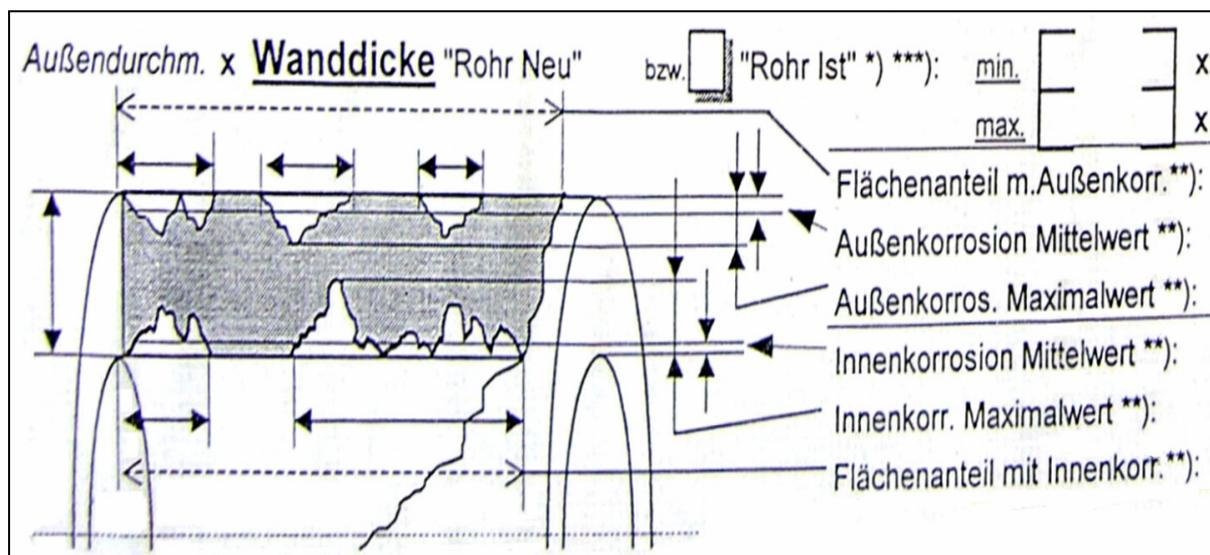


Abbildung 5: Quantitative Ist-Zustandserfassung am freigelegten Rohrquerschnitt [39]

1.3.2 Zustandsbeurteilung nach Böhm [2]

Böhm nennt keine Methoden zur messtechnischen Datenerfassung am Rohr, gibt aber je nach Schädigungsgrad Zustandsnoten an und schlägt entsprechende Maßnahmen vor (Tabelle 1.2). Zusätzlich bezieht er Einflüsse aus Bodenparametern ähnlich DVGW-Arbeitsblatt GW 9 [13] als Maß der Korrosionsgefährdung und Korrosionsgeschwindigkeit ein (Tabelle 1.3).

Tabelle 1.2: Bewertung des Rohrzustands in Abhängigkeit vom Korrosionsgrad [2]

Zustandsnote	Rohrzustand
1	gut erhalten
Erscheinungsform	Flächenkorrosion und / oder Zerstörung der Umhüllung $\leq 5\%$, keine Lochkorrosion, keine Graphitierung, keine Anrisse
Vorgeschlagene Maßnahme	keine
2	erhalten
Erscheinungsform	Flächenkorrosion und / oder Zerstörung der Umhüllung $\leq 30\%$, Lochkorrosion $\leq 5\text{mm}$ Durchmesser, keine Graphitierung, keine Anrisse
Vorgeschlagene Maßnahme	Auskleidung
3	zerstört
Erscheinungsform	Flächenkorrosion und / oder Zerstörung der Umhüllung $> 30\%$, Lochkorrosion $> 5\text{mm}$ Durchmesser, Graphitierung, Anrisse
Vorgeschlagene Maßnahme	Relining (DVGW-Arbeitsblatt GW 320 [41]) oder Erneuerung

Tabelle 1.3: Korrosionsgeschwindigkeiten an erdverlegten metallischen Wasserleitungen (Abtrag in mm pro Jahr) [2]

Korrosion		Aggressivitätsgrad							
Ort	Art	1	2	3	4	5	6	7	8
innen	Flächenkorrosion	0,01			0,02	0,03	0,06	0,11	0,15
	Lochkorrosion	0,06			0,07	0,08	0,10	0,20	0,35
außen	Flächenkorrosion	0,01			0,02	0,04	0,08	0,1	
	Lochkorrosion	0,05			0,15				

Weiterhin nennt Böhm als Kriterium zur Anwendung der Sanierungsmethode Zementmörtel-auskleidung:

- Korrosionstiefe bei Flächenkorrosion $\leq 0,5 \cdot \text{Rohrwanddicke}$
- Korrosionstiefe bei Lochkorrosion $\leq 0,1 \cdot \text{Nennweite bei DN 80 – 300}$
 $\leq 0,01 \cdot \text{Nennweite bei DN } > 300$

Im Rahmen der Untersuchung nach Böhm wird keine Bestimmung und Überprüfung werkstoffspezifischer Eigenschaften wie Zug- oder Druckfestigkeiten vorgenommen.

1.3.3 Zustandsbeurteilung nach Kottmann [36]

Laut Kottmann sollte die Ermittlung mittelfristiger Erneuerungsraten (km/Jahr) am Rohrnetz das Planungsziel in einem WVU sein. Diese Erneuerungsraten lassen sich über die Abschätzung der technischen Nutzungsdauer hinreichend zuverlässig bestimmen. Die technische Nutzungsdauer ist der Zeitraum zwischen der Inbetriebnahme und der durch das gehäufte Auftreten von Schäden verursachten bleibenden Außerbetriebnahme einer Leitung. Da die technische Nutzungsdauer nach Kottmann nicht eindeutig bestimmbar ist, soll durch Erfahrungswerte eine mittlere Nutzungsdauer bestimmt werden (vgl. Kapitel 5).

Weiterhin gibt Kottmann an, dass für die mittlere technische Nutzungsdauer das Korrosionsverhalten des Rohrwerkstoffs bzw. der Verbundkonstruktion Rohrwerkstoff / Umhüllung oder das Bruchverhalten ausschlaggebend sind. So wird für jeden Rohrwerkstoff unter Berücksichtigung der Umhüllung, der Bauweise (Sandbett, Rohrschuttmatten oder steiniger Boden) und der örtlichen Verhältnisse (Bodenbeschaffenheit, Streustromgefahr, Bodenmechanik) eine mittlere technische Nutzungsdauer geschätzt. Unter der Voraussetzung gleichartiger Böden, Bauweisen, Rohrarten (Werkstoff, Umhüllung, Verbindung), Nennweiten und vergleichbarer Einflüsse durch Fremdeinwirkungen ist die mittlere technische Nutzungsdauer eine Funktion der Zeit. Boden, Nennweite und Rohrart können als veränderlicher Faktor hinzu gezogen werden, da sie die „Alterung“ beschleunigen oder verzögern.

Zu rehabilitierende Rohrleitungen sollen in Abhängigkeit einer festgelegten Erneuerungsrate nach folgenden Kriterien ausgewählt werden (vgl. mit DVGW-Hinweis W 401 [9]):

- Anzahl der Schäden, Schadensentwicklung, Anzahl der Folgeschäden
- Auswahl besonders schadensanfälliger Versorgungsbereiche, Leitungsabschnitte oder Rohrwerkstoffe
- Art und Ursache der Schäden (z.B. Bruch, Korrosionsschaden, Zufallsschaden, Schäden durch Dritte)
- **Zustand der Rohrleitung** (von besonderer Bedeutsamkeit)
- Anforderungen an Betriebssicherheit und Verfügbarkeit
- vorbeugende Maßnahmen, z. B. in Bergsenkungsgebieten
- Reduzierung der Wasserverluste unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten
- Vermeidung hoher Druckverluste
- günstige wirtschaftliche Voraussetzungen zur Kopplung der Rehabilitationsmaßnahme mit anderen Baumaßnahmen

Zusätzlich ist die Beurteilung der statischen Resttragfähigkeit notwendig, um eine Entscheidung über die Sanierungsfähigkeit beispielsweise mittels Zementmörtelauskleidung nach DVGW-Arbeitsblatt W 343 zu treffen. Einzelne Durchrostungen lassen sich in Abhängigkeit der Lochgröße mit der Zementmörtelauskleidung überbrücken (siehe Abschnitt 8.3.3)

Untersuchungsverfahren bzw. Orientierungswerte zur Zustandsbeurteilung, zur Bestimmung der statischen Resttragfähigkeit und der technischen Abnutzungsreserve werden von Kottmann nicht genannt.

1.3.4 Weitere Techniken und Beurteilungskriterien zur Zustandserfassung

Korrosionsdiagnostik

Eine weitere Möglichkeit einer technischen Analyse zur Bestimmung des Ist-Zustands des Rohrleitungssystems (Gas / Wasser) ist die Bewertung korrosionstechnischer Kriterien mit Hilfe der Korrosionsdiagnostik [42]. Dazu zählt die Messung der Schichtdicke des äußeren Korrosionsschutzes (Umhüllungsschichtdicke) nach DIN EN ISO 2178 und ASTM B499-96 mittels der magnetischen Umhüllungsschichtdickenmessung [43; 44]. Bei dieser Schichtdickenmessung wird die Dicke von nicht leitenden Schichten auf metallischen Untergründen bestimmt. Die Magnetinduktion ist dabei für ferromagnetische Untergründe, die Wirbelstrominduktion für Grundwerkstoffe aus Nichteisenmetallen geeignet.

Die potenziostatische Methode wird zur Messung des Polarisationswiderstands angewendet und gibt Auskunft über die Korrosionsgeschwindigkeit eines Metalls mit einer Messzeit von wenigen Minuten. Hierbei wird die elektrochemische Reaktion von Sensorelektroden (aus der Rohrprobe) mit dem umgebenden Elektrolyten über die Messung des Polarisationswiderstandes ermittelt. Die Korrosionsgeschwindigkeit der Elektroden ergibt sich aus der Multiplikation mit einer Systemkonstante. Zur Abschätzung der Nutzungsdauer einer Rohrleitung aus korrosionstechnischer Sicht ist die Ermittlung der Korrosionsgeschwindigkeit der metallischen Leitung (Elektrode) im Boden (Elektrolyt) eine wichtige Kenngröße [45].

In Anlehnung an DVGW-Arbeitsblatt GW 9 und DIN EN 12501 ist der spezifische Erdwiderstand eine wichtige Größe zur Beurteilung der Korrosionsgefährdung erdverlegter metallischer Rohrleitungen [13; 174]. Die Messung erfolgt über das Wenner-Verfahren oder der Messung in einer sog. Soil-Box [46; 177].

Der Einfluss des spezifischen Erdwiderstands (Bodenaggressivität) und der Korrosionsgeschwindigkeit auf erdverlegte metallische Rohrleitungen wird in Kapitel 12 behandelt.

Ultraschallprüfung

Eine Ultraschallprüfung dient nicht nur zur Kontrolle der Schweißnähte an Stahlrohren. Mittels Ultraschallprüfung können sowohl bei Graugussrohren als auch bei anderen metallischen Rohrwerkstoffen der E-Modul, die Wanddicke und Imperfektionen (vgl. Abschnitt 4.9.1) zerstörungsfrei ermittelt werden [47].

Der E-Modul bildet zusammen mit Zug- und Druckfestigkeiten die Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der statischen Resttragfähigkeit bzw. für Tragfähigkeitsberechnungen nach ATV A 127 oder DIN EN 12565 [11; 140].

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der stationären Ermittlung des technischen Rohrleitungszustands. Zur Weiterentwicklung der Untersuchungsmethoden für eine mobile Zustandserfassung der Rohrleitung vor Ort ist die Verfahrensweise der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung genauer zu betrachten (vgl. Abschnitt 15.2).

Kamerabefahrung

Bekannt durch die Anwendung bei der Zustandsbeurteilung von Abwasserkanälen ist eine Kamerabefahrung der zu untersuchenden Rohrleitung gegenwärtig ab Nennweite DN 80 bei vorheriger Entleerung der Leitung möglich.

In Kombination der Kameraköpfe mit Laserabtastung der Rohrwand oder bereits erwähnter Ultraschallprüfung sind neben der relativ groben visuellen Erfassung bei vorheriger Reinigung der Leitung zumindest eine Messung des inneren Rohrverschleißes und die Kontrolle auf Lochkorrosion möglich [20].

Ermittlung des Spannungs-Dehnungsverhaltens [60; 61]

Ein Verfahren zur Ermittlung des Spannungs-Dehnungsverhaltens wurde zur rechnergestützten Rohrleitungsbewertung nach ASME B31G [48] für korrodierte Stahldruckrohre entwickelt. Es soll vor Ort an der freigelegten Rohroberfläche die mechanischen Werkstoffeigenschaften wie Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchzähigkeit zerstörungsfrei erfassen.

Die genannten Werte werden nicht direkt gemessen, sondern es wird über ein sog. Kugeleindrückgerät (automated ball indentation test technique ABI) anhand des Eindrückwiderstands bzw. der Eindrücktiefe auf das Spannungs-Dehnungsverhalten und die damit verbundenen mechanischen Werkstoffeigenschaften geschlossen.

Die Beziehungen zwischen Werkstoffhärte und Zugfestigkeit basieren auf rein empirischen Annahmen und sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Eine Umrechnung auf die Zugfestigkeit kann hier lediglich als Orientierung dienen [28; 62; 63; 126].

1.4 Methoden zur Berechnung der statischen Resttragfähigkeit

1.4.1 Berechnung nach ASME B31G [48]

Die Berechnungen nach ASME B31G beziehen sich in erster Linie auf Gas- und Hochdruckleitungen aus Stahl. Einzige Belastungen sind Innendruck bzw. äußerer Überdruck bei Verlegung unter Wasser. Es wird die Sicherheit bei geschwächter Wanddicke gegen Versagen durch inneren Überdruck berechnet. Die empirische Bemessungsmethodik basiert auf zahlreichen Versuchen, welche im Vorfeld im Rahmen der Erstellung der ASME B31G durchgeführt wurden [49].

Die Berechnung der statischen Resttragfähigkeit an Stahlleitungen mit geschwächtem Querschnitt nach ASME B31G ist für eine weitere Anwendung innerhalb der Arbeit ungeeignet, da sich dieses Regelwerk auf Hochdruckleitungen bezieht. Andere metallische Rohrwerkstoffe wie Grauguss mit Lamellengraphit oder auch weitere Lasten außer dem Innendruck lassen sich nicht berücksichtigen.

1.4.2 Berechnungsempfehlungen von Falter und Veenker [49; 50]

Die Berechnungsansätze beziehen sich vordergründig auf die Berechnung von Linern für die Sanierung von Druckrohrleitungen gemäß ATV A 127-2 [51]. Mögliche Rechenprogramme und Rechenverfahren sollen dem jeweiligen Schadensbild am Rohr bzw. dem statischen System angepasst werden. Eine Übertragbarkeit der Berechnungsempfehlungen auf die Berechnung der statischen Resttragfähigkeit erdverlegter Trinkwasserrohre aus den

Rohrwerkstoffen Grauguss mit Lamellengraphit, Duktulguss und Stahl sollte künftig untersucht werden.

Für die Berechnungen der Resttragfähigkeit setzen Falter und Veenker folgende Grundsätze der technischen Biegelehre an:

- Ebenbleiben der Querschnitte (nach Bernoulli-Hypothese)
- kleine Verformungen (bei größeren Verformungen sind die Lösungen nur Näherungen)
- Gleichgewicht am unverformten System (Theorie I. Ordnung) bei kleinen Normalkräften (z.B. $N < 0,1 \cdot N_{ki}$; mit N_{ki} = Knicklast)
- Gleichgewicht am verformten System (Theorie II. Ordnung) bei größeren Normalkräften (Zug oder Druck)
- normalentreue Belastung (bei innerem Unterdruck und Wasseraußendruck)
- Materialverhalten: ideal elastisch (Annahme bei GGL: linear elastisch)
- Berücksichtigung der abhebenden Bereiche durch Ausschluss von Zugbettung mit iterativer Ermittlung der Bereichsgröße
- bei Stabilitätsproblemen Ansatz von Vorverformungen, die der maßgebenden Beulform ähnlich sind

Bestimmungsgemäße Belastung ist der Innendruck. Jedoch dürfen bei Schwächungen und Zustandsverschlechterung äußere Lasten nicht vernachlässigt werden.

Im angegebenen Betriebsdruck ist der hydraulische Druckstoß berücksichtigt.

Weiterhin empfehlen Falter und Veenker, bei verschwächten Druckleitungen, welche im Allgemeinen durch verminderte Wanddicken durch Korrosion, Abrieb, äußere Einflüsse usw. gekennzeichnet sind, eine Bewertung der Verschwächung durch eine genauere statische Berechnung vorzunehmen [50]. In allen anderen Fällen wie Rissen, Schweißnahtfehler oder Deformation des Rohres sollte der Versuch einer statischen Berechnung nicht unternommen werden. Das Verfahren zur Beurteilung aus Verschwächungen an Stahlleitungen mit vorwiegender Belastung aus Innendruck nach ASME B31G liefert unzutreffende Ergebnisse, indem zu hohe noch zulässige Drücke errechnet werden (vgl. mit Abschnitt 1.3.1).

Die geeignete Methode zur statischen Berechnung verschwächter Rohre ist die Finite-Elemente-Methode (FEM). Sie liefert ausreichend genaue Ergebnisse (Fehler $< 5\%$) bei Auswahl des passenden statischen Ersatzsystems. Voraussetzung ist weiterhin, dass das untersuchte und statisch nachgerechnete Rohrteilstück charakteristisch für die restliche Stranglänge ist. Ähnliche Ansätze von Falter sind übertragbar [197; 198].

Bei vorhandenen Leitungen, die wie in Sanierungsfällen üblich seit langer Zeit im Boden liegen, können durch Entnahme ungestörter Bodenproben und entsprechender Laboruntersuchung die wirklich vorhandenen Lagerungsbedingungen (bzw. die schlechtesten) so genau ermittelt werden, dass eine Berechnung nach ATV A 127 möglich wird.

Wenn Wanddickenverschwächungen mit der FEM berechnet werden, ergeben sich im Verschwächungsbereich Materialspannungen, die bezogen auf Rohrwerkstoffe wie Duktulguss und Stahl, weit oberhalb der Fließspannungen liegen. Deshalb sollte ein Berechnungskonzept erstellt werden, das mit Sicherheiten gegen Versagen durch Bruch arbeitet und die Durchplastifizierung des geschwächten Querschnitts berücksichtigt. Empfohlen wird ein Mindestsicherheitswert von $S = 1,8$ (örtliche Sicherheit gegen Bruch) [49].

Für die sichere Bewertung von Fehlstellen müssen folgenden Grundlagen vorliegen:

- Übereinstimmung FEM-Rechenmodell und Wirklichkeit
- passendes Bemessungskonzept
- Korrosionsprognose (Abbildung 6)

In der entsprechenden Literatur sind keine Angaben über die Festlegungen zu Bemessungsverfahren und Sicherheitswerten bei Berechnung der Tragfähigkeit bei Verschwächungen vorhanden. Die empfohlenen Sicherheitswerte früherer Berechnungen mittels Kesselformel bei Innendruck mit $S = 4,0$ können nicht als wirtschaftlich angesehen werden. Veenker empfiehlt mittels probabilistischen Methoden aus einer zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit einen Sicherheitswert (hier Sicherheitszahl) abzuleiten.

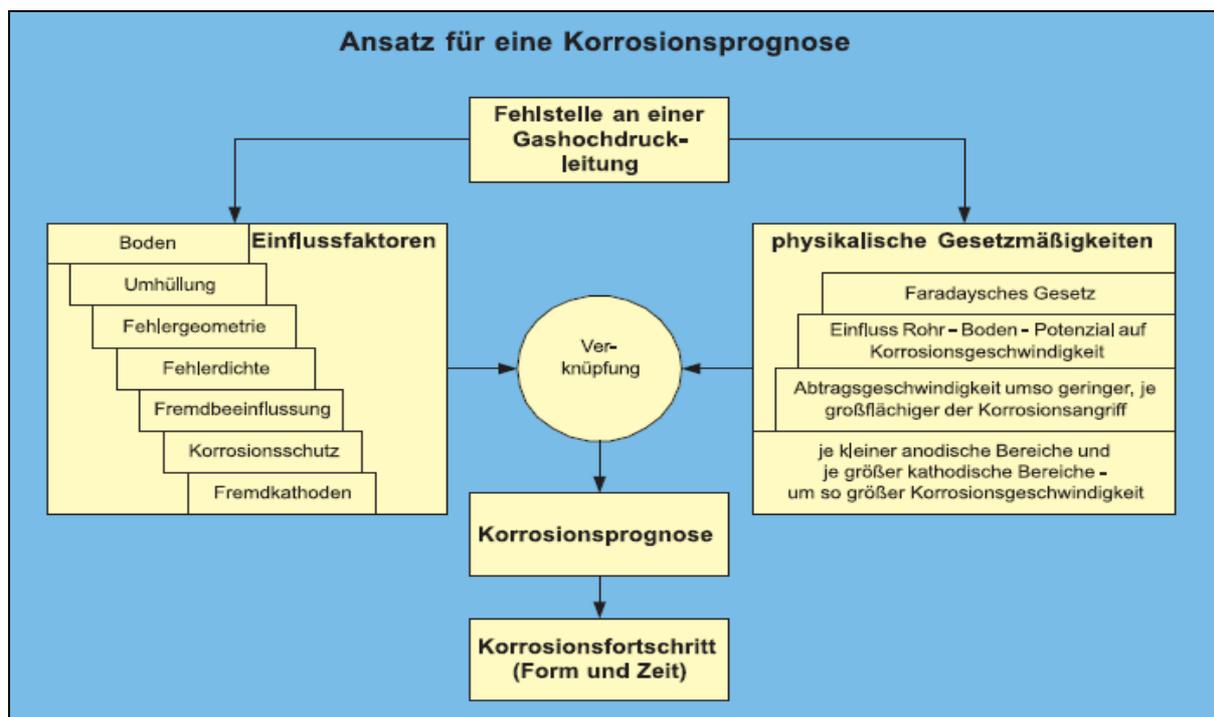


Abbildung 6: Ablaufschema einer Korrosionsprognose (hier: Gashochdruckleitung) [49]

Zur Berechnung der Tragfähigkeit erdverlegter Stahlrohren bei dominierendem Innendruck ist der Berechnungsalgorithmus nach VdTÜV-Merkblatt 1063 geeignet [52].

Die möglichst genaue Ermittlung der äußeren Belastungen aus Erdreich und Verkehr sowie die Berücksichtigung der Rohrauflagerbedingungen ist im Berechnungsalgorithmus nach ATV A 127 möglich und soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch zur Anwendung kommen.

Die statische Berechnung der Tragfähigkeit an Rohren bei Längsbiegung kann über die Annahme eines elastisch gebetteten Balkens mit vorgegebener Setzungslinie erfolgen (siehe Kapitel 13).

Die Ansätze der Berechnungsempfehlungen der Tragfähigkeit an geschwächten erdverlegten Druckrohrleitungen und der Korrosionsprognose nach Falter und Veenker soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf erdverlegte Trinkwasserleitungen und die dazugehörigen Rohrwerkstoffe Grauguss mit Lamellengraphit, Duktulguss und Stahl übertragen werden.

1.4.3 Berechnung aufnehmbarer Biegemomente an korrodierten Rohren nach Hauch und Bai [53]

Die Berechnungsansätze beziehen sich in erster Linie auf die Bemessung gegen lokales Beulen über aufnehmbare Biegemomente (am Kreisringquerschnitt) an Offshore-Stahlleitungen (hoch- und niedriglegierte Stähle) mit Narbenkorrosion.

Über geschlossene Formeln werden die Unrundheit der Rohre, die Korrosionsabmessungen (Breite, Tiefe, Länge), vorhandene Längskräfte und innerer / äußerer Überdruck berücksichtigt. Die erwähnten Formeln lassen sich für Materialien mit isotropen Spannungs-Dehnungsverhalten (richtungsunabhängiger E-Modul), aber auch anisotropen Spannungs-Dehnungsverhalten in Rohrlängs- und Umfangsrichtung anwenden.

Durch kombinierte Belastung aus Innendruck, äußerem Überdruck, Längszug- oder Druckkräfte entstehende Längs- und Umfangsspannungen werden über einen Korrekturfaktor zu einer Vergleichsspannung (Zug oder Druck) zusammengefasst. Anteile aus Radial- und Schubspannungen bleiben unberücksichtigt [54].

Die Korrosionsabmessungen werden über geometrische Korrekturfaktoren erfasst. Vertikale Gleichlasten aus Erdreich und Verkehr werden nicht berücksichtigt. Dadurch sind der Anwendung dieser Berechnungsansätze für die Ermittlung der statischen Resttragfähigkeit erdverlegter metallischer Trinkwasserleitungen mit geschwächtem Querschnitt Grenzen gesetzt.

1.4.4 Berechnung aufnehmbarer Längsbiegemomente nach DIN EN 1594 [55]

Bei der Neuverlegung von Trinkwasserleitungen erfolgt im Normalfall keine zusätzliche Berechnung der Tragfähigkeit bei innerer und äußerer Belastung, da die genormten Wanddicken in den einzelnen Rohrlieferprogrammen mit ausreichender Sicherheit belegt sind.

Die Regelwerke zur statischen Berechnung erdverlegter Entwässerungsleitungen, z.B. ATV A 127, können unter Annahme von Innendruck zur Kontrolle der Tragfähigkeit von Trinkwasserleitungen unter Berücksichtigung geänderter Verlegebedingungen und Festigkeitseigenschaften ebenfalls verwendet werden (vgl. Kapitel 10). Die Bemessung erfolgt im eben genannten Fall über die Ermittlung der Spannungen in Umfangsrichtung quer zur Rohrachse am Kreisringquerschnitt.

Treten jedoch bei unsachgemäßer Bettung oder anderweitigen Änderungen im Baugrund (z.B. Grundwasserschwankungen, Aufschüttungen, Bauarbeiten in Leitungsnähe) Setzungen in der Leitungszone auf, entstehen zusätzliche Spannungen in Rohrlängsrichtung (Längsbiegespannungen).

In DIN EN 1594 werden das Stabmodellverfahren und ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung von Setzungen und somit von Biegemomenten und daraus resultierenden Spannungen erläutert. Diese Verfahren sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Kontrolle einer Gefährdung der Rohre durch Längsbiegung (insbesondere spröde Graugussrohre) herangezogen werden (vgl. Kapitel 13).

1.5 Gegenwärtige Forschungsvorhaben zur Problematik der Rohrnetzrehabilitation auf Grundlage des technischen Rohrzustands (Auswahl)

1.5.1 Forschungsvorhaben des Instituts für Forschung im Bauwesen (IRC) Kanada

Zum Zeitpunkt der Anfertigung der vorliegenden Arbeit läuft ein Forschungsvorhaben zur Untersuchung der Auswirkungen alternder Wasserrohrnetze auf die Wasser- und Versorgungsqualität in WVU und zur Quantifizierung der Einflüsse auf Rohrleitungen als Unterstützung der Entscheidungsprozesse der Rohrnetzbetreiber bei Rehabilitationsplanungen [32; 33]. Es soll ein ganzheitlicher Entscheidungsalgorithmus entwickelt werden, der Materialeigenschaften (hier: structural integrity), hydraulische Kapazitäten (Betriebsregime) und den Einfluss der Alterung bzw. des Verschleißes der Leitung berücksichtigt [64; 65]. Der Einfluss von Alterung bzw. Verschleiß auf die Rohrrinnenwand wird nicht berücksichtigt.

In einem gesonderten Programm wird das mechanische Verhalten von Rohrleitungen aus Grauguss mit Lamellengraphit unter Biegung untersucht. Zur Ermittlung typischer Grenzspannungen werden an Rohrproben Druck- und Zugversuche sowie Biegeknickversuche vorgenommen, um das Spannungs-Dehnungsverhalten für weitere Vergleichsrechnungen mittels FEM zu formulieren. Zur Messung der vorhandenen Spannungen werden zerstörungsfreie Methoden angewendet (neutron defraction – Ablenkung /Beugung /Brechung von Neutronen [66]). Damit können Spannungen nicht nur an der Rohroberfläche, sondern auch entlang der Längsachse gemessen bzw. abgebildet werden.

Versuche werden an unkorrodierten Rohren und an Rohren mit absichtlich herbeigeführter Korrosion durchgeführt. Ziel ist die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen maximaler Anzahl und Tiefe von Lochkorrosion und maximal aufnehmbarer Spannungen (Bruchspannung).

Erste Experimente zeigen, dass die Dehnung in Rohrlängsrichtung doppelt so hoch ist wie die Höchstdehnung bei reinen Zugversuchen (Dehnung quer zur Zugachse) an gleichartigen Proben (Abschnitt 15.2). Ursache ist wahrscheinlich zum einen eine bessere Stützwirkung des Rohres in räumlicher Ausdehnung und zum anderen der Einfluss von Kerbwirkungen an Mikrorissen beispielsweise bei beginnender Korrosion [67].

1.5.2 Forschungsvorhaben des Lehrstuhls Stadtbauwesen der TU Dresden [68]

Am Lehrstuhl Stadtbauwesen der TU Dresden laufen verschiedene Forschungsvorhaben zu gesamtwirtschaftlichen Methoden der Rohrnetzbewertung und Rehabilitationsplanung städtischer Infrastrukturen. Unter dem Gesamttitel „Alterung und Erneuerung städtischer Infrastrukturnetze“ werden dazu relevante Projekte genannt, wie

- Methoden und Strategien zur Bestimmung effizienter Infrastrukturerneuerungsprojekte;
- Service-life Management of Water and Sewer Networks; Kontinuierlicher informeller Austausch zur Recherche über Forschungstätigkeiten und -ergebnisse im Bereich der Erneuerungsstrategien von Trinkwasserversorgungs- und Abwassernetzen;
- Action on Diagnosis of Infrastructure: Deterioration of Drinking Water Networks; Erfahrungsaustausch auf europäischer Ebene zwischen Wissenschaftlern und Praktikern der Trinkwasserversorgung über den Zustand von Trinkwasserversorgungssystemen, Alterungsprozesse und Instandhaltungsprogramme und -strategien.

2. Strukturierung der Arbeit und Methoden zur Lösungsfindung

Zur Umsetzung der formulierten Ziele in Kapitel II muss ein komplexer Themenbereich untersucht werden. Dies betrifft Teilbereiche der

- Metallwerkstoffkunde und Metallurgie
(Werkstoffeigenschaften, Rohrherstellungsverfahren, Materialgefüge, Metallographie)
- Elektrochemie
(Korrosionskunde, Korrosionszellen, Korrosionsbilder)
- Korrosionsdiagnostik
(Bestimmung und Interpretation des Korrosionsschutzes)
- Statik und Festigkeitslehre
(statische Werkstoffeigenschaften, deren Ermittlung und Wirkung)
- Verfahrenstechnik
(Sanierungs- und Erneuerungsverfahren in der Rohrleitungstechnik)
- Wasserwirtschaft
(Netzbetrieb, Hydraulik, Wasserversorgung)
- Prognosetechniken
(technische Nutzungsdauer, Korrosion)

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt bei der Beurteilung von

- Entwicklung von Rohrherstellungsverfahren und Rohrverbindungstechniken
- Entwicklung des Korrosionsschutzes (Umhüllung, Beschichtung, Auskleidung)
- Definition und Wichtung / Einteilung der Einflussfaktoren nach Abbildung 2
- Geometrie und Rohrgeneration über einfache Rohruntersuchungen im Werkstoffprüflabor der Fachhochschule Erfurt
- Metallographie und Messung des Korrosionsfortschritts über präzise Rohruntersuchungen im Werkstoffprüflabor der Fachhochschule Erfurt
- Zugfestigkeit, Scheitelbruchkraft und E-Modul über statische Versuche
- statischer Resttragfähigkeit (über Berechnungen z. B. nach ATV A 127 [11])
- Bodenproben (nach DVGW-Arbeitsblatt GW 9 [13])

Daraus sind Parameter abzuleiten zur

- Bildung einer Korrosions- und Zustandsprognose aus den Ergebnissen der oben genannten Untersuchungen zur Bestimmung des Abnutzungsvorrats und der technischen Restnutzungsdauer
- Einbindung bzw. Ergänzung der Prognosedaten in der Schadensstatistik
- Übertragung der Prognosedaten auf Rohrleitungsgruppen mit ähnlicher Wichtung der Einflussfaktoren nach Abbildung 2

Arbeitsschritte zur Umsetzung der Untersuchungsschwerpunkte und Zielvorgaben sind:

1. Definition und Wichtung von Einflussfaktoren in Bezug auf die technische Restnutzungsdauer und die Abnutzungsreserve am Rohrwerkstoff

In der Literatur fehlen eindeutige Definitionen von Einflussfaktoren auf den Rohrwerkstoff. Soweit im Rahmen der Arbeit notwendig, sollen Definitionen formuliert werden. Eine Wichtung der Einflussfaktoren ist erforderlich, um weniger relevante Faktoren auszusondern und damit den Untersuchungsaufwand zu minimieren. Zugleich erfolgt eine Konzentration auf die wichtigsten Faktoren.

2. Literaturrecherche zur technischen Entwicklung von Rohrherstellungsverfahren, Rohrverbindungstechniken, Korrosionsschutz sowie Abmessungen und Festigkeitseigenschaften

Die Einteilung metallischer Rohrwerkstoffe für Versorgungsleitungen in sog. Rohrgeneration nach Roscher und DVGW-Hinweis W 401 ist der erste Schritt, um Verlegeperioden bzw. werkstoffspezifische Eigenschaften und deren Einfluss auf die technische Restnutzungsdauer beschreiben zu können [1; 9].

Zusätzlich sollen die typischen Merkmale der jeweiligen Rohrgeneration wie beispielsweise Strukturen an der Rohrwand als Hinweis auf das Herstellungsverfahren erläutert werden, um eine einfache Erkennung in der Praxis zu gewährleisten.

3. Untersuchungen zu Schadensursachen in Verbindung mit den genannten Einflussfaktoren und Zuordnung von Schadensbildern

Bezüglich der Schadensursachen und Schadensarten an erdverlegten Trinkwasserrohrleitungen fehlen ebenfalls einheitliche Definitionen. Durch die Erkennung und Zuordnung typischer Schadensbilder können mögliche Schadenursachen besser erkannt bzw. auch ausgeschlossen werden. Rückschlüsse auf den Korrosions- bzw. Schädigungsgrad am Rohrwerkstoff und damit verbunden auf die statische Resttragfähigkeit sollen ermöglicht werden.

4. Statistische Auswertungen unter Berücksichtigung der Rohrgenerationen

Durch die statistische Auswertung von 600.000 Datensätzen zum Rohrleitungsbestand in Deutschland wird die Notwendigkeit und der Nutzen einer differenzierten Betrachtung der Rohrleitungsgruppen und die Einteilung in Rohrgenerationen aufgezeigt [6]. Weiteres Ziel ist die Ermittlung des statistischen mittleren Rohrnetzalters je Rohrgeneration für spätere Vergleiche mit der technischen Restnutzungsdauer auf Grundlage von DVGW-Hinweis W 401.

5. Durchführung der einfachen materialtechnischen Zustandsuntersuchung

Dazu gehören die Erläuterung zu Rohrprobenbeschaffung, die Ermittlung geometrischer Werte, Erkennung von Verbindungssystemen, die Beurteilung von Schadensursachen, Schadensbildern, vorhandener Korrosionsschutz und Korrosionsgrad auf Basis der Arbeiten von Brussig [39].

6. Durchführung der präzisen materialtechnischen Zustandsuntersuchung

Weitere Untersuchungen zur Metallographie am Rohrwerkstoff (z.B. zur eindeutigen Werkstoffbestimmung), statische Versuche wie der Ermittlung der Zugfestigkeit am Rohrwerkstoff, die Ermittlung der Werkstoffhärte (Zusammenhang von Zugfestigkeit und Härte) und die Begründung zur Auswahl der entsprechenden Prüfmethode.

7. Darstellung und statistische Auswertung der Untersuchungsergebnisse der materialtechnischen Zustandsuntersuchung

Die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse dient dazu, mögliche Trends bezüglich der materialtechnischen Zustandsuntersuchung zu erkennen (bspw. dominierende Schadensbilder je Rohrgeneration).

Die Möglichkeit einer Vergleichbarkeit des Korrosions- bzw. Schädigungsgrades an verschiedenen Leitungsproben wird geprüft.

8. Berechnung der Resttragfähigkeit und Darstellung der Ergebnisse

Hierzu zählen die Auswahl eines passenden Berechnungsalgorithmus und die Begründung der Notwendigkeit weiterer Annahmen sowie die anschließende Berechnung der Resttragfähigkeit an den im Rahmen der Arbeit untersuchten Rohrproben.

9. Konzept zur Ermittlung der technischen Restnutzungsdauer auf Grundlage des erfassten materialtechnischen Ist-Zustands

Prognose des technischen Abnutzungsvorrats und der Restnutzungsdauer anhand der Untersuchungsergebnisse zum Ist-Zustand des Rohrwerkstoffs und der statischen Resttragfähigkeit. Dies erfolgt über einen Vergleich des Ist-Zustands mit dem Ausgangszustand zum Zeitpunkt der Verlegung der Rohrleitung und eines erwarteten Mindestzustands (gerade noch tragfähiger Zustand der Rohrleitung).

10. Einfluss der umgebenden Bodenparameter auf Korrosionsgeschwindigkeit und technischer Resttragfähigkeit

Durchführung von Bodenuntersuchungen. Durch statistischen Vergleich sollen mögliche Zusammenhänge zwischen den Untersuchungsergebnissen nach DVGW-Arbeitsblatt GW 9 und den Ergebnissen zum Schädigungsgrad aus der materialtechnischen Zustandsuntersuchung erkannt werden

11. Beurteilung der Querbruchgefahr an Graugussleitungen

Vergleich und Durchführung von Berechnungsansätzen zur Ermittlung von Längsbiegespannungen an Graugussleitungen und Untersuchung zu einer möglichen Spannungsüberlagerung.

Kapitel	Kriterium	Methodik	Ergebnisse
3	Einflussfaktoren	> Wichtung	> Auswahl nach Bedeutung
4	Rohrgeneration	> Literaturrecherche > Laboruntersuchung	> Generationenkarte > Erkennungsmerkmale
5	mittleres Rohrnetzalter	> Stochastik	> mittlere statistische Restlebenserwartung
6+7	Zustandsuntersuchung	> Begutachtung > Statische Versuche > Metallographie	> Geometrie > Korrosionsschutz > Werkstoffeigenschaften
8+9	Auswertung der Zustandsuntersuchung	> Statistik > Verhältnisgleichungen	> Restwanddicke > Schädigungszahlen
10	Resttragfähigkeit	> Berechnungsansatz nach ATV A 127	> Tragfähige Mindestwanddicke
11	Prognosekonzept	> Vergleich der Zustandsverschlechterung	> Prognose der technischen Nutzungsdauer
12	Bodenaggressivität	> Kriterien nach DVGW GW 9	> Abtragungsraten > Eindringraten
13	Querbruchgefahr	> elastisch gebetteter Stab	> Gefährdete Nennweiten pro Rohrgeneration

Abbildung 7: Ablaufschema zur Lösungsfindung für die Prognose der technischen Nutzungsdauer

Kapitel 3 bis 5: theoretische Grundlagen

Kapitel 6 bis 9: praktische Grundlagen

Kapitel 10 und 11: Ziele

Kapitel 12 und 13: ergänzende Untersuchungen

3. Definition und Wichtung von Einflussfaktoren auf die Zustandsverschlechterung metallischer Trinkwasserleitungen

Der technische Zustand einer erdverlegten Trinkwasserleitung und damit ihre technische Nutzungsdauer werden von einer Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt (Abbildung 2). Um den Aufwand der materialtechnischen Zustandsuntersuchung zu reduzieren, ist es wichtig zu wissen, auf welche Faktoren sich die Untersuchung zu konzentrieren hat und welche Einflussfaktoren nur ergänzend zu betrachten sind.

Im Folgenden werden deswegen die Einflussfaktoren gemäß Abbildung 2 nach ihrer Bedeutsamkeit auf die Zustandsentwicklung geordnet und erläutert.

3.1 Festigkeits- und Werkstoffeigenschaften

Die Festigkeitseigenschaften eines Rohrwerkstoffs, wie etwa die Zugfestigkeit (siehe Abschnitt 4.8), bestimmen maßgeblich die Tragfähigkeit des Rohres und sind notwendig für weitere statische Berechnungen hinsichtlich der Resttragfähigkeit bei geschwächtem Rohrquerschnitt. Die Werkstoffeigenschaften (z. B. die Sprödigkeit von Graugussrohren mit Lamellengraphit) haben wesentlichen Einfluss auf mögliche Schadensbilder am Rohr.

Für statische Berechnungen notwendige Festigkeitseigenschaften (siehe Abschnitt 4.8) werden im Rahmen der Arbeit über Versuche nach Tabelle 3.6 ermittelt oder durch die Werte aus Tabelle 3.7 bis Tabelle 3.9 angenommen. Weitere Untersuchungen erfolgen in Kapitel 9.

3.2 Herstellungs- und Werkstofffehler

Imperfektionen im oder am Rohrwerkstoff (siehe Abschnitt 4.2) sowie im Metallgefüge (siehe Abschnitt 4.7) beeinträchtigen wesentlich die statische Resttragfähigkeit der Rohrleitung bzw. ihr Korrosionsverhalten. Dadurch wird die technische Nutzungsdauer der Leitung mit bestimmt. Die Erkennung von Herstellungs- und Werkstofffehlern erfolgt an der freigelegten Rohroberfläche (siehe Kapitel 6) und mittels metallographischer Betrachtungen (siehe Abschnitt 7.1) an ausgewählten Rohrproben.

3.3 Aktiver und passiver Korrosionsschutz

Korrosion ist die Hauptschadensart an Stahl- und Duktillgussrohren [5]. Auch Querbrüche als Hauptschadensart an Graugussrohren sind im Falle einer technischen Zustandsverschlechterung auf Querschnittschwächung durch Korrosion bzw. Graphitierung zurückzuführen [5; 155]. Korrosion führt dementsprechend einerseits zur Zustandsverschlechterung der Leitung ohne den Einfluss mechanischer Belastungen. Andererseits kann die Korrosion ebenso zu weiteren Schadensarten der Leitung infolge Querschnittschwächung in Verbindung mit mechanischen Belastungen führen.

Passiver Korrosionsschutz an metallischen Rohrwerkstoffen erfolgt durch den Überzug der in Abschnitt 4.5 genannten nicht leitenden Beschichtungen (mechanische Trennung von Metall und korrosivem Medium). Der Zustand des passiven Korrosionsschutzes (Beschädigungen, Haftung, Durchlässigkeit) beeinflusst den Ablauf der Korrosionsprozesse am Rohr und damit die Zustandsverschlechterung. Eine Auswertung der Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Schädigungsgrad des passiven Korrosionsschutzes und dem Schädigungsgrad (technischer Zustand) des Rohres erfolgt an ausgewählten Rohrproben (Kapitel 8).

Eine Form des aktiven Korrosionsschutzes an metallischen Trinkwasser-Versorgungsleitungen ist der kathodische Korrosionsschutz. Durch Polarisierung der

Rohrleitung mit einem Schutzstrom wird der Strom gezwungen, über Fehlstellen im beschädigten passiven Korrosionsschutz aus dem umgebenden Boden in die metallische Rohroberfläche einzudringen. Metalllösende Korrosionsprozesse werden so vermieden (DIN 30676 [156]).

Eine weitere Form des aktiven Korrosionsschutzes ist, bedingt durch den Chemismus, die Auskleidung der Rohrrinnenwand mit einer Zementmörtelschicht (DVGW-Arbeitsblatt W 343; DIN 2614 [40; 168]).

Eine Beurteilung der Wirksamkeit des aktiven Korrosionsschutzes erfolgt im Rahmen der Arbeit auf Grund seiner positiven Beeinflussung der technischen Zustandsveränderung nicht.

3.4 Bodeneigenschaften und Bodenaggressivität

Bodeneigenschaften wie Wichte, Verdichtungsgrad, Verformungsmodul und Bindigkeit haben hauptsächlich Einfluss auf die Belastung einer Rohrleitung (siehe Abschnitt 4.6). Die Bodenaggressivität wird durch Parameter wie pH-Wert des Bodens, spezifischer Bodenwiderstand oder dem Wassergehalt beeinflusst. Durch den Bewertungsalgorithmus in DVGW-Arbeitsblatt GW 9 werden die verschiedenen Bodenparameter hinsichtlich ihres Einflusses auf Korrosionsprozesse eingeschätzt und so eine Korrosionswahrscheinlichkeit ermittelt. Die Untersuchungsmethoden nach DVGW-Arbeitsblatt GW 9 bzw. nach Steinrath sind, soweit es der Umfang an Bodenproben zulässt, Bestandteil der materialtechnischen Zustandsuntersuchung [13; 46]. In Kapitel 12 sind Auswertungen und Zusammenhänge zwischen Bodenaggressivität und technischer Zustandsverschlechterung dargestellt. Anhaltswerte für Abtragungsraten wurden aus DIN EN 12501 bzw. DIN EN 12502 entnommen [151; 174].

3.5 Verlegebedingungen, Montage – und Bettungsfehler, Lage der Leitung

Die Verlegebedingungen (z.B. in einem Rohrgraben) einer Rohrleitung beeinflusst maßgeblich deren Belastung. Im Rahmen der Arbeit werden, wenn nicht anders bekannt, ungünstige Verlegebedingungen bei der Berechnung der statischen Resttragfähigkeit angenommen (siehe Kapitel 10). Wechselnde Grundwasserstände werden in den Berechnungsalgorithmen nach ATV A 127 bzw. DVGW-Arbeitsblatt GW 9 berücksichtigt.

Montage- und Verlegefehler entstehen durch mangelhafte Ausführung bei der Rohrverlegung und der Missachtung entsprechender Regelwerke, z. B. DIN EN 805 [157]. Montage- und Verlegefehler führen zwar zu Schäden an der Rohrleitung (etwa bei punktförmiger Auflagerung), stehen aber nicht in direktem Zusammenhang mit der technischen Zustandsentwicklung und sind im Rahmen der Arbeit als sog. unechte Schäden einzustufen (siehe Abschnitt 4.9.1). Ihre Vermeidung wird von der Qualifizierung der ausführenden Bauunternehmen bestimmt [158]. Der Einfluss von Verlegefehlern wird durch statische Berechnungen unter Annahme bestimmter statischer Systeme in Kapitel 13 geprüft.

3.6 Verkehrs- und Erdlasten, Belastungen aus Bodenbewegungen

Die in Abschnitt 3.4 erwähnten Bodeneigenschaften und in Abschnitt 3.5 erwähnten Verlegebedingungen wirken sich auf die Belastung der Rohrleitung ebenso aus wie der Verkehr. In weiteren statischen Berechnungen auf Grundlage von ATV A 127 wird eine Verkehrsbelastung von SLW 60 angenommen, da diese Belastungsart den für Verkehrsbelastungen relevanten Schwerverkehr einschließt (siehe Kapitel 10).

Schäden an der Rohrleitung, verursacht durch Bodenbewegung (z.B. unzulässige Setzungen), sind ebenfalls den sog. unechten Schäden zuzuordnen, da kein direkter Zusammenhang zur Zustandsverschlechterung (z.B. Verschleiß) der Rohrleitung besteht. Die Gefährdung durch

Bodenbewegung bei Bauarbeiten in Rohrleitungsnähe wird in DVGW-Merkblatt W 380 bewertet und soll ähnlich den ungünstigen Verlegebedingungen bei Kontrollrechnungen zur statischen Resttragfähigkeit berücksichtigt werden (siehe Kapitel 13) [159].

3.7 Rohrgeometrie und Rohralter

Die Rohrgeometrie (insbesondere Nennweite und Wanddicke) wirkt sich auf das Tragverhalten des Rohres aus (Widerstandsmoment). Vor allem bei Graugussrohren wird das Tragverhalten (hier Querbruchgefahr) durch ihre Nennweite bestimmt (kleine Nennweite = kleines Widerstandsmoment). Laut Kottman versagen spröde Graugussrohre bis zu einer Nennweite von ca. DN 100 sehr häufig durch Querbrüche infolge hoher Längsbiegespannungen [108]. Herstellungsbedingt besitzen in Sandformen gegossene Graugussrohre (siehe Abschnitt 4.2) größere Wanddicken als geschleuderte Graugussrohre oder Duktulguss- und Stahlrohre. Dadurch ist einer durch Korrosionsprozesse bedingten Zustandsverschlechterung bereits eine höhere materialtechnische Abnutzungsreserve entgegengesetzt (siehe Kapitel 12).

Das Rohralter allein kann nicht für eine Bestimmung der technischen Restnutzungsdauer herangezogen werden [34]. Dennoch ist die durch Korrosionsprozesse bedingte Zustandsverschlechterung zeitabhängig (siehe Abschnitt 4.9.3). Zusätzlich wird das Rohralter bzw. die damit verbundenen Herstellungs- und Verlegeperioden über die Einteilung in werkstoffhomogene Gruppen (Rohrgeneration) berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.10)

Durch die Bestimmung der mittleren statistischen Nutzungsdauer nach DVGW-Hinweis W 401 wird das Rohralter ebenfalls berücksichtigt.

3.8 Wasserparameter, Hydraulik und Betriebsregime

Vor allem die Entstehung von Inkrustationen wird durch die in der Teilüberschrift erwähnten Faktoren beeinflusst (siehe Abschnitt 4.9.4). Ebenso wirkt sich die Zusammensetzung der Wasserparameter (z.B. Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht) laut DIN 50930 auf Innenkorrosionsprozesse an der Rohrleitung aus [160]. Die Bildung von Inkrustationen an der Rohrrinnenwand hat keinen direkten Einfluss auf die technische Zustandsverschlechterung und mögliche Schäden, beeinflusst aber die Leistungsfähigkeit und Versorgungsqualität (Druck, Rostwasser).

Eine Untersuchung der zugehörigen Wasserparameter der im Rahmen der Arbeit beprobten Rohre zum Einfluss auf den inneren Korrosionsfortschritt erfolgte nicht. Zu den Auswirkungen des Betriebsregimes (z.B. Druck und Fließrichtung) auf die Bildung von Inkrustationen ist entsprechende Literatur vorhanden [152].

3.9 Witterungseinflüsse

Wie in Abschnitt 1.2 bereits erwähnt, haben das Schrumpfungsverhalten des Bodens bei Trockenperioden nach Schlechtwetterperioden und die Frosteindringtiefe nach einem kaltem Winter mit darauf folgenden trockenen Sommer und Herbst einen Einfluss auf das Querbruchverhalten bei Graugussrohren [19]. So sind die Zeiträume eines höheren Querbruch-Gefährdungspotenzials bei Auswertung der entsprechenden Wetterdaten eingrenzbar. Durch Annahme weiterer ungünstiger Verlegebedingungen nach ATV A 127 und statischen Berechnungen der Resttragfähigkeit bei Längsbiegespannung an Graugussrohren nach DIN EN 1594 wird das Querbruch-Gefährdungspotenzials von Graugussleitungen besser eingeschätzt (siehe Kapitel 13) [55]. Aufgrund der Annahme einer normgerechten frostsicheren Verlegetiefe wird die Gefahr von Schäden durch Frost bei längeren Frostperioden nicht weiter untersucht (DVGW-Hinweis W 397 [161]).

4. Metallische Rohrwerkstoffe

Metallische Rohrleitungen für die Verteilung des Trinkwassers im städtischen Bereich wurden und werden in Deutschland aus Grauguss (GGL – Grauguss lamellar), Duktulguss (GGG – Grauguss globular; auch Sphäroguss) und Stahl (St) hergestellt. Die üblichen Nennweiten für Versorgungsleitungen liegen heutzutage im Bereich von DN 80 bis DN 300 (siehe Kapitel III).

Die Nennweiten für metallische Rohrleitungen wurden bereits um 1873 in Deutschland genormt [69; 83]. Im Verlauf der Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren für die Rohrleitungen haben sich die geometrischen Normmaße geändert (Außen- und Innendurchmesser, Nennweite, Wanddicke – siehe unter Anhang A), so dass früher auch andere Nennweitenbezeichnungen möglich waren (z.B. in Zoll).

Metallische Trinkwasserleitungen werden in Deutschland seit ca. 1870 mit Beginn der einheitlichen und zentralen Trinkwasserversorgung verlegt (vereinzelt bereits früher, z.B. Hamburg 1848 [14]). In den folgenden 130 Jahren haben sich die Herstellungsverfahren und somit auch die Materialeigenschaften des metallischen Rohrwerkstoffs wesentlich verändert. Diese Weiterentwicklung der werkstoffspezifischen Parameter, aber auch die Entwicklungen bezüglich der Rohrverbindungstechnik und des Korrosionsschutzes müssen bei der Einteilung der metallischen Rohrwerkstoffe in Rohrleitungsgruppen berücksichtigt werden. Rohrleitungsgruppen, welche in einem Zeitraum mit gleichen Herstellungsverfahren und annähernd gleichen Materialeigenschaften hergestellt wurden, werden einer einzelnen Generation zugeordnet.

Eine Sonderstellung nehmen die metallischen Rohrwerkstoffe aus der Produktionszeit von ca. 1949 bis 1990 ein, welche in den ehemaligen RGW-Staaten (RGW = Rat für gegenseitige Wirtschaftshilfe, wie z.B. die DDR, Polen, CSSR) produziert und auf dem Gebiet der ehemaligen DDR verlegt wurden. Diese Rohrwerkstoffe besaßen zum Teil vergleichsweise unzureichende Materialeigenschaften (Grund war z.B. die Einschmelzung minderwertiger Metalle/ Stahlschrott bei der Stahlproduktion) bzw. entsprachen nicht dem Stand der Technik bezüglich der Herstellungsverfahren, Rohrverbindungssysteme und Korrosionsschutzsysteme (siehe folgende Abschnitte).

4.1 Zu berücksichtigende Merkmale und Eigenschaften

Eine Erkennung und Klassifizierung der metallischen Rohrwerkstoffe in Generationen ist aufgrund folgender Merkmale möglich.

- geometrische Abmessungen

erste einheitliche Angaben zu den Abmessungen um 1873 [83]; Änderungen der Normung und somit neue Rohrmaße zu späteren Zeitpunkten

- Abdrücke und Strukturen auf Rohrrinnen und -außenseite

bei Gussrohren hinterließen die verschiedenen Herstellungsverfahren typische Strukturen und Abdrücke an der Rohrwand, somit ist bei Erkennung dieser Strukturen eine Zuordnung zu einem bestimmten Herstellungsverfahren und die Einteilung in eine Generation möglich (siehe Abschnitt 4.10.1)

- vorhandener Korrosionsschutz

Verbesserungen bei der Entwicklung des Korrosionsschutzes lassen sich erkennen, wenn Reste des Korrosionsschutzes an der Rohrwand vorhanden sind; mitunter hinterlassen bestimmte Ausführungen des Korrosionsschutzes typische Schadensbilder (siehe Abschnitt 4.5)

- Verbindungssysteme

die steigenden Anforderungen an die Verbindungssysteme bei metallischen Rohrleitungen bewirkten eine Entwicklung verschiedener Verbindungsarten im Verlauf der Zeit; so kann durch das Erkennen der Verbindungsart ein Höchstalter des Rohrstrangs bestimmt werden (z.B. Schraubmuffe an Graugussrohren von 1931 bis 1970 – siehe Abschnitt 4.6)

- Ausbildung der mikroskopischen Kornstruktur

durch metallographische Untersuchungen kann eindeutig der metallische Rohrwerkstoff (GGL; GGG; St) festgestellt werden; teilweise ist es möglich, anhand der Kornstruktur auf Herstellungsverfahren bzw. Rohrgenerationen zu schließen (siehe Abschnitt 4.7)

- Untersuchungen der Materialeigenschaften

mit Hilfe geeigneter Prüfverfahren lassen sich an metallischen Rohrproben die Härte, die Zug- und Druckfestigkeiten und der E-Modul bestimmen; diese Werte können mit entsprechenden Vorschriften verglichen werden und dienen nachfolgenden rohrstatischen Berechnungen der Resttragfähigkeit (siehe Abschnitt 4.8)

- erkennbare Schadensbilder am Rohrstück

durch die spezifischen Materialeigenschaften (z.B. Grauguss = spröde) der metallischen Rohrwerkstoffe gibt es für einzelne Generationen typische Schadensbilder bzw. Schadensarten; im Umkehrschluss sind für einige Rohrgenerationen bestimmte Schadensarten auszuschließen (siehe Abschnitt 4.9)

Sind aufgrund fehlender Daten zum Rohrnetzbestand nur wenige Aussagen über Eigenschaften der metallischen Rohrwerkstoffe möglich, helfen die in den vorstehenden Stichpunkten genannten Kriterien bei der Ergänzung.

4.2 Rohrleitungen aus Grauguss mit Lamellengraphit (GGL)

Das folgende Kapitel beschreibt die Einteilung metallischer Rohrwerkstoffe in Generationen und die dazu erforderlichen Charakterisierung von Erkennungsmerkmalen und Werkstoffeigenschaften.

4.2.1 Allgemeine Herstellung

Seit ca. 1870 wurden in Deutschland Graugussrohre (GGL) industriell in großen Stückzahlen hergestellt. Grauguss ist ein Gemisch aus Eisen, Kohlenstoff und Aufbauelementen wie

Silizium und Phosphor [70]. Durch den Kohlenstoffanteil wird der Schmelzpunkt des reinen Eisens herabgesetzt (Gießtemperatur ca. 1300°C), das Eisen ist bei diesen Temperaturen fließfähig und kann somit in Formen gegossen werden [71]. Der Kohlenstoff erstarrt beim Abkühlen des Graugusses in Lamellenform (Lamellengraphit). Diese Graphitlamellen sind für die spröden Materialeigenschaften verantwortlich (siehe Abschnitt 4.7.1). An den Lamellenspitzen erfolgt eine Spannungskonzentration im Material, welche letztendlich zum Bruch führt (innere Kerbwirkung). Die mattgraue Farbe frischer Bruchstellen gab dem Grauguss seinen Namen.

Mit der Entwicklung des Duktulgusses (GGG) wurde die Produktion von Graugussrohren ab ca. 1964 in West-Deutschland eingestellt. In den Folgejahren wurden vereinzelt weiter Graugussrohre aus altem Materialbestand verlegt. Auf dem Gebiet der ehemaligen DDR wurden bis ca. 1980 dort produzierte Graugussrohre verlegt (ebenso Formteile) [75].

Vereinzelt sind in der entsprechenden Literatur Hinweise auf die relativ hohe Korrosionsbeständigkeit von in Sandformen gegossenen Graugussrohren zu finden. Als Ursache wird die Entstehung einer äußeren Schutzschicht aus Reaktionsprodukten des Formsandes und der Gussmasse genannt [21]. Diese Reaktionsprodukte bestehen aus Siliziumoxidverbindungen und Eisenoxidverbindungen und bilden eine korrosionsbeständige Gushaut (Dicke ca. 140 µm) [75].

4.2.2 Graugussrohre in Sandformen gegossen

Das ursprünglich übliche Verfahren zur Herstellung gusseiserner Rohre war das Gießen in liegenden oder stehenden Sandformen.

In der Literatur gibt es verschiedene Hinweise auf die Produktions- und Verlegezeiten dieser Rohre. In liegenden Sandformen wurden Graugussrohre bis 1877 hergestellt [74]. Um 1845 wurde bereits in England mit der Herstellung von Graugussrohren in stehenden Sandformen begonnen (Sandformen, welche nicht aus liegenden oder nachträglich aufgerichteten Sandformen bestanden). Die Zeit der Produktion stehend gegossener Graugussrohre wird für Deutschland von ca. 1880 bis 1930 angegeben [73]. Da in diesen Zeitraum der Beginn und Aufbau der städtischen Trinkwassernetze in Deutschland fällt, sind stehend gegossene Graugussrohre im überwiegenden Maße zur Anwendung gekommen [74].

Typisch für in Sandformen gegossene Graugussrohre sind die Unterschiede in der Wanddicke (Abbildung 9). Ursache dafür ist der Versatz des inneren Kerns beim Gießen der Rohre. Für das Verschieben des mittig entlang der Rohrachse ausgerichteten Kerns gibt es mehrere Gründe. Der Sandkern besaß ein geringeres spezifisches Gewicht als die flüssige Gussmasse, so dass der Kern beim Gießen in der liegenden Form nach oben auftrieb. Zusätzlich hing die äußere Form aufgrund ihres Eigengewichts und der langen Stützweite (in etwa Rohrlänge) um einige Millimeter durch. Weiterhin kam es häufig vor, dass der zuvor mittig ausgerichtete Kern sich in liegenden und später aufgerichteten Sandformen verschob und so Wanddicke-Unterschieden am gegossenen Rohr verursacht wurden [76].

In stehenden Sandformen ist der Kern am unteren Ende fixiert während das obere Ende mittig freisteht. Auch hier ist ein Kernversatz möglich [77]. Herstellungsbedingt ist bei liegend gegossenen Graugussrohren mit dem größten Kernversatz in Rohrmitte und bei stehend gegossenen Graugussrohren mit dem größten Kernversatz am glatten (oberen) Rohrende zu rechnen (Abbildung 8) [47].

Die im Rahmen der Arbeit untersuchten Rohrproben von Graugussleitungen bestätigen die Aussage, dass ein Kernversatz in der Sandform und somit Unterschiede in der Rohrwanddicke bei in liegenden sowie in stehenden Sandformen hergestellten Graugussrohren auftrat.

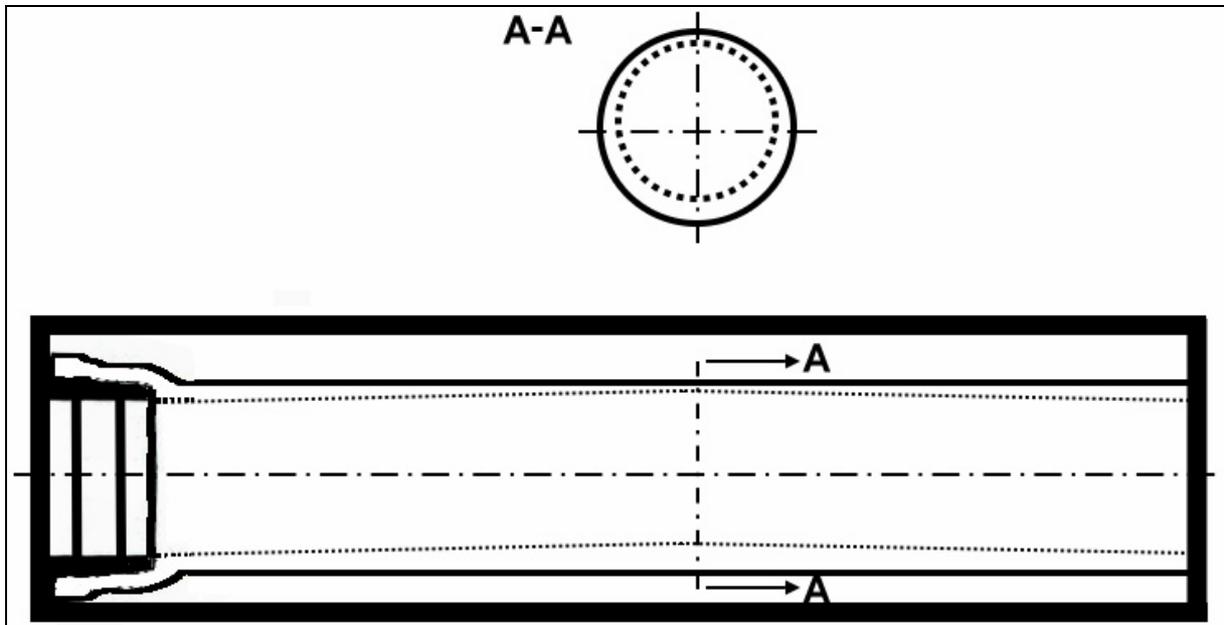


Abbildung 8: Prinzipskizze zum Kernversatz in liegender Sandform [47]

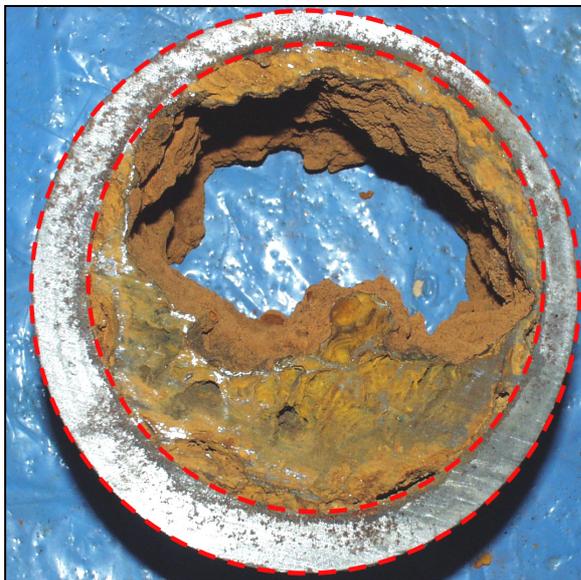


Abbildung 9:
Exzentrizität des Rohrinneendurchmessers und damit verbunden die Schwankung der Wanddicke infolge Kernversatz

Die Herstellung von liegend gegossenen Graugussrohren erfolgte zum überwiegenden Teil in sog. zweiteiligen Formkästen. Die Trennlinie zwischen oberer und unterer Formhälfte hinterließ am fertig gegossenen Rohr einen typischen beidseitigen Abdruck in Rohrlängsrichtung an der Rohraußenseite. Diese sog. Naht ist ein deutlicher Hinweis auf die Herstellung der Rohre in liegenden Sandformen (zweiteiliger Formkasten), da stehende Sandformen keine Trennlinien zwischen einzelnen Formteilen in Längsrichtung besaßen und folglich keinen Abdruck am Rohr hinterlassen konnten (Abbildung 10).

Eine andere typische Erscheinung an Graugussrohren, welche in Sandformen gegossen wurden, sind Lunker, Gasblasen und Verunreinigungen in der Gussmasse (siehe Abschnitt 4.9.1). Die Ursache sind beim Gießen mitgerissene Luft, Schlackereste in der Gussmasse und Reaktionsprodukte zwischen der Gussmasse und der Sandform.

Solche Fehlstellen tragen zur Verringerung der Rohrwanddicke und somit zur Verringerung der Tragfähigkeit bei [78]. Dennoch können Graugussrohre mit geschwächtem Querschnitt eine hohe Nutzungsdauer aufweisen (bis zu 130 Jahre) und sich heute noch in Betrieb befinden. Eine Begründung dafür liegt unter anderem darin, dass es bspw. an Stellen mit geschwächtem Querschnitt (durch Lunker, Gasblasen usw.) zu einer Materialverdichtung und Verfestigung der Gussmasse und somit zu einem anderen Kräfteverlauf bzw. zu anderen Bruchigenschaften im Gefüge kommt [78].



Abbildung 10: Sog. Naht als Abdruck der Formkastentrennlinie

Formteile, aber auch Sonderrohre (z.B. mit Rohre zwei Muffenenden) lassen sich aufgrund der geometrischen Abmessungen nur im Sandguss-Verfahren herstellen. Formteile und Sonderrohre werden somit bis heute im Sandguss-Verfahren hergestellt [79].

Wurden die Sandformen nicht per Hand geformt, sondern maschinell hergestellt, kam die sog. Ardelt'sche Rohrstampfmaschine zum Einsatz. Bei diesen Verfahren wurden die Formen aus speziellen Sandgemischen zurechtgestampft. Trotz des Zentrierens der Kerne kam es zu Kernverschiebungen und somit zu Unterschieden in der Wanddicke. Der Formsand besteht üblicher Weise aus einem Gemisch aus Lehm, Sand und Magerungsmittel [80].

Die Sandform und auch der Kern wurden mit speziellen Überzügen versehen. Staubförmige oder flüssige Formstoffüberzüge sollten so vor der starken Hitze des flüssigen Gießmetalls schützen. Zusätzlich glätteten sie die Formoberfläche und verhinderten das Anbrennen und Vermischen mit dem Formstoff. Dies funktionierte dadurch, dass sich ein Gasfilm zwischen Gießmetall und Formstück legte. Dabei wurden trockene (staubförmige) und nasse Überzüge unterschieden. Zu den trocken Überzügen zählt z. B. Holzkohlestaub und Ruß. Die nassen Überzüge (Schlichte) bestanden aus wässrigen bzw. dünnbreiigen Gemischen (Aufschlammung von Graphit, Koksstaub und Bindeton) mit gleicher Zusammensetzung wie

die Formstoffe und wurden meistens per Pinsel auf die Rohrinneenseite aufgetragen (schlichten). Die Abdrücke der Pinselspuren (Schlichtungsspuren) waren somit auch später auf der Rohrinneenseite zu sehen [81]. Die Schlichtungsspuren sind in ihrem Verlauf meist spiralförmig, seltener geradlinig (Abbildung 11).



Abbildung 11: Spiralförmige Schlichtungsspuren an einem in stehender Sandform gegossenem Graugussrohr

Die Unterschiede in der Wanddicke (Abbildung 9) können nicht als eindeutiges Erkennungsmerkmal für in liegenden Sandformen gegossene Graugussrohre angesehen werden. Einziges hinreichendes Erkennungsmerkmal ist der Nahtabdruck (Abbildung 10). Erkennungsmerkmal der in stehenden Sandformen gegossenen Rohre sind die Schlichtungsspuren (Abbildung 11) auf der Rohrinneenseite.

Graugussrohre wurden in stehenden Sandformen bis ca. 1930 hergestellt bzw. verlegt. Danach wurde die Produktion von Graugussrohren durch den sog. Schleuderguss abgelöst. Ausnahmen bilden die Fertigung von Formteilen und Sonderrohren (weiterhin Produktion nur in Sandformen möglich) und die Grauguss-Rohrproduktion auf dem Gebiet der DDR oder in anderen RGW-Staaten zwischen ca. 1949 - 1980. Einziger Produktionsstandort in der DDR war die Keulahütte Krauschwitz, in der die Graugussrohre bis 1983 in stehenden Sandformen gefertigt wurden [75].

Die Graugussrohre aus der Produktionszeit zwischen 1949 und 1990 entsprechen in ihren Erkennungsmerkmalen und Eigenschaften den Graugussrohren aus stehenden Sandformen (zwischen 1880 – 1930) mit der Ausnahme, dass Mängel bei der Ausführung des inneren und äußeren Korrosionsschutzes sowie bei der Qualität des eingeschmolzenen Eisens bestanden (siehe Abschnitt 4.10.1).

4.2.3 Graugussrohre in Schleuderformen (Kokillen) gegossen

Während es in England bereits 1848 möglich war, Graugussrohre im Schleuderverfahren herzustellen, ging in Deutschland die erste Schleudergussanlage für Graugussrohre erst 1926 in Gelsenkirchen-Schalke in Betrieb [80; 82]. Seit dem wurden in Deutschland Graugussrohre in rotierenden Kokillen hergestellt (geschleudert) und nicht mehr in Sandformen gegossen. Hierbei wurde die flüssige Gussmasse über eine sog. Lanze in eine leicht zur Waagerechten geneigte Form gegeben, welche in Rotation versetzt wurde. Durch die auftretenden Zentrifugalkräfte verteilte und verdichtete sich die flüssige Gussmasse gleichmäßig an der Kokillenwand und erstarrte dann durch Abkühlung.

Es wird davon ausgegangen, dass bis auf wenige Lagerrestbestände ab ca. 1930 die Schleudergussrohre die Sandgussrohre abgelöst hatten. Die Produktions- bzw. Verlegephase von geschleuderten Graugussrohren liegt im Zeitraum 1926 – 1965. Anfang der sechziger Jahre des 20. Jahrhunderts wurden die geschleuderten Graugussrohre von den Duktilgussrohren abgelöst (siehe Abschnitt 4.10.2).

Das Schleuderverfahren zur Herstellung von Gussrohren wird in verschiedene Varianten unterteilt. Grundsätzlich ist in die Herstellung in Kokillen mit blanker Metalloberfläche und das Gießen in Kokillen mit Beschichtung zu unterscheiden

Ausnahmen bilden das Hurst-Ball-Verfahren (Metallkokille nicht wie üblicherweise aus Chrom-Nickel-Stahllegierung sondern aus Grauguss), das Verfahren nach Cammen (angewärmte Formen zum Schleudern, geheizt wurde mit Strom) und das Henry-Weitling-Peake-Verfahren (Form mit inneren Kern und Quecksilberdampf-Füllung)[80].

Diese Verfahren kamen jedoch nachweislich in Deutschland nicht zum Einsatz und sind daher für weitere Betrachtungen nicht relevant.

Das in Deutschland übliche Verfahren zum Gießen in wassergekühlten Kokillen mit blanker Metalloberfläche ist das De-Lavaud-Verfahren (auch Arensverfahren) seit ca. 1926.

Die üblichen Verfahren zum Gießen in Kokillen mit beschichteter Metalloberfläche sind das Wet-Spray-Verfahren (Kokille mit Bentonit-Quarzmehl benetzt), das Sandspun-Verfahren (mit Sand ausgekleidete Kokille) und das Moore-Verfahren (mit Rotlehm-Silikatsand ausgekleidete Kokille) [79; 80; 84].

Schleudergussrohre, welche nach dem De-Lavaud-Verfahren hergestellt wurden, sind an den kalottenförmigen Hammerspuren an der Kokilleninnenseite (hinterlässt typische Abdrücke an Gussrohraußenseite, erhöht die Festigkeit der Kokille) zu erkennen (Abbildung 12) [79].

Die Sandbeschichtungen in den Kokillen hinterlassen ebenfalls typische Abdrücke an der späteren Rohraußenwand. (Abbildung 13). Diese Abdrücke der Kokillenwand und die relativ gleichmäßige und oftmals auch dünnere Wanddicke (im Vergleich zu in Sandformen gegossenen Graugussrohren) sind die Erkennungsmerkmale der im Schleudergussverfahren hergestellten Graugussrohre.

Da beim Gießen in Metallkokillen das flüssige Gusseisen über die Gießlanze vom unteren Punkt der Kokille gleichmäßig nach oben hin eingebracht wird, wickelt es sich beim Schleudervorgang zusätzlich spiralförmig an die Kokillenwand an. Diese Struktur ist am erkalteten Rohr zu erkennen (Abbildung 14) [85].



Abbildung 12: Kalottenförmige Abdrücke der Kokille an einem nach dem De-Lavaud-Verfahren hergestellten Gussrohr

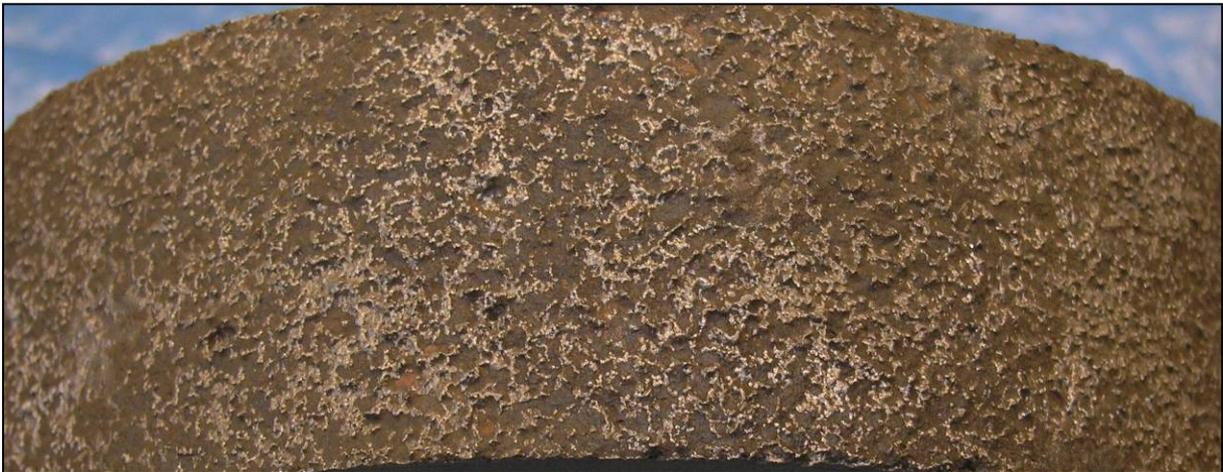


Abbildung 13: Abdrücke der Sandbeschichtung der Kokille an einem nach dem Sandspun-Verfahren hergestellten Graugussrohr



Abbildung 14: Rillenstruktur an der Rohraußenwand am im Schleuderverfahren hergestellten Gussrohr

Schleudergussrohre, welche in blanken Metallkokillen hergestellt werden, erkalten an der Rohraußenseite beim Kontakt mit der Kokilleninnenwand. Dadurch bildet sich im Metall eine primär vorhandene Zementit-Schicht. Während des Schleuderverfahrens nach Moore bildet sich ebenfalls diese Zementit-Schicht aus [70].

Die Abschreck-Wirkung der kalten Kokillenwand bzw. die Bildung der primär vorhandenen Zementit-Schicht erhöht die Härte des Gussrohres. Die Rohre können in diesem Zustand nicht weiter bearbeitet werden (schneller Verschleiß der Werkzeuge z. B. beim Anbohren der Rohre bei der Verlegung). Deswegen müssen diese Rohre im sog. Glühofen bei 850 – 950 °C thermisch nachbehandelt werden [84].

Bei der thermischen Nachbehandlung (Nachglühen) bildet sich je nach Temperatur und Abkühlungsgeschwindigkeit im Glühofen ein perlitisches Grundgefüge (verschleißfest) oder ein ferritisches Grundgefüge (dehnfähig) [70]. Zusätzlich bildet sich beim Nachglühen eine Glühhaut aus Eisenoxid. Diese Glühhaut soll einen guten Schutz gegen chemische Angriffe darstellen (siehe Abschnitt 4.7) [86]. Die Glühhaut besitzt im Vergleich zur restlichen Metallmasse eine andere Wertigkeit. Wird die Glühhaut z.B. durch unachtsame Verlegung verletzt, bilden sich kleine Anodenbereiche in großen Kathodenbereichen. Dadurch entsteht die Gefahr erhöhter Loch- und Narbenkorrosion [36].

Um das schnelle Erkalten an der Kokillenwand und somit eine nachträgliche thermische Behandlung der Rohre zu vermeiden, wurden die Kokillen wie beschrieben beschichtet. Deswegen besitzen Graugussrohre, welche nach dem Sandspun – oder Wet-Spray-Verfahren hergestellt wurden, bereits ein erforderliches perlitisches bzw. ferritisches Grundgefüge und müssen nicht nachgeglüht werden [70].

Bei den Schleuderformen aus Chrom-Nickel-Stahllegierung kam es aufgrund der häufigen Temperaturwechsel durch die heiße Gusseisenmasse und dem Kühlwasser zu Spannungen und dadurch zu schnellem Verschleiß der Formen. Die durch diese Spannungen entstehenden Risse verursachen auch Spuren und damit Qualitätsverluste an den geschleuderten Rohren. Die Gefahr von Gasblasenbildung bestand beim Gießen in kalten Kokillenformen. Diese Gasblasen sind an der Oberfläche spiralförmig entsprechend der Eingießrichtung des Gusseisens angeordnet und später am fertigen Rohr noch sichtbar (Abbildung 15) [80].



Abbildung 15: Abdrücke halb eingeschlossener Gasblasen an der Rohraußenseite, Rohr nach dem Schleudergussverfahren hergestellt

4.3 Graugussrohre mit Kugelgraphit bzw. Duktilgussrohre (GGG)

Durch eine Beimischung geringer Mengen Magnesiums (0,04%; sauerstoffaffin) bildet sich der elementare Graphit im Grauguss beim Abkühlen der Eisenschmelze nicht mehr in lamellarer sondern kugelförmiger Struktur aus (siehe Abschnitt 4.7) [71; 110].

Durch diese kugelförmige Struktur entsteht ein gleichmäßiger Spannungsverlauf innerhalb des Materials. Spannungsspitzen und somit eine innere Kerbwirkung werden vermieden. Das Material erhält somit elastische und dehbare Eigenschaften (duktil).

Die Ausbildung kugelförmigen Graphits im Gusseisen wurde schon 1921 entdeckt. Weitere Entwicklungen erfolgten 1943 bis 1947, deren Ergebnisse schließlich 1948 bekannt gegeben wurden. Um 1951 wurden erstmals in Europa industriell gefertigte Duktilgussrohre hergestellt, in Deutschland erstmals 1956. Eine erste Norm für Duktilguss existiert in Deutschland seit 1959.

Als erster Standort in Deutschland nahm die Luitpoldhütte bei Amberg bereits 1957 die Produktion von Duktilgussrohren auf [86]. Duktilgussrohre wurden somit in Westdeutschland ab 1957 in geringen Mengen und ab ca. 1965 in größerer Stückzahl verlegt [71; 79; 82].

Im Jahre 1965 waren gut 2500 km Duktilgussrohre (Wasser und Gas) verlegt. 1975 waren es bereits 50000 km Duktilgussrohre [88].

Duktilgussrohre bzw. Schleudergussrohre allgemein (also auch geschleuderte Graugussrohre) sind korrosionsempfindlicher als Sandgussrohre. Die Rohre werden wie bereits erwähnt zur Verringerung des Zementitanteils und zur Erhöhung des Ferritanteils (hoher Ferritanteil = dehnfähiger) nachgeglüht. Dieses Nachglühen muss die Schleudergussrohre gegenüber Sandgussrohren korrosionsempfindlicher machen (siehe Abschnitt 4.7) [87].

Im Glauben, in den anfangs produzierten Duktilgussrohren die guten technologischen Eigenschaften des Stahls (Elastizität) und die relativ gute Korrosionsbeständigkeit von Grauguss zu vereinen, wurde der Korrosionsschutz dieser Rohre zunächst auf dem Niveau der Graugussrohre belassen (siehe Abschnitt 4.5) [89]. Gegen Ende der siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts wurde erkannt, dass der Korrosionsschutz an Duktilgussrohren nicht dauerhaft ausreichend war und Maßnahmen zur Verbesserung getroffen. Duktilgussrohre, welche seit ca. 1980 gefertigt bzw. verlegt werden besitzen einen dem aktuellen Stand der Technik entsprechenden optimalen Korrosionsschutz (siehe z.B. DIN EN 545 [29]).

Auf dem Gebiet der ehemaligen DDR wurden ab 1978 Duktilgussrohre größerer Nennweite (DN > 1400) produziert. Rohre kleinerer Nennweite wurden hauptsächlich aus der BRD oder Jugoslawien importiert [75].

Duktilgussrohre werden hauptsächlich in Kokillen nach dem De-Lavaud-Verfahren hergestellt und sind anhand der elastischen (duktilen) Eigenschaften und der Abdrücke der Kokille auf der Rohraußenseite erkennbar (Abbildung 12). Zusätzlich ist anhand der Qualität des vorhandenen Korrosionsschutzes zu erkennen, ob es sich um eine frühere (vor ~ 1980) oder spätere (nach ~ 1980) Produktion handelt.

4.4 Stahlrohre (St)

Stahlrohre für Trinkwasserleitungen konnten bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts produziert werden (geschweißte Rohre). Eine Verlegung von Stahlrohren in größerer Anzahl begann allerdings erst Anfang des 20. Jahrhunderts.

Grundsätzlich wird bezüglich der Stahlrohrherstellung in geschweißte und nahtlose Rohre unterteilt. Geschweißte Stahlrohre lassen sich nochmals in Stahlrohre mit gerader oder spiralförmiger Schweißnaht aufteilen. Jedoch hat das Herstellungsverfahren nicht den Einfluss auf die Materialeigenschaften des Rohres, wie dies vergleichsweise bei den Graugussrohren der Fall ist.

Eine mögliche Unterteilung bei der Entwicklung der Stahlrohrtechnologie sollte in der Ausführung des Korrosionsschutzes vorgenommen werden, da die Wirksamkeit des Korrosionsschutzes den größten (indirekten) Einfluss auf die Nutzungsdauer von Stahlrohren hat (siehe Abschnitt 4.9.1).

Im Vergleich zu Graugussrohren besitzen Stahlrohre eine bedeutend höhere Zugfestigkeit und Elastizität. So konnten Rohre mit geringerer Wanddicke und somit weniger Gewicht bei gleicher Belastbarkeit hergestellt werden.

Während es seit ca. 1812 in England und 1849 in Deutschland möglich war, geschweißte Stahlrohre zu produzieren, wurden nahtlose Stahlrohre serienmäßig erst ab 1893 hergestellt (Schrägwalz-Pilgerschritt-Verfahren der Gebr. Mannesmann) [90; 92]. Eine größere Verwendung von Stahlrohren für die städtische Trinkwasserversorgung begann jedoch erst um 1905 / 1906 aufgrund angestiegener Produktionsmengen und gefallener Preise [1].

Je nach Herstellungsverfahren schwanken die Rohre im Bereich von Nennweite und Wanddicke. Nahtlose Stahlrohre werden im Allgemeinen warm umgeformt, während geschweißte Stahlrohre kalt geformte Rohre sind. Warmgeformte Metalle sind wesentlich feinkörniger als gegossene Werkstücke (siehe Abschnitt 4.7) [91].

In der Stahlrohrtechnologie lassen sich wie erwähnt die Herstellungsverfahren in geschweißte Stahlrohre bzw. nahtlose Rohre aufteilen, welche im Zeitraum vor ~ 1930 produziert und verlegt wurden. Zusätzliche Erkennungsmerkmale sind neben der vorhandenen bzw. fehlenden Schweißnaht ein mangelhafter Korrosionsschutz (siehe Abschnitt 4.5). Die Erkenntnisse über die Bedeutung eines ausreichenden Korrosionsschutzes führten dazu, dass Stahlrohre ab ca. 1930 mit einem verstärkten Korrosionsschutz versehen wurden [94]. Ab ca. 1980 werden Stahlrohre analog den Duktulgussrohren mit einem optimierten Korrosionsschutz entsprechend DIN EN 2460 versehen [30]. Stahlrohre aus der Produktion der RGW-Staaten (~1949 – 1990) bzw. mit Verlegung auf DDR-Gebiet wurden mit einem nicht ausreichenden Korrosionsschutz ausgestattet und besaßen aufgrund der Rohstoffknappheit unzureichende Materialeigenschaften (siehe Abschnitt 4.5).

4.5 Entwicklung des Korrosionsschutzes von metallischen Trinkwasserleitungen

Die Qualität des äußeren und inneren Korrosionsschutzes einer metallischen Rohrleitung kann Einfluss auf deren Nutzungsdauer haben (siehe Abschnitt 8.3.2). Ebenso hinterlassen einige Ausführungen des Korrosionsschutzes typische Schadensbilder an den Leitungen (Abbildung 65). Im Folgenden wird deswegen die chronologisch geordnete technologische Entwicklung des Korrosionsschutzes behandelt.

4.5.1 Korrosionsschutz von Graugussrohren

Graugussrohre wurden ausschließlich mit Steinkohleteerpech, später mit (Erdöl-)Bitumen als Korrosionsschutzmaßnahme außen sowie innen beschichtet. Eine Definition zur Unterscheidung der Begriffe Teer, Bitumen oder Asphalt erfolgte in früherer Literatur jedoch nicht [95]. Wurden zusätzlich Teer (destilliertes Steinkohleteerpech) oder Bitumen (destilliertes Erdölbitumen) mit Zuschlagstoffen (Kalksteinmehl oder andere mineralische Zuschläge) versehen, handelte es sich um sog. gefüllten Teer oder Bitumen. Häufig werden auch die Begriffe Asphalt oder Asphaltierung verwendet, die in früherer Literatur Beschichtungen mit Teer oder Bitumen (gefüllt und ungefüllt) verallgemeinern.

Die Graugussrohre wurden entweder in die heiße Masse (150 – 180 °C) für 10 – 20 Minuten getaucht (Abbildung 16) oder damit bestrichen (Abbildung 17). Die Schichtdicke schwankte zwischen 0,1 mm und bis zu 15 mm (meist fehlerhafte Beschichtung) [96].

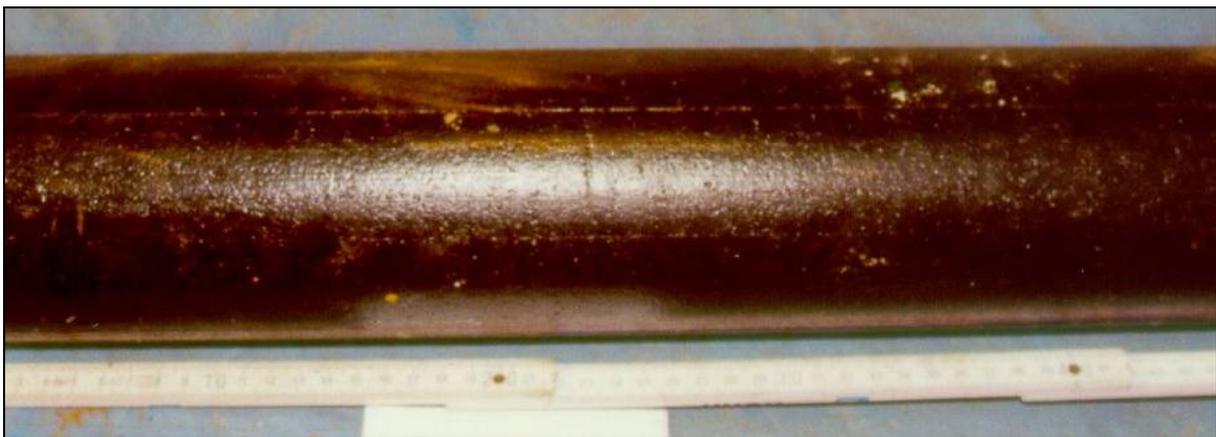


Abbildung 16: gut haftender äußerer Korrosionsschutz (getaucht in Heißbitumen) an einem Graugussrohr



Abbildung 17: Reste eines Bitumenanstrichs an einem Graugussrohr

Für eine zweifelsfreie Unterscheidung in teerhaltige oder bituminöse Beschichtungen der Graugussrohre, muss die Beschichtung mit einem Lösungsmittelhaltigen Stoff (z. B. Haarlack) besprüht werden. Unter UV-Licht fluoreszieren teerhaltige Bestandteile gelb-bräunlich, während bitumenhaltige Beschichtungen weiß-bläulich fluoreszieren (siehe Abbildung 18).

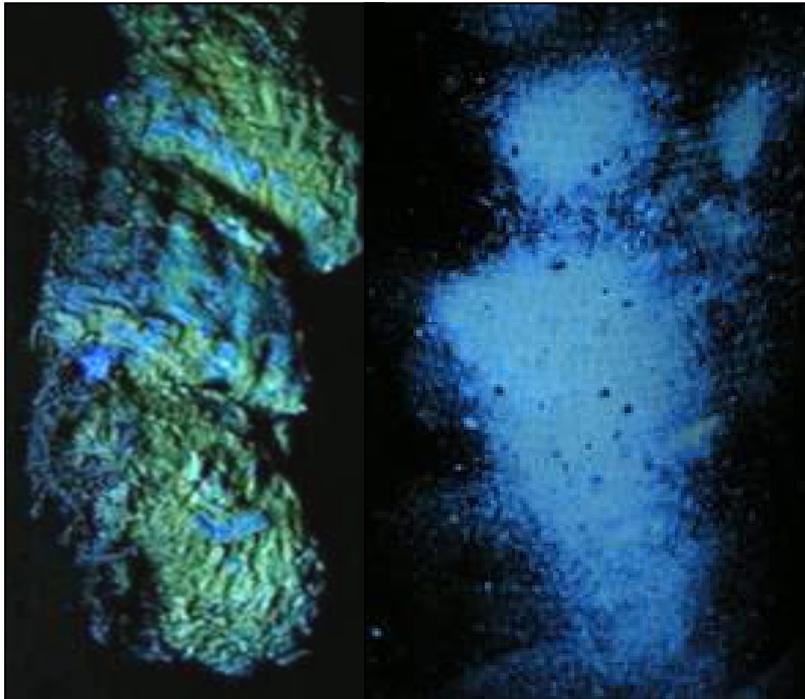


Abbildung 18:
Gelb-bräunlich fluoreszierende Bestandteile einer Teerbeschichtung (links) auf einem Graugussrohr

Teerhaltige Beschichtungen enthalten kanzerogene PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe), die bei Anwendung als Korrosionsschutz an das Trinkwasser abgegeben werden können. Beschichtungen auf Bitumenbasis waren u. U. mit gesundheitsschädlichen Stoffen imprägniert (Pentachlorphenol) [73].

Teerhaltige Beschichtungen als innerer und äußerer Korrosionsschutz wurden trotz bereits bestehender Bedenken hinsichtlich gesundheitsschädlicher Stoffe bis 1969 in der BRD verwendet. Bei Rohren aus DDR-Produktion wurden teerhaltige Beschichtungen auf Braunkohlebasis bis 1969 und auf Steinkohlebasis bis 1990 benutzt [73; 75; 87; 97]. Der Korrosionsschutz sollte hier meist nur bis zum Entstehen einer Kalk-Rost-Schicht halten (Inkrustierung) bzw. diente als temporärer äußerer Schutz (Schichtdicke 20 µm, Haltbarkeit in schwachaggressiven Böden ca. 10 Jahre) [75].

In Zeiten wirtschaftlicher Schwächeperioden (Weltkriege, Weltwirtschaftskrise 1929, Ölkrise 1973 und 1979/1980) war der Korrosionsschutz auf Bitumenbasis oftmals mangelhaft [100].

Bereits Anfang der sechziger Jahre des 20. Jahrhunderts bestand in Deutschland die Möglichkeit, Graugussrohre (später auch Stahl- und Duktulgussrohre) mit einer Zementmörtelschicht auszukleiden. Jedoch kam solch ein Korrosionsschutz zunächst selten zur Anwendung (meist bei aggressiven Wässern). Ebenso verhielt es sich mit Kunststoffbeschichtungen [97 - 99].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt ein Vergleich an untersuchten Rohrproben zwischen restlichem vorhandenem Korrosionsschutz und entsprechender Schädigung der Rohrwand (Korrosion) in Abschnitt 8.3.2.

4.5.2 Korrosionsschutz von Duktileisrohr

Die Ausführung und Entwicklung des Korrosionsschutzes der ersten Duktileisrohr (ca. 1960 – 1980) entsprach den Ausführungen der Graugussrohr (siehe auch Abschnitt 4.3)

Duktileisrohr aus der Produktion ab ca. 1980 besitzen einen inneren und äußeren Korrosionsschutz nach dem Stand der Technik. Dieser Korrosionsschutz besteht laut DIN EN 454 aus

- einer Zementmörtelauskleidung innen (ZMA)
- einer Zinkbeschichtung außen (Abbildung 19) und / oder
- einer Polymerbeschichtung oder Faserzementmörtelummhüllung außen



Abbildung 19: Reste der Zinkbeschichtung an einem Duktileisrohr

Erstmals wurden Duktileisrohr um 1973 bzw. 1974 mit einer Zinkbeschichtung (Spritzverzinkung) versehen [102].

Duktileisrohr, welche zwischen 1980 und 1990 auf dem Gebiet der DDR verlegt wurden, besaßen eine Bitumenbeschichtung (gelegentlich auch jutearmiert) als äußeren Korrosionsschutz (Abbildung 20) und mitunter eine nachträglich eingebrachte Zementmörtelschicht (Abbildung 21) durch das sog. Zementmörtelauspressverfahren. Diese Zementmörtelschichten besaßen merkliche Schwankungen in ihrer Schichtdicke [103].

Die Verbesserungen in der Ausführung des inneren und äußeren Korrosionsschutzes sind bei der Bildung von Leitungsgruppen bei Duktileisrohr zu beachten (siehe Abschnitt 4.10).



Abbildung 20: jutearmierte Bitumenbeschichtung eines Duktulgussrohres aus der Verlegeperiode auf DDR-Gebiet



Abbildung 21: Duktulgussrohr mit Zementmörtel-Verpressung

4.5.3 Korrosionsschutz von Stahlrohren

Der Korrosionsschutz der Stahlrohre aus dem Produktionszeitraum bis ~1930 entsprach den Ausführungen der Graugussrohre aus gleicher Produktionszeit. Um einen inneren und äußeren Korrosionsschutz der Stahlrohre zu gewährleisten, wurden die Rohre anfangs in heißen, flüssigen Teer oder Bitumen getaucht. Dies ergab eine Schicht von ca. 0,1 mm [98]. Jedoch heißt es in der „Studie über erdverlegte Trinkwasserleitungen aus verschiedenen Werkstoffen“: „Ein Rohraußenschutz ist auf die Dauer nur dann wirksam, wenn die Schichtdicke der Umhüllung größer als 0,5 mm ist.“ [99].

In den Jahren 1902 / 1903 gab es bereits erste Versuche bei der Mannesmann Röhrenwerke AG Düsseldorf, „der Korrosionsanfälligkeit des Stahls mit entsprechender Asphaltierung und Jutierung“ entgegen zu wirken [92]. Eine Bewehrung der äußeren Korrosionsschutzbeschichtung (auf Teer- oder Bitumenbasis) war notwendig, um ein Ablättern / Abplatzen der Beschichtung bei elastischer Verformung der Stahlrohre zu verhindern. Bei Graugussrohren ist eine solche Bewehrung nicht zu finden, da sich diese Rohre nicht elastisch verformen konnten. Als Bewehrungsmaterial wurde Jute, Wollfilzpappe oder Glasvlies verwendet (Abbildung 23) [73]. Die Stahlrohre wurden entsprechend Abbildung 22 lagenweise mit dem teer- oder bitumengetränktem Material umwickelt [104]. Die Umwicklung erfolgte tangential und wurde stumpf gestoßen. Die Streifenbreite der Umwicklung betrug 40 – 300 mm. Wollfilzpappe als Trägermaterial wurde der Jute vorgezogen (Widerstand gegen Transportschäden) [93].

Die Erkenntnisse über die Bedeutung eines ausreichenden Korrosionsschutzes führten dazu, dass Stahlrohre ab ca. 1930 mit einem verstärkten Korrosionsschutz versehen wurden. Der Korrosionsaußenschutz wurde mit einer Schichtdicke der Umhüllung von mindestens 0,5 mm ausgeführt (einfache Beschichtung) bzw. es wurden 4 mm dicke teer- oder bitumengetränkte Jute- oder Glasfliesbänder verwendet [94]. Eine Schichtdicke von mindestens 2 mm wurde bei teer- oder bitumenhaltigen Überzügen an Stahlrohren aus DDR-Produktion verlangt (vgl. mit Abschnitt 4.5.1) [86].

Trotz der zunehmenden Erkenntnisse über die Bedeutung des kathodischen Korrosionsschutzes erfolgte eine Ausstattung der Stahlleitungen mit einem kathodischen Korrosionsschutz erst allmählich bzw. ausschließlich in Gebieten mit offensichtlicher Streustromgefahr [73].

Stahlrohre der neusten Generation besitzen seit ca. 1980 einen optimierten Korrosionsschutz ähnlich dem der Duktilgussrohre. Üblich ist eine Zementmörtelauskleidung innen und PE-Beschichtung oder Faserzementmörtel-Umhüllungen außen [101].

In älterer Literatur wurde öfters die „Asphaltierung der Rohre“ beschrieben [105]. Asphalt ist laut Definition nach DIN EN 13108 ein bitumenhaltiges Mischgut (meist mineralische Zuschläge im Mischgut) [106]. Die Bezeichnungen „Asphaltierung der Rohre“; „Tauchen in Heißasphalt“; „gefülltes Steinkohleteer-Pech“ oder „gefüllter Bitumen“ meinen somit eine Mischung aus Bitumen- oder Teermasse mit feinen mineralischen Zuschlagstoffen, um die Verschleißfestigkeit des Korrosionsschutzes zu erhöhen [98; 107].



Abbildung 22: Jutearmierte Bitumentwicklung an einem Stahlrohr



Abbildung 23: Bitumentwicklung mit Glasvlies-Armierung

4.6 Entwicklung der Verbindungstechnik von Trinkwasserleitungen

Mit Hilfe der Feststellung der Verbindungssysteme (Form und Geometrie) lässt sich der Herstellungs- bzw. Verlegezeitraum der entsprechenden Wasserrohrleitung eingrenzen, da sich Verbindungssysteme stetig weiterentwickelt und verbessert haben (z. B. von der nicht längskraftschlüssigen Stemmmuffenverbindung zur zugfesten elastischen Verbindung). Die Erkennung des Verbindungssystems hilft zusätzlich bei der Beurteilung der Gefahr von Wasserverlusten über undichte Verbindungen.

4.6.1 Verbindungssysteme von Graugussrohren

Tabelle 4.1: Chronologische Entwicklung und Bemerkungen
[70; 78; 79; 83; 87; 108; 109]

Flanschverbindungen (Abbildung 24)	vor 1850 - heute
<ul style="list-style-type: none"> - seit 1882 in Deutschland genormt - seit 1926 Festlegung, dass die Anzahl an Schrauben mit mindestens 4 Stück und immer durch 4 teilbar angeordnet werden 	
Stemmmuffenverbindung (Abbildung 26)	1850 - 1951
<ul style="list-style-type: none"> - nicht längskraftschlüssig - Dichtung erfolgte mit Teerstrick, Hanfstrick bzw. Bleiwolle - nach 1945 wurden die Stemmmuffen mit Aluminiumwolle statt mit Blei vergossen (schnelle Oxidation des Aluminiums) - Gummidichtungen in der Muffe waren zwar bereits seit 1850 möglich, kamen aber sehr selten zur Anwendung - bis 1974 erfolgte die Herstellung von Graugussrohren mit Stemmmuffenverbindung bei DN 50 bis DN 400 auf DDR-Gebiet, danach nur für DN 500 bis 1200 	
Schraubmuffenverbindung (Abbildung 25)	1910 - 1970
<ul style="list-style-type: none"> - Schraubring presste Dichtung in Muffe (deswegen keine Gewindeverbindung) - Schraubmuffe UNION seit 1931 - um 1954 Anwendung bei DN 40 bis DN 600 - gegenwärtig Anwendung bei DN 80 bis DN 400 - ab 1974 Herstellung von Graugussrohren mit Schraubmuffenverbindung DN 50 bis DN 400 auf DDR-Gebiet - ab 1977 Herstellung von Graugussrohren mit Schraubmuffenverbindung System LKH DN 50 bis DN 400 auf DDR-Gebiet 	
Stopfbuchsenmuffen-Verbindung (Abbildung 27)	seit 1936
<ul style="list-style-type: none"> - mit gummidichtenden Stopfbuchsenring - im Vergleich zur Stemmmuffe relativ beweglich - um 1954 Anwendung ab DN 700 - gegenwärtig Anwendung ab DN 500 bis DN 1200 	
Steckmuffenverbindung (Abbildung 28)	seit 1950
<ul style="list-style-type: none"> - seit 1956 wird die TYTON-Muffe eingesetzt, die ständig weiter entwickelt wurde - gegenwärtig Anwendung ab DN 80 bis 1400 DN 	
Zugfeste Verbindungen	seit 1970
<ul style="list-style-type: none"> - kamen an Graugussrohren nicht mehr zum Einsatz, da Umstellung der Produktion von Grauguss auf Duktilguss bereits vor 1970 erfolgte - an Graugussrohren der Generation GGL IIa, welche bis 1990 produziert wurden, kamen ebenfalls keine (bzw. sehr selten) zugfesten Verbindungen zum Einsatz 	



Abbildung 24:
Flanschverbindung an
einem Graugussrohr



Abbildung 25:
Schraubmuffe UNION

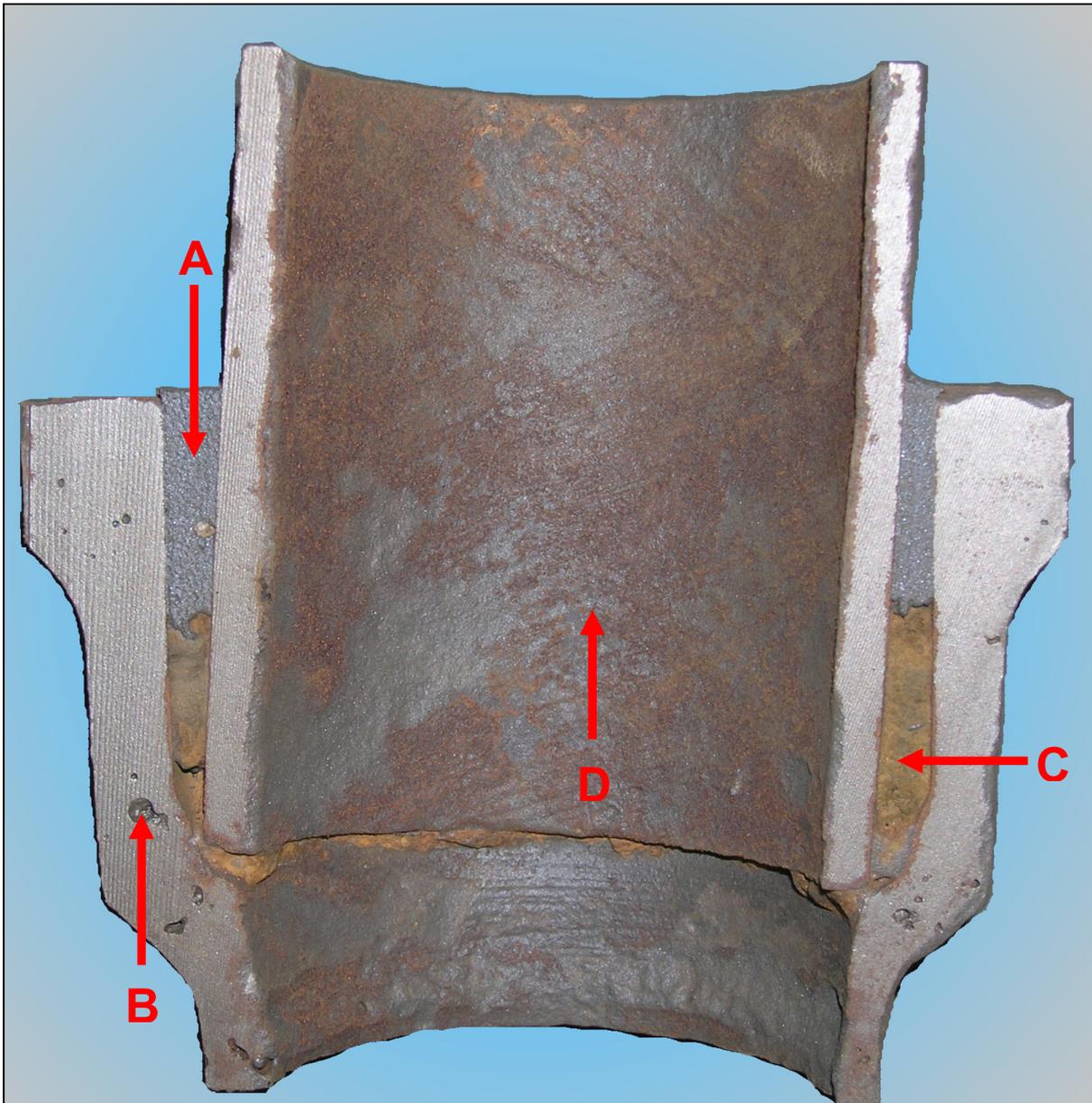


Abbildung 26: Längs aufgeschnittene Stemmuffe; deutlich zu erkennen ist die Auslenkung des glatten Rohrendes zur Rohrachse

Legende zu Abbildung 26:

- A: Bleiverstimmung
- B: Gasblase in der Metallmasse
- C: Dichtung aus Hanfstrick
- D: Schichtungsspuren

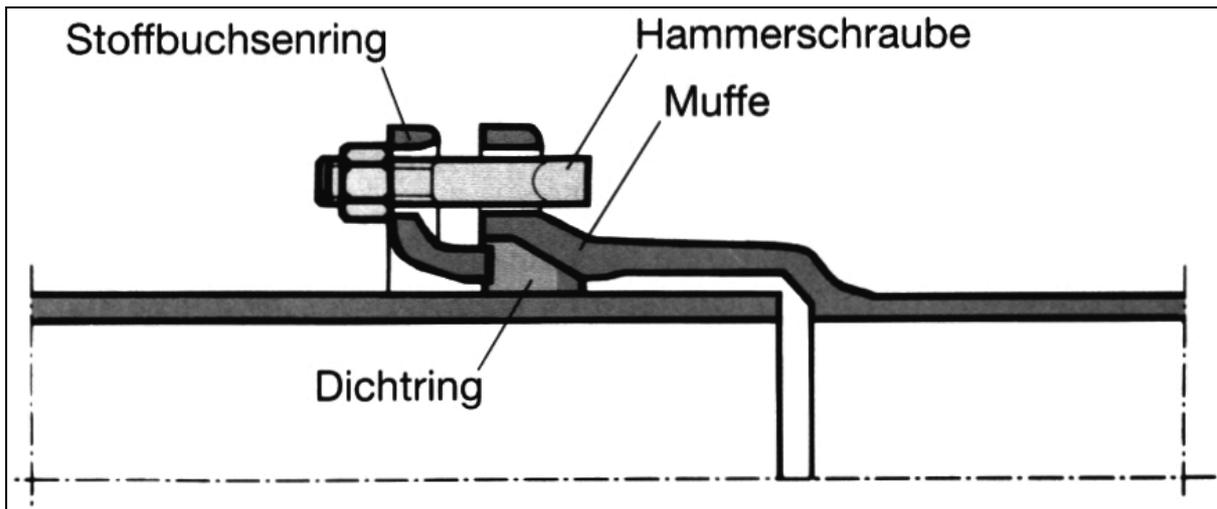


Abbildung 27: Prinzipskizze Stopfbuchsenmuffe [79]

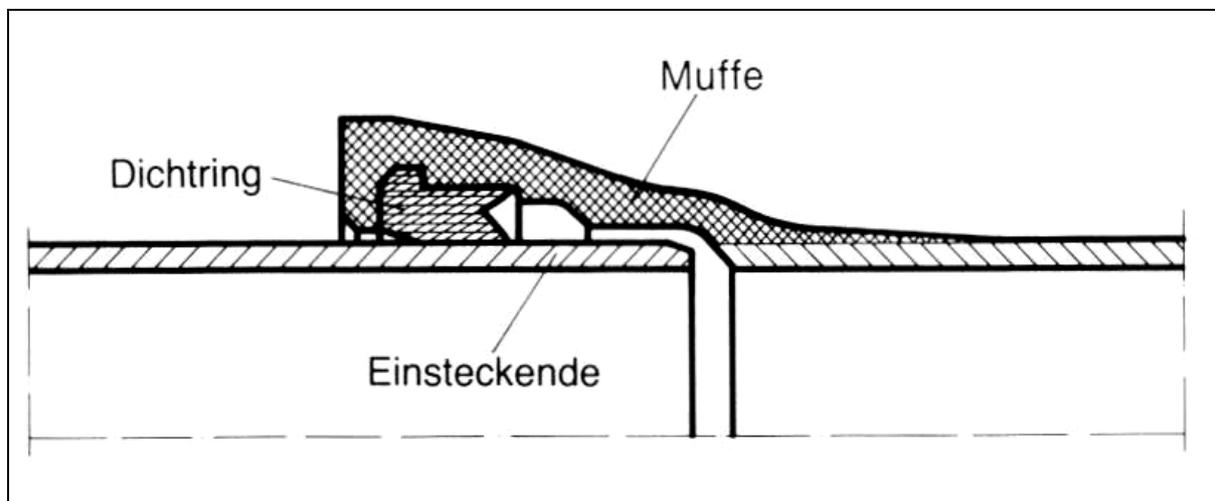


Abbildung 28: Prinzipskizze Steckmuffe [79]

4.6.2 Verbindungssysteme von Duktillgussrohren

Duktillgussrohre werden seit 1964 in Deutschland in größerem Umfang produziert bzw. verlegt. Entsprechend wurden bei den ersten Duktillgussrohren die damals bekannten und tauglichen Verbindungssysteme verwendet.

Tabelle 4.2: Chronologische Entwicklung und Bemerkungen [14; 110]

Flanschverbindungen	bis heute
- vorwiegend bei oberirdischen Leitungen	
Schraubmuffenverbindungen	bis 1970
- Ausführung ähnlich den Graugussrohren	
- um 1966 Anwendung bei DN 80 – 600	
Stopfbuchsenmuffen-Verbindung	bis heute
- Ausführung ähnlich den Graugussrohren	
- um 1966 Anwendung bei DN 500 – 1200	
- nicht relevant, da nur für große DN	
Steckmuffenverbindungen	bis heute
- hier TYTON-Muffen mit Gummidichtringen	
- um 1966 Anwendung bei DN 80 – 600	
Gewinde- und Schraubverbindung	bis heute
- hauptsächlich für Hausanschluss- oder Gasleitungen	
Längskraftschlüssige Verbindungen (Abbildung 29)	bis heute
- Ablösung der starrer Steckmuffensysteme durch längskraftschlüssige Verbindungen	
- bewegliche längskraftschlüssige Verbindungen (TYTON-Systeme, ständige Weiterentwicklung, z. B. um 1988 TYTON-NOVOSIT)	

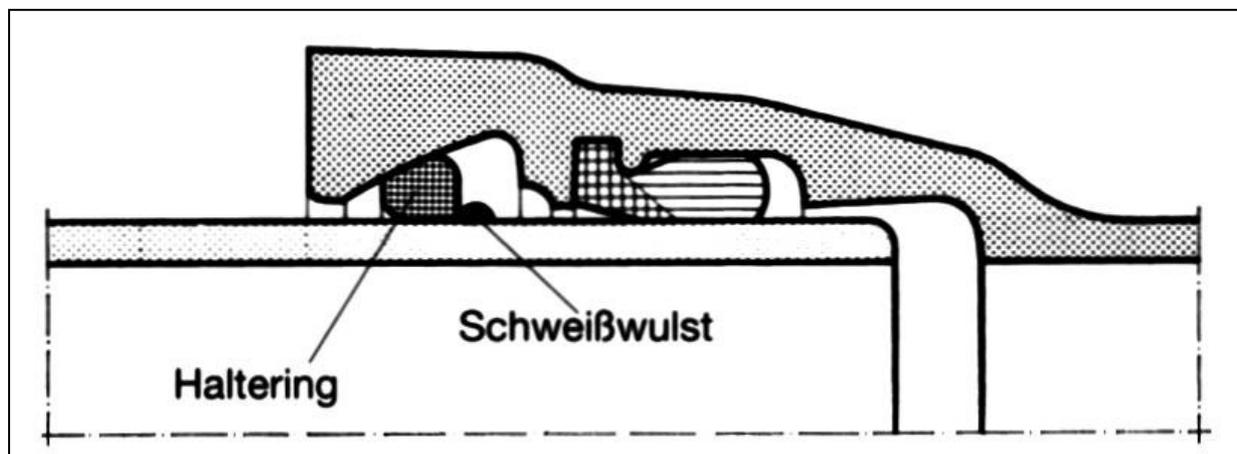


Abbildung 29: Prinzipskizze längskraftschlüssige Steckmuffenverbindung System TYS-K [79]

4.6.3 Verbindungssysteme von Stahlrohren

Die Entwicklung und Ausführung der Verbindungssysteme ist ähnlich bzw. analog denen der Grauguss- und Duktulgussrohre. In Anhang A erfolgt die Auflistung der zugehörigen geometrischen Abmessungen.

Tabelle 4.3: Chronologische Entwicklung und Bemerkungen [14; 71; 93; 111; 112]

Flanschverbindungen	seit 1850
<ul style="list-style-type: none"> - häufigere Anwendung als vergleichsweise bei Gussrohren - verschiedenste Ausführungen - lösbare Verbindung, meist Einsatz bei nicht erdverlegten Leitungen oder Formteilen und Armaturen 	
Stemmuffenverbindungen (Abbildung 30)	seit 1850 – 1950
<ul style="list-style-type: none"> - Dichtung erfolgte ebenfalls mit Hanfstrick und Bleiverstimmung - selten kamen bereits gummidichtende Stemmuffenverbindungen zum Einsatz - Anwendung nur bei nahtlosen Stahlrohren DN 40 – 80 - eine Unterart war die so genannte Schalker Muffe mit langem Führungshals (für Biegebeanspruchungen in Bergsenkungsgebieten) - eine weitere Unterart waren die Kugelstemmuffen (selten) 	
Schraubverbindungen	seit 1910
<ul style="list-style-type: none"> - wurden unterteilt in Ausführung A und B - einige Arten konnten teilweise Biege- und Längskräfte aufnehmen 	
Schweißverbindungen	seit 1920
<ul style="list-style-type: none"> - geläufige Verbindungsart - gegenwärtig werden Stumpfschweißverbindungen (alle Nennweiten), Einsteck-Schweißmuffen (DN 100 – DN 1200) und Überschiebschweißmuffen als Verbindungssystem an Trinkwasserleitungen aus Stahl ausgeführt 	
Steckverbindungen	seit 1940
<ul style="list-style-type: none"> - dazu gehörte die so genannte Sigurmuffe (Sicherheits-Gummi-Ring-Muffe) bei der der Muffenspalt mit Bitumenholzwollestrick gedichtet wurde - längskraftschlüssige Steckverbindungen analog den Duktulgussrohren seit ca. 1957 - gegenwärtig Steckmuffenverbindung für DN 100 – DN 300, normalerweise nicht längskraftschlüssig; durch System TYTON-SIT wird Längskraftschlüssigkeit erreicht 	
Kupplungssysteme	
<ul style="list-style-type: none"> - Sonderformen der Verbindungssysteme, selten Anwendung bei Trinkwasserleitungen - oftmals Einsatz bei Reparaturarbeiten 	



Abbildung 30: Stahlrohr mit Stemmuffenverbindung (längs aufgeschnitten)

4.6.4 Muffensignaturen an Graugussrohren

Oftmals war es gebräuchlich, an den Muffenköpfen der Rohrverbindungen nicht nur die entsprechende Nennweite, sondern auch den Rohrhersteller in Form einer Signatur zu kennzeichnen. Somit ist es u. U. möglich, den Produktionsstandort des Rohres zu ermitteln. Dadurch sind zwar keine direkten Aussagen zur Herstellungs- bzw. Verlegezeit möglich, aber der Verlegezeitraum kann grob eingegrenzt werden, da Eisenhütten, Gießereien und Röhrenwerke ihre Produktpalette wechselten, neu gegründet oder stillgelegt wurden. Zum Beispiel wurden Rohre mit der Signatur FWH am Muffenende in der **Friedrich-Wilhelm-Hütte** in Mülheim an der Ruhr hergestellt. In der Friedrich-Wilhelm-Hütte wurden nachweislich seit 1862 Rohre produziert [80; 83].

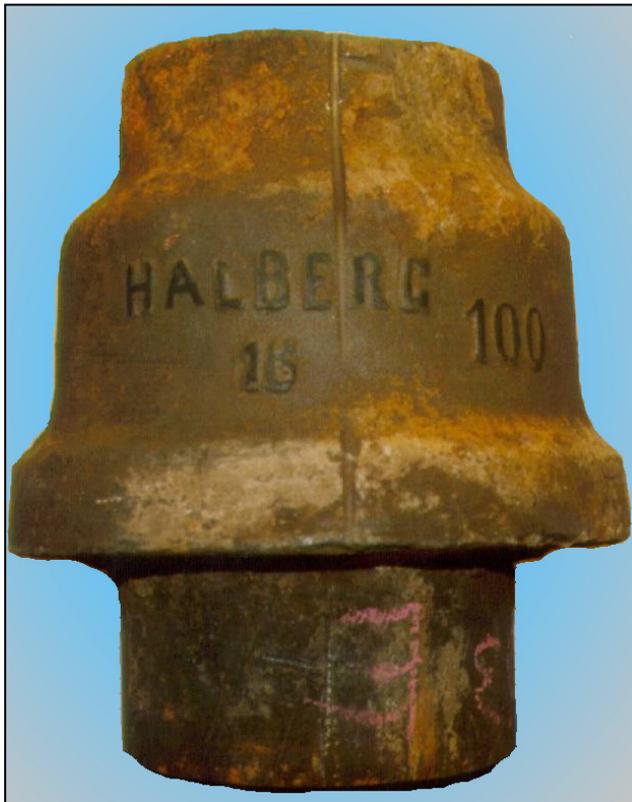


Abbildung 31:
Signaturen der Halberghütte an einer
Stemmmuffe
(nicht zu verwechseln mit der HALBERG-
Muffe)



Abbildung 32:
Signatur des
„Schalker Gruben- und
Hüttenverein Gelsen-
kirchen“

4.7 Metallographie - Ausbildung der mikroskopischen Kornstruktur

Mit Hilfe der Metallographie lässt sich im Zweifelsfall der Rohrwerkstoff (Grauguss, Duktulguss oder Stahl) eindeutig bestimmen.

Des Weiteren können Verunreinigungen bzw. Fehler im Metallgefüge (z. B. Seigerungen bei Stahl; Spongiose bei Gusseisen) erkannt werden und somit Aussagen über eine erhöhte Korrosionswahrscheinlichkeit und innere Verschwächungen getroffen werden.

Der Art der Rohrherstellung (Sandformen oder Kokillen bei Gussrohren, Walzverfahren bei Stahlrohren) hat wesentlichen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit und u. U. auf das Tragverhalten der Rohre (z. B. Glühhaut, Eigenspannungen).

4.7.1 Metallographie der Graugussrohre

Um das Gusseisen im Vergleich zu Stahl bei einer relativ niedrigen Temperatur (ca. 1300 °C) gießfähig zu bekommen, wird im Vergleich zu Stahl ein höherer Kohlenstoffanteil beigemischt.

Chemische Zusammensetzung und Legierungsbestandteile [79; 139]:

Kohlenstoffgehalt:	3,5 – 3,7 %
Siliziumgehalt:	2,0 – 2,2 %
Mangangehalt:	0,1 – 0,8 %

Störelemente:	Phosphat, Schwefel, Blei, Wismut (Al, Sn, As, Ti)
	Anteil Blei und Wismut soll unter 0,002% bleiben

Um das Schwindmaß des Graugusses und Lunkerbildung (siehe Abbildung 58) zu vermeiden, wird die Schmelze mit Spuren von Kalzium, Silizium, Mangan oder Zirkon geimpft. Dabei bildet sich ein sehr fein verteilter Lamellengraphit aus und die Zugfestigkeit bzw. Schlagzähigkeit wird erhöht [108].

Die Legierungszusätze Mangan, Phosphor und Schwefel sind korrosionschemisch unerheblich. Ab einem Phosphorgehalt >1,5% bilden sich jedoch Graphitnester (ähnlich Temperguss, siehe Abbildung 34). Dies führt zu einer höheren Härte der Graugussrohre. Zusätzlich erhöht Phosphor die Dünflüssigkeit der Schmelze [91; 97]. Mit einfachen metallographischen Betrachtungen (ohne Ätzung) kann erkannt werden, ob das Gusseisen einen höheren Phosphoranteil enthält (höhere Härte) [113].

Bei Bauteilen aus Grauguss mit einer erforderlichen hohen Verschleißfestigkeit (z. B. Radlager) war diese Erhöhung der Härte durch einen höheren Phosphorgehalt erwünscht. Bei Graugussrohren dagegen führte dies zu einer schwierigeren Bearbeitbarkeit. Deswegen kann davon ausgegangen werden, dass ein höherer Phosphorgehalt in Graugussrohren eher auf eine mangelnde Qualität der Schmelze zurückzuführen ist. Normalerweise liegt der Phosphorgehalt des Gusseisens zwischen 0,1 und 0,6 %.

Die meisten oben genannten Legierungszusätze bzw. Störelemente lassen sich mit den einfachen Methoden der Metallographie nur schwer nachweisen (Ätzmittel).

Von weiterer Bedeutung ist die Ausbildung der Graphitlamellen. Durch die Erkennung der Lamellenform, der Lamellenverteilung und der Lamellengröße lässt sich unter Umständen das Herstellungsverfahren nachweisen (Abbildung 41). Die Ausbildung der Lamellengraphitform hat zusätzlich neben der Wärmebehandlung und dem Herstellungsverfahren Einfluss auf die Korrosionswahrscheinlichkeit.

Der Lamellengraphit besitzt eine verzweigte Blättchenstruktur, welche die Korrosionsprodukte zusammen hält. Diese Korrosionsprodukte können Eisenoxid-Verbindungen sein (Rost) oder die zurückgebliebenen nichtmetallischen edleren Gefügebestandteile der Spongiose / Graphitierung (Abbildung 40). Die nicht löslichen, festhaftenden Korrosionsprodukte können einen beständigen Schutz gegen korrosive Medien bilden (siehe Abschnitt 12.2.3) [117]. Dabei handelt es sich um Graphit, Zementit und Phosphideutektikum, die nicht bis schwer löslich sind und mit den restlichen Korrosionsprodukten am nicht angegriffenen Teil des Werkstoffs haften bleiben [108].

Beim Gießen von Graugussrohren in Kokillen (Schleuderguss) ohne Sandauskleidung oder ähnlicher Beschichtung entsteht aufgrund des starken Temperaturgefälles beim Kontakt mit der relativ kalten Kokillenoberfläche ein dichteres und somit härteres Metallgefüge (die Wanddicke der Rohre spielt bei der Abkühlgeschwindigkeit ebenfalls eine Rolle).

Da solche Rohre sich schlecht bearbeiten lassen, werden sie nachgeglüht, um eine Veränderung im Metallgefüge zu bewirken und die Rohre weicher und damit dehnfähiger zu machen. Bei der nachträglichen Wärmebehandlung der Rohre entsteht die so genannte Glühhaut [108; 115].

Eine langsame Abkühlung der Rohre, wie beispielsweise in Sandformen, führt zu einer größeren Graphitbildung (Korngrenzengraphit), während eine schnelle Abkühlung der Rohre ohne anschließende Wärmebehandlung zu einer feinen Graphitbildung führt (Abbildung 37; Abbildung 38).

Bei sehr langsamer Abkühlung oder bei nachträglichem Glühen zerfällt außerdem der Perlit vollständig und das Gefüge besteht aus grobem Graphit und Ferrit. Bei schneller Abkühlung zerfällt der Perlit nur in Umgebung der Graphitblätter. Diese sind von Ferritsäumen umgeben, die ihrerseits an restlichen Perlit angrenzen.

Bei noch schnellerer Abkühlung schließlich wird der Perlitzerfall vollständig unterdrückt und das Gefüge besteht aus einer perlitischen Grundmasse mit eingelagertem Graphit. Je nach dem Grundgefüge wird deshalb zwischen ferritischem, ferritisch-perlitischem und perlitischem Gusseisen unterschieden.

Da sich die Abkühlgeschwindigkeit herstellungsbedingt (Sandform, Kokille, Wanddicke) schwer beeinflussen lässt, wird das erforderliche Grundgefüge über den Kohlenstoff- und Siliziumgehalt eingestellt.

In Abhängigkeit des Siliziumgehalts bzw. des Kohlenstoffanteils und dessen Aufteilung in elementaren Kohlenstoff (Graphitlamellen) und gebundenen Kohlenstoff ergibt sich ein anderes Gesamtgefüge mit jeweils verschiedenen korrosionschemischen und statischen Eigenschaften (Abbildung 33) [116].

Ein höherer Siliziumgehalt ist mittels metallographischer Betrachtungen feststellbar (Abbildung 36; Abbildung 39).

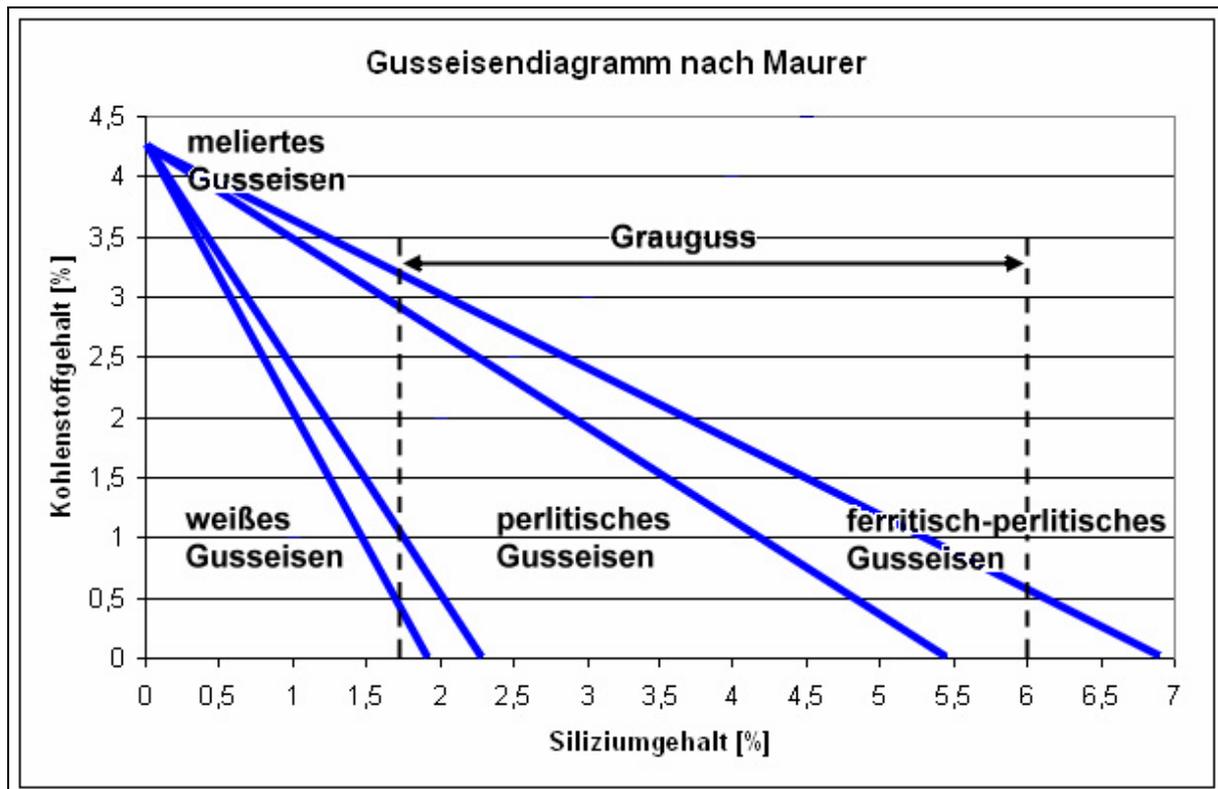


Abbildung 33: Gusseisendiagramm nach Maurer; Darstellung Zusammenhang Kohlenstoff- und Siliziumgehalt [116]

Die Wanddicke des zu produzierenden Rohres hat wie bereits erwähnt ebenfalls Einfluss auf die Abkühlgeschwindigkeit (unter der Voraussetzung, dass die oben erwähnten Legierungsbestandteile konstant gehalten werden und keine Störelemente enthalten sind) [75]. Je größer die Wanddicke, umso langsamer kühlt das Gussrohr aus und umso mehr Ferrit wird im Gefüge gebildet. Das Rohr wird dadurch weicher. Bei dünnwandigen Rohren kühlt die Gussmasse schneller aus und es bildet sich mehr Perlit, was eine höhere Härte des Rohres zur Folge hat (sog. Wanddickenempfindlichkeit) [91].

Für die Härte im Gusseisen ist der Ledeburit- oder Perlitanteil (Zementitanteil) im Gefüge verantwortlich. Der niedrigen Härte des Graphits steht die Härte des Ferrits (HB 100), die des Perlits (HB 250 – 350) und die des Zementits und Steadits (HB 700 – 800) gegenüber.

Da die Graphitmenge nur in relativ engen Grenzen variiert, ist die Härte des Gusseisens durch die Zusammensetzung der gesamten Grundmasse abhängig. Die Härte des Gusseisens nimmt mit steigendem Ferritanteil ab und mit steigendem Zementit- und Phosphidgehalt zu [91].

Im Gegensatz zu nicht geschleuderten Graugussrohren mit einer relativ hohen Korrosionsbeständigkeit führt das Nachglühen bzw. Weichglühen der Schleudergussrohre zur Erhöhung des Ferritanteils. Dieses Nachglühen muss die Schleudergussrohre gegenüber Sandgussrohren korrosionsempfindlicher machen.

Zusätzlich entsteht beim Nachglühen der Schleudergussrohre eine fest haftende Oxidschicht. Eine Verletzung dieser Oxidschicht führte zur Bildung einer Anode (edlere Oxidschicht) und Kathode (unedleres Gusseisen). Beim Vorhandensein von Elektrolyt entsteht ein elektrochemisches Element und es kommt zur Korrosion bzw. Spongiose [108].

Neben einem hohen Perlit-Anteil, der sich beim Nachglühen der Graugussrohre bildet, ist eine dichte Graphitstruktur (Abbildung 42), die durch die Fliehkraft beim Schleudern entsteht, für eine höhere Festigkeit (Zugfestigkeit) verantwortlich.

Tabelle 4.4: Relative Festigkeitseigenschaften von Graugussrohren in Abhängigkeit der Graphitlamellenstruktur

Lamellenverteilung	Lamellenform	Lamellengröße	Härte	Festigkeit	Herstellungsart
grob	strichförmig	groß	normal	normal	Sandguss
fein (dicht)	strichförmig	mittel	normal	höher	Schleuderguss mit nachträglicher Wärmebehandlung
fein (dicht)	strichförmig bis netzartig	mittel bis klein	hoch	höher	Schleuderguss ohne nachträglicher Wärmebehandlung
fein (dicht)	knötchenartig nesterartig	mittel	hoch	normal bis höher	höherer Phosphorgehalt

Im Vergleich zu Duktiguss- und Stahlrohren wird den erdverlegten Graugussrohren (gleichgültig ob in Sandform gegossen oder in Kokillen geschleudert) eine höhere Korrosionsbeständigkeit zugeordnet.

Ursachen dafür sind [79]:

- Gleichmäßige flächige Verteilung der Graphitteilchen und Eisenmischkristalle, dadurch flächiger Abtrag und geringe örtliche Stromdichten
- Graphithaltige Deckschichten, welche sich über die gesamte Oberfläche verteilen und am Metalluntergrund fest verankert sind
- Deckschichten, welche hauptsächlich aus Graphit, Eisenoxidhydraten und Kieselsäure (gelartiger Kitt) bestehen
- Spongioseschichten, welche aus unvollständig aufoxidiertem Eisen-II-Oxiden statt dem üblichen Eisen-III-oxidhydrat (Rost) bestehen

Weitere Untersuchungen ergaben jedoch keine signifikanten Unterschiede der Korrosionsrate bzw. Korrosionsempfindlichkeit zwischen Duktiguss und Grauguss (die eben genannten Aufzählungen können auch auf Duktigussrohre bezogen werden) [114].

Da Duktigussrohre im Vergleich zu Graugussrohren im Allgemeinen mit geringerer Wanddicke hergestellt werden (weniger Abnutzungsreserve), ist bei ungeschützten Duktigussrohren die Metallsubstanz bei relativ gleichen Korrosionsraten schneller aufgebraucht. Ähnlich verhält es sich auch bei Stahlrohren (siehe Abschnitt 12.2.3).

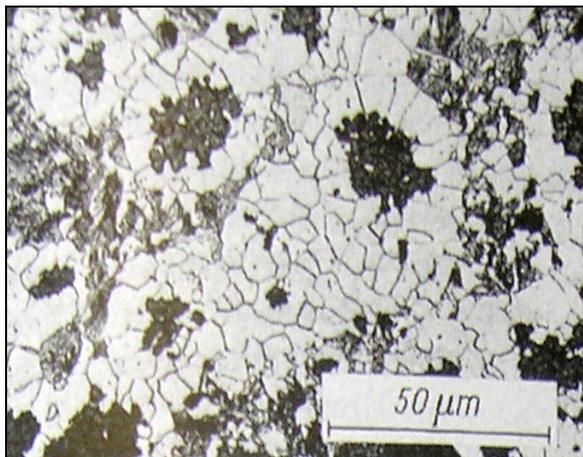


Abbildung 34:
Temperkohle, durch Zementitfall beim
Glühen entstanden, geätzt mit HNO_3 , 500X



Abbildung 35:
Normales Gusseisen, grobe Graphitlamellen,
ungeätzt, 500X

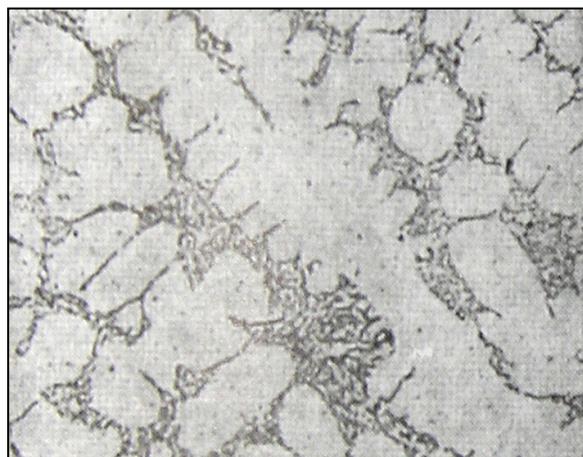


Abbildung 36:
Siliziumreiches Graphiteutektikum, ungeätzt,
500X



Abbildung 37:
Phosphorreiches Gusseisen, Nestergraphit,
ungeätzt, 500X



Abbildung 38:
Korngrenzengraphit, ungeätzt, 500X

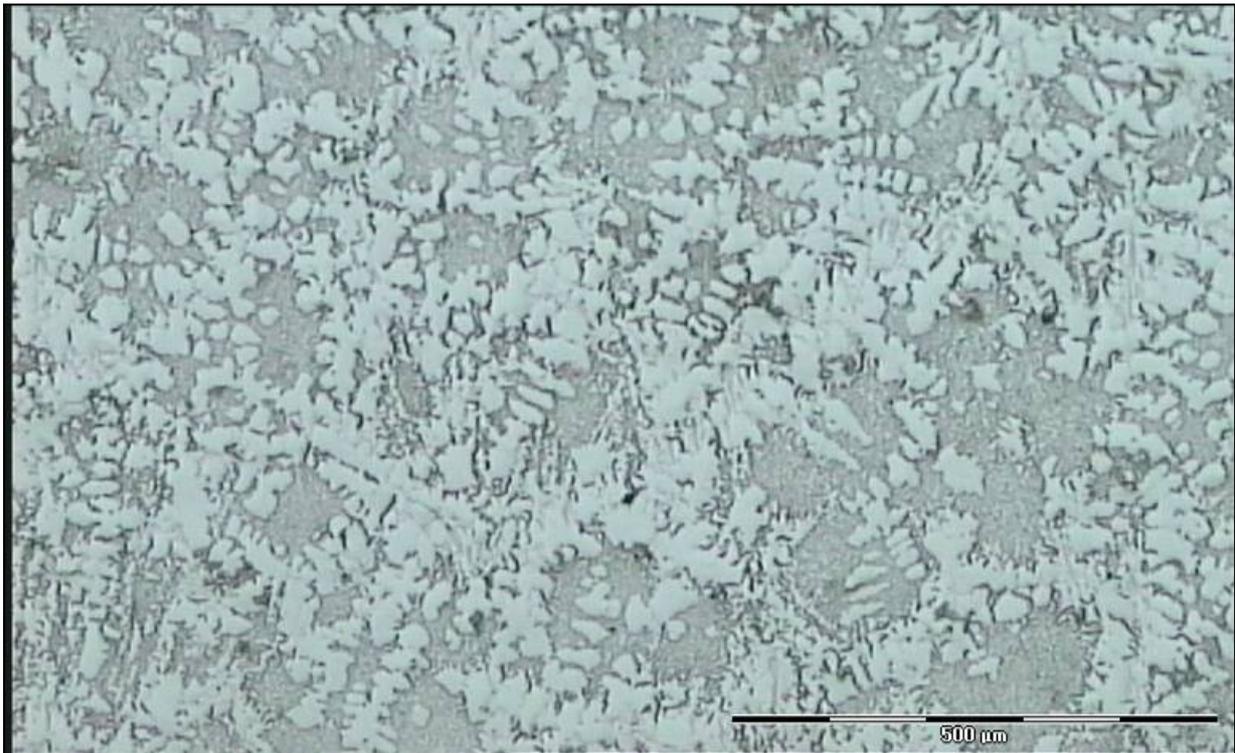


Abbildung 39: Graphiteutektikum bei höherem Siliziumgehalt, ungeätzt, 50X

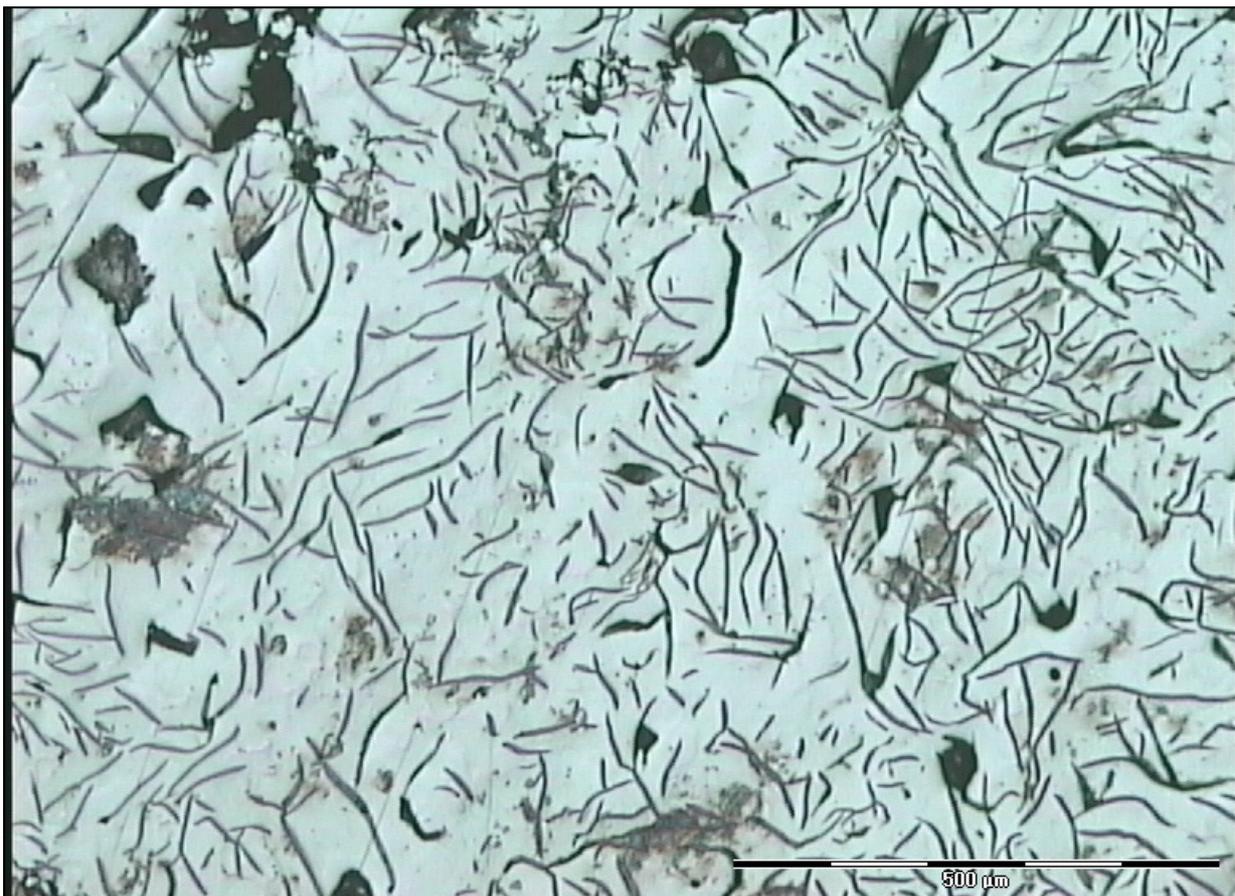


Abbildung 40: Beginnende Spongiose / Graphitierung (schwarze Flecken) an einem Sandgussrohr, ungeätzt, 50X

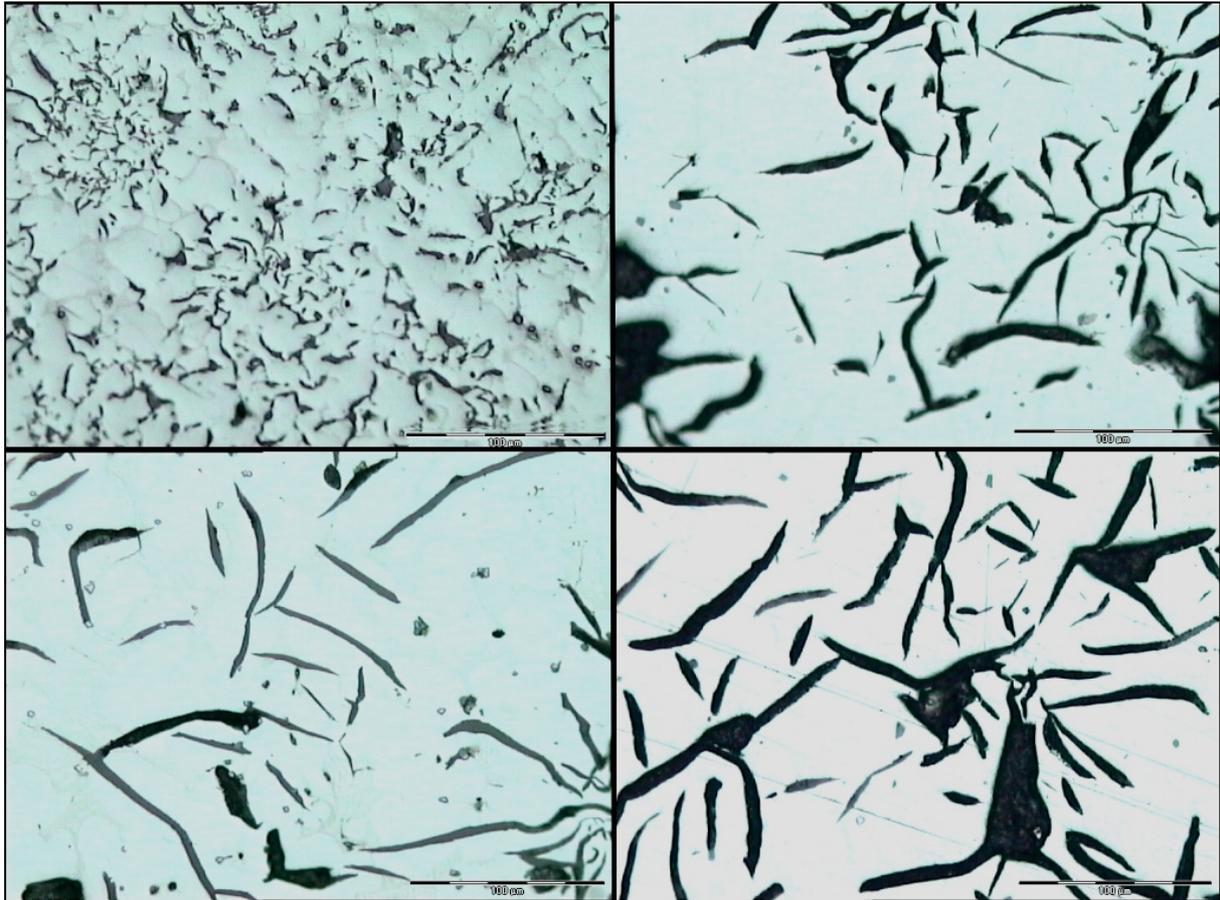


Abbildung 41: Metallographische Betrachtung verschiedener Graugussproben, links oben: Schleuderguss; Rest: Sandguss; ungeätzt, 200X

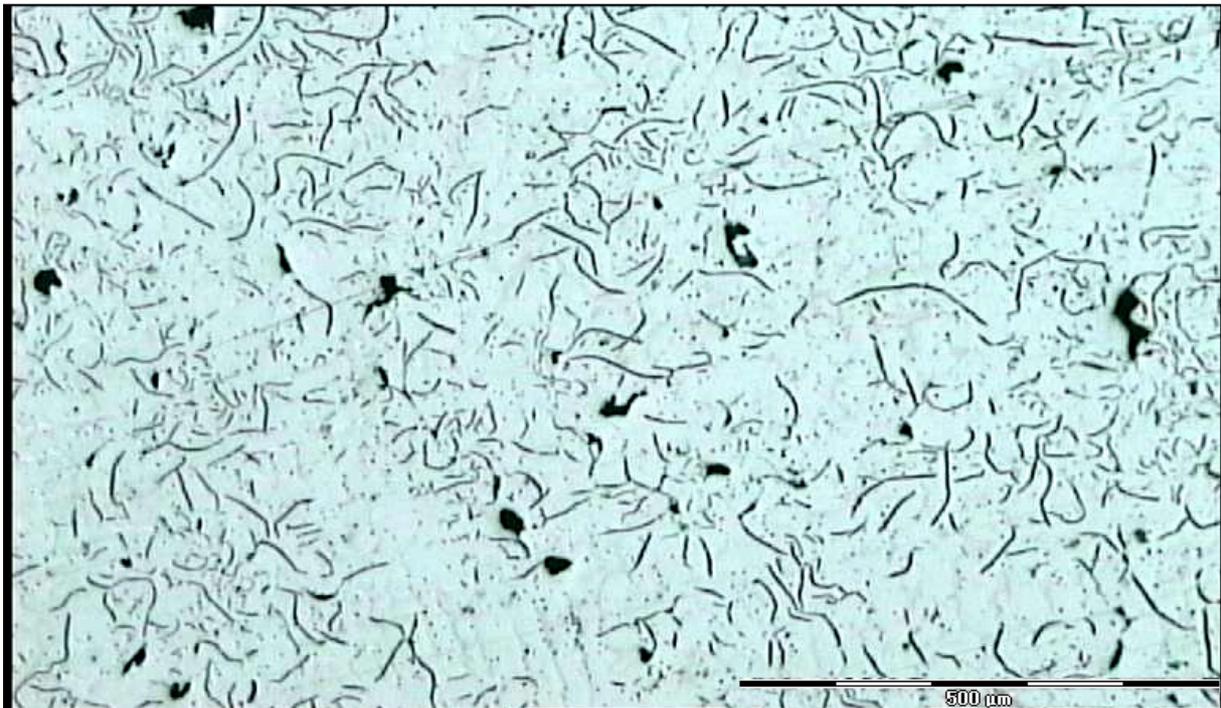


Abbildung 42: dichte Graphitlamellenstruktur an einem geschleuderten Graugussrohr, ungeätzt, 50X

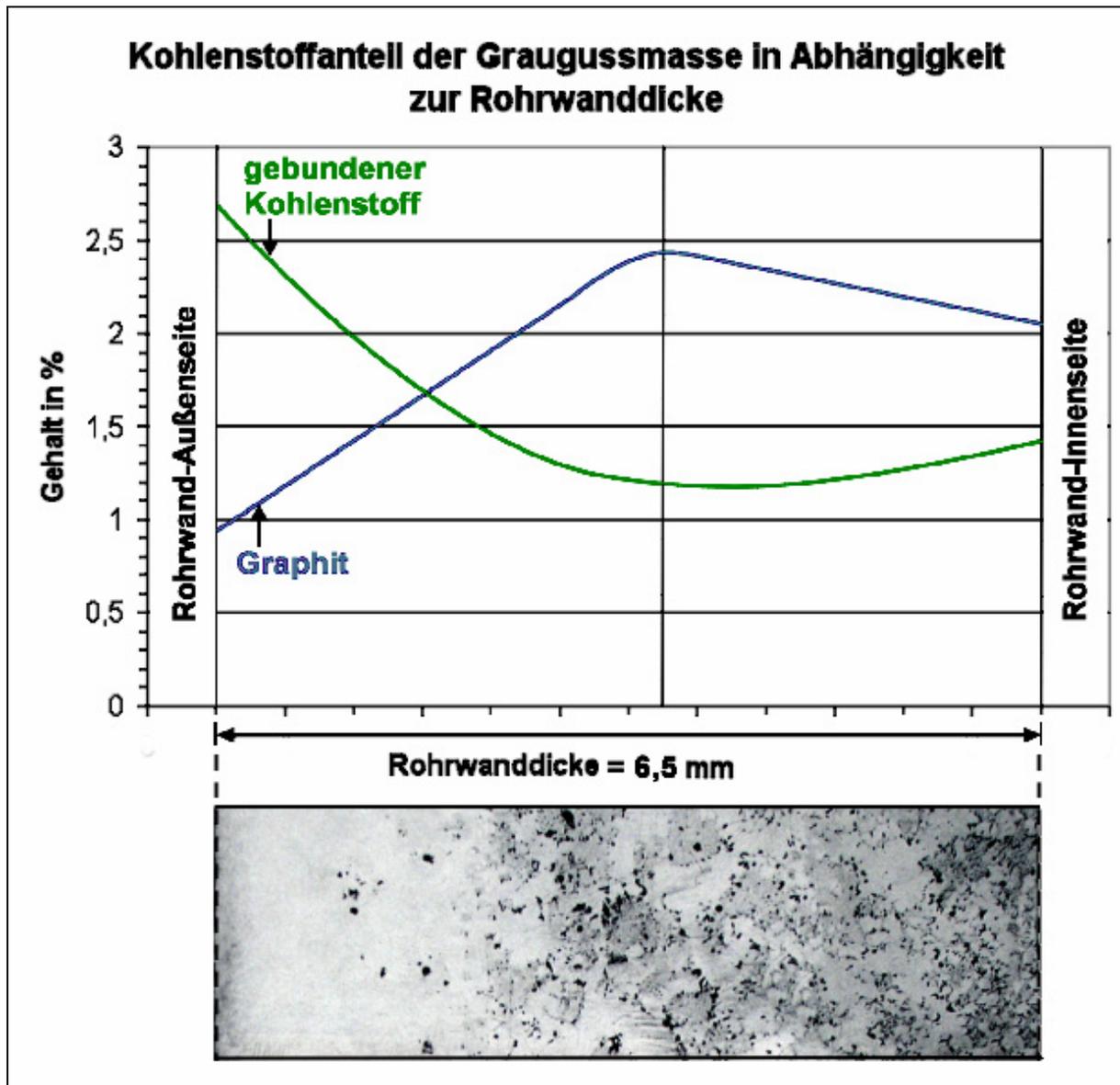


Abbildung 43: Verteilung des Kohlenstoffs im **ungeglühten** geschleuderten Grauguss über den Rohrwandquerschnitt; durch die schnelle Abkühlung an der relativ kalten Kokillenwand beim Schleudern bleibt der Kohlenstoff in der Metallmasse gebunden und fällt nicht in Form von Graphitlamellen aus; metallographische Aufnahme eines ungeglühten geschleuderten Graugussrohrs; ungeätzt, 110X [84];

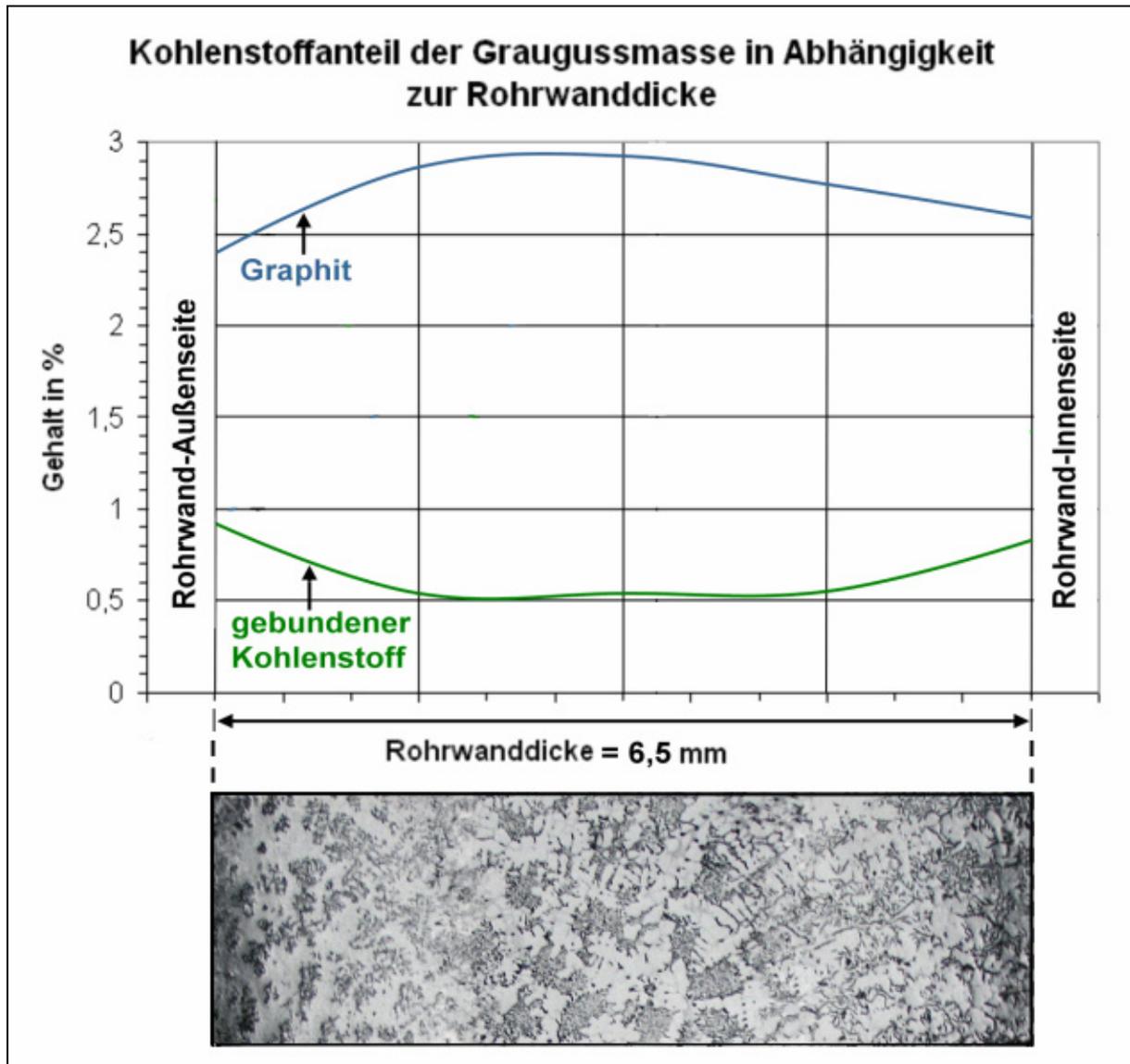


Abbildung 44: Verteilung des Kohlenstoffs im **geglühten** geschleuderten Grauguss über den Rohrwandquerschnitt; durch das nachträgliche Glühen fällt der gebundene Kohlenstoff schließlich in Form von Graphitlamellen aus; metallographische Aufnahme eines geglühten geschleuderten Graugussrohrs; ungeätzt, 110X [84];

4.7.2 Metallographie der Duktillusrohre

Chemische Zusammensetzung und Legierungsbestandteile [79]:

Kohlenstoffgehalt:	3,7 – 4,0 %
Siliziumgehalt:	2,4 – 2,8 %
Legierungszusatz: Magnesium:	0,03-0,07%

Der geringe Anteil an Magnesium führt zur kugelförmigen Ausbildung des Graphits. Der Graphit ist dadurch zusätzlich relativ homogen in der Grundmasse verteilt. Es kommt zu keinen Spannungsspitzen (Kerbwirkung) wie an den Enden der Graphitlamellen. Der Werkstoff besitzt deswegen im Vergleich zu Grauguss mit Lamellengraphit elastische Eigenschaften (duktil = dehnbar).

Der Kugelgraphit in der Metallmasse liegt in Form einzelner nicht verbundener Punkte dar während die Graphitlamellen beim Grauguss eine Art gleichmäßig verteilte Netzstruktur bilden (untereinander verbunden) [114].

Laut Kottmann halten die kugelförmig verteilten Graphitteilchen die Korrosionselemente bzw. Korrosionsprodukte schlechter zusammen als bei Grauguss mit Lamellengraphit (Zugfestigkeit Graphit: 20 N/mm²). Dies trägt zusätzlich zu einem korrosionsempfindlicheren Verhalten von Duktillus gegenüber Grauguss mit Lamellengraphit bei (vgl. mit Abschnitt 4.7.1) [108].

Wie bei Grauguss mit Lamellengraphit tritt auch an Duktillus Graphitierung auf. Die Festigkeit und Kompaktheit bzw. Durchlässigkeit der Graphitierung wird durch die Anlagerung anderer unlöslicher Bestandteile der Metallmasse wie Carbide, Silikat-Komponenten bzw. Phosphit-Eutektikum-Streifen oder unlöslicher Korrosionsprodukte beeinflusst, welche durch die graphitierte Schicht mit Korrosionsprodukten herangetragen werden. Die graphitierte Schicht mit ihren vermischten unlöslichen Korrosionsprodukten usw. kann undurchlässig werden für korrosive Flüssigkeiten und bildet so einen Schutz vor weiterer Korrosion (wachsender Widerstand hemmt die Bildung korrosionsfördernder Potenzialdifferenzen) [108; 114; 117]. Unter diesen Umständen ist Gusseisen korrosionsbeständiger als Stahl, denn Stahl besitzt nicht die Eigenschaft, sich selbst mit einer eigenen Schicht aus Korrosionsprodukten zu schützen. Weiterhin ist Gusseisen im Vergleich zu Stahl im Allgemeinen korrosionsbeständiger, da Gusseisen aus einer großen Zahl kleiner Elemente besteht. Das Eisen bildet eine große Anode und das Graphit unendlich viele Kathoden (nicht miteinander verbunden). Diese Mikroelemente verhindern die Entstehung von Makroelementen und somit großer Korrosionsraten [108].

Andererseits können die Reste einer graphitierten Schicht durchlässig werden für korrosionsverursachende Elektrolyte. Die Korrosion der darunter liegenden Eisenschicht wird dann nicht nur wieder fortgesetzt sondern durch den galvanischen Effekt sogar beschleunigt. Das heißt, dass die Graphitierung wie eine große Kathode funktioniert (Zusammenschluss mit anderen kathodischen Bereichen an der Eisenschicht). Wo dieser Effekt auftritt, kann Grauguss schneller als Stahl korrodieren [114].

Duktillusrohre für Trinkwasserleitungen wurden bis auf Formteile ausschließlich in Schleudergießmaschinen hergestellt. Dementsprechend ist der Einfluss des Herstellungsverfahrens und der Wärmebehandlung analog den geschleuderten Graugussrohren.

Da jedoch im Gegensatz zu geschleuderten Graugussrohren im Metallschliff keine Unterschiede der Graphitstruktur und somit Rückschlüsse auf Herstellungsverfahren und Wärmebehandlung zu machen sind, dient die metallographische Betrachtung von Proben aus Duktillgussrohren lediglich der eindeutigen Werkstoffbestimmung (Abbildung 45; Abbildung 46).

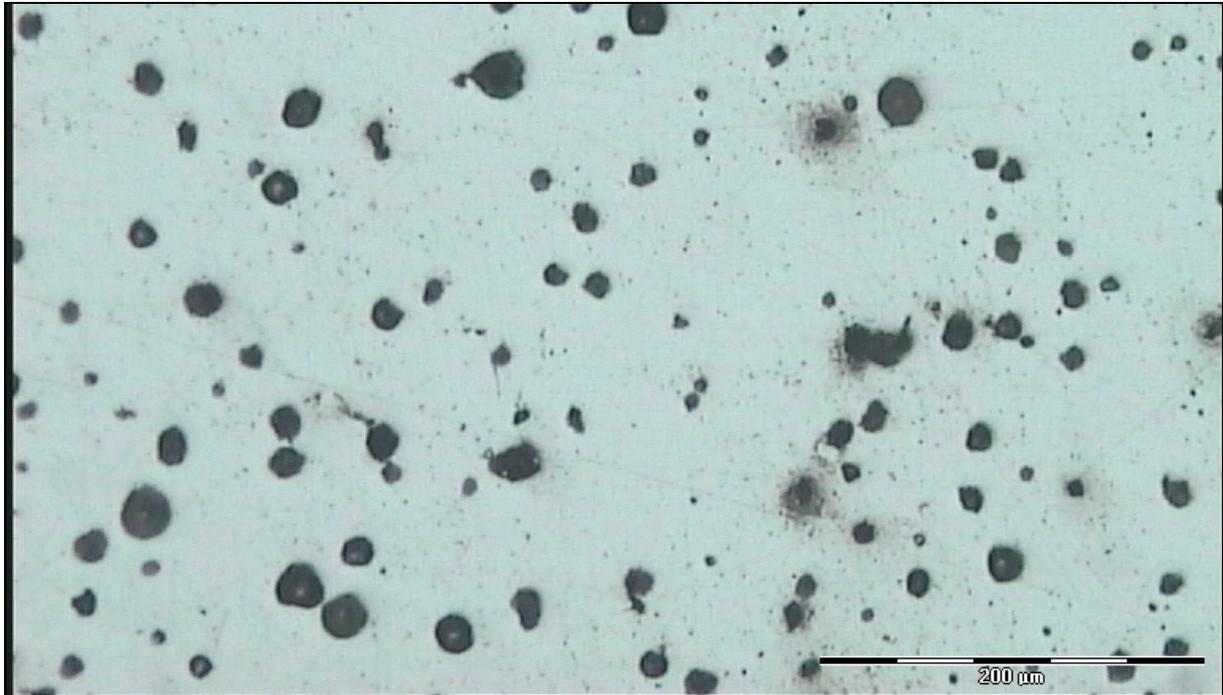


Abbildung 45: Metallographische Aufnahme Duktillguss (Grauguss mit Kugelgraphit), ungeätzt, ca. 100X

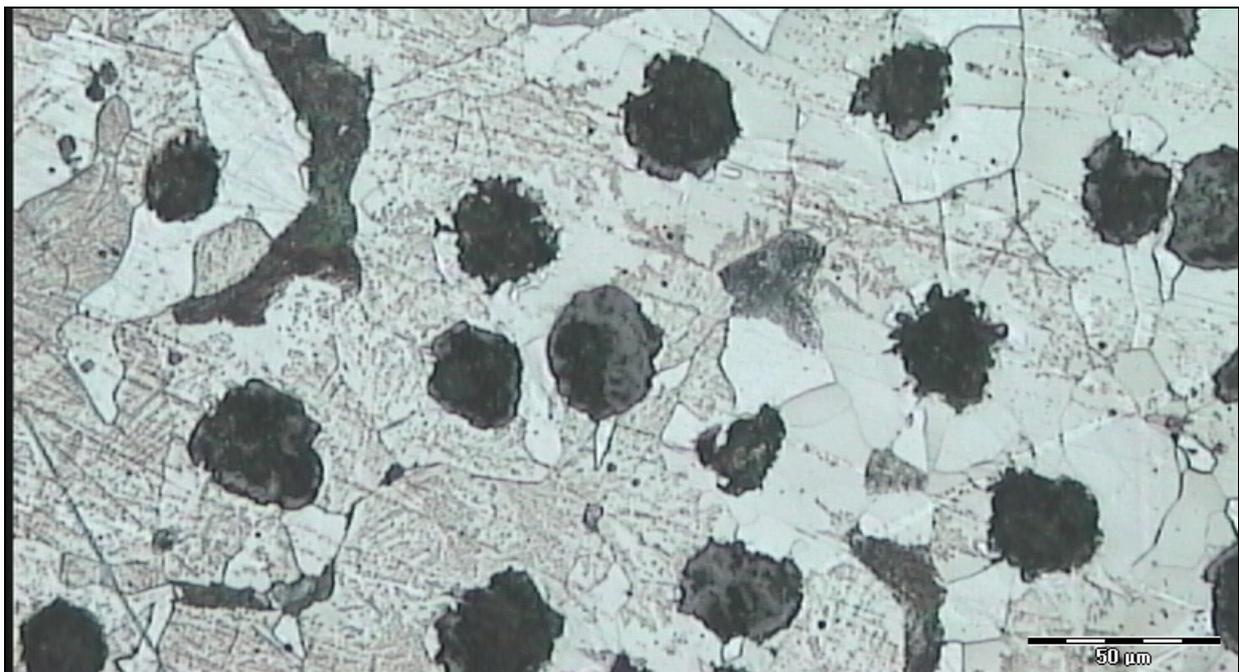


Abbildung 46: Metallographische Aufnahme Duktillguss, geätzt mit HNO_3 , ca. 200X

4.7.3 Metallographie der Stahlrohre

Stahl ist ähnlich dem Gusseisen eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung mit maximal 2 % Kohlenstoffanteil. Der Anteil an Kohlenstoff hat wesentliche Auswirkungen auf materialspezifische Eigenschaften des Stahls. Stähle für Trinkwasserleitungen enthalten laut DIN EN 10020 bzw. DIN EN 10224 maximal 0,16 – 0,22 % Kohlenstoff (je nach Stahlgüte) [118; 119].

Störelemente in der Stahlschmelze können mit speziellen Ätzmitteln durch metallographische Betrachtungen nachgewiesen werden. Jedoch sind die Fertigungsstufen und die Wärmebehandlung bei der Stahlrohrherstellung von größerem Einfluss auf materialspezifische Eigenschaften und auf die Korrosionswahrscheinlichkeit.

Nahtlose Stahlrohre werden im so genannten Warmverfahren (gewalzt) hergestellt und müssen dementsprechend nicht nachgeglüht werden.

Geschweißte Stahlrohre müssen spannungsfrei geblüht werden, wenn sie nicht im Warmverfahren hergestellt wurden [111].

Bei der Herstellung von Stahlerzeugnissen kommen verschiedene Wärmebehandlungsmethoden zur Anwendung (Tabelle 4.5).

Tabelle 4.5: Wärmebehandlungsmethoden [120]

Normalglühen / Normalisieren	
-	Änderung in eine einheitliche Gefügestruktur
-	grobes oder uneinheitliches Gefüge wird beseitigt bzw. umgewandelt
-	Erhöhung der Zähigkeit, mitunter der Festigkeit
-	nach dem Normalisieren liegt ein feinkörniges ferritisch-perlitisches Gefüge vor (Abbildung 47)
Rekristallisationsglühen	
-	wird bei kalt verformten Werkstücken angewendet
-	dabei auftretende Verfestigungen im Werkstück werden damit beseitigt
Spannungsarm- bzw. Spannungsfreiglühen / Entspannen	
-	Spannungen, verursacht durch die starken, lokal begrenzten Temperaturunterschiede, welche bei Schweißen entstehen, werden beim Spannungsfreiglühen entfernt
-	Spannungsfreiglühen beseitigt nicht die Folgen der Kaltumformung wie erhöhte Festigkeit und verringerte Kerbschlagarbeit
-	keine Gefügewandlung

Bei einer zu schnellen Abkühlung der Rohre bei gewalzten, nahtlosen Stahlrohren (Temperatur, Dauer) kann sich zusätzlich im Stahl ein sekundäres Zeilengefüge ausbilden. Solch ein sekundäres Zeilengefüge kann bereits in der Eisenhütte bei der Fertigung der Halbzeuge entstehen, aber auch bei der Weiterverarbeitung in Röhrenfabriken (Abbildung 48). Die fehlerhafte Wärmebehandlung der Stahlrohre lässt sich jedoch nicht lokal auf einzelne Röhrenwerke begrenzen. Mittels nachträglicher Wärmebehandlung (Rekristallisationsglühen) zerfällt das sekundäre Zeilengefüge im Gegensatz zu Seigerungen ab einer bestimmten Temperatur wieder. So kann bei Rohrproben mit Zeilengefüge (Abbildung 48) überprüft werden, ob es sich um ein sekundäres Zeilengefüge (Korrosionskeime) oder Seigerungen (verschlechterte Materialeigenschaften) handelt (Abbildung 49; Abbildung 50).

Die statischen Eigenschaften werden bis auf die Härte und die Zähigkeit der Rohre (Kerbschlagfestigkeit) durch eine falsche Wärmebehandlung nicht beeinflusst. Allerdings wird die Korrosionsanfälligkeit stark erhöht, da sich zwischen den verschiedenwertigen Zeilen im Korngefüge (Ferrit und Perlit) eine große Potenzialdifferenz bildet und somit Keimstellen für Loch- und Narbenkorrosion gegeben sind [121].

Da Stahl im Vergleich zu Gusseisen eine annähernd homogene Masse ist, können sich leichter auch an der Oberfläche Potenzialdifferenzen ausbilden [97].

Das sekundäre Zeilengefüge ist mit Hilfe der so genannten Fry'schen Ätzung metallographisch nachweisbar und das Risiko einer erhöhten Korrosionsanfälligkeit lässt sich mit Hilfe einer Stromdichte-Potenzialsonde messen (Abschnitt 1.3.4). Mit Hilfe der Metallographie ist es meist möglich, an Hand der mikroskopischen Gefügestruktur eine nachträgliche Wärmebehandlung bzw. Fehler in der Gefüge- oder Kornstruktur zu erkennen (Abbildung 48 – Abbildung 50).

Eine Bestimmung einer Produktionsepoche ist nach bisherigen Erkenntnissen mit Hilfe der Metallographie nicht möglich, sondern nur die Beurteilung der Materialqualität bzw. Korrosionsanfälligkeit.

Übliches Ätzmittel, um Korngrenzen im Gefüge des Stahls sichtbar zu machen ist wie bei Gussrohren eine dreiprozentige alkoholische Salpetersäure (Nital; HNO_3). Mit Hilfe der so genannten Fry'schen Ätzung (5 g Kupferchlorid, 40 cm³ Salzsäure, 30 cm³ Wasser, 25 cm³ Äthylalkohol) können Seigerungen und sekundäre Zeilengefüge im Stahl sichtbar gemacht werden.

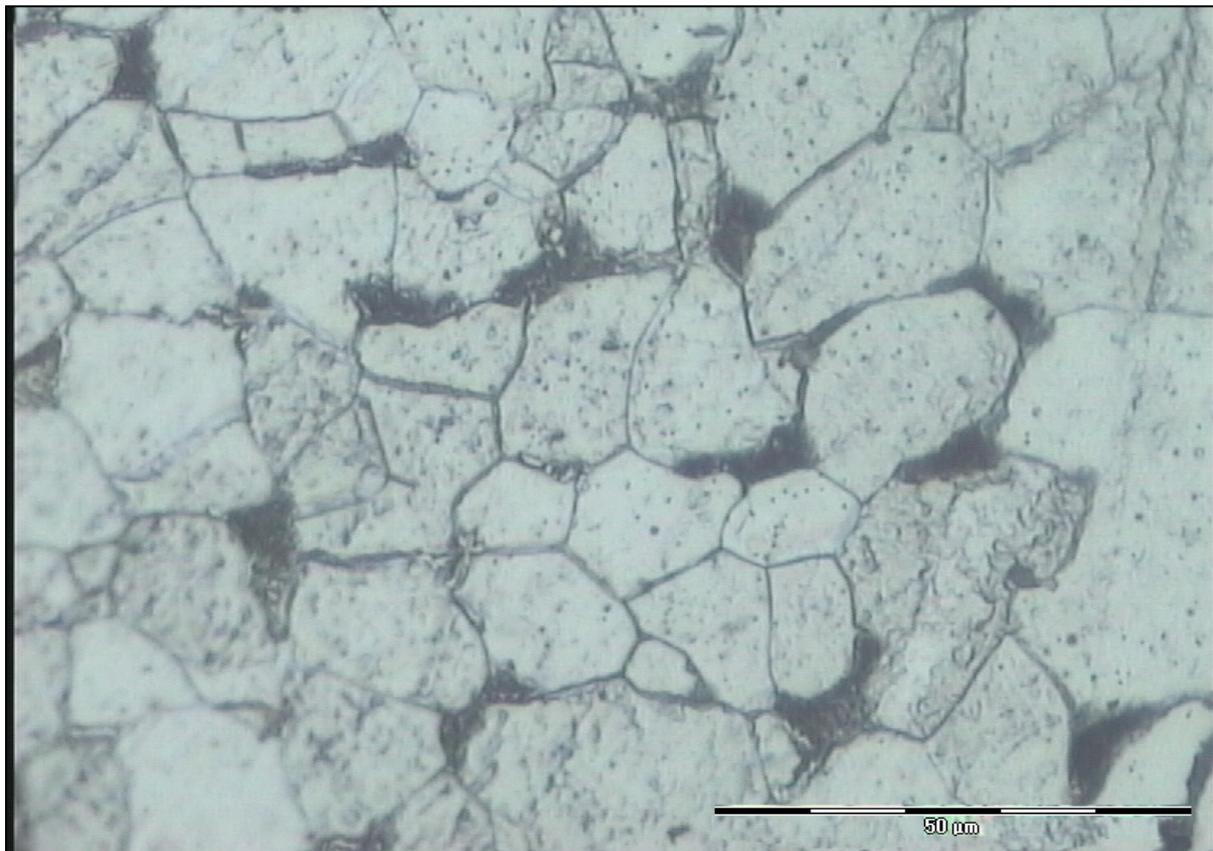


Abbildung 47: Metallographische Aufnahme eines Stahlrohrs, normales Perlit-Ferrit-Korngefüge, geätzt mit HNO_3 ; 500X

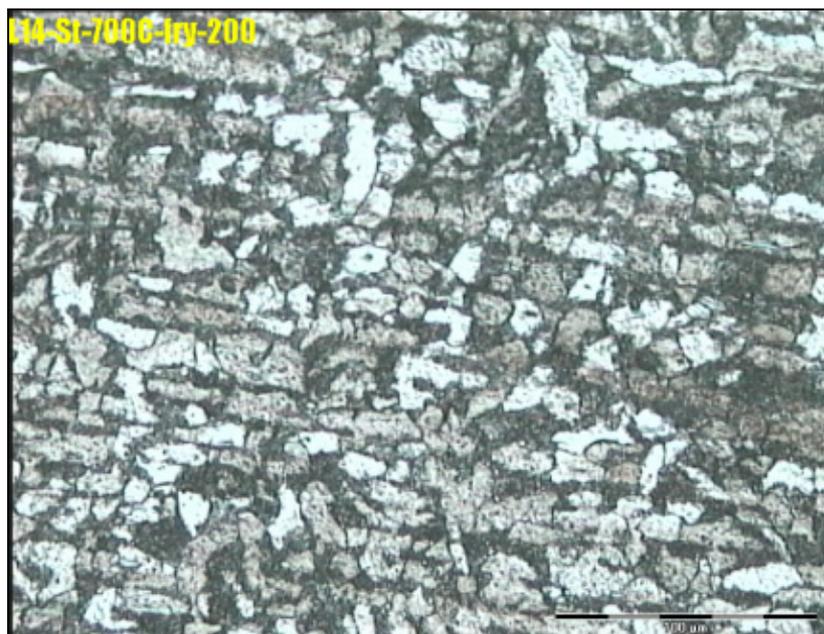


Abbildung 48:
Stahlrohr mit sekundärem
Zeilengefüge,
beim Kaltumformen
(Walzen) entstanden,
geätzt mit Fry'scher
Ätzung,
ca. 200X



Abbildung 49:
Stahlrohr mit sekundärem
Zeilengefüge,
nachträglich
wärmebehandelt bei 800°C,
geätzt mit Fry'scher
Ätzung,
ca. 200X

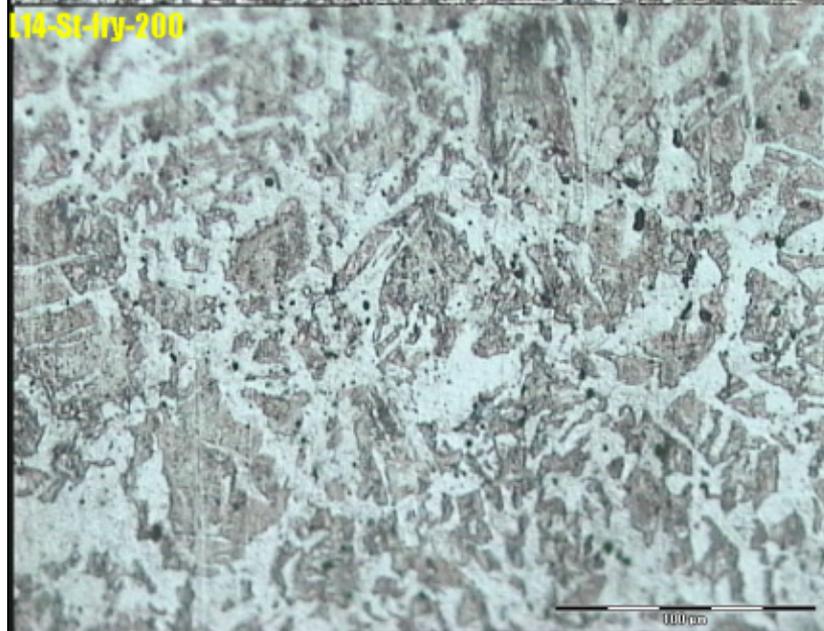


Abbildung 50:
Stahlrohr mit sekundärem
Zeilengefüge,
nachträglich
wärmebehandelt bei 900°C,
geätzt mit Fry'scher
Ätzung,
ca. 200X

4.8 Werkstoffeigenschaften metallischer Trinkwasserleitungen

Um die Festigkeitseigenschaften bzw. Werkstoffeigenschaften der Rohrwerkstoffgruppen für statische Berechnungen klassifizieren zu können, müssen folgende Daten an entsprechenden Rohrproben ermittelt und mit den in den Regelwerken geforderten Werten verglichen werden [122]:

- Zugfestigkeit
- E-Modul
- Härte
- Streckgrenze und Bruchdehnung

4.8.1 Übersicht relevanter Regelwerke

Eine Ermittlung der Zugfestigkeit und des E-Moduls erfolgt an Flach- oder Rundproben des jeweiligen Rohrwerkstoffs, wobei Flachproben bei Gussrohren zu bevorzugen sind. Grund ist der Einfluss der Eigenfestigkeit der Glüh- bzw. Gusshaut, welche bei abgedrehten Rundproben fehlen würden [108]. Die jeweiligen Vorschriften zur Ermittlung der oben genannten Werte für Grauguss-, Duktiguss- und Stahlrohre sind in Tabelle 4.6 aufgelistet. In Kapitel 7 wird näher auf die Probenanfertigung im Rahmen der Arbeit eingegangen.

Die Härte (Brinellhärte) wird ebenfalls an entsprechenden Probekörpern ermittelt. Mit Hilfe der Brinellhärte von Graugussrohren kann auf deren mögliche Legierungsbestandteile bzw. Wärmehandlung geschlossen werden (hoher Phosphoranteil oder Herstellung im De-Lavaud-Verfahren ohne Nachglühen = höhere Härte).

Über empirisch ermittelte Zusammenhänge ist eine Umrechnung der Werte von Brinellhärte in Werte der Zugfestigkeit möglich. Entsprechende Hinweise sind in DIN EN ISO 18625 enthalten [63]. Die Anwendbarkeit von DIN EN 1561 bzw. DIN EN 1563 ist für Gussrohre für Wasser- und Abwasserleitungen nach DIN EN 545 bzw. DIN EN 877 allerdings nicht gestattet [28; 29; 62; 123]. In Abschnitt 9.4 wird ein Vergleich von ermittelten Werten zur Zugfestigkeit und Brinellhärte an Rohrproben dargestellt.

Von geringerem Einfluss auf die Berechnung der Resttragfähigkeit sind Werte zur Bruchdehnung. Diese können aus vorgegebenen Werten aus DIN EN 545; DIN EN 10224 bzw. DIN EN 877 übernommen werden.

Da Grauguss-Druckrohre für die Trinkwasserversorgung nicht mehr hergestellt und verlegt werden, wurde die entsprechende Norm DIN 28500 zurückgezogen [27]. Werkstoffkennwerte für Entwässerungsleitungen aus Grauguss mit Lamellengraphit (auch als Druckleitung) sowie deren Ermittlung werden in DIN EN 877 genannt und für weitere Betrachtungen im Rahmen der Arbeit verwendet. Die Gegenüberstellung der Werkstoffeigenschaften soll den Vergleich unter den werkstoffspezifischen Werten in chronologischer Reihenfolge ermöglichen. Veraltete Angaben zu Einheiten wurden gemäß DIN 1301 umgerechnet [128].

Bei rohrstatischen Berechnungen wird der sog. Rechenwert der Biegezugspannung verwendet und ist mit der Zugfestigkeit gleichzusetzen (siehe Fußnoten zu Tabelle 3 in ATV A 127 [11]).

Tabelle 4.6: Übersicht zu Vorschriften für Lieferbedingungen und Werkstoffeigenschaften für metallische Druckrohre für die Trinkwasserversorgung [29; 63; 119; 123; 124; 125]

Werkstoff	Normung	Ermittlung und Werte der Zugfestigkeit	Ermittlung und Werte der Brinellhärte
Grauguss	DIN 28500 (zurückgezogen)		DIN EN ISO 6506 (Versuch)
	DIN 877 (nur für Entwässerung)	DIN 877 (Versuch und Werte)	DIN 877 (Werte)
Duktilguss	DIN EN 545	DIN EN 10002 (Versuch)	DIN EN ISO 6506 (Versuch)
		DIN EN 545 (Werte)	DIN EN 545 (Werte)
Stahl	DIN 2460 (Verbindungssysteme; Korrosionsschutz)	DIN EN 10002 (Versuch)	DIN EN ISO 6506 (Versuch)
	DIN EN 10224 (Herstellverfahren, Werkstoffeigenschaften)	DIN EN 10224 (Werte)	DIN EN ISO 18265 (Werte; nicht in DIN EN 10224 gefordert)

4.8.2 Werkstoffeigenschaften von Graugussrohren

In Tabelle 4.7 sind die für rohrstatische Berechnungen von Graugussrohren notwendigen werkstoffspezifischen Kennwerte chronologisch geordnet aufgelistet.

Weiterhin relevante Kennwerte sind:

- die Wichte mit $71,5 \text{ kN/m}^3$ [11]
- das Arbeitsvermögen mit 50 N \% / mm^2 quer zur Rohrachse und $0,6 \text{ Nm}$ längs zur Rohrachse (siehe Abschnitt 4.8.5) [108]
- die Biegebruchspannung quer zur Rohrachse mit 350 N/mm^2 für geschleuderte Graugussrohre bzw. 300 N/mm^2 für in Sand gegossene Rohre [84; 108]
- die Brinellhärte mit $\text{HB } 30/5 = 2100 \text{ N/mm}^2$ bzw. $\text{HB } 260$ (Einheit unbekannt) [98; 123; 129]

Tabelle 4.7: Gesammelte Werkstoffeigenschaften von Druckrohren aus Grauguss mit Lamellengraphit

Jahr	Quelle	Zug- festigkeit	Druck- festigkeit	E-Modul	Bruch- dehnung	Bemerkung
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	
1900	[79]	120	k. A.	k. A.	< 1	Sandguss
1925	[84]	162	k. A.	104.000	k. A.	Sandguss
1926	[57]	24,5	k. A.	k. A.	k. A.	DIN 2411*
1927	[80]	157	k. A.	k. A.	k. A.	Sandguss
		295				Schleuderguss
1928	[84]	170	k. A.	81.100	k. A.	Sandguss
		283		124.000		Schleuderguss
1935	[79]	200	k. A.	k. A.	< 1	
1971	[98]	177	~ 700	~ 117.000	< 1	Sandguss
		196	~ 780			Schleuderguss
		186	~ 740			DIN 28500
1977	[129; 130]	150	~ 600	~ 90.500	k. A.	GG-15 [131]
1986	[132; 133]	150	~ 700	~ 92.500	k. A.	GG-15 [131]
1986	[108]	150	600	90.000	0,3	GG-15
		220	900	110.000	0,4	für Rohre
2000	[11]	300	k. A.	100.000	k. A.	Ringbiegezug

4.8.3 Werkstoffeigenschaften von Duktillgussrohren

In Tabelle 4.8 sind die für rohrstatische Berechnungen von Duktillgussrohren notwendigen werkstoffspezifischen Kennwerte chronologisch geordnet aufgelistet.

Weiterhin relevante Kennwerte sind:

- die Wichte mit $70,5 \text{ kN/m}^3$ [11]
- das Arbeitsvermögen mit 1500 N \% / mm^2 quer zur Rohrachse und 10 Nm längs zur Rohrachse (siehe Abschnitt 4.8.5) [108]
- die Brinellhärte $\text{HB } 30 = 2500 \text{ N/mm}^2$ bei geschleuderten Duktillgussrohren und $\text{HB } 30 = 2300 \text{ N/mm}^2$ bei in Sand gegossenen Duktillgussrohren bzw. $\text{HB } 5/750 = 2000 \text{ N/mm}^2$ für Duktillgussrohre nach TGL 8189/01 [29; 98; 134; 135]

Duktillgussrohre wurden in der DDR ab ca. 1980 gefertigt. Zum Vergleich der Werkstoffeigenschaften zwischen den in RGW-Staaten gefertigten Duktillgussrohren gab es festgelegte Bezeichnungen [134]:

TGL-Bezeichnung nach ST RGW 4558-84 (Bezeichnung in anderen RGW-Staaten)

- | | |
|------------|---|
| - GGG 5005 | - keine |
| - GGG 5007 | - 33150 (für Duktillgussrohre häufig verwendet) |
| - GGG 5010 | - keine |

Tabelle 4.8: Gesammelte Werkstoffeigenschaften von Druckrohren aus Grauguss mit Kugelgraphit

Jahr	Quelle	Zug-	Druck-	E-Modul	Bruch-	Bemerkung
		festigkeit	festigkeit		dehnung	
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	
1971	[171]	390 (294)	k. A.	k. A.	10	geschleudert
					5	Sandguss
1986	[134; 135]	500 (320)	k. A.	~ 165.000	7	Sandguss
2002	[29]	420 (300)	550	170.000	> 10	

Die Werte in Klammern geben die Streckgrenze an

Der geforderte Wert der Bruchdehnung für Duktillgussrohre am abgedrehten Probestab beträgt ca. 10 %. Dieser Wert kann in einem breiten Streufeld liegen und ist abhängig von der Probenentnahme (Flachprobe / Rundprobe) und der ferritischen / perlitischen Ausbildung [108].

4.8.4 Werkstoffeigenschaften von Stahlrohren

In Tabelle 4.9 sind die für rohrstatische Berechnungen von Stahlrohren notwendigen werkstoffspezifischen Kennwerte chronologisch geordnet aufgelistet.

Weiterhin relevante Kennwerte sind:

- die Wichte mit $77,0 \text{ kN/m}^3$ [11]
- das Arbeitsvermögen mit $10000 \text{ N \% / mm}^2$ quer zur Rohrachse und $7,5 \text{ Nm}$ (nahtlos) längs zur Rohrachse bzw. $5,5 \text{ Nm}$ (geschweißt) längs zur Rohrachse (siehe Abschnitt 4.8.5) [108]
- Kennwerte für die Brinellhärte werden in DIN EN 10224 für Trinkwasserleitungen aus Stahl nicht erwähnt bzw. gefordert [119]
- üblicher Werkstoff für Stahlrohre nach TGL 9413 ist die Stahlsorte St 35 [136]

Tabelle 4.9: Gesammelte Werkstoffeigenschaften von geschweißten und nahtlosen Stahlrohren

Jahr	Quelle	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit	E-Modul	Bruchdehnung	Bemerkung
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	
1947	[153]	160	k. A.	200.000	k. A.	Handelsbaustahl
1964	[136]	333 (235) 440 (255)	k. A.	k. A.	25 21	St 35, nahtlos St 45, nahtlos
1964	[138]	314			25	St 33, nahtlos
1971	[98]	343 (>235) 442 (>255) 362 (>235) 382 (>313)	k. A.	~201.000	>25 >21 >23 >20	St 35, nahtlos St 45, nahtlos St 37, geschw. St 42, geschw.
1997	[108]	400 (285)	400	210.000	~30	k. A.
2003	[119]	360 (235) 430 (275) 500 (355)	k. A.	210.000	23 19	L235 L275 L355

Die Werte in Klammern geben die Streckgrenze an

Die technische Streckgrenze (auch Elastizitätsgrenze) wird bei 0,01 % bleibender Dehnung ($R_{p0,01}$) und 0,2 % bleibender Dehnung ($R_{p0,2}$) gemessen.

4.8.5 Ermittlung von Sicherheitsbeiwerten bezüglich statischer Berechnungen

Da sich die metallischen Rohrwerkstoffe Grauguss (spröde) und Duktulguss bzw. Stahl (elastisch) in ihren mechanischen Eigenschaften stark unterscheiden, führen jeweils andere Belastungszustände zum Versagen (Bruch, Perforierung, Riss) des Rohres. Zusätzlich beeinflusst die Nennweite der Rohre ihr Tragverhalten (siehe Kapitel 9 und Kapitel 13). Bei kleiner Nennweite herrschen vorwiegend Biegemomente in Längsrichtung und bei größerer Nennweite Biegemomente in Querrichtung vor [108].

Übliches Verfahren zu statischen Tragfähigkeitsberechnungen ist das Prinzip der Superposition. Eine Gesamtlast wird aus allen plausiblen und ungünstig wirkenden Lasten ermittelt und der Belastbarkeit des Rohres entgegengesetzt. Zu der Gesamtlast wird eine Sicherheitsreserve (Sicherheitsmarge) addiert. Gesamtlast und Sicherheitsreserve dürfen den Wert der Belastbarkeit nicht überschreiten (Abbildung 51) [11; 79].

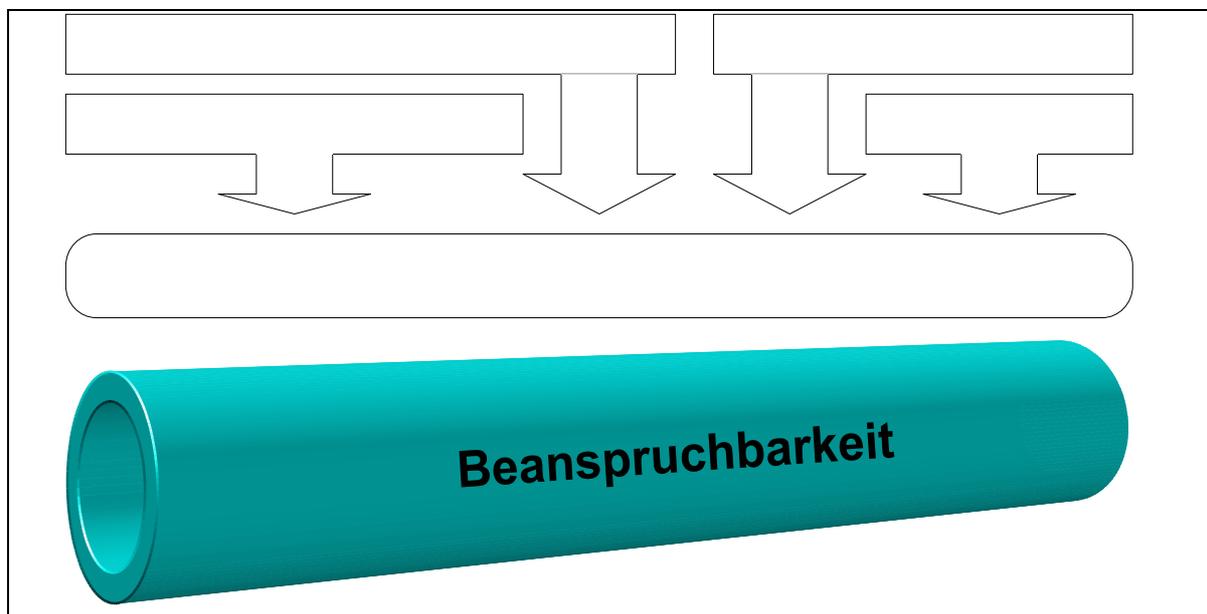


Abbildung 51: Prinzip der Superposition bei der Bewertung von Belastungen bzw. Belastbarkeit von erdverlegten Rohrleitungen

In ATV A 127 werden Sicherheitsbeiwerte γ gegen Versagen der Tragfähigkeit für Stahl- und Gusseisenrohre genannt [11]. Dabei handelt es sich um Sicherheitsbeiwerte für die statische Berechnung von erdverlegten Entwässerungsleitungen. Eine Übertragung auf die statische Berechnung von Trinkwasserleitungen ist möglich, da unter Annahme von Innendruck gleiche Belastungszustände vorherrschen. Bezüglich der Bewertung des Risikos zur Versorgungssicherheit gibt es Unterschiede, die über modifizierte Sicherheitsbeiwerte erfasst werden.

Die Sicherheitsbeiwerte nach ATV A 127 sind auf Grundlage der probabilistischen Zuverlässigkeitstheorie entwickelt. Sie basieren auf der Häufigkeitsverteilung (Normalverteilung) von Einwirkungen (Belastung) und Bauteilwiderstand (Beanspruchbarkeit), bei denen in bestimmten Grenzflächen das Risiko des Versagens gering ist und somit eine ausreichende Sicherheit gegeben ist (Abbildung 52) [11].

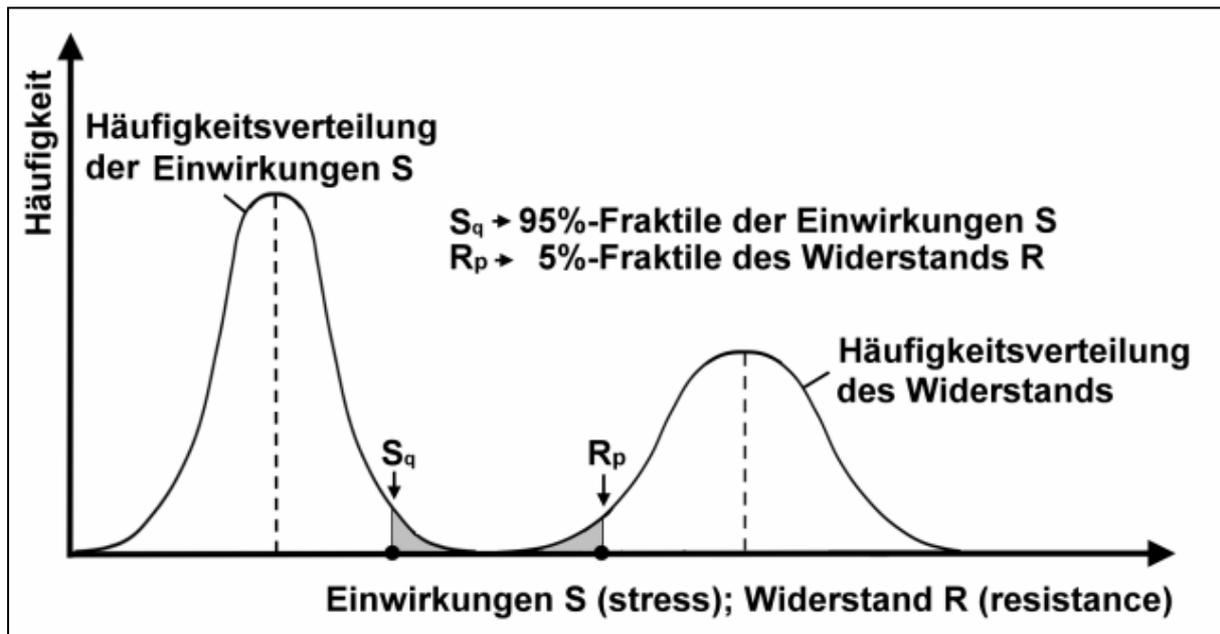


Abbildung 52: Festlegung des Bereichs der Sicherheitswerte aus der Risikoverteilung des Versagens des Rohres (Bauteils)

Die Nennsicherheit ist durch $\gamma = \frac{R_p}{S_q}$ definiert.

Tabelle 4.10: Gegenüberstellung geforderter Sicherheitsbeiwerte γ

Rohrwerkstoff	Quelle	Regelfall	Sonderfall	Bemerkung
Grauguss	[11]	1,5	1,3	Versagen bei Bruch
Duktilguss				
Stahl				
Duktilguss		2,5	2,0	Versagen durch Instabilität
Stahl				
Steinzeug	2,2	1,8	Versagen bei Bruch	
Grauguss	[98]	6	25	nur gegen Versagen durch Innendruck
Duktilguss		2,5	k. A.	
Stahl			1,6	
Stahl	[141]	1,5	k. A.	nur gegen Versagen durch Innendruck

Zum Vergleich ist in Tabelle 4.10 der Sicherheitsbeiwert für Steinzeug angegeben. Dieser Sicherheitsbeiwert gilt nach ATV A 127 neben Steinzeug auch für spröde Rohrwerkstoffe wie Asbestzement und Beton. Da es sich bei Grauguss mit Lamellengraphit ebenfalls um einen Rohrwerkstoff mit spröden Bruchverhalten handelt, soll dieser Sicherheitsbeiwert hier angewendet werden. Das in Tabelle 4.10 zitierte Regelwerk DIN 2413 erschien im Jahr 1954 und soll zeigen, mit welchen Sicherheitsbeiwerten die Tragfähigkeit von Stahlrohren bei Innendruck zu dieser Zeit berechnet wurde. Im Nachfolgedokument DIN EN 13480-3 sind ungeänderte Sicherheitsbeiwerte enthalten [141; 142].

4.9 Schadensbeurteilung zur Charakterisierung erdverlegter metallischer Trinkwasserleitungen

Laut Definition in DVGW-Hinweis W 401 ist ein Schaden an einer Trinkwasserleitung „eine lokale unzulässige Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit...“ und ist „...in aller Regel mit Wasseraustritt verbunden“ [9]. Schäden an Trinkwasserleitungen sind die Auswirkung eines allgemein verschlechterten technischen Zustands bzw. einer übermäßigen Überschreitung der Belastbarkeit der Rohrleitung durch die in Abbildung 2 gezeigten Einflussfaktoren.

Dementsprechend ist durch die Beurteilung von Art und Umfang des Schadens ein Rückschluss auf Schadensursache und Rohrleitungszustand möglich.

4.9.1 Schadensarten und Schadensursachen

Für eine Schadensbeurteilung oder auch Schadensanalyse wird im Rahmen der Arbeit eine Definition bzw. Unterteilung in sog. echte und unechte Schäden bzw. Schadensereignisse vorgenommen. Dass heißt, wenn Schäden an Trinkwasserleitungen primär durch Überschreitung der Belastbarkeit des ungeschwächten Rohres (zum Beispiel Biegezugkräfte) entstehen, so sind diese Schäden als unechte Schäden einzustufen. Es liegt keine alterungs- oder verschleißbedingte Querschnittsschwächung des Rohres vor. Die Anzahl unechter Schäden gibt deshalb keine Auskunft über den technischen Rohrzustand.

Ist vordergründig ein geschwächter Rohrquerschnitt (z.B. durch Korrosion) und eine Unterschreitung der in den entsprechenden Regelwerken geforderten Mindestfestigkeiten (z.B. Zugfestigkeit) Ursache für einen Schaden, so handelt es sich um einen echten Schaden bzw. echtes Schadensereignis. Über die Erfassung der Schwächung des Rohrquerschnitts und Werkstoffeigenschaften sind eine Beurteilung des technischen Zustands und damit die Abschätzung der technischen Restnutzungsdauer möglich.

Deswegen sind für eine Beurteilung des technischen Materialzustands echte Schäden bzw. Schadensereignisse am Rohrstück und dem Rohrverbindingssystem zu berücksichtigen.

Weitere Elemente eines Versorgungsnetzes wie Anbohrerlemente, Hydranten und Absperrschieber lassen keine Beurteilung des Zustands der Rohrleitung zu und werden deswegen in einer Materialuntersuchung nicht berücksichtigt.

Ursachen für die Überschreitung zulässiger Belastungen am ungeschwächten Querschnitt (unechte Schadensereignisse) sind:

- fehlerhafter Bettung mit örtlicher Spannungskonzentration durch punktförmige Belastung (Abbildung 53); aufgrund der Nichtbeachtung der jeweils gültigen Regelwerke zum Rohrleitungsbau verursacht (z. B. Bettungsfehler)
- sehr starke Verkehrsbelastung (Anstieg des Schwerlastverkehrs, Umleitung bei Baumaßnahmen)
- Bodenbewegungen (Hangrutsch, Bergsenkungsgebiete, benachbarte Baumaßnahmen)
- Fremdeinwirkungen (Beschädigungen bei Baumaßnahmen) und
- Druckstöße (Betriebsfehler).

Ursachen für eine Querschnittsschwächung bzw. Materialschwächung (Rohrverbindung) und dadurch Ursache für die Überschreitung der Belastbarkeit am geschwächten Querschnitt (echte Schadensereignisse) sind:

- Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffes (wird wiederum durch Werkstoffgüte und Herstellungsverfahren bedingt)
- aktiver und passiver Korrosionsschutz der Rohrleitung (außen sowie innen)
- Verlegebedingungen (hier: aggressive Bodenarten) (siehe Kapitel 12)
- Herstellungsfehler und
- Zersetzungsbeständigkeit des Dichtungsmaterials (Hanfstrick, Bleiwolle, Dichtungsgummi usw.).

Schadensarten, die eine Zustandsbewertung zulassen, wenn Schadensursachen zu Querschnittsschwächung oder undichten Verbindungen führen (echte Schadensereignisse), sind:

- Querbrüche (spröde Werkstoffeigenschaften) (Abbildung 54)
- Schalenbrüche (vor allem bei größeren Nennweiten) (Abbildung 55)
- Rundrisse (elastische Werkstoffeigenschaften)
- Längsriss (Abbildung 56)
- Korrosion (Abbildung 57)

und als Sonderformen

- undichte Verbindungen
- übermäßige Verformungen (Versagen durch Instabilität) (Abbildung 53)



Abbildung 53:
Übermäßige Verformung an einem Stahlrohr, verursacht durch punktförmige Belastung (Laborversuch)



Abbildung 54: Querbruch mit Rissfortpflanzung an einem Graugussrohr



Abbildung 55: Schalenbruch an einem Graugussrohr der Nennweite DN 500



Abbildung 56: Längsriss (ca. 30 cm) an einem Graugussrohr



Abbildung 57: Extreme Korrosion eines Stahlrohrs



Abbildung 58:
Lunker in der Bruchfläche eines
Grauguss-Rohrsegments

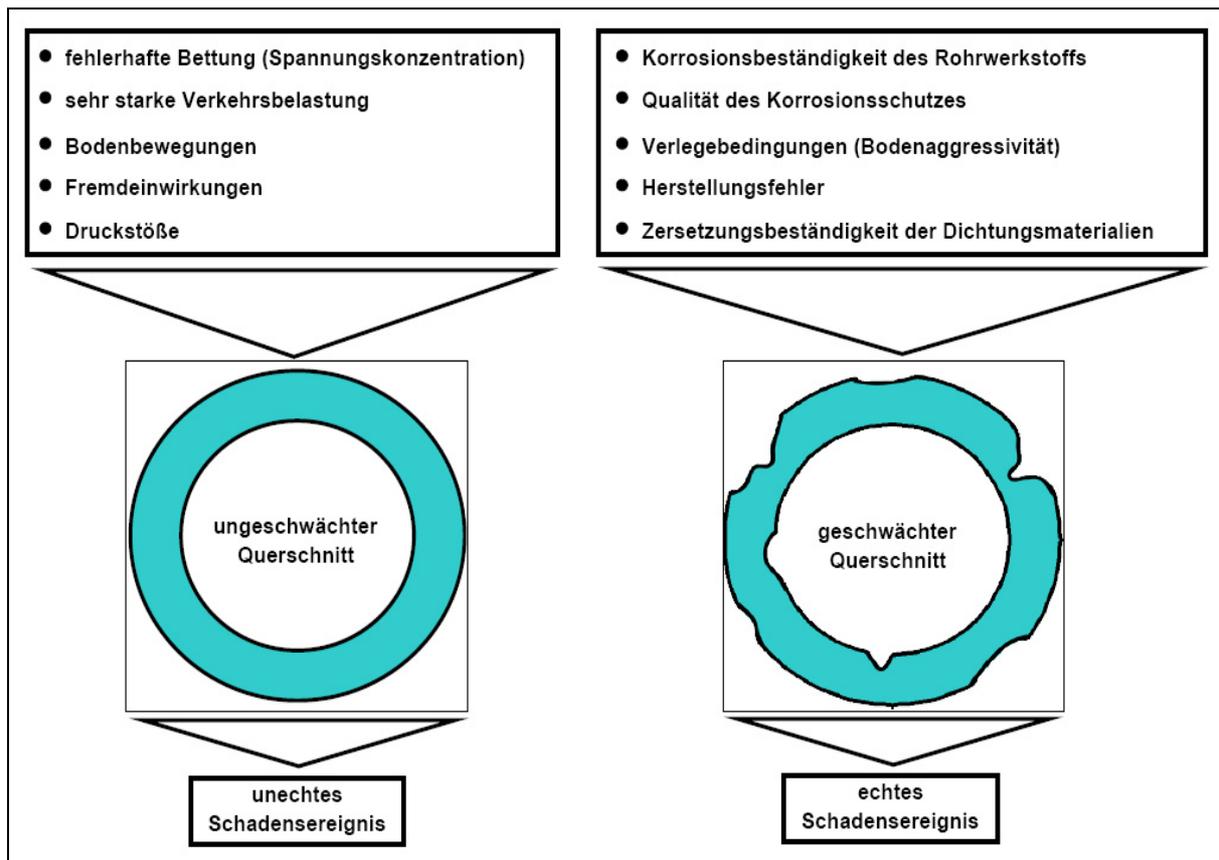


Abbildung 59: Definition von Schadensursachen als Voraussetzungen zur Unterscheidung in echte und unechte Schadensereignisse an metallischen Trinkwasserleitungen

Tabelle 4.11: Herstellungsfehler bei metallischen Rohrwerkstoffen

Werkstoff	Fehler	Auswirkung
Gusseisen	Fehlstellen an der Rohrwand	Dellen, geringe Wanddicke
	Fehlstellen in der Rohrwand	Lunker (Abbildung 58)
Stahl	Falsche Wärmebehandlung	Gefügefehler
		Eigenstressungen
Gusseisen, Stahl	Verunreinigte Schmelze (Schlackereste, Recyclingmaterial)	Verringerte Festigkeit Erhöhte Korrosionsempfindlichkeit
	Unpassende Legierungsbestandteile	

Die oben genannten Schadensarten sind zusätzlich abhängig vom Rohrwerkstoff. Bestimmte Schadensarten lassen sich einzelnen metallischen Rohrwerkstoffen zuordnen, sind aber auch auszuschließen (z. B. Spongiose bei Stahl). Der Zuordnung der Schadenssignifikanz in Tabelle 4.12 lag die statistische Auswertung der im Rahmen der Arbeit untersuchten Rohrproben zugrunde (siehe Kapitel 8)

Tabelle 4.12: Schadenssignifikanz an metallischen Trinkwasserleitungen

Schadensart	Grauguss	Duktilguss	Stahl
Querbruch	typisch	nicht möglich	nicht möglich
Schalenbruch	ab ~ DN 500	nicht möglich	nicht möglich
Rundriss	nicht möglich	selten	selten
Längsriss	selten	möglich ab DN 400	möglich ab DN 400
Korrosion	typisch	typisch	typisch
Graphitierung	typisch	typisch	nicht möglich
undichte Verbindungen	typisch	typisch	typisch
Übermäßige Verformung	nicht möglich	selten	selten

Rundrisse können an Duktilguss- und Stahlrohren nur bei extrem großen Längszugkräften und vorheriger plastischer Verformung nach Erreichen der Streckgrenze auftreten. Für eine Zustandsbewertung ist diese Schadensart hier jedoch nicht relevant, da es bereits vor dieser plastischen Verformung zu einer Beeinträchtigung der Versorgungsfunktion kommt.

Extreme plastische Verformungen quer zur Rohrachse, z. B. bei starker punkt- oder linienförmige Belastungen und größerer Nennweite) können bei Duktilguss- und Stahlrohren zusätzlich zu Längsrissen führen. Dieser Fall tritt ab einer Nennweite DN 400 ein und führt meist nur bei Überbeanspruchung und Biegung quer zur Längsachse zu Längsrissen, während bei kleineren Nennweiten der volle Querschnitt zum Tragen kommt [98; 108].

In Veröffentlichungen des National Research Council IRC Kanada wird als häufige Schadensart der sog. „crack at bell“ genannt. Dabei handelt es sich durch Spannungen induzierte Längsrisse im Bereich der Muffenköpfe an Graugussrohren (Glockenform = bell) [147]. Diese Schadensart wurde an den untersuchten Rohrproben nicht vorgefunden bzw. wird in entsprechender deutscher Literatur nicht erwähnt und ist somit nicht Untersuchungsbestandteil.

4.9.2 Korrosionsarten

Entsprechend der Untersuchungen im Rahmen der Arbeit (Kapitel 8) ist die Korrosion (Reaktion metallischer Werkstoffe mit der Umgebung) die am häufigsten anzutreffende Schadensart an metallischen Rohrleitungen. Zusätzlich sind die restlichen oben genannten Schadensarten häufig in Kombination mit Korrosion anzutreffen (Kapitel 8) [2; 144].

Korrosion führt zu Querschnittsschwächung und somit zu örtlichen Spannungskonzentrationen die das Rohr brechen bzw. verformen lassen. Bei entsprechender Korrosionstiefe (bezogen auf die Rohrwanddicke) ist die Querschnittsschwächung zusätzlich mit Wasserverlust verbunden (Menge abhängig von Druck und Korrosionsfläche) [2].

In VDI 3822 werden einzelne Korrosionsarten den folgenden drei Gruppen zugeordnet [145]:

- ebene Flächenkorrosion (ohne mechanische Belastung)
- örtlich begrenzte Korrosion (ohne mechanische Belastung)
- selektive Korrosion

Dazu zählen die für die Korrosion an erdverlegten metallischen Trinkwasserleitungen relevanten Korrosionsarten:

Tabelle 4.13: Für metallische Rohrwerkstoffe relevante Korrosionsarten [145]

Korrosionsart	Untergruppe	Gruppe
Ebenmäßige Flächenkorrosion	keine	ebenmäßige Flächenkorrosion
Lochkorrosion		örtlich begrenzte Korrosion
Muldenkorrosion		
mikrobiologisch induzierte Korrosion durch Sulfat reduzierende Bakterien		
Kontaktkorrosion	galvanische Korrosion	örtlich begrenzte Korrosion
Fremdstromkorrosion	Werkstoffhomogenität	selektive Korrosion
Spongiose		
Interkristalline Korrosion		
Seigerungskorrosion		

Abweichend von den Definitionen in VDI 3822 und der Auflistung in Tabelle 4.13 wird für weitere Untersuchungen die Schadensart „Korrosion“ in Abhängigkeit von Erscheinungsform und des Gefährdungsgrades in folgende Korrosionsarten unterteilt:

- Lochkorrosion bzw. örtlich begrenzte Korrosion (Abbildung 60)
- Narben- bzw. Zeilenkorrosion (Abbildung 61)
- Muldenkorrosion (Abbildung 62)
- Flächenkorrosion (Abbildung 63)
- Spongiose oder auch Graphitierung (Abbildung 64)



Abbildung 60: Lochkorrosion an einem Stahlrohr



Abbildung 61: Narbenkorrosion mit beginnender Lochkorrosion an einem Stahlrohr



Abbildung 62: Muldenkorrosion in Kombination mit Lochkorrosion an einem Graugussrohr; der fortgesetzte Korrosionsprozess führte von Muldenkorrosion zu Lochkorrosion



Abbildung 63:
Ebenmäßige
Flächenkorrosion an
der Rohraußenwand
in Kombination mit
Muldenkorrosion

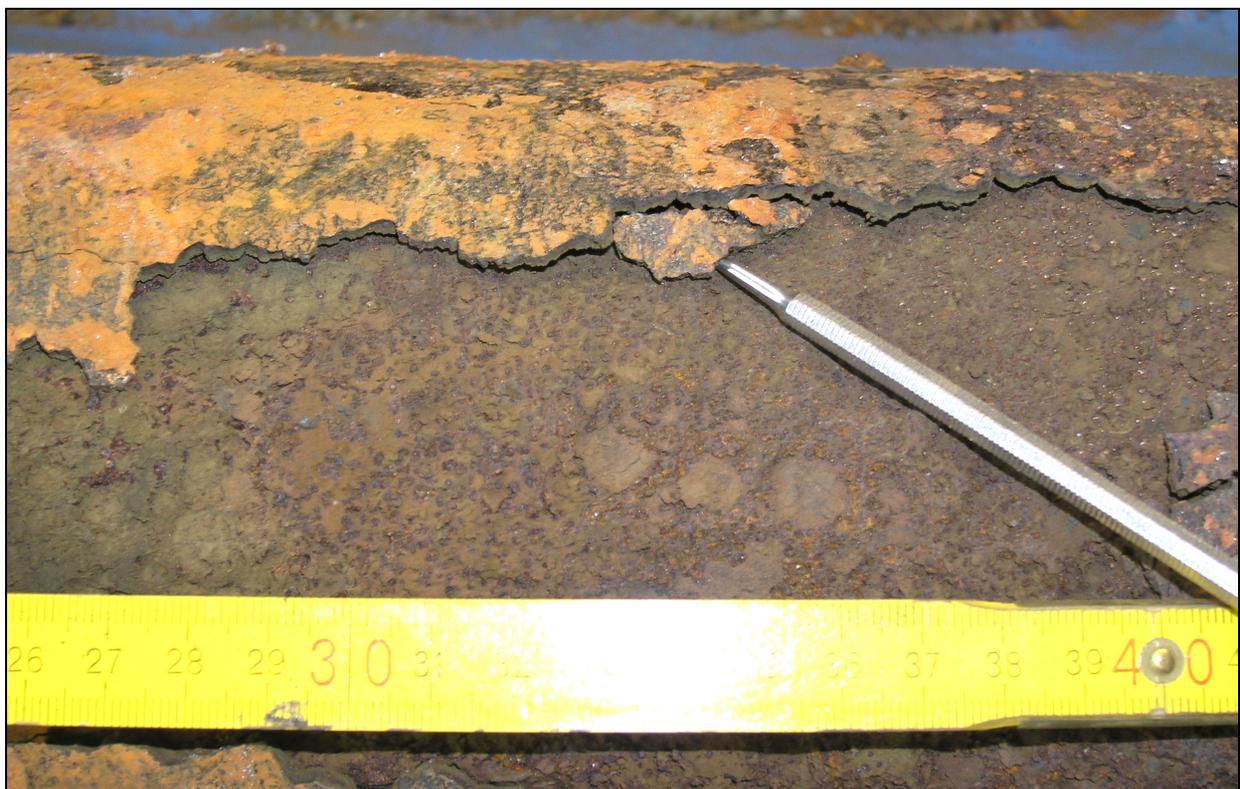


Abbildung 64: Ebenmäßige graphitierte Schicht an einem Graugussrohr

Die Gefahr der Lochkorrosion ist an Rohren mit jutearmiertem Korrosionsschutz verhältnismäßig hoch, da das Jutegewebe an den Kreuzungspunkten besonders stark die anstehender Bodenfeuchtigkeit aufsaugt und so direkt an die Metalloberfläche führt. An diesen Stellen kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Lochkorrosion (Abbildung 65).



Abbildung 65: „Abdrücke“ der Jutearmierung - Keimstelle für Lochkorrosion am Duktulguss- oder Stahlrohr

4.9.3 Charakterisierung relevanter Korrosionsarten und deren Entstehung

Narben- und Lochkorrosion treten örtlich begrenzt auf, so dass auf kleiner Fläche ein Materialabtrag bzw. die Elementbildung bei relativ hoher Korrosionsgeschwindigkeit eintritt. Auf diese Weise entsteht eine vergleichsweise schnelle Perforierung der Rohrwand und mit den entsprechenden Wasserverlusten.

Ursache für die schnelle Korrosionsgeschwindigkeit bei Narben- und Lochkorrosion ist das ungleichmäßige Verhältnis von Anodenfläche (Metall, welches in Lösung geht - also korrodiert) und Kathodenfläche (Metall, an dem sich die Korrosionsprodukte anlagern).

Narben und Löcher an der Rohroberfläche werden zu Anoden mit kleiner Fläche im Vergleich zur restlichen kathodischen Rohroberfläche (so genannte Flächenregel) [97]:

Unedle Stellen (lösbar)	= Anode	= Freisetzen von Elektronen
Edle Stellen (nicht lösbar)	= Kathode	= Verbrauch (Aufnahme) von Elektronen

Anodenfläche > Kathodenfläche → geringere Korrosionsgeschwindigkeit

Kathodenfläche > Anodenfläche → höhere Korrosionsgeschwindigkeit

Entsprechend der Flächenregel nimmt die Loch- bzw. Narbenkorrosion mit steigendem Verhältnis Kathode / Anode zu und mit wachsendem Bodenwiderstand ab. Im Allgemeinen sind kathodische Bereiche großflächig und anodische Flächen relativ gering polarisiert. Dies hat zur Folge, dass an anodischen Stellen häufiger Lochkorrosion auftritt [93].

Das Verhältnis der Oberflächen bei Mulden- und Flächenkorrosion zur restlichen Rohroberfläche ist ausgewogen und deshalb verläuft die Korrosion mit geringerer Geschwindigkeit als bei Narben- und Lochkorrosion. Jedoch ist laut Beschreibungen in DIN 50930 die Muldenkorrosion als Vorstufe zur Lochkorrosion definiert bzw. stellt die Lochkorrosion den Grenzfall der Muldenkorrosion dar [176]. Weitere notwendige Betrachtungen im Rahmen der Arbeit hierzu sind in Kapitel 12 aufgeführt.

Die Spongiose oder auch Graphitierung an Gussrohren kann alle erwähnten Erscheinungsformen der Korrosionsarten annehmen (Fläche, Mulde, Narbe oder Loch). Da bei der Graphitierung das Eisengerüst ausgelöst wird und der weiche, nicht tragfähige Graphit mit häufig anhaftenden Korrosionsprodukten zurück bleibt, ist von außen nicht augenscheinlich erkennbar, ob ein Gussrohr graphitiert ist.

Ein Nachweis graphitierter Stellen mit fünfprozentiger Kupfersulfatlösung ist ebenfalls nicht immer möglich, da nicht alle Stellen des zu untersuchenden Rohres (z.B. Rohrrinnenwand) benetzt werden können.

Beim Freilegen der blanken Rohroberfläche mittels Sandstrahlen (Sand, Stahlkies oder Glaskugeln als Strahlgut) werden die weichen graphitierten Stellen entfernt, so dass eindeutige Aussagen über den Graphitierungsfortschritt getroffen werden können (siehe Kapitel 6).

Aussagen zur Korrosionsgeschwindigkeit und zum Materialabtrag (bzw. Schwächung) bei der Graphitierung sind im Gegensatz zu den restlichen im Rahmen der Untersuchung relevanten Korrosionsarten nur schwer zu treffen. Die Korrosion kann mit geringerer, aber auch höherer Geschwindigkeit ablaufen. Ebenso ist der Materialabtrag großflächig bis örtlich begrenzt (siehe Kapitel 12).

Örtlich begrenzte Korrosion verläuft zwar vergleichsweise schnell und führt somit früher zu Wasserverlusten. Diese sind allerdings aufgrund der Geometrie der Korrosionsart relativ gering [2]. So beträgt theoretisch der Wasserverlust bei 5 bar Betriebsdruck und 2 mm Lochöffnung 5,5 m³ pro Tag, aber bei 5 mm Lochöffnung bereits 34,6 m³ pro Tag. Die statische Resttragfähigkeit des Rohres wird durch örtlich begrenzte Korrosion (Querschnittschwächung) aufgrund einer Überbrückungswirkung kaum beeinflusst (siehe Kapitel 10).

Tabelle 4.14: Charakterisierung der relevanten Korrosionsarten

Korrosionsart	Relative Korrosionsgeschwindigkeit	Relativer Materialabtrag
Lochkorrosion	hoch	gering, stark örtlich begrenzt
Narbenkorrosion	hoch	gering, örtlich begrenzt
Muldenkorrosion	gering	mittel – hoch, örtlich begrenzt
Flächenkorrosion	gering	mittel – hoch, großflächig

Die oben genannten und für die Zustandsverschlechterung verantwortlichen Korrosionsarten und deren Korrosionsgeschwindigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit sind von verschiedenen Faktoren abhängig und in Tabelle 4.15 aufgelistet.

Tabelle 4.15: Einflussfaktoren auf Korrosionswahrscheinlichkeit und Korrosionsgeschwindigkeit [13; 93; 122; 146]

Rohraußenwand	Rohrinnenwand
Zustand des Korrosionsschutzes	Zustand des Korrosionsschutzes
Bodenaggressivität	Sauerstoffgehalt des Wassers
Bodenart	pH-Wert des Wassers
Leitfähigkeit des Bodens	Fließgeschwindigkeit des Wassers
Belüftung (Redoxspannung)	Wasser mit hohem Salzgehalt (Chloride, Sulfate)
Streustromeinflüsse (Straßenbahn, Fundamentbewehrung)	Gehalt an Bicarbonat- und Kalziumionen (Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht)
Herstellungsfehler (sekundäres Zeilengefüge)	Herstellungsfehler (sekundäres Zeilengefüge)
Anaerobe Bakterien (organische Bestandteile)	
Porenvolumen des Bodens	
Feuchtigkeitsgehalt des Bodens	
Dispersität des Bodens	
Grundwasserspiegel	

Bodenarten mit einem geringen spezifischen Widerstand bzw. hoher Leitfähigkeit werden als aggressive Böden bezeichnet und erhöhen die Korrosionswahrscheinlichkeit. Eine Beurteilung der umgebenden Bodenart gibt bereits Auskunft über die Wahrscheinlichkeit einer Zustandsverschlechterung an metallischen Rohrleitungen. Eine geringe Korrosionswahrscheinlichkeit besitzen Böden mit geringer Leitfähigkeit (nicht aggressive Böden) [13; 46; 93]:

- Sandmergelboden
- Lösboden
- Kalkmergelboden
- Kalkboden
- stark kalkhaltige Humusböden
- gut belüfteter Lehm –und Lehmmangelboden

Eine hohe Korrosionswahrscheinlichkeit besitzen Böden mit erhöhter Leitfähigkeit (aggressive Böden):

- Tonböden (wegen Anodenbildung) und kalkarmer Humusböden

Eine sehr hohe Korrosionswahrscheinlichkeit besitzen Böden mit hoher Leitfähigkeit (starkaggressive Böden):

- Torf-, Schlick- und Marschböden bzw. Humusböden
- künstliche Böden (Müll, Schlacke, kohlehaltige Böden)

Im Allgemeinen besitzen bindige Böden (wie Tonböden) gegenüber nicht bindigen Böden (wie Sandböden) eine höhere Korrosionswahrscheinlichkeit. Rohre in ordnungsgemäß hergestellter Sandbettung sind dementsprechend gut vor Einflüssen zur Erhöhung der Korrosionswahrscheinlichkeit geschützt [108].

Die Korrosionsgeschwindigkeit und somit der Materialabtrag am Rohr und die Zustandsverschlechterung wird in Abhängigkeit der in Tabelle 4.15 genannten Einflussfaktoren bestimmt. Haupteinflussfaktor ist der spezifische Bodenwiderstand (Leitfähigkeit des Bodens) in Rohrleitungsumgebung (Tabelle 4.16 bis Tabelle 4.19).

Tabelle 4.16: Korrosionsgeschwindigkeit bzw. Korrosionstiefe der Lochkorrosion in Abhängigkeit des spezifischen Bodenwiderstands [46]

Spezifischer Bodenwiderstand [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Grenzwerte der Lochfraßtiefe [mm / Jahr]	Mittlere Lochfraßtiefe [mm / Jahr]
1000	0,08 – 0,40	0,18
1000 – 12000	0,02 – 0,14	0,08
12000	0,015 – 0,12	0,03

Tabelle 4.17: Korrosionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des spezifischen Bodenwiderstands [148]

Spezifischer Bodenwiderstand [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Mittlere Korrosionsgeschwindigkeit [mm / Jahr]
0 - 500	0,11
1500 - 2000	0,058
2500 - 3000	0,016

Tabelle 4.18: Maß der Korrosionsgefährdung [2]

Gesamtsalzgehalt der Lösung an der Rohrleitung bei O_2 -Sättigung [mg / l]	Spezifischer elektrischer Widerstand [$\Omega \cdot \text{Meter}$]	pH-Wert des Bodens		
		< 5	5 - 9	> 9
		Aggressivitätsgrad		
< 400	> 200	2	1	1
	200 - 100	3	2	
	100 - 20	4	3	
400 - 500	20 - 10	5	4	2
500 - 2000	10 - 5	6	5	3
2000 - 5000	5 - 2	7	6	4
5000 - 10000	2 - 1	8	7	5
10000 - 20000	1 - 0,5	8	8	6

Aus dem Aggressivitätsgrad wird die Korrosionsgeschwindigkeit bei Loch- und Flächenkorrosion abgeleitet (Tabelle 4.19).

Tabelle 4.19: Korrosionsgeschwindigkeiten an erdverlegten metallischen Wasserleitungen (Abtrag in mm pro Jahr) [2]

Korrosion		Aggressivitätsgrad							
Rohr	Art	1	2	3	4	5	6	7	8
innen	Flächenkorrosion	0,01			0,02	0,03	0,06	0,11	0,15
	Lochkorrosion	0,06			0,07	0,08	0,10	0,20	0,35
außen	Flächenkorrosion	0,01			0,02	0,04	0,08	0,1	
	Lochkorrosion	0,05			0,15				

Korrosionsversuche unter simulierten Verlegebedingungen an Grauguss und Duktulguss zeigten, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen Rohrwerkstoff und Korrosionsgeschwindigkeit gibt [114]. Eigene Versuche bestätigten die Aussage und ließen zusätzlich die Übertragung auf Stahlrohre zu (siehe Abschnitt 12.3).

In weiteren Versuchen wurde festgestellt, dass die Korrosionsgeschwindigkeit bzw. Abtragungsrate über die Zeit relativ konstant verläuft [149; 166]. In Böden mit einer positiven Redoxspannung (sauerstoffreiche Böden) verläuft die Korrosionsrate (Abtragung in Masse pro Zeiteinheit) relative linear, bei negativer Redoxspannung (sauerstoffarm, organisch) jedoch exponentiell [150].

Innerhalb der Arbeit wird ein annähernd linearer Korrosionsverlauf zugrunde gelegt (siehe Kapitel 11 und Kapitel 12).

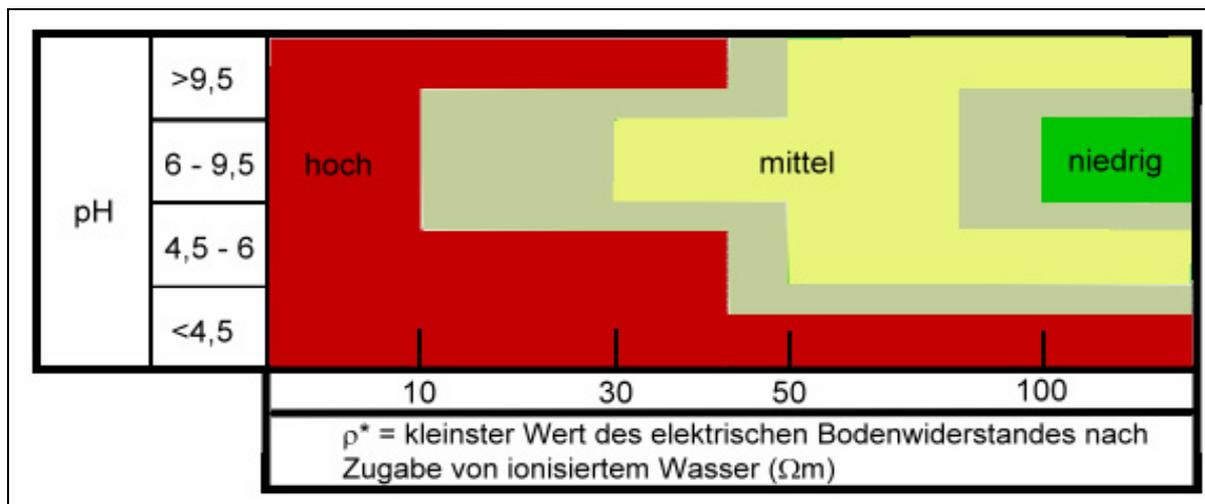


Abbildung 66: Korrosionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von pH-Wert und spezifischem Bodenwiderstand [151]

4.9.4 Inkrustierungen in metallischen Trinkwasserleitungen

Korrosionsprodukte an der Rohrrinnenwand sowie Ablagerungen aus dem Trinkwasser (Kalk-, Eisen- und Manganverbindungen) bilden bei zu geringer Fließgeschwindigkeit des Trinkwassers im Rohr bzw. zu hoher Konzentration die so genannte Inkrustierung (Abbildung 67). Diese Inkrustierung stellt zwar keine Schadensart dar, welche den Zustand des Rohrwerkstoffs beeinträchtigt. Dennoch werden die Funktion der Rohrleitung und die Versorgungsqualität beeinträchtigt (Fließgeschwindigkeit, Versorgungsdruck, Braunfärbungen, Geschmacksbeeinflussung) [2].

Durch die An- und Ablagerungen aus ausgeschiedenen Eisen-, Mangan- und Kalkverbindungen (Konzentration $> 0,2$ mg/l) erfolgt kein Angriff des Rohrwerkstoffs. Bei vorhandener freier aggressiver Kohlensäure wird jedoch der Rohrwerkstoff geringfügig angegriffen und es bilden sich aus dem Korrosionsprodukt (Eisenhydrogenkarbonat) sog. Rostknollen (Abbildung 68) [97].

Neben der Inkrustierung kann es auch zu einer Deckschichtbildung an der Rohrrinnenwand kommen, die eine Art passive Korrosionsschutzschicht bildet. Bei Wässern, welche sich im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befinden, bestimmt der Sauerstoffgehalt und die damit zusammenhängende sog. Wandalkalität, ob sich eine schützende Deckschicht an der Rohrrinnenwand ausbildet (unabhängig von der Fließgeschwindigkeit).

Bei geringem Sauerstoffgehalt erfolgt eine Oxidation der primär gelösten Eisen(II)-Ionen über den gesamten Rohrquerschnitt. Das so ausgefällte Eisen(III)-Hydroxid wird als Rost weiter mitgeführt (Rostwasser).

Bei höherem Sauerstoffgehalt wird das Eisen(III)-Hydroxid in relativer Nähe des Entstehungsortes der Eisen(II)-Ionen ausgefällt. Es bildet, wenn eine schützende Deckschicht nicht vorhanden ist, zusammenhängende Rostpusteln (Inkrustation) [73].

Anhand der Inkrustierungsform sind Aussagen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit und der Trinkwasserzusammensetzung am betreffenden Rohrleitungsstrang möglich (Kapitel 6).

Ergänzend zum Kapitel 1 sei auf detaillierte Untersuchungen an der TU Dresden zur Beurteilung der korrosionschemischen Beschaffenheit des Trinkwassers für eine Deckschichtbildung an der Rohrwand (korrosionshemmend) verwiesen [152].



Abbildung 67: Formen der Inkrustierung in Trinkwasserrohren; links: vollflächig; rechts: knollenförmig



Abbildung 68: Rostknollen als Korrosionsprodukt durch Angriff der Rohrwand bei Trinkwässern mit freier aggressiver Kohlensäure

4.10 Einteilung in Rohrgenerationen

Durch die Einteilung in sog. Rohrgenerationen werden die in Abschnitt 4.2 bis Abschnitt 4.4 erwähnten Rohrwerkstoffgruppen unter Beachtung der Entwicklung von Herstellungsverfahren, Verbindungssystem, Korrosionsschutz und werkstoffspezifischen Eigenschaften charakterisiert (Tabelle 4.20 und Abschnitt 4.10.1 bis Abschnitt 4.10.4).

Tabelle 4.20: Technischer Entwicklungsverlauf der Rohrwerkstoffgruppen

Rohrwerkstoff-gruppe	Merkmal (KS = Korrosionsschutz)	Charakteristischer Verlegezeitraum
Grauguss mit Lamellengraphit	in liegender Sandform gegossen	bis 1880
	in stehender Sandform gegossen	1880 - 1930
	in rotierender Kokille geschleudert	1926 - 1965
	in stehender Sandform gegossen, DDR-Prod.	1949 - 1985
Grauguss mit Kugelgraphit (Duktilguss)	geschleudert, mangelhafter KS	1964 - 1980
	geschleudert, optimaler KS	ab 1980
	geschleudert, mangelhafter KS, DDR-Prod.	1980 - 1990
Stahl	nur geschweißt, mangelhafter KS	bis 1930
	nur nahtlos, mangelhafter KS	1890 - 1930
	verbesserter KS	1930 - 1980
	optimaler KS	ab 1980
	mangelhafter KS, DDR-Prod.	1949 - 1990

Basierend auf Roscher bzw. DVGW-Hinweis W 401 und Tabelle 4.20 sind in Abbildung 69 die Rohrgenerationen nach Werkstoff chronologisch geordnet [1; 9].

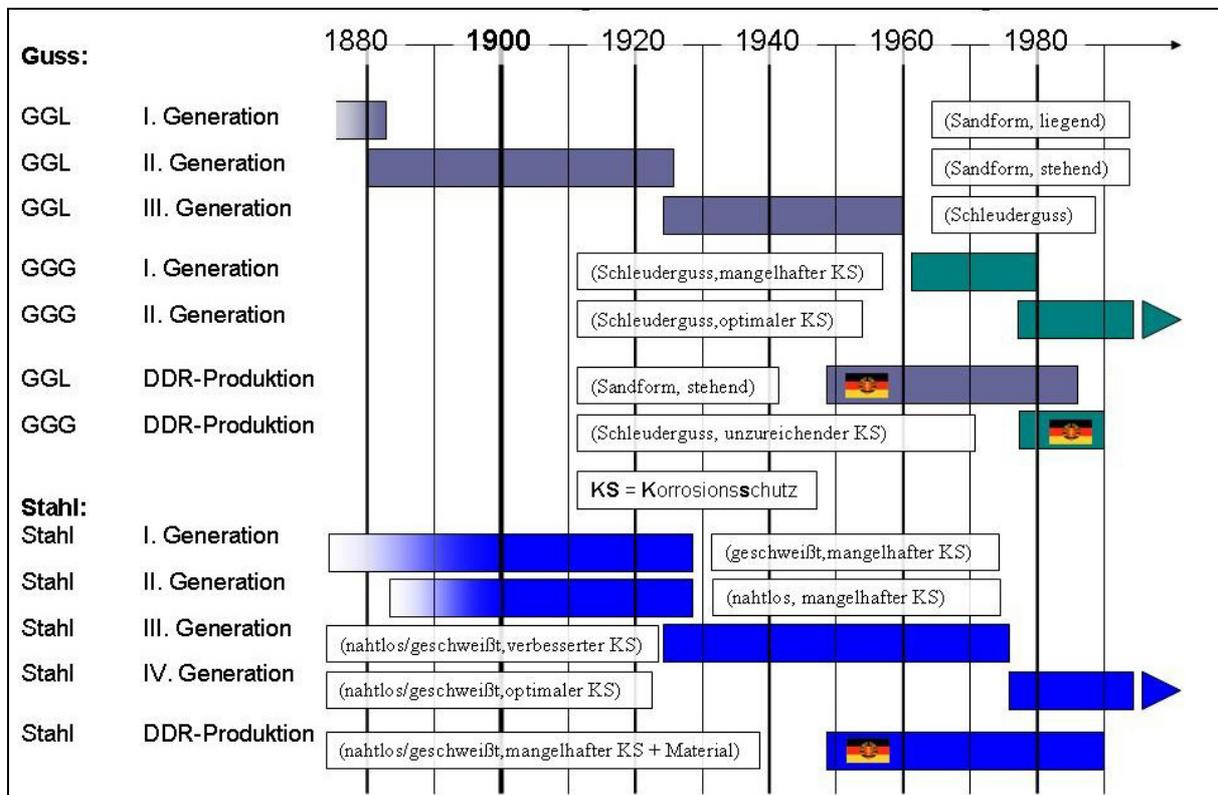


Abbildung 69: Rohrgenerationen metallischer Rohrwerkstoffe für TW-Leitungen

4.10.1 Charakterisierung der Rohrgenerationen Grauguss mit Lamellengraphit

Tabelle 4.21: Charakteristische Merkmale von Graugussrohren der I. Generation

Rohrgeneration	GGL I
Identifizierung	Exzentrizität durch Kernversatz bei liegenden Sandgussform Nahtabdruck durch liegenden Sandgussform
Korrosionsschutz	Teeranstrich innen + außen Teerbeschichtung innen + außen
Verbindungssysteme	Flanschverbindung Stemmmuffe
Schadensarten	Querbruch Korrosion (Graphitierung) Längsriss (selten, bei größerer Nennweite) Schalenbruch (selten, bei größerer Nennweite) Undichte Verbindungen

Tabelle 4.22: Charakteristische Merkmale von Graugussrohren der II. Generation

Rohrgeneration	GGL II
Identifizierung	Schlichtungsspuren an der Rohrrinnenwand Exzentrizität durch Kernversatz am glatten Rohrende möglich
Korrosionsschutz	Teeranstrich innen und außen Teerbeschichtung innen und außen Heißbitumenbeschichtung innen und außen
Verbindungssysteme	Flanschverbindung Stemmmuffe
Schadensarten	Querbruch Korrosion (Graphitierung) Längsriss (selten, bei größerer Nennweite) Schalenbruch (selten, bei größerer Nennweite) Undichte Verbindungen

Tabelle 4.23: Charakteristische Merkmale von Graugussrohren der III. Generation

Rohrgeneration	GGL III
Identifizierung	gleichmäßige Wanddicke geringere Wanddicke als bei Sandguss bei gleicher Nennweite typische Abdrücke der Kokille an der Rohraußenseite
Korrosionsschutz	Teeranstrich innen und außen Teerbeschichtung innen und außen Heißbitumenbeschichtung innen und außen Bitumenanstriche innen und außen ab 1960 Verzinkung außen ab 1960
Verbindungssysteme	Flanschverbindungen Stemmmuffen bis 1951 Schraubmuffen von 1931 - 1970 Stopfbuchsenmuffen seit 1936 Steckmuffen seit 1950 Steckmuffe TYTON seit 1956
Schadensarten	Querbruch Korrosion (Graphitierung) Längsriss (selten, bei größerer Nennweite) Schalenbruch (selten, bei größerer Nennweite) Undichte Verbindungen

Tabelle 4.24: Charakteristische Merkmale von Graugussrohren der II. Generation aus DDR-Produktion

Rohrgeneration	GGL IIa
Identifizierung	Schlichtungsspuren an der Rohrrinnenwand Exzentrizität durch Kernversatz am glatten Rohrende möglich
Korrosionsschutz	Teeranstrich innen und außen Teerbeschichtung innen und außen Heißbitumenbeschichtung innen und außen Bitumenanstriche innen und außen seit 1960
Verbindungssysteme	Flanschverbindung Stemmmuffen (ab 1974 nur noch ab DN 500) Stopfbuchsenmuffen seit 1949 Steckmuffen seit 1950 LKH-Muffe seit 1977
Schadensarten	Querbruch Korrosion (Graphitierung) Längsriss (selten, bei größerer Nennweite) Schalenbruch (selten, bei größerer Nennweite) Undichte Verbindungen

4.10.2 Charakterisierung der Rohrgenerationen Grauguss mit Kugelgraphit

Tabelle 4.25: Charakteristische Merkmale von Duktulgussrohren der I. Generation

Rohrgeneration	GGG I
Identifizierung	gleichmäßige Wanddicke geringere Wanddicke als bei Sandguss bei gleicher Nennweite typische Abdrücke der Kokille an der Rohraußenseite
Korrosionsschutz	Bitumenanstriche innen und außen seit 1964 Verzinkung außen seit 1964 Zementmörtelauskleidung innen seit 1975 (selten) Faserzementmörtelumhüllung außen seit 1975 (selten) Kunststoffbeschichtungen seit 1975 (selten)
Verbindungssysteme	Flanschverbindungen (selten, bei größeren Nennweiten) Schraubmuffen bis 1970 Stopfbuchsenmuffen seit 1964 (selten) Steckmuffen seit 1964 zugfeste Verbindungen seit 1970
Schadensarten	Korrosion (Lochkorrosion) durch Graphitierung Längsrisse ab DN 300 (selten) Verformungen

Tabelle 4.26: Charakteristische Merkmale von Duktulgussrohren der II. Generation

Rohrgeneration	GGG II
Identifizierung	gleichmäßige Wanddicke geringere Wanddicke als bei Sandguss bei gleicher Nennweite typische Abdrücke der Kokille an der Rohraußenseite Korrosionsschutz entspricht dem aktuellen Stand der Technik
Korrosionsschutz	Verzinkung außen Zementmörtelauskleidung innen Faserzementmörtelumhüllung außen Kunststoffbeschichtungen außen
Verbindungssysteme	zugfeste Verbindungen Flanschverbindungen (selten, bei größeren Nennweiten)
Schadensarten	Korrosion (Lochkorrosion), Graphitierung Längsrisse ab DN 300 (selten) Verformungen

Tabelle 4.27: Charakteristische Merkmale von Duktilegussrohren der I. Generation aus DDR-Produktion bzw. Verlegung

Rohrgeneration	GGG Ia
Identifizierung	gleichmäßige Wanddicke geringere Wanddicke als bei Sandguss bei gleicher Nennweite typische Abdrücke der Kokille an der Rohraußenseite
Korrosionsschutz	Verzinkung außen (selten) Zementmörtelauskleidung innen (selten, meist nachträglich) Faserzementmörtelumhüllung außen (selten) Bitumenbeschichtung (mit Jutearmierung) außen
Verbindungssysteme	zugfeste Verbindungen Flanschverbindungen (selten, bei größeren Nennweiten)
Schadensarten	Korrosion (Lochkorrosion), Graphitierung Längsrisse ab DN 300 (selten) Verformungen

4.10.3 Charakterisierung der Rohrgenerationen Stahl

Tabelle 4.28: Charakteristische Merkmale von Stahlrohren der I. Generation

Rohrgeneration	St I
Identifizierung	häufig nur minimale Reste des Korrosionsschutzes sichtbar sichtbare Schweißnaht
Korrosionsschutz	Teeranstrich innen und außen ab 1850 Teerbeschichtung innen und außen ab 1850 Bitumenanstrich innen und außen ab 1880 Bitumenbeschichtung innen und außen ab 1880 teergetränkte Glasvlies- oder Juteumwicklung ab 1900 bitumengetränkte Glasvlies- oder Juteumwicklung ab 1900
Verbindungssysteme	Stemmmuffenverbindungen (häufig mit Blei und Hanfstrick, aber auch schon gummidichtend) Flanschverbindungen seit 1850 (selten) Schweißverbindungen seit ca.1920
Schadensarten	Korrosion (häufig Lochkorrosion) Verformungen Undichte Verbindungen bei Stemmmuffen

Tabelle 4.29: Charakteristische Merkmale von Stahlrohren der II. Generation

Rohrgeneration	St II
Identifizierung	häufig nur minimale Reste des Korrosionsschutzes sichtbar keine Schweißnaht
Korrosionsschutz	Teeranstrich innen und außen Teerbeschichtung innen und außen Bitumenanstrich innen und außen Bitumenbeschichtung innen und außen teergetränkte Glasvlies- oder Juteumwicklung ab 1900 bitumengetränkte Glasvlies- oder Juteumwicklung ab 1900
Verbindungssysteme	Stemmmuffenverbindungen (häufig mit Blei und Hanfstrick, aber auch schon gummidichtend) Flanschverbindungen (selten) Schweißverbindungen seit ca.1920
Schadensarten	Korrosion (häufig Lochkorrosion) Verformungen Undichte Verbindungen bei Stemmmuffen

Tabelle 4.30: Charakteristische Merkmale von Stahlrohren der III. Generation

Rohrgeneration	St III
Identifizierung	Nur über Beurteilung des restlichen Korrosionsschutzes möglich
Korrosionsschutz	Teeranstrich innen und außen bis 1969 Teerbeschichtung innen und außen bis 1969 Bitumenanstrich innen und außen Bitumenbeschichtung innen und außen teergetränkte Glasvlies- oder Juteumwicklung 1900 - 1969 bitumengetränkte Glasvlies- oder Juteumwicklung ab 1900 Beschichtung mit Epoxydharz oder PE ab 1958 (verstärkt ab ~1965)
Verbindungssysteme	Schweißverbindungen Flanschverbindungen (bei geschweißten Rohren) Schraubmuffensysteme bis 1970 (selten) Stemmmuffenverbindungen bis 1951 Steckmuffen seit 1940
Schadensarten	Korrosion (häufig Lochkorrosion) Verformungen Undichte Verbindungen bei Stemmmuffen

Tabelle 4.31: Charakteristische Merkmale von Stahlrohren der IV. Generation

Rohrgeneration	St IV
Identifizierung	Korrosionsschutz entspricht dem aktuellen Stand der Technik
Korrosionsschutz	aufextrudierte PE-Beschichtungen Zinkbeschichtung außen Zementmörtelauskleidung innen Faserzementmörtelumhüllung außen
Verbindungssysteme	Schweißverbindungen (häufig) zugfeste Steckmuffensysteme (häufig) Steckmuffen Flanschverbindungen (selten)
Schadensarten	Korrosion (häufig Lochkorrosion) Verformungen

Tabelle 4.32: Charakteristische Merkmale von Stahlrohren der III. Generation aus DDR-Produktion

Rohrgeneration	St IIIa
Identifizierung	Nur über Beurteilung des restlichen Korrosionsschutzes möglich
Korrosionsschutz	Teeranstrich innen und außen Teerbeschichtung innen und außen Bitumenanstrich innen und außen Bitumenbeschichtung innen und außen teergetränkte Glasvlies- oder Juteumwicklung ab 1900 bitumengetränkte Glasvlies- oder Juteumwicklung ab 1900 teerhaltige Korrosionsschutzschichten bis 1967 Beschichtung mit Epoxydharz oder PE ab 1958 (verstärkt ab ~1965)
Verbindungssysteme	Schweißverbindungen Flanschverbindungen (bei geschweißten Rohren) Schraubmuffensysteme (selten) Stemmmuffenverbindungen bis 1950
Schadensarten	Korrosion (häufig Lochkorrosion) Verformungen Undichte Verbindungen bei Stemmmuffen

4.10.4 Werkstoffspezifische Eigenschaften innerhalb der Rohrgenerationen

Unter der Kenntnis werkstoffspezifischer Eigenschaften der jeweiligen Rohrgeneration sind nachträglich prüfende Tragfähigkeitsberechnungen nach ATV A 127 möglich. In Tabelle 4.33 sind die in den ursprünglichen Regelwerken geforderten Werkstoffkennwerte je Rohrgeneration aufgelistet (vgl. Abschnitt 4.8.2 bis Abschnitt 4.8.4).

Soweit es die Anzahl der im Rahmen der Arbeit untersuchten Rohrproben zuließ, wurden statische Versuche an den Rohrproben zur Ermittlung und zum Vergleich von Zugfestigkeit, E-Modul und Brinellhärte durchgeführt und den geforderten Werten gegenübergestellt (siehe Kapitel 9 bzw. Tabelle 4.33).

Tabelle 4.33: Materialeigenschaften metallischer Rohrwerkstoffe

Generation	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit	E-Modul**	Bruchdehnung
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
GGL I				
Geschätzt	~120	~480	~ 90.000	<1
GGL II [84]				
Gefordert	~160	~640	~100.000	<1
GGL III [79; 108]				
Gefordert	~200	~ 800	~110.000	<1
GGL IIa [129; 132]				
Gefordert	150	~600	~90.000	<1
GGG I [171]				
Gefordert	390 (294)	~507*	~170.000	10
GGG II [29]				
Gefordert	420 (300)	550	170.000	>10
GGG Ia [134; 135]				
Gefordert	500 (320)	~650*	~160.000	7
St I + St II (bis auf Herstellungsprozess und –zeitraum keine Unterschiede) [153]				
Gefordert	~240 (160)	~240	200.000	~21
St III [98]				
Gefordert	343 (235)	~343	200.000	23
St IV [119]				
Gefordert	360 (235)	~360	210.000	23
St IIIa [136; 138]				
Gefordert	314 (~235}	~314	~200.000	25

* Das Verhältnis Druckfestigkeit zu Zugfestigkeit betrug bei GGG II = 1,3. Mit diesem Verhältnis wurde der Wert der Druckfestigkeit für GGG I und GGG Ia berechnet, da keine weiteren Angaben vorhanden waren.

** Der E-Modul wurde auf volle 10.000 N/mm² abgerundet. Bei fehlenden Angaben zum E-Modul wurde der Wert ähnlicher Generation übernommen. Bei Werten, welche mit einem „~“ gekennzeichnet sind, handelt es sich um geschätzte Werte auf Grundlage der entsprechenden oftmals unterschiedlichen Literaturangaben. Die Werte in Klammern stellen die untere Streckgrenze dar

Im Rahmen der Arbeit wurden statische Versuche zur Überprüfung der in Tabelle 4.33 aufgelisteten Werte durchgeführt (Kapitel 9). Sofern es notwendig wurde, sind diese Werte mit den Messergebnissen aus den statischen Versuchen abgeglichen worden (Tabelle 9.7). Die werkstoffspezifischen Kennwerte für statische Berechnungen und statistische Auswertungen beziehen sich, sofern nicht anders ausgedrückt, auf die in dieser Tabelle aufgelisteten Kennwerte.

Die differenzierte Einteilung metallischer Rohrwerkstoffe in Gruppen mit annähernd gleichen Werkstoffeigenschaften, Herstellungsverfahren und zugehörigen Korrosionsschutz nach Abbildung 69 macht Diagramm 1 deutlich (Abnahme der Schadensrate durch verbesserten Korrosionsschutz). Es handelt sich um die Schadensrate an Duktigussrohren in Schäden pro Kilometer der Jahre 1987 bis 2002 eines städtischen Wasserversorgungsnetzes [22]. Da Duktigussrohre der I. Generation (GGG I) mit mangelhaftem Korrosionsschutz versehen wurden, tritt eine im Vergleich zu Duktigussrohren der II. Generation (GGG II) beschleunigte Zustandsverschlechterung am Rohrwerkstoff auf. Diese Zustandsverschlechterung äußert sich hier anhand höherer Schadensraten.

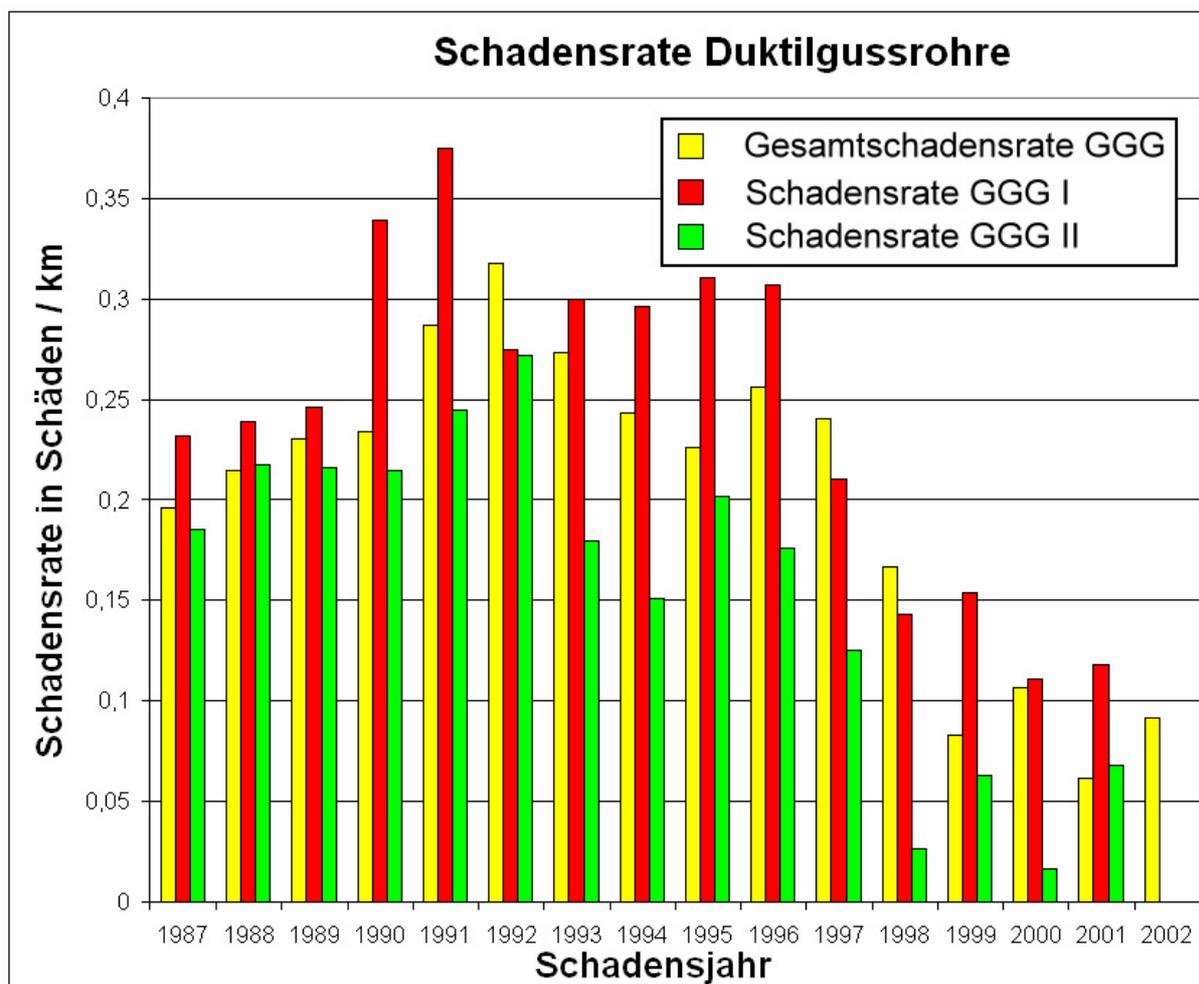


Diagramm 1: Differenzierte Darstellung der Schadensrate an Duktigussrohren [22]

5. Ermittlung der mittleren statistischen Nutzungsdauer

Für das später in Kapitel 11 behandelte Verfahren zur Prognose der technischen Nutzungsdauer ist ein Vergleichswert notwendig. Über diesen Vergleichswert soll geprüft werden, mit welchem Trend eine Zustandsverschlechterung bzw. der Substanzverlust am Rohrleitungsstrang abläuft. Als passender Vergleichswert bietet sich die mittlere statistische Nutzungsdauer an, da weitere Daten zur Beschreibung des Rohralters und der Nutzungsdauer zunächst nicht vorhanden sind. Der Ermittlung der mittleren statistischen Nutzungsdauer soll deshalb in den folgenden Abschnitten vorgegriffen werden.

5.1 Allgemeine Annahmen

Um Wasserverteilungsanlagen in einem ordnungsgemäßen Zustand gemäß den Vorgaben in DVGW-Arbeitsblatt W 400-3 zu halten, sind zur Sicherung, Wiederherstellung aber auch Verbesserung dieses Zustands rechtzeitige und kontinuierliche Instandsetzungsmaßnahmen notwendig [8]. Diese Instandhaltungsmaßnahmen umfassen neben den nicht planbaren Reparaturen vor allem Rehabilitationsmaßnahmen, bei denen die Anlagensubstanz nachhaltig gesichert werden soll. Der dafür notwendige Rehabilitationsbedarf (erforderliche Netzerneuerungsrate) ermittelt sich aus Betrachtungen und Abwägungen zu:

- der Entwicklung der Betriebs- und Instandhaltungskosten
- der Entwicklung der Schadensrate (Prognose)
- der Entwicklung der Wasserverluste (Prognose)
- der hydraulischen Leistungsfähigkeit
- der Ausfallwahrscheinlichkeit und
- der technischen Nutzungsdauer bzw. Restnutzungsdauer (Prognose)

Die Entwicklung der Schadensrate und die Entwicklung der Ausfallwahrscheinlichkeit müssen nicht direkt mit der technischen Nutzungsdauer zusammenhängen. Zwischen der Entwicklung des Trends der Schadensrate und einer Zustandsverschlechterung besteht kein quantitativer Zusammenhang (siehe Abschnitt 4.9.1 und Kapitel 14).

Voraussetzungen für die oben erwähnten Prognosen nach DVGW-Arbeitsblatt W 400-3 sind unter anderem:

- die Bestandserfassung der Teile der Versorgungsanlagen (hier: metallische Rohrleitungen) mit den wichtigsten Daten zu Länge, Lage, Nennweite, Korrosionsschutz und Alter
- die Zustandserfassung der Rohrleitungen mit Daten zu Schäden, Wasserverlusten, Instandhaltungs- und Betriebskosten

Hinweise zum praktischen Ablauf der Zustandserfassung finden sich nicht in DVGW-Arbeitsblatt W 400-3. Über die Anzahl von Schäden pro Leitungsabschnitt und die Menge an Wasserverlusten auf die Substanz einer Leitung zu schließen, ist nur bedingt möglich. Im Falle undichter Rohrverbindungen gibt die Menge an Wasserverlusten, soweit messbar, keinerlei Auskunft über den technischen Zustand (wie z. B. die Abnutzungsreserve) der zugehörigen Rohrleitung. Die für Rehabilitationsplanungen notwendige Ermittlung der statischen Resttragfähigkeit (z.B. für Sanierungsmaßnahmen) ist nicht über die Erfassung der Anzahl von Schäden möglich.

Für Instandhaltungsmaßnahmen besteht spätestens dann Handlungsbedarf, wenn das Ende der technischen Nutzungsdauer erreicht ist. Dies kann erfolgen, wenn eine gewisse Anzahl von Schäden pro Leitungsabschnitt (tatsächliche Schadensrate) einen definierten Grenzwert (zulässige Schadensrate) dauerhaft überschreitet [8]. Unabhängig von der Schadensrate ist die technische Nutzungsdauer auch dann erreicht, wenn durch Zustandsverschlechterung der Rohrleitung (z.B. durch Korrosionsprozesse) eine Mindesttragfähigkeit bei entsprechenden Belastungen nicht mehr gegeben ist (siehe Abschnitt 10.2).

Deshalb soll im Rahmen der Arbeit eine technische Restnutzungsdauer anhand des vorgefundenen technischen Zustands der Leitungssubstanz bestimmt werden. Die Daten der Schadensstatistik sollen zur Ermittlung des mittleren Rohrnetzalters dienen, um einen Vergleichswert für weitere Berechnungen zu bilden. Das zugehörige Berechnungskonzept der technischen Nutzungsdauer beruht darauf, dass die Entwicklung der mittleren statistischen Nutzungsdauer (entspricht hier der mittleren statistischen Lebenserwartung) basierend auf DVGW-Hinweis W 401 und den in Kapitel 10 durchgeführten Auswertungen über den festgestellten tatsächlichen technischen Zustand zugehöriger Rohrleitungsstränge rohrtypenspezifisch abgeglichen wird (siehe Kapitel 11) [9].

5.2 Datengrundlage

Die Datengrundlage zur Ermittlung der mittleren statistischen Nutzungsdauer bildet die in Kapitel 2 erwähnte Statistik [6]. Zu Vergleichszwecken dient die Auswertung der Schadensstatistiken einer mittleren ost- bzw. westdeutschen Großstadt (Tabelle 5.1) [22].

Tabelle 5.1: Datenumfang (Datensätze) der zur Ermittlung einer allgemeinen mittleren Nutzungsdauer genutzten Schadensstatistik:

Netz	OST [22]	WEST [22]	BRD [6]
Gesamtdaten	4300	24300	630000
Gefiltert*	3400	6600	374876

* die Datensätze wurden nach den in Kapitel III relevanten Kriterien gefiltert (u. a. Nennweite, Leitungsart, Rohrwerkstoff). Weiterhin wurden, wenn erkennbar, „unechte Schäden“ (siehe Abschnitt 4.9.1) herausgefiltert.

Der Anteil an ausgewiesenen bereits sanierten bzw. erneuerten Leitungen betrug in allen Netzen weniger als 0,7 %. Davon konnten aufgrund fehlender Angaben zu Länge oder Verlegejahr nur 50 % für eine mögliche Auswertung genutzt werden. Sanierte und erneuerte Leitungsabschnitte wurden deswegen in weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt.

Der statistisch belegte Verlegezeitraum der Rohrleitungen betrug rund 130 Jahre. Die ältesten noch erhaltenen Leitungen wurden bereits vor 1875 verlegt.

5.3 Berechnungsgrundlagen

Es wurde bereits erwähnt, dass zur Planung von Instandhaltungsmaßnahmen und vor allem Sanierungsmaßnahmen die Nutzungsdauer der entsprechenden Leitungsabschnitte bekannt sein muss [71]. Häufig angewendete probabilistische Methoden zur Bestimmung der Nutzungsdauer bzw. Restnutzungsdauer basieren auf Methoden zur Berechnung der „Sterbewahrscheinlichkeit“ bzw. Überlebenswahrscheinlichkeit aus der Finanzmathematik [25; 35; 71].

Die Datenstruktur der Schadensstatistik zu Bestand (Verlegelängen) und Verlegejahr von Rohrleitungen bietet sich für Berechnungen der empirischen Überlebenswahrscheinlichkeit und mittleren bzw. bedingten Lebenserwartung (erwartete Nutzungsdauer) an.

Um die oben erwähnten probabilistischen Methoden für die Berechnung der Nutzungsdauer von Rohrleitungen anwenden zu können, werden folgende Annahmen festgelegt.

- Die mittlere Nutzungsdauer technischer Anlagen entspricht i. A. dem Erwartungswert der Lebensdauer bzw. der sog. MTTF (mean time to failure) [25].
(Gleichung 5.1; Gleichung 5.2; Gleichung 5.3)
- Die bedingte Lebenserwartung (bedingter Erwartungswert) entspricht der Restnutzungsdauer [162]. (Gleichung 5.6)
- Unter Voraussetzung einer langjährigen Datenerfassung nähert sich das mittlere Rohrnetzalter entsprechend der Gleichung in DVGW-Hinweis W 401 unter Ausschluss wieder erneuerter Rohrstränge der empirischen mittleren Nutzungsdauer an. (Gleichung 5.7)
- Die nachfolgenden Gleichungen sind für nicht reparierbare Systeme anwendbar. Das bedeutet, dass in den folgenden Berechnungen keine sanierten Leitungen berücksichtigt werden bzw. durch alleinige Reparatur schadhafter Leitungen keine Zustandsverbesserung bzw. Nutzungsdauerverlängerung impliziert wird (der Austausch der schadhaftesten Rohrelemente verbessert nicht den Gesamtzustand eines Rohrleitungsstrangs).

Empirische Überlebenswahrscheinlichkeit (allgemein) [25]:

$$\hat{R}(t) = \frac{N(t)}{N(0)} \quad \text{(Gleichung 5.1)}$$

mit

- $N(t)$ = Anzahl der noch funktionsfähigen Elemente (Rohrstrang) zum Zeitpunkt t
- $N(0)$ = Gesamtanzahl zum Zeitpunkt $t = 0$ (aktuelles Jahr der Betrachtung)

Erwartungswert der Lebensdauer (allgemein) [163]:

$$E(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad \text{(Gleichung 5.2)}$$

Empirische mittlere Lebensdauer (speziell für technische Anlagen) [25]:

$$\hat{T}_B = \frac{1}{N(0)} \cdot \sum_{i=1}^{N(0)} t_{B,i} \quad \text{(Gleichung 5.3)}$$

mit

- $t_{B,i}$ = Lebensdauer des i -ten Elements (z.B. Rohrleitungsstrang)

Das Maß der Streuung (Varianz, Dispersion) soll hier angewendet werden, um die Aussagekraft der ermittelten Nutzungsdauer beurteilen zu können. Je kleiner die Streuung ist,

umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der berechnete Mittelwert der Lebenserwartung genau von den entsprechenden Rohrleitungssträngen erreicht wird.

Maß der Streuung um den Mittelwert der Lebenserwartung (allgemein) [163]:

$$\sigma^2(T) = 2 \cdot \int_0^{\infty} t \cdot R(t) dt - (E(T))^2 \quad (\text{Gleichung 5.4})$$

Bedingter Erwartungswert der restlichen Lebensdauer eines t-jährigen Elements bei einer Klassenunterteilung von einem Jahr (Addition von 0,5) [162]:

$$E(\hat{R}_t) = \frac{1}{N(t)} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} N(t+k) + 0,5 \quad (\text{Gleichung 5.6})$$

Die Berechnung des mittleren Rohrnetzalter nach der Gleichung in DVGW-Hinweis W 401 entspricht unter Ausschluss wieder erneuerter Rohrstränge der empirischen mittleren Lebensdauer [9]:

$$T_n = \frac{\sum_{i=1}^n (l_n - l_e)_i \cdot (n - i + 1) + \sum_{i=J}^n l_e \cdot (n - i + 1)}{\sum_{i=1}^n (l_n - l_e)_i} \quad (\text{Gleichung 5.7})$$

mit:

- T_n = mittleres Rohrnetzalter
- l_n = jährliche Rohrneuverlegung in km
- l_e = jährliche Rohrerneuerung in km
- n = Jahre
- J = Jahr der ersten Rohrerneuerung

Die in der Arbeit genutzten Datensätze zum Rohrnetzbestand deutscher WVU wurden nach Rohrgenerationen geordnet und anschließend hierfür die Überlebenswahrscheinlichkeit nach Gleichung 5.1 ermittelt [6]. Die Bestandsdaten des Rohrnetz „OST“ wurden zur Berechnung der Parameter Überlebenswahrscheinlichkeit, mittlere Lebenserwartung und Restlebensdauer für Rohre der Generationen GGL IIa, GGG Ia und St IIIa zugrunde gelegt. Zur Veranschaulichung der annähernden Übertragbarkeit der ermittelten Parameter auf andere Rohrnetz-Bestandsdaten dienen die Daten des Rohrnetzes „WEST“ und Rohrnetz „OST“ [5].

5.4 Ermittlung der mittleren Lebenserwartung

Beispielhaft sei hier zunächst die allgemeine Alterstruktur metallischer Rohrwerkstoffe in deutschen Wasserversorgungsnetzen dargestellt (Diagramm 2). Die Abgrenzung der relevanten Rohrwerkstoffe erfolgte gemäß Kapitel III.

Der größte Teil des Wasserversorgungsnetzes (WVN) wurde um die Zeit vor und nach dem 2. Weltkrieg gebaut. Während der beiden Weltkriege gab es relativ geringe Bauaktivität (typische Altersstruktur für deutsche WVN). Die geringe Anzahl der Rohrneuverlegungen während der Weltkriege wirkt den relativ hohen Schadensraten (durch verminderte Werkstoffqualität aufgrund Rohstoffknappheit und Kriegsschäden) an diesen Rohrleitungen entgegen.

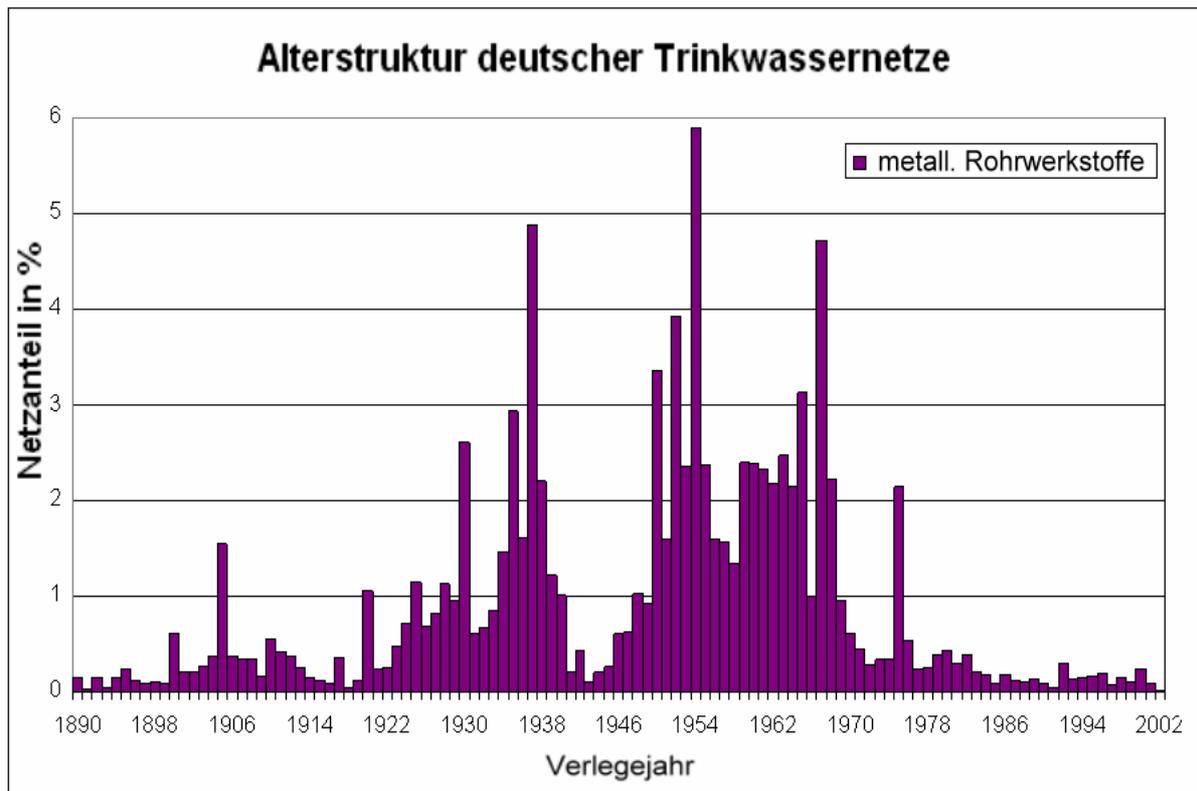


Diagramm 2: Netzbestand (Altersstruktur) an metallischen Rohrwerkstoffen in deutschen Trinkwassernetzen bezogen auf den Gesamtanteil metallischer Rohrwerkstoffe [6]

In Diagramm 3 ist die Verteilungsfunktion der empirischen Überlebenswahrscheinlichkeit von Graugussrohren der II. Generation (GGL II) dargestellt. Sie wurde wie erwähnt nach (Gleichung 5.1) auf Grundlage der Bestandsdaten für die Netze „OST“, „WEST“ und eines bundesdeutschen Durchschnitts ermittelt [6; 22]. Diese Verteilungsfunktion entspricht der Aufsummierung der Netzanteile (Rohrlänge in %) pro Jahr über alle Jahrgänge (wie in Diagramm 2 beispielhaft dargestellt). Das Betrachtungsjahr 2002 entspricht dem Rohralter $t = 0$. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die ersten Rohre um das Jahr 1880 (=2002 – 122 Jahre) verlegt wurden. Die letzten Graugussrohre der II. Generation wurden entsprechend Abbildung 69 um das Jahr 1930 verlegt (Zeitpunkt $A = 2002 - 72$).

Die mittlere Lebensdauer (entspricht hier der Nutzungsdauer) dieser Rohrgeneration wird an der Stelle einer 50-prozentigen Überlebenswahrscheinlichkeit (entspricht ebenso einer 50-

prozentigen Ausfallwahrscheinlichkeit) abgelesen und beträgt für Graugussrohre der II. Generation im Bundesdurchschnitt rund 90 Jahre (Zeitpunkt B). Dies entspricht ebenfalls dem Erwartungswert der Lebensdauer nach (Gleichung 5.2).

Die Verteilungsfunktion der empirischen Überlebenswahrscheinlichkeit auf Grundlage der Datensätze deutscher WVU verläuft annähernd gleichmäßig gemittelt zwischen der Verteilungsfunktion von Rohrnetz „WEST“ und Rohrnetz „OST“ [6; 22]. Aufgrund dessen werden wie oben erwähnt die Datensätze auf Grundlage eines bundesdeutschen Durchschnitts (BRD) für weitere Berechnungen genutzt [6].

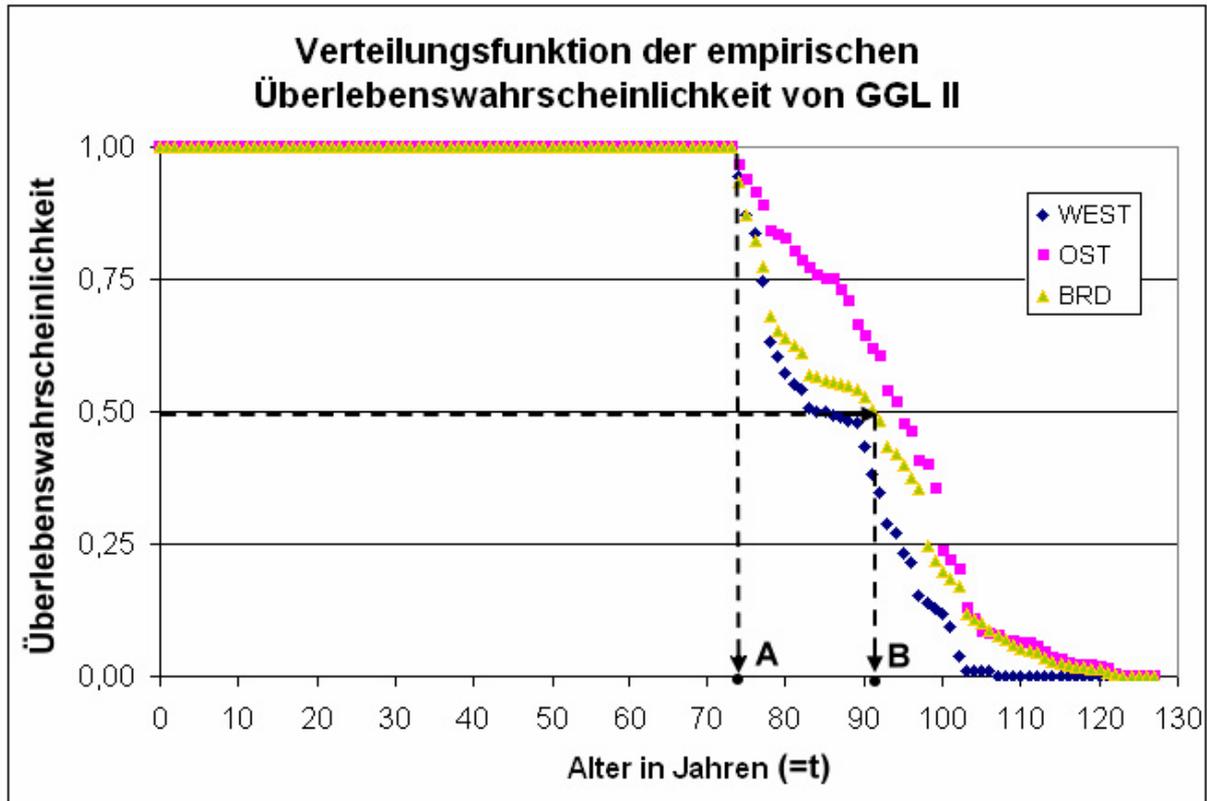


Diagramm 3: Überlebensfunktion für Graugussrohre der II. Generation, Datengrundlage siehe Tabelle 5.1

Die Schwächen einer Berechnung der mittleren Lebenserwartung (mittlere Nutzungsdauer) aufgrund von Bestandsdaten nach den oben erwähnten Gleichungen werden in Tabelle 5.2 offensichtlich. Relativ junge Rohrwerkstoffe wie GGG II und St IV mit optimiertem Korrosionsschutz sollten eine weitaus höhere zu erwartende Nutzungsdauer als die in Tabelle 5.2 gezeigten Werte aufweisen.

Allerdings kann der Wert der hier ermittelten Lebenserwartung statistisch gesehen nur maximal so hoch sein, wie die ältesten verlegten Rohre der jeweiligen Generation (Duktilgussrohre der II. Generation z. B. werden erst seit etwa 1980 verlegt). Ein weiterer Schwachpunkt ist, dass bei erstmaliger Erfassung und Auswertung der Statistik bereits ausgefallene Rohrstränge keinen Einfluss auf das mittlere Rohrnetzalter ausüben.

Die Auswertung der statistischen Daten kann dementsprechend zu falschen Schlussfolgerungen führen.

Um die zu erwartende Nutzungsdauer der neueren Rohrgenerationen wie St IV und GGG II abzustimmen und vergleichen zu können, soll diese Nutzungsdauer für einen längeren Betrachtungszeitraum prognostiziert werden.

Die ältesten Bestandsdaten beziehen sich auf Rohrleitungen, welche um 1875 verlegt wurden [6]. Das Jahr der Auswertung der Statistik war 2002. Der Betrachtungszeitraum wird deswegen für weitere Berechnungen mit 127 Jahren festgelegt (siehe Diagramm 6 und Diagramm 7).

In Tabelle 5.2 ist der Erwartungswert der empirischen mittleren Lebensdauer (Gleichung 5.2) und dessen Streuung (Gleichung 5.4) für die jeweilige Rohrgeneration angegeben.

Tabelle 5.2: Mittlere Lebensdauer (Nutzungsdauer) pro Rohrgenerationen

Generation	Erwartungswert der mittleren Lebensdauer $E(t)$	Streuung σ	Datengrundlage
	Jahre	Jahre	
GGL I	126,5	11,5	BRD [6]
GGL II	90,0	15,5	BRD [6]
GGL III	52,5	13,5	BRD [6]
GGL IIa	31,0	13,0	OST [22]
GGG I	29,0	6,5	BRD [6]
GGG II	12	7,5	BRD [6]
GGG Ia	keine Daten vorhanden		
St I+II	82	11	BRD [6]
St III	53,5	16,5	BRD [6]
St IV	12	8	BRD [6]
St IIIa	30,5	9,0	OST [22]

Der Erwartungswert der mittleren Lebensdauer (zu erwartende Nutzungsdauer) aus den Bestandsdaten aller Rohrgenerationen außer den Generationen GGL I, GGG II und St IV wird für weiteren Berechnungen im Rahmen der Arbeit unverändert wie in Tabelle 5.2 angenommen. Der Erwartungswert der mittleren Lebensdauer für Rohre der Generation GGL I erscheint mit rund 127 Jahren zu hoch. Ursache ist, dass bereits vor Beginn der statistischen Datenerfassung in den WVU die meisten Rohre dieser Generation erneuert wurden. Nur relativ unbeschädigte Rohre in Gebieten mit sehr geringer Bodenaggressivität und relativ schwachen Belastungen durch z.B. Erdreich und Verkehr sind erhalten geblieben und nicht für die Generation GGL I repräsentativ. Infolge dessen wird der Erwartungswert der Generation GGL I dem Wert der Generation GGL II angeglichen.

Rohre der Generation GGG II und St IV mit optimiertem Korrosionsschutz lassen eine weitaus höhere Nutzungsdauer als die in Tabelle 5.2. angegebenen Werte erwarten. Um Plausibilität herzustellen, soll der Erwartungswert dieser beiden Generationen entsprechend dem folgenden Abschnitt korrigiert werden

5.5 Ermittlung und Korrektur der statistischen Restlebensdauer und der mittleren Lebenserwartung

In Diagramm 4 ist beispielhaft der Verlauf der mittleren Lebenserwartung der Rohrgeneration St I+II und GGG II dargestellt. Die Restlebensdauer (auch bedingte Lebenserwartung bzw. Restnutzungsdauer) wurde nach (Gleichung 5.6) ermittelt. Zum Zeitpunkt $t = 0$, also im Betrachtungsjahr, entspricht diese Restlebensdauer dem Erwartungswert der mittleren Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer.

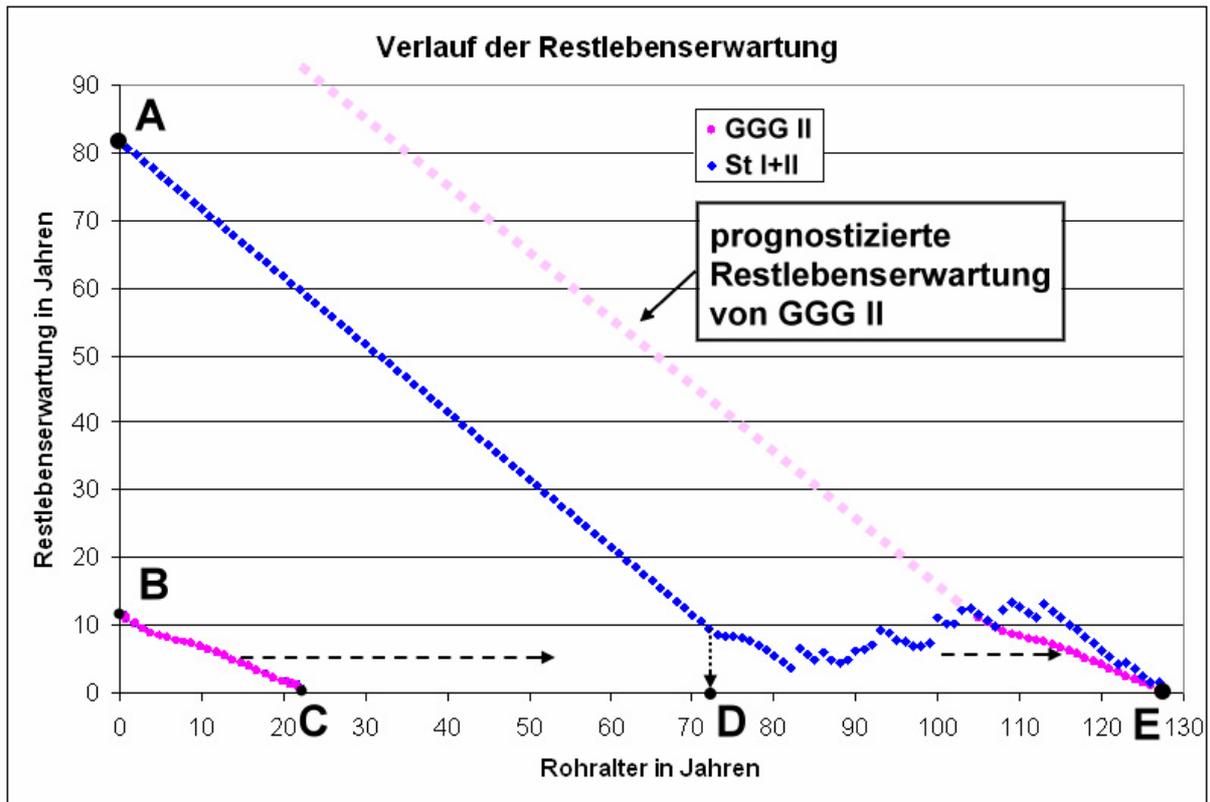


Diagramm 4: Verlauf der Restlebenserwartung von Rohren der Generation St I+II und GGG II

In Diagramm 4 ist zu erkennen, dass Stahlrohre der I. + II. Generation in den Bestandsdaten seit 1875 erfasst bzw. verlegt werden (Punkt E: $2002 - 127 = 1875$) [6]. Seit etwa 1930 (Punkt D: $2002 - 72 = 1930$) wird der Restbestand dieser Rohrgeneration mithilfe der (Gleichung 5.6) fortgeschrieben. Im Betrachtungsjahr (Punkt A) würde die Restlebenserwartung eines angenommen neu verlegten Rohres der Generation St I+II etwa 82 Jahre betragen (vgl. Tabelle 5.2). Dies entspricht dem Erwartungswert der mittleren Lebensdauer bzw. der zu erwartenden Nutzungsdauer.

Rohre der Generation GGG II werden seit etwa 1980 (Punkt C: $2002 - 22 = 1980$) bis heute (hier: Punkt B) verlegt. Die Restlebenserwartung entspräche in etwa 12 Jahre (vgl. Tabelle 5.2). Wie in Abschnitt 5.4 erwähnt fällt diese Annahme der Restlebenserwartung zu negativ aus.

Für eine passende Prognose der Restlebenserwartung bzw. Restnutzungsdauer soll der Betrachtungszeitraum ausgedehnt werden. In DVGW-Hinweis W 401 wird für Rohre der Generation GGG II (hier mit ZMA) eine mittlere technische Nutzungsdauer von 120 Jahren angegeben. Es ist davon auszugehen, dass Stahlrohre der Generation St IV mit vergleichbarem inneren und äußeren Korrosionsschutz eine ähnliche Nutzungsdauer erwarten lassen. Der Betrachtungszeitraum zur Fortschreibung der Restlebenserwartung ist dementsprechend auf rund 120 Jahre auszudehnen und soll im Rahmen der Arbeit 127 Jahre betragen (Anpassung an den Zeitpunkt der ersten Verlegung von Rohren innerhalb der Bestandsdaten [6]).

In Diagramm 4 ist diese Vorgehensweise verdeutlicht. Der Verlauf der Restlebenserwartung der Generation GGG II (Linie BC) wird über die Abszisse zu Punkt E verschoben (angenommener gleicher Startpunkt der Verlegung dieser Rohrgenerationen und analog dem

Verlauf der Generation St I+II bis zum Betrachtungsjahr (Rohralter = 0) fortgeschrieben. Der Schnittpunkt mit der Ordinate ergibt die prognostizierte Restlebenserwartung und den Erwartungswert der mittleren Nutzungsdauer für die entsprechende Generation (hier GGG II).

Eine passende Gleichung, um den tatsächlichen und prognostizierten Verlauf der Restlebenserwartung mathematisch darstellen zu können, ist die Funktion der Restlebenserwartung nach Herz [35]:

$$E(\tau/t) = \begin{cases} c - t + \frac{(a+1) \cdot \ln(a+1)}{a \cdot b} & \text{für } t < c \\ (a + e^{b \cdot (t-c)}) \cdot \left[\frac{\ln(a + e^{b \cdot (t-c)})}{a \cdot b} - \frac{t-c}{a} \right] & \text{für } t \geq c \end{cases} \quad \text{(Gleichung 5.8)}$$

mit:

- t = Alter
- a = Alterungsfaktor
- b = Ausfallfaktor
- c = Resistenzzeit

Die Alterungsparameter a, b und c werden iterativ anhand der Bestandsstruktur bestimmt. Das heißt, es wird das Alter anhand von Bestandsdaten bestimmt, welches von 10%, 50% und 100% der Rohrleitungen erreicht wird:

$$\left. \begin{aligned} \text{von } 100\% \text{ erreicht: } &\Rightarrow t_{100} = c \\ \text{von } 50\% \text{ erreicht: } &\Rightarrow t_{50} = c + \frac{\ln(a+2)}{b} \\ \text{von } 10\% \text{ erreicht: } &\Rightarrow t_{10} = c + \frac{t_{50} - c}{\ln(a+2)} \cdot [\ln(1+0,9 \cdot a) - \ln 0,1] \end{aligned} \right\} \quad \text{(Gleichung 5.9)}$$

Mit der Resistenzzeit c wird das Alter erfasst, welches von 100 % der Rohrabschnitte erreicht wird. Die Funktion nach (Gleichung 5.8) zeigt für $t \geq c$ einen exponentiellen Verlauf und für $t < c$ einen annähernd linearen Verlauf. Der Anstieg der linearen Fortschreibung ist statistisch bedingt gleich (siehe Diagramm 6 und Diagramm 7). Das unterschiedliche Alterungsverhalten der einzelnen Rohrgenerationen wird über den Gesamtverlauf (exponentiell und linear) des Kurvenverlaufs nach Gleichung 5.8 beschreiben.

Die Anpassung der Alterungsparameter der Generation GGL I erfolgt wie oben erwähnt an die Nutzungsdauer der Generation GGL II. Dazu wird die sog. Resistenzzeit c von ursprünglich 124 Jahren um 37 Jahre (Differenz der mittleren Erwartungswerte von GGL I und GGL II) auf 87 Jahre verkürzt wird. Voraussetzung ist die Annahme eines ungefähr gleichartigen Alterungsverhalten (Verschleiß; Korrosion).

Analog wird für die Generationen St IV und GGG II verfahren, wobei neben der neuen Resistenzzeit c auch der Alterungsfaktor a und der Ausfallfaktor b einem angenommenen günstigen Verlauf der Restlebenserwartung angepasst werden. In Diagramm 5 ist beispielhaft der Verlauf der Restlebenserwartung für die Generation GGG II, berechnet nach (Gleichung 5.8), dargestellt.

Der neue prognostizierte Erwartungswert der Lebensdauer in Diagramm 5 (entspricht hier der Restnutzungsdauer zum Zeitpunkt $t = 0$) beträgt im Vergleich zu Tabelle 5.2 etwa 116

Jahre. Auf diese Weise ist die Berücksichtigung einer höheren mittleren (technischen) Lebenserwartung für Duktileitungsrohre bzw. Stahlrohre mit optimalem Korrosionsschutz (entspricht GGG II bzw. St IV) bereits im Vorfeld möglich. Der nun prognostizierte mittlere Erwartungswert der Lebensdauer (Nutzungsdauer) der Generation GGG II (Tabelle 5.3) entspricht wie bereits erwähnt in etwa den in DVGW-Hinweis W 401 angegebenen Werten für Duktileitungsrohre mit optimalen Korrosionsschutz (120 Jahre).

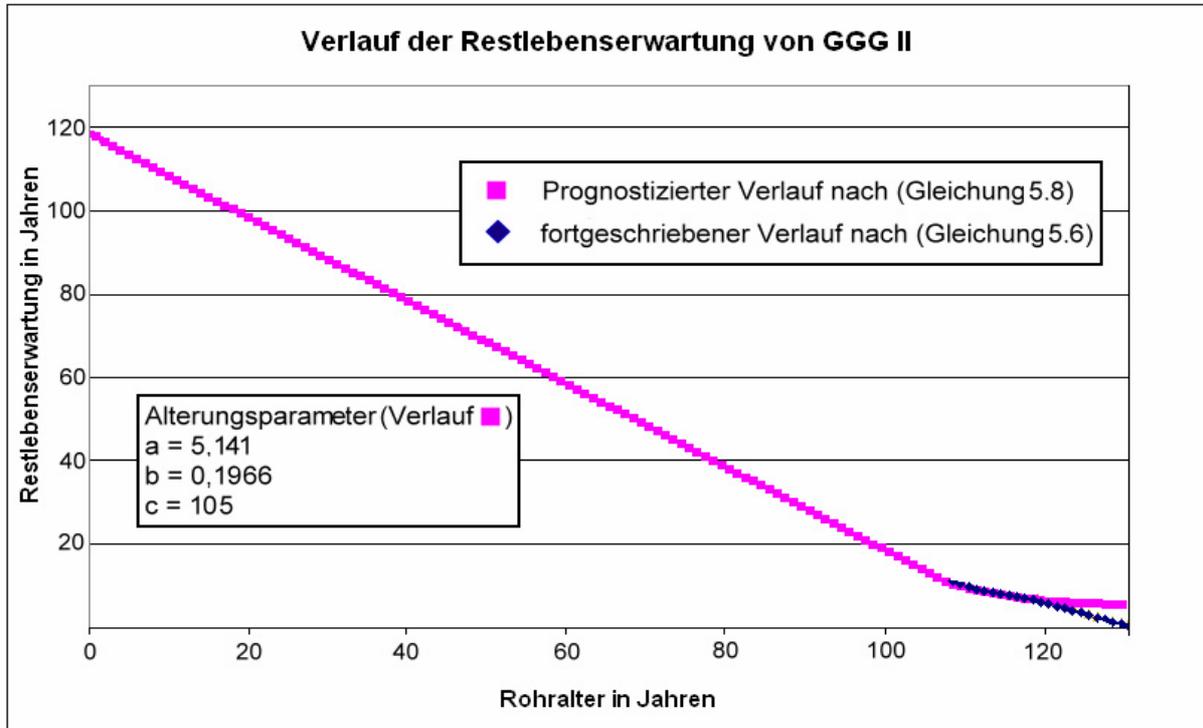


Diagramm 5: Darstellung des ermittelten Verlaufs der Restlebenserwartung von GGG II nach (Gleichung 5.6) und (Gleichung 5.8)

Beispielhaft für die Bestandsdaten der Generation GGG II folgt die Ermittlung der Alterungsparameter. Ebenso wird mit der Generation St IV verfahren.

- Erstverlegung GGG II = 1980 → Differenz : 1980 – 1875 = 105 Jahre
- Alter, welches 10% der Rohre GGG II erreicht haben: t_{10} = 21,5 Jahre
- Alter, welches 50% der Rohre GGG II erreicht haben: t_{50} = 11,0 Jahre
- Alter, welches 100% der Rohre GGG II erreicht haben: t_{100} = 1,0 Jahr

Annahme erreichtes Alter, bezogen auf den Betrachtungszeitraum:

- t_{10} = 20,5 + 105 = 125,5 Jahre
- t_{50} = 10,0 + 105 = 115 Jahre
- t_{100} = 0 + 105 = 105 Jahre

Die dazugehörigen Altersparameter nach (Gleichung 5.9); (siehe Diagramm 5):

- a = 5,141
- b = 0,1966
- c = 105

Trotz der Annahme von optimalem Korrosionsschutz bei ST IV und GGG II entstehen bei der Prognose des Erwartungswertes der mittleren Lebensdauer über einen größeren Zeitraum Unsicherheiten. Die eben erwähnten Rohrgenerationen sind aufgrund ihrer angenommenen langen Lebensdauer bzw. technischen Nutzungsdauer (optimaler Korrosionsschutz und Werkstoffeigenschaften) jedoch für materialtechnische Zustandsuntersuchungen weniger relevant. Die Ermittlung ihrer mittleren Lebensdauer dient vor allem Darstellungszwecken.

In Tabelle 5.3 sind die Alterungsparameter nach (Gleichung 5.9) für die entsprechende Rohrgeneration und der Erwartungswert der mittleren Lebensdauer nach eben genannter Vorgehensweise aufgelistet.

Tabelle 5.3: Angepasste mittlere Lebensdauer und Streuung der Rohrgenerationen auf Grundlage von Alterungsparametern nach Herz [35]

Generation	Ermittlung des Verlaufs der Restlebenserwartung	mittlere Lebensdauer E(t)	Streuung σ
	(Gleichung 5.8)	Jahre	Jahre
GGL I	a: 714,805 b: 2,192 c: 87	90 (angepasst)	11,5
GGL II	(keine Anpassung erforderlich)	90	15,5
GGL III	(keine Anpassung erforderlich)	52,5	13,5
GGL IIa	(keine Anpassung erforderlich)	31	13
GGG I	(keine Anpassung erforderlich)	29	6,5
GGG II	a: 5,141 b: 0,1966 c: 105	116 (Prognose)	.*
GGG Ia	Keine Datengrundlage		
St I+II	(keine Anpassung erforderlich)	82	11
St III	(keine Anpassung erforderlich)	53,5	16,5
St IV	a: 2,075 b: 0,1561 c: 105	115 (Prognose)	.*
St IIIa	(keine Anpassung erforderlich)	30,5	9,0

* praktisch keine Streuung da aufgrund des großen Prognosezeitraums der Verlauf der Restlebensdauer von Beginn an annähernd linear fortschreitet (Diagramm 5)

Der Erwartungswert der mittleren Lebensdauer besitzt für Rohre der neuesten Generationen GGG II und St IV den größten Betrag (Plausibilität).

Der Verlauf der prognostizierten ermittelten Restlebenserwartung je Rohrgeneration nach (Gleichung 5.6 bzw. Gleichung 5.8) ist in Diagramm 6 und Diagramm 7 dargestellt

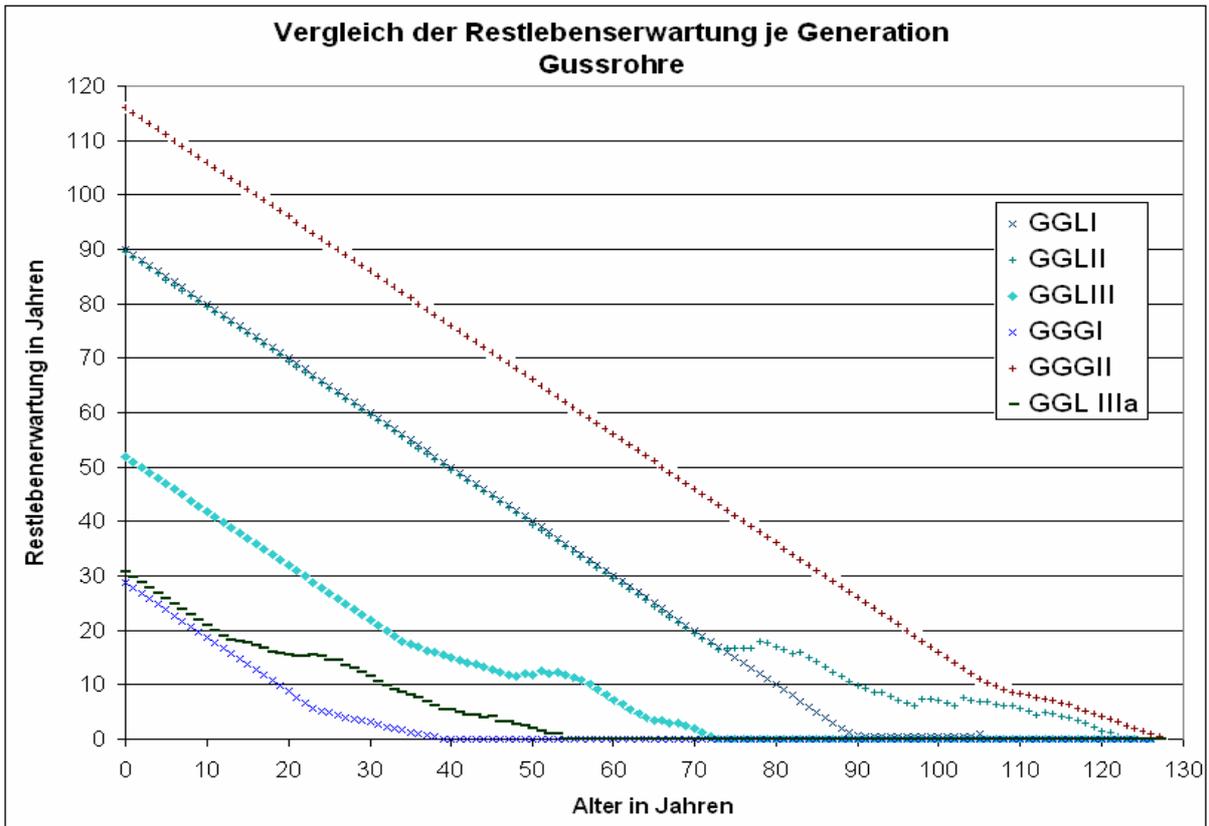


Diagramm 6: Verlauf der Restlebenserwartung von Gussrohren; Ermittlung nach (Gleichung 5.6) bzw. (Gleichung 5.8)

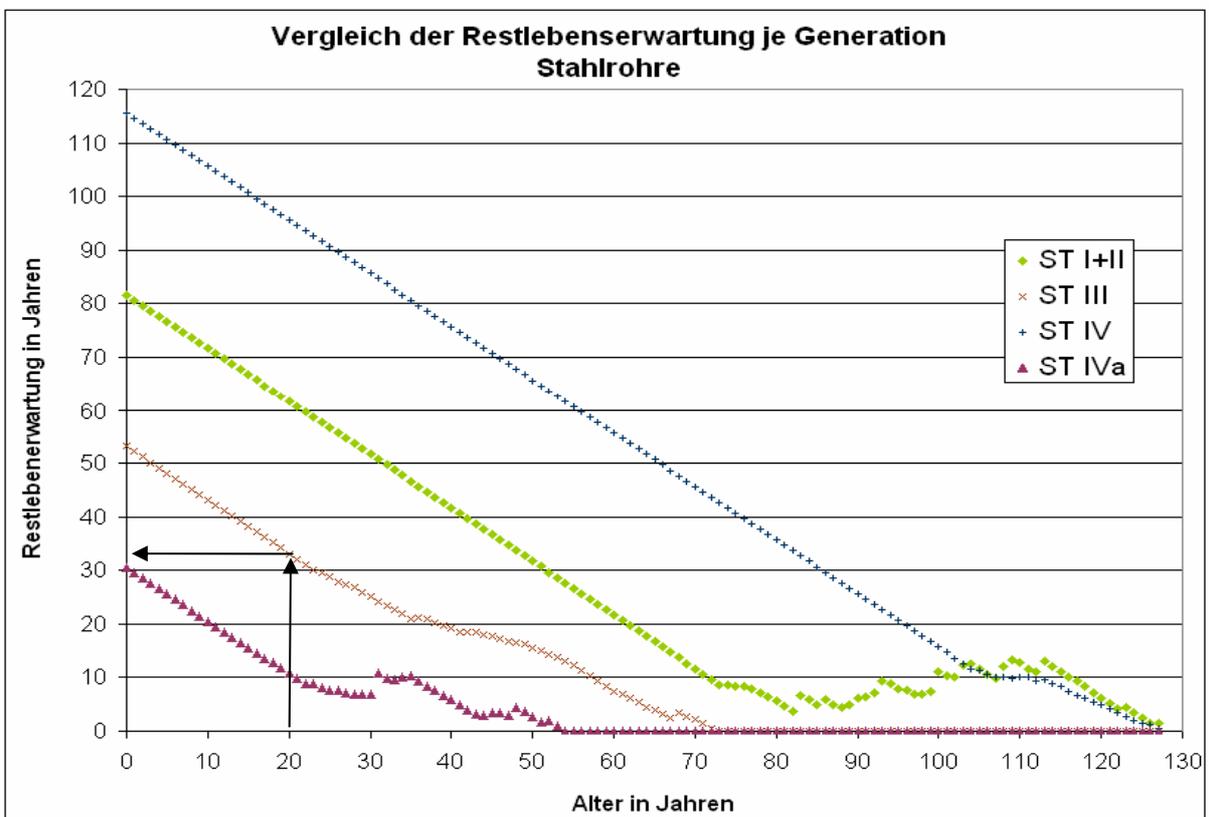


Diagramm 7: Verlauf der Restlebenserwartung von Stahlrohren; Ermittlung nach (Gleichung 5.6) bzw. (Gleichung 5.8)

Ablesebeispiel in Diagramm 7:

Ein Stahlrohr der Generation St III, welches zum Zeitpunkt einer Untersuchung ein Alter von ca. 20 Jahren aufweist, besitzt eine statistische mittlere Restlebenserwartung bzw. Restnutzungsdauer von etwa 32 Jahren (Punkt A).

Bereits sanierte oder erneuerte Leitungen konnten wie in Abschnitt 5.2 erwähnt nicht berücksichtigt werden. Die Ermittlung des Verlaufs der Restlebenserwartung nach (Gleichung 5.6) und die Alterungsfunktionen nach (Gleichung 5.8) bzw. (Gleichung 5.9) nach Herz sind sog. weiche Schätzverfahren [35]. Dadurch sind entsprechende Streuungen um die tatsächliche mittlere Lebenserwartung bzw. zu erwartende Nutzungsdauer vorhanden.

Weitere Korrekturen des Verlaufs der Restlebenserwartung erfolgen deshalb im Rahmen der Arbeit über die Ergebnisse der materialtechnischen Zustandsuntersuchung. Die mittlere Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer wird dadurch entsprechend dem technischen Zustand verlängert oder verkürzt (siehe Kapitel 11).

Für die im Rahmen der Arbeit untersuchten Rohrleitungsproben waren oftmals keine zugehörigen Bestandsdaten vorhanden, mit deren Hilfe die jeweilige mittlere Lebenserwartung ermittelt werden konnte. In diesem Fall wurde auf die in Tabelle 5.3 gezeigten Erwartungswerte der mittleren Lebensdauer und auf den in Diagramm 6 und Diagramm 7 gezeigten Verlauf der Restlebenserwartung zurückgegriffen. Diesen Werten wird die zu erwartende statistische Nutzungsdauer bzw. Restnutzungsdauer gleichgesetzt.

Die Auswertungen der hier genutzten Bestandsdaten beziehen sich wie erwähnt auf einen bundesdeutschen Durchschnitt [6]. Es empfiehlt sich, in einem WVU mit entsprechend vorhandenen Bestandsdaten das mittlere Rohrnetzalter bzw. die mittlere Nutzungsdauer nach oben erwähnten Gleichungen für jede Rohrgeneration separat zu ermitteln. Diese mittlere Nutzungsdauer ist zur Plausibilitätskontrolle mit den Werten aus Tabelle 5.3 abzugleichen.

6. Durchführung der vereinfachten materialtechnischen Zustandsuntersuchung

In den meisten Wasserversorgungsunternehmen ist die Durchführung umfangreicher Verfahren zur materialtechnischen Zustandsbewertung nicht möglich. Deshalb soll im folgenden Abschnitt ein vereinfachtes Verfahren zur materialtechnischen Zustandsbewertung erläutert werden. Zusätzlich wird auf die erforderliche Bestimmung des Herstellungsverfahrens der Rohre eingegangen, um dadurch auf die jeweilige Rohrgeneration und damit verbundene werkstoffspezifischen Eigenschaften zu schließen.

Die Sammlung der rohrspezifischen Daten erfolgt über einen sog. Probenbegleitschein in Anlehnung an DVGW-Arbeitsblatt W 400-3 [8]. Eine Darstellung und Auswertung der gewonnenen Ergebnisse im Rahmen der Arbeit erfolgt in Kapitel 8.

6.1 Rohrprobenbeschaffung

Möglichkeiten zur Bergung von Untersuchungsproben bieten sich bei Aufgrabungen und Arbeiten am Rohrnetz, bei denen ohnehin die entsprechenden Rohrleitungen freigelegt werden müssen. Werden an Reparaturstellen (z.B. bei Auswechslung kurzer Teilstücke) Rohrproben entnommen, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, das Teilstück zu untersuchen, welches den schlechtesten technischen Zustand eines Rohrstrangs anzeigt (da hier die höchste Schadenswahrscheinlichkeit besteht). Weitere Möglichkeiten der Rohrprobenentnahme bieten sich beim Austausch oder Einbau von Armaturen und Einbindung neuer Leitungen [39].

Der notwendige Untersuchungsumfang sollte laut Brussig etwa 3 – 5 % des verdächtigen Rohrleitungsstrangs betragen. Da Rohrleitungsstränge parallel zum Stadtausbau verlegt wurden (typische Blockbebauung mit ca. 100 – 130 m Länge) entspricht dies etwa einer Rohrprobenlänge von 0,5 – 1,0 Metern. Mehrere Untersuchungsstellen optimieren bei Leitungslängen > 200 m die Aussagekraft der Untersuchungsergebnisse. Insbesondere an Stahlrohrleitungen aber auch Graugussrohren sollten die Rohrverbindungen zusätzlich untersucht werden, da diese die Schwachstellen eines solchen Leitungsabschnitts darstellen können (Undichtigkeit) [164].

Auf die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse einzelner Rohrproben auf den gesamten zugehörigen Rohrleitungsabschnitt wird in Kapitel 14 eingegangen.

Während der Bergung und des Transports der Rohrproben ist darauf zu achten, dass weder vorhandene Inkrustierungen noch die Reste des Korrosionsschutzes beschädigt werden, um spätere Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Vor Ort sind analog zu den Bestandsdaten einer Schadensstatistik und den Vorgaben in DVGW-Merkblatt W 395 im Verlauf der Rohrprobenbergung weitere Daten zu erfassen (siehe Tabelle 6.1) [10; 12].

Angaben zu betriebsbezogenen Daten wie Versorgungsdruck, Wasserparameter, Durchflussmenge oder Fließrichtung sind den zugehörigen Bestandsdaten zu entnehmen. Hierbei sind ein Abgleich der Bestandsdaten mit den vorgefundenen Daten und eine Plausibilitätskontrolle sinnvoll. Wichtig ist z. B. das Verlegedatum, falls in den anschließenden Untersuchungen das Rohrherstellungsverfahren nur grob abgeschätzt werden kann.

Die Daten aus Bestandsplänen und Schadensstatistiken sollten außerdem immer mit den Daten der Zustandsuntersuchung abgeglichen und aktualisiert werden.

Tabelle 6.1: Erfassungskriterien bei Datensammlung zum Rohrleitungszustand vor Ort

Hauptangabe	Bemerkung bzw. Unterteilung
Schadensdatum bzw. Bergedatum	
Straßenname	zur Lokalisierung
Gegenüberliegende Hausnummer zur Schadens- bzw. Bergestelle	zur Lokalisierung (wenn möglich)
Lage der Leitung	zur Einschätzung der Verkehrsbelastung und Gefährdung bei Rohrschäden mit Unterteilung in <ul style="list-style-type: none"> - Fahrbahnbereich - Gehwegbereich bzw. befestigte Plätze - Vorgärten oder Grünstreifen - Gleisbereich - freies Gelände - Sammelkanal / Leitungsgang
Oberflächenbefestigung	zur Einschätzung des Arbeitsaufwands bei Freilegung mit Unterteilung in <ul style="list-style-type: none"> - Asphaltdecke - Asphaltdecke auf Pflastersteinen - Betondecke - Betonpflastersteine oder Platten - Naturpflastersteine - unbefestigt (z.B. Schotter, Mutterboden)
Bodenart / Bettung (falls abweichend)	zur Einschätzung der Bodenaggressivität und Lastübertragung mit Unterteilung (augenscheinlich) in <ul style="list-style-type: none"> - Abfälle, Schutt - bindige Böden (z.B. Lehm, Ton) - nicht bindige Böden (z.B. Sand, Kies) - gemischtkörnige Böden - steiniger Boden (auch u. U. anstehender Fels)
Grundwasserstand (wenn erkennbar)	zur Einschätzung von Korrosionsgefährdung und Lasteinwirkung mit Unterteilung in <ul style="list-style-type: none"> - oberhalb der Rohrsohle - unterhalb der Rohrsohle - schwankender Grundwasserstand - nicht erkennbar
Überdeckung	zur Abschätzung der Verlegetiefe, Frostsicherheit und Lastübertragung
Leistungsart	zur Einordnung der Funktion im Netz mit Unterteilung in <ul style="list-style-type: none"> - Hausanschlussleitungen - Versorgungsleitungen (Untersuchungsschwerpunkt) - Zubringer- oder Hauptleitungen
Verbindungsart	falls bei Aufgrabungen an Entnahmestellen die zugehörigen Rohrverbindungsarten erkennbar sind und keine Probeentnahme inkl. Rohrverbindingssystem möglich ist, sollte dies bereits vermerkt werden Ansonsten erfolgt eine weitere Beurteilung der Rohrverbindungsart wie in Tabelle 6.2 beschrieben
Schadensursache	soweit möglich bei offensichtlichen Schäden wie Fremdarbeiten oder Bodenbewegung (Abschnitt 4.9.1)

6.2 Begutachtung der Probe im Labor

Vor weiteren Untersuchungen ist die Rohrprobe äußerlich zu säubern. Die Säuberung wird mittels Drahtbürste und Spachtel durchgeführt. Anhaftende Schmutzpartikel können ungefähre Auskunft über die Art der Bettung geben (z.B. bindiger Boden) falls Angaben zur Bettung der Rohrprobe fehlen.

In Tabelle 6.2 sind die zu erfassenden Untersuchungsdaten aufgelistet.

Tabelle 6.2: Erfassungskriterien bei Datensammlung zum Rohrleitungszustand bei Begutachtung der Rohrprobe im Untersuchungslabor

Hauptangabe	Bemerkung bzw. Unterteilung
Nennweite	zur Klassifizierung mit Unterteilung in - < DN 65 (etwa bis 60 mm mittlerer Durchmesser) - DN 65 (~ 60 – 75 mm) - DN 80 (~ 76 – 90 mm) - DN 100 (~ 91 - 115 mm) - DN 125 (~ 116 - 140 mm) - DN 150 (~ 141 - 165 mm) - DN 175 (~ 166 - 195 mm) - DN 200 (~ 196 - 214 mm) - DN 225 (~ 215 – 239 mm) - DN 250 (~ 240 – 265 mm) - DN 275 (~ 266 – 285 mm) - DN 300 (~ 286 – 315 mm) - DN 325 (~ 316 – 339 mm) - DN 350 (~ 340 – 365 mm) - > DN 350 (> 365 mm)
Verbindungsart	zur Abschätzung der Herstellungszeitspanne (Abschnitt 4.6) und des Gefährdungspotenzials durch undichte Verbindungen, mit Unterteilung in - Flanschverbindungen - Schweißverbindungen - Steckmuffensysteme - Stemmuffensysteme - Schraub- und Gewindeverbindungen - Kupplungssysteme - zugfeste Verbindungen
Rohrwerkstoff	soweit zweifelsfrei möglich zur Klassifizierung und Bestimmung der Rohrgeneration mit Unterteilung in - Grauguss mit Lamellengraphit (GGL) - Grauguss mit Kugelgraphit (GGG) - Stahl (St)

6.3 Erfassung von Korrosionsschutz und Inkrustierungen bzw. Ablagerungen

Die Beurteilung des äußeren und inneren Korrosionsschutzes dient hauptsächlich der Einschätzung, in welchem Ausmaß ein weiterer Angriff durch Korrosionsmedien den metallischen Rohrwerkstoff schädigen kann. Zusätzlich lässt die Ausführung des Korrosionsschutzes Rückschlüsse auf das Herstellungsverfahren zu (Abschnitt 4.5).

Der Grad und die Erscheinungsform der Inkrustierung soll den Abgleich rohrhydraulischer Parameter wie etwa Druck- und Reibungsverluste ermöglichen und als Entscheidungsgrundlage bei geplanten Reinigungs- bzw. Rohrspülplänen zugezogen werden. Ein direkter Einfluss der Inkrustierung auf den technischen Zustand ist nicht vorhanden (Abschnitt 4.9.4). In Tabelle 6.3 sind die zu erfassenden Untersuchungsdaten und deren Klassifizierung aufgelistet.

Tabelle 6.3: Untersuchungsdaten zur Beurteilung von Korrosionsschutz und Inkrustierung

Hauptangabe	Bemerkung bzw. Unterteilung
Art des Korrosionsschutzes	zur Klassifizierung und Rückschlüsse auf Herstellungsverfahren (Abschnitt 4.5), Unterteilung in <ul style="list-style-type: none"> - Bitumen- oder Teerbeschichtungen (innen / außen) - Kunststoffbeschichtung (außen) - Zinküberzug (außen) - Zementmörtelschicht (Umhüllung / Auskleidung)
Flächenanteil des Korrosionsschutzes	zur Beurteilung der Vollflächigkeit bzw. Bedeckungsgrad innen und außen, Unterteilung in <ul style="list-style-type: none"> - 0 % (nicht vorhanden) - 1 – 10 % (Reste vorhanden) - 11 – 40 % - 41 – 60 % (zur Hälfte vorhanden) - 61 – 90 % - 91 – 99 % (fast vollflächig) - 100 % (vollflächig)
Haftungsgrad des Korrosionsschutzes	Annahme einer verminderten Schutzwirkung bei loser Haftung, Unterteilung in <ul style="list-style-type: none"> - lose, fehlender Korrosionsschutz - lockerer Verbund / Haftung - mäßiger Verbund / Haftung - fester Verbund
Flächenanteil Inkrustierung	augenscheinliche Abschätzung des Inkrustierungsgrades (Abbildung 70), Unterteilung in <ul style="list-style-type: none"> - keine Inkrustierung A - wenig Inkrustierung B - mittelmäßig Inkrustierung C - starke Inkrustierung D - vollständig zugesetzt E
Struktur der Inkrustierung	zur rohrhydraulischen Einschätzung (Abbildung 67), (Abbildung 68), Unterteilung in <ul style="list-style-type: none"> - knollenartig, vereinzelt - knollenartig, vollflächig - flächig - dünnschichtig

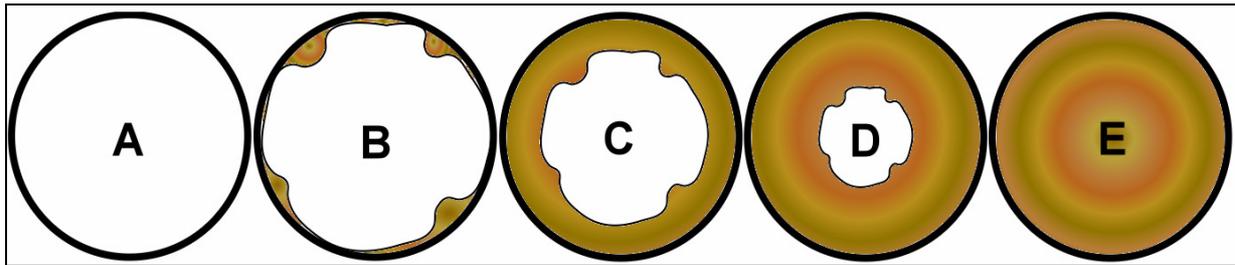


Abbildung 70: Grad der Inkrustierung

Die Einschätzung des Flächenanteils des Korrosionsschutzes erfolgt nach Augenschein. Bei starker Verschmutzung der Rohraußenseite und starker Inkrustierung der Rohrinneenseite können Reste eines bitumen- oder teerhaltigen Korrosionsschutzes mittels Heißluftpistole nachgewiesen werden. Die dabei schmelzende Bitumen- oder Teermasse wird durch Schwarzfärbung sichtbar (Abbildung 71).



Abbildung 71: Reste eines bituminösen Korrosionsaußenschutz werden durch Erhitzung mittels Heißluftpistole sichtbar gemacht (rechtes Bild)

Die Beurteilung der Haftung des Korrosionsschutzes wird ebenfalls augenscheinlich vorgenommen. Während der in Abschnitt 6.5 beschriebenen Freilegung der blanken metallischen Rohroberfläche ist der Haftungsgrad abschließend zu beurteilen, wenn fest haftende Reste des Korrosionsschutzes abgestrahlt werden.

Über Betrachtung der Reste des äußeren oder inneren Korrosionsschutzes unter UV-Licht ist die Unterscheidung zwischen bitumen- oder teerhaltiger Beschichtung möglich (Abschnitt 4.5.1).

6.4 Aufbereitung der Rohrprobe

Die Rohrproben sind für weitere Untersuchungen in entsprechend kleinere Teilstücke zu trennen. Dazu gehört das Zuschneiden kleiner Probenabschnitte (max. 30 cm Länge) für eine anschließende Freilegung der metallischen Rohroberfläche (Abschnitt 6.5) und ggf. das Herausstrennen kleinerer Probestücke (Abbildung 72) für erweiterte metallographische Untersuchungen (Abschnitt 7.1). Das zu untersuchende Probestück sollte eine Breite von etwa 30 mm aufweisen (Draufsicht Kreisringsegment). An Stahlrohren sind Probenstücke entgegen der Darstellung in Abbildung 72 längs zur Rohrachse herauszutrennen.

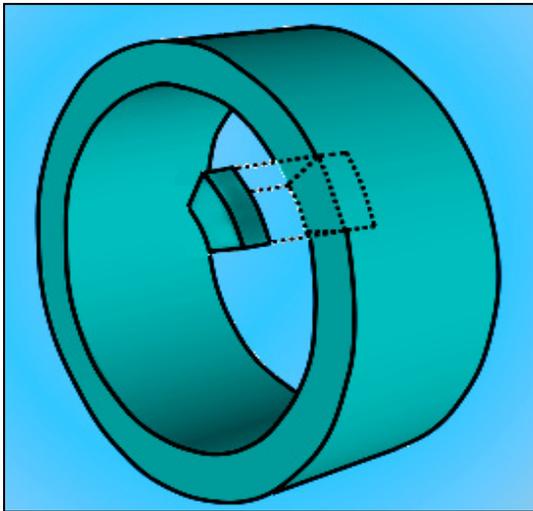


Abbildung 72:
Skizzenhafte Darstellung der Entnahmestelle und Probenform für metallographische Untersuchungen bei Gusseisen



Abbildung 73: Graphitisiertes Graugussrohr mit Längsriß vor dem Strahlprozess

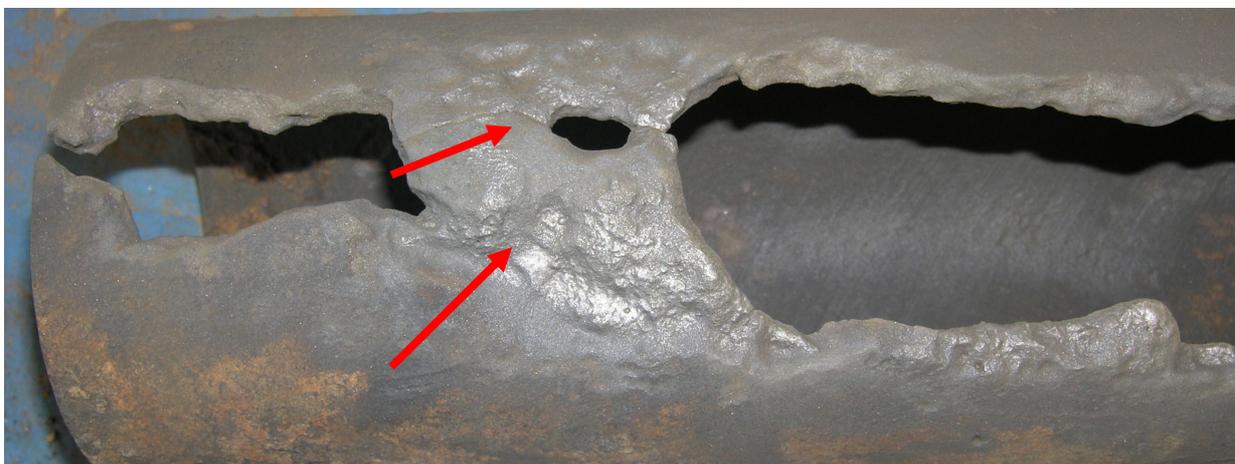


Abbildung 74: Freigelegte Fehlstellen durch Graphitierung nach dem Strahlprozess

In einer sog. Strahlkammer werden die auf ca. 30 cm zugesägten Probestücke von Korrosionsprodukten, Inkrustierungen und Schmutzpartikeln gereinigt, bis die metallische Rohroberfläche freiliegt. Als Strahlgut eignen sich sehr kleine Metallkugeln mit max. Durchmesser von 1 mm, da diese im Vergleich zu Sandstrahlgut eine annähernd gleiche Härte aufweisen und bei notwendigen langwierigen Strahlprozessen nicht unnötig unbeschädigtes Material abtragen. Während des Strahlprozesses werden zusätzlich mögliche Signaturen oder verdeckte graphitierte Stellen sichtbar (Abschnitt 4.6.4), (Abbildung 73; Abbildung 74).

6.5 Erfassung von Schadensart, Korrosionsart und Rohrherstellungsverfahren

In Anlehnung an Abschnitt 4.9 wird die Erfassung der Schadens- und Korrosionsarten durchgeführt. Das Ausmaß der Korrosion wird messtechnisch erfasst (Tabelle 6.4).

Um das Ausmaß der Schädigung (Substanzverlust) zu bestimmen, ist ergänzend die Restwanddicke am blank gestrahlten Teilstück zu messen. Die Messpunkte sollten sich an den jeweils gegenüberliegenden Rohrenden und Rohrscheitelpunkten befinden bzw. sollte die augenscheinlich maximale und minimale Wanddicke erfasst werden.

Die augenscheinliche Abschätzung des Flächenanteils bezieht sich auf die zu untersuchende Rohrprobenoberfläche am Teilstück. Eine genauere messtechnische Erfassung ist z. B. mit photometrischen Methoden möglich. Zu dieser Methode werden digitale Einzelaufnahmen, in passenden Einzelabständen über den abgewickelten Rohrumfang verteilt von der blank gestrahlten Rohroberfläche gemacht (Abbildung 75). Über Bildanalysesoftware und dazugehörigen Farb- und Belichtungsabgleich ist dann die Flächenverteilung korrodierter und nicht korrodierter Stellen messbar. Im Vergleich zur augenscheinlichen Erfassung ist diese Methode jedoch zeitaufwendig und setzt die nötige Analysetechnik voraus.

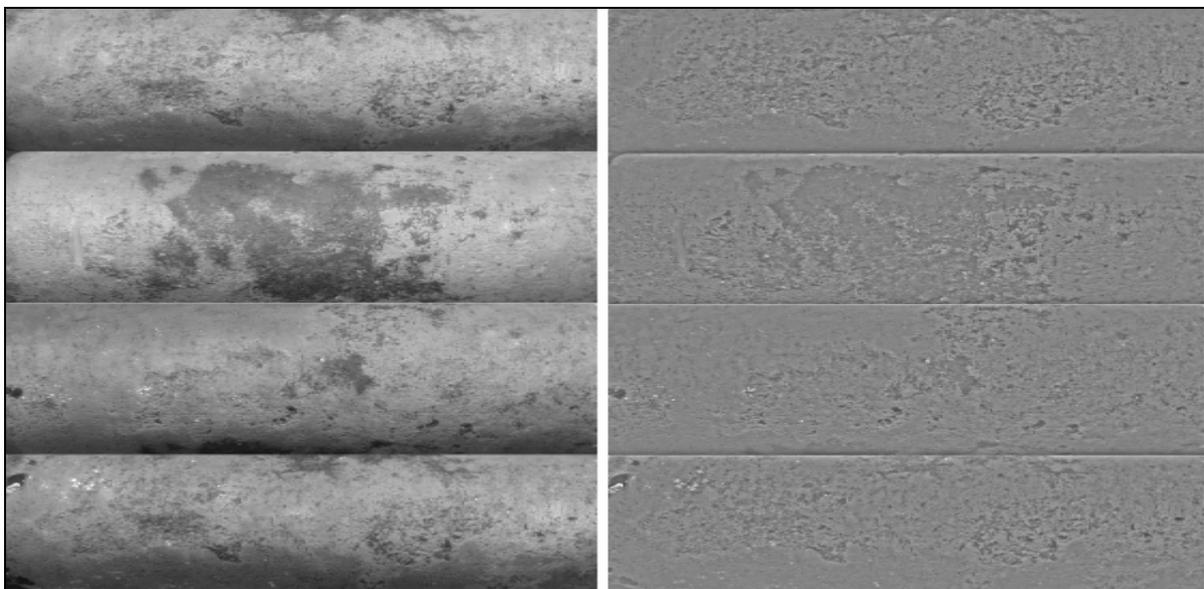


Abbildung 75: Photometrische Analyse der Flächenverteilung der Korrosionsart, hier Flächenkorrosion außen; rechts ist die von Flächenkorrosion angegriffene Rohroberfläche als dunkel markierter Bereich erkennbar, während Schattenbereiche herausgefiltert wurden

Tabelle 6.4: Erfassungsdaten zur weiteren Beurteilung von Schadensart und Korrosionsart

Hauptangabe	Bemerkung bzw. Unterteilung
Wanddicke	zur Beurteilung der tatsächlichen Restwanddicke wie oben beschrieben, Messung auf 1/10 Millimeter genau
Schadensart	zur Beurteilung des Schädigungsgrades, Unterteilung nach Abschnitt 4.9.1 in <ul style="list-style-type: none"> - Querbrüche - Schalenbrüche - Rundrisse - Längsrisse - Korrosion - undichte Verbindungen - übermäßige Verformungen
Korrosionsart	zur Beurteilung des Schädigungsgrades innen und außen, bei mehr als einer Korrosionsart pro Rohrseite erfolgt die Erfassung von max. zwei dominierenden Korrosionsarten, Unterteilung nach Abschnitt 4.9.2 in <ul style="list-style-type: none"> - Lochkorrosion - Narben- bzw. Zeilenkorrosion - Muldenkorrosion - Flächenkorrosion - Graphitierung
Korrosionsgrad	zur geometrischen Erfassung der Korrosionsarten innen und außen und weiteren Beurteilung, Messung auf 1/10 Millimeter genau, Unterteilung in <ul style="list-style-type: none"> - mittlere Tiefe (praktisch Eindringtiefe) - mittlerer Durchmesser (bzw. Narbenbreite) - Flächenanteil (Abbildung 75)
Rohrherstellungsverfahren	Zur Einteilung in Rohrgenerationen, Erkennung laut Abschnitt 4.2 bis Abschnitt 4.4, Einteilung in <ul style="list-style-type: none"> - GGL I - GGL II bzw. GGL IIa - GGL III - GGG I bzw. GGG Ia - GGG II - St I - St II - St III bzw. St IIIa - St IV

7. Durchführung der präzisierten materialtechnischen Zustandsuntersuchung

Die vorherigen genannten Untersuchungsschritte in Kapitel 6 dienen der Erfassung notwendiger Daten zur Bestimmung des Schädigungsgrades des Rohrwerkstoffs und des Korrosionsschutzes (notwendig für weitere Berechnungen in Kapitel 11). Für eine eindeutige Werkstoffbestimmung und Zuordnung der Rohrgeneration kommt die in Abschnitt 4.7 erwähnte Methodik der Metallographie zur Anwendung. Fehlende Werkstoffeigenschaften (Abschnitt 4.8) zur Berechnung der Resttragfähigkeit werden durch entsprechende statische Versuche (Abschnitt 7.2 bis Abschnitt 7.3) ermittelt.

Mittels der präzisierten materialtechnischen Zustandsuntersuchung werden die Untersuchungsergebnisse verfeinert und deren Aussagekraft erhöht. Präzisierte Untersuchungen empfehlen sich bei größerem Netzbestand gleichartiger Rohrgenerationen. Entstehende Mehrkosten durch erhöhten Untersuchungsaufwand werden durch die Anzahl gleichartiger Rohrgenerationen ausgeglichen. Die Untersuchungskosten pro Rohrstrang verringern sich, wenn die Untersuchungsergebnisse bei ähnlichen Verlegebedingungen auf andere gleichartige Rohrstränge übertragen werden können (siehe Abschnitt 14.1).

7.1 Metallographische Untersuchungen

Die metallographischen Untersuchungen zur Erkennung des mikroskopischen Metallgefüges nach den Abbildungen in Abschnitt 4.7 werden an präparierten Probestücken, wie in Abbildung 72 gezeigt, durchgeführt. Dazu wird das Probestück für den sog. Metallschliff vorbereitet, indem es in entsprechenden Formen mit Bettungsmitteln eingebettet wird. Am häufigsten kommen Kalteinbettmittel zur Anwendung, die nach dem Mischen aus zwei Kunststoff-Komponenten (z.B. Methylmethacrylate, Epoxidharze oder ungesättigte Polyesterharze) aushärten und das Schleifen und Polieren der Probestücke ermöglichen.

Durch geeignetes Schleifpapier mit Schleifkörnern aus Siliziumcarbonat, Aluminiumoxid oder Diamant (je nach Härte) wird die Probe mit stufenweise feinerer Körnung plan geschliffen bis keine Schleifspuren an der behandelten Metalloberfläche erkennbar sind. Die Angabe der Körnung von Schleifpapieren erfolgt über die sog. Körnungszahl (je größer die Körnungszahl, umso feiner die Körnung bzw. umso kleiner die Korngröße). Der übliche Abstufungsbereich der Körnung liegt zwischen einer Körnungszahl von 200 – 1000. Anschließend muss das Probestück poliert werden, um Schleifmittelreste und feinste Unebenheiten zu entfernen. Als Polier- oder Abrasivmittel kommt eine Diamantsuspension mit einem Korngrößendurchmesser von 3 – 15 µm zur Anwendung.

Die mikroskopische Betrachtung der präparierten Probe erfolgt unter einem Auflichtmikroskop. Entsprechend den Hinweisen in Abschnitt 4.7 müssen Stahlproben zur Erkennung der Kornstruktur geätzt werden.

Tabelle 7.1: Erfassungsmerkmale bei metallographischen Untersuchungen an Teilstücken von Rohrproben

Hauptangabe	Bemerkung bzw. Unterteilung
Mikroskopische Kornstruktur	zur eindeutigen Werkstoffbestimmung oder Erkennung etwaiger Korrosionskeime, Unterteilung in - Lamellengraphit, grob (Abbildung 35) - Lamellengraphit, fein (Abbildung 42) - Lamellengraphit, knotenförmig (Abbildung 37) - Kugelgraphit (Abbildung 45) - sekundäres Zeilengefüge (Abbildung 47)

Andere Erscheinungsformen der mikroskopischen Kornstruktur sind zwar möglich (z. B. Abbildung 39) aber zur Werkstoffbestimmung und Erkennung von Korrosionskeimen im Rahmen der Untersuchungen nicht weiter relevant.

7.2 Ermittlung der Zugfestigkeit an Rohrproben

Die Zugfestigkeit wird durch statische Versuche an passenden Probekörpern nach den in Tabelle 4.6 genannten Regelwerken ermittelt. Zusätzlich gewonnene Kenngröße während der Versuche ist der E-Modul. Beide Werte sind für rohrstatische Berechnungen nach ATV A 127 und wie in Kapitel 10 beschrieben notwendig.

Aufgrund des annähernd isotropen Verhaltens der Rohrwerkstoffe Grauguss, Duktulguss und Stahl können die Zugproben längs zur Rohrachse herausgearbeitet und geprüft werden (Flachproben).

7.2.1 Ermittlung der Zugfestigkeit an Grauguss-Rohrproben

In Deutschland werden heutzutage keine Trinkwasserrohre mehr aus Grauguss hergestellt. Dementsprechend existieren keine aktuell gültigen Prüfvorschriften zur Ermittlung und Kontrolle von Materialeigenschaften und Festigkeitswerten (z.B. Zugfestigkeit). Um dennoch passende Anhaltspunkte bzw. Vorgehensweisen für statische Versuche zu nutzen, wurden die Angaben aus DIN EN 877 (gültig für Entwässerungsleitungen aus Grauguss – auch Druckleitungen – Stand 1999) herangezogen [123]. Zusätzliche Angaben wurden aus DIN 50125 genutzt (allgemeine Anfertigung und Prüfung metallischer Probekörper) [165].

Die Probenform nach DIN EN 877 gilt für Versuche an Graugussrohren mit Lamellengraphit. Da die Rohrherstellungsverfahren und Belastungsvarianten (möglicher Innendruck) dem von Trinkwasserrohren entsprechen, ist eine Übertragbarkeit möglich. Aus messtechnischen Gründen ist die Verwendung der in Abbildung 76 gezeigten Probeform unpassend. Der für statische Berechnungen notwendige E-Modul kann nicht erfasst werden, da aufgrund der geringen Länge der Probe ein Dehnungsmessgerät nicht an der Probe angebracht werden kann.

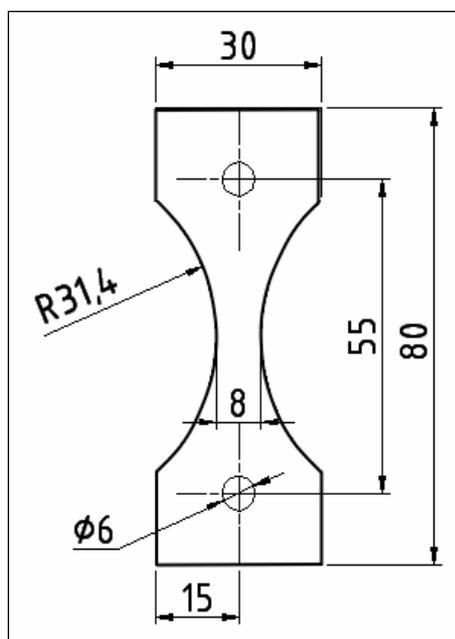


Abbildung 76:
 Probenform für Zugversuche nach DIN EN 877 [123]
 (Maßangaben in Millimeter, Abbildung nicht maßstäblich)

Somit war es notwendig, eine neue Probenform für Zugversuche zu entwerfen. Zur Orientierung dienen die Angaben zur Probenanfertigung nach DIN 50125 und DIN EN 10002, da hier eine ausreichende Probenlänge zur Anbringung des Dehnungsmessgerätes vorhanden ist [125; 165].

Die Zugproben werden in einer passenden Maschine mit einer maximalen Höchstzugkraft von 200 kN geprüft. Dazu werden normalerweise die Zugprobenköpfe zwischen zwei Metallbacken eingespannt. Aufgrund der gewölbten Form der Zugproben in Umfangsrichtung ist eine vollflächige Einspannung nicht möglich. Deswegen müssen die Proben mit einer Bohrung in Probenkopfmitte versehen werden, um eine gelenkige Einspannung mittels Bolzen zu gewährleisten (Abbildung 78 und Abbildung 77).

Die Grenzabmessungen der Zugproben richten sich nach den Vorgaben in DIN 50125 bzw. DIN EN 10002, nach der Höchstzugkraft an der Prüfmaschine und einem ausreichend großen Verhältnis der Querschnittsflächen in Zugrichtung von Probenkopf und Probensteg (Abbildung 78). Dieses Verhältnis sollte ungefähr 3:1 betragen, da es durch die Bohrung zu Kerbwirkungen im Probenkopf und damit höheren Zugspannungen kommen kann.



Abbildung 77: Probenhalterung zur gelenkigen Einspannung der Flachproben

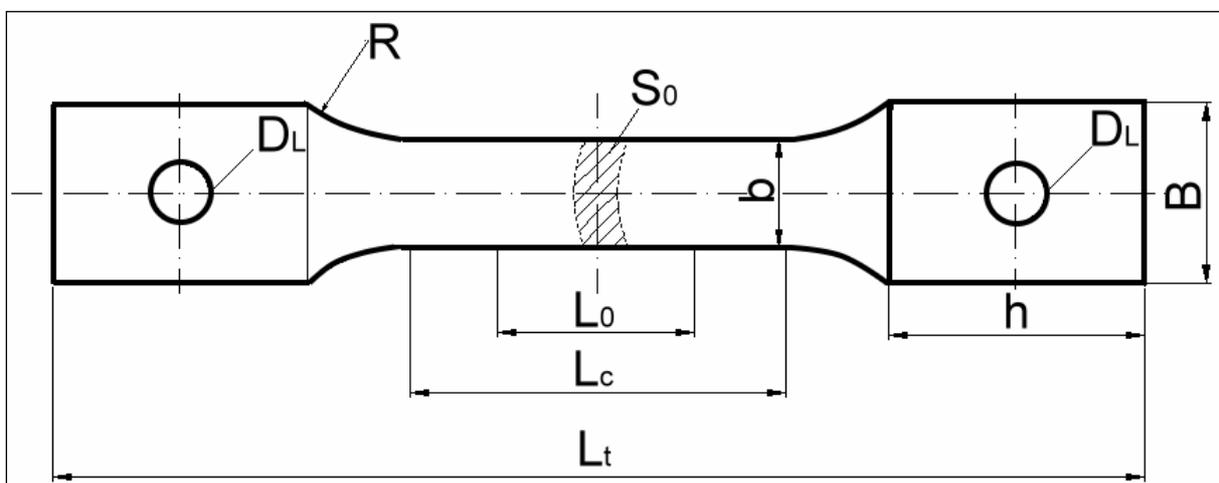


Abbildung 78: Flachprobe aus GGL für Zugversuche (Abbildung nicht maßstäblich)

Die Bezeichnungen der Flachprobe in Anlehnung an DIN EN 10002 lauten:

- Probenkopfbreite B
- Probenkopfhöhe h
- Probendicke a (entspricht der Rohrwanddicke)
- Probenbreite b
- Anfangsmesslänge L_0 (zur Messung der Bruchdehnung)
- Versuchslänge L_c
- Gesamtlänge L_t
- Probenkopfradius R
- Bohrungsdurchmesser D_L
- Anfangsquerschnitt innerhalb der Versuchslänge S_0
- Querschnitt Probenkopf S_{PK}

Alle Maße in Millimeter. Die Flächen S_0 und S_{PK} können über den Inhalt einer Rechteckfläche abgeschätzt werden ($a \cdot b$). Die genaue Querschnittsfläche berechnet sich in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers zu:

$$S_0 = \left(\frac{b}{4}\right) \cdot \sqrt{(D^2 - b^2)} + \frac{D^2}{4} \cdot \arcsin \frac{b}{D} - \left(\frac{b}{4}\right) \cdot \sqrt{(D-2a)^2 - b^2} - \left(\frac{D-2a}{2}\right)^2 \cdot \arcsin \left(\frac{b}{D-2a}\right)$$

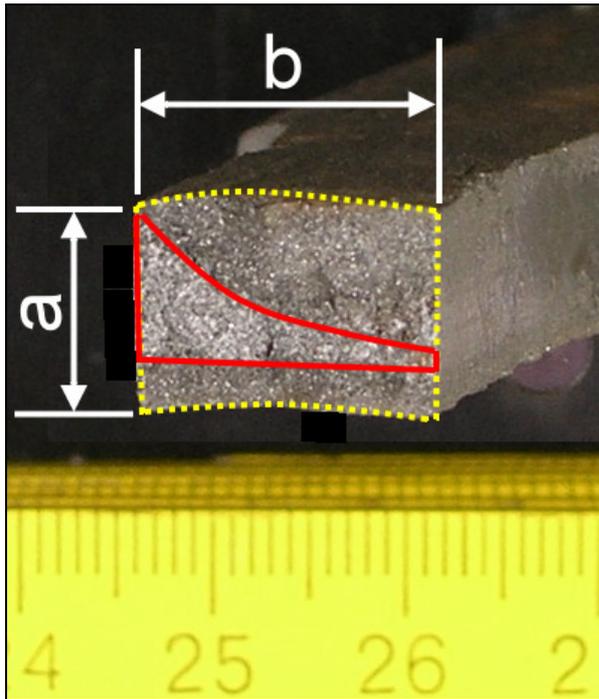
(Gleichung 7.1)

mit:

- Rohraußendurchmesser D [mm]
- Rohrwanddicke a [mm]
- Probenbreite b (bzw. Probenkopfbreite B) [mm]
- Winkelfunktionen im Bogemaß (RAD)

Den Abmessungen der Flachprobe in Abbildung 78 sind wie oben erwähnt Grenzmaße gesetzt. Im Rahmen der Arbeit und in Anlehnung an DIN 50125 bzw. DIN EN 10002 sind das:

- Mindestrohrwanddicke = 3 mm
- Gesamtprobenlänge L_t = 300 mm
- Anfangsmesslänge L_0 $\geq 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$
- Versuchslänge L_c $\geq L_0 + 1,5 \cdot \sqrt{S_0}$
- Probenkopfradius R ≥ 35 mm
- Bohrungsdurchmesser D_L = 16 mm
- Abstand Mittelpunkt Bohrung – Probenkopfrand
 - in Querrichtung $\geq 1,5 \cdot D_L$
 - in Längsrichtung $\geq 1,2 \cdot D_L$
- Verhältnis S_0 zu S_{PK} = 1 : 3
- Höchstprüfkraft ≥ 20 kN (im Rahmen der Untersuchungen)



Sind nach dem Bruch einer Zugprobe am Bruchquerschnitt Imperfektionen wie Lunker, Gasblasen oder Graphitierung (Abschnitt 4.9.1) erkennbar, ist nötigenfalls der Bruchquerschnitt im Vergleich zu S_0 für weitere Berechnungen neu zu ermitteln (Abbildung 79).

Abbildung 79:

Verminderung der wirksamen Querschnittsfläche durch Graphitierung (dunkle Bruchfläche).

Die neue Querschnittsfläche (rote Linie) ist annähernd einer Dreiecksfläche neu zu ermitteln.

Die bereits genannten und nachfolgenden Berechnungen beziehen sich laut Vorgaben in den entsprechenden Regelwerken auf den Anfangsquerschnitt S_0 bzw. auf die Anfangsmesslänge L_0 [125].

Grauguss besitzt keine nennenswerte Bruchdehnung ($< 1\%$). Die Ermittlung der wirksamen Querschnittsfläche (siehe Abbildung 79) ist deshalb nachträglich am Bruchquerschnitt möglich.

Die Zugfestigkeit berechnet sich zu:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{Gleichung 7.2})$$

mit:

- F = Höchstzugkraft in N
- S_0 = Anfangsquerschnitt bzw. bei Grauguss im Falle von Imperfektionen die angepasste Querschnittsfläche nach Bruch in mm^2 (Abbildung 79)

Grauguss mit Lamellengraphit weist im Vergleich zu Duktilguss oder Stahl keinen linearen Zusammenhang zwischen Zugspannung und Dehnung auf. Der E-Modul ist näherungsweise zu ermitteln (Annahme eines linearen Dehnungsverhaltens). Dies erfolgt über das Anlegen einer Tangente an die sog. Spannungs-Dehnungslinie (Arbeitslinie) wie in Abbildung 80 beispielhaft dargestellt oder über die Vorgehensweise bei nicht proportionaler Dehnung nach DIN EN 10002 [47; 125].

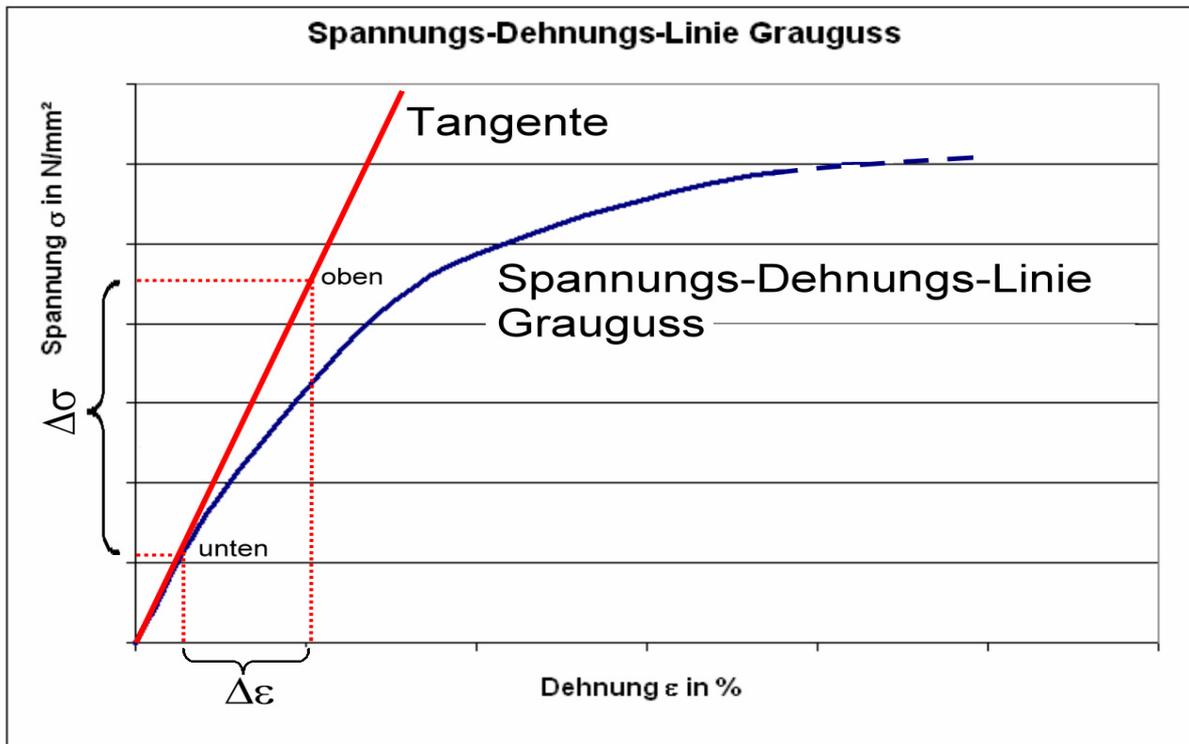


Abbildung 80: Ermittlung des E-Moduls anhand einer an die Spannungs-Dehnungslinie angelegten Tangente

Der E-Modul ermittelt sich zu:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} = \frac{(F_o - F_u) / A}{(l_o - l_u) / l_n} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{Gleichung 7.3})$$

mit:

- F = Zugkraft am jeweiligen Messpunkt (oben / unten) in N
- A = entspricht S_0 bzw. dem wirksamen Querschnitt in mm^2
- l_o / l_u = Dehnlängen am jeweiligen Messpunkt in mm
- l_n = entspricht Anfangsmesslänge L_0 in mm bzw. der Länge der Dehnungsmessvorrichtung

Die Bruchdehnung A_c errechnet aus der gemessenen bleibenden Verlängerung der Zugprobe nach dem Versuch. Da Grauguss keine plastischen Werkstoffeigenschaften besitzt, fällt dieser Wert sehr gering aus (Tabelle 4.33). Er errechnet sich zu:

$$A_c = \left(\frac{L_0 - L_u}{L_0} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{Gleichung 7.4})$$

mit:

- L_0 = Anfangsmesslänge in mm
- L_u = Messlänge nach dem Bruch in mm

Die Druckfestigkeit von Grauguss beträgt i. A. den vierfachen Wert der Zugfestigkeit [98]. Die Bestimmung des genauen Wertes durch statische Versuche für Tragfähigkeitsberechnungen ist somit nicht relevant.

7.2.2 Ermittlung der Zugfestigkeit an Duktilguss- und Stahlrohrproben

Das relevante Regelwerk zur Durchführung von Versuchen zur Ermittlung der Zugfestigkeit an Duktilguss- und Stahlrohrproben ist die bereits erwähnte DIN EN 10002. Die Anfertigung der Flachproben erfolgt analog Abschnitt 7.2.1 bzw. Abbildung 78. Da die gewölbten Probeköpfe bei Duktilguss- und Stahlrohren flachgedrückt werden dürfen, entfällt die Bohrung [125]. Die Proben werden mit Hilfe von Spannbacken gehalten.

Zugfestigkeit und Bruchdehnung werden analog nach (Gleichung 7.2) und (Gleichung 7.4) ermittelt. Der E-Modul berechnet sich nach (Gleichung 7.3) für den Bereich des linearen Anstiegs (proportionales Verhalten) der Spannungs-Dehnungslinie (Abbildung 81).

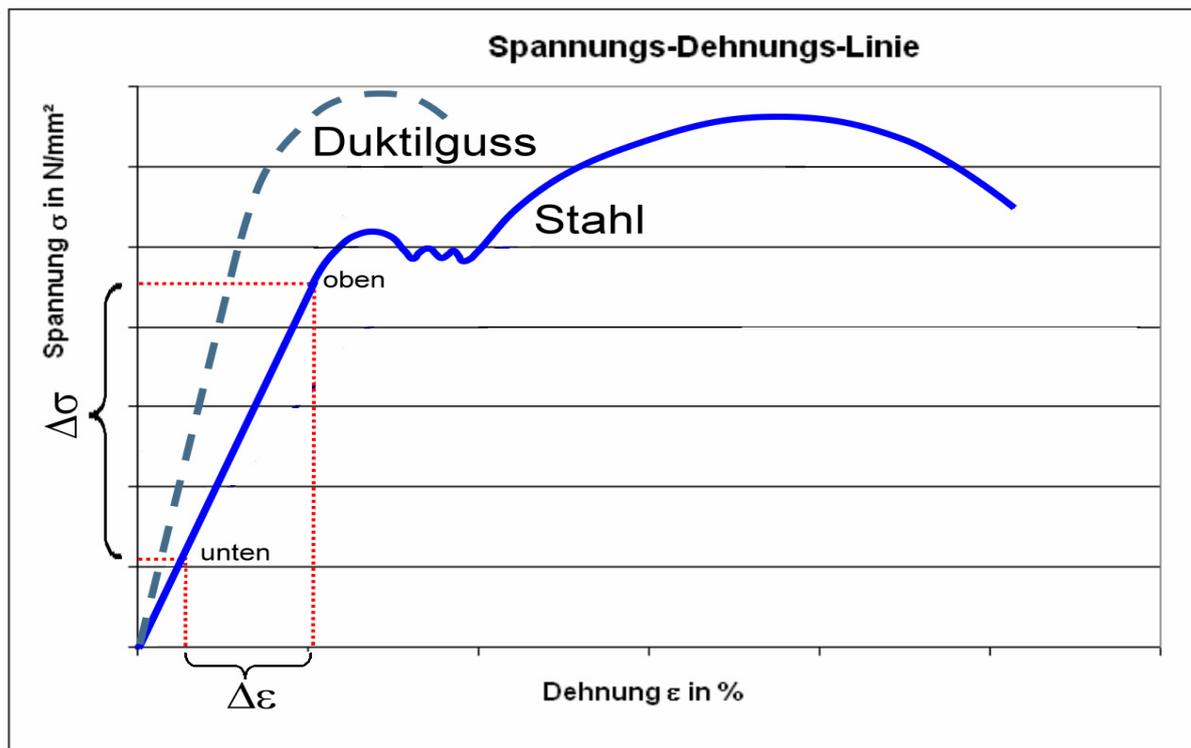


Abbildung 81: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Duktilguss und Stahl (beispielhaft)

In Abbildung 82 und Abbildung 83 ist beispielhaft der Spannungs-Dehnungsverlauf von zwei im Rahmen der Arbeit untersuchten Zugproben veranschaulicht.

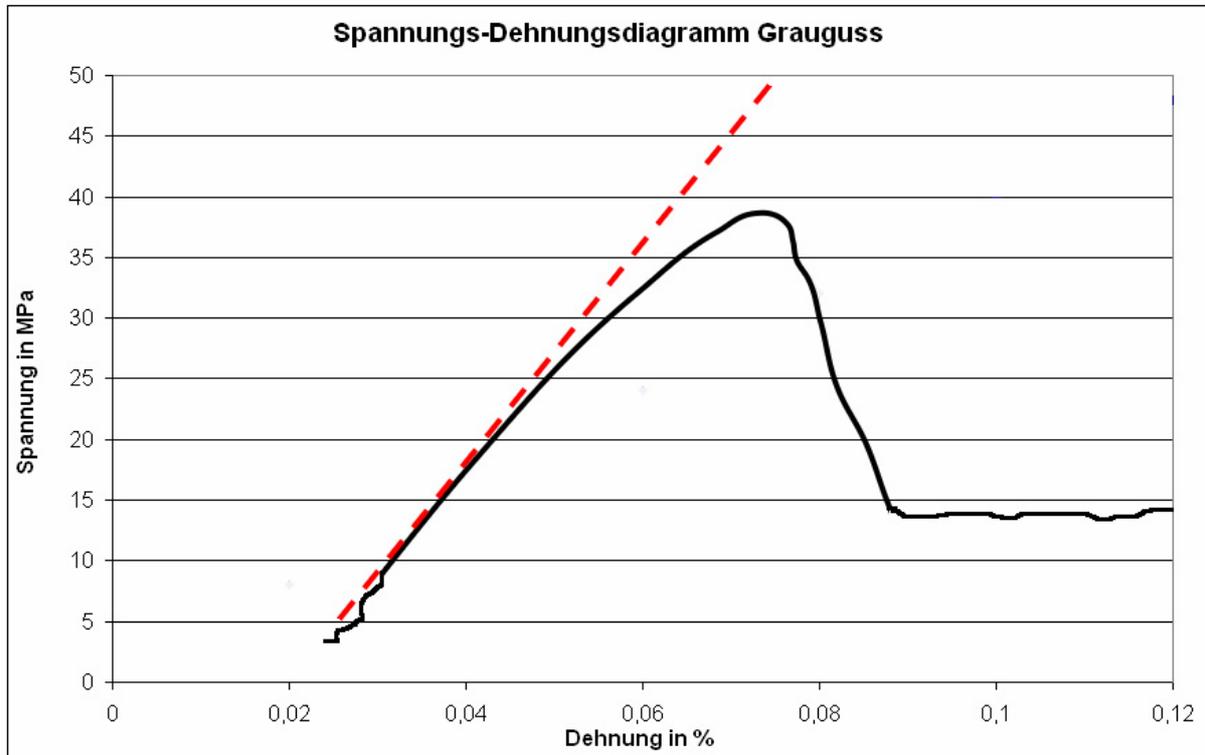


Abbildung 82: Spannungs-Dehnungsverlauf einer Graugussrohrprobe; (DN 150)

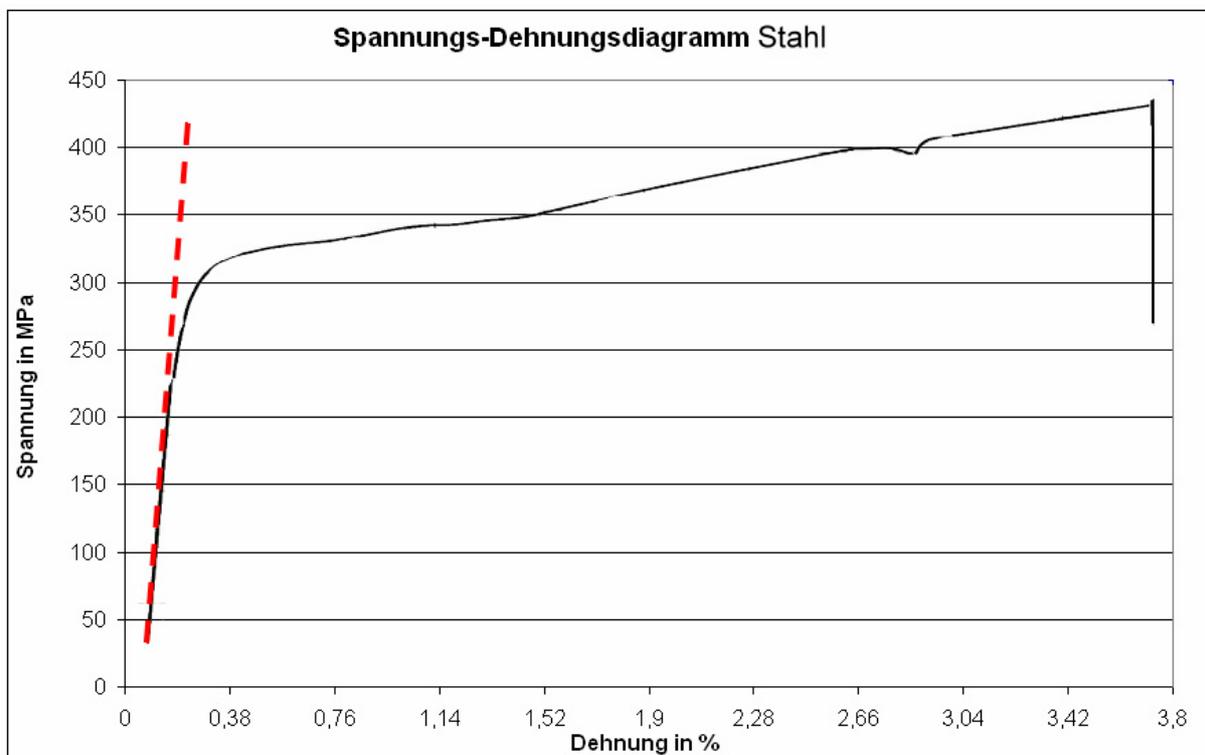


Abbildung 82: Spannungs-Dehnungsverlauf einer Stahlrohrprobe; (DN 100)

7.3 Ermittlung der Brinellhärte an Rohrproben

Die Ermittlung der Brinellhärte dient hauptsächlich Vergleichszwecken, da ein empirischer Zusammenhang zwischen Brinellhärte und Zugfestigkeit besteht. Zusätzlich lässt ein hoher Wert der Brinellhärte auf eine falsche Wärmebehandlung bei der Rohrherstellung oder auf falsche Legierungsbestandteile schließen (Abschnitt 4.8.1). Im Rahmen der Arbeit findet eine Überprüfung dieser Aussagen auf eine mögliche Übertragbarkeit auf die technische Zustandsbewertung in Abschnitt 9.4 statt.

In Anlehnung an DIN EN ISO 6506 wird die Brinellhärte an Probekörpern durchgeführt, welche wie in Abschnitt 6.4 beschrieben, hergestellt wurden [124]. Folgende Grenzwerte der Probenabmessung sind einzuhalten:

- Probendicke $\geq 8 \cdot$ Eindrücktiefe h
- Abstand der Eindrück-Mittelpunkte vom Probenrand $\geq 2,5 \cdot$ Eindrückdurchmesser d
- Abstand der Eindrück-Mittelpunkte untereinander $\geq 3 \cdot$ Eindrückdurchmesser d
- Prüfkraft F so wählen, dass Eindrückdurchmesser d zwischen $0,24 \cdot D$ und $0,6 \cdot D$ liegt (D = Kugeldurchmesser)

Alle Angaben können bei einer Rohrwanddicke von mindestens 2,5 mm eingehalten werden. Die Versuchsoberfläche ist metallisch blank zu polieren, damit der Eindrückdurchmesser optisch abgelesen werden kann.

In DIN EN ISO 6506 wird für den Eindrückversuch ein Kugeldurchmesser D von 10 mm empfohlen. Im Verlauf der Versuche hatte sich aber herausgestellt, dass bei diesem Kugeldurchmesser und der dazugehörigen Prüfkraft die Eindrückspannung zu gering ausfällt und kein Kugelabdruck auf der Probe hinterlassen wird. Der Kugeldurchmesser ist deshalb auf $D = 2,5$ mm reduziert worden und kam auch bei der Prüfung von Duktillguss- und Stahlproben zur Anwendung.

Zur Prüfung von Rohrproben aus Gusseisen wird ein sog. Beanspruchungsgrad von 10 und für Stahl ein Beanspruchungsgrad von 30 empfohlen (Tabelle 3 in DIN EN ISO 6506 [124]). Das übliche Kurzzeichen der Härte betrug im Rahmen der durchgeführten Versuche deswegen

- für Gusseisen: HBW 2,5 / 62,5
(mit einem Kugeldurchmesser $D = 2,5$ und einer Prüfkraft $F = 612,5$ N)
- für Stahl: HBW 2,5 / 187,5
(mit einem Kugeldurchmesser $D = 2,5$ und einer Prüfkraft $F = 1.839$ N)

Umrechnung (1 / Fallbeschleunigung = 0,102): $612,5 \cdot 0,102 = 62,5$

Die gewonnenen Versuchsergebnisse sind in Kapitel 9 dargestellt.

Tabelle 7.2: Erfassungsmerkmale bei statischen Versuchen an Metallrohrproben

Hauptangabe	Bemerkung bzw. Unterteilung
Zugfestigkeit	N/mm ²
E-Modul	N/mm ²
Bruchdehnung	%
Brinellhärte	HBW

8. Auswertungen der Untersuchungsergebnisse der einfachen materialtechnischen Zustandsuntersuchung

Die in Kapitel 2 erwähnten Darstellungen und statistischen Auswertungen von Untersuchungsergebnissen der materialtechnischen Zustandsuntersuchung dienen der Charakterisierung der einzelnen Rohrgenerationen.

Ziel ist es, anhand der Untersuchungsergebnisse die in Abschnitt 4.1 bis 4.10 aufgezeigten Eigenschaften (z. B. typischer Korrosionsschutz, typische Schadensarten, typische Festigkeitseigenschaften) der einzelnen Rohrgenerationen zu bestätigen bzw. zu ergänzen.

8.1 Untersuchungsumfang

Für belastbare Aussagen aus repräsentativen Ergebnissen technischer Untersuchungen und Beprobungen an Rohren ist ein gewisser Stichprobenumfang notwendig. Repräsentative Ergebnisse sind nur bei gleichen Untersuchungsverfahren und -abläufen und vergleichbaren Einflussfaktoren ermittelbar, sofern eine Abhängigkeit zwischen Einflussfaktor und technischem Zustand besteht. Die Vielzahl an möglichen Kombinationen zwischen den Einflussfaktoren und deren Auswirkung auf den technischen Zustand erfordert für aussagefähige Schlussfolgerungen aus den Untersuchungsergebnissen eine große Untersuchungsmenge. Der Betrag einer notwendigen Untersuchungsmenge kann aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren weder bestimmt noch anschließend geprüft werden.

Deshalb wurde im Rahmen der Arbeit die Annahme getroffen, dass die Anzahl an Zustandsuntersuchungen bzw. Rohrproben dann eine annähernd repräsentative Größe erreicht hat, wenn die einzelnen Untersuchungsergebnisse (Abschnitt 8.2 bis 8.3) sich innerhalb eines Bereichs um einen bestimmten Mittelwert befinden (das heißt, annähernd gleiche Versuchsergebnisse).

Im Rahmen der Arbeit wurden 131 Rohrproben nach dem Konzentrationsprinzip bzw. Cut-off-Verfahren ausgewählt und anschließend untersucht (Kriterien siehe Kapitel III). An diesen Proben erfolgte die Ermittlung des technischen Zustands innerhalb der einfachen Zustandsuntersuchung. Die Untersuchungsergebnisse sind in Abschnitt 8.2 bis Abschnitt 8.3 dargestellt.

Die Untersuchung der zur Charakterisierung notwendigen werkstoffspezifischen Eigenschaften wie etwa die Zugfestigkeit erfolgte mit Hilfe der präzisen Zustandsuntersuchung an 34 im Zufallsverfahren ausgewählten Rohrproben aus der Gesamtanzahl der 131 Proben.

Im Verlauf der Untersuchungen wurden nur die Ergebnisse je Generation berücksichtigt, bei denen keine größeren Abweichungen der werkstoffspezifischen Eigenschaften zu einem bestimmten Mittelwert je Generation erkennbar waren. Diese Werte werden dann als annähernd repräsentativ angesehen (siehe Tabelle 9.2 ff).

Das Auswahlverfahren der einzeln untersuchten Rohrproben für den repräsentativen Untersuchungsumfang zeigt Abbildung 84. Von den 131 Rohrproben stammten 91 Proben von thüringischen WVU. Die restlichen Proben (44 Stück) verteilten sich auf WVU aus dem gesamten Bundesgebiet.

Es erfolgte eine Konzentration auf Rohrproben aus dem städtischen Bereich (80 % der Proben) entsprechend den vorgenannten Abgrenzungskriterien. Der restliche Anteil bezog sich auf Rohrproben aus Stadtrandgebieten oder ländlichen Gegenden bzw. Dörfern und diente Vergleichszwecken, da das Rohrnetz historisch bedingt aus den städtischen Bereichen in Richtung Stadtrand gebaut wurde [167].

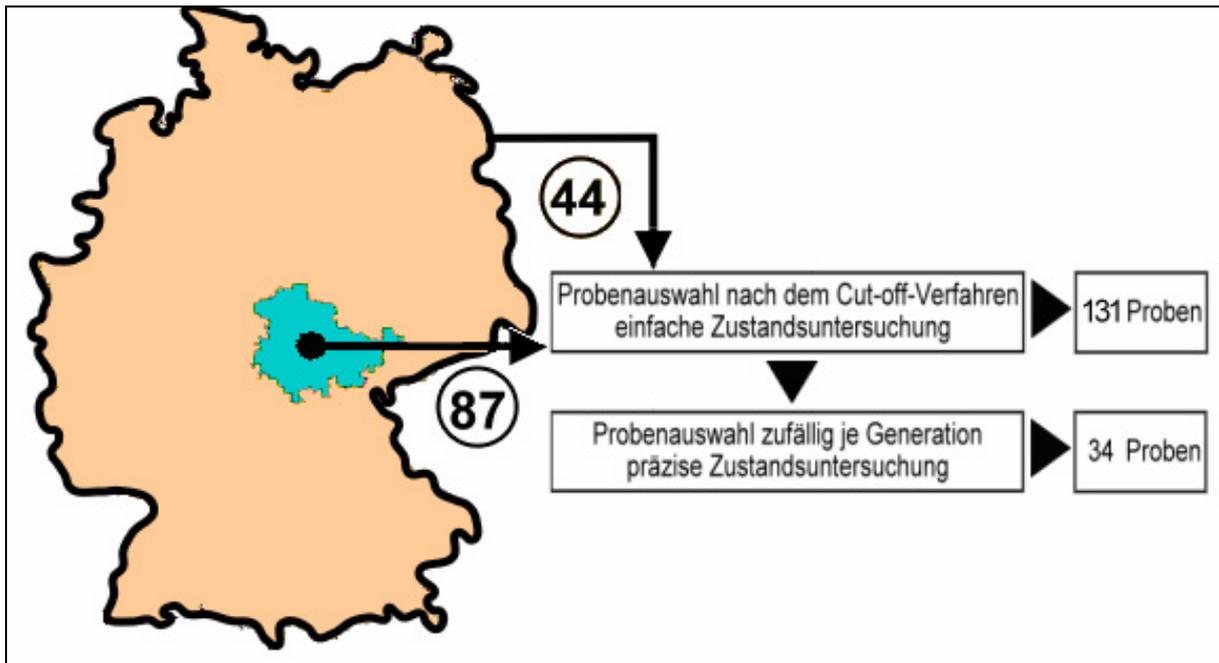


Abbildung 84: Herkunft und Rohrprobenumfang für die materialtechnischen Zustandsuntersuchungen

Alle 131 untersuchten Rohrproben stammten aus Leitungsabschnitten, die innerhalb eines WVU in Betrieb waren und hauptsächlich aufgrund von Schadensereignissen, seltener wegen Einbau neuer Armaturen oder Einbindung von Hausanschlussleitungen, ausgebaut wurden. Bedingt durch die Materialstruktur an verlegten metallischen Trinkwasserleitungen in Deutschland sind die erwähnten 131 Rohrproben nicht gleichmäßig auf die jeweiligen Rohrwerkstoffe verteilt. In Diagramm 8 ist die tatsächliche Aufteilung dargestellt.

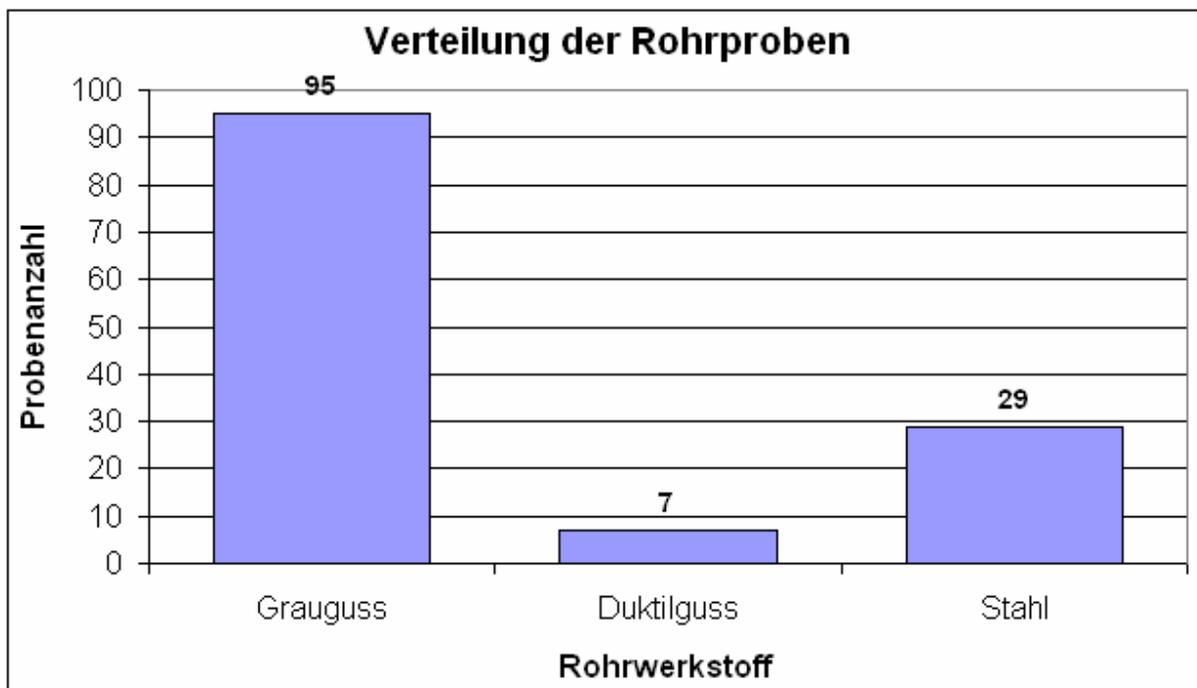


Diagramm 8: Verteilung der untersuchten Rohrproben auf die relevanten Rohrwerkstoffe

Die weitere Aufteilung der Anzahl der Proben pro Rohrgeneration zeigt Diagramm 9.

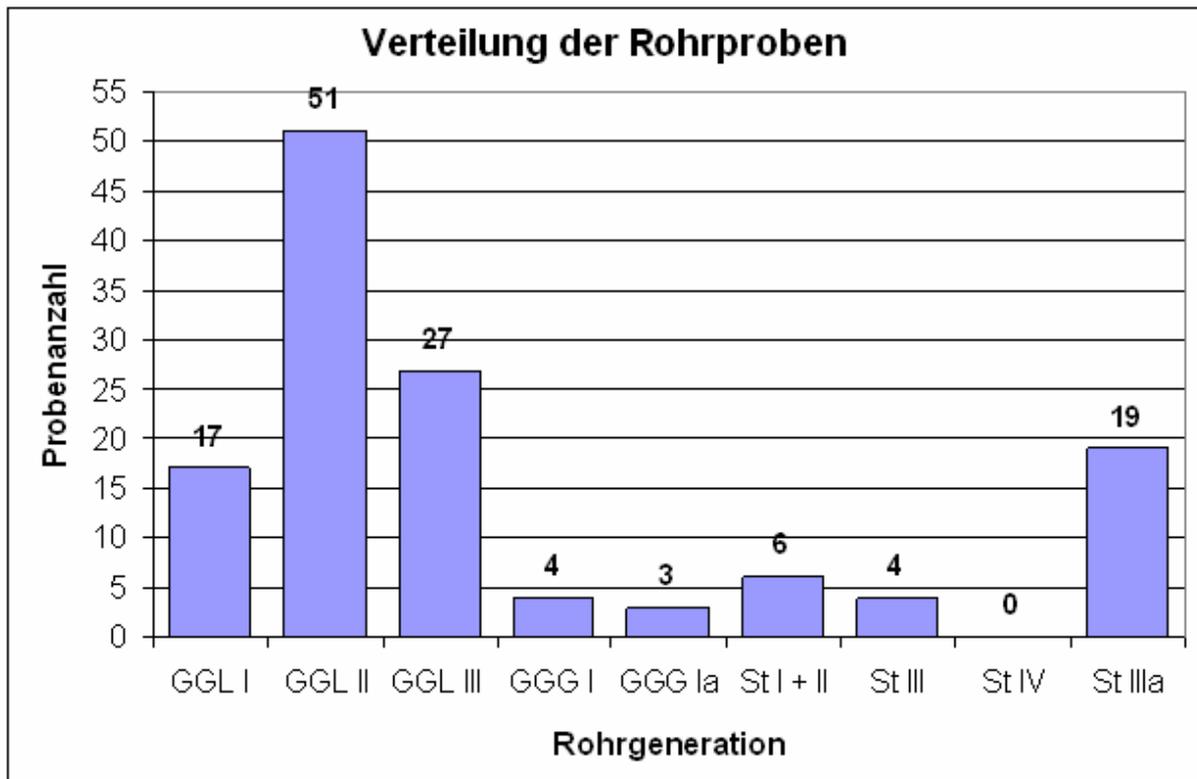


Diagramm 9: Verteilung der untersuchten Rohrproben auf die jeweiligen Rohrgenerationen

Zu Diagramm 9 sind folgende Anmerkungen zu machen:

Rohrproben der Rohrgenerationen GGL IIa bzw. GGG Ia sind im Probenumfang der Generation GGL III bzw. GGG I enthalten, da im Verlauf der Untersuchungen oftmals eine eindeutige Zuordnung zur Rohrgeneration nicht möglich war.

Für einen späteren Vergleich mit Daten aus entsprechenden Schadensstatistiken wurden der Übersicht wegen Stahlrohre der I. und II. Generation zu einer Gruppe zusammengefasst (ausschließlich nahtlose Stahlrohre der II. Generation). Stahlrohre der IV. Generation konnten im Rahmen der Untersuchungen nicht von entsprechenden WVU zur Verfügung gestellt werden.

Die meisten WVU stellten Proben von Graugussrohren der II. und III. Generation zur Verfügung. Deshalb ist zu vermuten, dass sich Schäden am Rohrnetz deutscher WVU am häufigsten auf Rohre der Generation GGL II, GGL III und auch St IIIa bzw. GGL I verteilen (siehe Diagramm 9).

Über die Art der Schäden (echt / unecht), deren Umfang und über den technischen Zustand der entsprechenden Rohrleitungsabschnitte geben die Angaben in Diagramm 9 keine Auskunft.

Entsprechend den Angaben in der DVGW-Schadensstatistik der Erhebungsjahre 1997 bis 1999 ist eine Häufung der Anzahl von Rohrproben mit den Nennweiten von DN 65 bzw. DN 80 bis DN 150 in Diagramm 10 zu erkennen [5]. Diese Nennweitenverteilung findet sich bei ausreichender Probenanzahl ebenfalls bei den einzelnen Rohrwerkstoffen wieder.

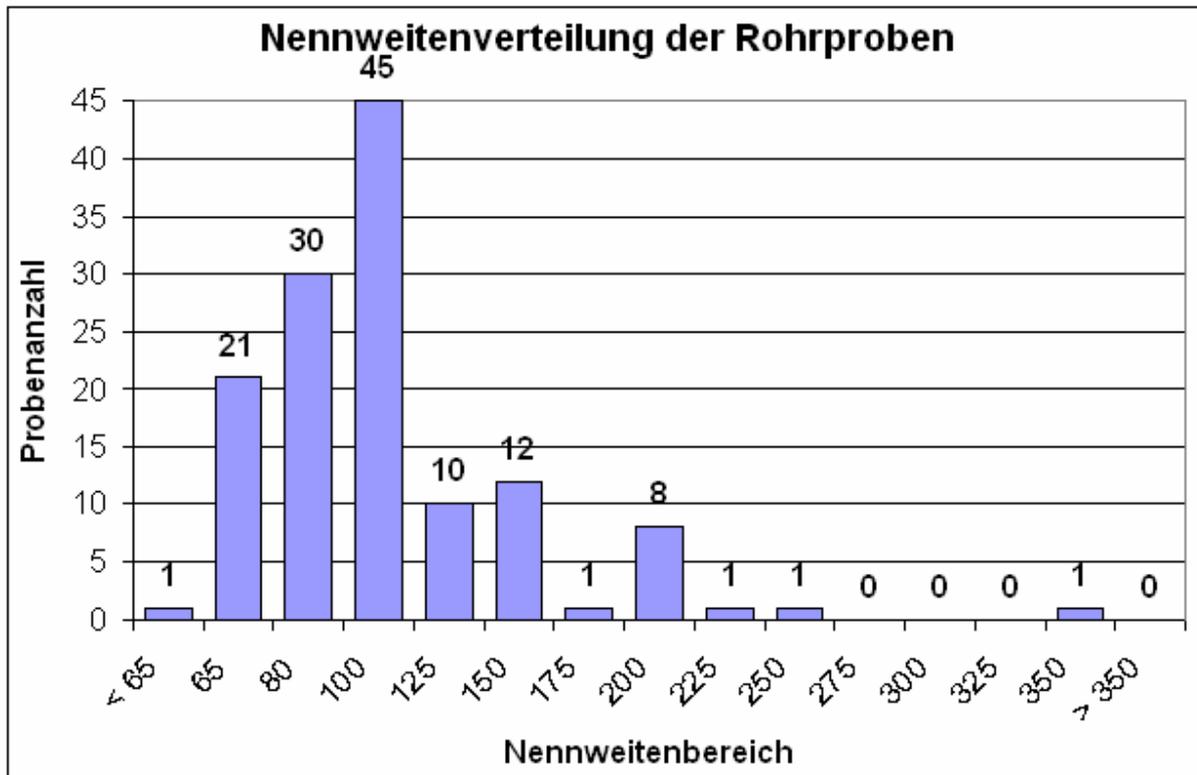


Diagramm 10: Nennweitenverteilung der untersuchten Rohrproben

Wie oben erwähnt, wurden die untersuchten Rohrproben infolge von Schadensereignissen oder Bauarbeiten am Rohrnetz von thüringischen bzw. deutschen WVU geborgen und zur materialtechnischen Zustandsuntersuchung im Rahmen der Arbeit zur Verfügung gestellt. Diese Rohrproben sind zwar repräsentativ für eine qualitative mittlere Schadenshäufung pro Rohrgeneration, sie sind jedoch nicht repräsentativ für den technischen Leitungszustand einzelner WVU, da die Anzahl der zur Verfügung gestellten Rohrproben nicht mit der Anzahl der tatsächlich eingetretenen Schadensereignisse zusammenhängen muss.

8.2 Verteilung von Schadensursachen und Schadens- bzw. Korrosionsarten

Eine Schadensanalyse bezüglich Schadensursachen laut Definitionen in Abschnitt 4.9.1 war an den zu Verfügung gestellten Rohrproben nicht vollständig möglich. Ursache waren einerseits unvollständige Angaben der beteiligten WVU zur Rohrprobenbergung und andererseits ein fehlendes Verständnis seitens der WVU zur Unterscheidung in Schadensursachen und Schadensarten und die Unterteilung in echte und unechte Schadensereignisse (Abbildung 59).

Der Großteil der untersuchten Rohrproben wies einen bereits geschwächten Rohrquerschnitt auf (Abschnitt 8.3). Deshalb wird für weitere Untersuchungen die Annahme getroffen, dass es sich hauptsächlich um echte Schadensereignisse an den jeweiligen Rohrproben handelte und somit materialtechnische Zustandsuntersuchungen relevant wurden.

Eine weitere Unterteilung in die nach Abschnitt 4.9.1 definierten Schadensursachen für echte Schadensereignisse wurde im Rahmen der Arbeit nicht vorgenommen, da sich aus diesen Schadensursachen keine weiteren direkten Rückschlüsse auf den technischen Zustand der entsprechenden Rohrproben bzw. zugehörigen Rohrleitungsabschnitte ziehen lassen.

Für weitere Untersuchungen ist es wichtig zu wissen, welche Schadensarten an metallischen Rohrleitungen hauptsächlich vorherrschen und ob sich einzelne Rohrgenerationen typischen Schadensarten zuordnen lassen. In Diagramm 11 und Diagramm 12 ist die Verteilung der in Abschnitt 4.9.1 definierten Schadensarten auf die untersuchten Rohrproben dargestellt.

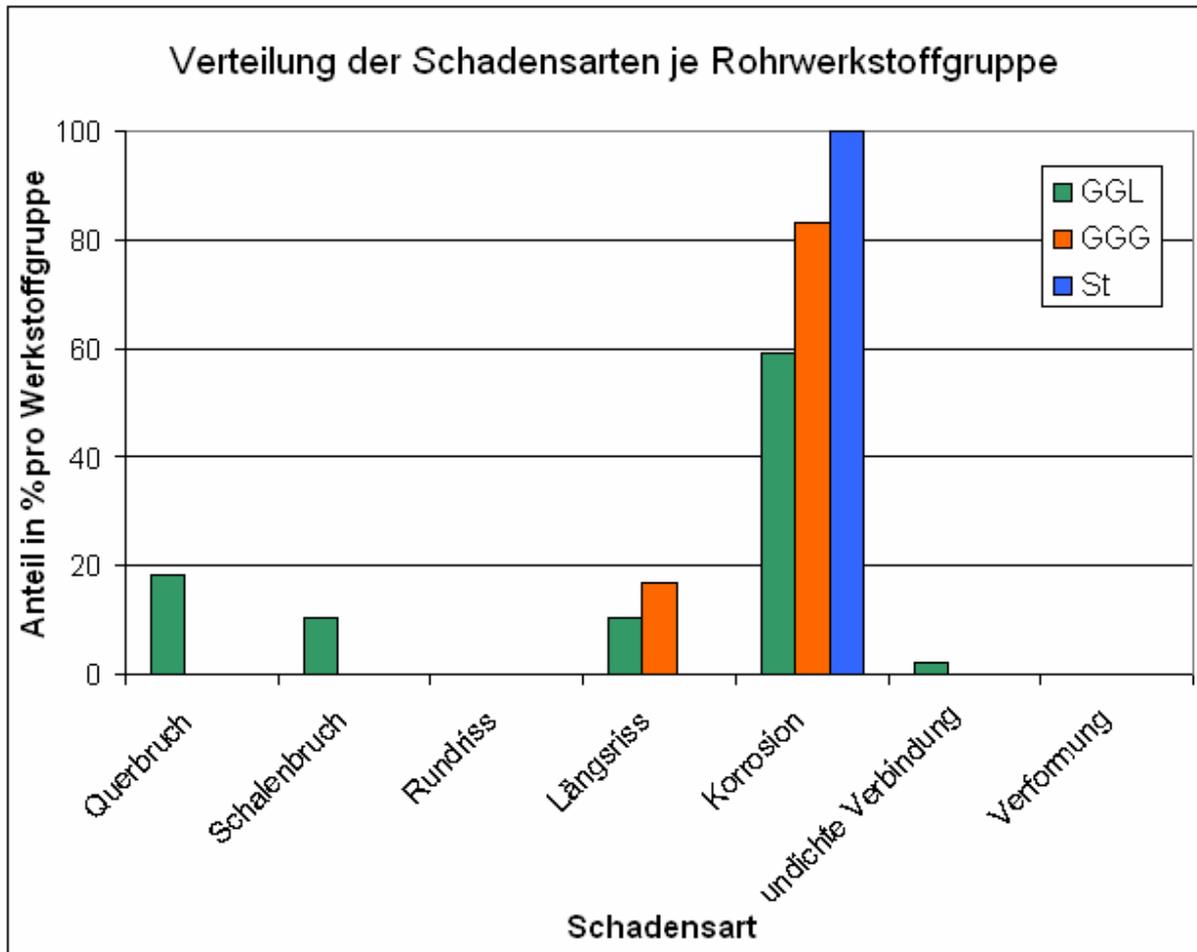


Diagramm 11: Verteilung der für eine materialtechnische Zustandsuntersuchung relevanten Schadensarten bezogen auf die jeweilige Rohrwerkstoffgruppe

Den Darstellungen in Diagramm 11 ist zu entnehmen, dass die mit Abstand häufigste Schadensart an metallischen Rohrwerkstoffen die Korrosion ist. Alle im Rahmen der Arbeit untersuchten Stahlrohrproben wiesen ausschließlich die Schadensart Korrosion auf, jedoch ist daraus nicht zu schlussfolgern, dass keine anderen Schadensarten wie etwa undichte Verbindungen oder Verformungen an Stahlrohren auftreten können. Stahlrohre der I. bis III. Generation wurden größtenteils mit Stemmmuffen verlegt (siehe Abbildung 30). Diese Muffen sind ebenso wie die Stemmmuffen an Graugussrohren häufig undicht geworden. Eine ähnliche Schadensverteilung wie an Stahlrohrproben ist an Duktulguss-Rohrproben zu erkennen. Die Schadensarten Rundriss und Verformung waren an den Untersuchungsproben nicht feststellbar und können in weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt werden. Duktulgussrohre der II. Generation, welche im Untersuchungsumfang enthalten waren, wiesen keinerlei Schäden auf und wurden vermutlich im Zuge von Baumaßnahmen am Netz vom entsprechenden WVU für Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Die ausschließlich für den spröden Rohrwerkstoff Grauguss (mit Lamellengraphit) typischen Quer- und Schalenbrüche sind ebenfalls in Diagramm 11 zu erkennen

Unerwartet ist auf den ersten Blick das Auftreten von Längsrissen an elastischen Duktulgussrohren. Jedoch kann vorangegangene Korrosion zu solch einer starken Querschnittsschwächung führen, dass bereits geringe Spannungen am Duktulgussrohr (mit ansonsten relativ hohen Festigkeitseigenschaften) zum Längsriss führen.

Die Verteilung der am häufigsten anzutreffenden Schadensarten für die jeweiligen Generationen der Graugussrohre mit Lamellengraphit zeigt Diagramm 12.

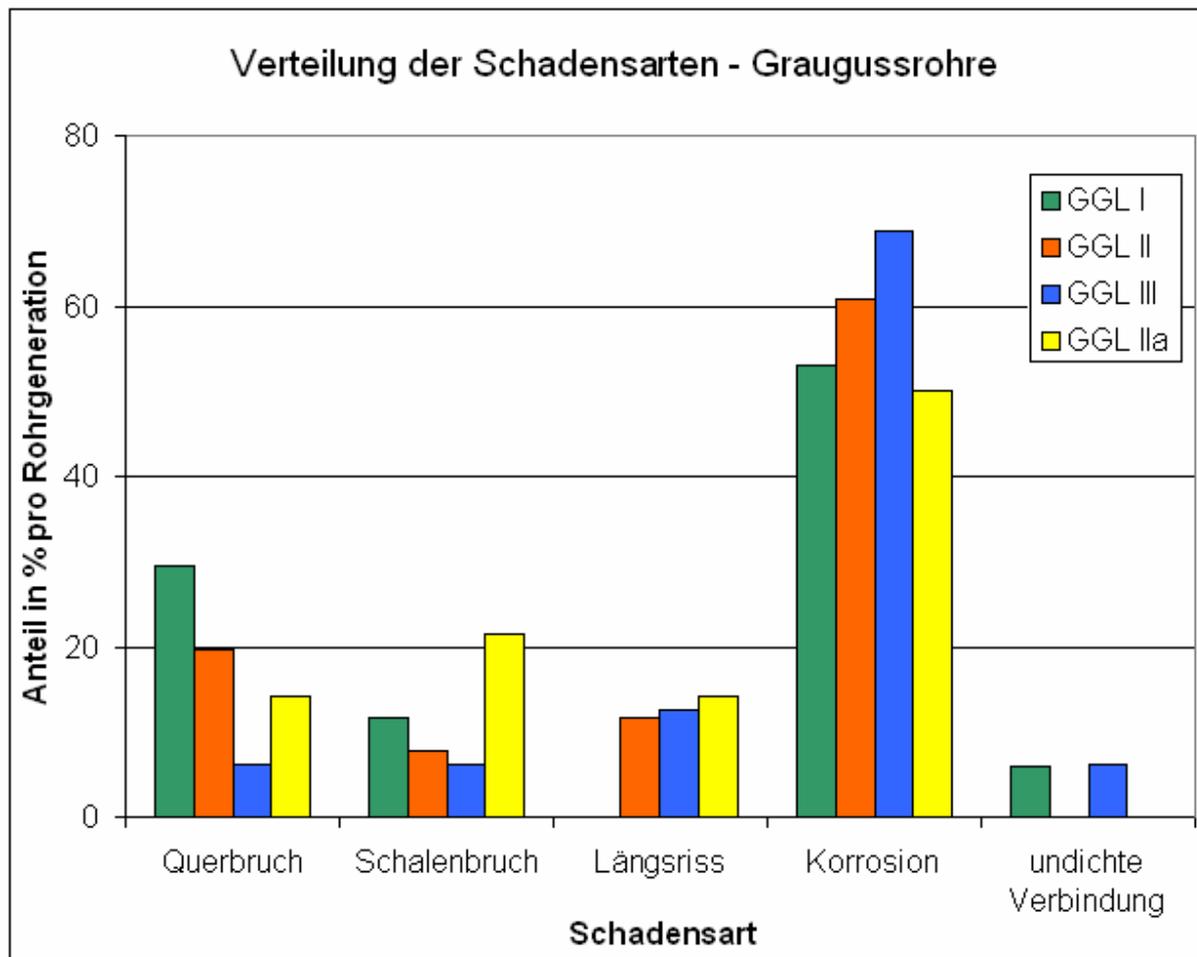


Diagramm 12: Verteilung der relevanten Schadensarten auf die jeweiligen Generationen der Graugussrohre mit Lamellengraphit; der Anteil der Schadensarten bezieht sich jeweils auf 100 % des Probenumfangs einer Generation

In Abschnitt 4.7.1 bzw. Tabelle 4.33 wurde auf die erhöhte Korrosionsempfindlichkeit und die vergleichsweise höheren Festigkeitseigenschaften von geschleuderten Graugussrohren (Generation GGL III) hingewiesen. Diese charakteristischen Eigenschaften sind in Diagramm 12 wieder zu finden. Graugussrohre der III. Generation weisen im Vergleich zu den restlichen Grauguss-Generationen einen erhöhten Anteil der Schadensart Korrosion auf, jedoch bezüglich der Schadensarten Querbruch und Schalenbruch einen vergleichsweise geringen Anteil. Quer- und Schalenbrüche treten statisch bedingt an spröden Werkstoffen mit relativ geringen Festigkeitseigenschaften auf. Längsrisse treten meist an bereits durch Korrosion

geschwächten Querschnitten auf und sind so auch an Rohrwerkstoffen mit vergleichsweise hohen Festigkeitseigenschaften vorzufinden.

Wie erwähnt ist die Korrosion die am häufigsten anzutreffende Schadensart an metallischen Rohrwerkstoffen und hat wesentlichen Einfluss auf den technischen Zustand des Rohres (Querschnittsschwächung). Die Schadensart Korrosion lässt sich in weitere Unterarten bzw. Korrosionsarten aufteilen, welche einen untereinander abweichenden Einfluss auf den technischen Zustand des Rohres besitzen (Tabelle 4.14). Die für die Untersuchungen relevanten Korrosionsarten

- Flächenkorrosion
- Lochkorrosion,
- Muldenkorrosion,
- Narben- bzw. Zeilenkorrosion und
- Spongiose oder auch Graphitierung

können separat aber auch in Kombination an der Rohroberfläche auftreten. In den Diagrammen 13 bis 15 sind die häufigsten Korrosionsarten je Rohrwerkstoffgruppe und Rohrgenerationen dargestellt. Gleichzeitig erfolgte eine Unterteilung in Korrosionsarten an der Rohrrinnen- oder -außenseite. Diese Unterscheidung ist notwendig, da der Ablauf von Innenkorrosion durch entsprechende Sanierungsmaßnahmen im Gegensatz zu Außenkorrosion unterbunden werden kann. Dargestellt ist die Häufigkeitsverteilung der Korrosionsarten innerhalb der Schadensart Korrosion.

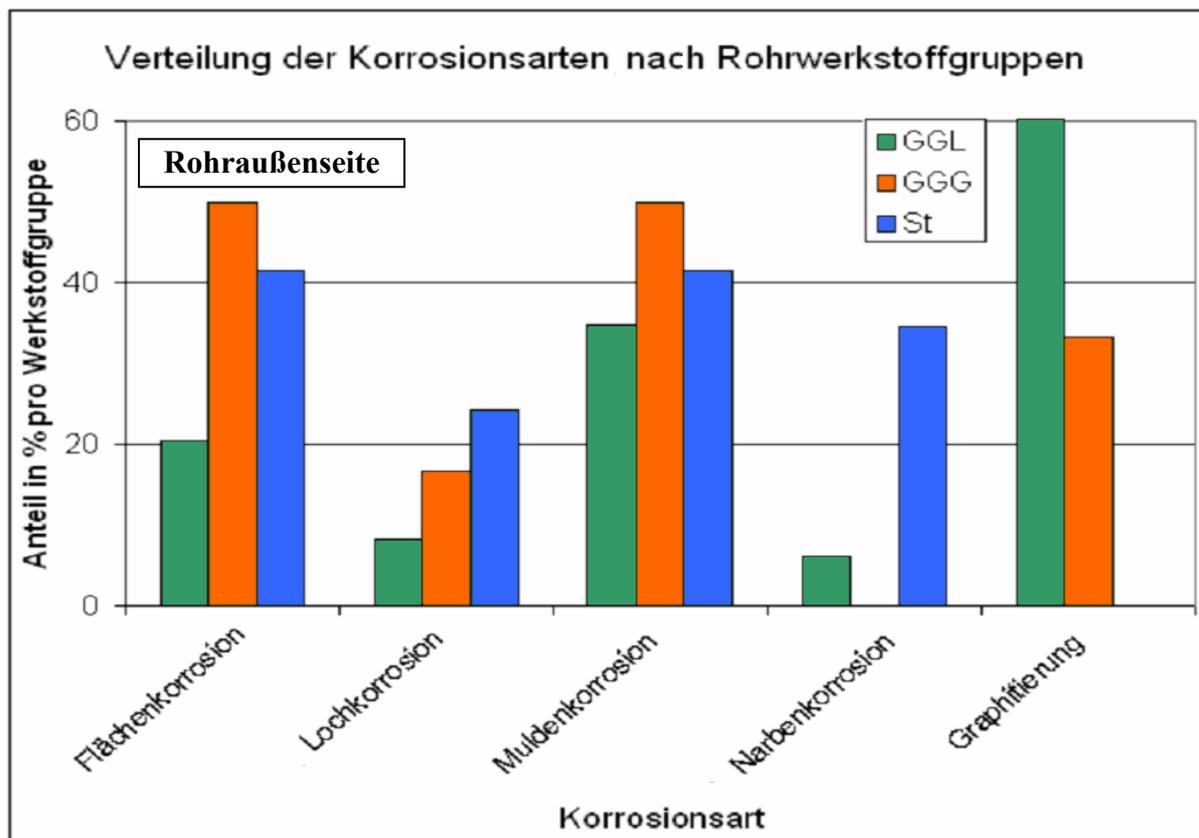


Diagramm 13: Verteilung der Korrosionsarten auf die Rohrwerkstoffgruppen (außen)

Da mehrere Korrosionsarten innerhalb einer Rohrprobe auftreten können, wurden die zwei häufigsten Korrosionsarten im Rahmen der Untersuchungen berücksichtigt. Deswegen sind Mehrfachnennungen innerhalb einer Rohrwerkstoffgruppe oder Rohrgeneration möglich. So ist in Diagramm 13 zu entnehmen, dass an ca. 60 % aller Grauguss-Rohrproben die Korrosionsart Graphitierung auftrat. Dies bedeutet jedoch nicht, dass auf die restlichen 40 % die anderen Korrosionsarten entfallen, da neben der Graphitierung die zwei häufigsten Korrosionsarten gleichermaßen berücksichtigt werden. Zusammenfassend sind in Tabelle 8.1 die häufigsten Korrosionsarten je Rohrwerkstoffgruppe aufgelistet.

Die Graphitierung ist an Rohrschadensstellen vor Ort oftmals nicht erkennbar (keine Fehlstellen in der Rohrwand, da Graphitgerüst noch vorhanden). Die Erkennung und Einschätzung der Korrosionsart Graphitierung ist deshalb nur über materialtechnische Zustandsuntersuchungen möglich.

Tabelle 8.1: Die häufigsten Korrosionsarten an metallischen, erdverlegten Trinkwasserleitungen an der Rohraußenseite

Rohrwerkstoffgruppe	Häufigsten Korrosionsarten
Grauguss	Graphitierung, Muldenkorrosion
Duktilguss	1. Flächenkorrosion; 2. Muldenkorrosion, Graphitierung
Stahl	1. Flächenkorrosion; 2. Lochkorrosion, Muldenkorrosion

Eine dominierende Korrosionsart ist vorhanden, wenn eine Korrosionsart den größten zustandsverschlechternden Einfluss auf den Rohrwerkstoff ausübt. Die Ermittlung der dominierenden Korrosionsart und der Vergleich untereinander sind in Abschnitt 8.3 beschrieben.

Wie in Diagramm 13 ist auch in Diagramm 14 zu erkennen, dass bei den Grauguss-Rohrproben aber auch bei den Duktilguss-Rohrproben die Korrosionsart Graphitierung an der Rohrinneenseite sehr häufig auftrat. Einige wenige Rohre der Generationen GGL I, GGL II und GGL III wiesen an der Rohrinneenseite keine Schädigung durch Korrosion auf.

In Tabelle 8.2 sind die häufigsten Korrosionsarten je Rohrwerkstoffgruppe aufgelistet.

Tabelle 8.2: Die häufigsten Korrosionsarten an metallischen, erdverlegten Trinkwasserleitungen an der Rohrinneenseite

Rohrwerkstoffgruppe	Häufigsten Korrosionsarten
Grauguss	Graphitierung, Muldenkorrosion
Duktilguss	Muldenkorrosion, Graphitierung
Stahl	Narbenkorrosion

Entsprechend den Werten in Tabelle 4.14 besitzen die oben genannten Korrosionsarten einen unterschiedlichen Einfluss auf die Zustandsverschlechterung des Rohrwerkstoffs bzw. eine unterschiedliche Korrosionsgeschwindigkeit. Eine örtlich begrenzte Korrosion wie die Lochkorrosion bedeutet einen vergleichsweise höheren Materialabtrag pro Zeiteinheit. Örtliche stark begrenzte Korrosion führt allerdings nicht zwangsweise zu einem schnelleren Verlust der Tragfähigkeit der Rohre. Die Schwächung am Gesamtquerschnitt ist hierbei im Vergleich zu Korrosionsarten mit langsamem aber großflächigem Materialabtrag gering. Zusätzlich ist bei örtlich stark begrenzter Korrosion eine Perforierung durch die gesamte Rohrwanddicke wahrscheinlicher, so dass mit Wasserverlusten am entsprechenden

Rohrleitungsabschnitt gerechnet werden muss. Daten zu Wasserverlustmengen in Abhängigkeit von Betriebsdruck und Lochgröße werden von Böhm genannt [2].

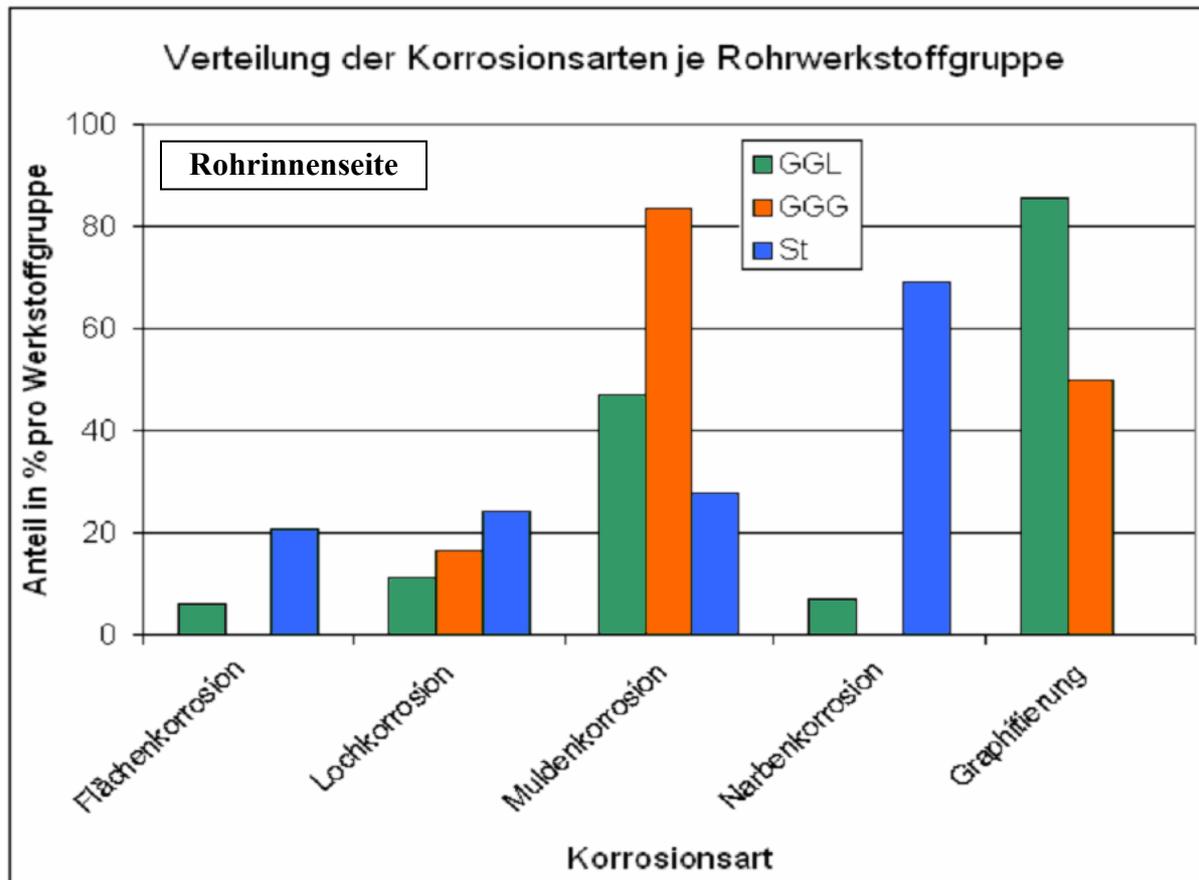


Diagramm 14: Verteilung der Korrosionsarten auf die Rohrwerkstoffgruppen (innen)

Ein Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Korrosionsarten unter den einzelnen Rohrgenerationen zeigte geringfügige Abweichungen zu den in Tabelle 8.1 und Tabelle 8.2 erwähnten Korrosionsarten.

Der Übersicht wegen wurde auf die Darstellung aller Verteilungen der Korrosionsarten pro Rohrgeneration und Rohrseite verzichtet. In Diagramm 15 ist beispielhaft diese Verteilung für die Grauguss-Rohrgenerationen dargestellt.

Die häufigsten Korrosionsarten der im Rahmen der Arbeit untersuchten Rohrproben je Rohrgeneration und Rohrseite zeigt die Übersicht in Tabelle 8.3.

Tabelle 8.3: Die häufigsten Korrosionsarten an metallischen, erdverlegten Trinkwasserleitungen, unterteilt nach Rohrgenerationen

Rohr- generation	Häufigsten Korrosionsarten	
	außen	innen
GGL I	Graphitierung, Muldenkorrosion	Graphitierung, Muldenkorrosion
GGL II	Graphitierung, Muldenkorrosion	Graphitierung, Muldenkorrosion
GGL III	Graphitierung, Muldenkorrosion	Graphitierung, Muldenkorrosion
GGL IIa	Graphitierung, Muldenkorrosion	Graphitierung, Muldenkorrosion
GGG I	Muldenkorrosion, Graphitierung	Muldenkorrosion, Graphitierung
GGG Ia	Muldenkorrosion	Muldenkorrosion, Narbenkorrosion
St II	Flächenkorrosion	Narbenkorrosion, Flächenkorrosion
St III	Muldenkorrosion, Flächenkorrosion	Narbenkorrosion, Flächenkorrosion
St IIa	Flächenkorrosion, Lochkorrosion	Flächenkorrosion

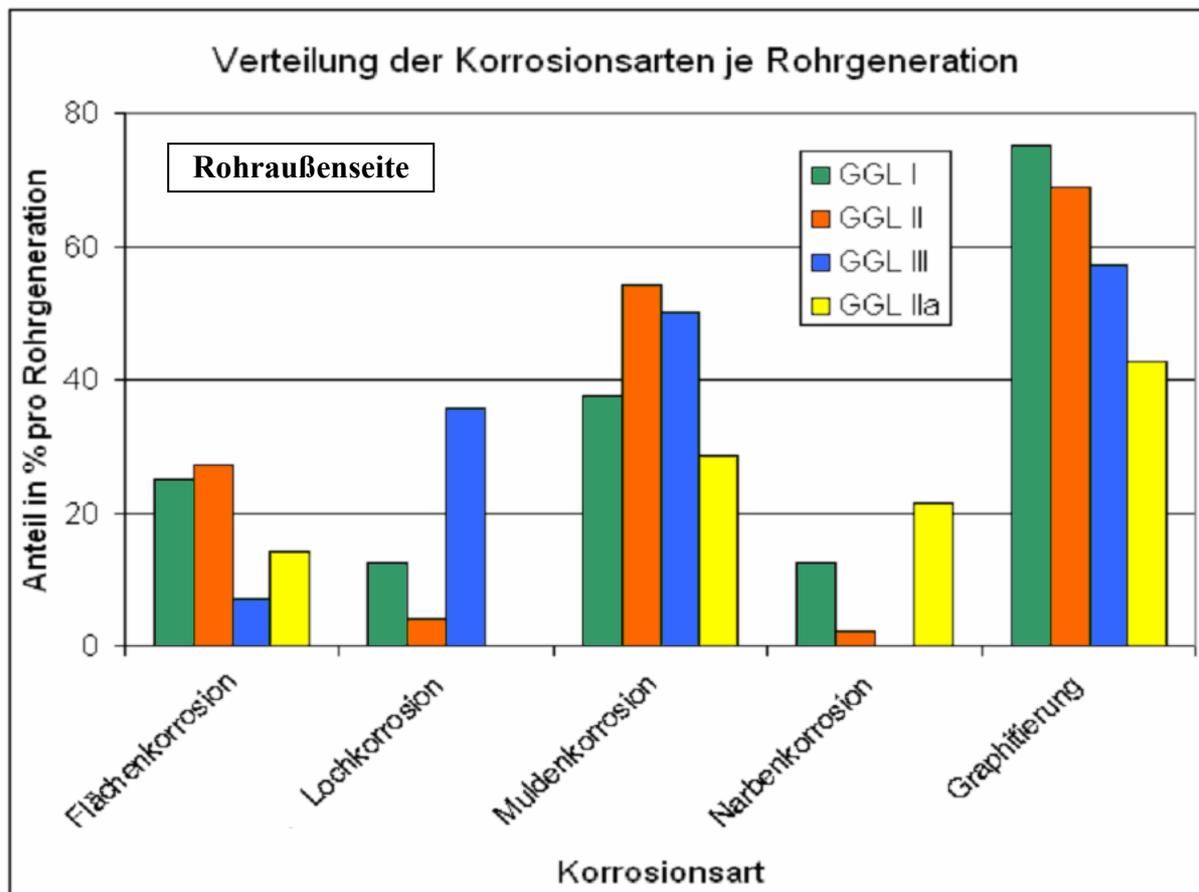


Diagramm 15: Verteilung der Korrosionsarten je Grauguss-Rohrgeneration (außen)

Auffällig ist in Diagramm 15 der vergleichsweise hohe Anteil Lochkorrosion bei Graugussrohren der III. Generation (geschleudert). Während der Untersuchungen wurde festgestellt, dass diese Rohre eine besondere Korrosionsform aufweisen, welche an quer zur Rohrachse verlaufende Rillen erinnert (Abbildung 85). An den Tiefpunkten dieser Rillen entstehende Muldenkorrosion schlägt aufgrund der geringeren Restwanddicke relativ schnell zur Lochkorrosion durch. Vermutlich sind Herstellungsfehler die Ursache. Beim Schleuderprozess führt die nicht abgestimmte Geschwindigkeit der Zufuhr des flüssigen

Gusseisens in die Kokille zu unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten innerhalb der Rohrwand. Dadurch kam es zur Ausbildung korrosionsanfälliger Bereiche in Rohrquerrichtung.

Im Verlauf weiterer Untersuchungen und Auswertungen (z.B. Abschnitt 8.3) ist die Ermittlung der dominierenden Korrosionsarten zur Einschätzung des technischen Zustands eines Rohrleitungsabschnitts Grundvoraussetzung.



Abbildung 85: Rillenstruktur an einem geschleuderten Graugussrohr (GGL III) der Nennweite DN 100; Rückschlüsse auf Herstellungsfehler möglich

8.3 Restwanddicke und Schädigungszahlen

Der technische Ist-Zustand einer metallischen Rohrleitung wird in der Arbeit als die restliche Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften definiert. Das heißt, ein vollständig erhaltener Rohrquerschnitt ohne Verschwächungen durch Herstellungsfehler oder Korrosionseinflüsse (Abschnitt 4.9.1) wird mit einem Ist-Zustand von 100 % gleichgesetzt. Die Darstellungen in Diagramm 11 sowie die statistischen Erhebungen in der DVGW-Schadensstatistik für die Jahre 1997 bis 1999 zeigen, dass die Schadensart Korrosion hauptsächlich für eine Zustandsverschlechterung des Rohres verantwortlich ist [5]. Korrosion verursacht Materialabtrag und somit Verschwächungen am Rohrquerschnitt und setzt dadurch die Tragfähigkeit der Rohre herab. Die Schadensart Korrosion führt letztendlich zur Schadensfolge mit Wasserverlusten und zum Versagen der Tragfähigkeit des Rohres.

Da die verschiedenen bereits erwähnten Korrosionsarten ungleichmäßig in ihrer Abtragungsgeschwindigkeit, in ihrer geometrischen Form und ihrer Verteilung über den Rohrquerschnitt in Quer- und Längsrichtung sind, wird in den nachfolgenden Untersuchungen ein Vergleichsverfahren angewendet, um die eben genannten unterschiedlichen Erscheinungsformen zu berücksichtigen.

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 6.5 wird zunächst die maximale Korrosionstiefe bzw. maximale Ausdehnung (Durchmesser) der zwei häufigsten Korrosionsarten an der Rohrrinnen- sowie Rohraußenseite und die prozentuale Anteil der jeweiligen Korrosionsarten über das untersuchende Rohrsegment messtechnisch erfasst.

Die dabei zu untersuchenden Rohrproben müssen bezüglich ihres technischen Zustands repräsentativ für den zugehörigen Rohrleitungsabschnitt sein (Abschnitt 6.1).

8.3.1 Empirische Restwanddicke RWD und Schädigungszahl Rohr SZ_R

Aus den eben erwähnten Daten lässt sich eine gemittelte Fehlstellendicke berechnen, die der tatsächlich vorhandenen Wanddicke anteilig ins Verhältnis gesetzt wird (Gleichung 8.1). Die restliche vorhandene Rohrwanddicke wird folglich in Längs- und Querrichtung gleich verteilt (Abbildung 86). Diese gemittelte restliche Rohrwanddicke nach (Gleichung 8.1) soll in weiteren Berechnungen als sog. empirische Restwanddicke RWD bezeichnet werden. Diese empirische Restwanddicke ist nicht die tatsächlich vorhandene Restwanddicke, da diese an jeder Stelle über den Rohrquerschnitt einen anderen Betrag besitzen kann. Sie dient dem Vergleich unterschiedlich stark geschwächter Rohre und dem Abschätzen der Resttragfähigkeit. Die Gültigkeit dieser Berechnungsmethode beschränkt sich auf kleinere Fehlstellen durch Korrosion. Bei größeren Fehlstellen tendiert der Ist-Zustand des Rohres gegen null, so dass keine weitere Berechnung der Restwanddicke nach (Gleichung 8.1) erforderlich ist.

Empirische Restwanddicke:

$$RWD = t - \frac{s}{t} \cdot DM \cdot \frac{AK}{100} \quad [0 \leq RWD \leq t; mm] \quad \text{(Gleichung 8.1)}$$

mit

s	=	Korrosionstiefe [mm]
t	=	maximal vorhandene Wanddicke [mm]
DM	=	max. Durchmesser der Korrosionsstelle [mm]
AK	=	Anteil der Korrosionsart am Rohrsegment [%], max. Länge des Segments = 300 – 500 mm im Rahmen der Untersuchung

Um die empirische Restwanddicke der beiden häufigsten Korrosionsarten zu berücksichtigen, wird die resultierende empirische Restwanddicke RWD_r , bezogen auf die maximale Wanddicke, berechnet (Gleichung 8.5). Bei Berücksichtigung von nur einer Restwanddicke, nämlich der geringeren, würde der schädigende Einfluss der zweiten Korrosionsart vernachlässigt werden.

Resultierende empirische Restwanddicke:

$$RWD_r = \frac{(RWD_1 \cdot RWD_2)}{t} \quad [0 \leq RWD \leq t; \text{ mm}] \quad (\text{Gleichung 8.5})$$

RWD_1 und RWD_2 sind die Werte der empirische Restwanddicke bei Berücksichtigung der beiden häufigsten Korrosionsarten jeweils für die Rohraußen- und Rohrinneenseite in Millimetern. Die im Folgenden beschriebene Schädigungszahl Rohr errechnet sich aus der resultierenden empirischen Restwanddicke mit dem geringeren Wert für die Rohraußen- oder Rohrinneenseite.

Eine Überlagerung der inneren und äußeren empirischen Restwanddicke erfolgt nicht, da im Verlauf der Untersuchungen festgestellt wurde, dass gleichzeitig vorhandene starke Verschwächungen an der Rohrinne- und Rohraußenseite nicht vorkamen (das heißt, keine Muldenkorrosion an einer Stelle von innen und außen).

Der Vergleich einer Schädigung bzw. Verschwächung des Rohrquerschnitts durch Korrosion erfolgt über eine sog. Schädigungszahl Rohr, indem die empirische Restwanddicke mit der tatsächlich vorhanden (maximalen) Wanddicke ins Verhältnis gesetzt wird (Gleichung 8.2).

$$\text{Schädigungszahl Rohr } SZ_R = \frac{RWD_r}{t} \quad \text{bzw.} \quad = 1 - \left(\frac{s}{t^2} \cdot DM \cdot \frac{AK}{100} \right) \quad [-] \quad (\text{Gleichung 8.2})$$

mit den Grenzwerten $SZ_R = 1$ Rohrwand vollständig erhalten und
 $SZ_R = 0$ Rohrwand vollständig zerstört

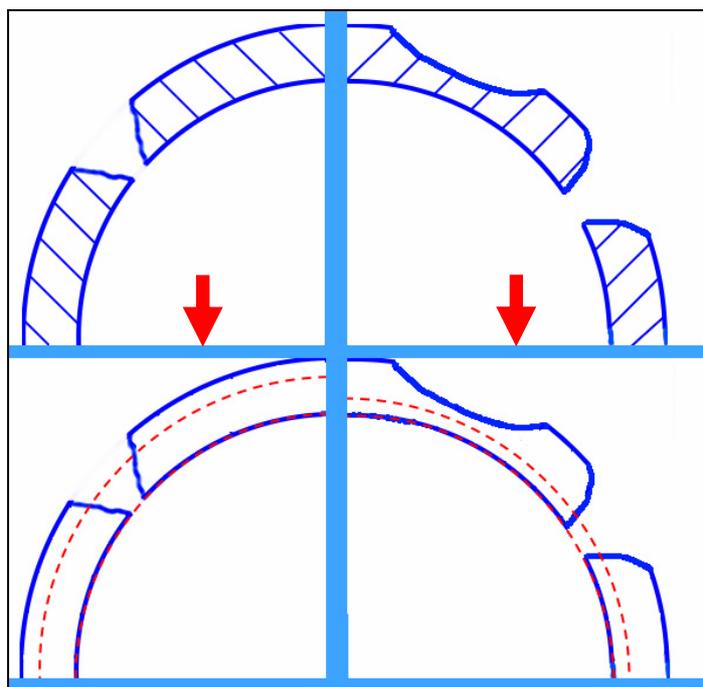


Abbildung 86:
 Beispiele der Verteilung des
 restlichen geschwächten
 Rohrquerschnitts zu einer
 empirischen Restwanddicke RWD
 (rote Linie)

Ein Vergleich der jeweiligen Schädigungszahl für die untersuchten Rohrproben erfolgt in Diagramm 16 bis Diagramm 17.

Für jede Rohrprobe wurde im Rahmen der Untersuchungen die empirische Restwanddicke RWD für die zwei häufigsten anzutreffenden Korrosionsarten zuzüglich der Graphitierung für die Rohrrinnen- und Rohraußenseite ermittelt.

Anzumerken ist, dass bei Auftreten von Lochkorrosion oder vollständiger Graphitierung diese nur jeweils einer Rohrseite zugeschrieben werden kann, um eine doppelte Erfassung auszuschließen.

Die Korrosionsart, welche die kleinste empirische Restwanddicke und somit die kleinste Schädigungszahl Rohr SZ_R ergibt, ist als die dominierende Korrosionsart zu betrachten und für weitere Berechnungen bezüglich der Resttragfähigkeit und technischer Ist-Zustand einzusetzen.

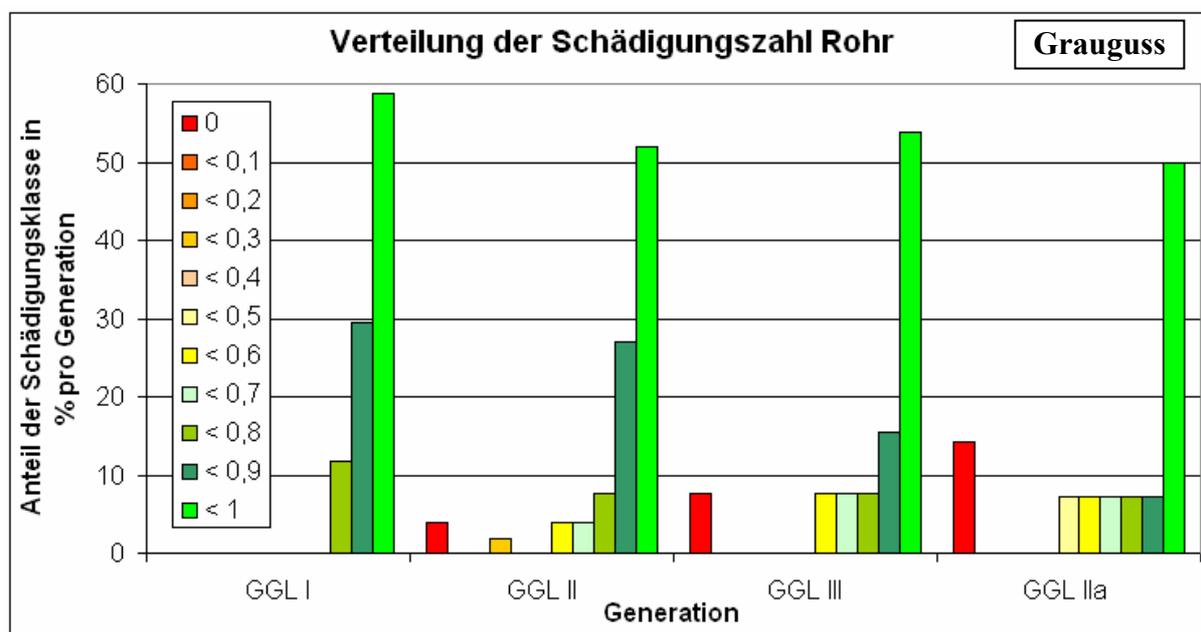


Diagramm 16: Verteilung der Schädigungszahl Rohr SZ_R an Graugussrohr-Generationen; Aufteilung in Schädigungsklassen

Ablesebeispiel zu Diagramm 16: 50 % der Graugussrohre der Generation GGL Ila befinden sich in der Schädigungsklasse $< 0,9$. Das bedeutet wiederum, dass 50 % dieser Rohre demnach einen nur sehr schwach geschädigten Rohrquerschnitt besitzen, da die Schädigungszahl im Bereich $0,9 \leq SZ_R \leq 1,0$ liegt.

Diagramm 16 ist weiterhin zu entnehmen, dass ein relativ hoher Anteil ($\geq 50\%$) aller Grauguss-Generationen mit einer Schädigungszahl $\geq 0,9$ einen noch fast vollständig erhaltenen Restquerschnitt aufweist.

Die Schädigungsklasse „0“ bzw. die Schädigungszahl $SZ_R = 0$ bedeuten, dass die empirische Restwanddicke RWD den Wert „0“ besitzt und der Rohrquerschnitt somit stark geschädigt ist.

Der Wert der Schädigungszahl Rohr dient Vergleichszwecken, sagt jedoch nichts über die endgültige Resttragfähigkeit eines Rohres aus, da der Einfluss der Festigkeitseigenschaften (z.B. Zugfestigkeit) nicht berücksichtigt werden kann. Die Ermittlung der Resttragfähigkeit soll unter Annahme ungünstiger Verlegeparameter, typischer Festigkeitseigenschaften und der Nutzung der empirischen Restwanddicke RWD erfolgen (Kapitel 10).

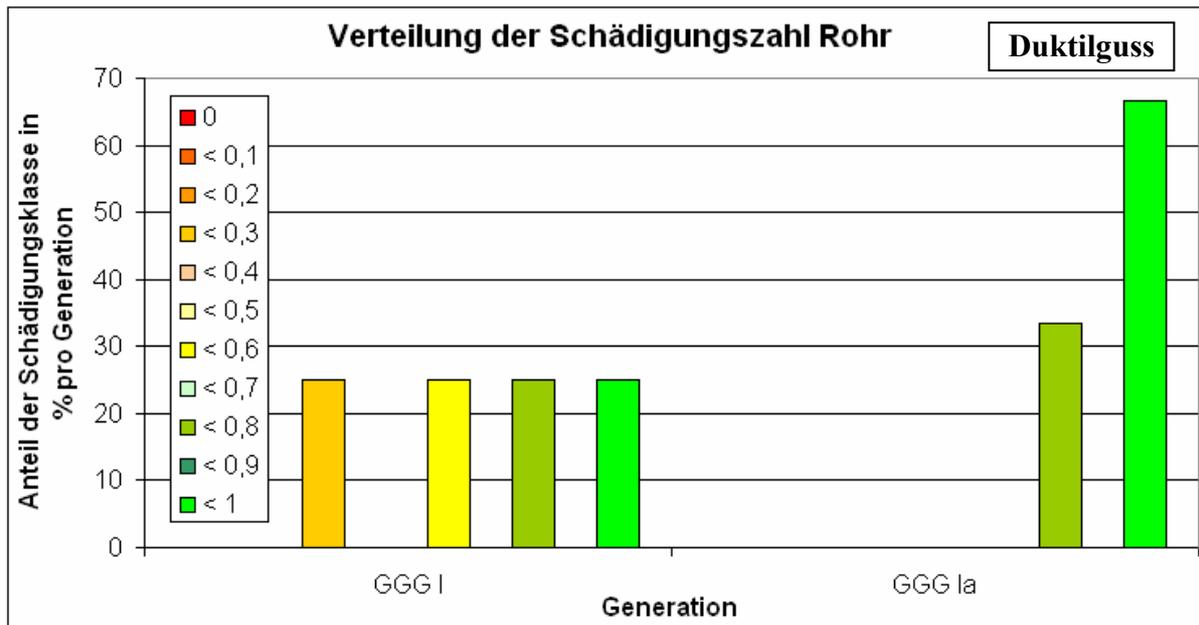


Diagramm 17: Verteilung der Schädigungszahl Rohr SZ_R an Duktulgussrohr-Generationen; Aufteilung in Schädigungsklassen

In Diagramm 17 ist ein relativ großer Anteil an nur wenig geschwächten Duktulgussrohren der Generation GGG Ia zu erkennen. Aufgrund der relativ geringen Probenanzahl an Duktulgussrohren im Rahmen der Untersuchung (7 Proben) fehlt es den Darstellungen in Diagramm 17 an Aussagekraft.

Laut Diagramm 18 weisen die älteren Stahlrohr-Generationen im Vergleich zu Gussrohren einen relativ hohen Anteil an niedrigen Schädigungsklassen bzw. Schädigungszahlen auf. Das heißt, dass ein relativ stark geschwächter Rohrquerschnitt vorhanden ist. Ursache hierfür ist die vergleichsweise geringe Grundwanddicke der Rohre und ein daraus resultierendes geringes Verhältnis von empirischer Restwanddicke RWD zur maximal vorhandenen Wanddicke (Gleichung 8.2).

Wie oben bereits erwähnt ist die dominierende Korrosionsart die Korrosionsart, welche die kleinste rechnerische Restwanddicke verursacht und somit die vom Betrag kleinste Schädigungszahl Rohr. In Tabelle 8.4 sind die dominierenden Korrosionsarten dargestellt, aufgeteilt nach ihrer Erscheinung an der Rohrrinnen- oder Rohraußenseite.

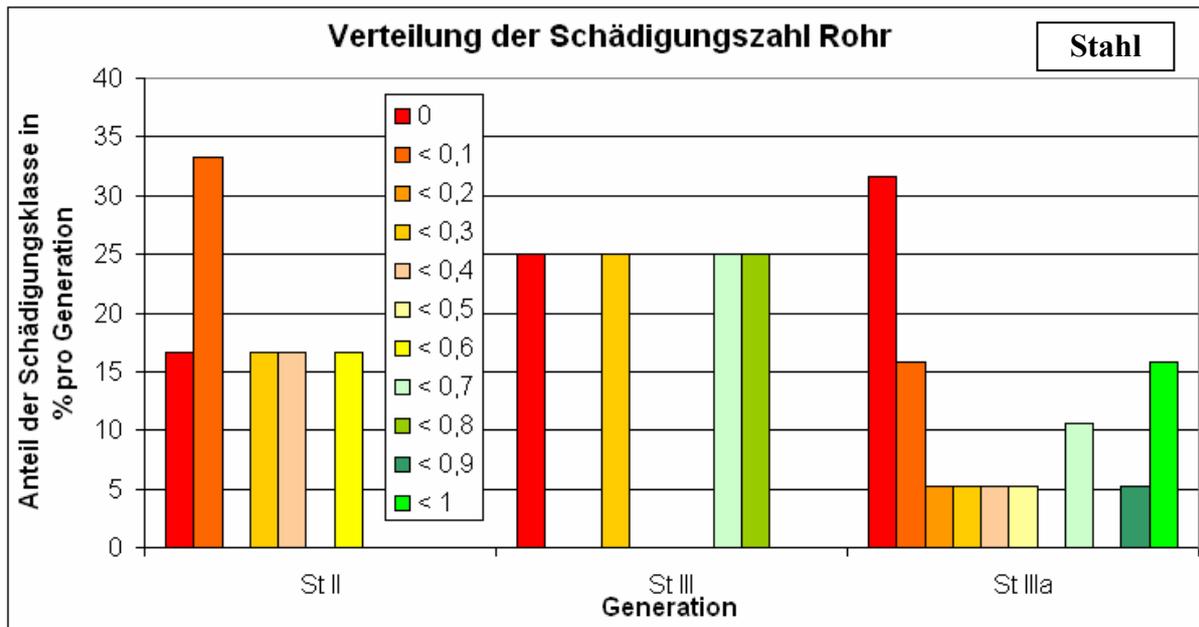


Diagramm 18: Verteilung der Schädigungszahl Rohr SZ_R an Stahlrohr-Generationen; Aufteilung in Schädigungsklassen

Tabelle 8.4: Dominierende Korrosionsarten an metallischen erdverlegten Trinkwasserleitungen

Rohr-generation	Dominierende Korrosionsart		Anteil an allen festgestellten Korrosionsarten pro Generation	
	außen	innen	außen	innen
GGL I	Graphitierung	Graphitierung	67 %	50 %
GGL II	Graphitierung	Graphitierung	50 %	76 %
GGL III	Graphitierung	Graphitierung	86 %	86 %
GGL IIa	Graphitierung	Graphitierung, Flächenkorrosion	67 %	44 % / 33 %
GGG I	Muldenkorrosion	Muldenkorrosion	100 %	100 %
GGG Ia	Graphitierung	Graphitierung	67 %	100 %
St II	keine	Flächenkorrosion		100 %
St III	keine	Flächen- / Muldenkorrosion		50 % / 50 %
St IIa	Flächenkorrosion	Flächenkorrosion	67 %	71 %

Aus Tabelle 8.4 ist zu entnehmen, dass bei den Grauguss-Rohrgenerationen neben der Graphitierung als der Korrosionsart mit dem größten schädigenden (dominierenden) Einfluss auch die Flächenkorrosion bzw. Muldenkorrosion auftreten kann.

Bei Duktulgussrohren der Generation GGG Ia ist abweichend zur Muldenkorrosion als der häufigsten Korrosionsart die Graphitierung die dominierende Korrosionsart.

Nur sehr geringe Abweichungen zwischen häufigster und dominierender Korrosionsart sind bei annähernd allen Generationen der Stahlrohre vorhanden. Die häufigsten Korrosionsarten waren ebenso wie die dominierenden Korrosionsarten Mulden- und Flächenkorrosion.

Die Darstellungen in Tabelle 8.3 und Tabelle 8.4 lassen den Schluss zu, dass es u. U. unzureichend ist, bei Schadensereignissen am Rohrnetz über sog. Erfassungsbögen zur

Schadensstatistik, nur die Schadensart Korrosion oder wenigstens die offensichtlich häufigste Korrosionsart zu erfassen (Beispiel GGG Ia) [5]. Über materialtechnische Zustandsuntersuchungen muss die dominierende Korrosionsart bzw. die Korrosionsart mit dem größten schädigenden Einfluss (Schwächung des Rohrquerschnitts) ermittelt werden, um passende Aussagen zum technischen Ist-Zustand des entsprechenden Rohrleitungsabschnitts treffen zu können.

8.3.2 Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K

In Abschnitt 6.3 wurde bereits die Erfassung und Spezifizierung des an den Rohrproben vorhandenen Korrosionsschutzes beschrieben. Der Korrosionsschutz hat die Aufgabe, den metallischen Rohrwerkstoff vor korrosiven Medien wie Bodenfeuchtigkeit oder Streuströmen zu schützen und somit einen Abtrag des Rohrmaterials (=Korrosion) zu verhindern.

Es liegt die Annahme nahe, dass die Schwächung des Rohrquerschnitts durch Korrosion mit der Qualität des Korrosionsschutzes zusammenhängen muss. Ein mangelhafter Korrosionsschutz wird also zu einer niedrigen Schädigungszahl Rohr SZ_R führen, da die metallische Rohroberfläche nicht mehr ausreichend vor korrosiven Medien geschützt wird.

Um die Qualität des vorhandenen Korrosionsschutzes an den Rohrproben vergleichen zu können, werden die in Abschnitt 6.3 beschriebenen Parameter „Flächenanteil Korrosionsschutz“ und „Haftung Korrosionsschutz“ genutzt. Ähnlich der Schädigungszahl Rohr wird aus diesen zwei Parametern die Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K ermittelt. Weiterhin wird die Annahme getroffen, dass alle in Abschnitt 4.5 beschriebenen Korrosionsschutzarten bei vollständiger und ordnungsgemäßer Ausführung eine annähernd gleiche Schutzwirkung besitzen. Erst bei Beschädigung kann die restliche Schutzwirkung untereinander abweichen. Zum Beispiel besteht eine erhöhte Gefahr der Lochkorrosion bei Stahlrohren mit bituminösem Korrosionsschutz und Jutearmierung. Dieses Gefährdungspotenzial wird wiederum bei sichtbaren Schädigungen durch die Schädigungszahl Rohr erfasst.

Die Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K ist das Produkt aus den zwei Faktoren, welche die Parameter „Flächenanteil Korrosionsschutz“ und „Haftung Korrosionsschutz“ berücksichtigen (Gleichung 8.3). Die Faktoren erhalten den Wert „1“, wenn der Korrosionsschutz vollflächig bzw. fest haftend vorhanden ist und den Wert „0“, wenn der Korrosionsschutz nicht mehr vorhanden ist bzw. nur noch lose am Rohr anliegt.

Für den Parameter „Haftung Korrosionsschutz“ ergibt sich deshalb in Anlehnung an Tabelle 6.3 ein Faktor „Haftung“ mit folgenden Grenzwerten:

Haftung Korrosionsschutz = fester Verbund	→ Faktor 1
Haftung Korrosionsschutz = lose	→ Faktor 0

Die zugehörigen restlichen Unterteilungen werden über lineare Interpolation ermittelt:

Haftung Korrosionsschutz = mäßiger Verbund	→ Faktor 2/3
Haftung Korrosionsschutz = lockerer Verbund	→ Faktor 1/3

Ähnlich wird beim Faktor für den Parameter „Flächenanteil Korrosionsschutz“ verfahren. In Anlehnung an Tabelle 6.3 ergeben sich folgenden Grenz- bzw. Zwischenwerte:

Flächenanteil Korrosionsschutz = 100 % (vollflächig)	→ Faktor 1
Flächenanteil Korrosionsschutz = 41 – 60 % (zur Hälfte vorhanden)	→ Faktor 1/2
Flächenanteil Korrosionsschutz = 0 % (nicht vorhanden)	→ Faktor 0

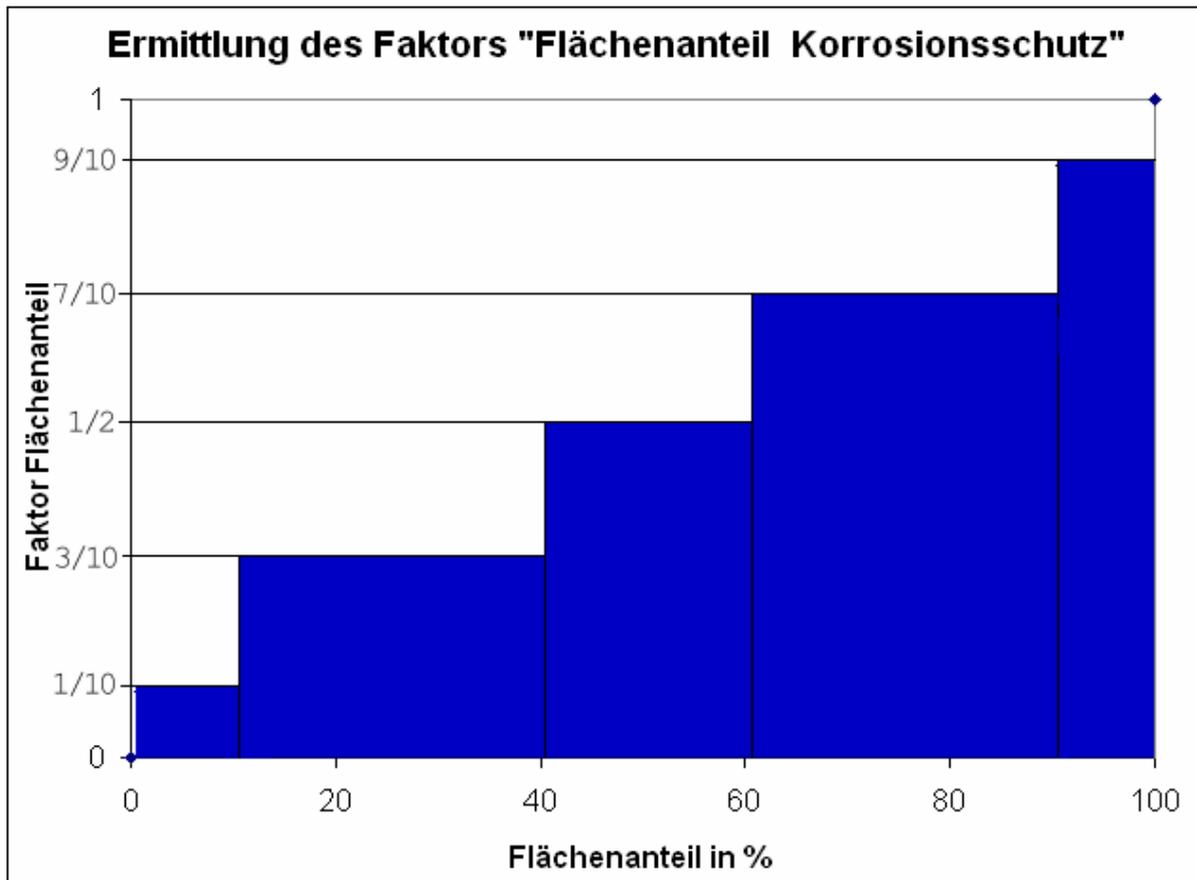


Diagramm 19: Umrechnung des Parameters „Flächenanteil Korrosionsschutz“ in einen zugehörigen anteiligen Faktor

Den zugehörigen restlichen Unterteilungen wird der Faktor anteilmäßig entsprechend Diagramm 19 zugeordnet. Bei einem geringfügig vorhandenen Rest des Korrosionsschutzes wird der Faktor ebenso geringfügig von „0“ auf „0,1“ erhöht bzw. bei einem fast vollständig erhaltenden Korrosionsschutz der Faktor geringfügig von „1“ auf „0,9“ verringert. Anteilige Zwischenwerte werden wie in Diagramm 19 dargestellt interpoliert.

Die Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K (Gleichung 8.3) errechnet sich folglich zu:

$$\text{Schädigungszahl } SZ_K = \text{Faktor Flächenanteil} \cdot \text{Faktor Haftung} [-] \quad (\text{Gleichung 8.3})$$

Ein vollflächig erhaltener Korrosionsschutz (Faktor = 1) ergibt dennoch keine Schutzwirkung ($SZ_K = 0$), wenn er nur noch lose am Rohr anliegt (Faktor = 0; Gefahr der Unterwanderung des Korrosionsschutzes durch korrosive Medien bei loser Haftung).

In Diagramm 20 bis Diagramm 23 ist die Verteilung der Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K für die jeweiligen Graugussrohr-, Duktigussrohr- und Stahlrohr-Generationen dargestellt. Gleichzeitig erfolgte eine Differenzierung in Außen- und Innenkorrosionsschutz.

Bis auf wenige Ausnahmen, wie etwa die Schädigungszahl SZ_K beim Korrosions-Außenschutz der Generation GGL IIa (Diagramm 20), der Generationen GGG I und St IIIa (Diagramm 22) befindet sich der restliche vorhandene Korrosionsschutz der untersuchten Rohrproben mit einer Schädigungszahl von $SZ_K < 0,2$ in einem relativ schlechten Zustand. Das bedeutet, dass der restliche Korrosionsschutz nur noch lose am Rohr anlag und / oder nur noch einen geringen Teil der Rohroberfläche bedeckte. Zusätzlich ist in Diagramm 20 bis Diagramm 23 zu erkennen, dass durchschnittlich die Schädigungszahl SZ_K des Innen-Korrosionsschutzes vergleichsweise niedriger ist als beim Außen-Korrosionsschutz.

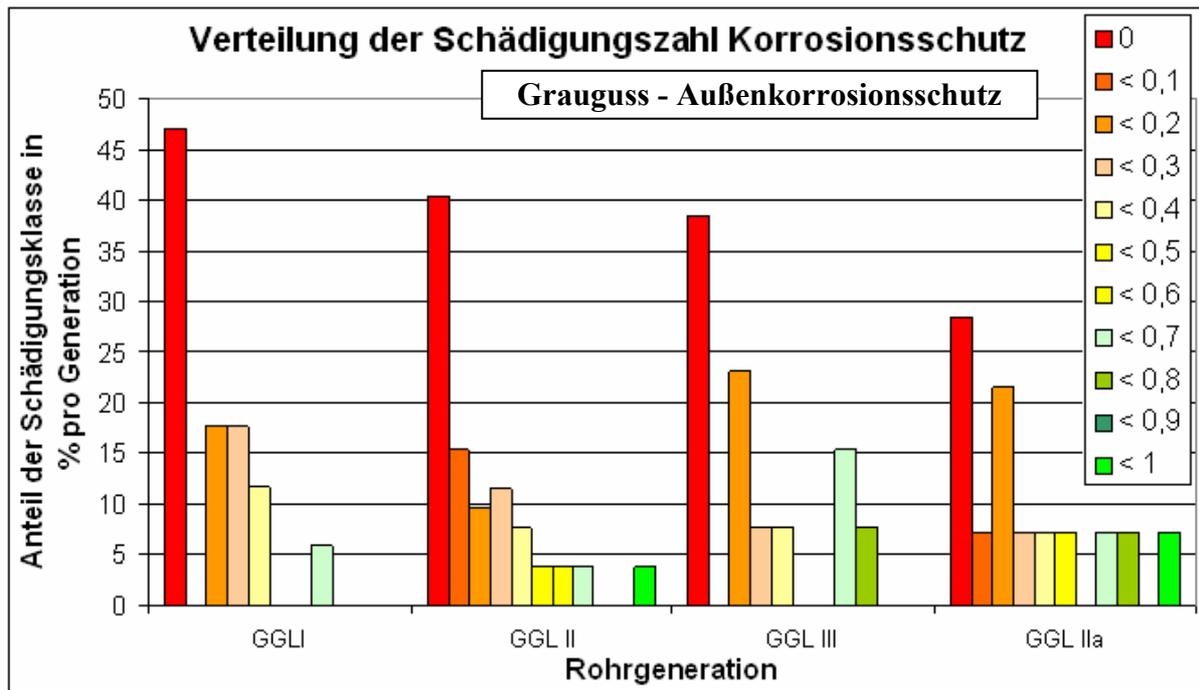


Diagramm 20: Verteilung der Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K (Außenkorrosionsschutz) an Graugussrohr-Generationen; Aufteilung in Schädigungsklassen

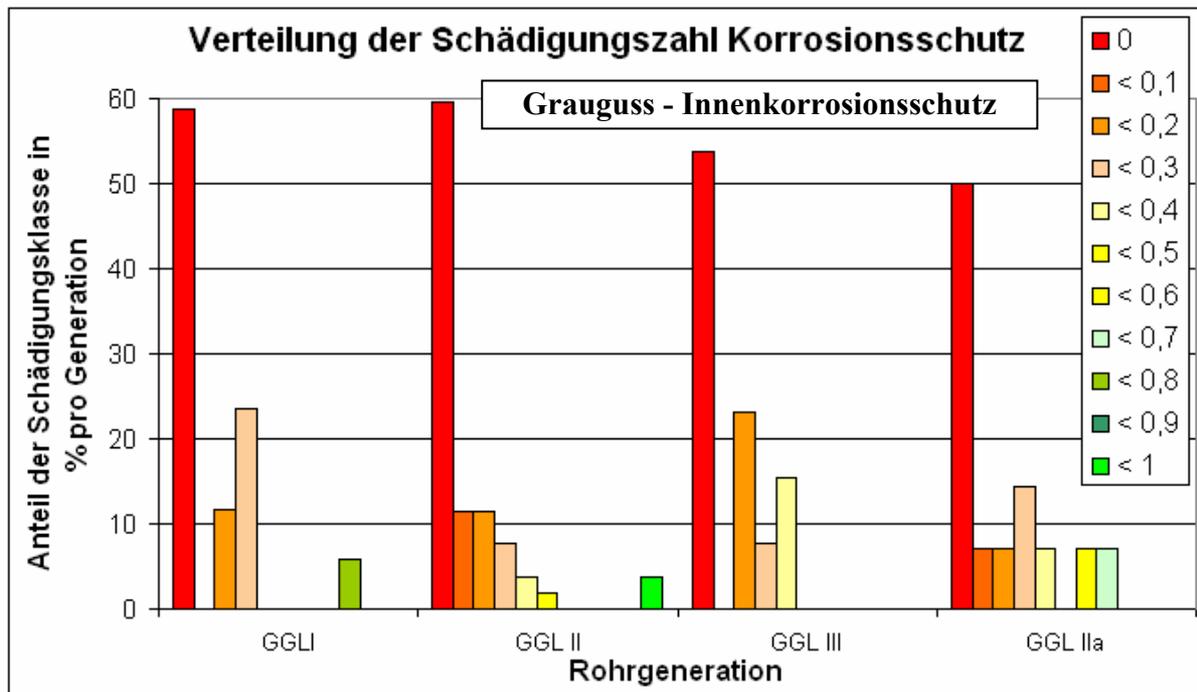


Diagramm 21: Verteilung der Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K (Innenkorrosionsschutz) an Graugussrohr-Generationen; Aufteilung in Schädigungsklassen

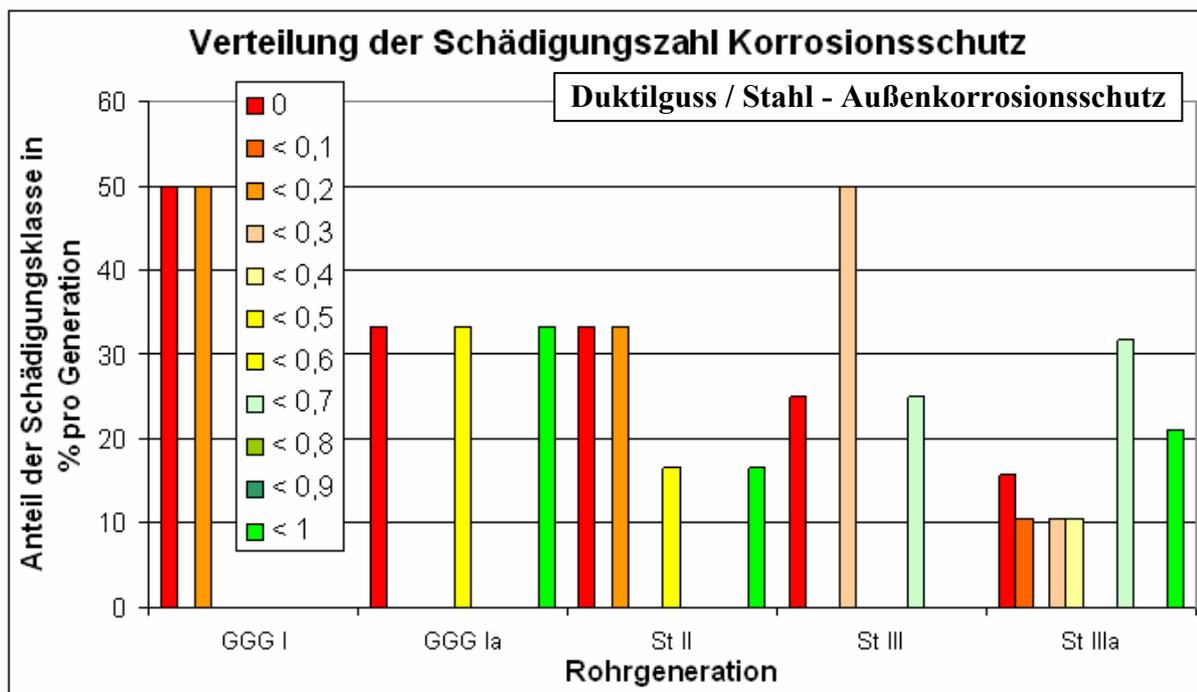


Diagramm 22: Verteilung der Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K (Außenkorrosionsschutz) an Duktulgussrohr- und Stahlrohr-Generationen; Aufteilung in Schädigungsklassen

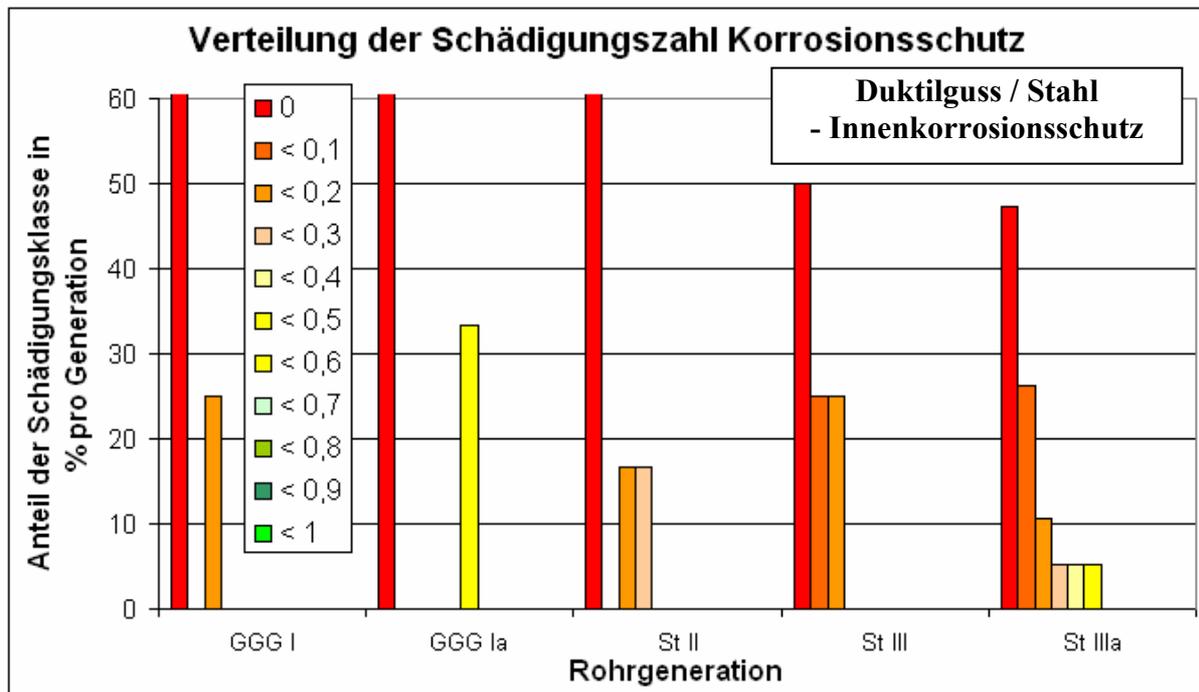


Diagramm 23: Verteilung der Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K (Innenkorrosionsschutz) an Duktilgussrohr- und Stahlrohr-Generationen; Aufteilung in Schädigungsklassen

Den Darstellungen in Diagramm 20 bis Diagramm 23 ist zu entnehmen, dass an älteren Rohrgenerationen die Wirkung des äußeren und inneren Korrosionsschutzes nachzulassen scheint.

Wie oben bereits erwähnt, liegt die Vermutung nahe, dass ein geschwächter Rohrquerschnitt mit einem mangelhaften Korrosionsschutz und unzureichender Schutzwirkung zusammenhängt (niedrige SZ_R = niedrige SZ_K). Zur Überprüfung dieser Vermutung wurden in den Diagramm 24 bis Diagramm 27 der Schädigungszahl Rohr SZ_R einzelner Rohrproben die zugehörige Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K gegenübergestellt. Es müsste ein Trend erkennbar sein, bei welchem sinkende Schädigungszahlen SZ_R auch zu sinkenden Schädigungszahlen SZ_K führen.

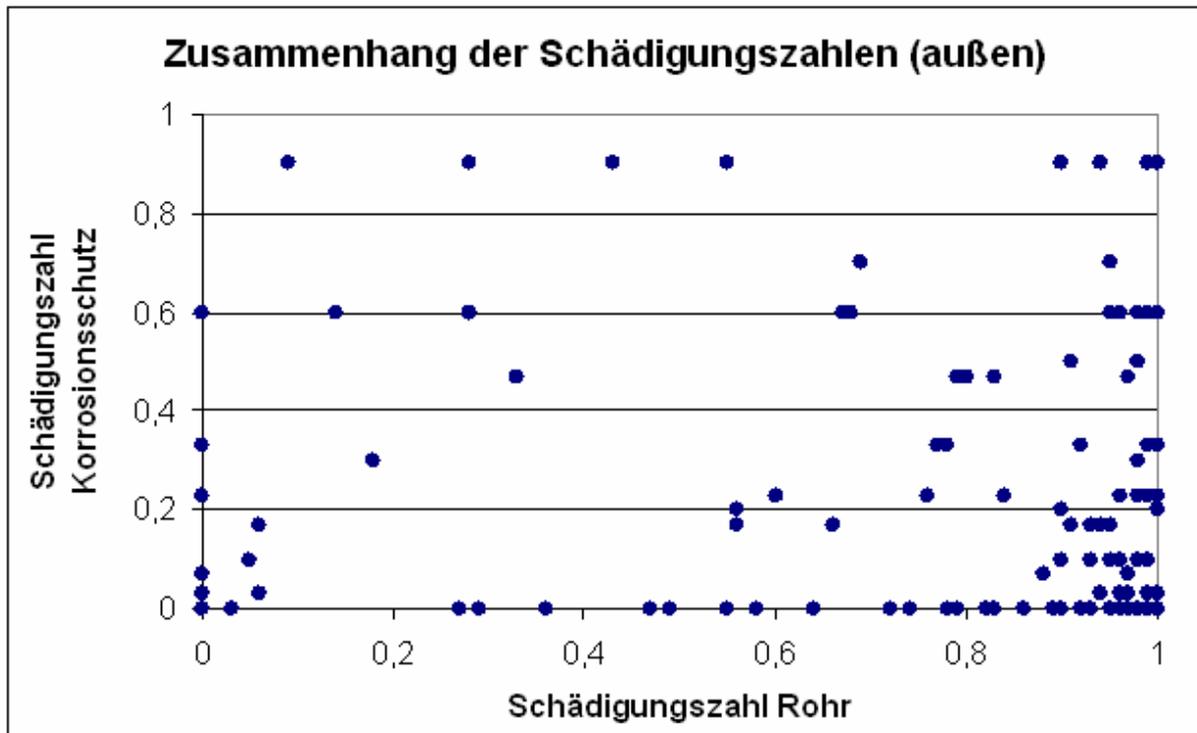


Diagramm 24: Zusammenhang zwischen den Schädigungszahlen SZ_R und SZ_K (außen); alle Rohrgenerationen

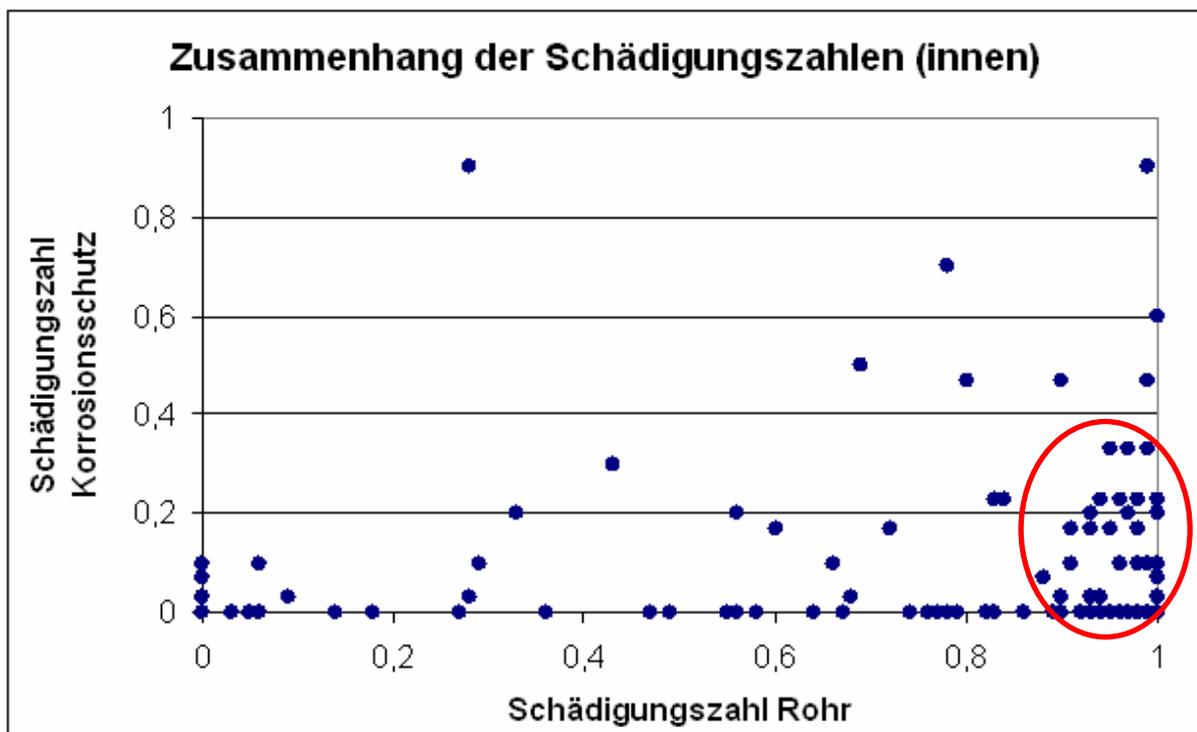


Diagramm 25: Zusammenhang zwischen den Schädigungszahlen SZ_R und SZ_K (innen); alle Rohrgenerationen

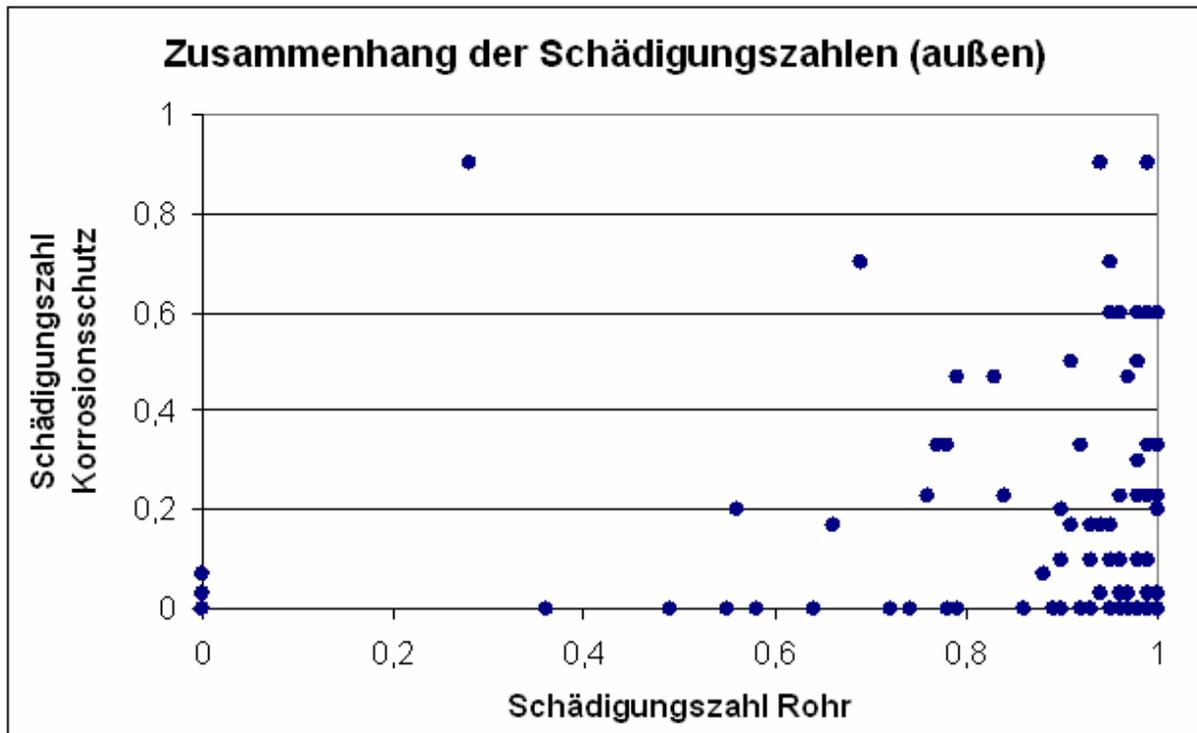


Diagramm 26: Zusammenhang zwischen den Schädigungszahlen SZ_R und SZ_K (außen), beispielhaft für alle Graugussrohr-Generationen

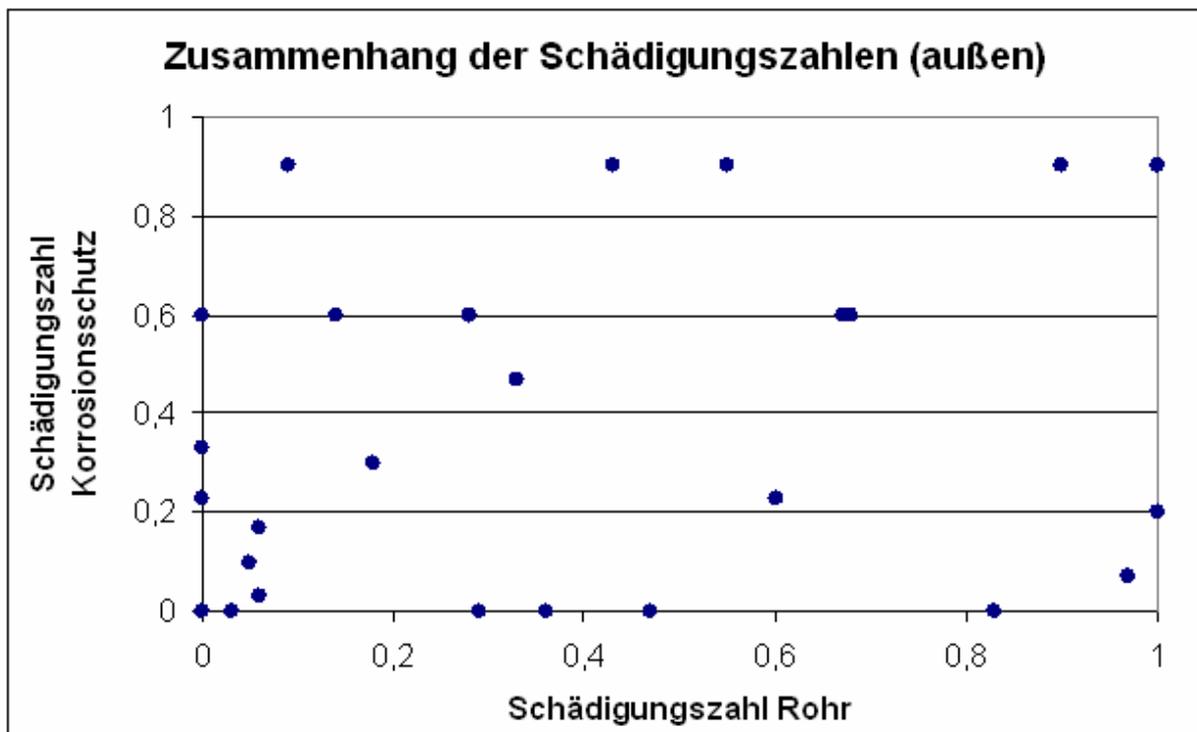


Diagramm 27: Zusammenhang zwischen den Schädigungszahlen SZ_R und SZ_K (außen); beispielhaft für alle Stahlrohr-Generationen

Aufgrund der sehr wenigen Untersuchungsergebnisse von Duktiguss-Rohrproben (7 Stück) wurde auf eine separate Darstellung des Zusammenhangs der Schädigungszahlen SZ_R und SZ_K verzichtet.

Ein Trend einer stetigen Zustandsverschlechterung (sinkende Schädigungszahl Rohr) bei mangelhaftem Korrosionsschutz (sinkende Schädigungszahl Korrosionsschutz) ist in Diagramm 24 bis Diagramm 27 nicht zu erkennen. Besonders in Diagramm 25 im markierten Bereich ist ersichtlich, dass trotz einer Konzentration von Schädigungszahlen SZ_K mit geringem Wert ($< 0,4$) die zugehörigen Schädigungszahlen SZ_R einen relativ hohen Wert ($>0,9$) aufweisen und der Rohrquerschnitt entsprechend wenig Verschwächungen aufweist. Die Aussage, dass ein mangelhafter Korrosionsschutz (niedriger Wert von SZ_K innen sowie außen) zwangsweise zu einer Schädigung bzw. Zustandsverschlechterung des Rohres (niedriger Wert von SZ_R) führt, kann anhand der vorangegangenen statistischen Auswertungen nicht bestätigt werden.

Die höheren Werte der Schädigungszahl Rohr SZ_R an Graugussrohren im Vergleich zu Stahlrohren sind durch die größere Wanddickenreserve zu erklären (unter Annahme gleicher Korrosionsgeschwindigkeiten bzw. Abtragungsraten).

Ein indirekter Zusammenhang zwischen den Schädigungszahlen SZ_K des äußeren und inneren Korrosionsschutzes und der Korrosionsgeschwindigkeit bzw. Abtragungsrate (zeitunabhängig), ausgedrückt durch die absoluten Wanddickenverlusten (Gleichung 8.11), ist nicht erkennbar.

Absoluter resultierender Wanddickenverlust:

$$t_{\text{verl}} = t - RWD_r \quad [mm] \quad (\text{Gleichung 8.11})$$

mit t = maximal vorhandene Wanddicke [mm]
 RWD_r = resultierende Restwanddicke (Gleichung 8.5) [mm]

Je beschädigter der innere bzw. äußere Korrosionsschutz ist, umso größer sollte der Materialabtrag bzw. der Substanzverlust am Rohr sein. Diese Annahme wird durch die beispielhaften Darstellungen in Diagramm 28 und Diagramm 29 nicht bestätigt.

Der Korrosionsbeginn am Rohr und der Beginn des Qualitätsverlustes des Korrosionsschutzes sind nicht feststellbar. Da ein geschädigter Korrosionsschutz nicht zwangsweise sofort zu einem Substanzverlust führen muss (niedriger Wert Schädigungszahl SZ_R), ist anzunehmen, dass ein niedriger Wert der Schädigungszahl SZ_K einen Substanzverlust und somit eine Zustandsverschlechterung „nachschiebt“ (Diagramm 30; sog. Verzögerungseffekt). Diese Annahme wird durch die Darstellungen in Diagramm 31 für Graugussrohre nicht bestätigt (innen sowie außen). Aus den Darstellungen in Diagramm 32 ist jedoch bezüglich der technischen Zustandsverschlechterung für Stahlrohre ein geringer Verzögerungseffekt zwischen Schädigungszahl Korrosionsschutz und Schädigungszahl Rohr erkennbar. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um aus diesen Verzögerungseffekt auf den Beginn des Korrosionsangriffs schließen zu können (siehe Abschnitt 15.2).

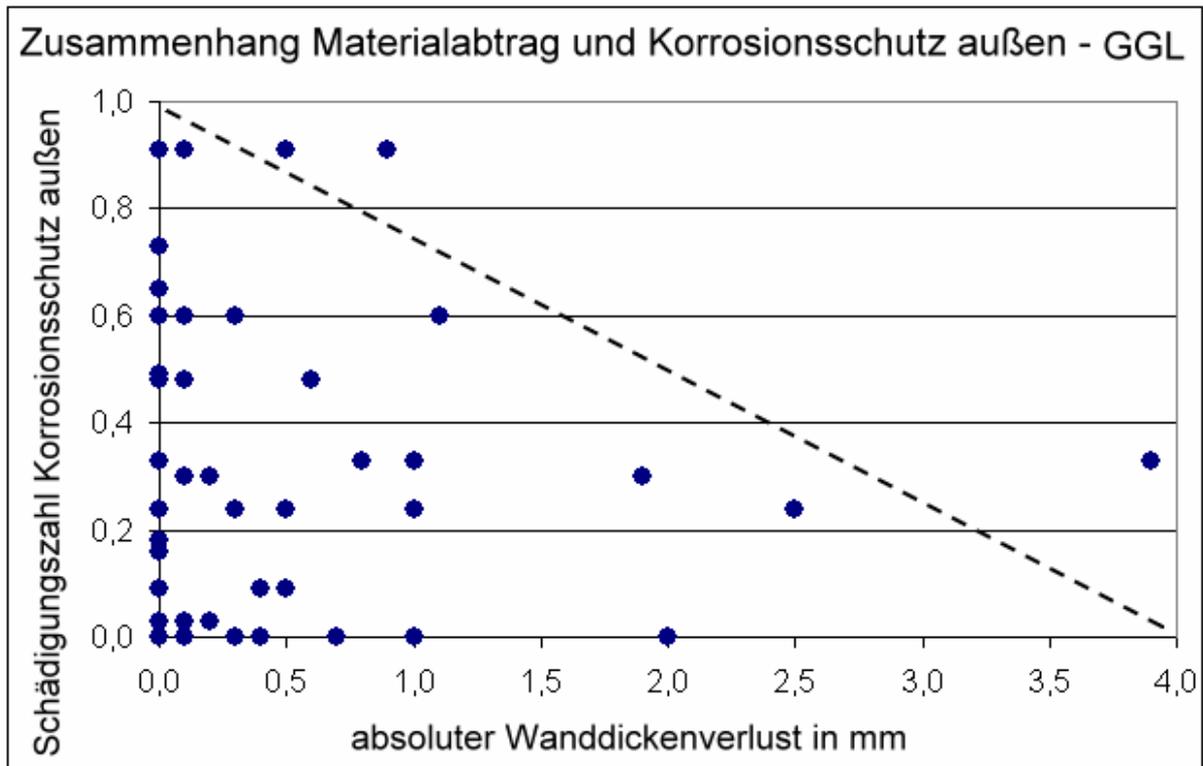


Diagramm 28: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Schädigungszahl Korrosionsschutz außen SZ_{Ka} und dem absoluten Wanddickenverlust (Gleichung 8.11); Graugussrohre

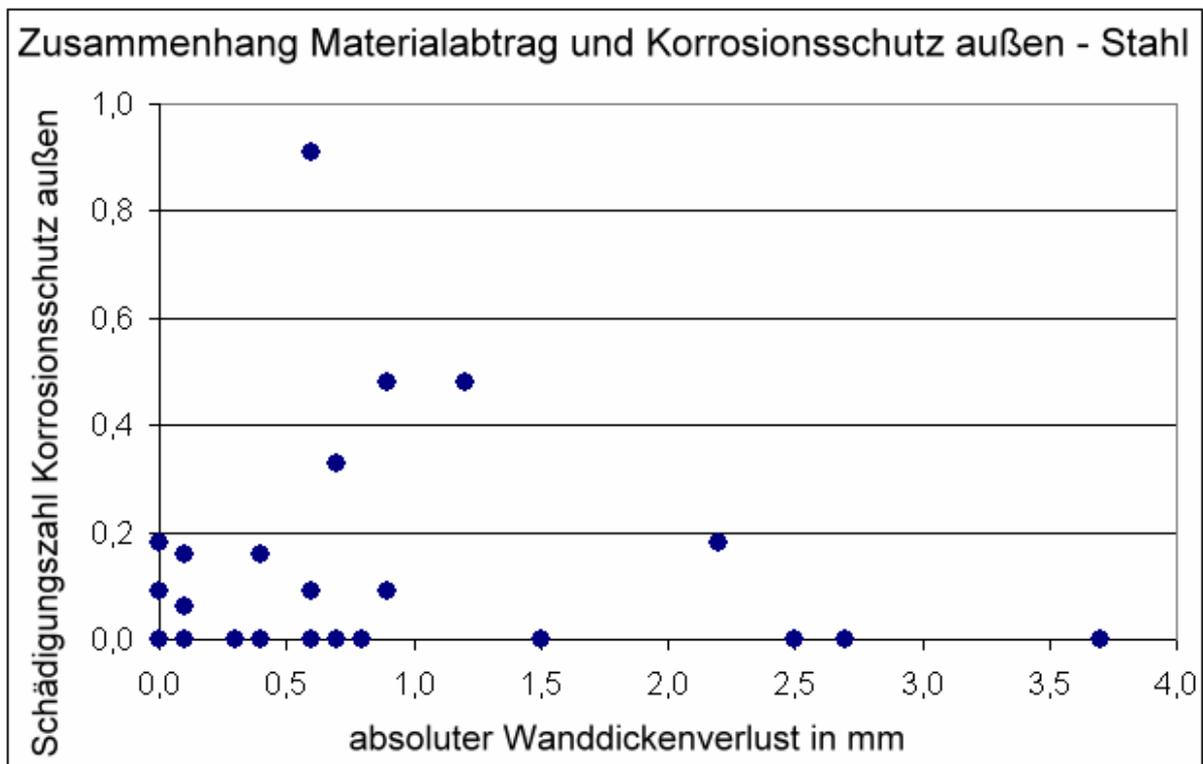


Diagramm 29: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Schädigungszahl Korrosionsschutz außen SZ_{Ka} und dem absoluten Wanddickenverlust (Gleichung 8.11); Stahlrohre

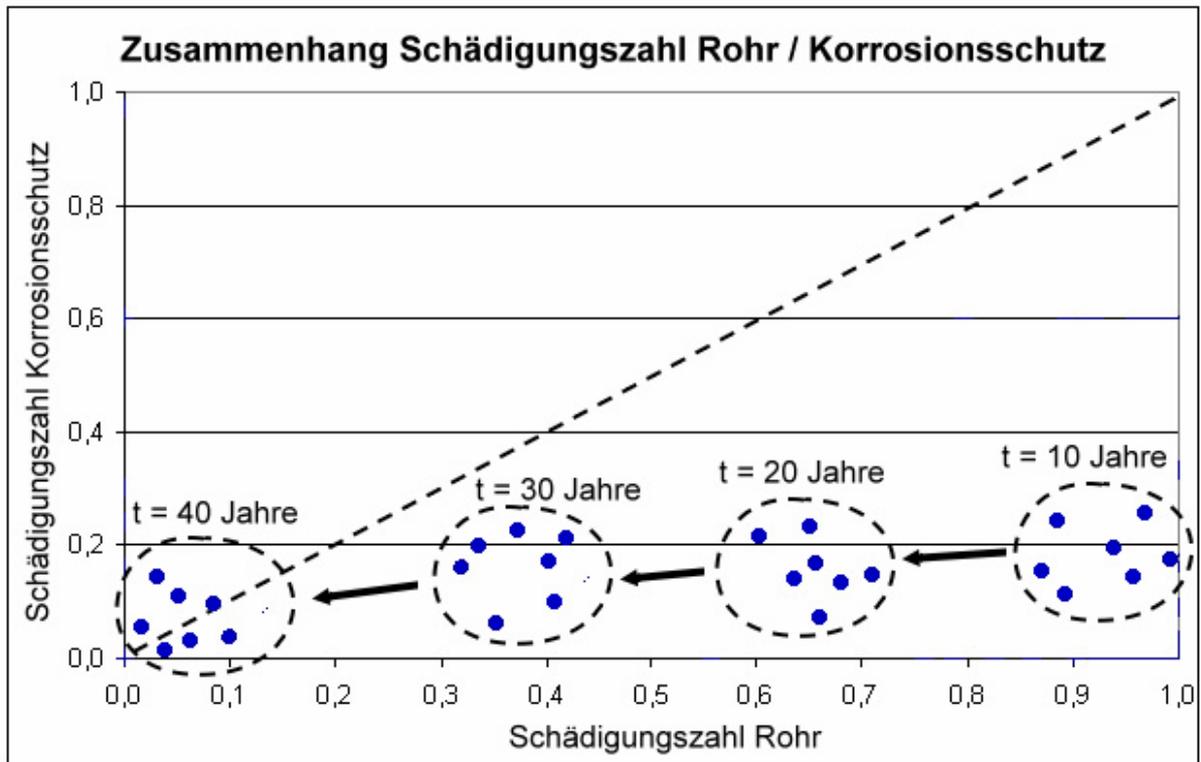


Diagramm 30: Beispielhafte Darstellung des Verzögerungseffekts bezüglich des Zusammenhangs zwischen der Schädigungszahl Korrosionsschutz und einer angenommen verzögerten und zeitabhängigen Verschlechterung der Schädigungszahl Rohr

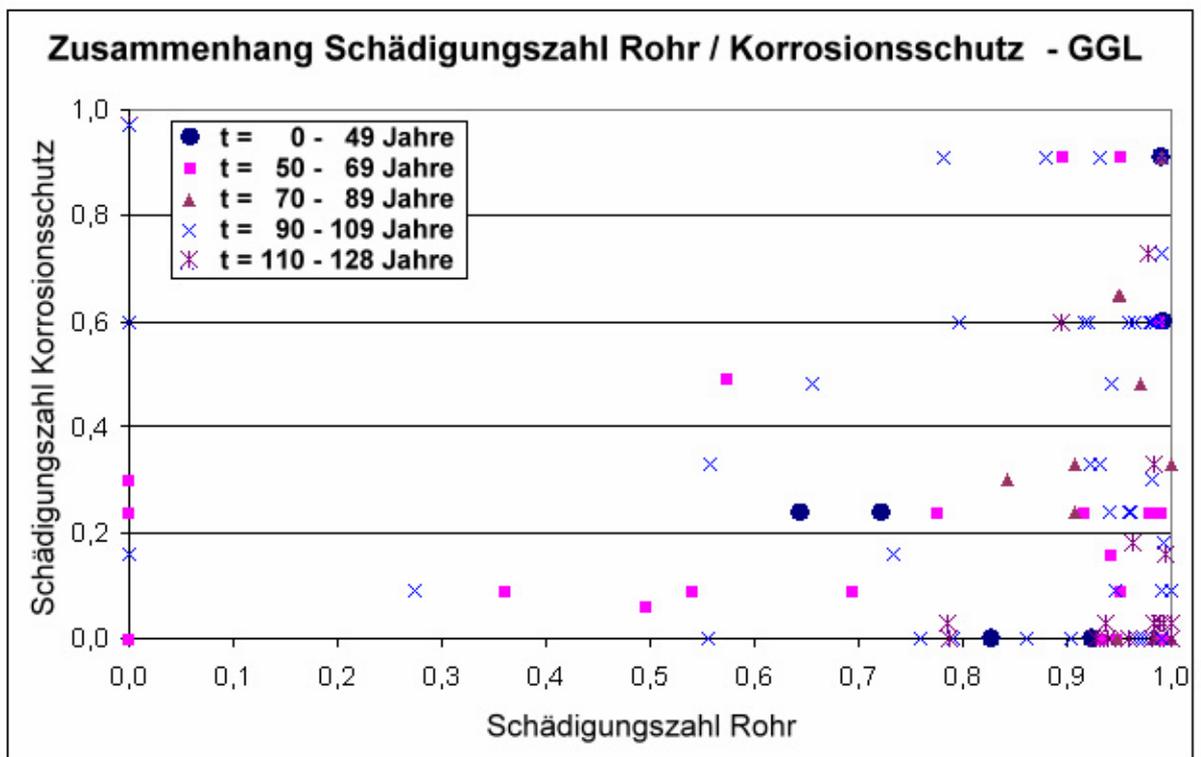


Diagramm 31: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Schädigungszahl Korrosionsschutz (außen) und der in Altersbereiche eingeteilten Schädigungszahl Rohr

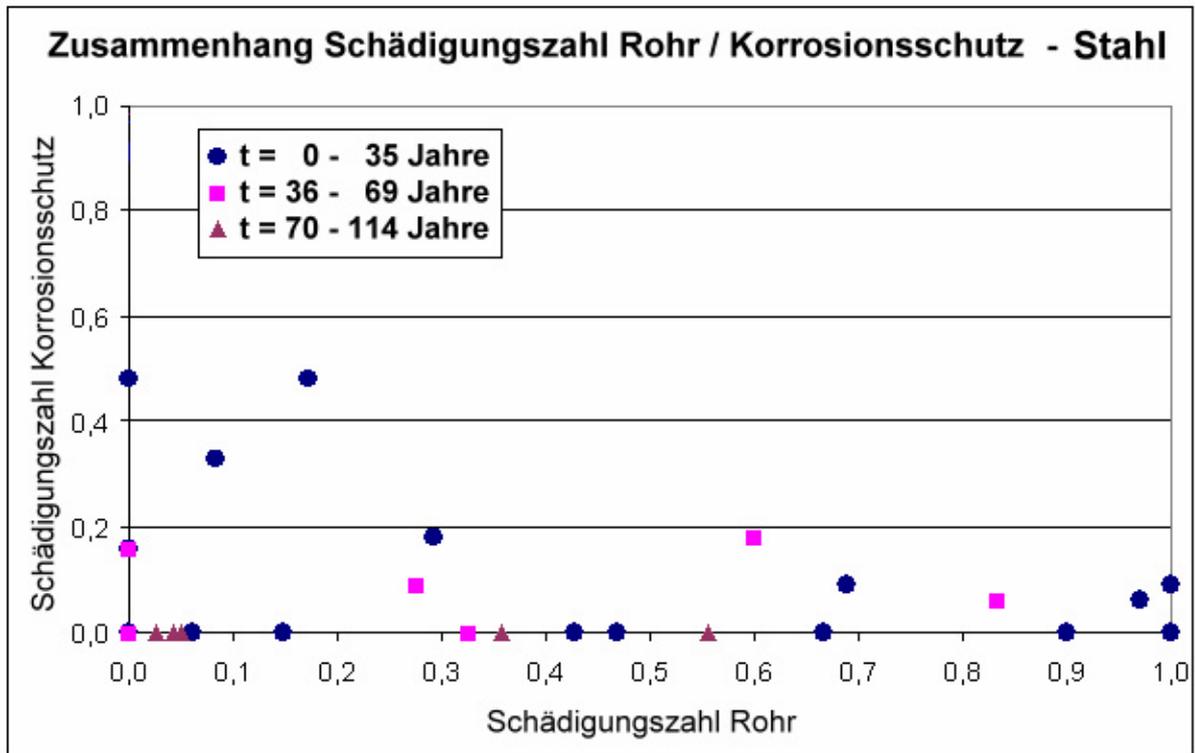


Diagramm 32: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Schädigungszahl Korrosionsschutz (außen) und der in Altersbereiche eingeteilten Schädigungszahl Rohr

Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen dem Wert der Schädigungszahlen SZ_R bzw. SZ_K und dem Einfluss des umgebenden Bodens (Bodenaggressivität) erfolgen in Kapitel 12.

8.3.3 Zusätzliche Betrachtungen bei der Ermittlung von RWD_r für weitere statische Berechnungen

Die resultierende empirische Restwanddicke RWD_r dient dem Vergleich der schädigenden Einflüsse der verschiedenen Korrosionsarten auf die Rohrsubstanz. Zur Nutzung von RWD_r für vergleichende statische Berechnungen der Mindesttragfähigkeit müssen Grenzwerte definiert werden, um ungünstige Korrosionsbilder auszuschließen. Rohrsegmente mit größer dimensionierter Lochkorrosion könnten zwar aufgrund von Überbrückungswirkungen noch durchaus tragfähig sein, jedoch ist eine Nutzung bzw. Sanierung solch eines Segments mit den heute bekannten Sanierungsverfahren für Trinkwasserleitungen nicht möglich [14].

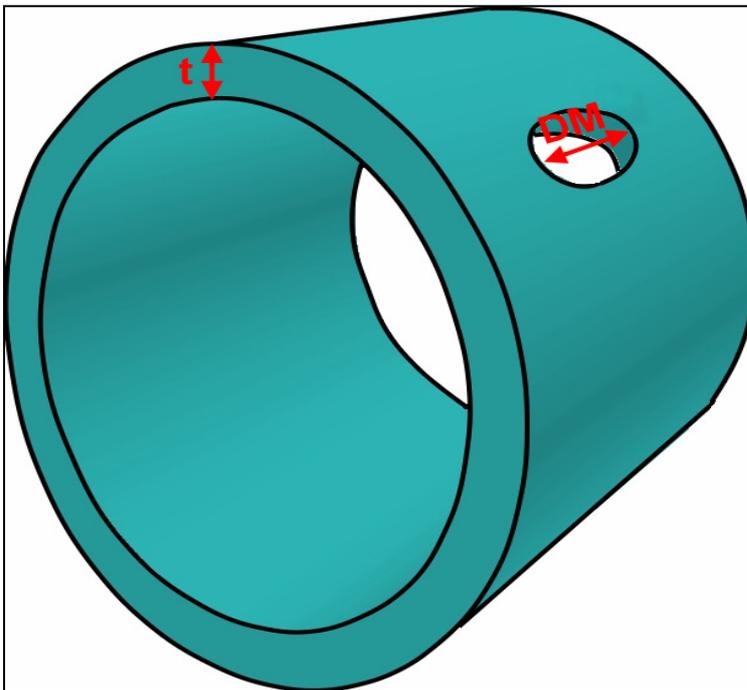


Abbildung 87:
Beispielhafte Darstellung einer ungünstigen Korrosionsform (hier Lochkorrosion) bei der Ermittlung der empirischen Restwanddicke RWD

Zur Veranschaulichung des Problems ungünstiger Korrosionsformen soll die beispielhafte Darstellung in Abbildung 87 dienen. Dazu werden folgenden Annahmen zur Ermittlung der empirischen Restwanddicke RWD getroffen:

Rohrsegmentlänge:	300 mm
Wanddicke t :	10 mm
Korrosionstiefe s :	10 mm (da Lochkorrosion)
max. Durchmesser DM :	40 mm (per Sanierung mittels Zementmörtelauskleidung nicht mehr zu überbrücken)
Anteil am Rohrsegment AK :	5 %

Entsprechend (Gleichung 8.1) ergibt sich eine empirische Restwanddicke RWD von 8 mm und eine Schädigungszahl Rohr SZ_R nach (Gleichung 8.2) von 0,8 (da in diesem Beispiel nur eine Korrosionsart vorhanden ist, entfällt die Berechnung der resultierenden empirischen Restwanddicke RWD_r).

Der Wert $SZ_R = 0,8$ gibt einen scheinbar relativ ungeschwächten Rohrquerschnitt wieder. Jedoch ist davon auszugehen, dass Lochkorrosionsstellen mit größerem Durchmesser nicht

mehr durch eine nachträglich eingebrachte Zementmörtelschicht bei der Sanierung mittels Zementmörtelauskleidung überbrückt werden können (Diagramm 27).

Deswegen ist ein passender Grenzwert des maximalen Durchmessers einer Korrosionsstelle zu bestimmen. Im Falle von kraterförmiger Lochkorrosion ist ein idealer Durchmesser DM_i zu bilden (Abbildung 88 und Gleichung 8.10) [122].

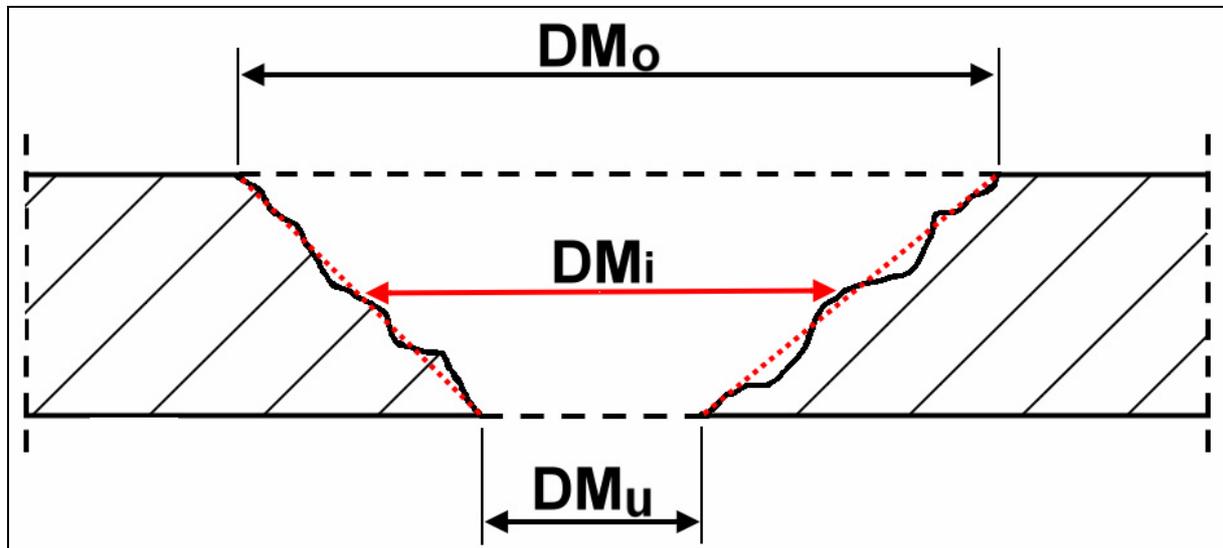


Abbildung 88: Längsschnitt durch eine von Lochkorrosion geschädigte Rohrwand; Ermittlung des idealen Lochdurchmesser DM_i

Idealer Lochdurchmesser DM_i :

$$DM_i = 0,5 \cdot (DM_o + DM_u) \quad [mm] \quad (\text{Gleichung 8.10})$$

mit DM_o = max. Durchmesser am oberen Lochrand [mm]
 DM_u = max. Durchmesser am unteren Lochrand [mm]

Die Ermittlung eines idealen Lochdurchmessers DM_i für andere Korrosionsarten (wie etwa bei Muldenkorrosion) entfällt, da ohnehin der maximale Durchmesser DM der entsprechenden Korrosionsart erfasst wird.

Der Grenzwert von DM richtet sich nach der Tragwirkung einer späteren möglichen Zementmörtelauskleidung und dem vorherrschenden Innendruck in einer Leitung [122]. Entsprechend (Gleichung 8.7 bis Gleichung 8.9) wurde für folgende Ausgangswerte der Grenzwert DM ermittelt (Diagramm 27).

Es wird angenommen, dass die Tragfähigkeit des Zementmörtels bei Innendruck geringer ist als die Tragfähigkeit des Korrosionsstellenrandes (Abbildung 89). Die Gleichungen zur Berechnung des maximal vorherrschenden Innendrucks bei Zementmörtelschichten basieren auf Ableitungen der Differentialgleichung der Kreisplatte [122].

Der maximal mögliche Innendruck P_i bei Erreichen der Biegezugfestigkeit des Zementmörtels in Lochmitte ergibt sich zu:

$$P_{i,Mitte} = \frac{80 \cdot \beta_{BZ}}{3 \cdot (1 + \nu)} \cdot \left(\frac{t_{ZM}}{0,5 \cdot DM_i} \right)^2 \quad [bar] \quad \text{(Gleichung 8.7)}$$

$$P_{i,radial,Rand} = \frac{40 \cdot \beta_{BZ}}{3} \cdot \left(\frac{t_{ZM}}{0,5 \cdot DM_i} \right)^2 \quad [bar] \quad \text{(Gleichung 8.8)}$$

$$P_{i,Umfang,Rand} = \frac{40 \cdot \beta_{BZ}}{3 \cdot \nu} \cdot \left(\frac{t_{ZM}}{0,5 \cdot DM_i} \right)^2 \quad [bar] \quad \text{(Gleichung 8.9)}$$

- mit β_{BZ} = Biegezugspannung Zementmörtel [N/mm^2];
 nach DIN 2614 = $5 N/mm^2$ [168]
 ν = Querdehnzahl Zementmörtel bzw. Beton [-]; = 0,1667
 DM_i = idealer Lochdurchmesser [mm]
 t_{ZM} = Mindestdicke der Zementmörtelschicht [mm]; nach DIN 2614 = 3 mm
 für Verfahren II (nachträgliches Ausschleuderverfahren) [168]

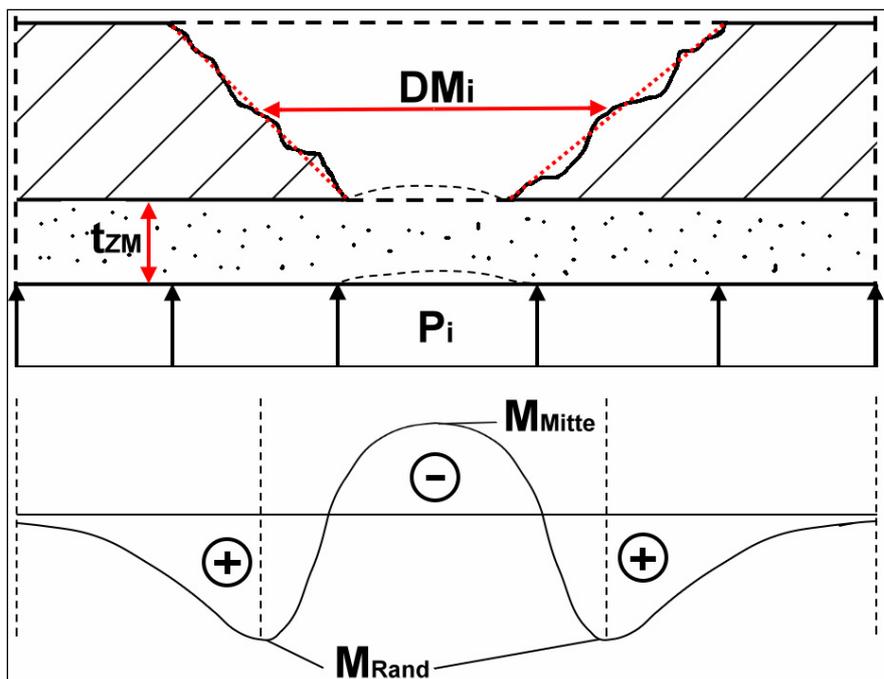


Abbildung 89: Schemenhafte Darstellung der Überbrückung von Lochkorrosionsstellen mit Zementmörtel und Momentenverlauf am statischen Ersatzsystem (eingespannte Kreisplatte)

Der vom Betrag kleinste mögliche Innendruck ergibt sich nach (Gleichung 8.8), da hierbei das maximale Moment in der Zementmörtelschicht in radialer Richtung am Lochrand hervorgerufen wird (Abbildung 89).

Die Tragfähigkeit des Zementmörtels, welcher die Korrosionsstelle innerhalb der Rohrwand ausfüllt, wird nicht berücksichtigt.

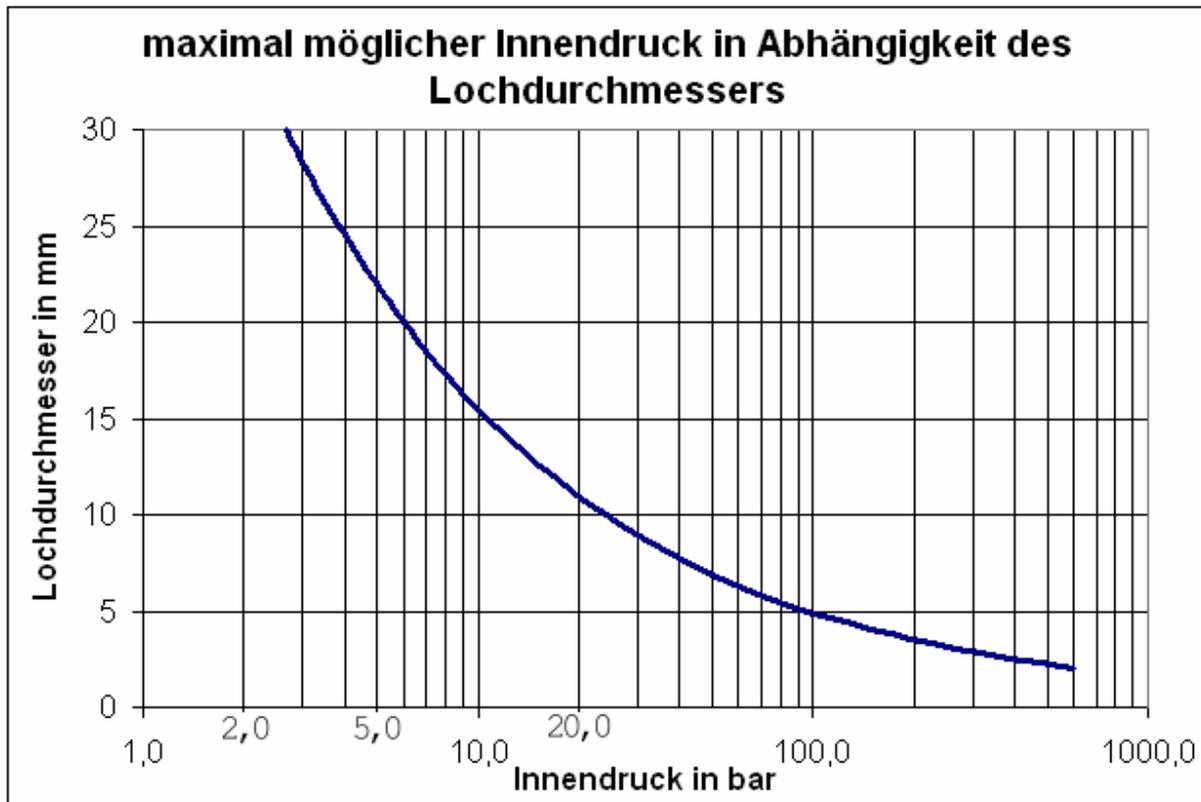


Diagramm 33: Bestimmung des zugehörigen Grenz-Lochdurchmessers DM für einen maximal möglichen Innendruck bei Zementmörtelauskleidung nach dem Anschleuderverfahren; logarithmische Unterteilung der Abszisse für den Innendruck [122; 168]

Für weitere Berechnungen zur statischen Resttragfähigkeit und technischen Restnutzungsdauer wurde unter Annahme eines Betriebsdrucks von 10 bar ein maximaler Grenzdurchmesser von 15 mm entsprechend Diagramm 33 festgelegt.

Im Falle graphitierter Stellen an Gussrohren, welche sich wie Lochkorrosion über die gesamte Wanddicke erstrecken, wird die Festlegung getroffen, bei der Ermittlung des Grenzdurchmessers der Korrosionsstelle wie bei Lochkorrosion vorzugehen. Das heißt, wenn die maximale Korrosionstiefe der graphitierten Stelle gleich der kleinsten Wanddicke ist, wird der Grenzdurchmesser auf max. 15 mm beschränkt.

9. Auswertung der statischen Versuche

In Abschnitt 4.8 und Abschnitt 4.10.4 wurden die für statische Berechnungen an metallischen Trinkwasserleitungen relevanten Festigkeitseigenschaften genannt und die für die jeweilige Generation geforderten Werte aus entsprechenden Regelwerken aufgeführt (Tabelle 4.33).

Ein Ziel der Arbeit ist es, anhand zufällig ausgewählter Rohrproben nach den in Abschnitt 7.2 und Abschnitt 7.3 erwähnten Verfahren die tatsächlichen Festigkeitswerte zu ermitteln und den geforderten Werten aus Tabelle 4.33 gegenüberzustellen. So soll geprüft werden, inwieweit größere Abweichungen der Festigkeitseigenschaften zwischen den in den Regelwerken geforderten und den tatsächlich vorhanden Werten bestehen. Für weitere statische Berechnungen wurden, soweit überhaupt vorhanden, die durch statische Versuche ermittelten Festigkeitseigenschaften eingesetzt.

Grundvoraussetzung zur Feststellung der Festigkeitseigenschaften nach Abschnitt 7.2 war eine gewisse, nicht von Korrosion geschädigte Rohrschubstanz, um aus den Rohrsegmenten passende Probekörper herauszuarbeiten. Dadurch reduzierte sich die Anzahl relevanter Proben für statische Versuche. Aus dieser Restmenge wurden die passenden Proben zufällig ausgewählt.

In Tabelle 9.1 sind die Anzahl geprüfter Rohrproben und die zugehörige Generation aufgeführt. Festgestellt wurden die Zugfestigkeit, der E-Modul und die Brinellhärte.

Tabelle 9.1: Probenumfang für statische Versuche

Rohrgeneration	Anzahl geprüfter Proben	Bemerkung
GGL II	13	Generationen mit den meisten zur Verfügung stehenden relevanten Proben
GGL III	12	
St IIIa	8	
GGG I	1	als einmaliger Vergleichswert

Bis auf wenige Ausreißer wurden im Verlauf der statischen Versuche keine größeren Abweichungen der ermittelten Festigkeitswerte festgestellt. Die in Tabelle 9.1 erwähnte Probenanzahl wird deshalb als repräsentativ angesehen (mit Ausnahme der Probe der Generation GGG I, welche einmaligen Vergleichszwecken diene).

9.1 Ermittlung der Zugfestigkeit

In Diagramm 34 bis Diagramm 36 sind alle ermittelten Werte der Zugfestigkeit je Generation dargestellt.

Durch Eliminieren einzelner Ausreißer (je einmal bei GGL II und GGL III) wurde ein annähernd repräsentativer Mittelwert der Zugfestigkeit gefunden. In Tabelle 9.2 sind die Mittelwerte der Zugfestigkeit aufgelistet. Zusätzlich ist der geforderte Wert aus Regelwerken gegenübergestellt (Tabelle 4.33).

Die jeweilige Zugfestigkeit einer Rohrprobe errechnet sich aus dem Mittelwert des Quotienten von Höchstzugkraft und Bruchfläche zweier Probekörper (Gleichung 7.2).

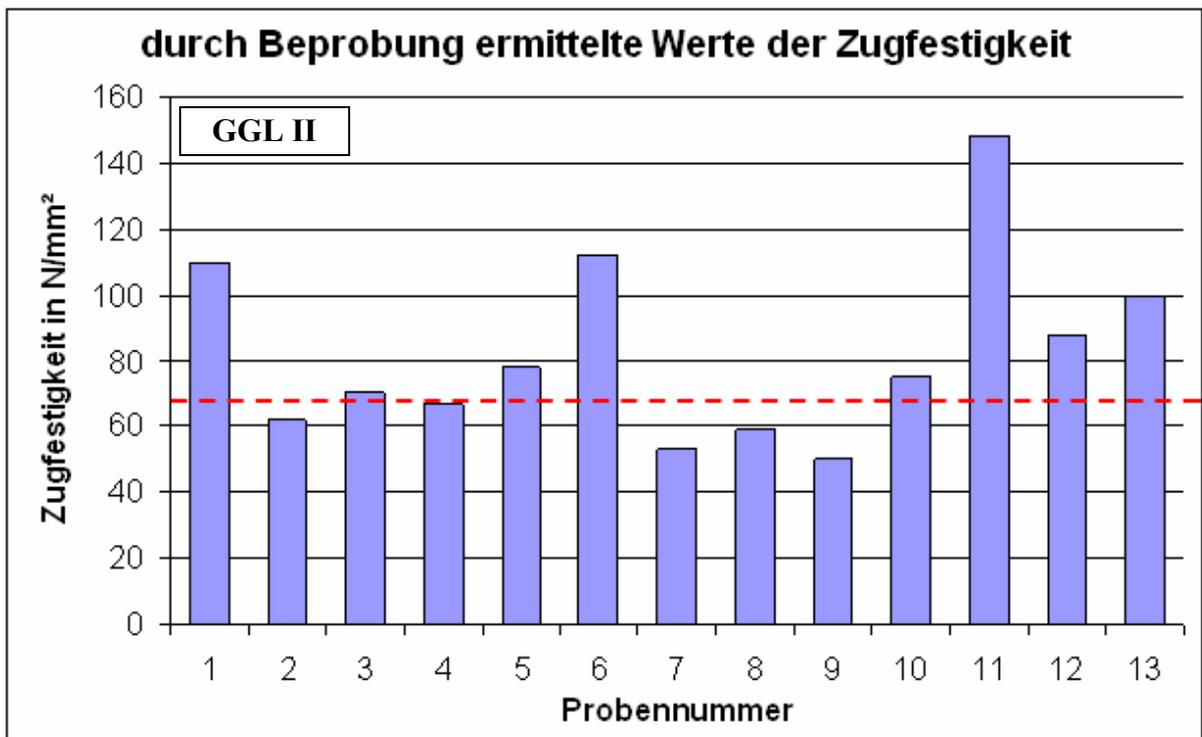


Diagramm 34: Zugfestigkeit einzelner Proben von Graugussrohren der II. Generation; die rote Linie markiert den Mittelwert

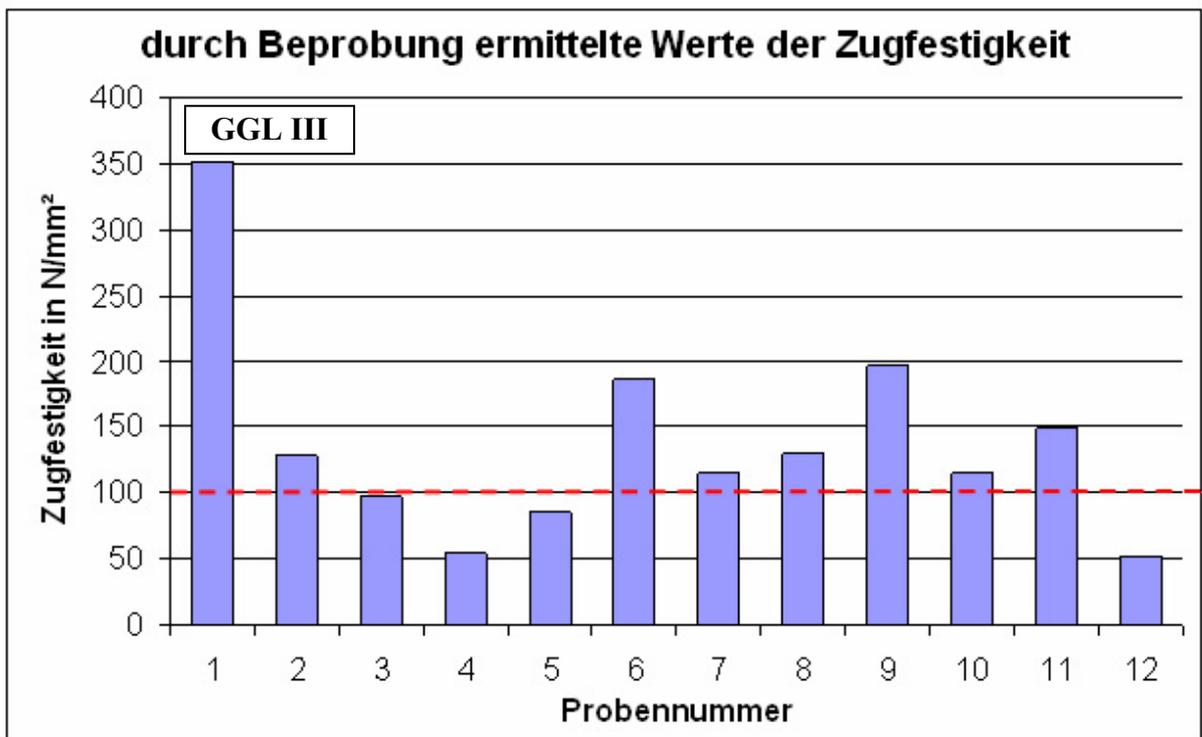


Diagramm 35: Zugfestigkeit einzelner Proben von Graugussrohren der III. Generation; die rote Linie markiert den Mittelwert; Probe 1 für Mittelwert nicht berücksichtigt

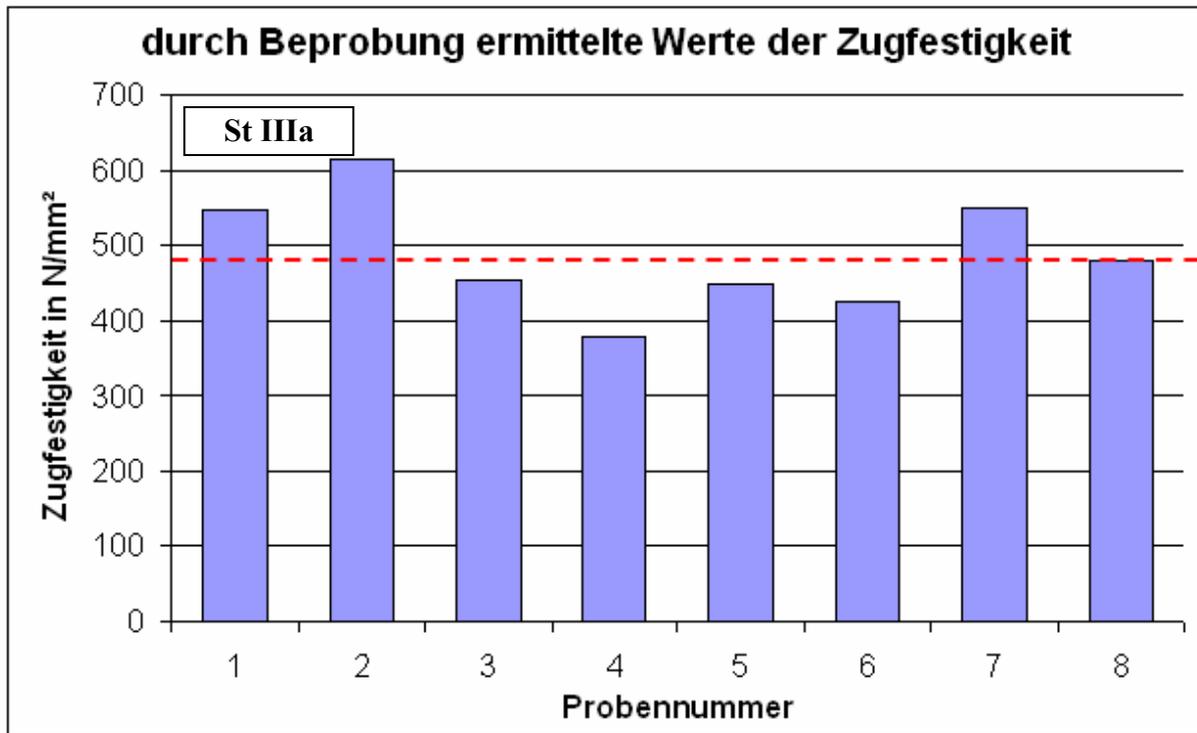


Diagramm 36: Zugfestigkeit einzelner Proben von Stahlrohren der Generation IIIa; die rote Linie markiert den Mittelwert

Tabelle 9.2: Mittelwert der durch Beprobung ermittelten Zugfestigkeit an Probekörpern; (Werte der Zugfestigkeit in N/mm²)

Generation	Mittelwert	Standard- abweichung	95 % - Vertrauensintervall	Geforderter Wert
	\bar{x}	s		
GGL II	67	12	57 – 76	160
GGL III	100	35	71 -129	200
St IIIa	488	78	423 - 553	314

Bis auf einzelne Ausreißer liegen die Werte der Zugfestigkeit für Graugussrohre der II. Generation in einem relativ engen Bereich. Jedoch beträgt der entsprechende Mittelwert mit 67 N/mm² weniger als die Hälfte der geforderten Festigkeit von 160 N/mm² (Tabelle 4.33). Ebenso verhält es sich beim Mittelwert der Zugfestigkeit für Graugussrohre der III. Generation. Er beträgt mit 100 N/mm² ebenfalls nur die Hälfte des geforderten Festigkeitswertes.

Erkennbar ist zusätzlich die in Abschnitt 4.2.3 beschriebene durchschnittlich höhere Festigkeit geschleuderter Graugussrohre (GGL III).

Die beprobten Stahlrohre der Generation St IIIa wiesen im Mittel eine weitaus höhere Zugfestigkeit gegenüber dem in Tabelle 4.33 geforderten Wert auf. In Diagramm 36 ist zu erkennen, dass alle Stahlrohrproben eine höhere Zugfestigkeit als die geforderte aufwiesen.

Als Konsequenz für weitere Berechnungen werden die oben erwähnten Mittelwerte der Zugfestigkeit statt die geforderten aus Tabelle 4.33 für die Generationen GGL II und GGL III verwendet. Da die Mittelwerte nur jeweils der Hälfte der geforderten Werte entsprachen, wird für Graugussrohre der Generation GGL I und GGL IIIa ebenfalls nur die Hälfte der geforderten Zugfestigkeitswerte für weitere statische Berechnungen berücksichtigt. Zusätzlich wird dadurch bei den statischen Berechnungen eine gewisse Sicherheit einbezogen.

Bezüglich aller Stahlrohrgenerationen werden für weitere rohrstatische Berechnungen die Festigkeitswerte aus Tabelle 4.33 weiterverwendet, da die statischen Versuche zeigten, dass diese geforderten Werte bei Stahlrohrproben der Generation St IIIa eingehalten werden. Daraus resultiert die Annahme, dass Stahlrohre der restlichen Generationen (St I, St II, St III und St IV) ebenfalls die geforderten Zugfestigkeitswerte erreichen.

Laut Tabelle 3, Fußnote 11 in ATV A 127 ist der 1,43fache Wert der Mindeststreckgrenze als der Rechenwert der Biegezugspannung für rohrstatische Berechnungen einzusetzen [11]. Für weitere Berechnungen im Rahmen der Arbeit wird die Zugfestigkeit dem Rechenwert der Biegezugspannung gleichgesetzt. Die Beprobungen von Stahlrohren der Generation St IIIa zeigte, dass das mittlere Verhältnis von unterer Streckgrenze (R_{el}) zu Zugfestigkeit (R_m) den Wert von 1,47 beträgt und somit über den Wert von 1,43 liegt. Das bedeutet, dass dieser oben erwähnte Zusammenhang ebenfalls eingehalten wurde (Tabelle 9.3).

Tabelle 9.3: Werte der durch Beprobung ermittelten unteren Streckgrenze R_{el} und zugehörige Zugfestigkeit R_m an Stahlrohrproben

Probennummer	Untere Streckgrenze	Zugfestigkeit	Verhältnis
	R_{el}	R_m	
	N/mm ²	N/mm ²	
05-02	521	616	1,18
L03	223	454	2,04
L14	387	380	0,98
L18	413	450	1,09
L19	219	425	1,94
L20	337	551	1,64
L22	382	548	1,43
S47	kein Messergebnis	480	-
		Mittelwert	1,47
		Standardabweichung	0,41

9.2 Ermittlung des E-Moduls

Während der Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Zugfestigkeit wurde gleichzeitig mittels Taster die Dehnung an den Zugproben gemessen und dadurch der E-Modul berechnet. In Diagramm 37 bis Diagramm 39 sind die einzelnen Messergebnisse dargestellt. Analog Abschnitt 9.1 erfolgt in Tabelle 9.4 eine Auflistung der Mittelwerte.

Bei den E-Modul-Werten < 10.000 N/mm² in Diagramm 37 und Diagramm 38 handelte es sich um Messfehler, da der Taster zur Messung der Dehnung während der Versuchsdurchführung von der Probe rutschte.

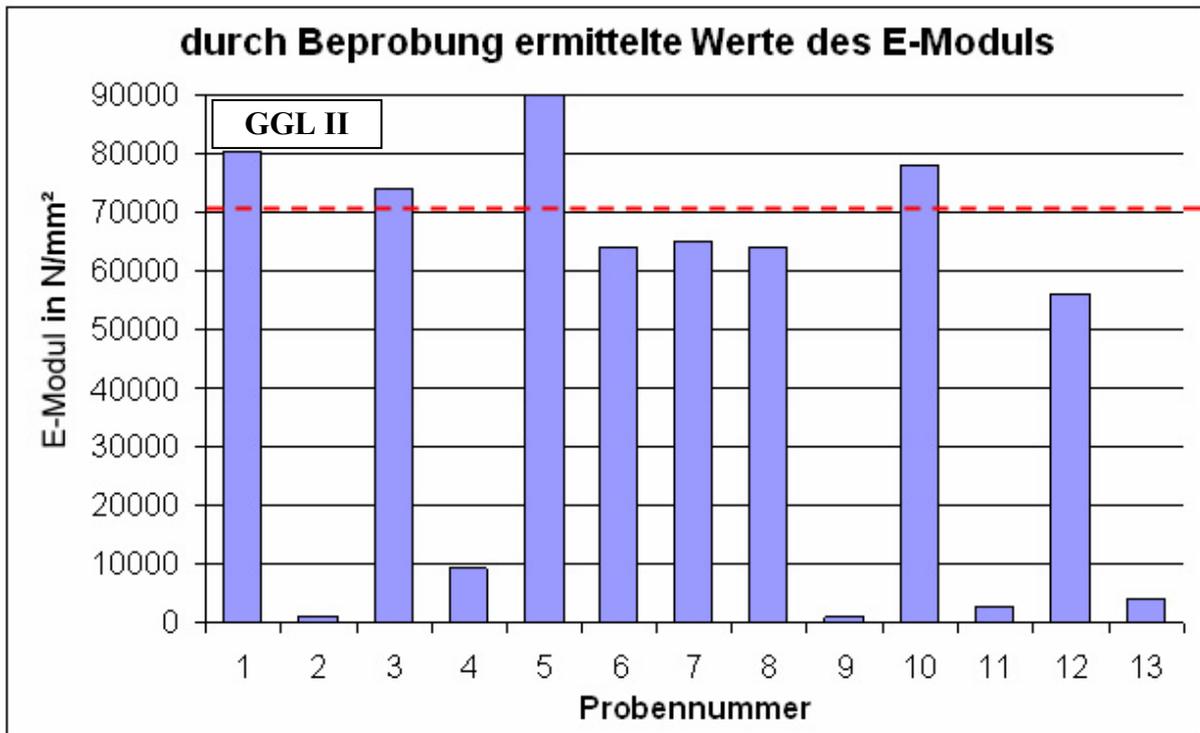


Diagramm 37: E-Modul einzelner Proben von Graugussrohren der II. Generation; die rote Linie markiert den Mittelwert; E-Modul-Werte unter 10.000 N/mm² wurden für den Mittelwert nicht berücksichtigt (Messfehler)

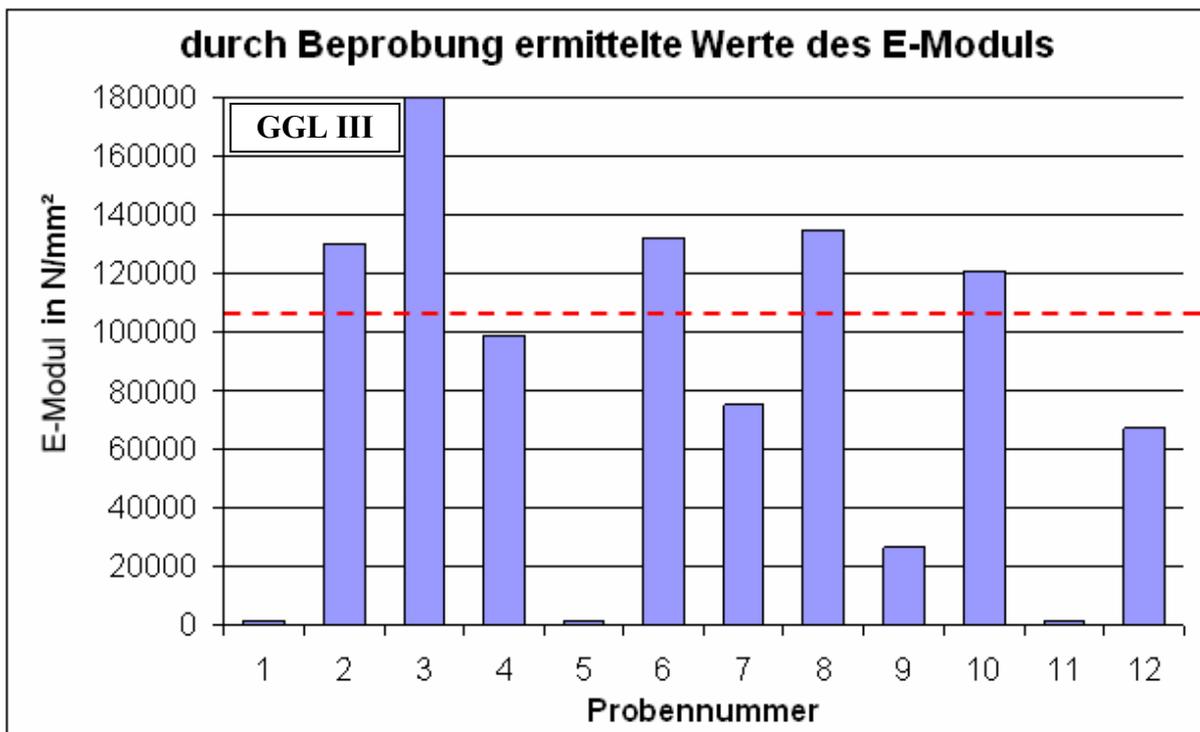


Diagramm 38: E-Modul einzelner Proben von Graugussrohren der III. Generation; die rote Linie markiert den Mittelwert; E-Modul-Werte unter 10.000 N/mm² wurden für den Mittelwert nicht berücksichtigt (Messfehler)

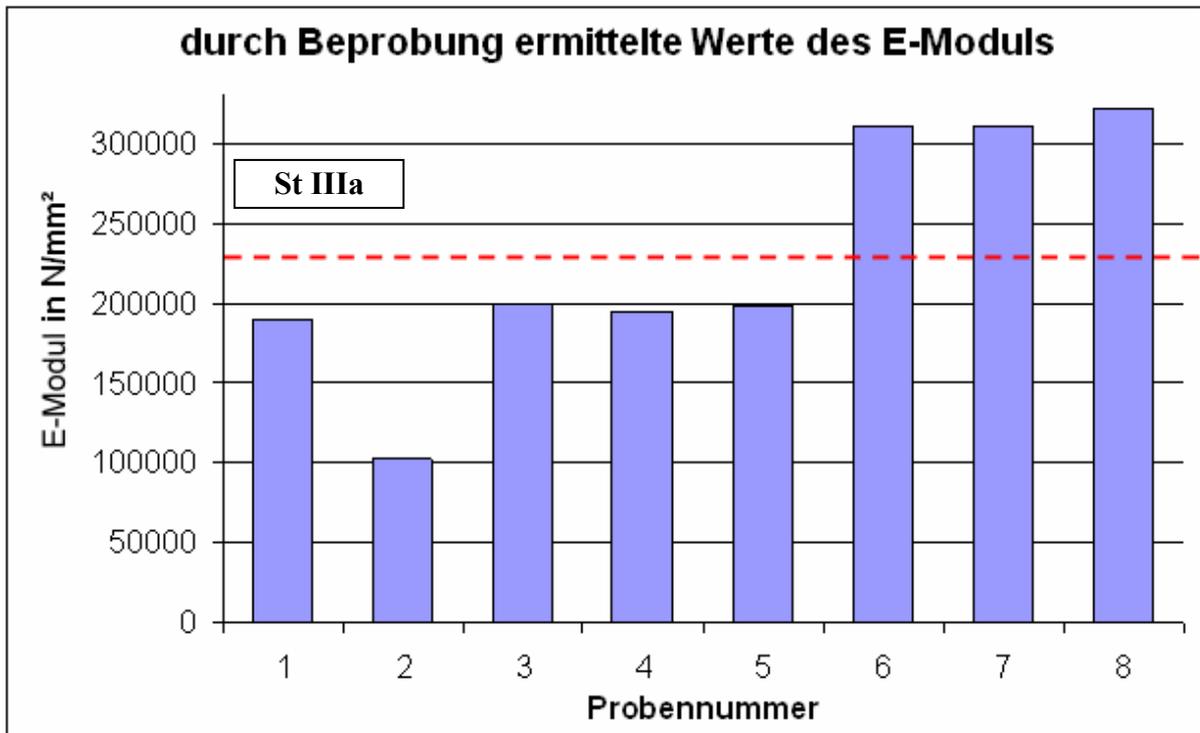


Diagramm 39: E-Modul einzelner Proben von Stahlrohren der Generation St IIIa; die rote Linie markiert den Mittelwert;

Tabelle 9.4: Mittelwert der durch Beprobung ermittelten E-Moduln an Probekörpern; (Werte des E-Moduls in N/mm²)

Generation	Mittelwert	95 %-Vertrauensintervall	Geforderter Wert
	\bar{x}		
GGL II	71.500	62.000 – 81.000	100.000
GGL III	107.300	72.000 – 142.000	110.000
St IIIa	231.000	169.000 – 292.000	200.000

Die Mittelwerte des E-Moduls der Generation GGL III und St IIIa entsprechen annähernd den in den Regelwerken geforderten Werten. Lediglich der Mittelwert des E-Moduls der Generation GGL II beträgt nur ca. 30 % des geforderten Wertes.

In weiteren rohrstatischen Berechnungen wird folglich für die Generationen GGL III und St IIIa sowie für alle weiteren Stahlrohre bzw. auch Duktulgussrohre der in den Regelwerken geforderte Wert des E-Moduls eingesetzt.

Der geforderte Wert des E-Moduls für die Generationen GGL I und GGL II wird als Konsequenz aus den oben erwähnten Versuchen um 30 % reduziert.

Alle neuen geschlussfolgerten Werte sind in Tabelle 9.7 aufgelistet.

9.3 Ermittlung der Bruchdehnung

Zusätzlich wurde während der statischen Zugversuche die Bruchdehnung an den Proben bestimmt und in Tabelle 9.5 mit den geforderten Werten aus Tabelle 4.33 verglichen.

Es sind keine nennenswerten Abweichungen erkenntlich. Die geforderten Werte der Bruchdehnung können für weitere statische Versuche ungeändert genutzt werden.

Tabelle 9.5: Mittelwert der durch Beprobung ermittelten Bruchdehnung an Probekörpern; (Werte der Bruchdehnung in %)

Generation	Mittelwert	Standardabweichung	Geforderter Wert
	\bar{x}	s	
GGL II	0,02	0,04	< 1
GGL III	0,08	0,1	< 1
St IIIa	24,42	3,2	25

Ergänzend zu den erwähnten Versuchen sind in Tabelle 9.6 die im Verlauf der statischen Versuche ermittelten Kennwerte des Duktilgussrohres (GGG Ia) aufgelistet. Die geforderten Werte aus Tabelle 4.33 werden zwar mit Ausnahme des E-Moduls nicht eingehalten, jedoch ist die Aussagekraft einer einzigen Beprobung gering. Für weitere Berechnungen bleiben die geforderten Kennwerte gültig.

Tabelle 9.6: Materialeigenschaften am Duktilgussrohr (GGG Ia) (versuchstechnisch ermittelt)

Zugfestigkeit	Streckgrenze	Druckfestigkeit	E-Modul	Bruchdehnung
N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
300	215	~ 600	230.000	32

Für alle weiteren statischen Berechnungen werden die gemessenen bzw. abgeglichenen Werte in Tabelle 9.7, sofern nicht anders ausgedrückt, verwendet.

Tabelle 9.7: Materialeigenschaften metallischer Rohrwerkstoffe

Generation	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit	E-Modul	Bruchdehnung
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
GGL I				
Geschätzt	~120	~480	~90.000	<1
Abgeglichen	60	~240	71.000	<1
GGL II [84]				
Gefordert	~160	~640	~100.000	<1
Gemessen	67	~268	71.000	<1
GGL III [79; 108]				
Gefordert	~200	~800	~110.000	<1
Gemessen	100	~400	~110.000	<1
GGL IIa (TGL 14400/01) [129; 132]				
Gefordert	150	~600	~90.000	<1
Abgeglichen	75	~300	71.000	<1
GGG I (DIN 28600) [171]				
Gefordert	390 (294)	~507	~170.000	10
Abgeglichen	390 (294)	~507	~170.000	10
GGG II (DIN EN 545) [29]				
Gefordert	420 (300)	550	170.000	>10
Abgeglichen	420 (300)	550	170.000	>10
GGG Ia (TGL 8189) [134; 135]				
Gefordert	500 (320)	~650	~160.000	7
Gemessen	500 (320)	~650	~160.000	7
St I + St II (bis auf Herstellungsprozess und –zeitraum keine Unterschiede) [153]				
Gefordert	~240 (160)	~240	200.000	~21
Abgeglichen	~240 (160)	~240	200.000	~21
St III [98]				
Gefordert	343 (235)	~343	200.000	23
Abgeglichen	343 (235)	~343	200.000	23
St IV (DIN 10224) [119]				
Gefordert	360 (235)	~360	210.000	23
Abgeglichen	360 (235)	~360	210.000	23
St IIIa (TGL 9413; TGL 9414) [136; 138]				
Gefordert	314 (~235)	~314	~200.000	25
Gemessen	314 (~235)	~314	~200.000	25

Der E-Modul wurde auf volle 10.000 N/mm² abgerundet; die Werte in Klammern stellen die untere Streckgrenze dar

9.4 Ermittlung der Brinellhärte

In Abschnitt 1.3.4 bzw. Kapitel 2 wurde bereits auf einen möglichen empirischen Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Härte (Brinellhärte) hingewiesen. Die durch Beprobung ermittelten Werte von Zugfestigkeit und Brinellhärte sollen auf diesen empirischen Zusammenhang hin untersucht werden.

Die These, dass fehlerhaft hergestellte Schleudergussrohre (GGL III), welche eine zu hohe Härte aufweisen, vergleichsweise korrosionsempfindlicher sind, soll anhand einer Gegenüberstellung von Härte und zugehöriger Schädigungszahl SZ_R der jeweiligen Rohrproben geprüft werden.

Tabelle 9.8: Mittelwert der durch Beprobung ermittelten Brinellhärte an Probekörpern; (Werte der Brinellhärte in N/mm^2)

Generation	Mittelwert	Standard- abweichung	95 % - Vertrauensintervall	Geforderter Wert
	\bar{x}	s		
GGL II	201	17	191 – 211	190 (TGL 14400) [130]
GGL III	211	48	181 - 242	
St IIIa	152	27	130 - 174	-

Zu Tabelle 9.8: Bezeichnung der Brinellhärte im Rahmen der Beprobungen

Graugussrohre → HBW 2,5 / 62,5

Stahlrohre → HBW 2,5 / 187,5

HBW = Brinellhärte mit Hartmetallkugel bestimmt [N/mm^2]

Erster Wert = Kugeldurchmesser [mm]

Zweiter Wert = Prüfkraft [kp]; Nennwert der Prüfkraft = $9,81 \cdot$ Prüfkraft [N]

Die bspw. in TGL 14400 geforderten Werte der Brinellhärte für Graugussrohre werden bei geprüften Rohrproben im Rahmen der Arbeit erreicht. Für Stahlrohre bzw. Stahl werden in den entsprechenden Regelwerken keine expliziten Anforderungen an den Härtewert gestellt. In DIN EN ISO 18265 sind empirische Zusammenhänge zwischen Zugfestigkeit und Härte für Stahl und in DIN EN 1561 für Grauguss erwähnt [28; 127]. Der Zusammenhang für Duktulguss kann nicht geprüft werden, da es im Rahmen der Untersuchungen an Proben fehlte.

Ein Zusammenhang zwischen Brinellhärte und Zugfestigkeit ist in Diagramm 40 für Graugussrohre der II. Generation nicht zu erkennen. Laut DIN EN 1561 wird zur Darstellung der empirischen Beziehung von Härte und Zugfestigkeit der Faktor RH für die relative Härte eingeführt (Gleichung 9.1) [28]. Der Faktor RH liegt zwischen den Werten 0,8 und 1,2 und wird von den Rohstoffen, dem Schmelzverfahren und den metallurgischen Arbeiten bestimmt. Das bedeutet, dass innerhalb der Rohrproduktionsserie einer Gießerei ein relativ deutlicher Zusammenhang zwischen Härte und Zugfestigkeit bestehen kann, aber mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zwischen Rohrproben aus verschiedenen Produktionsstandorten und Produktionsserien (entsprechend den Proben im Rahmen der Untersuchungen).

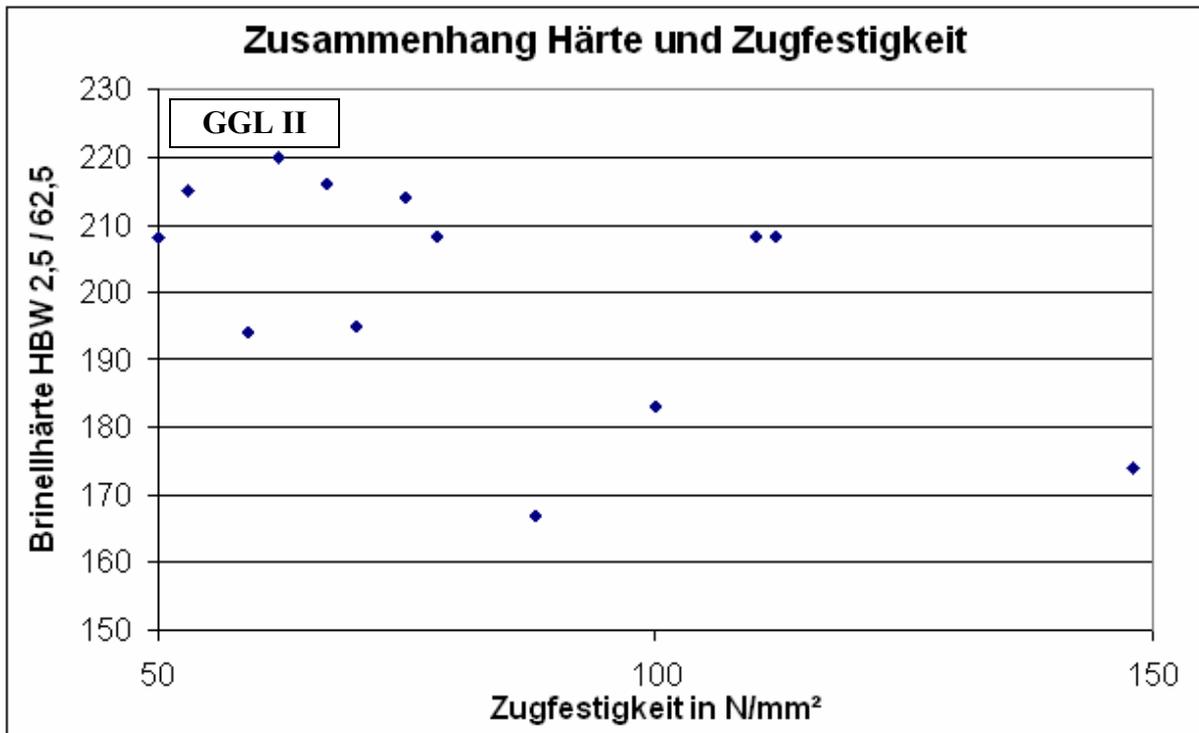


Diagramm 40: Zusammenhang zwischen Brinellhärte und Zugfestigkeit von Graugussrohren der II. Generation

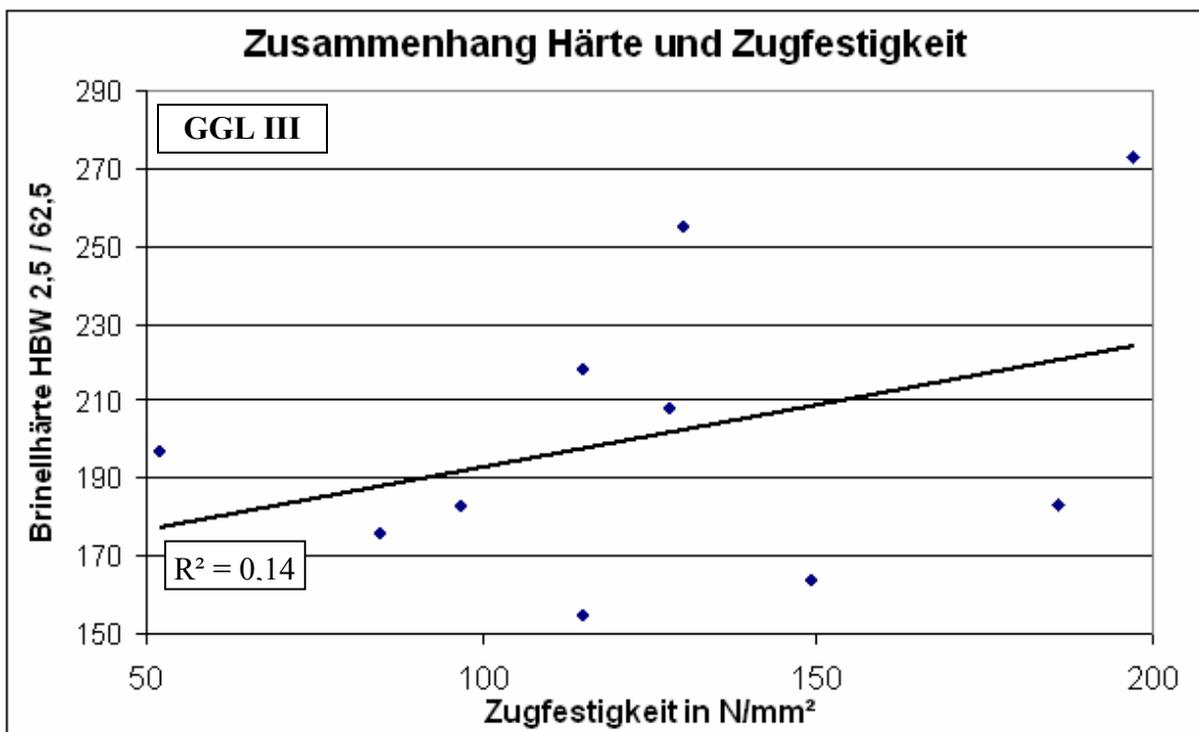


Diagramm 41: Zusammenhang zwischen Brinellhärte und Zugfestigkeit von Graugussrohren der III. Generation

Der Faktor RH zur Darstellung des empirischen Zusammenhangs zwischen Brinellhärte HBW und Zugfestigkeit R_m errechnet sich wie folgt:

$$RH = \frac{HBW}{100 + 0,44 * R_m} \quad [-] \quad \text{(Gleichung 9.1)}$$

Nach der Bereinigung von zwei Ausreißern (Messfehler) ist in Diagramm 41 für Graugussrohre der III. Generation eine empirische Abhängigkeit zwischen der Härte und der Zugfestigkeit zu erkennen.

Die automatisierten Produktionsprozesse bei der Herstellung von Schleudergussrohren (GGL III) führten zu vergleichbaren Materialeigenschaften innerhalb eines Produktionsstandortes und ebenfalls zwischen verschiedenen Produktionsstandorten.

Der Mittelwert der relativen Härte beträgt hier allerdings $RH = 1,31$. Somit liegt er oberhalb des in DIN EN 1561 vorgeschriebenen Bereich von 0,8 – 1,2. Die Streuungen um die in Diagramm 41 und Diagramm 42 eingefügten Regressionsgerade sind ebenfalls hoch (Korrelationskoeffizient = 0,37).

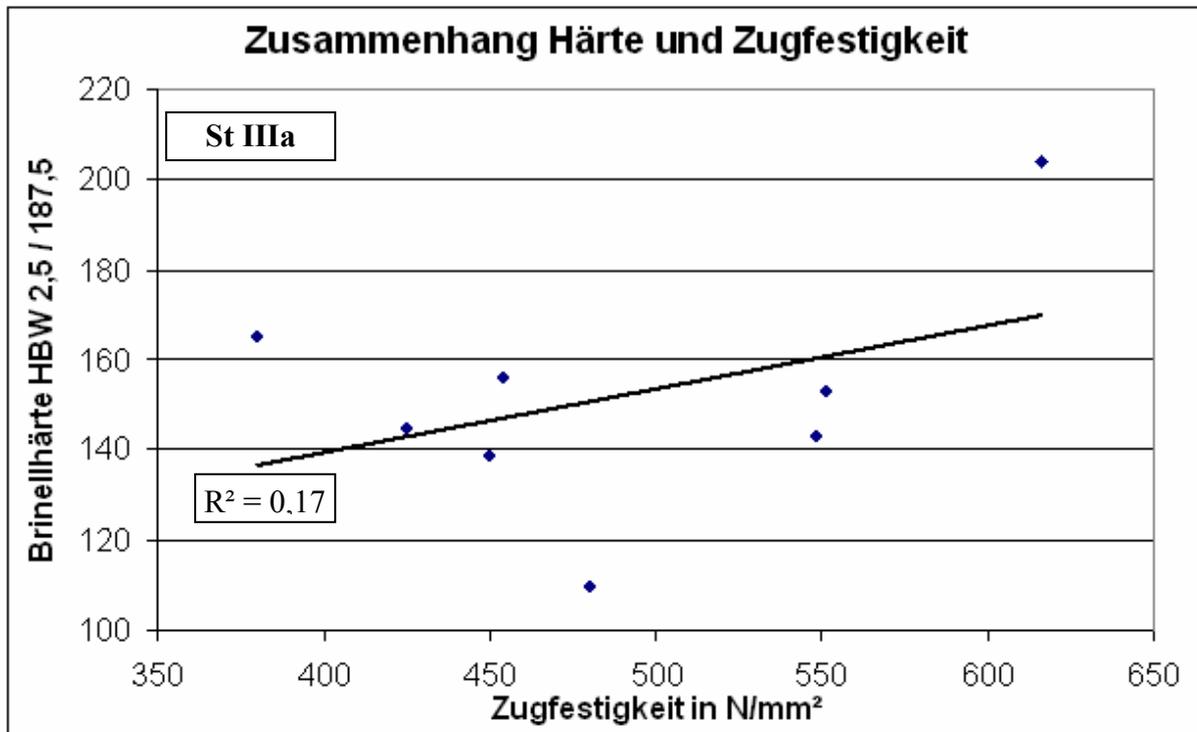


Diagramm 42: Zusammenhang zwischen Brinellhärte und Zugfestigkeit von Stahlrohren der Generation St IIIa

Ein empirischer Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Härte ist in Diagramm 42 für Stahlrohre der Generation St IIIa zwar erkennbar, jedoch streuen die einzelnen Werte mitunter stark um die eingefügte Regressionsgerade (Korrelationskoeffizient = 0,4)

Bei der Ermittlung der Zugfestigkeit auf Grundlage des Zusammenhangs über die Brinellhärte bestehen folglich große Unsicherheiten, so dass auf die einfache Ermittlung der Zugfestigkeit verzichtet werden muss (die Ermittlung der Brinellhärte und somit der Zugfestigkeit könnte

ansonsten mit entsprechenden Prüfgeräten bereits vor Ort an der Rohrschadensstelle geschehen)

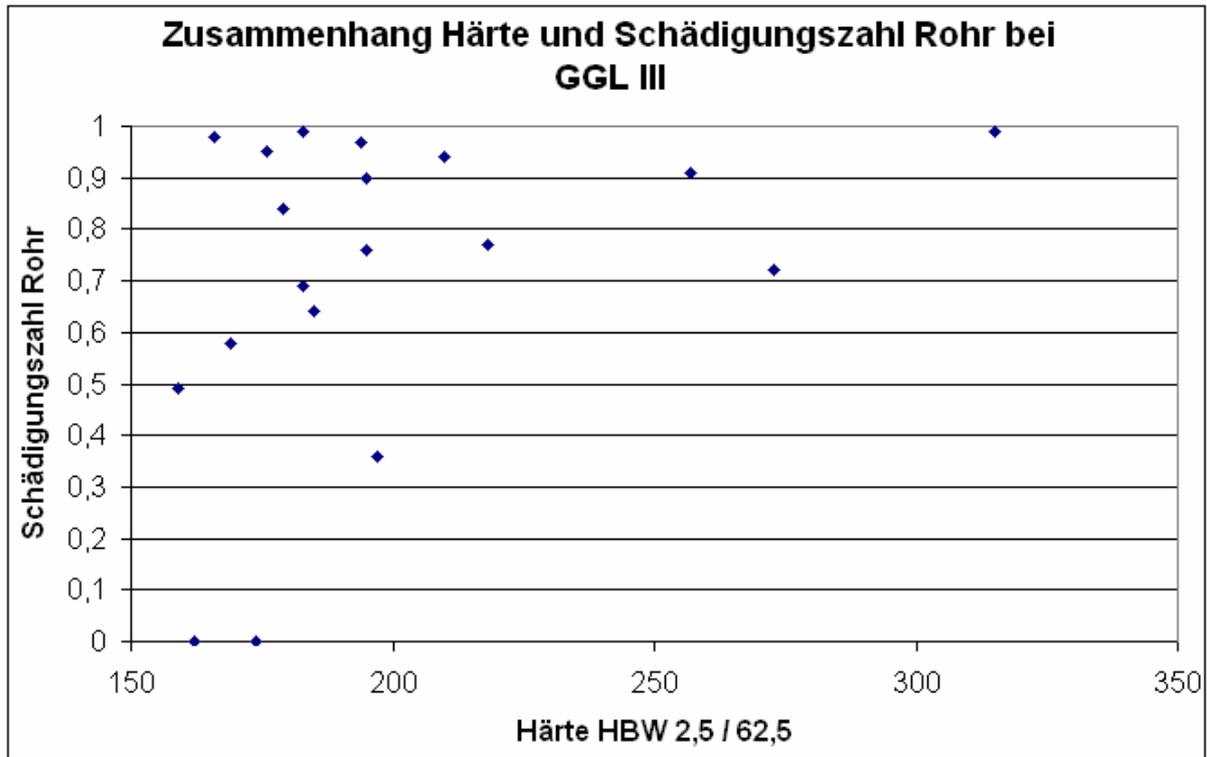


Diagramm 43: Zusammenhang zwischen Härte und Schädigungszahl Rohr SZ_R an geschleuderten Graugussrohren (GGL III)

Im Rahmen der Untersuchungen konnte an 19 Proben von Graugussrohren der III. Generation (Schleudergussrohre) die Härte bestimmt werden. In Diagramm 43 ist der Zusammenhang zwischen Härte und der Schädigungszahl Rohr aufgetragen. So soll geprüft werden, ob eine hohe Härte, resultierend aus fehlerhafter Herstellung bzw. Wärmebehandlung (Abschnitt 4.7.1) zu einer höheren Korrosionswahrscheinlichkeit und damit zu einer kleineren Schädigungszahl Rohr SZ_R führt.

Ein solcher Zusammenhang ist in Diagramm 43 nicht feststellbar. Dominierende Korrosionsart war in allen Fällen Graphitierung; es lassen sich keine speziellen Korrosionsformen auf eine zu hohe Härte zurückführen.

10. Berechnung der Resttragfähigkeit erdverlegter metallischer Trinkwasserleitungen auf Grundlage der empirischen Restwanddicke

Zur Beurteilung der noch vorhandenen Tragfähigkeit erdverlegter Trinkwasserleitungen bieten die Berechnungsalgorithmen in ATV A 127 geeignete Voraussetzungen. Da gleiche Belastungsbilder und Werkstoffigenschaften bestehen, sind diese für Abwasserleitungen entwickelten Berechnungsalgorithmen auch auf Trinkwasserleitungen unter Berücksichtigung des Innendrucks als zusätzliche Belastung übertragbar. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass es sich im Falle einer nachträglichen Beurteilung der Tragfähigkeit um bereits verlegte und benutzte Leitungen und keine Neuverlegungen handelt [11]. Alle dazu notwendigen Annahmen zur statischen Berechnung sind in Abschnitt 10.1 erläutert.

Grundgedanke der Beurteilung der Resttragfähigkeit ist die Berechnung einer noch tragfähigen Mindestwanddicke in Abhängigkeit von Rohrgeneration und Nennweite bei ungünstiger Belastung und ansonsten ungeschwächtem Rohrquerschnitt. Diese Mindestwanddicke wird mit der empirischen Restwanddicke eines Rohrstranges verglichen. Bei Unterschreitung der Mindestwanddicke ist davon auszugehen, dass der Rohrstrang an seinen geschwächten Stellen einen technischen Ist-Zustand besitzt, welcher nicht mehr ausreichend tragfähig ist. Das heißt, dass abhängig von der Schadensstelle und der Bergungsursache mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mit weiteren Schäden durch Risse, Brüche oder Perforierung (Wasserverluste) am Rohrleitungsstrang zu rechnen ist. Eine Sanierung des entsprechenden Leitungsabschnitts kommt nicht mehr in Frage, da das Altrohr nicht ausreichend tragfähig ist.

Durchgeführt wurden die statischen Berechnungen mit entsprechender handelsüblicher Software, welche auf den Berechnungsalgorithmen nach ATV A 127 basieren. Eine Gegenrechnung erfolgte mittels nachprogrammierten Algorithmen in Tabellenkalkulationsform.

Erforderliche Nachweise zur Bemessung erdverlegter Rohre sind nach ATV A 127:

- Spannung- Dehnungsnachweis (biegeweiche und -steife Rohre)
- Tragfähigkeitsnachweis (biegesteife Rohre)
- Verformungsnachweis (biegeweiche Rohre)
- Stabilitätsnachweise über kritische Beullast (biegeweiche Rohre)

Auf einen Nachweise des kritischen äußeren Wasserdrucks wurde verzichtet, da der vorherrschende Erdruchdruck gegenüber eines äußeren Wasserdrucks bei Stand des Grundwasserspiegels über Rohrscheitel ungleich größere Belastungen bewirkt (Erdruchdruck >> äußerer Wasserdruck).

Zusätzlich wurde auf Empfehlung in ATV A 127 der Innendruck nach modifizierten Formeln aus dem Rechenansatz von Netzer und Pattis und ggf. in Kombination mit den restlichen Belastungen berücksichtigt oder separat nach der sog. Kesselformel berechnet [169].

Weitere Untersuchungen zu Resttragfähigkeit, technischem Ist-Zustand, technischer Restnutzungsdauer und Sanierungsfähigkeit sind in Kapitel 11 aufgeführt.

Mögliche Exzentrizitäten der Rohrwanddicke durch Kernversatz bei Graugussrohren müssen nicht berücksichtigt werden, da durch die Verwendung der (gemittelten) empirischen Restwanddicke in einen Rohrquerschnitt mit gleichmäßiger Wanddicke übergegangen wird.

10.1 Fixe Eingangsdaten zur Berechnung der Tragfähigkeit nach ATV A 127 [11]

Um den Berechnungsaufwand zu minimieren und eine gewisse zusätzliche Sicherheit bei der Berechnung der Tragfähigkeit zu gewährleisten, wurden Annahmen getroffen, die sich neutral bzw. ungünstig auf die Ergebnisse auswirken.

10.1.1 Sicherheiten

Für die relevanten Berechnungen wurde die Sicherheitsklasse A (Regelfall) zugrunde gelegt. Ggf. modifizierte Sicherheitsbeiwerte γ sind in Tabelle 10.1 aufgelistet. Zulässige Verformungen (Typ A = Regelfall) werden für entsprechend verformbare Rohrwerkstoffe wie Duktilguss und Stahl bis zu 6% zugelassen. Bereits vorhandene Vorverformungen, resultierend aus Produktion, Lagerung oder Transport werden mit 1% beanschlagt (Regelfall). Es wird angemerkt, dass an keiner der im Rahmen der Untersuchung geprüften Rohrproben Verformungen als Schadensart festgestellt wurde. Lokale Vorverformungen (Sonderfall) werden deswegen zu 0% angesetzt. Sollten ggf. lokale Vorverformungen als Schadensart vorhanden sein, können diese innerhalb der Berechnungsalgorithmen berücksichtigt werden.

In Tabelle 4.10 sind die geforderten Sicherheitsbeiwerte γ aufgelistet. Für weitere statische Berechnungen und Nachweise nach allen oben genannten Verfahren (äußere Belastung; Innendruck) kommen folgende modifizierte Beiwerte auf Grundlage von Abschnitt 4.8.5 bzw. Tabelle 4.10 zu Anwendung (Tabelle 10.1).

Tabelle 10.1: modifizierte Sicherheitsbeiwerte γ für Tragfähigkeits- bzw. Verformungsnachweise [11]

Rohrwerkstoff	γ	Bemerkung
Versagen durch Bruch		
Grauguss	2,2	Wert angehoben, gilt sonst für spröde Materialien wie Steinzeug
Duktilguss	2,0	Wert angehoben auf zweifache Sicherheit
Stahl		
Versagen durch Instabilität (Verformung)		
Duktilguss	2,5	Wert belassen
Stahl		

10.1.2 Einbaubedingungen

Das Regelwerk ATV A 127 gilt ursprünglich für die Berechnung neu verlegter Rohre. Im Falle der untersuchten Rohrproben handelt es sich jedoch um Rohre, die bereits bis zu ca. 100 Jahren und mehr im Boden liegen. Unter Annahme eines im Laufe der Zeit annähernd gesetzten Bodens ist von einer das Rohr entlastenden Stützwirkung der ursprünglichen Grabenwände nicht mehr auszugehen (wieder eingefüllter Boden stützte sich aufgrund von Gewölbewirkung im Erdprisma in Abhängigkeit vom Wandreibungswinkel an der Grabenwand ab; Silowirkung).

Der Böschungswinkel ist somit $\beta = 0$ zu setzen, was einer sog. Dammbedingung (Dammleitungszustand) entspricht. Die Auswahl der Überschüttungs- und Einbettungsbedingungen für eine Grabenverfüllung erübrigen sich somit. Die relative Ausladung (Höhe der Schicht neben dem Rohr, die gegenüber der vertikalen Rohrverformung abweichende Setzungen erfahren kann) beträgt $a = 1$ und entspricht somit einem losen Auflager [170].

10.1.3 Boden

Die Bodenwichte ist für die weiteren statischen Berechnungen mit $\gamma_B = 21 \text{ kN/m}^3$ angenommen worden. Damit handelt es sich um einen relativ schweren (und bindigen) Boden, wodurch ungünstige Fälle berücksichtigt werden. Liegen Werte z. B. durch Bodengutachten vor, ist die Wichte anzupassen.

Der Boden unter dem Rohr (Baugrund; E_4) und der anstehende Boden neben der Leitungszone (E_3) wird als Bodengruppe G3 definiert. Das bedeutet, dass es sich um einen bindigen Mischboden handelt, wie er häufig im städtischen Bereich anzutreffen ist oder gegenüber einem nicht bindigen Boden (Bodengruppe G1) oder schwach bindigen Boden (Bodengruppe G2) den ungünstigeren Fall darstellt. Weiterhin wird angenommen, dass die Verfüllung des ursprünglichen Rohrgrabens (Überschüttung über den Rohrscheitel; E_1) ebenfalls mit dem anstehenden Bodenmaterial erfolgte. Eine nicht ausreichende Verdichtung zum Zeitpunkt der Rohrverlegung sollte sich im Laufe der Zeit konsolidiert haben, so dass der Verdichtungsgrad dem des anstehenden Bodens (E_3) entspricht. Für die Verfüllung der Leitungszone neben dem Rohr (E_2 bzw. E_{20}) wurde ursprünglich ein nicht bindiger Boden (Bodengruppe G1) verwendet, welcher sich aber im Laufe der Zeit mit bindigen Anteilen (z.B. durch Sickerwasser oder eventueller Verwitterung) angereichert hat und so einem schwach bindigen Boden (Bodengruppe G2) entspricht.

Laut ATV A 127 besitzen gewachsene Böden (hier: E_4) bei ursprünglicher Lagerungsdichte einen Verdichtungsgrad D_{pr} zwischen 90% und 97%. Ein höherer Verdichtungsgrad bedeutet einen höheren Verformungsmodul E_B der einzelnen Bodengruppen. Ein höherer Verformungsmodul führt im Allgemeinen zu einer höheren Lastkonzentration und somit zu einer höheren Belastung der Rohre und stellt dadurch einen ungünstigen Fall dar. Ausnahme bildet der Boden in Leitungszone (E_{20}), da ein höherer Verformungsmodul zu einer höheren horizontalen Bettungssteifigkeit und dadurch zu einer höheren Systemsteifigkeit mit vermindertem Lastkonzentrationsfaktor führt. Da wie oben erwähnt eine annähernd gleichmäßige Konsolidierung der Bodenzonen angenommen wird, ist der Verdichtungsgrad aller Bodenzonen dementsprechend gleich. In Tabelle 10.2 sind die angenommenen Verdichtungsgrade und Verformungsmoduln der Bodenzonen aufgelistet. Der Verformungsmodul der Leitungszone darf den Modul der Überschüttung (Ausnahme bei Bodenaustausch) nicht überschreiten. Da jedoch ein Bodenaustausch (G2 statt G3) erfolgte, könnte der Verformungsmodul für E_{20} heraufgesetzt werden. Wie jedoch erwähnt, führt eine Erhöhung dieses Verformungsmoduls E_{20} in diesem Fall zu einer Verminderung des Lastkonzentrationsfaktors. Die Beibehaltung eines niedrigeren Wertes für E_{20} liegt folglich auf der sicheren Seite.

Berechnung des Verformungsmoduls in Abhängigkeit von Bodengruppe und Verdichtungsgrad:

$$E_B = \frac{2,47 \cdot 10^{-7}}{G} \cdot e^{0,188 \cdot D_{pr}} \quad [N/mm^2] \quad \text{(Gleichung 10.1)}$$

mit G = Bodengruppe mit dem Wert 1 bis 4
 D_{pr} = Verdichtungsgrad (Proctordichte) [%]

Tabelle 10.2: Angenommener Verdichtungsgrad und Verformungsmodul der Bodenzonen um eine bereits verlegte Rohrleitung (städtischer Bereich)

Bodenzone	Bodengruppe	Verdichtungsgrad D_{pr}	Verformungsmodul E_B^*
		%	N/mm ²
E ₁	G3	97	8
E ₂₀ bzw. E ₂	G2	97	11 → 8**
E ₃	G3	97	8
E ₄	G3	97	80 ***

* Verformungsmodul E_b auf Grundlage von (Gleichung 10.1) berechnet

** E₂₀ darf nicht größer als E₁ angenommen werden (hier: Bodenaustausch) [11]

*** i. d. R $E_4 = 10 \cdot E_1$ [11]

Bei Gegenrechnungen mit leicht abweichenden ungünstigen anderen Werten der Bodengruppen, Verdichtungsgrade und E-Moduln ergab sich eine nur sehr geringfügige Änderung der für einen Nachweis relevanten Spannungen bzw. Verformungen. Die oben getroffenen Annahmen werden deswegen als passend angesehen.

10.1.4 Belastungen

In Abbildung 2 wurden bereits verschiedene Lasteinflüsse auf eine Rohrleitung aufgezeigt. In den Berechnungsalgorithmen in ATV A 127 werden berücksichtigt:

- Verkehrslasten
- Erdlasten
- zusätzliche Oberflächenlasten
- äußerer Wasserdruck bei Grundwasserstand ab Rohrsohle bzw. ab Rohrscheitel
- Innendruck
- Wasserfüllung

Verkehrslasten werden über das Regelfahrzeug SLW 60 (Schwerlastwagen mit 600 kN Gesamtlast) berücksichtigt. Dies entspricht dem schwersten auswählbaren Regelfahrzeug. Etwaige Lasten aus Eisenbahn- oder Flugzeugverkehr sind für die Untersuchungen im Rahmen der Arbeit nicht relevant.

Die vorhandenen Erdlasten werden durch die angenommene Bodenwichte von 21 kN/m³ berücksichtigt. Die Verlegetiefe bzw. Überdeckungshöhe (ab Rohrscheitel) lag im Rahmen der Untersuchungen in einem Bereich zwischen 0,80 m < h < 2,00 m. Mit diesem Wert wird ein ungünstiger Einfluss einer hohen Lastkonzentration aus Verkehr erfasst. Ungünstig betroffen sind aufgrund von Lastkonzentrationen vor allem Graugussrohre kleinerer Nennweite. Höhere Überdeckungen führten erst ab einer Verlegetiefe von über 2,00 m zu höheren Belastungen der Rohre. Diese Überdeckungshöhe ist für erdverlegte Trinkwasserleitungen mit kleinerer Nennweite (DN 80) im städtischen Bereich eher selten anzutreffen und wird für die Ermittlung einer durchschnittlich tragfähigen Mindestwanddicke im Rahmen der Untersuchungen nicht berücksichtigt (Abbildung 90).

Zusätzliche Oberflächenlasten und ein äußerer Wasserdruck aufgrund eines sehr hohen Grundwasserstandes wurden nicht berücksichtigt, da sie für erdverlegte Trinkwasserleitungen im städtischen Bereich im Allgemeinen nicht relevant sind.

Die vorherrschende Belastung aus Wasserfüllung wird mit 10 kN/m^3 angesetzt und ein mittlerer Systembetriebsdruck mit 10 bar. Der Innendruck wurde mit voller Überlagerung zu den Außenbelastungen gerechnet. Zusätzlich wurde der Innendruck auch als einzeln auftretend berücksichtigt (Kesselformel).

In den zu den untersuchten Rohrproben beiliegenden sog. Probenbegleitscheinen (durch die WVU ausgefüllt) waren Überdeckungshöhen zwischen 0,8 bis 1,5 m verzeichnet. Ein Grundwasserstand über Rohrsohle bzw. Rohrscheitel wurden in keinem Fall angegeben. Im konkreten Fall können jedoch abweichende Werte der einzelnen Belastungen während der Berechnung abgeglichen werden.

Die relevanten Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 9.7 zusammengestellt. Die relevanten geometrischen Abmessungen wie Nennweite sind in Anhang A aufgelistet und richten sich nach den für die jeweilige Rohrgeneration gültigen Regelwerken.

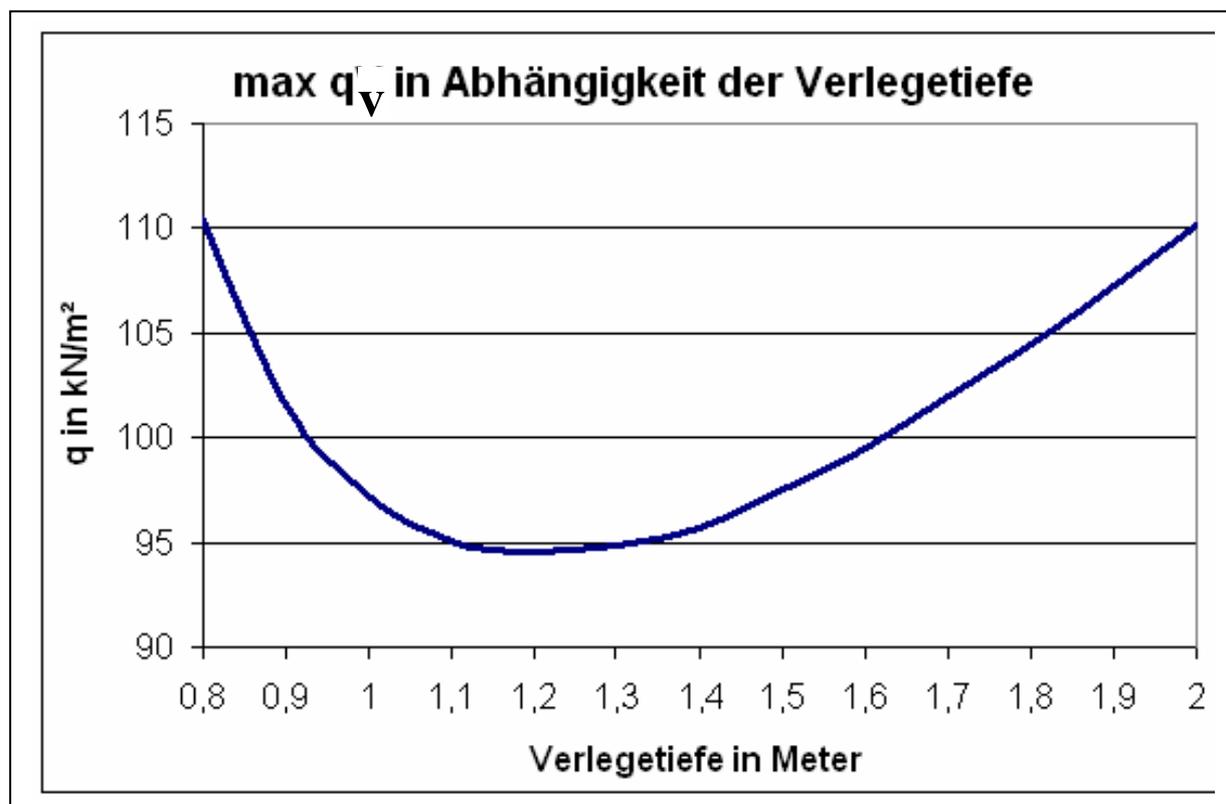


Abbildung 90: Maximale vertikale Belastung eines Rohres (DN 80) in Abhängigkeit der Verlegetiefe bzw. Überdeckungshöhe

10.2 Tragfähige Mindestwanddicke

Im Verlauf der statischen Berechnungen nach den in Abschnitt 10.1 erwähnten Abgrenzungen wurde die Abmessung der Rohrwanddicke bei Graugussrohren in 0,5-Millimeter-Schritten und bei Duktiguss- bzw. Stahlrohren in 0,1-Millimeter-Schritten soweit reduziert, bis einer der in Tabelle 10.1 genannten Sicherheitsbeiwerte entsprechend dem Rohrwerkstoff unterschritten wurde. Die dabei gefundene Wanddicke ist die tragfähige Mindestwanddicke, die den Mindestzustand eines Rohrstücks definiert. Die Werte der Mindestwanddicke sind in Tabelle 10.3 und in Diagramm 44 dargestellt und wurden nach den Algorithmen in ATV A 127 berechnet.

Tabelle 10.3: Tragfähige Mindestwanddicke [mm] für erdverlegte metallische Trinkwasserleitungen unter ungünstigen Bedingungen

Generation	GGL I	GGL II	GGL III	GGL IIa			
DN 80	5	5	4	4,5			
DN 100	6,5	6	5	5,5			
DN 125	8,0	7,5	6	7			
DN 150	9	8,5	7	8			
DN 175	10,5	10	8	9,5			
DN 200	12	11,5	9	10,5			
DN 225	13,5	12,5	9,5	11,5			
DN 250	15	14	10,5	13			
DN 275	16,5	15	11,5	14			
DN 300	17,5	16,5	12,5	15			
DN 325	19	17,5	13,5	16,5			
DN 350	20	19	14,5	17			
Generation	GGG I	GGG II	GGG Ia	St I+II	St III	St IV	St IIIa
DN 80	1,5	1,5	1,5	1,7	1,5	1,5	1,6
DN 100	1,7	1,6	1,5	2,4	1,9	1,9	2
DN 125	2,1	2	1,7	2,9	2,3	2,3	2,4
DN 150	2,5	2,4	2	3,5	2,7	2,8	2,9
DN 175				4	3,1		3,5
DN 200	3,2	3,1	2,6	4,6	3,6	3,6	3,9
DN 225				5,1	4		4,4
DN 250	4,1	3,9	3,2	5,7	4,4	4,5	4,9
DN 275				6,2	4,9		5,3
DN 300	4,8	4,6	3,9	6,7	5,3	5,3	5,8
DN 325				7,3	5,8		
DN 350	5,6	5,3	4,5	7,8	6,1	6,1	6,7

Anmerkungen zu Tabelle 10.3:

Üblicherweise führt ein größerer Rohraußendurchmesser zu größeren Spannungen, da die Bezugsfläche (projizierte Rohrscheitelfläche) vergrößert wird und somit der Einfluss von Verkehrs- und Erdlasten wächst. Dem gegenüber steht jedoch ein größeres Widerstandsmoment.

Grau hinterlegte Bereiche in Tabelle 10.3 markieren Nennweitenbereiche, in denen die ursprüngliche in den jeweiligen Regelwerken geforderte Wanddicke die berechnete Mindestwanddicke bereits unterschritt. Bei fett gedruckten Mindestwanddicken handelt es sich um Wanddicken für extrapolierte Abmessungen, da die erforderlichen Abmessungen zum Nennweitenbereich DN 350 nicht in den jeweiligen Regelwerken aufgeführt sind.

Für alle Berechnungen, die zur Ermittlung der Mindestwanddicke der Grauguss-Rohrgenerationen (GGL) nach ATV A 127 durchgeführt wurden, erfolgte der maßgebende Nachweis über die vorhandenen Biegespannungen (Bruch) aus voller Überlagerung der äußeren Belastungen mit den Innendruck (geringsten Sicherheiten, ungünstigster Fall).

Maßgebender Nachweis für Duktillgussrohr- und Stahlrohr-Generationen war der lineare Stabilitätsnachweis mittels kritischer Beullast (Sicherheit gegen Beulen) aus voller Überlagerung der äußeren Belastungen und dem Innendruck, jedoch ohne äußeren

Wasserdruck (siehe Abschnitt 10.1.4). Eine Berücksichtigung des Innendrucks nach dem Rechenansatz von Netzer und Pattis führte zu höheren Sicherheiten und war somit nicht relevant [169].

Entgegen Fußnote 8 und Fußnote 9 in ATV A 127 wird der Rechenwert der Biegezugspannung für Grauguss- und Duktulgussrohre nicht mit den jeweiligen Ringdruck- bzw. Ringbiegezugspannungen gleichgesetzt, sondern mit der tatsächlichen Zugspannung. Die somit errechneten Spannungen liegen auf der sicheren Seite. Weiterhin gibt Fußnote 11 in ATV A 127 an, dass der erforderliche Rechenwert der Biegezugspannung für Stahlrohre der 1,43-fache Wert der Mindeststreckgrenze ist, das bedeutet, dass der Wert der Zugspannungen für weitere Berechnungen verwendet werden kann.

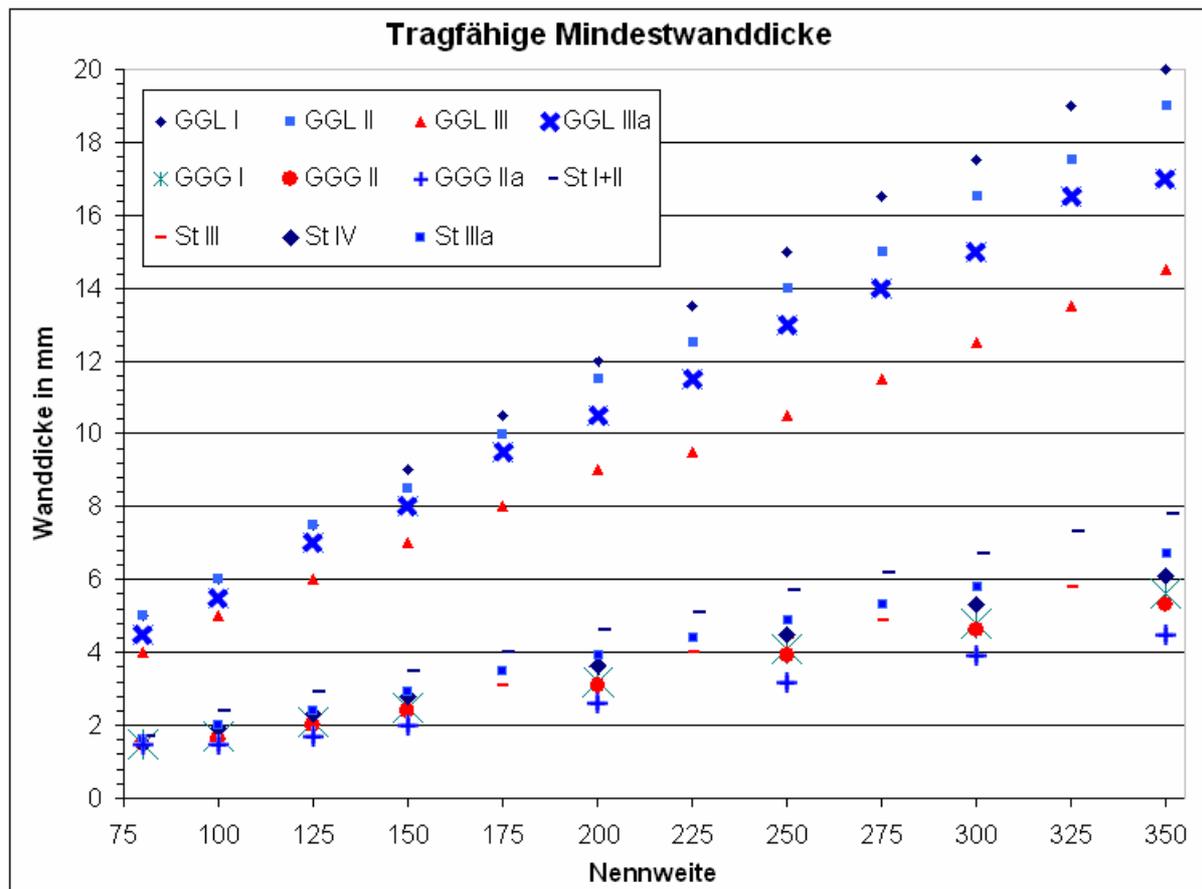


Diagramm 44: Tragfähige Mindestwanddicke für erdverlegte metallische Trinkwasserleitungen unter der Annahme ungünstiger Bedingungen und eines Systembetriebsdrucks von 10 bar;

Zur Ermittlung der Resttragfähigkeit eines durch Korrosion geschwächten Rohrquerschnitts wird die Annahme getroffen, dass der Ausfallzustand erreicht ist bzw. die Resttragfähigkeit unterschritten ist, wenn der Wert der resultierenden empirischen Restwanddicke RWD_R (Abschnitt 8.3.1) geringer als die tragfähige Mindestwanddicke ist. Somit ergeben sich Grenzbedingungen für die weitere Untersuchung von Rohrproben aus entsprechenden Rohrleitungsabschnitten zur Beurteilung von Resttragfähigkeit, technischer Restnutzungsdauer und eventuellen Entscheidungen über Sanierungs- oder Erneuerungsverfahren.

Grenzbedingungen:

- resultierende empirische Restwanddicke $RWD_R \geq$ tragfähige Mindestwanddicke t_{min}
- Durchmesser DM bzw. $DM_i \leq 15$ mm (bei Lochkorrosion bzw. durchgehender Graphitierung und max. 10 bar Betriebsdruck)
- keine Anrisse [2]

Die Ermittlung der technischen Nutzungsdauer auf Grundlage der eben erwähnten Grenzbedingungen erfolgt in Kapitel 11.

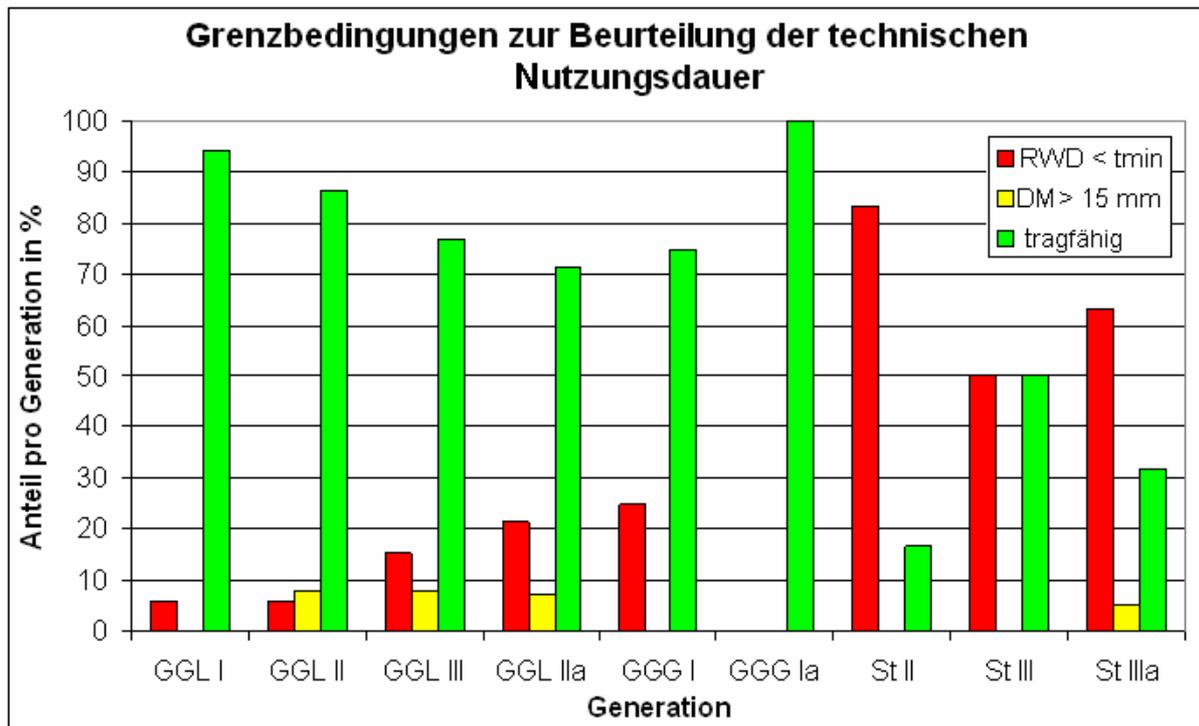


Diagramm 45: Kontrolle der Grenzbedingungen an den im Rahmen der Arbeit untersuchten Rohrproben

Die Darstellungen in Diagramm 45 zeigen, dass ein Großteil der untersuchten Rohrproben einen für die Sanierung noch ausreichend tragfähigen Restquerschnitt aufweisen und deshalb bezogen auf den zugehörigen Rohrstrang im Ganzen betrachtet der Endpunkt der technischen Nutzungsdauer noch nicht erreicht ist. Falls die untersuchten Rohrproben aufgrund echter Schäden bzw. echter Schadensursachen (Abschnitt 4.9.2 und Abschnitt 8.2) geborgen wurden, hilft die Ermittlung der empirischen Restwanddicke das Risiko weiterer Rohrschäden abzuschätzen. Das heißt, je größer die empirische Restwanddicke im Vergleich zur tragfähigen Mindestwanddicke ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit weiterer Schäden am entsprechenden Rohrstrang, da noch ausreichend tragfähige Rohrsubstanz vorhanden ist.

Diagramm 46 ist zu entnehmen, dass an den untersuchten Graugussrohren (alle Graugussgenerationen), welche keine ausreichende Resttragfähigkeit mehr besaßen, die dominierende Korrosionsart die Graphitierung mit einem Anteil von 45 % ist, gefolgt von Muldenkorrosion mit einem Anteil von 30 %. Die mit Abstand dominierende Korrosionsart an allen Stahlrohren (alle Stahlgenerationen) war die Flächenkorrosion (80 %). Diese in Tabelle 8.4 aufgeführten dominierenden Korrosionsarten sind folglich auch an den

Rohrproben wieder zu finden, die bereits eine starke Schädigung aufweisen und dadurch keine ausreichende Tragfähigkeit mehr besitzen (Grenzbedingungen unterschritten).

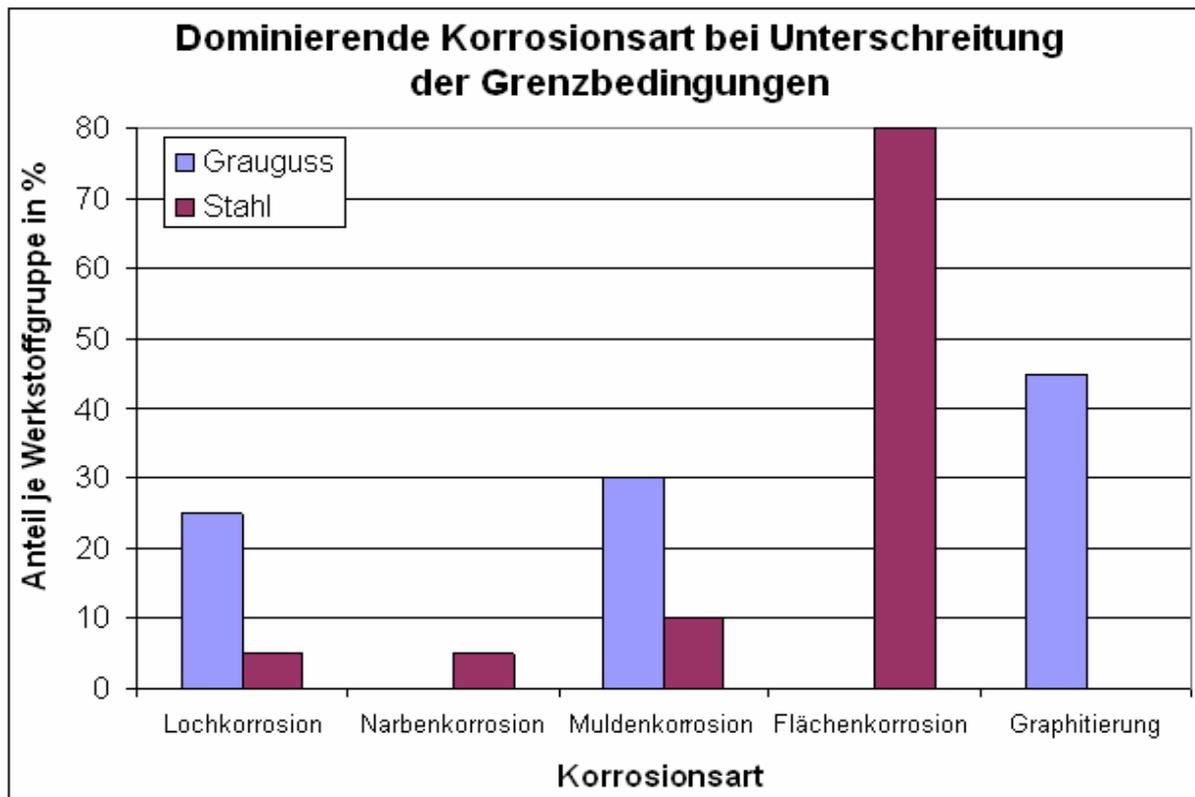


Diagramm 46: Dominierende Korrosionsart bei Unterschreitung der oben erwähnten Grenzbedingungen; die Summe aller Anteile je Korrosionsart betrug 100 %.

Einen deutlicheren Einblick geben Diagramm 47 bzw. Diagramm 48. Für alle untersuchten Grauguss- und Stahlrohre, bei denen keine ausreichende Tragfähigkeit vorhanden war (Grenzbedingungen unterschritten), ist die Schädigungszahl Rohr SZ_R und die Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K (außen / innen) gegenübergestellt.

Eine Konzentration der Schädigungszahlen um niedrige Zustandswerte (geringer Wert = „schlechter“ Zustand) ist in Diagramm 47 nicht zu erkennen. Ursache ist, dass es sich hierbei um Rohrproben handelte, bei denen bereits eine ungeschwächte Rohrwanddicke keine ausreichende Tragwirkung besaß. Das heißt, dass die in Tabelle 10.3 zugehörige tragfähige Mindestwanddicke bereits mit ungeschwächtem Rohrquerschnitt unterschritten wurde und das Originalrohr bereits ab Werk theoretisch keine ausreichende Tragfähigkeit besaß. Ein zweiter Grund ist das Vorhandensein von Lochkorrosion mit relativ großem Durchmesser ($DM > 15$ mm, siehe Grenzbedingungen) bei ansonsten relativ ungeschwächtem Rohrquerschnitt.

In Diagramm 48 dagegen erfolgt für alle untersuchten und nicht mehr tragfähigen Stahlrohrproben eine Konzentration der Schädigungszahlen um niedrige Zustandswerte (SZ_R).

Aus den Darstellungen in Diagramm 48 lässt sich schlussfolgern, dass entgegen den Darstellungen in Diagramm 24 bis Diagramm 27 im Falle der Unterschreitung der oben genannten Grenzbedingungen ein direkter Zusammenhang zwischen geschädigtem bzw. geschwächtem Rohrquerschnitt (niedriger Wert SZ_R) und geschädigtem Korrosionsschutz (niedriger Wert SZ_K), zumindest bei Stahlrohren, besteht.

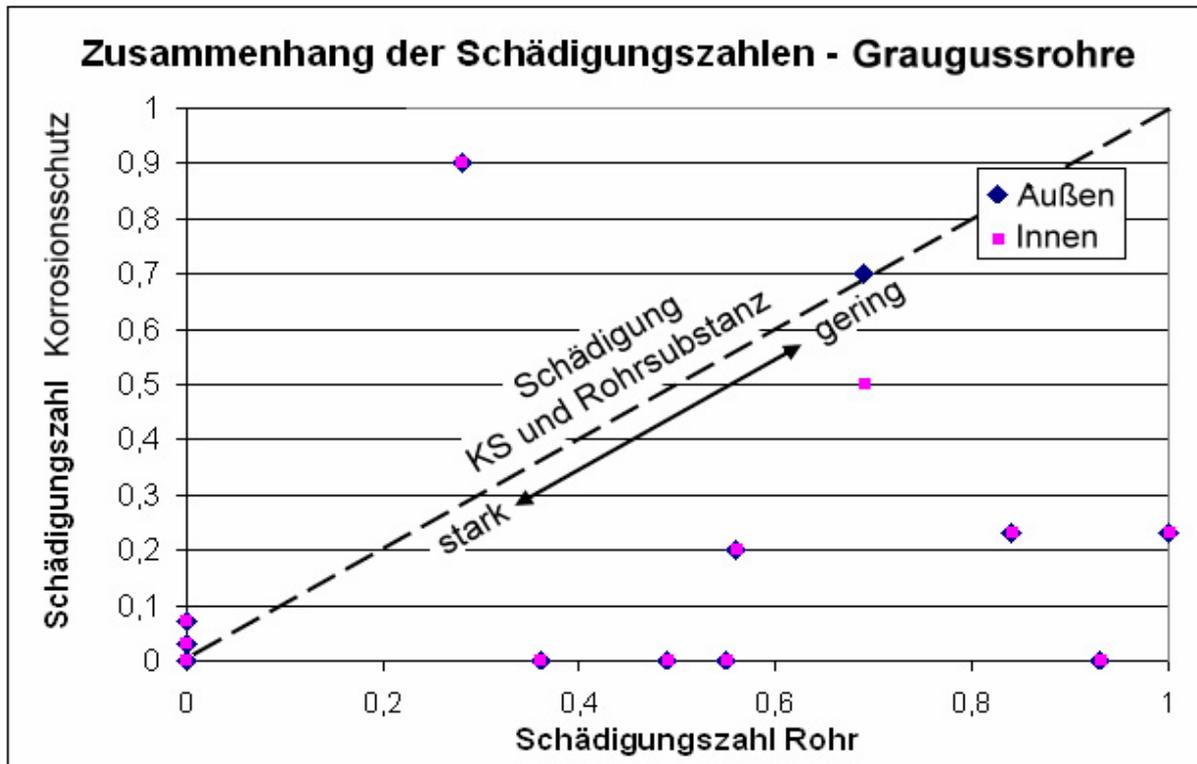


Diagramm 47: Gegenüberstellung der Schädigungszahlen SZ_R und SZ_K bei nicht mehr tragfähigen Graugussrohrproben (alle untersuchten Generationen)

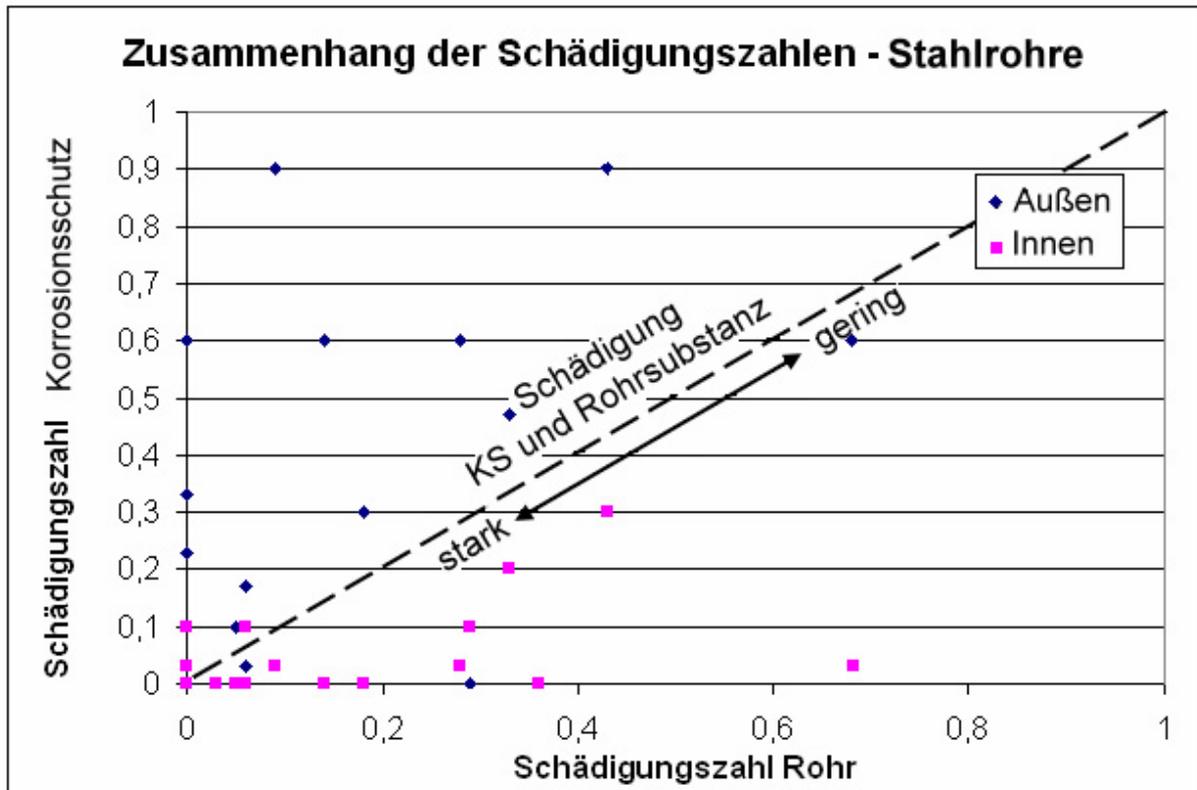


Diagramm 48: Gegenüberstellung der Schädigungszahlen SZ_R und SZ_K bei nicht mehr tragfähigen Stahlrohrproben (alle untersuchten Generationen)

11. Bestimmung der technischen Nutzungsdauer auf Grundlage des festgestellten Ist-Zustands an Rohrproben

Der Grundgedanke zur Ermittlung der technischen Nutzungsdauer metallischer erdverlegter Trinkwasserleitungen nach den in Kapitel III erwähnten Abgrenzungen ist der Vergleich des technischen Ist-Zustands mit einem definierten Mindest- oder Ausfallzustand über die empirische Restwanddicke (Abschnitt 8.3.1 und Abschnitt 10.2).

Um diesen Grundgedanken fortzuführen und weitere Betrachtungen zur Ermittlung der technischen Nutzungsdauer zu konkretisieren, sind folgenden Annahmen in Rahmen der Arbeit getroffen worden.

11.1 Annahmen und Berechnungsvoraussetzungen

1. Zustand des Rohrleitungsabschnitts (siehe auch Diagramm 49)

- Zum Zeitpunkt der Verlegung des untersuchten Rohrleitungsstrangs betrug dessen technischer Zustand bzw. Ausgangszustand 100 %, das heißt, dass der Rohrquerschnitt ungeschwächt war (keine Herstellungsfehler, Transportschäden usw.).
- Zum Zeitpunkt der Rohrprobenbergung bzw. der anschließenden materialtechnischen Zustandsuntersuchung nach Kapitel 6 und Kapitel 7 entspricht der technische Zustand des Rohrleitungsstrangs dem technischen Ist-Zustand und berechnet sich wie folgt:

$$\text{Ist-Zustand} = \frac{RWD_r}{t} \cdot 100 = SZ_R \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{Gleichung 11.1})$$

- Zum Ende seiner technischen Nutzungszeit hat der untersuchte Rohrleitungsstrang seinen Ausfall- oder Mindestzustand erreicht, das heißt, die tragfähige Mindestwanddicke t_{\min} (Abschnitt 10.2) wird unterschritten. Der Mindest-Zustand errechnet sich zu:

$$\text{Mindest-Zustand} = \frac{t_{\min}}{t} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{Gleichung 11.2})$$

(„t“ entspricht der maximalen Wanddicke in Millimetern)

- Wie in Abschnitt 10.2 beschrieben, ist die tragfähige Mindestwanddicke bzw. der Mindest-Zustand unterschritten, wenn gilt:

$$RWD_r < t_{\min} \text{ [mm] bzw. festgestellter Ist-Zustand} < \text{Mindestzustand} \text{ [%]}$$

- Der Mindest-Zustand ist herleitungsbedingt erreicht bzw. unterschritten, wenn er Werte um null Prozent annimmt.

2. Relevante Betrachtungszeiträume (siehe auch Diagramm 49)

- Der Zeitraum zwischen Rohrherstellung und Rohrverlegung wird als vernachlässigbar gering angenommen. Der Zeitpunkt der Rohrherstellung und der Rohrverlegung ist deshalb annähernd gleich.
- Der Zeitraum zwischen der Rohrherstellung bzw. der Rohrverlegung und dem Erreichen des Mindestzustands (Ausfallzeitpunkt) entspricht zunächst der (mittleren) statistischen Nutzungsdauer nach Kapitel 5.
- Der Zeitraum zwischen dem Feststellen des Ist-Zustands über materialtechnische Zustandsuntersuchungen und dem Erreichen des Mindestzustands entspricht der technischen Restnutzungsdauer.
- Mittels Vergleich von Ist-Zustand und Mindest-Zustand wird ein ggf. neuer Ausfallzeitpunkt bestimmt und die Restnutzungsdauer korrigiert (Ausfall bzw. Erreichen des Mindestzustands früher oder später).

3. Zustandsverschlechterung

- Die Auswertungen in Abschnitt 8.2 haben gezeigt, dass die technische Zustandsverschlechterung einer metallischen Rohrleitung zum größten Teil von Korrosionsangriffen beeinflusst wird.
(Korrosion → Materialabtrag = Querschnittsschwächung = Tragfähigkeitsminderung).
- Die Abtragungsraten bzw. Korrosionsgeschwindigkeiten verlaufen über einen bestimmten Betrachtungszeitraum annähernd konstant und linear [149; 166].
- Der Beginn des Korrosionsangriffs kann im Rahmen der materialtechnischen Zustandsuntersuchung nicht festgestellt werden. Es wird daher angenommen, dass ein querschnittsschwächender Materialabtrag im ungünstigsten Fall bereits zum Zeitpunkt der Rohrverlegung erfolgte. Im günstigsten Fall ist zum Zeitpunkt der Untersuchung momentan kein Korrosionsangriff feststellbar. Im Allgemeinen kann eine gewisse Resistenzzeit des metallischen Rohres vorausgesetzt werden bis ein Korrosionsangriff erfolgt.
- Bei Annahme einer gewissen Resistenzzeit wird statt einer linearen eine progressive Zustandsverschlechterung angenommen (ungünstiger Fall). Eine degressive Zustandsverschlechterung, z. B. bei Bildung von korrosionshemmenden Schutzschichten an der Rohrwand) würde sich günstig auf die technische Restnutzungsdauer auswirken und somit nicht auf der sicheren Seite liegen (Diagramm 50).
- Der Einfluss festigkeitsrelevanter Werkstoffeigenschaften ist bereits über die Berechnung der tragfähigen Mindestwanddicke berücksichtigt (siehe Abschnitt 10.2) und wird über die gesamte technische Nutzungsdauer als konstant angenommen.
- Für weitere Berechnungen relevante Korrosionsgeschwindigkeiten bzw. Materialabtragungsraten werden aus Tabelle 4.16 und Tabelle 4.17 entnommen.

Die oben aufgezählten Annahmen und Aussagen sollen in Diagramm 49 und Diagramm 50 verdeutlicht werden.

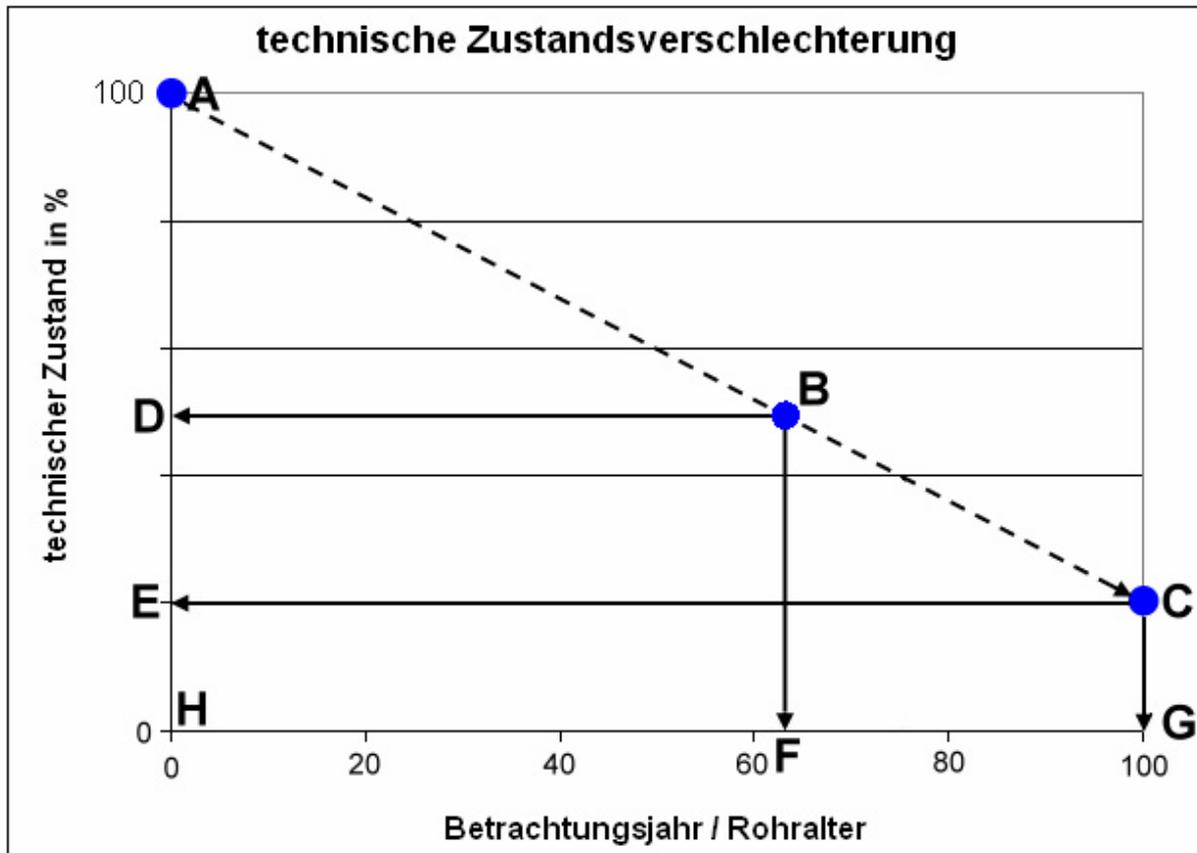


Diagramm 49: In Diagrammform übertragene beispielhafte Beurteilungskriterien zur Einschätzung der technischen Zustandsverschlechterung und der technischen Nutzungsdauer erdverlegter metallischer Trinkwasserrohre

Zu Diagramm 49:

- Punkt A: Ausgangszustand = 100 % im Jahr der Rohrverlegung (Rohralter = 0)
- Punkt B: technischer Ist-Zustand der Leitung in % (Punkt D) zum Zeitpunkt der Untersuchung (Punkt F)
- Punkt C: erreichter Mindestzustand der Leitung in % (Punkt E) zum Ende der vorerst statistischen Nutzungsdauer (Punkt G), Tragfähigkeit im weiteren Verlauf unterschritten
- Strecke \overline{HG} : statistische Nutzungsdauer
- Strecke \overline{FG} : statistische Restnutzungsdauer bzw. statistische Lebensdauer
- Strecke \overline{DE} : technische Abnutzungsreserve bzw. statistische Restlebensdauer
- Strecke \overline{AC} : ideal linearer Verlauf der Zustandsverschlechterung

Bei Annahme einer ideal linearen Zustandsverschlechterung liegt Punkt B (festgestellter Ist-Zustand) auf der Strecke \overline{AC} .

Weitere Möglichkeiten des Verlaufs der technischen Zustandsverschlechterung gibt Diagramm 50 an

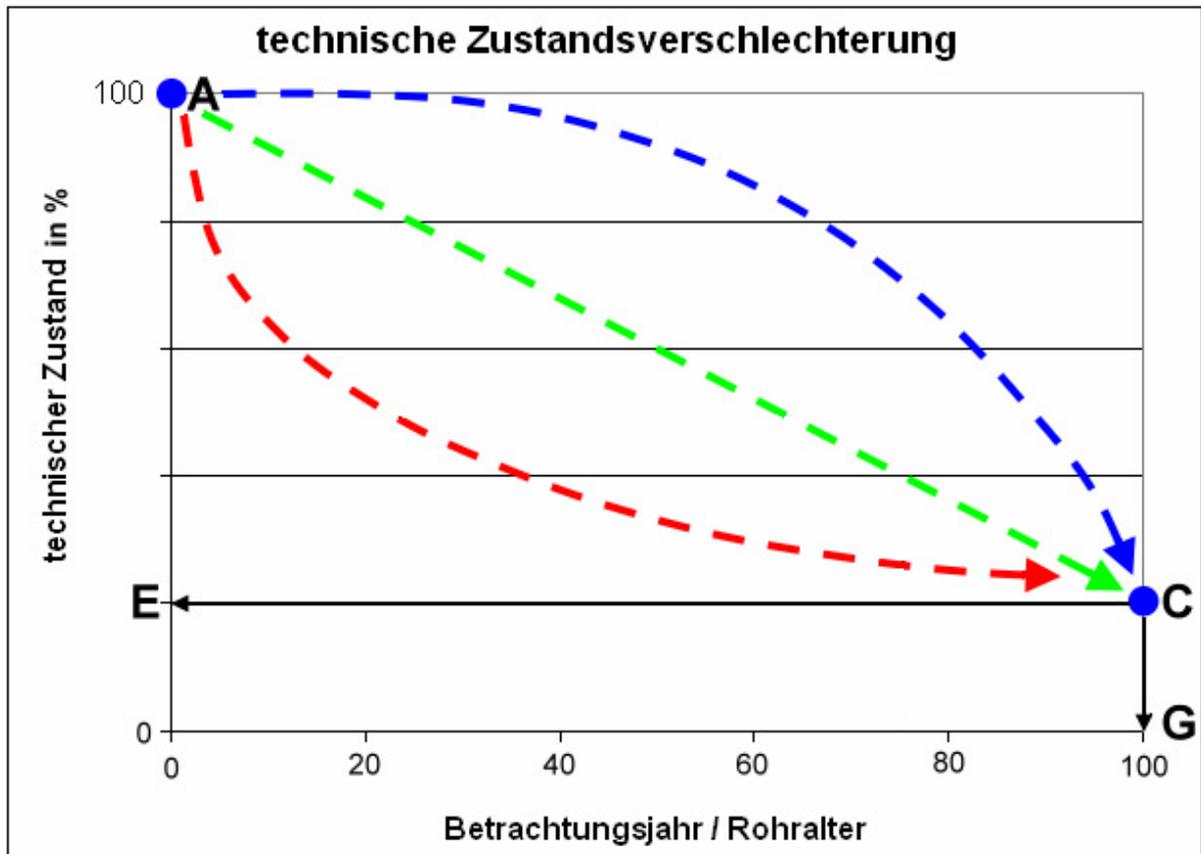


Diagramm 50: Verschiedene Darstellungsformen des Verlaufs einer allgemeinen möglichen Zustandsverschlechterung

Zu Diagramm 50:

- Strecke \overline{AC} (grün): ideal linearer Verlauf der Zustandsverschlechterung
- Strecke \overline{AC} (rot): degressiver Verlauf der Zustandsverschlechterung; Annahme ungünstig, da der Punkt des Erreichens des Mindestzustands unrealistisch zu einem späteren Zeitpunkt verschoben wird
- Strecke \overline{AC} (blau): progressiver Verlauf der Zustandsverschlechterung unter Annahme einer gewissen, unbestimmten Resistenzzeit; Verlauf der Zustandsverschlechterung ähnlich einer sog. Wurfparabel [72]

Im Idealfall liegt Punkt B (festgestellter technischer Ist-Zustand zum Zeitpunkt der Untersuchung in Diagramm 49) im Bereich zwischen dem linearen Verlauf und dem progressiven Verlauf der Zustandsverschlechterung. In diesem Fall kann die technische Nutzungsdauer annähernd der statistischen Nutzungsdauer (Erwartungswert der mittleren Lebensdauer) gleichgesetzt werden.

Sollte Punkt B unterhalb von Punkt C liegen, ist das Ende der technischen Nutzungsdauer aufgrund der Unterschreitung der Mindest-Tragfähigkeit erreicht (vgl. mit den in Abschnitt 10.2 erwähnten Grenzbedingungen).

Liegt Punkt B unterhalb des Verlaufs der ideal linearen Zustandsverschlechterung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einem früheren Erreichen des Mindest-Zustands und somit mit einer Verkürzung der technischen Nutzungsdauer zu rechnen. Die technische Nutzungsdauer ist folglich geringer als die statistische Nutzungsdauer (Diagramm 51).

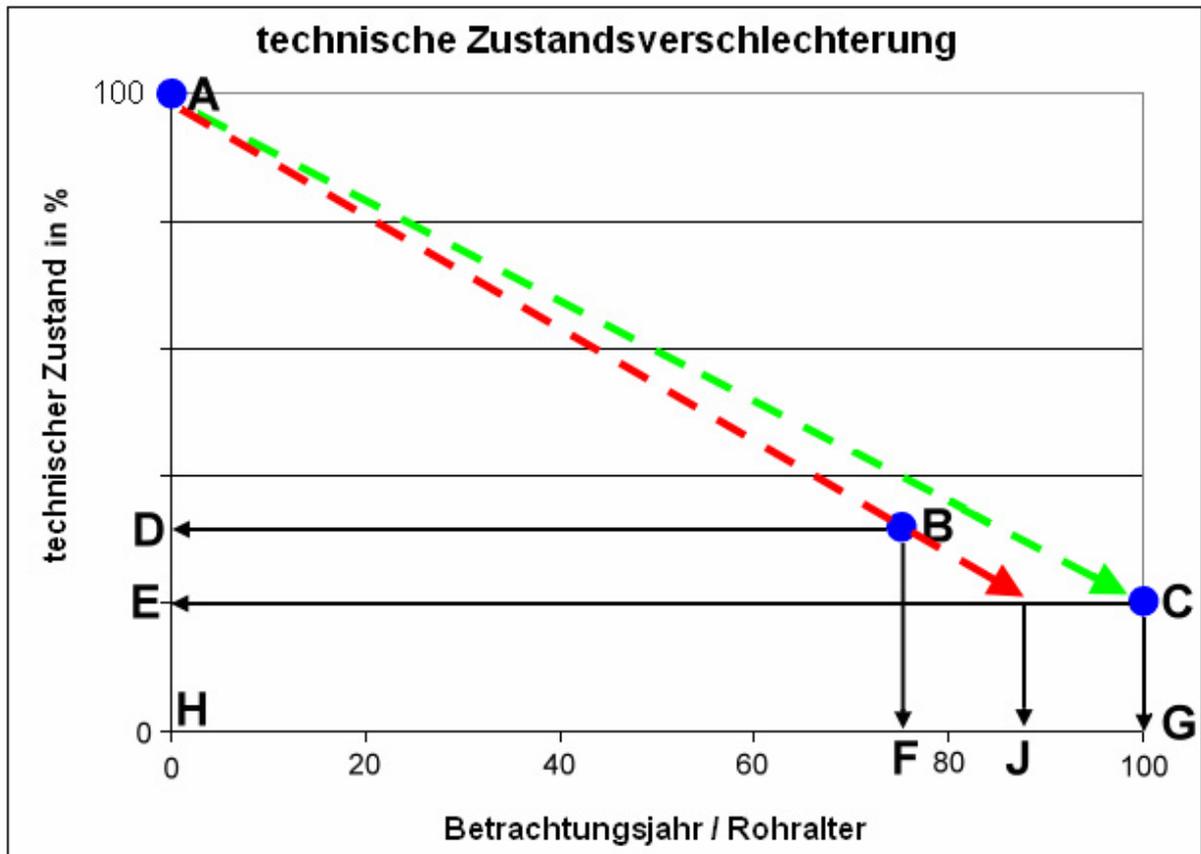


Diagramm 51: Verlauf der Zustandsverschlechterung falls der technische Ist-Zustand (Punkt B) unterhalb des Verlaufs der ideal linearen Zustandsverschlechterung liegt; frühzeitiger Ausfall der Leitung noch vor Erreichen der statistischen Nutzungsdauer zu erwarten (Punkt J)

Liegt Punkt B oberhalb des Verlaufs der progressiven Zustandsverschlechterung wird mit hoher Wahrscheinlichkeit der Mindest-Zustands zu einem späteren Zeitpunkt erreicht. Die technische Nutzungsdauer ist dann folglich höher als die statistische Nutzungsdauer (Diagramm 52).

Zur Vermeidung unrealistisch hoher Werte der technischen Nutzungsdauer (u. U. gegen unendlich) wird diese im Falle weiterer Berechnungen auf maximal den doppelten Wert der bisher erreichten Nutzungsdauer begrenzt. Der Abstand des Endpunkts der technischen Nutzungsdauer (Punkt L) zum Endpunkt der statistischen Nutzungsdauer (Punkt C) wird deshalb um den Abstand \overline{AB} verlängert und der Verlauf der zugehörigen tatsächlichen Zustandsverschlechterung (hier Strecke \overline{BL}) verschoben.

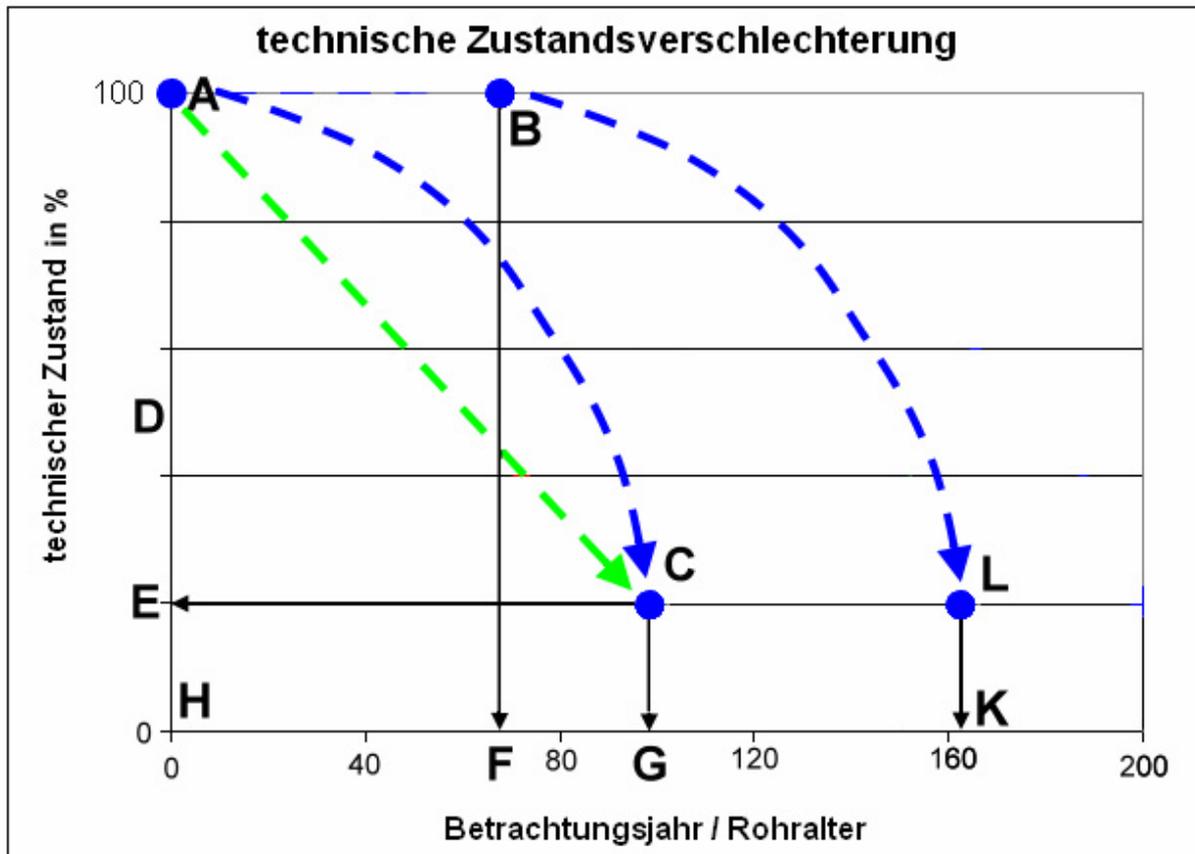


Diagramm 52: Verlauf der Zustandsverschlechterung falls der technische Ist-Zustand (Punkt B) oberhalb des Verlaufs der progressiven Zustandsverschlechterung liegt; späterer Ausfall der Leitung nach Erreichen der statistischen Nutzungsdauer zu erwarten (Punkt K)

11.2 Mathematische Formulierung der Berechnungen zur technischen Nutzungsdauer

Die in Abschnitt 11.1 getroffenen Annahmen bzw. Aussagen und beispielhaften Darstellungen in Diagramm 49 bis Diagramm 52 über die technische Nutzungsdauer wurden für eine rechnergestützte Auswertung der Untersuchungsergebnisse der in Abschnitt 8.1 genannten Rohrproben mathematisch formuliert (Gleichung 11.3 bis Gleichung 11.10).

Festlegungen:

Zeitpunkt der Rohrverlegung $= X_0 = 0$
 Zugehörige Zustandsordinate (Ausgangszustand) $= Y_0 = 100 \%$

Zeitpunkt der Untersuchung $= X_{Ist} = 0 < X_{Ist} < X_{Aus}$ (Regelfall)
 Zugehörige Zustandsordinate (Ist-Zustand) $= Y_{Ist} = Y_{Aus} < Y_{Ist} < Y_0$ (Regelfall)

Zeitpunkt des Ausfalls $= X_{Aus}$
 Zugehörige Zustandsordinate (Mindestzustand) $= Y_{Aus}$

Die Kombination aus linearen und progressiven quadratischen Verlauf (ähnlich einer Wurfparabel) der Zustandsverschlechterung (z.B. Diagramm 50) wird wie bereits erwähnt den mittleren Trend der Zustandsverschlechterung am besten nachzeichnen (Gleichung 11.3 und Gleichung 11.4)

Lineare Zustandsverschlechterung (allgemein):

$$Y = -\frac{1}{m} \cdot X + C \quad (\text{Gleichung 11.3})$$

mit $C = 100\%$ (Ausgangszustand)

Quadratische Zustandsverschlechterung (allgemein):

$$Y = -\frac{1}{b} \cdot X^2 + C \quad (\text{Gleichung 11.4})$$

mit $C = 100\%$ (Ausgangszustand)

Der (negative) Anstieg der linearen Zustandsverschlechterung bis zum Ausfallzeitpunkt errechnet sich zu:

$$-\frac{1}{m_{Aus}} = \frac{Y_{Aus} - Y_0}{X_{Aus} - X_0} \quad (\text{Gleichung 11.5})$$

Bei Anwendung der hier genannten Gleichungen muss mit dem relativen Alter gerechnet werden. Dabei kann X_0 vernachlässigt werden ($X_0 = \text{Jahr der Verlegung; relatives Alter} = 0$).

Der (negative) Anstieg der progressiven quadratischen Zustandsverschlechterung bis zum Ausfallzeitpunkt errechnet sich zu:

$$b_{Aus} = \frac{X_{Aus}^2}{-Y_{Aus} + C} \quad (\text{Gleichung 11.6})$$

Liegt der festgestellte Ist-Zustands zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen der Zustandsverschlechterung mit linearen und progressiven quadratischen Verlauf, so kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass das Rohr beim Erreichen der mittleren (statistischen) Nutzungsdauer ausfällt.

Folgende Bedingung muss dazu erfüllt sein:

$$m_{Aus} \leq m_B \leq \frac{b_{Aus}}{X_{Ist}}$$

$$\text{mit } -\frac{1}{m_B} = \frac{Y_{Ist} - Y_0}{X_{Ist} - X_0} \quad (\text{Gleichung 11.7})$$

Falls der festgestellte Ist-Zustand (Punkt B in Diagramm 51) unterhalb der linearen Zustandsverschlechterung liegt, ist mit einem Ausfall vor Erreichen der mittleren statistischen Nutzungsdauer zu rechnen. Dazu muss folgende Bedingung eintreten:

$$m_B < m_{Aus}$$

Der neue Ausfallzeitpunkt (Erreichen der technischen Nutzungsdauer) errechnet sich zu:

$$X_{Aus} = \frac{Y_{Aus} - C}{-\frac{1}{m_B}} \quad (\text{Gleichung 11.8})$$

Wenn der festgestellte Ist-Zustand bereits den Wert des Mindestzustands erreicht hat, besitzt das Rohr keine ausreichende Resttragfähigkeit mehr und hat bereits das Ende seiner technischen Nutzungsdauer erreicht.

$$Y_{Ist} = Y_{Aus}$$

Liegt der festgestellte Ist-Zustand (Punkt B in Diagramm 52) zum Zeitpunkt der Untersuchung über der progressiven quadratischen Zustandsverschlechterung, ist mit einer Verlängerung der Nutzungsdauer zu rechnen. Bedingung:

$$m_B > \frac{b_{Aus}}{X_{Ist}}$$

Der neue (spätere) Ausfallzeitpunkt ließe sich wiederum mittels linearer oder progressiver quadratischer Zustandsverschlechterung errechnen. Jedoch tendiert der neue Wert ($X_{aus-neu}$) gegen unendlich, je näher der Ist-Zustand am Ausgangszustand liegt:

$$X_{Aus-neu} = \infty \quad \text{wenn} \quad Y_{Ist} = Y_0.$$

Die mittlere statistische Nutzungsdauer wird deswegen mit dem Abstand \bar{X} (Abstand \overline{AB} in Diagramm 52) verlängert. Beträgt der Ist-Zustand zum Zeitpunkt der Auswertung noch 100 %, so entspricht $\bar{X} = X_{Ist}$.

$$X_{Aus-neu} = \sqrt{\frac{Y_{Aus} - C}{-\frac{1}{b_{Aus}}}} + \bar{X} \quad (\text{Gleichung 11.9})$$

$$\text{mit } \bar{X} = X_{Ist} - \sqrt{\frac{Y_{Ist} - C}{-\frac{1}{b_{Aus}}}} \quad (\text{Gleichung 11.10})$$

$$\text{bzw.: } X_{Aus-neu} = X_{Aus} + \bar{X}$$

11.3 Berechnungsbeispiele zur Ermittlung der technischen Nutzungsdauer zur Veranschaulichung

Untersuchungsergebnisse:

- Stahlrohr Generation IIIa (Verlegung zu DDR-Zeiten)
- Verlegejahr X_0 : 1985
- angenommener Zustand Y_0 : 100 %
- Untersuchungszeitpunkt X_{Ist} : 2005
- festgestellter Zustand Y_{Ist} : 65 % (Gleichung 11.1)
- Mindestzustand Y_{Aus} : 60 % (Gleichung 11.2)
- mittlere statistische Restlebensdauer (Diagramm 7): 11 Jahre (Ausfall ~ 2016)

Zwischenergebnisse:

- $m_B = 0,57$ (Gleichung 11.7)
- $m_{Aus} = 0,76$ (Gleichung 11.5)
- $m_B < m_{Aus} \rightarrow$ Ausfall vor Erreichen der mittleren Lebensdauer
- $X_{Aus-neu} = 23$ (Gleichung 11.9) \rightarrow neues Ausfalljahr 1985 + 23 ~ 2008

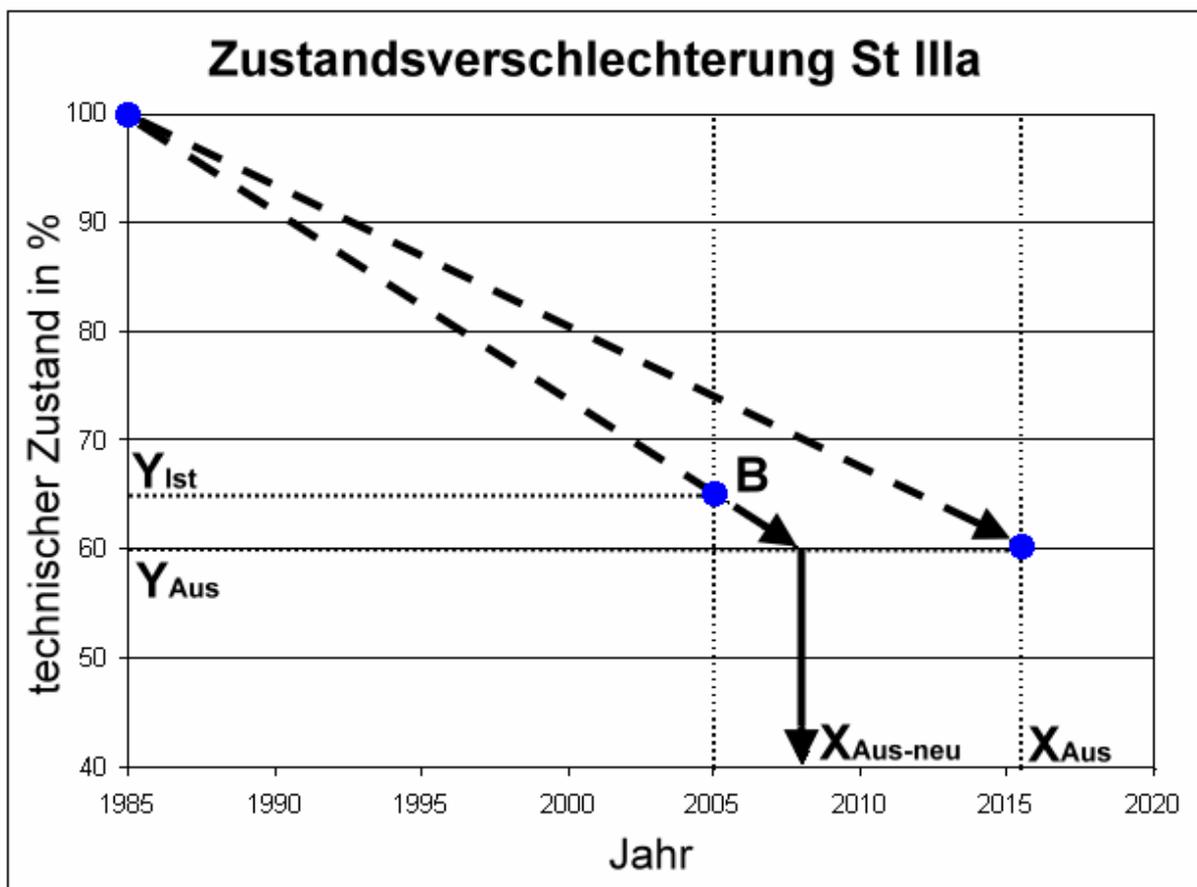


Diagramm 53: Verlauf der Zustandsverschlechterung für das oben genannte Beispiel

In Diagramm 53 ist bereits zu erkennen, dass die Zustandsverschlechterung schneller abläuft als die ideal lineare Zustandsverschlechterung (größere Neigung des Verlaufs). Der neue Ausfallzeitpunkt (Erreichen des Mindestzustands; Versagen der statischen Tragfähigkeit aufgrund Materialverlusts durch Korrosion) tritt 2008 statt etwa 2015 ein. Der Leitungs-

abschnitt befindet sich dementsprechend in einem schlechteren Zustand als aufgrund der allgemeinen Auswertung der Schadensstatistik abgeschätzt werden kann (z. B. über die mittlere statistische Nutzungsdauer).

Als weiteres Beispiel sollen ausgewählte Darstellungen der ermittelten Ausfallzeitpunkte (und damit die technische Nutzungsdauer) für die im Rahmen der Arbeit untersuchten Rohrproben pro Generation erfolgen (Diagramm 54 bis Diagramm 56).

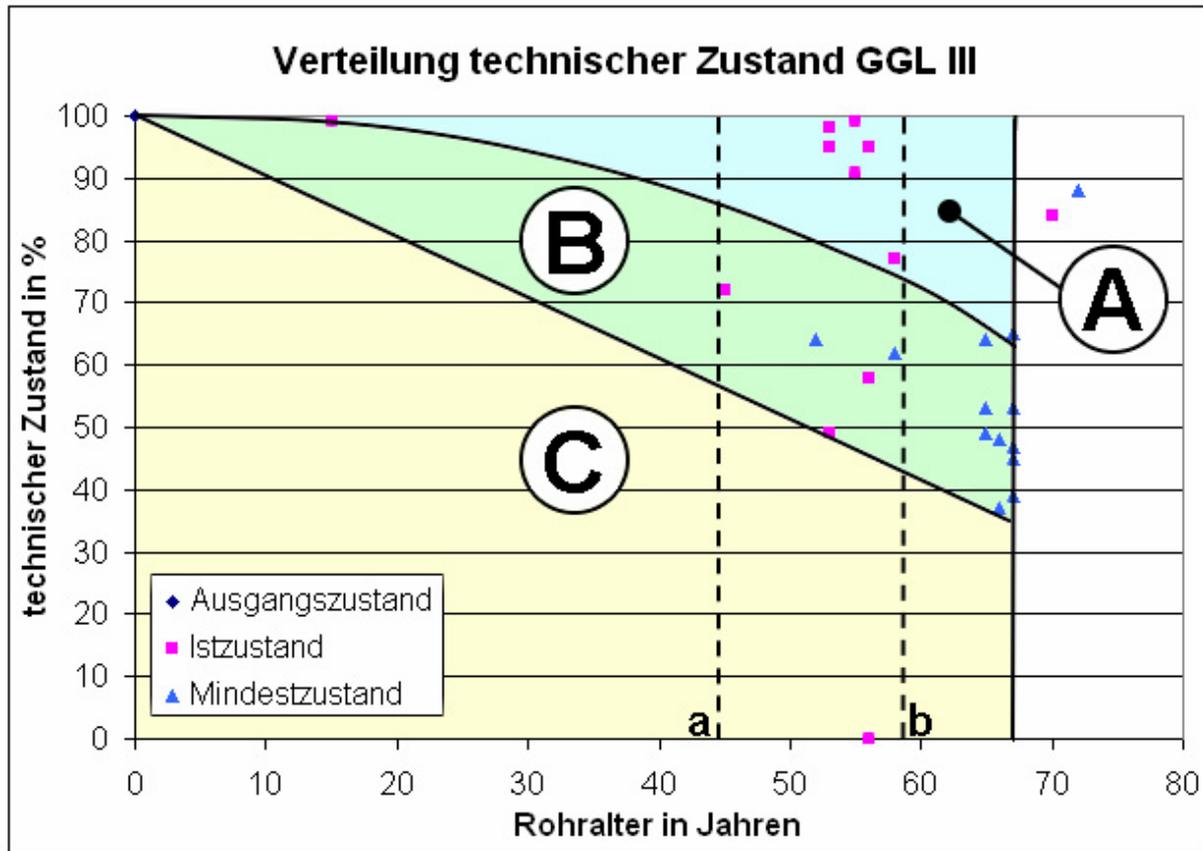


Diagramm 54: Verteilung der ermittelten Ist-Zustände und Mindest-Zustände der untersuchten Rohrproben (hier: Generation GGL III; 13 Proben)

Der Bereich zwischen Punkt a und Punkt b in Diagramm 54 gibt das durchschnittliche Rohralter der Proben im Jahr der Untersuchung an. Rohre, deren Ist-Zustände im Bereich A liegen, werden mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem späteren Zeitpunkt als dem Ende der mittleren statistischen Nutzungsdauer ausfallen (hier der Großteil der Proben). Das Ende der technischen Nutzungsdauer der Proben im Bereich B wird mit hoher Wahrscheinlichkeit mit dem Endpunkt der mittleren statistischen Nutzungsdauer zusammen eintreten. Proben, deren Ist-Zustände im Bereich C liegen, erreichen mit hoher Wahrscheinlichkeit das Ende ihrer technischen Nutzungsdauer noch vor dem Endpunkt der mittleren statistischen Nutzungsdauer. In Diagramm 54 ist i. M. ein relativ guter Ist-Zustand an Rohren der Generation GGL III (Schleuderguss) zu erkennen.

In Diagramm 55 ist zu erkennen, dass bereits ein Großteil der untersuchten Stahlrohre der Generation St IIIa zum Zeitpunkt der Untersuchung (Rohralter im Bereich zwischen Punkt a und Punkt b) den tragfähigen Mindestzustand unterschritten hatten (Linie c). Das Ende der technischen Nutzungsdauer war folglich zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits theoretisch erreicht.

Bei Übertragung dieser Untersuchungsergebnisse auf den zur Rohrprobe zugehörigen Rohrleitungsabschnitt ist davon auszugehen, dass für den gesamten Rohrleitungsstrang das Ende der technischen Nutzungsdauer erreicht ist und mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mit Schäden aufgrund Perforierung, übermäßiger Verformung und / oder Tragfähigkeitsverlust zu rechnen ist.

Im Vergleich zu Diagramm 55 zeigt Diagramm 56 einen relativ guten Zustand der im Rahmen der Arbeit untersuchten Duktulgussrohre. Zwei der sieben Proben wiesen zum Zeitpunkt der Untersuchung einen komplett ungeschwächten Rohrquerschnitt auf (Ist-Zustand = Ausgangszustand = 100 %). Bei Übertragung dieser Untersuchungsergebnisse auf den zur Rohrprobe zugehörigen Rohrleitungsabschnitt ist davon auszugehen, dass für den gesamten Rohrleitungsstrang das Ende der technischen Nutzungsdauer mit hoher Wahrscheinlichkeit erst viel später als statistisch ermittelt erreicht wird und der entsprechende Leitungsabschnitt erst dann ausfällt.

Die in Diagramm 54 bis Diagramm 56 dargestellten Zustände der jeweils untersuchten Rohrproben lassen sich aufgrund der mitunter geringen Anzahl und aufgrund großer Streuungen um eine (mittlere) technische Nutzungsdauer nicht allgemeingültig auf die jeweiligen Rohrgenerationen übertragen. Für Aussagen zur technischen Nutzungsdauer, z. B. im Rahmen von Rohrnetzbewertungen, sind somit materialtechnische Zustandsuntersuchungen notwendig.

Zur Bestimmung des Trends und der Entwicklung von Schadensraten gibt die im Rahmen der Arbeit beschriebene Berechnungsmethode zur Ermittlung der technischen Nutzungsdauer nur bedingt Auskunft, da wie oben gezeigt der Zeitpunkt eines Komplettausfalls eines Leitungsabschnitts ermittelt wird und keine Hochrechnung von Schadensraten erfolgt, bis ein definierter Komplettausfall aufgrund zu vieler Schäden eintritt (siehe auch Kapitel 14).

12. Bodenuntersuchungen zur Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit

Die Grenzbedingungen in Abschnitt 10.2 legen u. a. bezüglich der Bewertung des technischen Ist-Zustands bzw. der Sanierungsfähigkeit einer geschwächten Leitung eine noch ausreichende tragfähige Restwanddicke und speziell bei der Schadensart Lochkorrosion einen maximalen idealen Durchmesser DM_i von 15mm fest (bei 10 bar Betriebsdruck).

Sollte während einer Untersuchung keine Lochkorrosion bzw. Perforierung des Rohres mit $DM_i > 15$ mm festgestellt werden, ist dennoch nicht auszuschließen, dass im weiteren Verlauf einer nicht unterbundenen Zustandsverschlechterung bzw. bei fortlaufender Korrosion die Grenzbedingung $DM_i \leq 15$ mm überschritten wird. Eine weitere Zustandsverschlechterung aufgrund von Innenkorrosion kann durch Sanierung mittels Zementmörtelaukleidung verhindert werden.

Bei der Prognose der technischen Nutzungsdauer nach Abschnitt 11 bzw. der Festlegung des Ausfallzeitpunkts eines Rohrleitungsabschnitts kann eine Einbeziehung der Kontrolle zur Einhaltung der Grenzbedingung $DM_i \leq 15$ mm zunächst nicht direkt erfolgen. Nach dem Verfahren in Abschnitt 11 wird zwar indirekt eine allgemeine mittlere Dickenabnahme durch Korrosion berücksichtigt, doch es können sich in Abhängigkeit der Korrosionsart verschiedene Materialabtragungsraten ergeben, deren Werte größer als die mittlere Dickenabnahme sind. Das führt u. U. zu weiteren Perforierungen und somit Wasserverlusten am Rohrleitungsabschnitt, obwohl sich der Abschnitt laut Prognose in einem noch tragfähigen Zustand befindet. Deshalb werden weitere Betrachtungen zu Korrosionsart, Abtragungsgeschwindigkeit und der Änderung des Prognosezeitraums der technischen Nutzungsdauer angestellt.

12.1 Abtragsrichtung

Ist die Korrosionsgeschwindigkeit bzw. die Abtragsrate für die Verlegebedingungen (Bodenaggressivität, Korrosionsmedien, Korrosionsschutz, Rohrwerkstoff) eines Rohrleitungsabschnitts bekannt, so kann ein weiterer Verlauf des Materialverlusts bei Lochkorrosion und den restlichen Korrosionsarten am Rohr bis zum Wanddurchbruch bzw. Erweiterung des Durchmessers $DM_i > 15$ mm eingeschätzt werden.

Tabelle C.1 in DIN EN 12501 zeigt die für eine Begrenzung der Funktion der Rohrleitung relevanten Korrosionsarten (hier in Bezug auf die Angriffsfläche) [174]:

- Beeinträchtigung der Dichtheit einer Rohrleitung → örtliche Korrosion
- Beeinträchtigung der Festigkeit einer Rohrleitung → gleichmäßige Korrosion

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 4.9.3 und speziell in Tabelle 4.14 unterscheiden sich die zugehörigen relativen Korrosionsgeschwindigkeiten und relativen Materialabtragungsraten ω [mm/a].

Ebenso unterscheiden sich die Abtragsraten nicht nur in Abhängigkeit der Geometrie der Korrosionsarten, sondern auch in Abhängigkeit örtlicher Verhältnisse und vom Auftreten der Korrosionsarten an der Rohrrinnen- oder Rohraußenseite.

Nach DIN 50930 besteht Gefahr von Mulden- oder Lochkorrosion insbesondere bei:

- unvollständig schützenden Deckschichten (siehe Abschnitt 4.9.4),
- unter sog. Rostknollen (anodischer Bereich) oder
- im Bereich von Gasblasen im Rohrscheitelbereich bzw. Ablagerungen im Rohrsohlenbereich (Differenzen in der Sauerstoffkonzentration zwischen Korrosionselement und dem durchfließenden Wasser) [160].

Die unterschiedlichen schädigenden Auswirkungen und die Angriffsrichtung von Abtragungsraten bei den einzelnen Korrosionsarten in Anlehnung an Tabelle 4.14 und DIN 50905 sollen im Rahmen der Arbeit wie in den Darstellungen in Abbildung 91 bis Abbildung 95 für weitere Berechnungen berücksichtigt werden [178].

12.1.1 Flächenkorrosion

Bei Flächenkorrosion ergibt sich nach DIN 50905 die Abtragungsrate ω bzw. Abtragungsgeschwindigkeit aus einem flächenbezogenen Masseverlust v und der Dichte ρ eines Metallwerkstoffs. Die Dickenabnahme Δs des Metallwerkstoffs (hier: die Rohrwand; siehe Abbildung 91) kann so durch Umstellen und Gleichsetzen der in DIN 50905 genannten Gleichungen direkt aus der Abtragungsrate ω errechnet werden (Gleichung 12.1) [178].

Abnahme Δd der restlichen Rohrwanddicke bei Flächenkorrosion:

$$\Delta d = \omega \cdot t \quad [mm] \quad \text{(Gleichung 12.1)}$$

mit ω = Abtragungsgeschwindigkeit [mm/Jahr]
 t = Betrachtungszeitraum [Jahre]

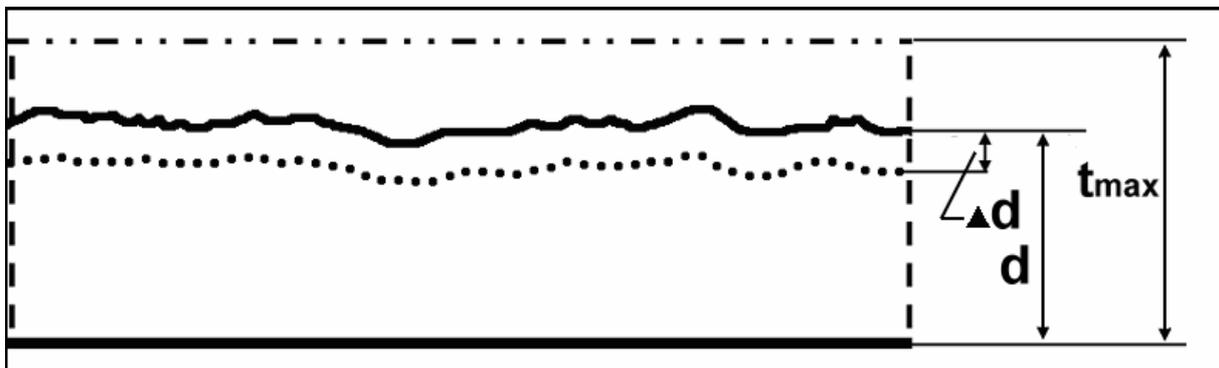


Abbildung 91: Skizzenhafte Darstellung des Angriffs der Rohrwand (Längsschnitt) bei Flächenkorrosion; d = restliche Wanddicke, t_{\max} = ursprüngliche maximale Rohrwanddicke

Unter der Annahme, dass die restliche Rohrwanddicke den Grenzwert der Dickenabnahme Δd bildet, kann die restliche Zeit ermittelt werden, bei welcher unter einer bestimmten Abtragungsgeschwindigkeit ω die restliche Wanddicke d aufgebraucht ist und die Rohrwand durchbrochen ist (Gleichung 12.2).

Restzeit bis zum Rohrwand-Durchbruch bei Flächenkorrosion:

$$t_{FK} = \frac{d}{\omega} \quad [Jahre] \quad \text{(Gleichung 12.2)}$$

mit t_{FK} = Restzeit bei Flächenkorrosion [Jahre]
 ω = Abtragungsgeschwindigkeit [mm/Jahr]
 d = Restwanddicke des Rohres [mm]

Die Massenverlustrate v und somit auch die Dickenabnahme Δd kann sehr unterschiedlich verlaufen. In DIN 50905 werden insbesondere für den Anfangszeitraum eines Korrosionsangriffs nichtlineare Verläufe der Masseverlustrate genannt, wie die integrale oder differentiale flächenbezogenen Masseverlustrate. Weiterhin wird angegeben, dass über einen längeren Zeitraum betrachtet (einige Wochen bis Jahre) sich der Verlauf der Masseverlustrate einem linearen Verlauf annähert. Ein linearer Verlauf der Masseverlustrate gestattet eine Extrapolation für die Dickenabnahme bei längerer Korrosionsdauer.

Bezüglich der Prognose der Dickenabnahme an metallischen Rohrwerkstoffen bei Korrosionsangriff wird im Rahmen der Arbeit festgelegt, dass der Zeitabschnitt der linearen Masseverlustrate bzw. Dickenabnahme bereits erreicht wurde, da die entsprechenden Rohre seit Jahren verlegt sind und ein Korrosionsangriff bereits begonnen hat. Sollte während der materialtechnischen Zustandsuntersuchungen an der Rohrprobe kein Korrosionsangriff festgestellt werden, erübrigen sich Betrachtungen zur Prognose des Zeitraums eines weiteren Korrosionsangriffs und der zugehörigen Dickenabnahme.

Diese eben erwähnten Festlegungen gelten im Rahmen der Arbeit für Flächenkorrosion ebenso wie für Mulden-, Narben- und Lochkorrosion und Graphitierung.

12.1.2 Muldenkorrosion

Im Unterschied zur Flächenkorrosion gibt es bei der Muldenkorrosion zwei Möglichkeiten der Dickenabnahme Δd . Unter der Annahme, dass sich die Muldenform bei einem weiteren Korrosionsverlauf nur radial zur Rohrachse ausdehnt, nämlich in Richtung Korrosionstiefe, wird nach DIN 50905 die sog. maximale Angriffstiefe l_{max} betrachtet (Abbildung 92) [179]. In diesem Fall vergrößert sich ungeachtet der Abtragungsrate nicht der Durchmesser DM der Muldenkorrosion sondern ausschließlich die Korrosionstiefe (hier l_{max}).

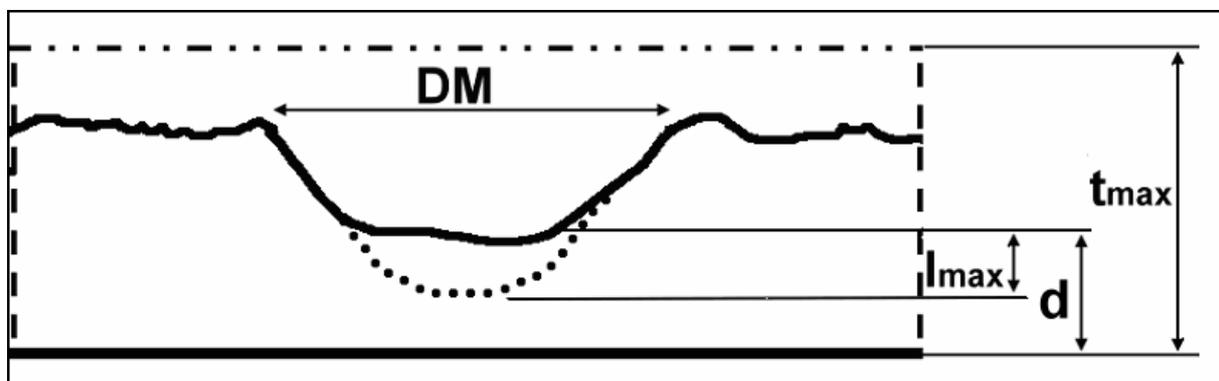


Abbildung 92: Skizzenhafte Darstellung des Angriffs der Rohrwand (Längsschnitt) bei Muldenkorrosion; d = restliche Wanddicke, t_{max} = ursprüngliche maximale Rohrwanddicke; DM = Durchmesser der Muldenkorrosion

Die auf l_{\max} bezogene Abtragungsrate oder auch Eindringgeschwindigkeit $\omega_{l_{\max}}$ wird bei der Berechnung der Restzeit des Korrosionsverlaufs verwendet (Gleichung 12.3).

Restzeit bis zum Rohrwand-Durchbruch bei Muldenkorrosion in Tiefenrichtung:

$$t_{MK} = \frac{d}{\omega_{l_{\max}}} \quad [\text{Jahre}] \quad (\text{Gleichung 12.3})$$

mit t_{MK} = Restzeit bei Muldenkorrosion [Jahre]
 $\omega_{l_{\max}}$ = Eindringgeschwindigkeit [mm/Jahr]
 d = Restwanddicke des Rohres [mm]

Die andere Möglichkeit zur Beschreibung der Abtragungsrate bzw. Abtragungsgeschwindigkeit bei Muldenkorrosion ist die mittlere Dickenabnahme $\Delta \bar{d}$. Sie bezieht sich auf die gesamte Oberfläche der Muldenkorrosion und verursacht neben einer Wanddickenabnahme auch eine Vergrößerung des Muldendurchmessers (Abbildung 93).

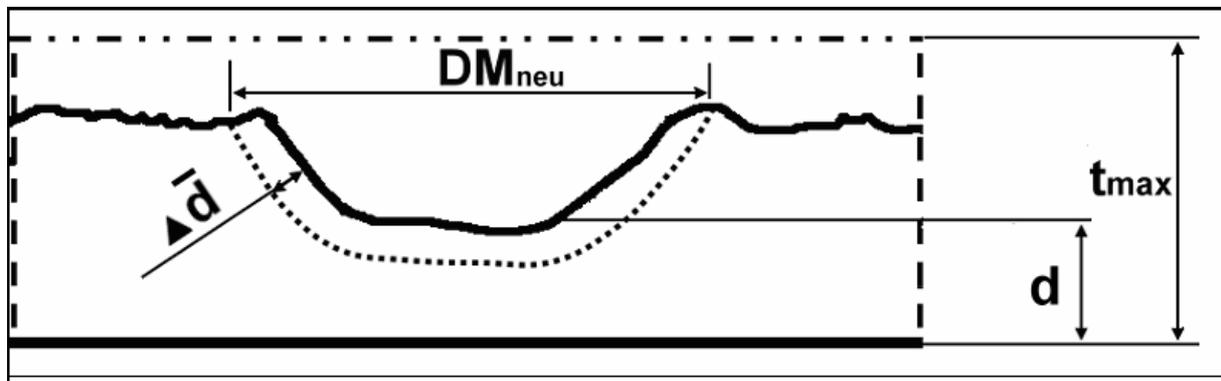


Abbildung 93: Skizzenhafte Darstellung des Angriffs der Rohrwand (Längsschnitt) bei Muldenkorrosion; d = restliche Wanddicke, t_{\max} = ursprüngliche maximale Rohrwanddicke; DM = Durchmesser der Muldenkorrosion

Für die mittlere Dickenabnahme $\Delta \bar{d}$ existieren im Rahmen der Untersuchungen zum technischen Zustand einer Rohrleitung zwei Grenzwerte. Einerseits ist das die Restzeit bis zum Rohrwand-Durchbruch analog der Flächenkorrosion (Gleichung 12.5) und andererseits die Begrenzung des Lochdurchmesser DM infolge der in Abschnitt 10.2 genannten Grenzbedingungen $DM \leq 15\text{mm}$ (Gleichung 12.4). Es wird angenommen, dass sich die Form der Muldenkorrosion bei ununterbrochenem und fortschreitendem Korrosionsverlauf in alle Richtungen gleich schnell ausweitet (Abbildung 93).

Bedingung zur Ermittlung der maximalen Restzeit bis zum Erreichen des Grenzdurchmessers ($DM = 15\text{mm}$) bei Muldenkorrosion:

$$DM_{neu} = DM + (2 \cdot \omega \cdot t) \quad [\text{max. } 15\text{mm}] \quad (\text{Gleichung 12.4})$$

mit DM = max. Durchmesser der Muldenkorrosion [mm]
 ω = Abtragungsgeschwindigkeit [mm/Jahr]
 t = Betrachtungszeitraum [Jahre]

Die Ermittlung der maximalen Restzeit nach (Gleichung 12.4) ist jedoch für weitere Betrachtungen im Rahmen der Arbeit unrelevant, da es bereits zu einem Wanddicken-Durchbruch bzw. zur Perforierung der Rohrwand durch Muldenkorrosion gekommen sein muss. Ist die Rohrwand durchbrochen, übt das ausströmende Wasser infolge von bspw. Kavitationskräften einen größeren Einfluss auf die Abtragsrate und somit der Vergrößerung des Lochdurchmessers aus. Gleiches gilt für Loch- und Narbenkorrosion. Weiterhin wird angenommen, dass im Falle einer Sanierung einer perforierten aber noch tragfähigen Leitung ($DM \leq 15 \text{ mm}$), z. B. mittels Zementmörtelauskleidung, eine weitere Vergrößerung des Lochdurchmessers gestoppt wird.

12.1.3 Loch- und Narbenkorrosion

Die Ermittlung der Restzeit bis zum Rohrwand-Durchbruch bei Loch- und Narbenkorrosion wird analog der Muldenkorrosion durchgeführt (Gleichung 12.5). Hier ist ebenfalls der Korrosionsfortschritt in Tiefenrichtung relevant (Abbildung 94 und Abbildung 95).

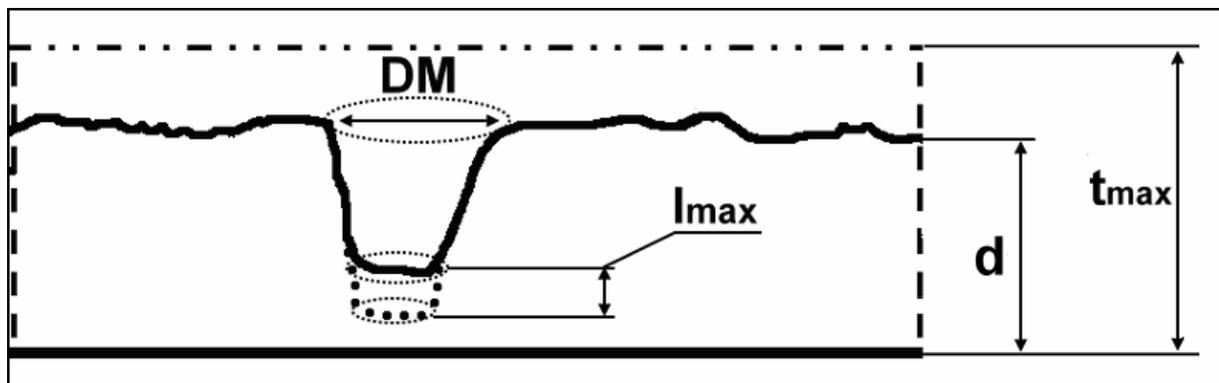


Abbildung 94: Skizzenhafte Darstellung des Angriffs der Rohrwand (Längsschnitt) bei Lochkorrosion; d = restliche Wanddicke, t_{\max} = ursprüngliche maximale Rohrwanddicke; DM = Durchmesser der Lochkorrosion

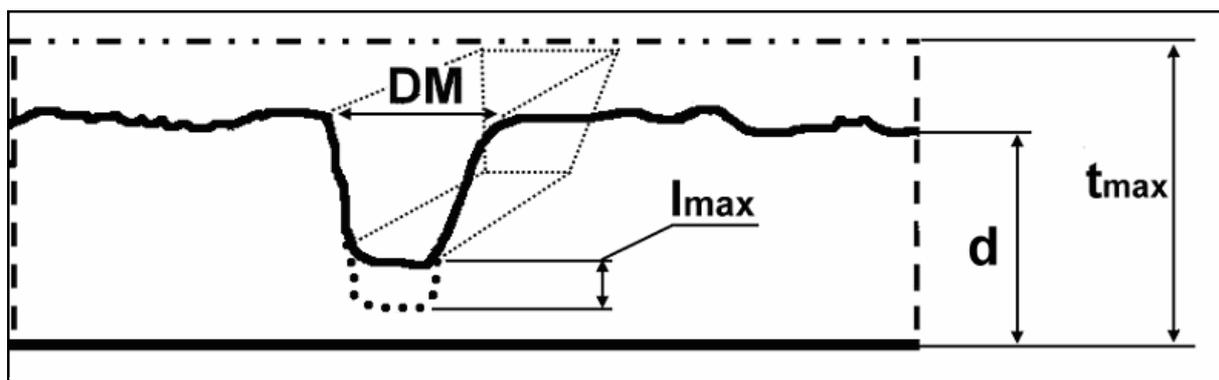


Abbildung 95: Skizzenhafte Darstellung des Angriffs der Rohrwand (Längsschnitt) bei Narbenkorrosion; d = restliche Wanddicke, t_{\max} = ursprüngliche maximale Rohrwanddicke; DM = hier Breite der Narbenkorrosion

Hinweis zu Abbildung 95: Entgegen den Beschreibungen in Abschnitt 8.3 wird als maximaler Korrosionsdurchmesser im Rahmen der Zustandsuntersuchungen bei Narbenkorrosion die maximale Narbenbreite gemessen.

Restzeit bis zum Rohrwand-Durchbruch bei Narbenkorrosion und unvollständiger Lochkorrosion in Tiefenrichtung:

$$t_{LK;NK} = \frac{d}{\omega_{lmax}} \quad [Jahre] \quad \text{(Gleichung 12.5)}$$

mit $t_{LK;NK}$ = Restzeit bei Loch- oder Narbenkorrosion [Jahre]
 ω_{lmax} = Eindringgeschwindigkeit [mm/Jahr]
 d = Restwanddicke des Rohres [mm]

12.1.4 Graphitierung

Die Graphitierung kann jede geometrische Erscheinungsform der anderen relevanten Korrosionsarten an Grau- und Duktulgussrohren annehmen. Da kein direkter Materialabtrag stattfindet sondern ein Graphitgerüst erhalten bleibt (siehe Abschnitt 4.7), wird die Dickenabnahme Δd in eine sog. Durchdringungstiefe und die Abtragungsrate in eine sog. Durchdringungsrate umbenannt.

Bei Graphitierung über die Rohrwanddicke bleibt aufgrund des zurückbleibenden Graphitgerüsts die Rohrleitung im Gegensatz zu den restlichen Korrosionsarten in Abhängigkeit von Betriebsdruck, Bettung (Stützwirkung) und Ausmaß der Graphitierung dicht. Da ein möglicher Wasseraustritt an graphitierten Stellen jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, werden zur Sicherheit eine Durchdringungsrate und die Restzeit bis Rohrwand-Durchbruch analog der Muldenkorrosion (siehe Abschnitt 12.1.2) angenommen.

12.2 Abtragungsgeschwindigkeit

Zunächst wird die Annahme getroffen, dass sich die Abtragungsraten für die relevanten Rohrwerkstoffe Grauguss, Duktiguss und Stahl sich nicht wesentlich unterscheiden [114]. Weitere Untersuchungen hierzu sind in Abschnitt 12.4 enthalten.

Die Korrosionswahrscheinlichkeit und somit auch die Abtragungsraten werden von zahlreichen Faktoren bestimmt, welche über die Länge eines Rohrleitungsabschnitts örtlich untereinander abweichen können. Aussagen zu Abtragungsraten und Korrosionsgeschwindigkeiten zu treffen, ohne den annähernden Einfluss der Faktoren aus Tabelle 4.15 zu kennen, sind mitunter spekulativ [39].

Über die Erfassungskriterien in DVGW-Arbeitsblatt GW 9; DIN 50929 oder DIN 50930 sind Aussagen zur Korrosionswahrscheinlichkeit und Korrosionsgeschwindigkeit möglich und sollen ergänzend zur materialtechnischen Zustandsuntersuchung und zur Prognose der technischen Nutzungsdauer genutzt werden (Abschnitt 12.2.1 bis Abschnitt 12.4) [13; 146; 176].

12.2.1 Festlegung der Abtragungsgeschwindigkeit bei fehlenden Untersuchungsergebnissen zur Bodenaggressivität

Um eine annähernde mittlere Abtragungsgeschwindigkeit für die einzelnen Korrosionsarten bei fehlenden Untersuchungsergebnissen zur Bodenaggressivität festlegen zu können, sollen die Angaben zur Korrosionsgeschwindigkeit in Tabelle 4.16 bis Tabelle 4.17 sowie die Richtwerte zur Abschätzung der mittleren Korrosionsgeschwindigkeit in DIN 50929 als Grundlage dienen [146].

Da die Angaben in Tabelle 4.18 und Tabelle 4.19 nach Böhm vergleichsweise aktuell sind und eine Unterscheidung in Abtragungsraten für die Rohrrinnen- und Rohraußenseite zulassen, werden diese in Kombination mit Tabelle 12.1 für weitere Betrachtungen angewendet.

Tabelle 12.1: Spezifischer Erdwiderstand verschiedener Bodenarten [180]

Bodenart	Spezifischer Erdwiderstand [$\Omega \cdot \text{Meter}$]
Lehm- und Tonboden, feuchter Kies	20 - 300
Feuchter Sandboden	200 - 600
Trockener Sandboden, trockener Kies	200 - 2.000
Steiniger Boden	300 - 8.000

Für einen in Bezug auf die Korrosionswahrscheinlichkeit ungünstigen Fall wird eine Verlegung der Rohre in bindigem Boden (Lehm- oder Tonboden) oder feuchtem, nicht bindigem Boden (z.B. feuchter Kies, witterungsabhängig) angenommen. Somit ergibt sich nach Tabelle 12.1 ein durchschnittlicher spezifischer Erdwiderstand von mindestens $20 \Omega \cdot \text{Meter}$.

Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass der pH-Wert des Bodens bei durchschnittlichen Verlegebedingungen im Bereich zwischen 5 und 9 liegt (vgl. Abbildung 66). Laut Tabelle 4.18 ergibt sich so ein Aggressivitätsgrad von 4 für das Maß der äußeren Korrosionsgefährdung. Das gleiche Maß wird für die innere Korrosionsgefährdung angewendet.

Zusätzlich wird festgelegt, dass sich die Abtragungsraten bzw. Korrosionsgeschwindigkeiten für die Korrosionsarten Loch- und Narbenkorrosion nicht unterscheiden (hohe Abtragungsgeschwindigkeit). Da nach Tabelle 4.14 bei Mulden- und Flächenkorrosion eine vergleichsweise geringe Korrosionsgeschwindigkeit besteht, werden die Abtragungsraten für diese beiden Korrosionsarten gleichgesetzt. Die maximale Eindringrate $\omega_{l,max}$ bei Muldenkorrosion (Abschnitt 12.1.2) entspricht deswegen der normalen Abtragsrate ω .

Tabelle 12.2: Festgelegte Abtragungsraten ω für die verschiedenen Korrosionsarten

Korrosionsart	Abtragsrate ω in [mm/Jahr]	
	außen	innen
Lochkorrosion	0,05	0,07
Narbenkorrosion	0,05	0,07
Muldenkorrosion	0,01	0,02
Flächenkorrosion	0,01	0,02

Die Korrektur der technischen Nutzungsdauer aufgrund örtlich schneller ablaufender Korrosionsvorgänge und aufgrund des Eintretens der in Abschnitt 10.2 erwähnten Grenzbedingung erfolgte unter Beachtung von (Gleichung 12.1) bis (Gleichung 12.5). Zusätzlich wurden die Angaben zur Abtragsrate aus Tabelle 12.2 für die im Rahmen der Arbeit untersuchten Rohrproben hinzugezogen.

Unter Beachtung der oben genannten Annahmen ergab sich nur für 9 % aller untersuchten, noch tragfähigen Rohrproben eine Verkürzung der restlichen technischen Lebensdauer aufgrund von Perforierung bei fortschreitender Korrosion. Die relevanten Korrosionsarten unterteilten sich bezüglich ihres Auftretens jeweils zur Hälfte auf die Rohrrinnen- und Rohraußenseite. Hierbei handelte es sich in einem Fall um Perforierung und Überschreitung der Grenzbedingung $DM < 15\text{mm}$ und in den restlichen Fällen um fortschreitende Lochkorrosion, welche demzufolge zu einem früheren Zeitpunkt zur Perforierung der Leitung führen kann als durch das Eintreten des Mindestzustands.

Für ausschließlich 9 % der untersuchten, noch tragfähigen Rohrproben (insgesamt 89 Proben) ergab sich unter Berücksichtigung einzelner Abtragungsraten je Korrosionsart eine Verbesserung der Aussagequalität bezüglich der Prognose der technischen Nutzungsdauer. Daraus wird geschlussfolgert, dass die Beurteilung der Bodenaggressivität und der zugehörigen Abtragsrate für die Prognose der technischen Nutzungsdauer nach dem Verfahren in Kapitel 10 nicht zwingend erforderlich ist.

12.2.2 Festlegung der Abtragungsgeschwindigkeit bei vorhandenen Untersuchungsergebnissen zur Bodenaggressivität

Im Falle vorhandener Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Korrektur der technischen Nutzungsdauer aufgrund örtlich schneller ablaufender Korrosionsvorgänge werden in DIN 50929 differenzierte Richtwerte zur Abschätzung der mittleren Korrosionsgeschwindigkeit bzw. Abtragsrate bezüglich der Rohraußenseite angegeben (Tabelle 12.3).

Die Angaben in Tabelle 4.19 enthalten zusätzlich differenzierte Richtwerte zur Abschätzung der mittleren Korrosionsgeschwindigkeit bzw. Abtragsrate bezüglich der Rohrrinnenseite.

Tabelle 12.3: Richtwerte zur Abschätzung der mittleren Korrosionsgeschwindigkeit bzw. Abtragsrate bezüglich der Rohraußenseite nach DIN 50929 [146]

Bewertungs- summenzahl	Abtragsrate	max. Eindringrate	Bemerkung
	ω [mm / Jahr]	$\omega_{l,max}$ [mm / Jahr]	
B₀- und B₁ –Werte			
≥ 0	0,005	0,03	zeitlich abnehmend
-1 bis -4	0,01	0,05	
-5 bis -10	0,02	0,2	
< -10	0,06	0,4	zeitlich konstant
B_E- und W_E-Werte			
≥ 0	0,01	0,05	örtlicher Korrosionsangriff überwiegt
-1 bis -4	0,02	0,1	
-5 bis -8	0,05	0,3	
< -8	0,2	1	
Bezugszeitraum	100 Jahre	30 Jahre	

12.2.3 Korrosionsversuche

Zur Überprüfung von Unterschieden der relativen Korrosionsgeschwindigkeit unter den einzelnen Rohrgenerationen wurden im Rahmen der Arbeit Korrosionsversuche und Untersuchungen nach DIN 50905 durchgeführt [178; 179]. Begriffe und Definitionen wurden gemäß DIN EN ISO 8044 und DIN 50900 verwendet [154; 188].

Dazu wurden pro Rohrgeneration jeweils zwei Rohrproben (Abbildung 96) mit den in Tabelle 12.4 und Tabelle 12.5 aufgelisteten Abmessungen einem Trinkwasser als Korrosionsmedium mit den in Tabelle 12.6 aufgeführten Parametern über eine Dauer von einem Jahr ausgesetzt. Das Korrosionsmedium und die Proben wurden dazu in einem luftdicht geschlossenen Behälter gegeben. Das Korrosionsmedium wurde nach jeweils fünf Tagen ausgetauscht. Die Kontrolle der Wasserparameter zu verschiedenen Zeitpunkten zeigte keine signifikanten Abweichungen.

Ein Teil der Rohrproben wurde mit einer 1 cm starken Schicht aus weit gestuftem Quarzsand bedeckt (min. Korndurchmesser 0,1 mm; max. Korndurchmesser 2,5 mm), der andere Teil der Proben wurde gleichmäßig vom Korrosionsmedium umgeben.

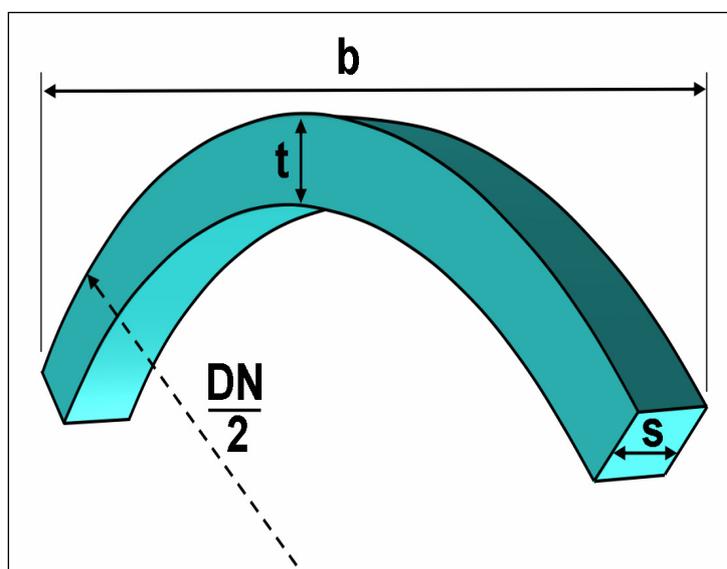


Abbildung 96:
Abmessungen der Rohrproben für
Korrosionsuntersuchungen

Tabelle 12.4: Abmessungen der für Korrosionsuntersuchungen verwendeten Rohrproben (Proben mit freier Umspülung)

Generation	Rohrdurchmesser	t	s	b	Probenoberfläche
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm ²]
GGL I	10	1,30	1,00	7,60	53,04
GGL II	12	1,10	0,80	11,80	61,77
GGL III	12	1,00	1,00	11,50	67,04
GGG I	10	0,75	0,75	8,50	38,90
GGG II	10	0,80	0,60	9,50	37,50
St II	11	1,20	0,35	9,30	38,48
St IIIa	10	1,70	0,35	8,00	43,91

Tabelle 12.5: Abmessungen der für Korrosionsuntersuchungen verwendeten Rohrproben (Proben mit Sandüberdeckung)

Generation	Rohrdurchmesser	t	s	b	Probenoberfläche
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm ²]
GGL I	10	0,80	0,80	8,30	40,74
GGL II	12	1,20	0,70	11,70	59,40
GGL III	12	0,70	1,00	11,50	60,44
GGG I	10	1,40	0,70	7,80	47,49
GGG II	9,8	0,90	0,70	9,60	42,78
St II	11	1,20	0,30	9,90	37,47
St IIIa	10	1,50	0,35	8,20	40,33

Tabelle 12.6: Parameter des Korrosionsmediums

Parameter	mittlerer Messwert	Einheit	Bestimmungsverfahren
Kupfer-Ionen	0,099	mg / l	Photometrie
Chlorid-Ionen (Konzentration c)	21,63 (0,61)	mg / l mol / m ³	Photometrie
Sulfat-Ionen (Konzentration c)	102,25 (1,06)	mg / l mol / m ³	Photometrie
Calcium-Ionen (Konzentration c)	61,0 (1,52)	mg / l mol / m ³	Titration
Magnesium-Ionen	10,0	mg / l	Titration
Sauerstoff (Konzentration c)	10,08 (10,08)	mg / l g / m ³	Titration
Leitfähigkeit	269	μS / cm	Elektrode
pH-Wert	7,3		Elektrode
Säurekapazität K _{S4,3}	3,0	mol / m ³	Titration

Anionen-Quotient nach (Gleichung 12.6); siehe Abschnittsende:

AQ = 0,91 < 1 → Verringerte Korrosionswahrscheinlichkeit nach DIN 50930
(keine ungleichmäßige Flächenkorrosion zu erwarten) [176]

Die Bildung korrosionshemmender Schutzschichten wird begünstigt, wenn folgende Bedingungen durch die Wasserparameter eingehalten werden [176]:

- Sauerstoffkonzentration $c(\text{O}_2)$ > 3 g / m³
- pH-Wert > 7,0
- Säurekapazität $K_{\text{S4,3}}$ > 2 mol / m³
- Konzentration an Calcium-Ionen $c(\text{Ca}^{2+})$ > 0,5 mol / m³

Die Wasserparameter in Tabelle 12.6 erfüllen diese Bedingungen zur Bildung korrosionshemmender Schutzschichten.

In Tabelle 12.7 und Tabelle 12.8 ist der Masseverlust, der flächenbezogene Masseverlust, die flächenbezogene Masseverlustrate (375 Tage) und die daraus resultierende integrale Abtragungsrate der einzelnen Rohrproben aufgelistet (Versuchsdauer = 375 Tage).

Tabelle 12.7: Korrosionsgrößen nach DIN 50905 (Proben mit freier Umspülung)

Generation	Masseverlust	flächen- bezogener Masseverlust	flächenbezogenen Masseverlustrate	integrale Abtragungsrate
	[%]	Δm in g / cm ²	v in g / cm ² h	ω_{int} in mm / Jahr
GGL I	10	0,166	0,000018392	0,222
GGL II	12	0,172	0,000019086	0,231
GGL III	12	0,144	0,000015955	0,193
GGG I	10	0,069	0,000007628	0,095
GGG II	10	0,140	0,000015541	0,193
St II	11	0,179	0,000019920	0,222
St IIIa	10	0,161	0,000017902	0,200

Tabelle 12.8: Korrosionsgrößen nach DIN 50905 (Proben mit Sandüberdeckung)

Generation	Masseverlust	flächen- bezogener Masseverlust	flächenbezogenen Masseverlustrate	integrale Abtragungsrate
	[%]	Δm in g / cm ²	v in g / cm ² h	ω_{int} in mm / Jahr
GGL I	10	0,106	0,000011751	0,142
GGL II	4	0,068	0,000007599	0,092
GGL III	4	0,063	0,000007019	0,085
GGG I	6	0,060	0,000006693	0,083
GGG II	5	0,066	0,000007328	0,091
St II	8	0,082	0,000009160	0,102
St IIIa	7	0,066	0,000007369	0,082

Die integrale Abtragungsrate ω_{int} lässt keine Extrapolation der Korrosionsgeschwindigkeit auf längere Zeiträume zu (dafür sind wenigstens zwei Messungen des flächenbezogenen Masseverlusts Δm zu unterschiedlichen Zeitpunkt notwendig). Dennoch ist eine qualitative Abschätzung der Unterschiede der Korrosionsgeschwindigkeiten zwischen den einzelnen Generationen und sandüberdeckten Rohrproben möglich. Die graphische Gegenüberstellung der ermittelten integralen Abtragungsrate zeigt Diagramm 57.

Alle Rohrproben wiesen nach Versuchende ebene Flächenkorrosion auf.

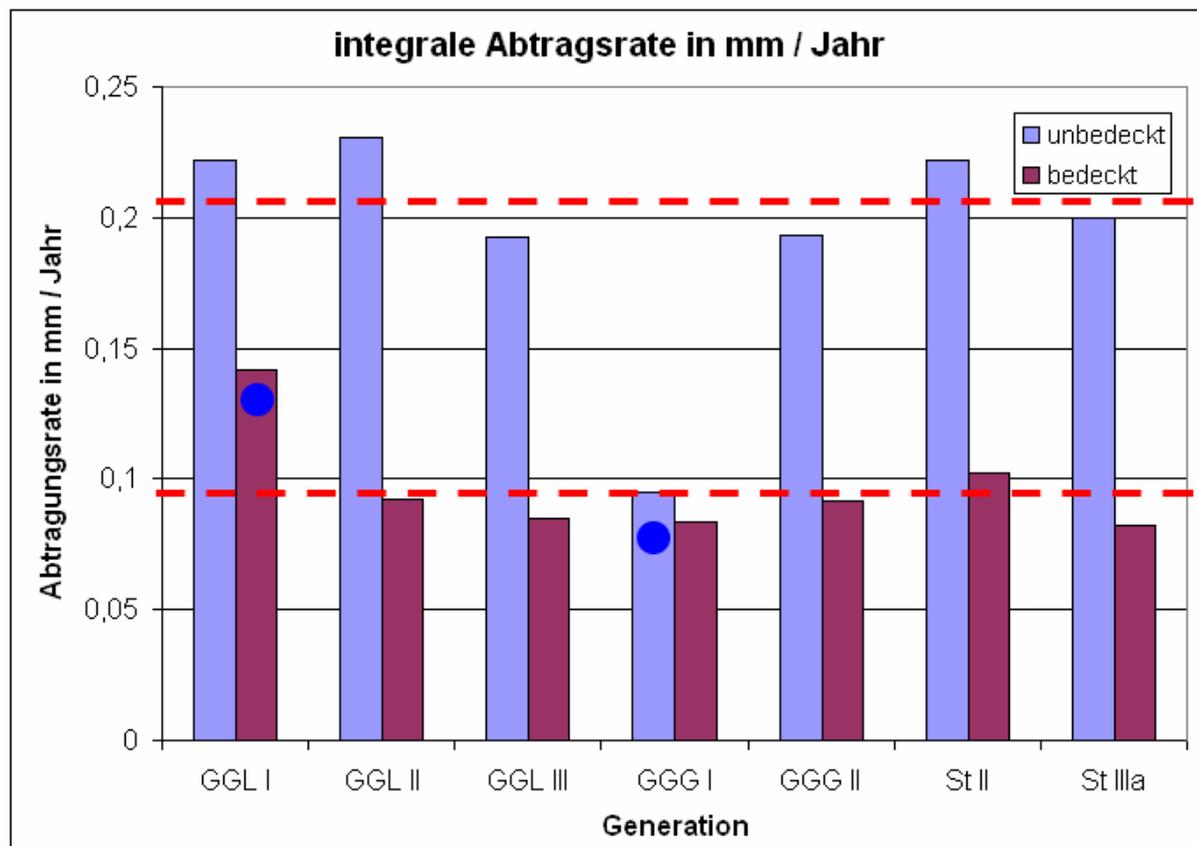


Diagramm 57: Integrale Abtragungsraten ω_{int} einzelner Rohrproben je Generation; durch Korrosionsversuche ermittelt

Bis auf die markierten Ausreißer in Diagramm 57 besitzen alle jeweiligen bedeckten (Quarzsand) und unbedeckten (freie Umspülung des Korrosionsmediums) Rohrproben eine annähernd gleiche integrale Abtragsrate. Die Aussagen über gleiche Korrosionsgeschwindigkeiten bei den Rohrwerkstoffen Grauguss, Duktulguss und Stahl werden unter den oben erwähnten Versuchsbedingungen bestätigt.

Des Weiteren zeigt die Darstellung in Diagramm 57 einen signifikanten Unterschied der integralen Abtragungsraten zwischen bedeckten und unbedeckten Rohrproben. Die integrale Abtragsrate unbedeckter Rohrproben ist ungefähr doppelt so hoch wie die integrale Abtragsrate bedeckter Rohrproben.

- mittlere integrale Abtragsrate aller Rohrproben: 0,21 mm / Jahr (unbedeckt)
Streuung: 0,017 mm / Jahr
- mittlere integrale Abtragsrate aller Rohrproben: 0,089 mm / Jahr (bedeckt)
Streuung: 0,0075 mm / Jahr

Die markierten Ausreißer in Diagramm 57 sind darauf zurückzuführen, dass die erwähnte Sandbedeckung beim Austausch des Korrosionsmediums verwirbelt wurde. Die zugehörigen Proben waren dadurch im Vergleich zu den restlichen Proben unverhältnismäßig mit mehr oder weniger Sand bedeckt.

Alle Gussrohrproben wiesen eine 0,5 – 1,0 mm starke Schicht aus Graphitierung und anhaftenden Korrosionsprodukten auf. An den Stahlrohrproben bildete sich eine 1,0 – 1,5 mm starke Schicht aus Korrosionsprodukten (Abbildung 97).



Abbildung 97: Schicht aus fest haftenden Korrosionsprodukten an einer Stahlrohrprobe nach einjährigem Korrosionsversuch

12.3 Ermittlung der Bodenaggressivität im Rahmen einer materialtechnischen Zustandsuntersuchung

Um mögliche Zusammenhänge zwischen Bodenaggressivität, Schädigungszahl SZ_R und SZ_K sowie der technischen Nutzungsdauer erkennen zu können, wurden Untersuchungen nach DVGW-Arbeitsblatt GW 9; DIN 50929 oder DIN EN 12501 an Bodenproben durchgeführt [13; 146; 175].

Die Bodenproben wurden im Bereich der Bergstellen bereits untersuchter Rohrproben entnommen, soweit dies nachträglich noch möglich war. Entnommen wurden jeweils zwei Proben á 3000 g des vorhandenen Bettungsmaterials der Altrohrleitung.

In Tabelle 12.9 sind die relevanten Beurteilungskriterien und die für eine Bestimmung zugehörigen Regelwerke aufgeführt.

Tabelle 12.9: Beurteilungskriterien zur Bestimmung der Bodenaggressivität [13]

Kriterium	Regelwerk / Quelle	Verfahren
Bodenart und Bindigkeit	DIN 18123 [181]	Nasssiebung
	Steinrath [46]	kohlige Bestandteile
spezifischer Bodenwiderstand	Steinrath; DIN 12501 [46; 175]	Bodenmesszelle
Wassergehalt	DIN 18121-1 [182]	Ofentrocknung
pH-Wert	DIN ISO 10390 [183]	im Eluat
Pufferkapazität	DIN 38409-7 [184]	Titration im Eluat
Sulfid-Gehalt	DIN 38405-26 [185]	photometrisch im Eluat
Neutralsalzgehalt	DIN 38405-1; DIN 38405-5 [187; 188]	photometrisch im Eluat
Sulfatgehalt	DIN 38405-5; [188]	photometrisch im Eluat
Lage des Objekts zum Grundwasser		Abschätzung ¹
Bodenhomogenität, horizontal		Abschätzung ²
Bodenhomogenität, vertikal		
Feststellung von Fremdkathoden		Abschätzung ³

Zu Tabelle 12.9:

- ¹ Entsprechend dem zugehörigen Probenbegleitschein lag der maximale Grundwasserspiegel bei allen untersuchten Rohrproben unterhalb der Rohrsohle.
- ² Eine Messung des horizontalen und vertikalen Bodenwiderstandsprofils nach dem sog. Wenner-Verfahren konnte im Rahmen der Untersuchungen aufgrund der Oberflächenbefestigung (Asphalt; Beton) nicht erfolgen. Das Bodenwiderstandsprofil wird als annähernd homogen eingestuft.
- ³ Eine Messung des Objekt-Bodenpotenzials zur Feststellung von Fremdkathoden konnten aus oben genannten Gründen nicht durchgeführt werden. Für eine weitere Beurteilung der Bodenaggressivität wurde deswegen pauschal der Wert der Zustandsziffer Z12 von -3 festgelegt [13].

Die Bestimmung des spezifischen Bodenwiderstands erfolgte in einer sog. Bodenmesszelle oder auch Soil Box nach Vorgaben von Steinrath [46]. Die Messung wurde an der erdfeuchten Bodenprobe durchgeführt. Die Bodenprobe wurde so gut als möglich verdichtet, um die natürliche Lagerungsdichte (siehe Abschnitt 10.1.3) nachzubilden. Der Formfaktor der Bodenmesszelle betrug $f = 5 \text{ cm}$ [177].

In Tabelle 12.10 sind die augenscheinliche Zuordnung zur Bodenart der untersuchten Bodenproben und die festgestellten abschlämmbaren Bestandteile dargestellt.

Tabelle 12.10: Auflistung von Bodenart und Anteil abschlämmbarer Bestandteile der untersuchten Bodenproben

Bodenprobe	Bodenart (augenscheinlich)	Anteil abschlämmbarer Bestandteile ($< 0,063 \text{ mm}$)
		Masse-%
13	bindig	62
23	nicht bindig	12
24-1	bindig	49
24-2	gemischtkörnig	8
25	nicht bindig	25
26	nicht bindig	14
29	gemischtkörnig	44
30	bindig	69
31	gemischtkörnig	38
56	gemischtkörnig	85
60	gemischtkörnig	19
91	nicht bindig	12
107	bindig	72
108	nicht bindig	9
131	gemischtkörnig	20

Die Verteilung des gemessenen spezifischen Bodenwiderstands (Bodenmesszelle) der untersuchten Bodenproben zeigt Diagramm 58. Hierbei handelt es sich um den Mittelwert zweier Proben.

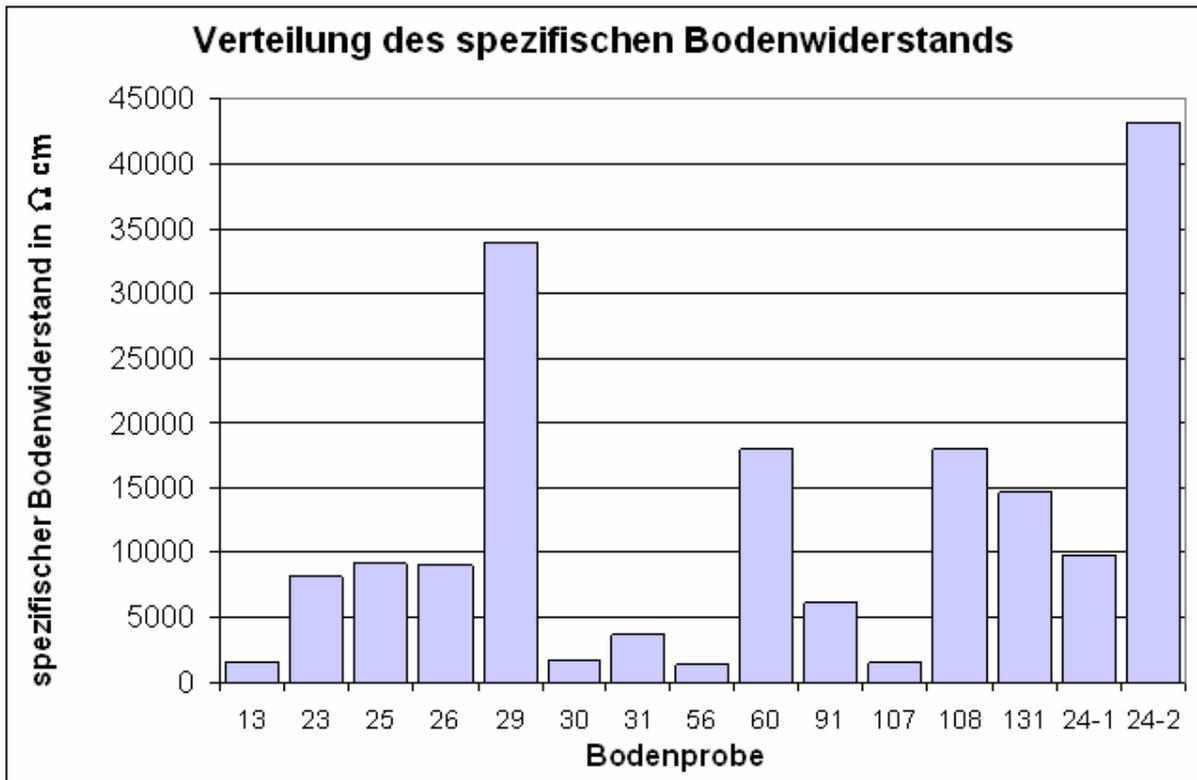


Diagramm 58: Spezifischer Bodenwiderstand der jeweiligen untersuchten Bodenproben (Bodenproben erdfeucht)

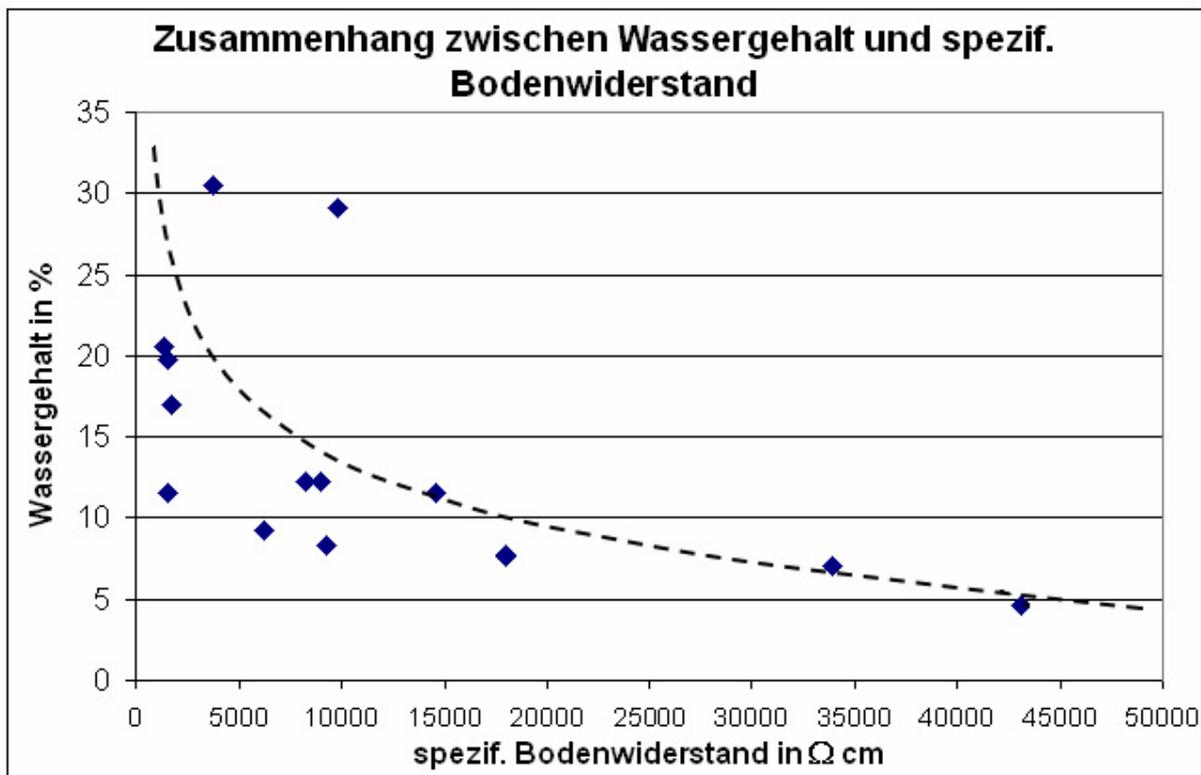


Diagramm 59: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und spezifischem Bodenwiderstand (natürlicher Wassergehalt = erdfeucht); aufgrund der großen Streuung nicht näher quantifiziert

In Diagramm 59 ist ein direkter Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und dem spezifischen Bodenwiderstand der Bodenproben zu erkennen. Ein niedriger Wassergehalt führt erwartungsgemäß zu einem höheren spezifischen Bodenwiderstand. Da es sich bei allen Bodenproben um Entnahmestellen an Rohrleitungsabschnitten mit befestigter und wasserundurchlässiger Oberfläche handelt, wird davon ausgegangen, dass der Wassergehalt der Bodenproben keinen relevanten witterungsbedingten Schwankungen unterliegt. Ausströmendes Trinkwasser aus einer Schadensstelle erhöht zwar den Wassergehalt zeitnah entnommener Bodenproben, diese Erhöhung soll aber keinen signifikanten Einfluss auf die Bodenaggressivität ausüben [148]. Die Beurteilung der Aggressivität und Korrosionswahrscheinlichkeit der nach DVGW-Arbeitsblatt GW 9 vergebenen Bewertungszahlen für die einzelnen Bodenproben zeigt Tabelle 12.12.

Tabelle 12.11: Auflistung von Bodenart und Anteil abschlämmbarer Bestandteile der untersuchten Bodenproben

Boden- probe	Boden- aggressivität	Korrosionswahrscheinlichkeit			
		Mulden- und Lochkorrosion (Narbenkorrosion)		Flächenkorrosion	
		freie Korrosion	bei Element- bildung*	freie Korrosion	bei Element- bildung*
13	aggressiv	mittel	sehr hoch	gering	erhöht
23	nicht aggressiv	sehr gering	mittel	sehr gering	sehr gering
24-1	nicht aggressiv	sehr gering	mittel	sehr gering	sehr gering
24-2	nicht aggressiv	sehr gering	mittel	sehr gering	sehr gering
25	nicht aggressiv	sehr gering	mittel	sehr gering	sehr gering
26	aggressiv	mittel	sehr hoch	gering	erhöht
29	aggressiv	mittel	sehr hoch	gering	erhöht
30	aggressiv	mittel	sehr hoch	gering	erhöht
31	nicht aggressiv	sehr gering	mittel	sehr gering	sehr gering
56	nicht aggressiv	sehr gering	mittel	sehr gering	sehr gering
60	stark aggressiv	hoch	sehr hoch	mittel	erhöht
91	nicht aggressiv	sehr gering	gering	sehr gering	sehr gering
107	nicht aggressiv	sehr gering	mittel	sehr gering	sehr gering
108	schwach aggressiv	gering	mittel	sehr gering	sehr gering
131	nicht aggressiv	sehr gering	gering	sehr gering	sehr gering

* Fremdkathoden

Die Überprüfung eines sichtbaren Zusammenhangs zwischen der Bodenaggressivität bzw. Korrosionswahrscheinlichkeit und den Schädigungszahlen SZ_R und SZ_{Ka} erfolgt über die Darstellungen in Diagramm 60 und Diagramm 61. Für eine differenziertere Darstellung wurden die Bewertungsziffern der einzelnen Bodenproben genutzt. Je niedriger der Wert einer Ziffer ist, umso höher ist die Bodenaggressivität und Korrosionswahrscheinlichkeit.

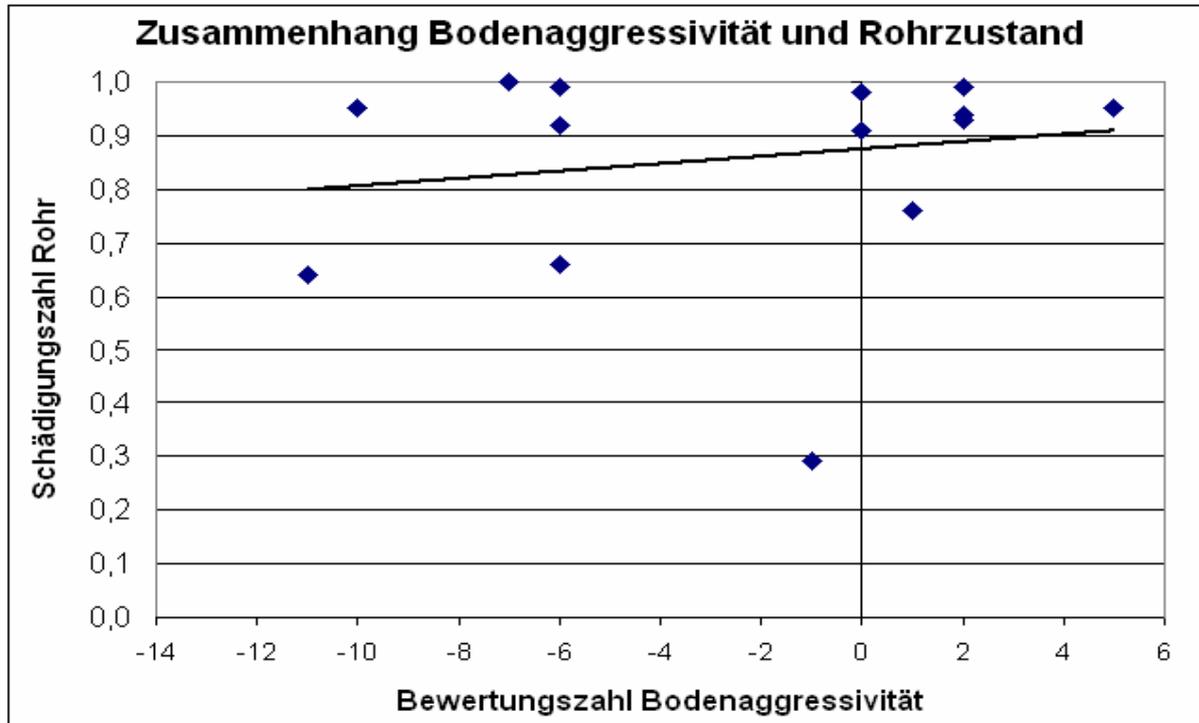


Diagramm 60: Zusammenhang zwischen Bodenaggressivität und der Schädigungszahl Rohr SZ_R

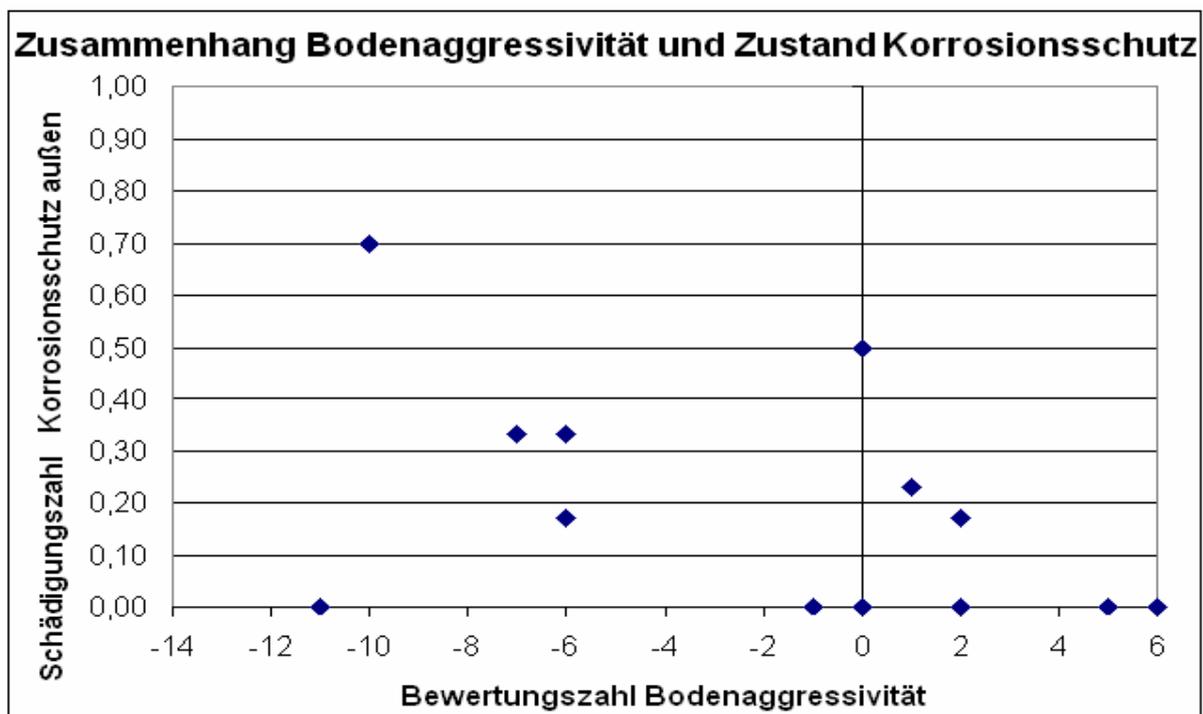


Diagramm 61: Zusammenhang zwischen Bodenaggressivität und der Schädigungszahl Korrosionsschutz außen SZ_K

Die Aussagekraft von Diagramm 60 und Diagramm 61 ist relativ gering. Die zur jeweiligen Bodenprobe gehörigen Rohrproben waren zum größten Teil Graugussrohre und wiesen Graphitierung an der Innenseite als dominierende Korrosionsart auf (siehe Tabelle 12.12). Die Beurteilung der Bodenaggressivität und Korrosionswahrscheinlichkeit ist nicht auf Innenkorrosion übertragbar. Nur zwei von 13 Proben zeigten eine dominierende Außenkorrosionsart. Auf dieser Grundlage sind keine weiteren Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Schädigungszahl SZ_R bzw. SZ_K und Bodenaggressivität bzw. Korrosionswahrscheinlichkeit im Rahmen der Arbeit durchführbar.

Tabelle 12.12: Dominierende Korrosionsarten an zur Bodenprobe zugehörigen Rohrproben

Boden- probe	Rohr- probe	Generation	dominierende Korrosionsart	SZ_R	SZ_{Ka}	Bewertungs- summenzahl*	
						$B_0; B_1$	B_E
13	10/01	GGL IIa	Graphitierung Innen	0,99	0,33	-6	-9
23	4/02	GGL II	Graphitierung Innen	0,98	0,00	0	-3
24-1	5/02	St IIIa	Flächenkorrosion Innen	0,29	0,00	-1	-3
24-2	5/02	St IIIa	Flächenkorrosion Innen	0,29	0,00	6	3
25	4/03	GGL II	Graphitierung Innen	0,94	0,17	2	-1
26	7/02	GGL II	Lochkorrosion Außen	0,93	0,00	2	-1
29	10/02	GGL II	Narbenkorrosion Innen	0,99	0,00	2	-1
30	11/02	GGL I	Graphitierung Innen	0,92	0,33	-6	-9
31	12/02	GGL II	Graphitierung Innen	1,00	0,33	-7	-9
56	8/03	GGL III	Graphitierung Innen	0,95	0,70	-10	-13
60	12/03	GGL II	Graphitierung Innen	0,76	0,23	1	-2
91	S20	GGL II	Flächenkorrosion Außen	0,91	0,50	0	-3
107	S33	GGL IIa	Graphitierung Innen	0,64	0,00	-11	-14
108	S34	GGL II	Graphitierung Innen	0,95	0,00	5	2
131	S35	GGL III	Graphitierung Außen	0,99	0,00	2	-1
X	14/01	GGL II	Graphitierung Innen	0,66	0,17	-6	-9

* aus der Beurteilung der Bodenaggressivität bzw. Korrosionswahrscheinlichkeit [13]

Trotz des hier fehlenden Zusammenhangs zwischen Schädigungszahl SZ_R bzw. SZ_K und Bodenaggressivität bzw. Korrosionswahrscheinlichkeit sind die Ergebnisse der Beurteilung nach DVGW-Arbeitsblatt GW 9 für eine Prognose der technischen Nutzungsdauer nach dem in Kapitel 11 behandelten Verfahren nutzbar.

Die in Tabelle 12.2 festgelegten Abtragungsgeschwindigkeiten werden durch die Werte in Tabelle 12.3 für eine verbesserte Prognose abgeglichen.

Für die in Tabelle 12.12 gezeigten Rohrproben mit z. B. dominierender Außenkorrosion ergeben sich folgende, möglicherweise veränderte Abtragungsraten [13]:

Probe 7/02:

- $B_0 = 2 \rightarrow$ Abtragsrate ω = 0,005 mm / Jahr
max. Eindringrate $\omega_{l,max}$ = 0,03 mm / Jahr
- $B_E = -1 \rightarrow$ Abtragsrate ω = 0,02 mm / Jahr
max. Eindringrate $\omega_{l,max}$ = 0,1 mm / Jahr

Probe S20:

- $B_0 = 0 \rightarrow$ Abtragsrate ω = 0,005 mm / Jahr
max. Eindringrate $\omega_{l,max}$ = 0,03 mm / Jahr
- $B_E = -3 \rightarrow$ Abtragsrate ω = 0,02 mm / Jahr
max. Eindringrate $\omega_{l,max}$ = 0,1 mm / Jahr

Beispiel zur Verdeutlichung

Untersuchungsergebnisse:

- Stahlrohr Generation IIIa (Produktion und Verlegung zu DDR-Zeiten)
- mittlere statistische Restlebensdauer (Diagramm 7): 11 Jahre (Ausfall ~ 2016)
- technische Restlebensdauer nach Kapitel 11: 21 Jahre (Ausfall ~ 2026)
- Bewertungszahl der zugehörigen Bodenprobe: $B_E = -5$ (ungünstiger Fall)
- zugehörige Abtragsrate ω (Tabelle 12.3) 0,05 mm / Jahr
- zugehörige max. Eindringrate $\omega_{l,max}$ 0,3 mm / Jahr
- max. Wanddicke: 5,0 mm
- Korrosionstiefe Korrosionsart 1 außen: 2,5 mm
(Flächenkorrosion)
- Korrosionstiefe Korrosionsart 2 außen: 1,0 mm
(Lochkorrosion)

Zwischenergebnisse:

- Restzeit bis Wanddurchbruch Korrosionsart 1: 50 Jahre $((5-2,5)/0,05)$
 - Restzeit bis Wanddurchbruch Korrosionsart 2: 13 Jahre $((5-1)/0,3)$
 - maßgebende Restzeit bis Wanddurchbruch: 13 Jahre
- \rightarrow Begrenzung der technischen Nutzungsdauer aufgrund Wasserverluste durch Perforierung (Sanierung weiterhin noch möglich): ~ 2018

Die Berücksichtigung der Beurteilungsergebnisse von Bodenuntersuchungen nach DVGW-Arbeitsblatt GW 9 ergänzt die Prognose der technischen Nutzungsdauer. Während bei der Prognose der technischen Nutzungsdauer nach dem in Kapitel 11 erläuterten Verfahren von einem Versagen der Tragfähigkeit bzw. Stabilität des entsprechenden Rohrleitungsabschnitts ausgegangen wird (siehe Grenzbedingungen in Abschnitt 11.2), wird über die Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeiten bzw. Abtragungsraten der Zeitpunkt neuer Perforierungen bestimmt (verbunden mit Wasserverlusten). Dadurch ist die Abschätzung der Verlängerung der technischen Nutzungsdauer aufgrund von Sanierungsmaßnahmen wie der Zementmörtelauskleidung möglich, wenn angenommen wird, dass ein weiterer Korrosionsfortschritt und eine Vergrößerung des Lochdurchmessers bei Perforierung ($DM > 15 \text{ mm}$) unterbunden wird.

Für das oben gezeigte Beispiel bedeutet das, dass bei Sanierung des zugehörigen Rohrleitungsabschnitts die prognostizierte technische Restnutzungsdauer von 21 Jahren bei Unterbindung bzw. Überbrückung von Perforierungen ($DM < 15 \text{ mm}$) mit hoher Wahrscheinlichkeit erreicht wird.

12.4 Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit bei innerer Korrosionsbelastung durch Trinkwasser

Eine Abstimmung der Abtragungsrate und der max. Eindringgeschwindigkeit über die Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit für Innenkorrosion nach DIN 50930 ist nicht möglich, da hier keine Abtragungsraten entsprechend der Korrosionswahrscheinlichkeit explizit genannt werden [160]. Bei Kenntnis der zugehörigen Trinkwasserparameter ist eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit der Bildung korrosionshemmender Deckschichten (Innen) möglich (Gleichung 12.6).

Anionenquotient AQ zur Beurteilung der korrosionschemischen Beschaffenheit des Wassers für eine Deckschichtbildung an der Rohrrinnenwand (korrosionshemmend) nach DIN 50930 [176; 186]:

$$AQ = \frac{c(Cl^-) + 2 \cdot c(SO_4^{2-})}{K_{S4,3}} \quad [-] \quad \text{(Gleichung 12.6)}$$

mit $c(Cl^-)$ = Konzentration an Chlorid-Ionen [mol/m^3]
 $c(SO_4^{2-})$ = Konzentration an Sulfat-Ionen [mol/m^3]
 $K_{S4,3}$ = Säurekapazität bis pH 4,3 [mol/m^3]

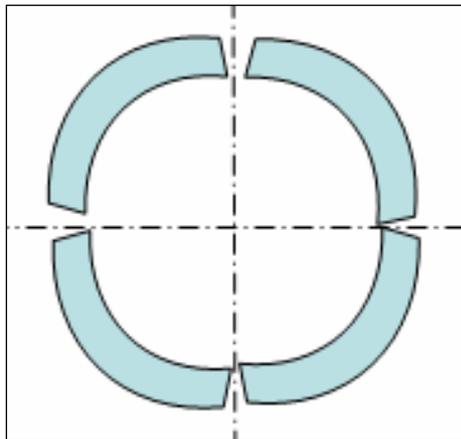
Ein Wert $AQ < 1$ bietet günstige Bedingungen für die Bildung von Deckschichten.

Die in DVGW-Arbeitsblatt GW 9, DIN 50929 oder DIN 50930 enthaltenen Kriterien zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit sind als Trendaussagen zu verstehen. Diese Trendaussagen werden mittels der sog. Korrosionsdiagnostik präzisiert (siehe auch Abschnitt 1.3.4). Eine aussagekräftige Korrosionsdiagnostik, z. B. als Ergänzung und Präzisierung der Prognose der technischen Nutzungsdauer nach dem hier vorgestellten Verfahren, sollte im Allgemeinen nicht ohne fachliche Kompetenz durchgeführt werden [42].

13. Beurteilung der Querbruchgefahr von Graugussrohren

Die Darstellungen in Diagramm 11 zeigen, dass abgesehen von der Schadensart Korrosion die zweithäufigste Schadensart Querbrüche an Graugussrohren sind. Graugussrohre (mit Lamellengraphit) versagen aufgrund ihrer spröden Werkstoffeigenschaften (siehe Abschnitt 4.2). Ursachen sind durch Korrosion geschwächte Rohrquerschnitte und / oder zu hohe Belastungen durch fehlerhafte (punktförmige) Bettung oder ungleichmäßige Setzungen im Baugrund. Diese Belastungen führen zur überhöhten Längsbiegespannungen im Rohrquerschnitt. Da Graugussrohre aufgrund ihrer spröden Werkstoffeigenschaften nur eine begrenzte Zugfestigkeit bzw. Biegezugfestigkeit aufweisen (siehe Kapitel 9), führen diese Belastungen zu Querbrüchen.

Über die Tragfähigkeitsberechnungen nach ATV A 127 ist die Gefahr von Querbrüchen aufgrund von Längsbiegung nicht erfassbar. Die Berechnungsalgorithmen setzen eine vollständige Auflagerung der Leitung in Längsrichtung voraus und lassen die Berechnung von Spannungen aufgrund von Belastungen in Querrichtung (quer zur Rohrachse, Leitung als Ring) zu [11]. Das Bruchbild eines spröden Graugussrohres bei Überschreitung der zulässigen Spannungen bei Belastung quer zur Rohrachse entspricht der Darstellung in Abbildung 98.



Das Bruchbild bei Überschreitung der zulässigen Spannungen bei Belastung längs zur Rohrachse (Leitung als Stab) entspricht dagegen der Darstellung in Abbildung 99.

Abbildung 98:
Bruchbild bei übermäßiger Belastung quer zur Rohrachse; ideale Bruchstellen in den Viertelpunkten (Scheitel, Kämpfer, Sohle)

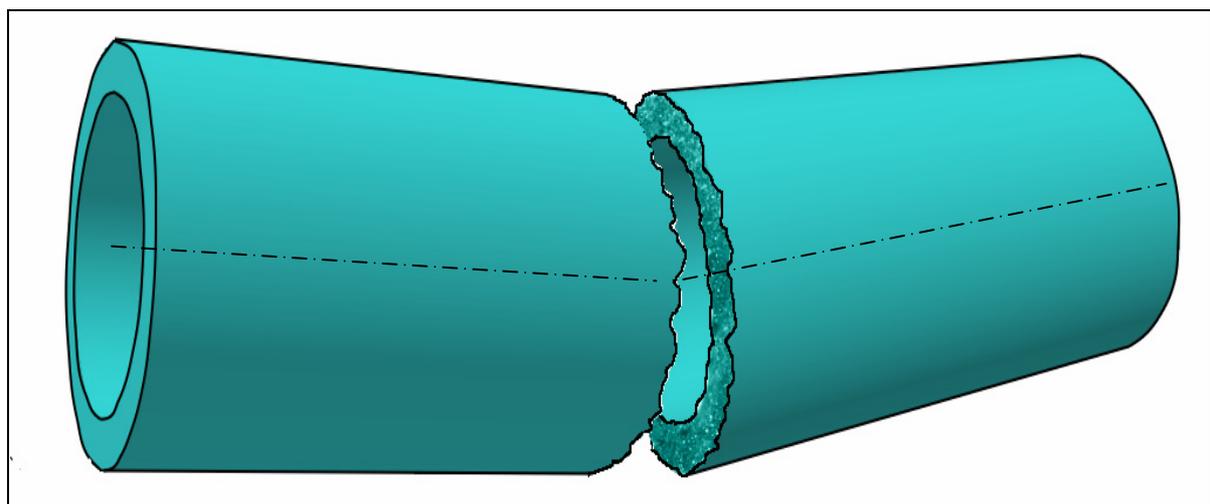


Abbildung 99: Bruchbild bei übermäßiger Belastung längs zur Rohrachse; Querbruch

Die Abschätzung der Gefahr von Querbrüchen durch Längsbiegung muss dementsprechend über andere Berechnungsansätze erfolgen.

13.1 Auswahl eines passenden statischen Modells

Zunächst soll ein passendes statisches Modell zur Berechnung der Längsbiegemomente gefunden werden.

Das relativ einfache Stabmodell „Träger auf zwei Stützen“ (Abbildung 100) mit einem maximalen Feldmoment von:

$$M_{\text{vorh}} = \frac{q_v \cdot l^2}{8} \quad [kNm] \quad \text{(Gleichung 13.1)}$$

entspricht nicht den realen Bedingungen der Rohrauflagerung und ergibt zu dem zu ungünstige Werte. Erst ab einer Nennweite von ca. DN 350 besitzen Graugussrohre ein entsprechend hohes Widerstandsmoment, um hier nicht gegen Bruch zu versagen (bei einer üblichen Rohrlieferlänge nach TGL 14389 von 4 Metern und unter Annahme einer gelenkigen Lagerung in den Muffen [131]).

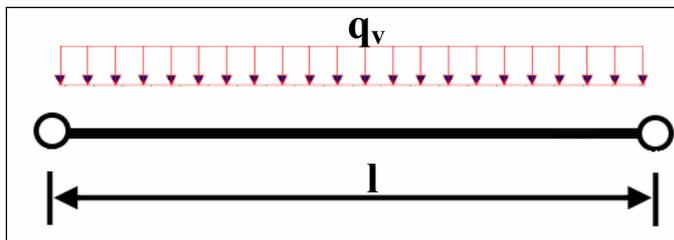


Abbildung 100:
Stabmodell „Träger auf zwei Stützen“

Um die real vorhandenen (auch ungünstigen) Bettungsbedingungen erdverlegter Graugussrohre so gut als möglich zu berücksichtigen, wird ein Stabmodell gewählt, in dem die zunächst vollflächige und quasielastische Bettung des Rohres berücksichtigt wird. Das Graugussrohr selbst soll als sog. schubsteifer Balken angenommen werden.

Ein geeignetes Stabmodell hierfür ist der elastisch gebettete Stab (mit einer Bettungskonstante k) mit zunächst unendlicher Länge und über die Länge konstanten Werkstoff-, Last- und Bettungseigenschaften (Abbildung 101). Die Belastungen sind in einer vertikalen Gleichlast q_v berücksichtigt. Die Ermittlung der zugehörigen Bettungskonstante k ist in Abschnitt 13.2 erläutert.

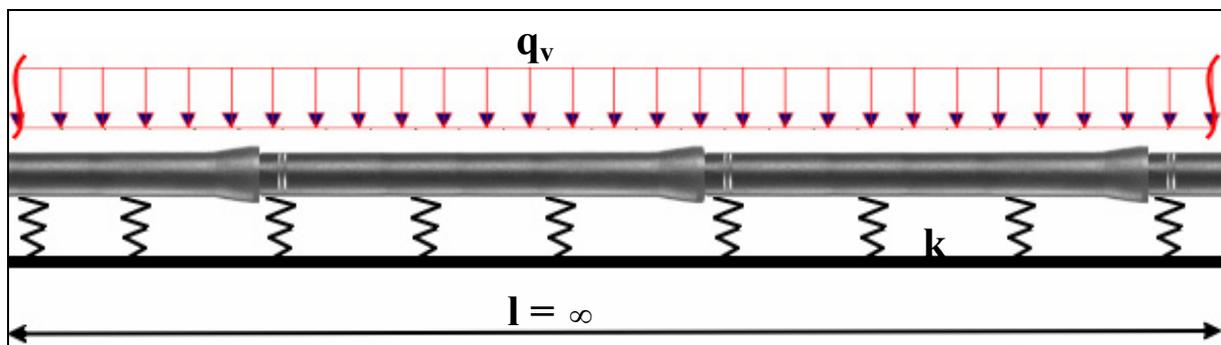


Abbildung 101: elastisch gebetteter Stab (Rohr) mit beidseitig unendlicher Länge

Bei einem störungsfrei elastisch gebetteten Stab (hier das Rohr) mit ausschließlich vorhandener vertikaler Gleichlast q_v tendieren die Längsbiegemomente und Querkräfte aufgrund der über die Länge gleichmäßigen Setzungen gegen Null. Daher erfolgt die Berechnung relevanter Biegespannungen nach ATV A 127 ausschließlich am

Ringquerschnitt. Erst bei einer Störung wie z.B. Aufgrabungen, punktförmige Belastung oder punktförmiger Lagerung (Abbildung 102) vergrößern sich die Längsbiegemomente und Querkräfte. Deshalb sollen diese beiden Fälle (punktförmige Belastung, „freie“ Auflagerung) in den folgenden Teilabschnitten näher behandelt werden (Abschnitt 13.3 und Abschnitt 13.4).

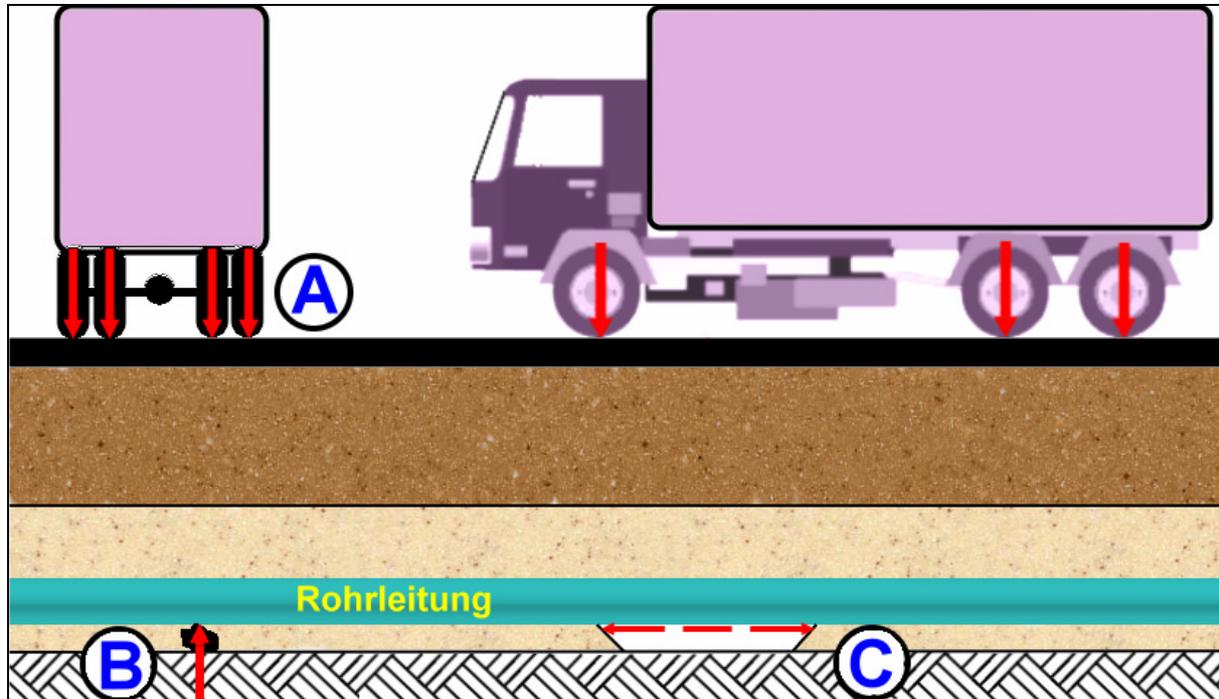


Abbildung 102: Skizzenhafte Darstellung außergewöhnlicher Belastungen an einer Graugussrohrleitung, welche zu Längsbiegespannungen führen können;
 A = übermäßige Einzel-Verkehrslasten;
 B = Einzellasten aus punktförmiger Belastung (z.B. Stein als Auflager);
 C = fehlendes Auflager durch fehlerhafte Bettung

Weitere Gefährdungsbereiche für außergewöhnliche Belastungen an Rohrleitungen, die vor allem durch Baumaßnahmen in Rohrleitungsnähe entstehen, sind in DVGW-Merkblatt W 380 dargestellt [159].

Die Ermittlung der vertikalen Gleichlast q_v aus Erd- und Verkehrslasten soll über die Algorithmen nach ATV A 127 erfolgen, da hier Lastkonzentrationen und ein zusammenhängendes Boden-Rohr-System bereits berücksichtigt werden. Für die Durchführung weiterer Berechnungen zu Längsbiegespannungen an Graugussrohren werden Anteile aus übermäßiger Verkehrsbelastung nicht weiter berücksichtigt. Die Lastanteile aus Schwerverkehr sind im Berechnungsalgorithmus bereits enthalten, etwaige kurzzeitige Lasterhöhung deckt der in den Algorithmus enthaltene sog. Stoßbeiwert ab [11].

Weiterhin wird angenommen, dass es sich innerhalb weiterer Berechnungen bei allen gewöhnlichen und außergewöhnlichen Lasten um vorwiegend statische Belastungen handelt. Der anstehende Boden unterhalb der Rohrbettung (E_4 , siehe Abschnitt 10.1.3) hat im Übrigen aufgrund langjähriger Konsolidierung der Rohrleitungstrasse keine Auswirkung auf das restliche Setzungsverhalten.

Bei der nach ATV A 127 ermittelten vertikalen Gleichlast q_v handelt es sich um eine Flächenlast, die bei Berechnung der Tragfähigkeit erdverlegter Rohre quer zur Rohrachse (Rohr als Ring, Abbildung 98) über eine Rohrlänge von einem Meter in eine Linienlast umgewandelt wird.

Im Falle der Berechnung der Tragfähigkeit längs zur Rohrachse (Rohr als Stab; Abbildung 99) wird die vertikale Gleichlast auf den äußeren Rohrdurchmesser bezogen, um so eine für weitere Berechnungen notwendige Linienlast zu erhalten (Abbildung 103).

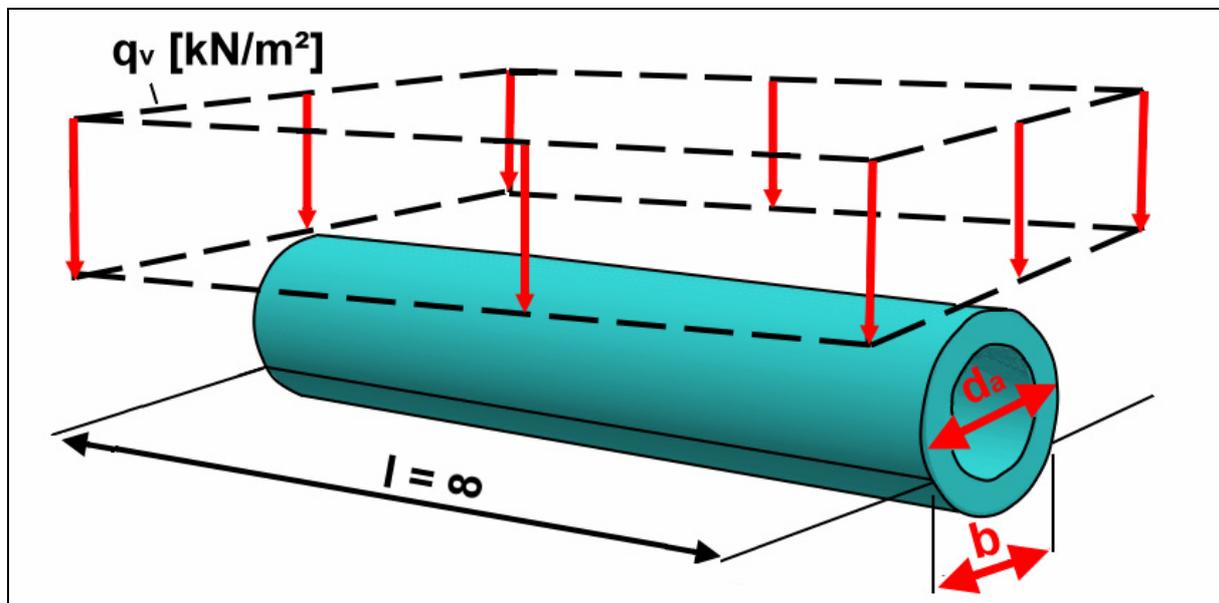


Abbildung 103: Umlagerung der vertikalen Gleichlast (Flächenlast) q_v über den Rohraussendurchmesser d_a zu einer Linienlast

13.2 Ermittlung der Bettungskonstante k

Zur Berechnung von Schnittkräften bzw. Spannungen an einem elastisch gebetteten Stab ist die Bettungskonstante k notwendig, welche die elastische Nachgiebigkeit des Rohraufagers berücksichtigt. Des Weiteren ist die Bettungskonstante k das Produkt aus der sog. mittleren Bettungsziffer und Rohrbreite bzw. Rohrauflegerbreite. Die Rohrauflegerbreite b berechnet sich zu:

$$b = d_a \cdot \sin\left(\frac{2\alpha}{2}\right) \quad [m] \quad \text{(Gleichung 13.2)}$$

mit: d_a = Rohraußendurchmesser [m]
 2α = Auflagerwinkel nach ATV A 127; üblicherweise = 60°

Die mittlere Bettungsziffer $k_{s,m}$ oder auch mittlerer Bettungsmodul ist nach DIN 4018 zu ermitteln [189]:

$$k_{s,m} = \frac{\sigma_{0,m}}{s_m} \quad [kN / m^3] \quad \text{(Gleichung 13.3)}$$

mit: $\sigma_{0,m}$ = mittlere Sohldruckpressung [kN/m²]
 s_m = mittlere Setzung [m]

Die mittlere Sohldruckpressung ist in diesem Fall der vertikalen Gleichlast q_v (umgelagert über Rohraußendurchmesser d_a und über die Rohrauflagerbreite b) und dem Rohreigengewicht bzw. Wasserfüllung gleichzusetzen. Eine günstig wirkende Aushubentlastung wird vernachlässigt. Somit ergibt sich die mittlere Sohlspannung (das Rohr kann wie ein Streifenfundament mit unendlicher Länge betrachtet werden) zu:

$$\sigma_{0,m} = \frac{q_v \cdot d_a + \gamma_{Rohr} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_a^2 - d_i^2) + \gamma_w \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2}{b} \quad [kN/m^2] \quad \text{(Gleichung 13.4)}$$

mit: q_v = vertikale Gleichlast [kN/m²]
 d_a = äußerer Rohrdurchmesser [m]
 d_i = innerer Rohrdurchmesser [m]
 b = Rohrauflagerbreite [m] (Gleichung 13.2)
 γ_{Rohr} = Wichte des Rohres (Grauguss: $\gamma = 71,5$ kN/m³)
 γ_w = Wichte von Wasser (Wasserfüllung; $\gamma_w = 10,0$ kN/m³)

Zur Vereinfachung weiterer Rechnungen wird die vertikale Gleichlast durch Erdlast- und Verkehrslast, durch Rohreigengewicht und durch Wasserfüllung zu einer Gesamtlast q' zusammengefasst:

$$q' = q_v \cdot d_a + \gamma_{Rohr} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_a^2 - d_i^2) + \gamma_w \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \quad [kN/m] \quad \text{(Gleichung 13.14)}$$

Die mittlere Setzung errechnet sich entsprechend DIN 4019 [190]:

$$s_m = \kappa \cdot \frac{\sigma_{0,m} \cdot b \cdot f}{E_s} \quad [m] \quad \text{(Gleichung 13.5)}$$

mit: κ = Korrekturbeiwert für die Bodenart [191]
 für Sand und Schluff: $\kappa = 2/3$
 für einfach verdichteten und leicht überverdichteten Ton: $\kappa = 1$
 für stark überverdichteten Ton: $\kappa = 0,5 - 1$
 b = Rohrauflagerbreite (Gleichung 13.2)
 E_s = Steifemodul des Rohrauflegers (E_{20}) [kN/m²]
 Es wird angenommen, dass der anstehende Boden unter dem Rohrauflager keinen Einfluss auf die Bettungsziffer ausübt.
 f = Setzungsbeiwert nach KANY [191]

Annahmen für Setzungsbeiwert f :

- a / b entspricht hier l / b ; da $l = \infty \rightarrow f$ für $a / b > 10$
 (Verhältnis Rohrlänge zu Rohrauflagerbreite)
- z / b entspricht hier der Dicke der setzungsverursachenden Schicht (Dicke des Rohrauflegers) im Verhältnis zur Rohrauflagerbreite; Annahme: $z = 0,10$ m
 $\rightarrow f$ für z / b

Unter Vernachlässigung einer günstig wirkenden Aushubentlastung kürzt sich die Sohlspannung $\sigma_{0,m}$ aus (Gleichung 13.3) heraus. So ergibt sich eine vereinfachte Gleichung zur Berechnung des mittleren Bettungsmoduls:

$$k_{s,m} = \frac{E_s}{b \cdot f \cdot \kappa} \quad [kN / m^3] \quad \text{(Gleichung 13.6)}$$

Anhaltswerte für den Steifemodul E_s [192]:

- Kies, rein: 10,00 - 20,00 kN/cm²
- Sand, rein: 1,00 - 10,00 kN/cm²
- Schluff: 0,30 - 1,50 kN/cm²
- Ton: 0,10 - 6,00 kN/cm²
- Torf: 0,01 - 0,10 kN/cm²

Der in Abschnitt 10.1.3 angegebene Verformungsmodul E_B (hier E_{20} der Leitungszone) ist als weiterer Anhaltswert für den Steifemodul E_s heranzuziehen. Ein niedriger Wert von E_s entspricht hier einem ungünstigeren Fall.

Anhaltswerte für den mittleren Bettungsmodul (entspricht der mittleren Bettungsziffer) [193]:

- Grober Kiessandboden: 0,15 - 0,20 kN/cm³
- Feiner Kiessandboden: 0,08 - 0,10 kN/cm³
- Lehmboden, trocken: 0,06 - 0,08 kN/cm³
- Lehmboden, nass: 0,02 - 0,03 kN/cm³

Beispielhafte Ermittlung des mittleren Bettungsmoduls für ein querbruchgefährdetes Graugussrohr DN 80:

- Außendurchmesser d_a : 0,089 m
- Innendurchmesser d_i : 0,080 m
- Rohrauflagerbreite b : 0,0445 m (Gleichung 13.2)
- Steifemodul E_s : 8 N/mm² (aus Abschnitt 10.1.3) = 8000 kN/m²
- alternativ Steifemodul E_s : 1,5 kN/m² [192]
- Setzungsbeiwert f : 0,9655
(gewählt für $a / b > 10$ und $z / b = 2,2$ [191])
- Korrekturbeiwert κ : 1 [191]
- Bettungsmodul $k_{s,m}$: 186000 kN/m³ = 0,186 kN/cm³ bzw.
34900 kN/m³ = 0,0349 kN/cm³ (alternativ)

Ein Vergleich mit den entsprechenden Anhaltswerten zeigt, dass der Bettungsmodul einem mittelfeinen Kiessandboden entsprechen würde und der alternative Bettungsmodul in etwa feuchtem Lehmboden [193]. Der ungünstigere Wert ist in diesem Fall der alternative Bettungsmodul. Dieser sollte für weitere Berechnungen eingesetzt werden. Ein geringerer Bettungsmodul führt zu höheren Längsbiegespannungen. Die Bettungskonstante k ergibt sich somit zu:

$$k = k_{s,m} \cdot b \quad [kN / m^2] \quad \text{(Gleichung 13.7)}$$

13.3 Berechnung der Biegemomente aus Längsbiegung bei punktförmiger Auflagerung

Punktförmige Auflager (wie etwa Steine) entstehen an Graugussleitungen z. B. bei unsachgemäßer Ausführung des Rohraufagers / Bettung. Um das statische Model des elastisch gebetteten Stabes mit unendlicher Länge auf diesen Fall abzustimmen, wurden folgenden Annahmen getroffen:

- das punktförmige Auflager ist wie ein unverschiebliches Auflager trotz möglicher Einsenkung in die restliche Bettung bzw. ins anstehende Erdreich anzusehen (ungünstiger Fall)
- die Verhältnisse am Schnittufer über der punktförmigen Auflagerung entsprechen in der Realität eher einer elastischen Einspannung, zur Vereinfachung der Berechnungen wird jedoch eine feste Einspannung angenommen (ungünstiger Fall)

Das festgelegte System entspricht somit dem sog. 4. Lagerungsfall mit unendlicher Stablänge.

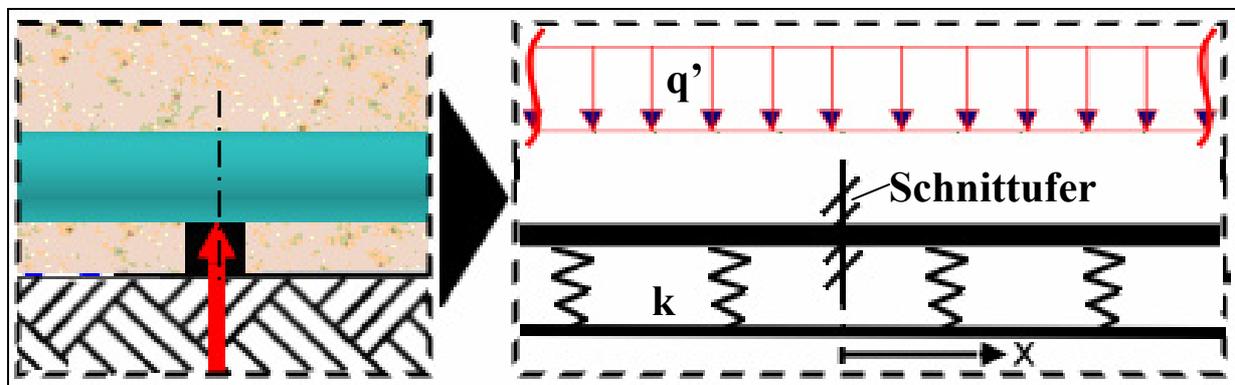


Abbildung 104: Angepasstes statisches System zur Berechnung von Momenten bei punktförmiger Auflagerung einer Rohrleitung

Alle Schnittgrößen am Schnittufer werden ausschließlich durch die vertikale Gesamtlast q' verursacht und haben hier ihren Maximalwert (an der Stelle $x = 0$).

Als Hilfwert wird zusätzlich eine sog. elastische Länge λ benötigt, die sich nach folgender Gleichung berechnet:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{4EI}{10^9 \cdot k}} \quad [m] \quad \text{(Gleichung 13.8)}$$

mit: E = E-Modul des Rohrwerkstoffs [N/mm^2];
 für Grauguss = 100.000 N/mm^2 (Anhaltswert; siehe auch Tabelle 9.7)
 I = Trägheitsmoment der Kreisringfläche des Rohres [mm^4]
 k = Bettungskonstante [kN/m^3]

Das maximale Moment am Schnittufer für den sog. 4. Lagerungsfall mit dem zusätzlichen Sonderfall der unendlichen Stablänge und ausschließlicher Gleichlast wird wie folgt berechnet [170]:

$$M_{\max} = -0,5 \cdot q' \cdot \lambda^2 \quad [kNm] \quad (\text{Gleichung 13.9})$$

mit: q' = vertikale Gesamtlastlast [kN/m]
 λ = Hilfwert nach (Gleichung 13.8) [m]

Zusätzlich lässt sich eine maximale Querkraft Q_{\max} am Schnittufer (Abbildung 104) errechnen:

$$Q_{\max} = q' \cdot \lambda \quad [kN] \quad (\text{Gleichung 13.10})$$

Mithilfe von M_{\max} nach (Gleichung 13.10) lässt sich die Längsbiegespannung ermitteln (Abschnitt 13.5).

13.4 Berechnung der Biegemomente aus Längsbiegung bei teilweise fehlender Auflagerung / Bettung

Unter Umständen, z. B. bei Unterspülungen, kann der Rohrstrang auf einer bestimmten Teillänge freiliegen, so dass in diesem Bereich keine elastische Bettung mehr vorhanden ist und größere Biege- bzw. auch Einspannmoment entstehen (Punkt C in Abbildung 105). Das statische Ersatzsystem hierfür sieht folgendermaßen aus:

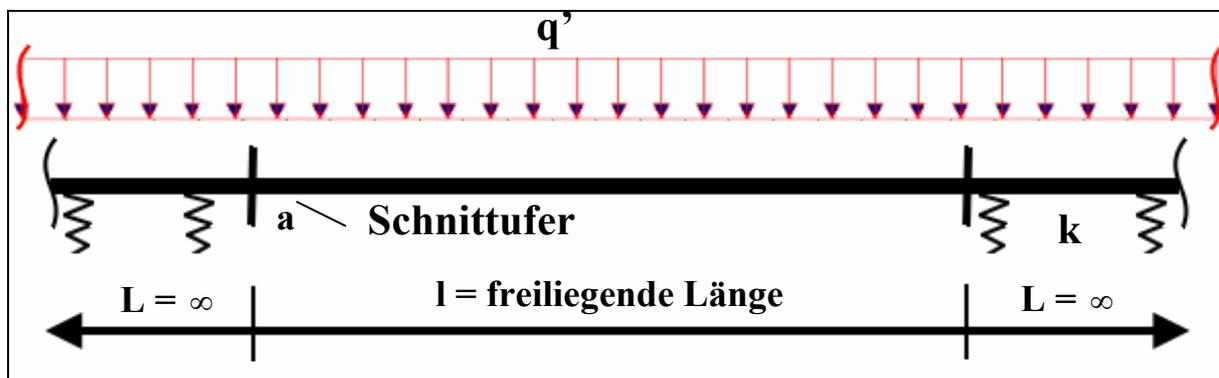


Abbildung 105: Statisches Ersatzsystem einer Rohrleitung mit teilweise freiliegender Länge infolge fehlenden Auflagers

Das oben gezeigte symmetrische System wird als beidseitig eingespannter Träger betrachtet. Am Schnittufer (Punkt a) wird ähnlich Abbildung 104 trotz einer elastischen Bettung / Einspannung eine volle Einspannung angenommen.

Das gesamte Stabsystem unterliegt bei konstanten Querschnitts-, Bettungs- und Belastungsbedingungen einer gleichmäßigen Setzung bzw. Verschiebung ω_{\max} (Gleichung 13.11).

Das Rohr besitzt eine relativ hohe Steifigkeit, so dass trotz des freiliegender Abschnitts (freiliegende Länge) keine Verschiebungs- bzw. Setzungsunterschiede $\Delta\omega$ zu ω_{\max} verursacht werden. Deshalb entstehen keine zusätzlichen Momente und Querkräfte. Momente und

Querkräfte am Schnittufer (Punkt a in Abbildung 105) werden ausschließlich durch die vertikale Gleichlast über der freiliegenden Länge verursacht (Gleichung 13.12).

Die Verschiebung ω_{\max} (oder auch Setzung) errechnet sich für einen elastisch gebetteten Stab mit unendlicher Länge und ausschließlich vertikaler Gleichlast zu:

$$\omega_{\max} = \frac{q'}{k} \quad [m] \quad \text{(Gleichung 13.11)}$$

mit: q' = vertikale Gesamtlastlast [kN/m]
 k = Bettungskonstante [kN/m²]

Die Verschiebung ω_{\max} entspricht bei Verwendung gleicher Eingangswerte der mittleren Setzung s_m nach (Gleichung 13.5).

Das maximale Moment (hier Einspannmoment im Punkt a) errechnet sich zu:

$$M_{\max} = -\frac{q' \cdot l^2}{12} \quad [kNm] \quad \text{(Gleichung 13.12)}$$

mit: q' = vertikale Gesamtlastlast [kN/m]
 l = freiliegende Länge [m]

Durch Umstellung ergibt sich die Gleichung zur Ermittlung der kritischen freiliegenden Länge l , ab der die zulässige Biegespannung (siehe Abschnitt 13.5) überschritten wird und das Rohr bricht:

$$l_{\text{krit}} = \sqrt{\left| \frac{12 \cdot \sigma_{\text{zul}} \cdot W}{10^6 \cdot q'} \right|} \quad [m] \quad \text{(Gleichung 13.13)}$$

mit: σ_{zul} = zulässige Längsbiegespannung des Rohrwerkstoffs [N/mm²]; (Abschnitt 13.5)
 W = Widerstandsmoments der Kreisringfläche des Rohres [mm³]
 q' = vertikale Gesamtlastlast [kN/m]

Sollte das Auflager von Graugussrohren z. B. durch Wasserverluste weggespült werden, ist ab der kritischen Länge l_{krit} mit erhöhter Querbruchgefahr zu rechnen. Jedoch fehlt es in der Literatur an Anhaltswerten zur Abschätzung weggespülter Erdmassen in Abhängigkeit von Wasseraustritt, Zeit und weiterer Parameter.

13.5 Nachweis der Tragfähigkeit erdverlegter Graugussrohre bei Längsbiegebeanspruchung

An einem Kreisringquerschnitt verursachen die einwirkenden Belastungen (Kapitel 10) verschiedene Spannungen mit unterschiedlichen Wirkungsrichtungen (Abbildung 106). Maßgebende Spannungen sind die Umfangsspannung σ_φ und die Längsspannung σ_x . Spannungen in Radialrichtung (σ_r) sind aufgrund ihrer sehr geringen Beträge zu vernachlässigen. Die Berechnungen der Umfangsspannung σ_φ (Rohr als Ring) erfolgt über die Algorithmen nach ATV A 127. Mögliche Spannungen in Längsrichtung (Rohr als Stab) können bspw. in Form von Längsbiegespannung $\sigma_{\text{vorh}} \sigma_{\text{LBZ}}$ nach den in Abschnitt 13.3 und

Abschnitt 13.4 gezeigten Verfahren ermittelt werden. Beide Spannungsarten können gleichzeitig auftreten und müssten zur Ermittlung einer Vergleichsspannung normalerweise überlagert werden (bei elastisch verformbaren Werkstoffen).

Da Grauguss jedoch ein spröder Werkstoff ist (keine Plastifizierung, also keine große Verformungen vor dem Bruch), ist hier die Normalspannungshypothese zur Ermittlung einer Vergleichsspannung anwendbar. Das heißt, dass allein die betragsmäßig höchste Normalspannung bzw. maximale Hauptspannung (σ_φ oder σ_x) für weitere Berechnungen maßgebend ist. Weitere Annahmen unter Voraussetzung der Normalspannungshypothese zur Berechnung der Vergleichsspannung am Rohrring-Segment sind:

- keine Schubspannungen in den Hauptebenen ($\tau = 0$)
- die Normalspannungen (z. B. σ_φ und σ_x sind extrem) = Hauptspannungen
- im dreiachsigen (räumlichen) Zustand σ_{III} : alle drei Hauptspannungen ungleich 0
- zweiachsiger (ebener) Zustand σ_{II} : eine Hauptspannung = 0
- einachsiger Zustand σ_I : zwei Hauptspannungen = 0

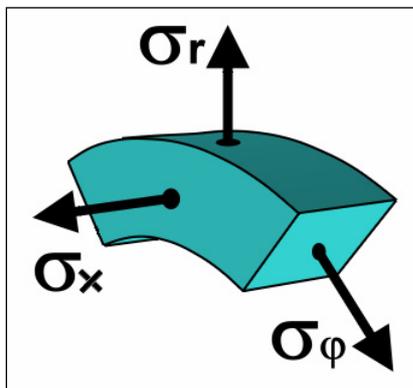


Abbildung 106:
Räumlicher Spannungszustand (Hauptspannungen) im Rohrring-Segment

Da wie oben erwähnt, die Spannungen in Radialrichtung (σ_r) und die Schubspannungen (τ) gegen null tendieren ist zunächst eine Vergleichsspannung σ_V für einen zweiachsigen (ebenen) Zustand (σ_{II}) anzunehmen. Die Vergleichsspannung für den ebenen Spannungszustand errechnet sich unter Vernachlässigung der Schubspannungsanteile zu:

$$\sigma_{V,II} = 0,5 \cdot \left[(\sigma_\varphi + \sigma_x) + \sqrt{(\sigma_\varphi - \sigma_x)^2} \right] \quad \text{(Gleichung 13.17)}$$

Unter Vernachlässigung der Schubspannungsanteile τ (spröder Werkstoff) ist der höchste Wert der Vergleichsspannung σ_V nach (Gleichung 13.17) gleich der maximalen Normalspannung. Die relevante Vergleichsspannung σ_V ist demzufolge der maximalen Normalspannung (Zug) gleichzusetzen. In dem oben erwähnten Fall trifft dies für die Spannungen in Längsrichtung σ_x zu (größere Spannungen in Längsrichtung als in Ringrichtung bei ungleichmäßig gebetteten Rohren mit relativ kleiner Nennweite):

$$\max \sigma_V = \sigma_x$$

Die Spannung in Längsrichtung σ_x ist zur Vereinfachung der Rechenwege der Zugspannung bzw. dem Rechenwert der Längsbiegespannung $z_{ul} \sigma_{LBZ}$ gleichzusetzen.

Die vorhandene Spannung $\text{vorh}\sigma_{\text{LBZ}}$ infolge Längsbiegung über punktförmigem Auflager errechnet sich aus dem vorhandenen Biegemoment (Gleichung 13.9) und dem Widerstandsmoment der Kreisringfläche des Rohres:

$$\text{vorh}\sigma_{\text{LBZ}} = \frac{\max M \cdot 10^6}{W} \quad [N/mm^2] \quad \text{(Gleichung 13.16)}$$

mit: $\max M$ nach (Gleichung 13.9) [kNm]
 W = Widerstandsmoment der Kreisringfläche [mm³]

Der Nachweis erfolgt vereinfacht mit dem Vergleich von aufnehmbarer (zulässiger) Spannung zu vorhandener Längsbiegespannung. Als zulässige Längsbiegespannung wird die Zugspannung (= Rechenwert der Biegezugfestigkeit) von Graugussrohren mit 2,2-facher Sicherheit (siehe Tabelle 10.1) eingesetzt.

$$\frac{\text{zul}\sigma_{\text{LBZ}}}{\text{vorh}\sigma_{\text{LBZ}}} \geq \gamma \quad [-] \quad \text{(Gleichung 13.15)}$$

mit: $\text{zul}\sigma_{\text{LBZ}}$ = Rechenwert der Biegezugfestigkeit (Tabelle 9.7)
 $\text{vorh}\sigma_{\text{LBZ}}$ = vorhandene Längsbiegespannung infolge Biegemoment
 γ = Sicherheitsbeiwert; z. B. 2,2 nach Tabelle 10.1, jedoch ungünstig

Bei Überschreitung des zulässigen Sicherheitsbeiwertes γ besteht für das zugehörige Graugussrohr eine erhöhte Querbruchgefahr, da punktförmige Auflager infolge unsachgemäßer Ausführung der Rohrbettung nicht auszuschließen sind.

In Diagramm 62 sind die vorhandenen Sicherheiten für die einzelnen Graugussrohr-Generationen in abhängig der Nennweite dargestellt. Die Berechnung erfolgte unter den in Abschnitt 10.1 genannten (ungünstigen) Verlegebedingungen, den in Tabelle 9.7 genannten Festigkeitswerten und der in Tabelle 10.3 genannten jeweiligen (noch tragfähigen) Mindestwanddicke.

Um beispielsweise eine Sicherheit gegen Querbruch nach oben genannten Kriterien von wenigstens $\gamma \geq 1$ zu erhalten, müsste die Wanddicke von Graugussrohren der ersten Generation der Nennweitenklasse DN 80 mindestens 18 mm betragen. Das heißt, dass auch bei eventuell vorhandenen größeren Wanddicken als der tragfähigeren Mindestwanddicke nach Tabelle 10.3 eine erhöhte Querbruchgefahr unter ungünstigen Verlegebedingungen (Abschnitt 10.1) besteht.

Tabelle 13.1: Besonders gefährdete Nennweitenklassen in Abhängigkeit der Generation und bei Annahme einer einfachen Sicherheit gegen Querbruch

Generation	Nennweitenbereich
GGL I	< DN 250
GGL II	< DN 200
GGL III	< DN 150
GGL IIa	< DN 175

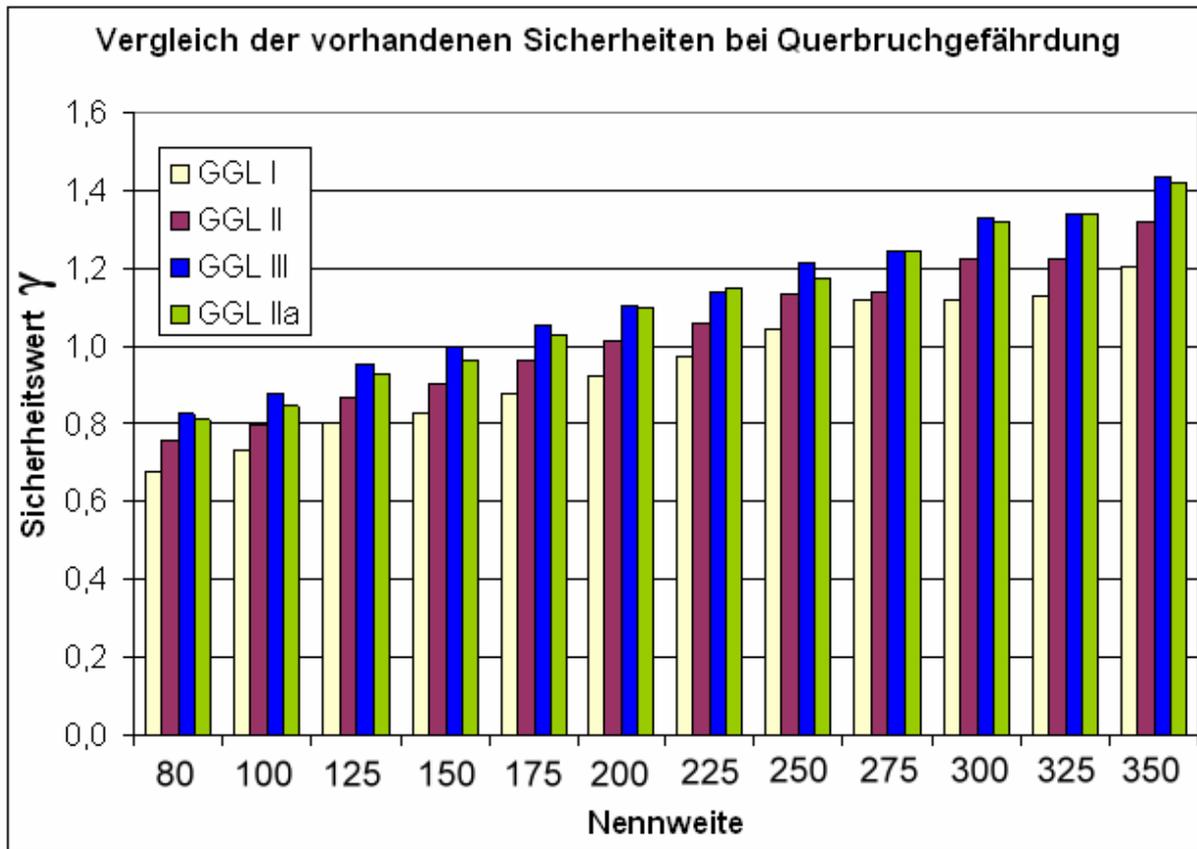


Diagramm 62: Gegenüberstellung der vorhandenen Sicherheiten gegen Querbruch bei punktförmiger Auflagerung eines Graugussrohres in Abhängigkeit von Nennweite und Rohrgeneration

14. Anwendbarkeit des Prognoseverfahrens

Da die materialtechnische Zustandsuntersuchung zur Prognose der technischen Nutzungsdauer an Einzelproben eines Rohrleitungsabschnitts durchgeführt wird, ist die Übertragbarkeit der einzelnen Ergebnisse auf den zugehörigen Rohrstrang oder ähnliche Rohrleitungsabschnitt zu prüfen (Abschnitt 14.1).

In welchem Ausmaß die Prognose der technischen Nutzungsdauer zu einer Rohrnetzbewertung herangezogen werden kann und bisherige Bewertungsmethoden ergänzt oder verbessert werden, zeigt ein beispielhafter Vergleich zwischen Untersuchungsergebnissen und den zugehörigen Schadensraten ausgewählter Rohrproben (Abschnitt 14.2)

In Abschnitt 14.4 ist beispielhaft die Anwendbarkeit des Verfahrens zur Prognose der technischen Nutzungsdauer bei vorliegenden und fehlenden Untersuchungsergebnissen dargestellt.

14.1 Übertragbarkeit

Der technische Zustand eines Rohrleitungsabschnitts wird durch Korrosionsangriffe vermindert. Korrosionsangriffe treten örtlich begrenzt und / oder großflächig auf. Der Verlauf der Korrosionsgeschwindigkeit und die Menge des Substanzverlusts am Rohr (Abtragungsrate) hängen bei Annahme gleicher Verlegebedingungen (Rohrwerkstoff, Korrosionsschutz, Bodenaggressivität) von der Korrosionsart und somit wiederum von einem örtlichen oder flächigen Angriff ab (siehe Abschnitt 12).

Um relative präzise Aussagen über den schädigenden Einfluss eines Korrosionsangriffs treffen zu können, müssen neben der Korrosionsart und somit der Abtragungsrate folgende Kriterien bekannt sein:

- an welchen Stellen der Korrosionsangriff am Rohrabschnitt auftritt (Ort)
- an wie viel Stellen der Korrosionsangriff am Rohrabschnitt auftritt (Anzahl)
- zu welchem Zeitpunkt der Korrosionsangriff am Rohrabschnitt auftritt (Zeitpunkt)

In welchem Umfang sich die Kriterien in Abhängigkeit der Korrosionsform bzw. Korrosionsart ermitteln lassen, ist in Tabelle 14.1 dargestellt.

Tabelle 14.1: Erfüllbarkeit notwendiger Kriterien zur Abschätzung des Korrosionsangriffs

Korrosionsart	Ort	Anzahl	Zeitpunkt
gleichmäßige flächige Korrosion	ganzer Rohrabschnitt	einmalig über den ganzen Rohrabschnitt	bestimmbar über die ungünstigste Abtragungsrate
örtlich begrenzte Korrosion	Zufallsgröße	Zufallsgröße	bestimmbar über die ungünstigste Abtragungsrate

Die Anzahl und der Ort lokal begrenzter Korrosionsangriffe lassen sich nicht vorherbestimmen, da diese Korrosionsangriffe aufgrund stark schwankender Einflussfaktoren und Inhomogenitäten dem Zufall unterliegen (z.B. die Kriterien zur Einschätzung der Bodenaggressivität nach DVGW-Arbeitsblatt GW 9 [13]). Es wird vorausgesetzt, dass im Schadensfall (echter Schaden) und anschließender materialtechnischer Zustandsuntersuchung mit hoher Wahrscheinlichkeit die Stelle mit den größten Schwächungen und somit den

ungünstigsten Korrosionsangriff am Rohrleitungsabschnitt analysiert wird. So ist es möglich, den Zeitpunkt erster bzw. weiterer Wasserverluste (im Falle von Perforierung) oder auch das Totalversagen (Unterschreitung der Tragfähigkeit) zu prognostizieren.

Die Übertragbarkeit der ungünstigsten Untersuchungsergebnisse (Prognose der technischen Nutzungsdauer) auf den gesamten zugehörigen Rohrleitungsabschnitt bei annähernd gleichen Verlegebedingungen (Rohrwerkstoff, Korrosionsschutz, Bodenaggressivität) liegt damit auf der sicheren Seite.

Um die Untersuchungsergebnisse einzelner Beprobungen auf einen ganzen Rohrleitungsabschnitt oder ähnliche Rohrleitungsabschnitte übertragen zu können, müssen neben den grundlegenden Kenndaten wie Rohrwerkstoff bzw. Rohrgeneration, Nennweite und Verlegejahr (möglichst aus Bestandsplänen) weitere Kenndaten wie Bodenart und Verlegetiefe (aus Bodenkarten oder Aufgrabungen durch Baumaßnahmen in Rohrleitungsnahe) vorliegen. Es empfiehlt sich, zunächst ungünstige Untersuchungsergebnisse auf ähnliche Rohrleitungsabschnitte zu übertragen. Eine Korrektur erfolgt, sobald separate Untersuchungsergebnisse des jeweiligen Rohrleitungsabschnitts vorliegen.

Eine weitere Möglichkeit ist die Übertragung der statistischen mittleren Nutzungsdauer aus Diagramm 6 und Diagramm 7 auf Rohrleitungsabschnitte gleicher Generation mit nachfolgender Korrektur zur technischen Nutzungsdauer, sobald Ergebnisse einer zugehörigen materialtechnischen Zustandsuntersuchung vorliegen.

Die Beurteilung der Übereinstimmung und Übertragbarkeit einzelner Ergebnisse bzw. Befunde der materialtechnischen Zustandsuntersuchungen ist z. B. über die Bildung sog. Kennzahlen zur Bewertung der Aussagegenauigkeit nach den Vorgaben nach Traunecker möglich [194]. Die dort aufgeführten Bewertungskennzahlen zum Rohrleitungszustand (Daten aus der Schadensstatistik und Bestandsplänen) sind durch die Ergebnisse der materialtechnischen Zustandsuntersuchungen (z.B. RWD_t , SZ_R usw.) zu ergänzen bzw. zu ersetzen.

14.2 Aussagefähigkeit

Übliches Verfahren zur Zustandsbewertung erdverlegter metallischer Rohrleitungen ist die in Abschnitt 1 erwähnte Bewertung anhand von Trends der Schadensraten und der statistischen Nutzungsdauer, basierend auf umfangreichen statistischen Schadens- und Rohrnetzdaten [22]. Unter Einbeziehung von unternehmensspezifischen Investitions- und Reparaturkosten können Strategien für Instandhaltungsmaßnahmen ermittelt werden. Das heißt, dass im Falle geschädigter Rohrleitungen der Zeitpunkt der Rohrerneuerung dann eintritt, wenn die Reparaturkosten der Rohrschäden die Investitionskosten einer Neuverlegung überschreiten.

Über den technischen Zustand der Rohrsubstanz gibt der Verlauf der Schadensrate (Schäden pro Leitungslänge und Zeiteinheit) nur bedingt Auskunft, da kein direkter Zusammenhang zwischen Schadensanzahl und Rohrverschwächung bestehen muss (Abbildung 107; Diagramm 63). Quantitative Aussagen zum Ausmaß der Rohrverschwächungen (tragfähige Mindestwanddicke) sind auf Grundlage von Schadensraten nicht zu treffen. Deswegen sind anhand von Schadensraten keine Sanierungsmaßnahmen als kostenoptimierte Alternative zur Rohrerneuerung (bei Überschreitung einer spezifischen Schadensrate) planbar.

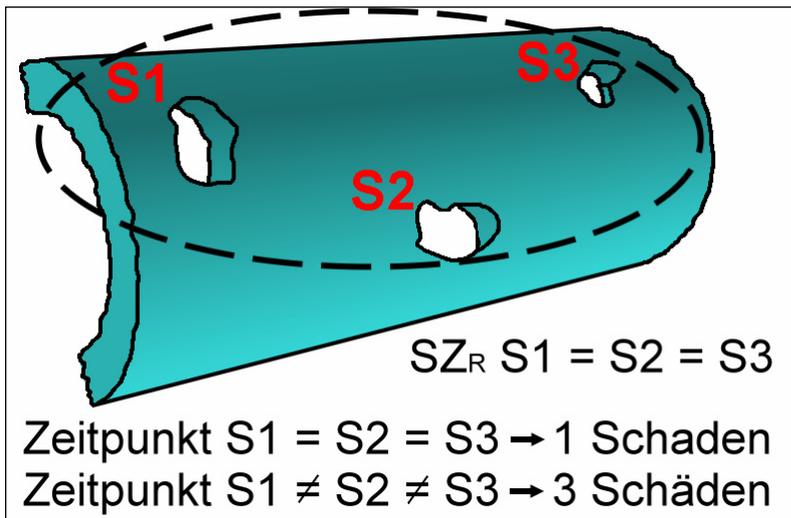


Abbildung 107:
 Beeinflussung der Schadensrate durch veränderliche Definition der Schadensstelle

Die Schädigungszahl Rohr für die in Abbildung 107 markierte Stelle ist annähernd gleich der Schädigungszahl der einzelnen Schäden S1 bis S3. Daraus ergibt sich ein annähernd gleicher technischer Zustand der Rohrsubstanz des fiktiven Probenstückes.

Treten die (echten) Schäden S1 bis S3 zeitgleich auf bzw. werden im Schadensfall gleichzeitig entdeckt und behoben (repariert), resultiert daraus ein einziger Schaden der einmalig in die Ermittlung der zugehörigen Schadensrate eingeht.

Bei zeitversetztem Auftreten der Schäden S1 bis S3 oder ihrer Unauffälligkeit bei der Schadensbehebung resultieren daraus bis zu drei Schäden, welche die zugehörige Schadensrate erhöhen, obwohl sich der technische Zustand des Abschnitts nicht wesentlich verschlechtert hat.

Zur Prüfung des Zusammenhangs zwischen dem technischen Zustand eines Rohrleitungsabschnitts (ausgedrückt über die Schädigungszahl Rohr) und der zugehörigen Schadensrate wurde im Falle vorhandener Schadensstatistiken die Schadensrate der untersuchten Rohrproben bestimmt. Die Schadensrate wurde anhand der Schäden der letzten 11 Jahre (bis Schadenszeitpunkt) und der zugehörigen Rohrstranglänge bestimmt, soweit dies nachträglich zuzuordnen war. Die in Diagramm 63 dargestellten Zuordnungen sind unabhängig der Rohrgeneration. Eine Aufteilung in einzelnen Rohrgenerationen zeigte keine wesentlichen Abweichungen (auf die Darstellung wurde verzichtet).

In Diagramm 63 ist zwar ein leichter Trend zwischen niedriger Schädigungszahl Rohr und einer vergleichsweise erhöhten Schadensrate erkennbar, jedoch lässt dieser Trend aufgrund der starken Schwankungen keine belastbaren Schlussfolgerungen zum technischen Zustand durch die Schadensrate zu.

Die Ergebnisse der materialtechnischen Zustandsuntersuchung erlauben folglich eine präzisere Ermittlung des technischen Zustands der Rohrsubstanz eines Leitungsabschnitts und eine auf den Zustand der Leitung aufbauende Prognose der technischen Nutzungsdauer bzw. Restnutzungsdauer.

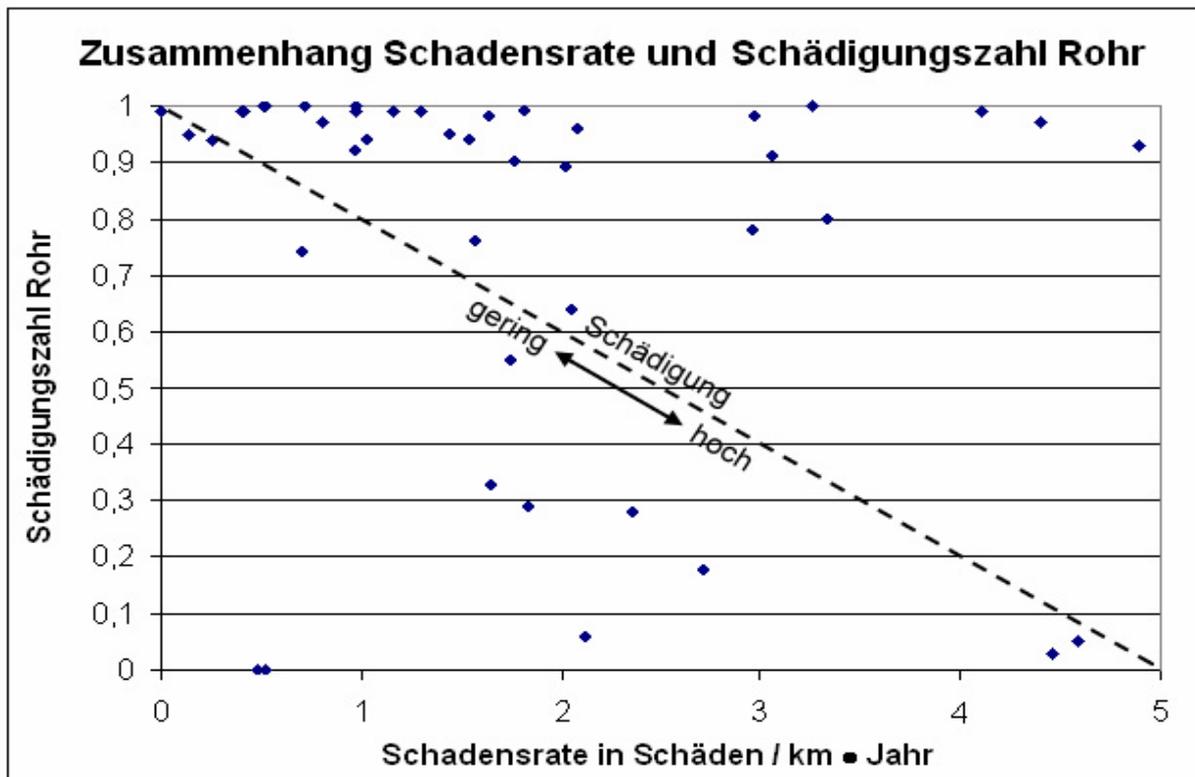


Diagramm 63: Zusammenhang zwischen der Schädigungszahl Rohr untersuchter Rohrproben und der dazugehörigen mittleren Schadensrate (11 Jahre)

14.3 Nutzen und Wirtschaftlichkeit

Die Ermittlung des technischen Zustands durch die materialtechnische Zustandsuntersuchung und die damit verbundene Ermittlung der statischen Resttragfähigkeit lässt im Gegensatz zur Bestimmung des Trends von Schadensraten die Auswahl von Sanierungsmaßnahmen zu. So sind im Schadensfall Sanierungsverfahren auswählbar, welche auf den technischen Zustand der entsprechenden Leitung abgestimmt sind. Durch diese Alternative erschließen sich im Vergleich zu einer Leitungserneuerung Kosteneinsparpotenziale von ca. 15 – 50 % und eine Verlängerung der technischen Nutzungsdauer von ca. 30 – 50 Jahre [24; 195; 196].

Durch die Verwendung der technischen Nutzungsdauer in Kombination mit der Bestimmung der sog. optimalen Nutzungsdauer (Kostenoptimum Reparaturkosten und Investitionskosten) ist der optimale Zeitpunkt einer Rohrerneuerung korrigierbar (Diagramm 64). Die optimale Nutzungsdauer muss korrigiert werden, wenn [1; 37]:

- die technische Nutzungsdauer < OND ist (Fall A in Diagramm 64) oder
- ein auf den technischen Zustand abgestimmtes Sanierungsverfahren den Anstieg der Reparaturkosten verringert und sich die OND verlängert (Fall B in Diagramm 64)

Des Weiteren ist mit Hilfe der technischen Nutzungsdauer unter Beachtung der in DVGW-Arbeitsblatt W 400-3; Abschnitt 8.3 genannten Abwägungskriterien eine mittel- bis langfristige Rohrnetzerneuerung planbar [8]. Zum ungefähren Zeitpunkt des Totalausfalls muss dann die entsprechende Rohrleitung bei unterlassener Sanierung erneuert werden, da eine ausreichende Tragfähigkeit zur Aufrechterhaltung einer sicheren Wasserversorgung nicht mehr besteht (Wasserverluste, Trübungen, Folgeschäden).

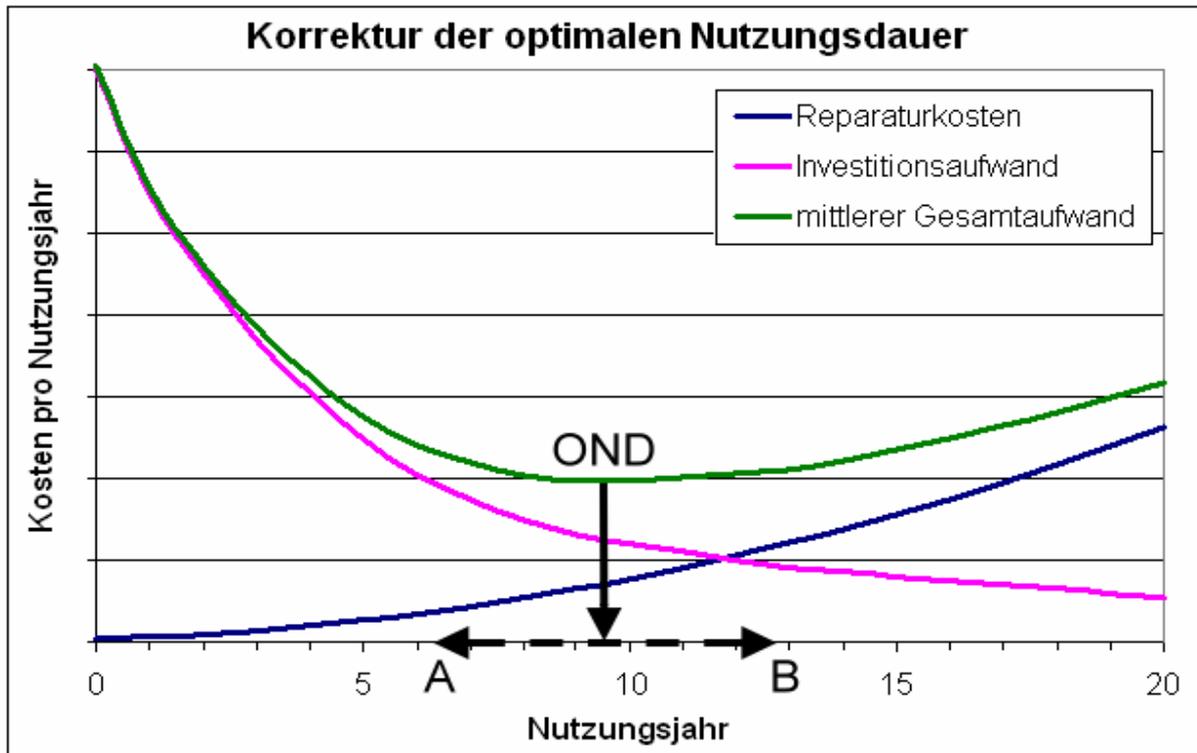


Diagramm 64: Korrektur der sog. optimalen Nutzungsdauer OND durch Vergleich mit der über die materialtechnische Zustandsuntersuchung ermittelten Ergebnisse (prognostizierte technischen Nutzungsdauer bzw. Sanierungsfähigkeit) [14]

14.4 Anwendungsbeispiel

Die praktische Anwendbarkeit des in der Arbeit erstellten Prognoseverfahrens soll das folgende komplexe Beispiel zeigen. Als Grundlage diente eine Grauguss-Rohrprobe der Generation GGL II, da Rohre dieser Generation zu den in der Vergangenheit am häufigsten verlegten Rohrwerkstoffen zählten [5].

Die jeweiligen Teilergebnisse der Untersuchungen und Berechnungen sind mit Verweis auf die zugehörigen Untersuchungsverfahren, Kapitel bzw. Abschnitte, Gleichungen, Diagramme und Tabellen aufgelistet. Vorgreifend wird auf Diagramm 65 in der Zusammenfassung der Arbeit verwiesen, welches einen zusätzlichen Überblick verschafft.

Sollten aufgrund fehlender Proben bzw. Untersuchungen keine Teilergebnisse für weitere Berechnungen zur Verfügung stehen, sind diese aus den entsprechenden Diagrammen und Tabellen der Arbeit zu entnehmen.

14.4.1 Eingangsdaten / Probenbegleitschein

Die Rohrprobe wurde im Zuge einer Erneuerungsmaßnahme an einer Graugussleitung geborgen (städtischer Bereich) und wies äußerlich keine Schäden auf. Weitere Daten zum Rohrleitungsstrang wie die Strang-ID-Nummer wurden im Rahmen der Auswertung anonymisiert.

Der von den entsprechenden WVU ausgefüllte Probenbegleitschein enthielt folgende Angaben:

Tabelle 14.2: Erfasste Daten zum Rohrleitungszustand laut Probenbegleitschein – Erfassung vor Ort (siehe auch Tabelle 6.1)

Kriterium	Befund und Verweis
Schadensdatum	16.05.2002 (=Untersuchungsdatum)
Straßenname	F.-L.-Straße
Hausnummer	34
Lage der Leitung	Fahrbahnbereich
Oberflächenbefestigung	Naturpflastersteine
Bodenart / Bettung	bindiger Boden
Grundwasserstand	nicht erkennbar
Überdeckung	120 cm
Leistungsart	Versorgungsleitung
Verbindungsart	Stemmmuffe (Tabelle 6.2); (Abbildung 69); (Tabelle 4.1)
Schadensursache	Querbruch Abschnitt 4.9.1
Verlegezeit	1900 (aus Bestandsplänen), ansonsten siehe Abschnitt 4.2 bis Abschnitt 4.4
Rohrwerkstoff	„Schleuderguss“ (aus Bestandsplänen)
Rohrprobenlänge	50 cm

Zusätzliche ergänzende Daten konnten den Bestandsunterlagen entnommen werden.

Tabelle 14.3: Zusätzliche Daten; aus Bestandsunterlagen entnommen

Kriterium	Befund und Verweis
Versorgungsdruck	7,0 bar
Rohrstranglänge	210 m

Den Daten in Tabelle 14.2 ist zu entnehmen, dass es sich zum Zeitpunkt der Untersuchung bzw. Rohrprobenbergung um eine ca. 102 Jahre alte Gussleitung handelte. Die Angabe „Schleuderguss“ ist jedoch nicht plausibel, da geschleuderte Graugussrohre (GGL III) erst seit ca. 1926 hergestellt bzw. verlegt wurden.

Die Korrektur der Angaben zum Rohrwerkstoff oder auch der Verlegezeit bzw. Verlegeperiode erfolgte durch die anschließende materialtechnische Zustandsuntersuchung nach Abschnitt 6.

Ist eine materialtechnische Zustandsuntersuchung nicht durchführbar, sind für die Prognose der technischen Nutzungsdauer die Durchschnittswerte der entsprechenden Tabellen einzusetzen. In den nachfolgenden Tabellen ist dieser Fall ergänzend zum Komplexbeispiel dargestellt (Abschnitt 14.4.2)

Über die einfache Untersuchung wurden nachfolgende Daten erfasst (Tabelle 14.4):

Tabelle 14.4: Erfassungskriterien bei Datensammlung zum Rohrleitungszustand bei Begutachtung der Rohrprobe im Untersuchungslabor

Kriterium	Befund und Verweis
Nennweite	Innendurchmesser i. M. 99,0 mm → DN 100 (Tabelle 6.2) Außendurchmesser i. M. 118,5 mm
Verbindungsart	Stemmuffensysteme (Angaben aus Tabelle 14.2 bestätigt)
Rohrwerkstoff	Grauguss mit Lamellengraphit (GGL)
Art des Korrosionsschutzes	Bitumen- oder Teerbeschichtungen (innen); (Abschnitt 4.5.1) Bitumen- oder Teerbeschichtungen (außen); (Abschnitt 4.5.1)
Flächenanteil des Korrosionsschutzes	41 – 60 % (zur Hälfte vorhanden; außen); (Abschnitt 6.3) 1 – 10 % (Reste vorhanden; innen); (Abschnitt 6.3)
Haftungsgrad des Korrosionsschutzes	mäßiger Verbund / Haftung (außen) lose, fehlender Korrosionsschutz (innen)
Flächenanteil Inkrustierung	wenig Inkrustierung (Bsp. B in Abbildung 70)
Struktur der Inkrustierung	knollenartig, vollflächig (Abschnitt 4.9.4)

Nach dem Freilegen des blanken Rohrquerschnitts wurden weitere Daten zum Rohrleitungszustand erfasst (Tabelle 14.5)

Tabelle 14.5: Erfassungsdaten zur Beurteilung von Schadensart und Korrosionsart

Kriterium	Befund und Verweis
Wandstärke	Messpunkt 1: 9,7 mm Messpunkt 2: 9,1 mm Messpunkt 3: 9,5 mm Messpunkt 4: 10,0 mm
Schadensart	Querbruch (Abschnitt 4.9.1) (Angaben aus Tabelle 14.2 bestätigt; zusätzlich Korrosion)
Korrosionsart	häufigste Korrosionsart 1, außen: keine (Abschnitt 4.9.2) häufigste Korrosionsart 2, außen: keine häufigste Korrosionsart 1, innen: Narbenkorrosion häufigste Korrosionsart 2, innen: keine Graphitierung außen: vorhanden Graphitierung innen: vorhanden
Korrosionsgrad	Abmessungen in der Reihenfolge Tiefe, Durchmesser, Flächenanteil häufigste Korrosionsart 1, außen: 0; 0; 0 häufigste Korrosionsart 2, außen: 0; 0; 0 häufigste Korrosionsart 1, innen: 1 mm; 1 mm; 50 % häufigste Korrosionsart 2, innen: 0; 0; 0 Graphitierung außen: 3 mm; 5 mm; 5% Graphitierung innen: 2 mm; 2 mm; 5%
Rohrherstellungsverfahren	GGL II (Schlichtungsspuren n. Abschnitt 4.2.2 bzw. Abbildung 11 erkennbar)

Die Ergebnisse der einfachen materialtechnischen Zustandsuntersuchung nach Abschnitt 6 haben gezeigt, dass es sich entgegen der Angaben im Probenbegleitschein nicht um ein geschleudertes Graugussrohr sondern um ein Graugussrohr der Generation GGL II (stehender Sandguss) handelte. Die Bestandsdaten des entsprechenden WVU sollten demzufolge abgeglichen werden, um so die Auswertung von Bestandsdaten und Daten der Schadensstatistik für eine Netzbewertungsmaßnahme oder möglichen Rehabilitationsmaßnahme zu präzisieren (andere Rohrgeneration = anderes Werkstoffverhalten, abweichende mittlere statistische und technische Nutzungszeiten).

Die Durchführung der präzisen Zustandsuntersuchung brachte nachfolgende Ergebnisse zur ausgewählten Rohrprobe.

Tabelle 14.6: Untersuchungsergebnisse der präzisen Zustandsuntersuchung

Kriterium	Befund und Verweis
Mikroskopische Kornstruktur	Lamellengraphit, grob (Abbildung 35; Abschnitt 4.7.1)
Zugfestigkeit	i. M. 70 N/mm ² (Abschnitt 7.2.1)
E-Modul	75.000 N/mm ²
Bruchdehnung	< 0,2 %
Brinellhärte	keine Erfassung, da zur weiteren Zustandsbeurteilung nicht zwingend erforderlich

Die Daten in Tabelle 14.6 zeigen für Graugussrohre der Generation GGL II relativ typische Werkstoffkennwerte (siehe auch Tabelle 9.7).

Zusätzlich wurden während der Rohrprobenbergung vor Ort Bodenproben aus Rohrleitungsnähe entnommen und im Rahmen der materialtechnischen Zustandsbewertung untersucht.

Tabelle 14.7: Beurteilungskriterien zur Bestimmung der Bodenaggressivität [13]

Kriterium	Befund und Verweis
Bodenart und Bindigkeit	38 % abschlämmbare Bestandteile < 0,063 mm
spezifischer Bodenwiderstand	3800 Ωcm
Wassergehalt	30 %
pH-Wert	6,93 %
Pufferkapazität	K _{S4,3} : 5,67 mmol/kg; K _{B7,0} : 0,083 mmol/kg
Sulfid-Gehalt	0,667 mg/kg
Neutralsalzgehalt	11,5 mmol/kg
Sulfatgehalt	5,618 mg/kg
Lage des Objekts zum Grundwasser	Kein Grundwasser erkennbar (Tabelle 14.2)
Bodenhomogenität, horizontal	keine sichtbaren Inhomogenitäten vor Ort
Bodenhomogenität, vertikal	keine sichtbaren Inhomogenitäten vor Ort
Feststellung von Fremdkathoden	keine Fremdkathoden (siehe Tabelle 14.13)

14.4.2 Berechnung der Zwischenergebnissen zur Ermittlung der technischen Nutzungsdauer

Parallel zur beispielhaften Prognose der technischen Nutzungsdauer nach den in Abschnitt 14.4.1 gezeigten vollständigen Eingangsdaten (einfache und präzise Zustandsbewertung, Bodenuntersuchung) soll zu Vergleichszwecken eine Prognose nur anhand der Daten aus dem oben erwähnten Probenbegleitschein erfolgen. Auf diese Weise soll gezeigt werden, wie sich die Aussagekraft der Prognose ändert. Eventuell fehlende Untersuchungsergebnisse wurden mit den in der Arbeit ermittelten Durchschnittswerten aus den Untersuchungen von 131 Rohrproben ergänzt.

Tabelle 14.8: Restwanddicke, Schädigungszahlen und mittlere statistische Nutzungsdauer aus Ergebnissen der materialtechnischen Zustandsuntersuchung

Kriterium	Ergebnis und Verweis
Maximale Wanddicke t	10 mm (Tabelle 14.2)
Empirische Restwanddicke RWD	(Gleichung 8.1)
Korrosionsart 1 außen (keine)	10 mm
Korrosionsart 2 außen (keine)	10 mm
Korrosionsart 1 innen	9,95 mm
Korrosionsart 2 innen (keine)	10 mm
Graphitierung außen	9,93 mm
Graphitierung innen	9,98 mm
Resultierende empirische Wanddicke RWD_R	(Gleichung 8.5)
Außen	9,93 mm (da nur Graphitierung)
Innen	9,93 mm ($9,95 \bullet 9,98 / 10$)
Dominierende Korrosionsart	Graphitierung außen (kleinste RWD)
Schädigungszahl Rohr SZ_R	0,993 (Gleichung 8.2)
Schädigungszahl Korrosionsschutz SZ_K	(Abschnitt 8.3.2); (Gleichung 8.3)
Faktor Haftung Korrosionsschutz außen	0,5
Faktor Flächenanteil Korrosionsschutz außen	2/3
Faktor Haftung Korrosionsschutz innen	1/10 (Diagramm 19)
Faktor Flächenanteil Korrosionsschutz innen	0
Schädigungszahl Korrosionsschutz außen SZ_{Ka}	1/3
Schädigungszahl Korrosionsschutz innen SZ_{Ki}	0
Mittlere statistische Nutzungsdauer	(Kapitel 5)
Alter	102 Jahre (2002 – 1900)
Mittlere statistische Restlebenserwartung	6 Jahre (Diagramm 6)
Statistische Nutzungsdauer	108 Jahre (102 + 6)
Statistisches Ausfalljahr	2008 (2002 + 6)

Tabelle 14.9: mittlere statistische Nutzungsdauer, wenn keine Untersuchungsergebnisse vorhanden; z.B. nach DVGW-Hinweis W 401 [9],

Kriterium	Ergebnis und Verweis
Mittlere statistische Nutzungsdauer	90 Jahre
Alter	102 Jahre
Mittlere statistische Restnutzungsdauer	0 Jahre (Nutzungsdauer theoretisch bereits überschritten)
Mittleres statistisches Ausfalljahr	1990

Tabelle 14.10: Tragfähige Mindestwanddicke

Kriterium	Präzise Werte aus Untersuchung	Durchschnittliche Werte aus Tabellen
Rohrdurchmesser außen	118,5 mm	118 mm (Anhang A)
Rohrdurchmesser innen	99 mm	100 mm (da DN 100)
Überdeckungshöhe	120 cm	80 cm (ungünstiger Fall)
Einbaubedingungen / Boden	wie in Abschnitt 10.1.2 und Abschnitt 10.1.3	
Belastungen	wie in Abschnitt 10.1.4 ¹	wie in Abschnitt 10.1.4
Zugfestigkeit	70 N/mm ²	67 N/mm ² (Tabelle 9.7) ²
Druckfestigkeit	~ 280 N/mm ²	~ 268 N/mm ²
E-Modul	75.000 N/mm ²	71.000 N/mm ²
Bruchdehnung	0,2 %	< 1 %
Sicherheit gegen Bruch	2,2 (Tabelle 10.1)	
Tragfähige Mindestwanddicke	5 mm [11] ³	6 mm (Tabelle 10.3)

Zu Tabelle 14.10:

¹ in Tabelle 14.10 beträgt entgegen den Annahmen in Abschnitt 10.1.4 der Innendruck = 7 bar; theoretisch Erhöhung des Grenzlochdurchmessers nach Diagramm 33 auf 18 mm (statt 15 mm) möglich

² es erfolgte ein Abgleich mit Abbildung 69 und der in Tabelle 14.2 angegebenen Verlegezeiten; Entscheidung für Generation GGL II statt GGL III („Schleuderguss“), da ungünstiger Fall

³ Berechnung nach ATV A 127 mit den zugehörigen oben erwähnten Eingangsdaten

Eine Überprüfung der Grenzbedingungen nach Abschnitt 10.2 zeigte, dass das Ende der technischen Nutzungsdauer des zur untersuchten Rohrprobe zugehörigen Rohrstrangs noch nicht erreicht ist:

Tabelle 14.11: Einhaltung der Grenzbedingungen zur weiteren Prognose der technischen Nutzungsdauer

Grenzbedingung	Präzise Werte aus Untersuchung	Durchschnittliche Werte aus Tabellen
$RWD_R \geq t_{\min}$	9,93 mm > 5 mm (Tabelle 14.8 und Tabelle 14.10)	9 mm > 6 mm (Anhang A und Tabelle 14.10)
$DM_i \leq 15 \text{ mm}$	0 mm < 15 mm (Tabelle 14.5)	Bedingung nicht nachprüfbar
keine Anrisse	Bedingung erfüllt (Tabelle 14.5)	Bedingung nicht nachprüfbar

Im Falle nicht vorhandener Untersuchungsergebnisse (Alternativbeispiel) muss für eine weitere Durchführung der Prognose der technischen Nutzungsdauer nach dem hier erklärten Verfahren davon ausgegangen werden, dass die Grenzbedingungen eingehalten werden.

14.4.3 Prognose der technischen Nutzungsdauer

Auf Grundlage der vorangegangenen Daten und Ergebnisse wurden der Ist-Zustand, der Mindestzustand und der neue Ausfallzeitpunkt des zur Rohrprobe zugehörigen Rohrleitungsstrangs ermittelt. Anschließend erfolgte eine mögliche Korrektur des Ausfallzeitpunkts anhand der Ergebnisse der Bodenuntersuchung.

Tabelle 14.12: Zustand und Ausfallzeitpunkt

Kriterium	Präzise Werte aus Untersuchung	Durchschnittliche Werte aus Tabellen
Zeitpunkt der Verlegung X_0 (Abschnitt 11.2)	1900 (Tabelle 14.2)	1900 (Tabelle 14.2)
Ausgangszustand Y_0 (Abschnitt 11.2)	100 %	100 %
Zeitpunkt der Untersuchung / Bergung X_{Ist}	2002 (Tabelle 14.2)	2002 (Tabelle 14.2)
Ist-Zustand Y_{Ist} (Gleichung 11.1)	99,3 % (Tabelle 14.11)	100 % (Tabelle 14.11)
Ausfallzeitpunkt n. Statistik X_{Aus}	2008 (Tabelle 14.8)	1990 (Tabelle 14.9)
Mindestzustand Y_{Aus} (Gleichung 11.2)	50,0 % * (Tabelle 14.11)	66,7 % (Tabelle 14.11)
m_{Aus} (Gleichung 11.5)	2,16	2,70
b_{Aus} (Gleichung 11.6); (X_{Aus} in Jahren!)	233,28	243,00
m_B (Gleichung 11.7)	145,71	$Y_{Ist} = Y_0$; $m_B \Rightarrow \infty$
$\frac{b_{Aus}}{X_{Ist}}$	2,29	2,38
Bedingung: $m_B > \frac{b_{Aus}}{X_{Ist}}$	erfüllt, Berechnung von \bar{X}	erfüllt, Berechnung von \bar{X}
\bar{X} (Gleichung 11.10)	89 Jahre	102 Jahre
Ausfallzeitpunkt $X_{Aus-Ist}$ (Gleichung 11.9)	2097	2092
Prognostizierte technische Nutzungsdauer	197 Jahre	192 Jahre
Technische Restnutzungsdauer	95 Jahre	90 Jahre

* Aufgrund der Herleitung bedeutet ein Mindestzustand von 50,0 % nicht zwangsläufig, dass ca. 50 % der Rohrschubstanz vorhanden sind. Je niedriger der errechnete Mindestzustand [%], umso höher ist die Wahrscheinlichkeit einer vergleichsweise längeren technischen Nutzungsdauer.

Die Daten zur Prognose der technischen Nutzungsdauer in Tabelle 14.12 zeigen, dass der zur Rohrprobe zugehörige Rohrstrang mit hoher Wahrscheinlichkeit erst ca. die Hälfte seiner technischen Nutzungsdauer erreicht hat. Die materialtechnische Zustandsuntersuchung lieferte vergleichsweise präzisere Ergebnisse und die Gewissheit, dass zumindest die untersuchte Rohrprobe keine weiteren Perforierungen besitzt.

Der im zugehörigen Probenbegleitschein angegebene Schaden durch Querbruch (Tabelle 14.2) ist mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf einen geschwächten Rohrquerschnitt zurückzuführen (Abschnitt 4.9.1) sondern auf übermäßige Belastung oder mangelhafte Verlegebedingungen (siehe Abbildung 102). Es handelt sich somit um einen unechten Schaden am Rohrstrang, der bei fehlender materialtechnischer Zustandsuntersuchung keine Aussagen zum technischen Zustand zulässt.

Ein Anstieg der Schadensrate durch Versagen der Tragfähigkeit der Leitung oder Wasserverluste aufgrund von Perforierungen ist mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb der prognostizierten Restnutzungsdauer nicht zu erwarten.

Weitere Auswertungen der Ergebnisse der Bodenuntersuchung (Zustandsverschlechterung an der Rohraußenseite) und zur Querbruchgefahr ergänzen die Prognose.

Am untersuchten Rohrprobenstück, dessen zugehöriger Rohrstrang bereits seit über 100 Jahren in Betrieb war, wurde im Rahmen der Zustandsuntersuchung keine Perforierung oder Hinweise auf örtlich begrenzte Korrosion an der Außenseite gefunden. Äußerliche Anzeichen auf das Vorhandensein von Fremdkathoden (Streuströme durch Straßenbahngleise; hochgradig bewehrte Fundamente) wurden am Rohrleitungsstrang während der Begehung zur Rohrprobenbergung nicht festgestellt. Deswegen ist mit großer Wahrscheinlichkeit erst um das Jahr 2052 mit Wasserverlusten aufgrund von Perforierungen zu rechnen. Dieser in Tabelle 14.13 ermittelte Zeitpunkt einer erhöhten Gefahr von Perforierungen stellt den ungünstigsten Fall dar.

Im Falle des Wanddurchbruchs (Perforierung) ist mittels Sanierung durch Zementmörtelauskleidung eine technische Lebensdauererlängerung möglich. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Auskleidung im Bereich einzelner Perforierungen eine Überbrückungswirkung besitzt und der Lochdurchmesser (bzw. Perforierungsdurchmesser) weniger als 15 mm beträgt (siehe Abschnitt 8.3.3). Der frische Zementmörtel füllt beim Ausschleudern die perforierte Stelle vollständig aus, so dass ein weiterer Korrosionsprozess im Perforierungsbereich gestoppt wird.

Sollte sich der zu sanierende Rohrstrang jedoch dauerhaft unterhalb des Grundwasserspiegels befinden, ist u. U. eine Sanierung mittels ZMA nicht durchführbar, da der frische Zementmörtel bzw. Zementleim vom anstehenden Wasser ausgeschwemmt werden kann.

Tabelle 14.13: Bestimmung der Bodenaggressivität und der Abtragungsrate [13; 146]

Kriterium	Befund und Verweis
Bewertungszahl B_0	- 7 (aggressiv)
Bewertungszahl B_1	- 7
Bewertungszahl B_E	- 9
Korrosionswahrscheinlichkeit Narben- bzw. Lochkorrosion	mittel
Korrosionswahrscheinlichkeit Flächenkorrosion (bzw. Muldenkorrosion und Graphitierung)	gering
Abtragungsrate ω (Tabelle 12.3)	0,02 mm / Jahr
max. Eindringrate $\omega_{l,max}$ (Tabelle 12.3)	0,2 mm / Jahr
Restzeit bis Wanddurchbruch bei Narben- o. unvollständiger Lochkorrosion (außen)	50 Jahre ((9,93 mm) / 0,2 mm/Jahr); (RWD _R aus Tabelle 14.8)
Restzeit bis Wanddurchbruch bei Flächen- o. Muldenkorrosion bzw. Graphitierung (außen)	497 Jahre ((9,93)/0,02) (RWD _R aus Tabelle 14.8)
Erhöhte Gefahr von Perforierungen	2052 (2002 + 50 Jahre)
Korrigierter Ausfallzeitpunkt*	keine Korrektur notwendig (siehe unten)

* Annahme: Graphitierung verläuft wie Flächen- bzw. Muldenkorrosion (vgl. Abschnitt 12.1.4)

Eine Korrektur der Ausfallzeit bzw. dem Ende der prognostizierten technischen Nutzungsdauer aufgrund der Abtragungsrate bei Flächen- oder Muldenkorrosion bzw. Graphitierung ist nicht notwendig, da die Restzeit bis zum Wanddurchbruch (497 Jahre) weit über der prognostizierten technischen Restnutzungsdauer (95 bzw. 90 Jahre) liegt.

Tabelle 14.14: Beurteilung der Gefährdung durch Querbruch (Kapitel 13)

Kriterium	Befund und Verweis
Erd- und Verkehrslast q_v	92,79 kN/m ² (Abschnitt 10.1.4)
Festigkeitseigenschaften	(Tabelle 14.6)
Rohrinnendurchmesser	99,0 mm (Tabelle 14.4)
RWD _R	9,93 mm (Tabelle 14.8)
Rohraußendurchmesser	118,96 mm
Rohrauflagerbreite b (Gleichung 13.2)	0,059 m
Vertikale Gesamtlast q' (Gleichung 13.14)	13,05 kN/m
Mittlerer Sohlspannung σ_0 (Gleichung 13.4)	191,16 kN/m ²
Mittlere Steifemodul E_s [192]	2000 kN/m ² (bindiger Boden) ¹
mittlerer Bettungsmodul $k_{s,m}$ (Gleichung 13.6)	67.249 kN/m ³
Bettungskonstante k (Gleichung 13.7)	4000 kN/m ²
Elastische Länge λ (Gleichung 13.8)	0,787 m
Moment aufgrund punktförmigem Auflager (Gleichung 13.9)	3,53 kNm
Längsbiegespannung σ_{LHZ}	40,95 N/mm ²
Sicherheit gegen Querbruch (momentan)	1,85
Sicherheit gegen Querbruch (bei Erreichen des tragfähigen Mindestzustand, $t_{min} = 6\text{mm}$)	1,45

Zu (Tabelle 14.14):

¹ Auswahl des eingesetzten Wertes des Steifemoduls E_s nach Anhaltswerten und aufgrund der Tatsache, dass im Rahmen der Bodenuntersuchungen (Tabelle 14.7) ein bindiger Boden festgestellt wurde (auch für Rohrbettung) [192].

Der zur untersuchten Rohrprobe zugehörige Rohrstrang besitzt bis zum Ende seiner technischen Nutzungsdauer eine mindestens 1,4-fache Sicherheit gegen Querbruch bei punktförmigem Auflager (z.B. fehlerhafte Rohrbettung).

15. Schlussfolgerungen

Das in der Arbeit entwickelte Verfahren zur Prognose der technischen Nutzungsdauer erdverlegter metallischer Rohrleitungen dient der Rohrnetzbewertung neben den geforderten Kriterien aus DVGW-Arbeitsblatt W400-3 und DVGW-Hinweis W 401 als Grundlage für künftige Rehabilitationsplanungen bzw. Investitionsplanungen am Netz [8; 9].

In Kombination mit Daten der Schadensstatistik (Entwicklung von Schadensraten) und Reparaturkosten bzw. Investitionsaufwand (optimale Nutzungsdauer) lässt sich die Rohrnetzbewertung durch dieses Verfahren insgesamt präzisieren.

Zur Ermittlung der notwendigen Eingangsdaten für die Prognose der technischen Nutzungsdauer ist die materialtechnische Zustandsuntersuchung erforderlich (vereinfachte bzw. präzierte Zustandsuntersuchung). Erfolgt eine materialtechnische Zustandsuntersuchung an Rohrproben, welche ohne ein zugehöriges Schadensereignis geborgen wurde, sind folgende Ergebnisse zum technischen Rohrleitungszustand bestimmbar:

- Prognose der technischen Nutzungsdauer bzw. Restnutzungsdauer
- Zeitpunkt erhöhter Wasserverluste aufgrund von Perforierungen

Fällt die Rohrprobenbergung mit einem (echten) Schadensereignis zusammen, ist zusätzlich berechenbar bzw. auswählbar:

- die statische Resttragfähigkeit der Rohrprobe
- ein auf den Rohrleitungszustand abgestimmtes Sanierungsverfahren [9]

15.1 Erkenntnisse und Ergebnisse der Arbeit

Eine Einteilung metallischer Rohrwerkstoffe in charakteristische Gruppen (Generationen) ist für eine Rohrnetzbewertung bzw. Zustandsbestimmung und den daraus resultierenden Instandhaltungsmaßnahmen nach DVGW-Arbeitsblatt W400-3 erforderlich.

Durch die Einteilung in Generationen wird die chronologische Entwicklung des Herstellungsverfahrens einschließlich der Entwicklung des Korrosionsschutzes, der Verbindungstechniken und der Festigkeits- und Werkstoffeigenschaften metallischer Rohrwerkstoffe berücksichtigt (Abbildung 69).

Die in der Arbeit vorgenommene Unterteilung in Rohrgenerationen muss u. U. im jeweiligen Wasserversorgungsunternehmen auf die dort vorherrschenden Bedingungen abgestimmt werden. Die wäre z. B. der Fall, wenn genau bekannt ist, ab welchem Zeitpunkt bestimmte Rohrgenerationen erstmals verlegt wurden.

Die ausführlichen Untersuchungen an 131 Rohrproben zeigten, dass die Schadensart Korrosion am häufigsten an erdverlegten metallischen Trinkwasserleitungen anzutreffen ist. Korrosionsangriffe verschlechtern den technischen Zustand der Leitung (hier Tragfähigkeitsverlust) und rechtfertigen deshalb materialtechnische Zustandsuntersuchungen zur Feststellung des Korrosionsgrades.

Die häufigste Korrosionsart an Graugussrohren (GGL) ist die Graphitierung. Da die graphitierten Stellen am Rohr sehr häufig nicht erkennbar sind, ist eine Freilegung der blanken Rohroberfläche an Teilabschnitten z. B. durch Sandstrahlen notwendig.

Die am häufigsten an metallischen Rohrleitungen anzutreffenden, u. U. offensichtlichen Korrosionsarten müssen nicht zwangsläufig die schädlichsten Einflüsse auf den technischen Zustand der Leitung ausüben, da sehr häufig verschiedene Korrosionsarten am Rohrstrang auftreten. Deshalb ist ein Vergleich des schädigenden Einflusses einzelner Korrosionsarten mittels der sog. Schädigungszahl Rohr SZ_R notwendig. Aus den Auswertungen der Untersuchungsergebnisse der einfachen materialtechnischen Zustandsuntersuchung ist ersichtlich, dass an Graugussrohren die Graphitierung und an Stahlrohren die Flächenkorrosion den größten schädigenden Einfluss ausüben.

Einer Verschlechterung des technischen Zustands eines Rohrleitungsstrangs durch Korrosionsangriffe wirken gemäß der Definition in Abschnitt 8.3 die Festigkeitseigenschaften und die Materialsubstanz (Wanddickenreserve) in einem bestimmten Umfang entgegen. Bei Graugussrohren werden die relativ niedrigen Festigkeitseigenschaften im Vergleich zu Duktilguss- und Stahlrohren durch größere Wandstärken ausgeglichen (z. B. höheres Widerstandsmoment). Die Bewertung dieses ausgleichenden Verhältnisses zwischen Wanddickenreserve und Festigkeitseigenschaften und der damit verbundene Einfluss auf die technische Zustandsverschlechterung zeigt Tabelle 15.1.

Tabelle 15.1: Verhältnis von Wanddickenreserve und Festigkeitseigenschaften von metallischen Rohrwerkstoffen

Rohrwerkstoff	Wanddickenreserve		Festigkeitseigenschaften	
	vorhandene Reserve	Schädigungszahl SZ_R	Zugfestigkeit (Tabelle 9.2)	E-Modul (Tabelle 9.4)
Grauguss	+	hoch (Diagramm 16)	-	-
Duktilguss*	0	mittel (Diagramm 17)	+	+
Stahl	-	niedrig (Diagramm 18)	+	+

* Es wurden aufgrund des geringen Rohrprobenumfangs keine Untersuchungen und Auswertungen bezüglich der tatsächlichen Festigkeitseigenschaften an Duktilgussrohren vorgenommen. Die Bewertung der Festigkeitseigenschaften bezieht sich daher auf die geforderten Werte in DIN EN 545 [29].

Den Belastungen wirken die Festigkeitseigenschaften und eine große Wanddicke entgegen. Im Falle eines unwirksamen Korrosionsschutzes wird der Korrosionsangriff bzw. Materialabtrag neben der Abtragsrate hauptsächlich durch die Wanddickenreserve bestimmt. Die Korrosionsbeständigkeit und somit die Abtragsraten der einzelnen relevanten Rohrwerkstoffe sind annähernd gleich.

Die Qualität des Korrosionsschutzes, ausgedrückt über die Schädigungszahl SZ_K , hat in Bezug auf Graugussrohre offensichtlich keinen direkten Einfluss auf das Ausmaß eines Korrosionsangriffs (ausgedrückt über die Schädigungszahl SZ_R).

Ein Grossteil der untersuchten Rohrproben (Grauguss) wies trotz eines mangelhaften Korrosionsschutzes (niedriger Wert SZ_K) unabhängig vom Alter der zugehörigen Rohrleitung nur geringfügige Schwächungen am Rohrquerschnitt durch Korrosionsangriffe auf.

An Stahlrohren war bezüglich des Zusammenhangs zwischen Schädigungszahl SZ_R und Schädigungszahl SZ_K eine Altersabhängigkeit erkennbar. Während relativ junge Stahlrohrleitungen trotz eines mangelhaften Korrosionsschutzes eine relativ ungeschwächte Rohrschubstanz aufwiesen, zeigte sich bei älteren Stahlrohrleitungen ein ungefähre Zusammenhang zwischen Schädigungszahl SZ_R und Schädigungszahl SZ_K .

Für die Prognose der technischen Nutzungsdauer bedeutet das, dass der Beginn und somit der qualitative Verlauf der Zustandsverschlechterung („Anstieg“) präzisiert werden können. Dazu

sind jedoch weitere Untersuchungen hinsichtlich des sog. Verzögerungseffekts und einer gewissen Resistenzzeit notwendig.

Die Auswertung der statischen Versuche zeigte, dass die vorhandenen Festigkeitseigenschaften an Graugussrohren (insbesondere GGL II und GGL III) im Mittel weit unter den geforderten Werten aus den entsprechenden Regelwerken lagen [79; 84]. So betrug die vorhandene Zugfestigkeit von Rohrproben der Generation GGL II und GGL III nur ca. 50 % der in den entsprechenden Regelwerken angegebenen Zugfestigkeiten.

Dagegen ergab die Auswertung der statischen Versuche an Stahlrohrproben der Generation St IIIa im Mittel eine um ca. 50 % höhere Zugfestigkeit als in TGL 9413 und TGL 9414 gefordert wird [136; 138].

In nachträglichen rohrstatischen Berechnungen bereits verlegter metallischer Trinkwasserleitungen sind diese verminderten Festigkeitseigenschaften der Graugussrohre (GGL) zu berücksichtigen. Fehlen die durch statische Versuche ermittelten Festigkeitseigenschaften, sind deshalb die in der Arbeit empfohlenen Anhaltswerte zu verwenden.

Die ersatzweise empirische Berechnung der Zugfestigkeit metallischer Rohrwerkstoffe aus der vergleichsweise einfachen Ermittlung der Brinellhärte führt zu stark abweichenden Ergebnissen. Die Ermittlung der Brinellhärte ist deswegen für weitere rohrstatische Berechnungen zur Resttragfähigkeit nicht relevant.

Die wichtigste Kenngröße der Festigkeitseigenschaften ist die Zugfestigkeit, da sie sich bezüglich der Berechnung der statischen Tragfähigkeit nach ATV A 127 hauptsächlich auf das Tragverhalten des Rohres auswirkt [11]. So führt z.B. eine Abminderung der Zugfestigkeit um 5 % ebenfalls zu einer Verringerung der Sicherheit gegen Versagen durch Bruch um annähernd 5 % (bei Graugussrohren).

Geringen Einfluss hat der Wert des E-Modul, der sich hauptsächlich auf das Verformungsverhalten (Versagen durch Instabilität) auswirkt. Eine Änderung des Wertes des E-Modul um 10 % führt zu einer Veränderung der Sicherheit gegen Versagen durch Stabilität von ca. 1 %.

Die Berechnung der Tragfähigkeit der untersuchten Rohrgenerationen nach den Algorithmen aus ATV A 127 zeigte für Graugussrohre eine Unterdimensionierung der erforderlichen Mindestwanddicke. Berücksichtigt wurden für diese Berechnungen die Angaben zur Rohrgeometrie aus den jeweils gültigen Regelwerken bzw. die in der Arbeit empfohlenen tatsächlichen Festigkeitseigenschaften und relativ ungünstige, jedoch nicht ungewöhnliche Verlegebedingungen. Relativ ungünstige Annahmen sorgen für eine höhere Sicherheit innerhalb der Ergebnisse.

Ein Großteil der untersuchten Graugussrohre wies dagegen eine noch ausreichende Tragfähigkeit auf (die Rohre besaßen eine stärkere Wanddicke als die in den Regelwerken vorgeschriebene Mindestwanddicke).

Die untersuchten Stahlrohr-Proben besaßen zwar relativ hohe Festigkeitseigenschaften, jedoch reichte die restliche Wanddicke bzw. Wanddickenreserve nicht aus, um eine ausreichende Sicherheit gegen Versagen durch Instabilität (Verformen) unter ungünstigen Verlegebedingungen zu gewährleisten.

Wie Auswertungen zeigen, lässt die Prognose der technischen Nutzungsdauer nach dem in der Arbeit entwickelten Verfahren im Vergleich zur statistisch ermittelten Nutzungsdauer differenziertere Aussagen zum Ausfallzeitpunkt eines Rohrleitungsabschnitts zu. Grundlage hierfür ist die Berücksichtigung des tatsächlichen technischen Ist-Zustands der Rohrsubstanz und die daraus resultierende Prognose.

Die Aussagen über annähernd gleiche Korrosionsgeschwindigkeiten bzw. Abtragungsraten (vollflächig) zwischen den relevanten Rohrwerkstoffen Grauguss, Duktulguss und Stahl werden durch die eigenen Versuche bestätigt [148].

Die Bestimmung der Bodenaggressivität an Bodenproben und die damit verbundene Bestimmung von Abtragungsraten nach DVGW-Arbeitsblatt GW 9 ermöglicht eine Korrektur bei der Prognose der technischen Nutzungsdauer. Aufgrund der relativ hohen Anzahl von Einflussfaktoren auf die Bodenaggressivität ist eine Einschränkung auf einige wenige Untersuchungsparameter nicht sinnvoll (Verringerung der Aussagekraft). Jedoch sind die dazu notwendigen Untersuchungen nicht zwingend erforderlich, da sich nur in wenigen Fällen eine neue (korrigierte) technische Nutzungsdauer ergab (bei 9 % der untersuchten Rohrproben).

Ein nutzbarer Zusammenhang zwischen Bodenaggressivität und Schädigungszahl Rohr bzw. Schädigungszahl Korrosionsschutz für die Prognose der technischen Nutzungsdauer wurde nicht gefunden. Ursache hierfür war vermutlich der geringe Umfang an Bodenproben. Weitere Untersuchungen hierzu sind erforderlich.

Eine Beurteilung der Querbruchgefahr von Graugussrohren ist neben der Prognose der technischen Nutzungsdauer zur verbesserten Rohrnetzbewertung notwendig. Der in der Arbeit gefundene Ansatz zur Berechnung der Längsbiegespannungen bei punktförmiger Auflagerung ermöglicht eine Beurteilung des Querbruchrisikos besonders gefährdeter Rohrleitungen kleinerer Nennweite.

Die materialtechnische Zustandsuntersuchung lässt im Vergleich zur Zustandsbeurteilung aufgrund von Schadensraten eine Rohrnetzbewertung zu, ohne dass sichtbare Schäden eintreten müssen. Dadurch sind vorbeugende Maßnahmen (Sanierung) zum Substanzerhalt von metallischen Rohrleitungen möglich.

Die Rohrnetzbewertung mittels Trendprognose von Schadensraten auf Grundlage von Schadensdaten und einer „weichen“ Datenbasis (z. B. mittlere statistische Nutzungsdauer) wird mit den Ergebnissen der materialtechnischen Zustandsuntersuchung und der darauf basierenden Prognose der technischen Nutzungsdauer präzisiert und erhärtet.

15.2 Ausblick

Während der materialtechnischen Zustandsuntersuchungen an den erwähnten Rohrproben ergaben sich eine Reihe weiterer Problemstellungen und Lösungsansätze, die aufgrund der festgelegten Abgrenzung und Zielstellung der Arbeit nicht vertiefend untersucht werden konnten.

Die Methodik der Einteilung metallischer Rohrwerkstoffe in charakteristische Rohrgenerationen lässt sich bei vorausgehender Recherche auch auf nichtmetallische Rohrwerkstoffe übertragen und verbessert so eine Rohrnetzbewertung [1].

Methoden zur Ermittlung von Werkstoffeigenschaften direkt an der Rohrschadensstelle können künftig die materialtechnische Zustandsuntersuchung vereinfachen und verkürzen. Ein besonderer Schwerpunkt für potenzielle Erfassungsmethoden liegt in einer einfachen, möglichst zerstörungsfreien Ermittlung der Zugfestigkeit metallischer Rohrwerkstoffe (z. B. Erfassung von Verschwächungen durch Ultraschallprüfung u. ä. [47; 66]).

Um den Einfluss von Verschwächungen am Metallrohr durch Herstellungsfehler oder Korrosionsangriffe auf die statische Tragfähigkeit noch besser beurteilen zu können, sind

weitere Versuche unter Einbeziehung EDV-gestützter Rechenmodelle notwendig. Besonders der spannungserhöhende Einfluss (Kerbwirkung) von scharfkantigen Verschwächungen oder Perforierungen an der Rohrwand sollte untersucht werden [58; 59]. Künftige Berechnungen zur Resttragfähigkeit werden dadurch genauer.

Der Zusammenhang zwischen Verlegebedingungen, Bodenaggressivität und dem äußeren Korrosionsangriff auf die Rohroberfläche ist durch einen größeren Probenumfang eingehender zu untersuchen. Insbesondere neue Verfahrensweisen zur Messung bzw. Abschätzung von Korrosionsgeschwindigkeiten bzw. Abtragungsraten und deren Einfluss auf eine technische Zustandsbestimmung sind zu betrachten [204]. Zusätzlich geben umfangreichere Korrosionsversuche an den Rohrwerkstoffen Grauguss, Duktiguss und Stahl belastbare Ergebnisse über ein gleiches oder individuelles Korrosionsverhalten.

Der während der Arbeit festgestellte sog. Verzögerungseffekt infolge geschädigtem äußeren Korrosionsschutz und dem dadurch entstehenden Korrosionsangriff auf die Rohroberfläche ist durch vertiefende Korrosionsversuche über längere Zeitabschnitte zu prüfen.

Während der Auswertung von Schadens- und Bestandsdaten zahlreicher WVU stellte sich heraus, dass bezüglich der Benennung der erfassten Kriterien in Probenbegleitscheinen Klärungsbedarf über einheitliche Definitionen besteht. Subjektive Angaben zu relevanten Kriterien wie Bodenart, Rohrwerkstoff, Schadens- und Korrosionsarten weichen untereinander ab. Bezeichnungen und Angaben sind oftmals unklar oder nicht plausibel. Deswegen sollte künftig zur Unterstützung einer verbesserten und effektiven Rohrnetzbewertung eine genaue Definition und Beschreibung relevanter Erfassungskriterien vorgenommen werden. Erste Aktivitäten diesbezüglich wurden parallel zur Arbeit in Zusammenarbeit mit einem Dienstleister für softwaregestützte Rohrnetzbewertungen über eine sog. Rohrnetzmeister-Befragung begonnen [205].

15.3 Zusammenfassung

Über die materialtechnische Zustandsuntersuchung ist es möglich, den technischen Zustand der Rohrschubstanz einer Wasserversorgungsleitung auch ohne zuvor eingetretenes Schadensereignis zu bewerten. Anhand des technischen Zustands lässt sich über das in der Arbeit erstellte Prognosekonzept der Ausfallzeitpunkt und die Sanierungsfähigkeit eines Rohrleitungsstrangs bestimmen. Mit diesen Ergebnissen sind die Schritte für eine Strategie und Umsetzung der Netzrehabilitation nach DVGW-Hinweis W 401 zu ergänzen. Mit der passenden Rehabilitationsmaßnahme wird kostenintensiven Schäden vorgebeugt.

Die Umsetzung der materialtechnischen Zustandsuntersuchung und des erstellten Prognosekonzepts vollzieht sich über die in der Arbeit erstellten Ansätze (siehe auch Diagramm 65):

- Die Berücksichtigung der Weiterentwicklung von Herstellungsverfahren und Werkstoffeigenschaften metallischer Rohrleitungen erfolgt über die Einteilung in Rohrgenerationen. Es wurde in vier Grauguss-, drei Duktiguss- und fünf Stahlrohrgenerationen eingeteilt. Sie bilden die Grundlage für alle weiteren Betrachtungen.
- Die Zugfestigkeit des Rohres ist als die wesentliche Werkstoffeigenschaft zur Beurteilung der Resttragfähigkeit heranzuziehen.

- Die innerhalb der Arbeit erstellten Verhältnisgleichungen lassen eine Beurteilung und einen Vergleich der relativen Schädigung der Rohrsubstanz durch Korrosion und somit die Bestimmung des Ist-Zustands zu.
- Der Ist-Zustand der Rohrsubstanz, die modifizierte statistische Nutzungsdauer je Rohrgeneration und die tragfähige Mindestwanddicke eines Rohres sind die Eingangsdaten für die Prognose und Korrektur der technischen Nutzungsdauer.
- Die Prognose bzw. Korrektur der technischen Nutzungsdauer erfolgt über das innerhalb der Arbeit erstellte mathematische Modell, bei welchem der Verlauf einer annähernd linearen Zustandsverschlechterung mit den eben erwähnten Eingangsdaten verglichen wird.
- Da der technische Ist-Zustand auch an Rohrproben festgestellt werden kann, welche bspw. im Zuge von Armaturenwechsel oder Rohreinbindungen ausgebaut wurden, ist eine Zustandsbewertung des zugehörigen Rohrstrangs ohne vorhergehenden Schadenseintritt durchführbar. Somit sind vorbeugende Maßnahmen zum Substanzerhalt der Rohrleitungsnetze, wie z. B. die Sanierung bei ausreichender statischer Resttragfähigkeit der Rohrleitung, möglich.
- Die im Rahmen der technischen Zustandsbewertung durchgeführten Korrosionsversuche haben keine signifikanten Unterschiede der Korrosionsrate zwischen den jeweiligen Rohrgenerationen gezeigt. Die in der Literatur angegebenen Korrosionsraten sind in Abhängigkeit der Bodenaggressivität für alle metallischen Rohrgenerationen anwendbar.
- Querbruchgefährdete Graugussrohre werden über die Berechnung von Längsbiegespannungen nach dem in der Arbeit erstellten Ansatz markiert.

Den Wasserversorgungsunternehmen wird über das in der Arbeit erstellte Konzept die Möglichkeit gegeben, die Prognose der technischen Nutzungsdauer zu präzisieren und Schadensereignissen vorzubeugen. Dadurch wird ein sinnvoller und nachhaltiger Finanzmitteleinsatz im Rahmen von Rehabilitationsplanungen (Planungen zur Sanierung oder Erneuerung) für städtische Trinkwasserversorgungsnetze ermöglicht und die Erhaltung einer hoher Versorgungsqualität gewährleistet.

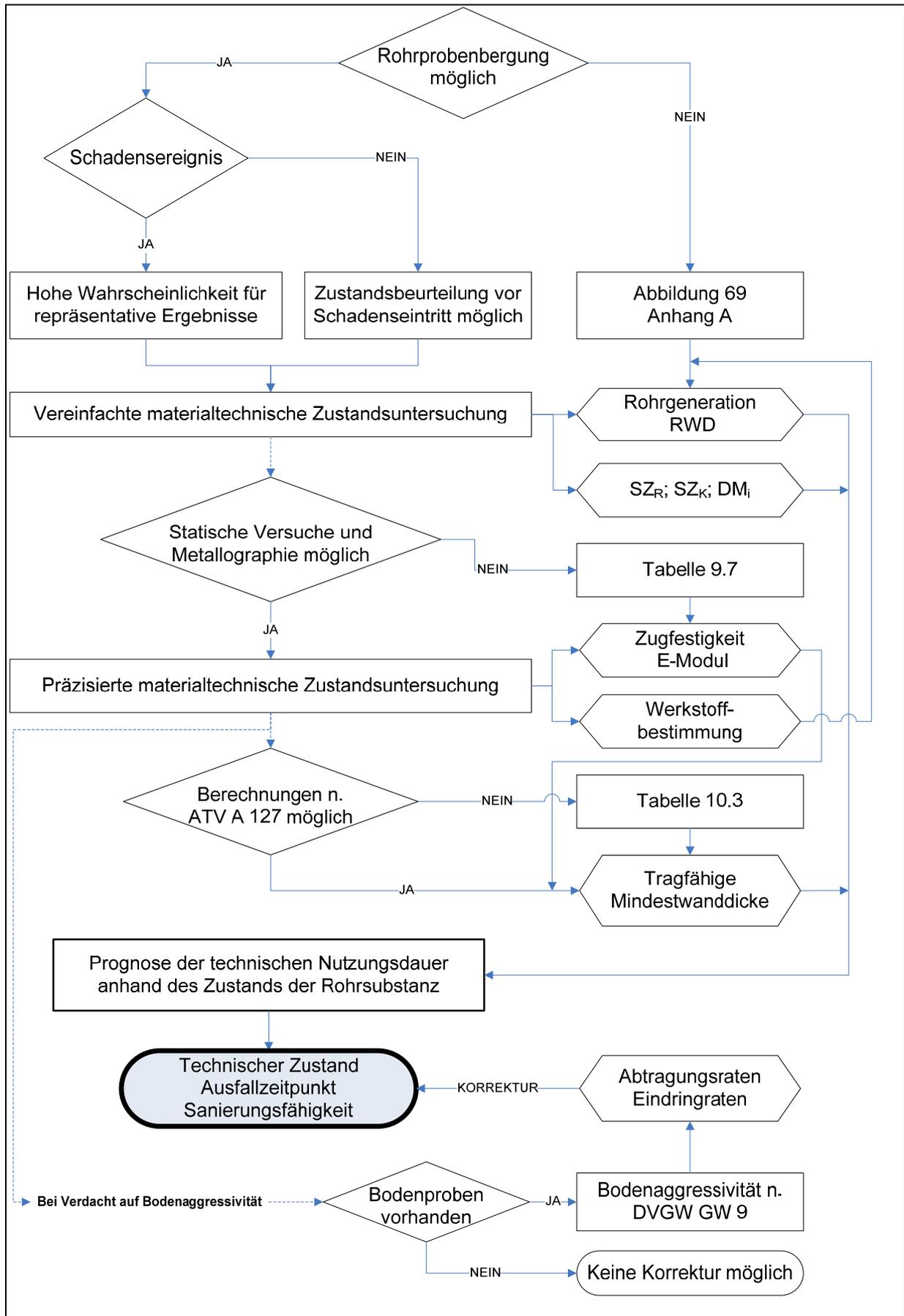


Diagramm 65: Ablaufschema zur Prognose und Korrektur der technischen Nutzungsdauer nach dem in der Arbeit erstellten Konzept

Anhang A – Auflistung geometrischer Abmessungen, geordnet nach Rohrgenerationen

Die folgenden Tabellen sollen bei der Bestimmung der Rohrgeneration durch Vergleich mit typischen Abmessungen der Rohre beitragen. Zusätzlich sind bei Unkenntnis über die ursprünglichen Rohrabmessungen für statische Berechnungen (z. B. tragfähige Mindestwanddicke) die notwendigen Maße aus den folgenden Tabellen auszuwählen.

Ältere Angaben in Zoll wurden der Übersicht wegen in Millimeter umgerechnet und notfalls gerundet. Die Angabe der Nennweite in Zoll war bis in die 1960er Jahre hinein noch gängig. Zur damaligen Zeit (bis ca. 1936) war es außerdem üblich, die Rohrnennweite für Versorgungsleitungen in Städten zwecks Brandbekämpfung nicht kleiner als 80 mm auszuführen (100 mm bei großen Städten) [115].

Graugussrohre

Stand: 1904

Quelle: Oesten und Frühling 1904; [96]

Gültig für: Graugussrohre

Lichte Weite des Rohres	normale Wandstärke	äußerer Durchmesser des Rohres	innerer Durchmesser der Muffe	äußerer Durchmesser der Muffe	Muffentiefe	Dichtungstiefe	übliche Rohrlänge
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
40	8	56	70	116	74	62	3000
50	8	66	81	127	77	65	3000
60	8,5	77	92	140	80	67	3000
70	8,5	87	102	150	82	69	3500
80	9	98	113	163	84	70	3500
90	9	108	123	173	86	72	3500
100	9	118	133	183	88	74	4000
125	9,5	144	159	211	91	77	4000
150	10	170	185	239	94	79	4000
175	10,5	196	211	267	97	81	4000
200	11	222	238	296	100	83	4000
225	11,5	264	264	324	100	83	4000
250	12	274	291	353	103	84	4000
275	12,5	300	317	381	103	84	4000
300	13	326	343	409	105	85	4000
325	13,5	352	369	437	105	85	4000

Stand: 1912
 Quelle : Brockhaus 1912; [172]
 Gültig für: Muffenverbindungen; Flanschverbindungen

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	9	80	98
90	9	90	108
100	9	100	118
125	9,5	125	144
150	10	150	170
175	10,5	175	196
200	11	200	222
225	11,5	225	248
250	12	250	274
275	12,5	275	300
300	13	300	326

Stand: 1942
 Vorschrift: DIN 2432; DIN 2422 [199; 200]
 Gültig für: Muffen- und Flanschverbindungen

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	8,5	80	97
90	8,5	90	107
100	9	100	118
125	9,5	125	144
150	10	150	170
175	11	175	197
200	11	200	222
225	12	225	249
250	12	250	274
275	12	275	299
300	13	300	326

Stand: 1953
 Quelle: DIN 2431 [201]
 Gültig für: Muffenverbindungen

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	8	82	98
100	8	102	118
125	8,5	127	144
150	9	152	170
175	9,5	177	196
200	10	202	222
250	11	252	274
300	11,5	303	326

Stand: 1970
 Quelle : TGL 14389 [131]
 Gültig für: Muffenverbindungen

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	9	80	98
100	9	100	118
150	10	150	170
200	11	200	222
250	12	250	274
300	13	300	326

Stand: 1970
 Quelle : TGL 14389 [131]
 Gültig für: Flanschverbindungen

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	8,5	80	97
100	9	100	118
150	10	150	170
200	11	200	222
250	12	250	274
300	13	300	326

Stand: 1977
 Quelle: Degen 1977 [109]
 Gültig für: Schraubmuffenrohre (Einschiebmuffen System LKH)

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
50	8	50	66 ± 2
80	9	80	98 ± 2
100	9	100	118 ± 2
150	10	150	170 ± 2,5
200	11	200	222 ± 2,5
250	12	250	274 ± 3
300	13	300	326 ± 3

Duktilgussrohre

Stand: 1969 (Entwurf 1966)
 Quelle : DIN 28610 [173]
 Gültig für: Schraub- ; Flansch- und zugfeste Steckverbindungen (TYTON)

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	6,0	86,0	98,0
100	6,1	105,8	118,0
125	6,2	131,6	144,0
150	6,5	157,0	170,0
200	7,0	208,0	222,0
250	7,5	259,0	274,0
300	8,0	310,0	326,0

Stand: 1969
 Quelle : DIN 28610 [173]
 Gültig für: Doppelflanschverbindungen

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	8,1	81,8	98,0
100	8,4	101,2	118,0
125	8,8	126,4	144,0
150	9,1	151,8	170,0
200	9,8	202,4	222,0
250	10,5	253,0	274,0
300	11,2	303,6	326,0

Stand: 2002
 Quelle : DIN EN 545 [29]
 Gültig für: Muffenverbindungen

DN	Wanddicke	Zementmörtel- auskleidung	Innendurchmesser (ohne ZMA)	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	4,8 / 6,0 / 6,0	3,5	88,4 / 86,0 / 86,0	98
100	4,8 / 6,0 / 6,0	3,5	108,4 / 106,0 / 106,0	118
125	4,8 / 6,0 / 6,2	3,5	134,4 / 132,0 / 131,6	144
150	5,0 / 6,0 / 6,5	3,5	160,0 / 158,0 / 157,0	170
200	5,4 / 6,3 / 7,0	3,5	211,2 / 209,4 / 208,0	222
250	5,8 / 6,8 / 7,5	3,5	262,4 / 260,4 / 259,0	274
300	6,2 / 7,2 / 8,0	3,5	313,6 / 311,6 / 310,0	326

Stahlrohre

Stand: 1904
 Quelle: Oesten und Frühling 1904 [96]
 Gültig für: nahtlose Stahlmuffenrohre der Mannesmann-Werke

lichte Weite des Rohres	lichte Weite der Muffe	normale Wandstärke	Stärke der Dichtungsfuge	Muffentiefe
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
75	97	3,5	7,5	91
80	102	3,5	7,5	111
90	112,5	3,75	7,5	113
100	123	4,0	7,5	115
125	148	4,0	7,5	118
150	174	4,5	7,5	122
175	200	5,0	7,5	127
200	227	5,5	8,0	135
225	254	6,5	8,0	135
250	282	7,0	8,0	139

Stand: 1904
 Quelle: Oesten und Frühling 1904 [96]
 Gültig für: nahtlose Stahlmuffenrohre (Thyssen & Co.)

lichte Weite des Rohres	lichte Weite der Muffe	normale Wandstärke	Stärke der Dichtungsfuge	Muffentiefe
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
75	96,5	3,25	7,5	109
82,5	104	3,25	7,5	112
88,5	110	3,25	7,5	115
100,5	123	3,25	7,5	122
125	148	4,0	7,5	126
150	174	4,5	7,5	135
175	200	5,0	7,5	137
200	227	5,5	8,0	139
228	257	6,5	8,0	146
253	284	7,0	8,5	150
277	309	7,5	8,5	150
303	335	7,5	8,5	156

Stand: 1912
 Quelle : Brockhaus 1912 [172]
 Gültig für: Mannesmannrohre – Schmiedeeiserne Rohre

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	3,5	80	87
90	3,75	90	97,5
100	4	100	108
125	4	125	133
150	4,5	150	159
175	5	175	185
200	5,5	200	211

Stand: 1912
 Quelle : Brockhaus 1912 [172]
 Gültig für: Thyssenrohre – Schmiedeeiserne Rohre

Nennweite (lichte Weite)	Nennweite (optional)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[Zoll]	[mm]	[mm]	[mm]
82,5	3 1/4	3,25	82,5	89
88,5	3 1/2	3,5	88,5	95,5
100,5	4	3,75	100,5	108
125		4	125	133
150		4,5	150	159
175		5	175	185
200		5,5	200	211
228	9	6,5	228	241
253	10	7	253	267
277	11	7,5	277	292
303	12	7,5	303	318

Stand: 1936
 Quelle: Akademischer Verein Hütte e.V. 1936 [115]
 Gültig für: nahtlose Flusstahlrohre

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	3,50	80	87
90	3,75	90	97,5
100	4,00	100	108
125	4,00	125	133
150	4,50	150	159
175	5,50	175	186
200	5,50	200	211
225	6,50	225	238
250	7,00	250	264
275	7,50	275	290
300	7,75	300	315,5

Stand: 1950
 Quelle : Rheinische Röhrenwerke AG 1950 [111]
 Gültig für: nahtlose Stahlmuffenrohre; Einsteckschweißmuffe

lichte Weite des Rohres	Außendurchmesser	Wanddicke	Muffentiefe
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
65	76	3	50
80	87	3,5	50
100	108	4	55
125	133	4	60
150	159	4,5	65
200	211	5,5	80
250	264	6	90
300	321	7	105
350	368	8	115

Stand: 1950
 Quelle : Rheinische Röhrenwerke AG 1950 [111]
 Gültig für: nahtlose Stahlrohre; Sigurmuffe

lichte Weite des Rohres	Außendurchmesser	Wanddicke	Muffentiefe
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
65	76	3	275
80	87	3,5	275
100	108	4	275
125	133	4	300
150	159	4,5	300
200	211	5,5	315
250	264	6	320
300	321	7	320
350	368	8	320

Stand: 1950
 Quelle : Rheinische Röhrenwerke AG 1950 [111]
 Gültig für: nahtlose Stahlrohre, Schraubmuffe

Nennweite	Außen- durchmesser	Wanddicke	Muffentiefe Schraubmuffe A	Muffentiefe Schraubmuffe B
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
65	76	3	55	65
80	87	3,5	60	65
100	108	4	65	70
125	133	4	70	70
150	159	4,5	70	80
200	211	5,5	80	90
250	264	6	85	100
300	321	7	100	110
350	368	8	105	-

Stand: 1960
 Quelle: DIN 2440 [202]
 Gültig für: nahtlos, Gewindeverbindungen

Nennweite (lichte Weite)	Nennweite (optional)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[Zoll]	[mm]	[mm]	[mm]
80	3	4,1	80,7	88,9
100	4	4,5	105,3	114,3
125	5	4,85	130	139,7
150	6	4,85	155,4	165,1
80	3	4,1	80,7	88,9
100	4	4,5	105,3	114,3
125	5	4,85	130	139,7
150	6	4,85	155,4	165,1

Stand: 1966
 Quelle: DIN 2460 [207]
 Gültig für: nahtlos; Schraub-, Steck- und Kugelmuffenverbindungen

Nennweite (lichte Weite)	Wanddicke	Innendurchmesser	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	3,5	80	87
100	4	100	108
125	4	125	133
150	4,5	150	159
200	5,5	200	211
250	6	252	264
300	7	302	316

Stand: 1992
 Quelle: DIN 2460 [30]
 Gültig für: geschweißt; Steckverbindungen

DN	Wanddicke	Innendurchmesser (ohne ZMA)	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
100	3,2	111,1	117,5
125	4	136	144
150	4	160,3	168,3
200	4,5	210,1	219,1
250	5	263	273
300	5,6	312,7	323,9

Stand: 1992
 Quelle: DIN 2460 [30]
 Gültig für: geschweißte Stahlrohre

DN	Wanddicke	Innendurchmesser (ohne ZMA)	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	3,2	82,5	88,9
100	3,2	107,9	114,3
125	3,6	132,5	139,7
150	3,6	161,1	168,3
200	3,6	211,9	219,1
250	4	265	273
300	4,5	314,9	323,9

Stand: 1992
 Quelle: DIN 2460 [30]
 Gültig für: nahtlos Stahlrohre

DN	Wanddicke	Innendurchmesser (ohne ZMA)	Außendurchmesser
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
80	3,2	82,5	88,9
100	3,6	107,1	114,3
125	4	131,7	139,7
150	4,5	159,3	168,3
200	6,3	206,5	219,1
250	6,3	260,4	273
300	7,1	309,7	323,9
350	9	361,0	355,6

Stand: 1970
 Quelle: TGL 9012; TGL 14514 [137; 203]
 Gültig für: nahtlos, geschweißt Stahlrohre

Aufgrund der umfangreichen und detailreichen Maßvorgaben für Durchmesser und Wanddicke dieser Stahlrohre wurde auf eine tabellarische Übersicht verzichtet.

-
- [1] Roscher, H: Das 21. Jahrhundert – Jahrhundert der Rehabilitation unserer Wasserversorgungsnetze, in: gwf Wasser Abwasser, 146. (2005), Nr. 12, S. 912-923.
- [2] Böhm, A: Betrieb, Instandhaltung und Erneuerung des Wasserrohrnetzes, Schriftenreihe Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, Vulkan-Verlag Essen 1993.
- [3] Roscher, H.; Sorge, H.-C.: Materialtechnische Zustandsuntersuchung von Wasserrohrleitungen, in: bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 56. (2005), Nr. 9, S. 18-24.
- [4] Skarda, C.: Außenkorrosion und Wasserrohrnetz-Erhaltung in: gwa Gas Wasser Abwasser, 73. (1993), Nr. 1, S. 1-4.
- [5] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. Wasserinformation Nr. 67 – Dezember 2002, DVGW-Schadensstatistik Wasser, Auswertungen für die Erhebungsjahre 1997-1999, Bonn 2002.
- [6] o. V.: Übergabe von 600.000 anonymisierten Datensätzen zum Rohrnetzbestand beliebig ausgewählter deutscher Wasserversorgungsunternehmen, Büro für Rohrnetzanalysen (BfR), Neuenhagen, 22.08.2005.
- [7] Stadtfeld, R: Die öffentliche Wasserversorgung 1970-1990 in: gwf Wasser Abwasser, 132. (1991), Nr.12, S. 660- 670.
- [8] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen, Teil 3: Betrieb und Instandhaltung, Arbeitsblatt W 400-3 (Entwurf), August 2004.
- [9] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. Entscheidungshilfen für Rehabilitation von Wasserrohrnetzen, Hinweis W 401, September 1997.
- [10] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. Schadensstatistik für Wasserrohrnetze, Merkblatt W 395, Juli 1998.
- [11] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK) e. V. Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen, Arbeitsblatt A 127, August 2000.
- [12] Zenz, T.: Überarbeitung W 395 (M) Anhang 4 „Formblätter zur Schadensstatistik“ – Ankündigung der Veröffentlichung in: DVGW (Hrsg.), energie | wasser-praxis, 57 (2006), Nr. 7 + 8, S. 76
- [13] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. Beurteilung von Böden hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens auf erdverlegte Rohrleitungen und Behälter aus unlegierten und niedriglegierten Eisenwerkstoffen, Arbeitsblatt GW 9, März 1986.

-
- [14] Roscher, H. u. a.: Sanierung städtischer Wasserversorgungsnetze - Strategien, Verfahren, Fallbeispiele der Rehabilitation; Verlag Bauwesen, Berlin 2000.
- [15] Buckler, M.; Sattler, R.: DVGW-Statistik Wasser, erste Auswertung und Umsetzung in: gwf Wasser Spezial, 140. (1999), Nr. 13, S. 48 - 53
- [16] Kleiner; Rajani: Forecasting variations and trends in water-main breaks, Institute for research in construction, national research council Canada in: Journal of Infrastructure Systems, 8 (2002), Nr. 4, S.122-131.
- [17] Kleiner; Rajani: water main assets: from deterioration to renewal, Institute for research in construction, national research council Canada in AWWA annual conference, Anaheim 2003, S.1-12.
- [18] Kocks, H.-J.: Die Bedeutung des Stahlrohres in der Rehabilitation von Rohrleitungen in: gwf Wasser Abwasser, 147. (2006), Nr.1, S. 53-60.
- [19] Kottmann, A.: Auswertungen von Langzeitbeobachtungen in einem großstädtischen Rohrnetz, Diss. Stuttgart 1976.
- [20] Michalik, P.: Beitrag zur Ermittlung des ökonomisch günstigen Rekonstruktionszeitpunktes von Wasserversorgungsleitungen unter Nutzung des Datenbankteils Wasserversorgungsnetze, Diss. Dresden 1985.
- [21] Busch, H. in: Lenz, J.; John, H.-J. (Hrsg.): Ertüchtigung, Sanierung, Erneuerung von Druckrohrleitungen, Vulkan-Verlag, Essen 1996.
- [22] Roscher, H u. a.: Vergleich von Bewertungssystemen für Rohrleitungen, Wasser- und Gasrohrnetze, Abschlussbericht zum DVGW-Forschungsvorhaben GW 3/04/02, Erfurt 2005.
- [23] o. V.: Kostenvorteile der Rohrleitungssanierung in Deutschland werden nicht ausgeschöpft, Studie des Instituts für Rohrleitungsbau Oldenburg in: 3R international, 44 (2005), Nr. 6, S. 356.
- [24] Sorge, H.-C.: Untersuchungen zur flächendeckenden Rehabilitation von Wasserversorgungsnetzen dargestellt an Beispielen der Stadt Erfurt, Diplomarbeit Erfurt 2002.
- [25] Rötsch, D.: Zuverlässigkeit von Rohrleitungssystemen, Fernwärme und Wasser, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1999.
- [26] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen, Teil 1: Planung, Arbeitsblatt W 400-1, Oktober 2004.
- [27] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 28500: Gusseiserne Druckrohre und Formstücke, technische Lieferbedingungen, August 1977.
- [28] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 1561: Gießereiwesen; Gusseisen mit Lamellengraphit, August 1997.

- [29] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 545: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für Wasserleitungen, Anforderungen und Prüfverfahren, September 2002.
- [30] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 2460 (Entwurf): Stahlrohre und Formstücke für Wasserleitungen, März 2005
- [31] Jaszewski, A.: Betrachtungen der Entwicklung von Wahrscheinlichkeitsprognosen hinsichtlich der Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit von Gas- und Wassernetzen zur Implementierung in das GIS der Energienetze Braunschweig GmbH, Diplomarbeit Oldenburg 2003
- [32] National Research Council Canada, Institute for Research in Construction: Urban infrastructure rehabilitation, Collaborative project to study failure mechanisms in grey cast-iron pipes, 9/01, http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/ci/v6no3/v6no3_9_e.html, 25. Jan. 2006.
- [33] Najjaran u.a.: Fuzzy expert system to assess corrosion of cast/ductile iron pipes from backfill properties, national research council Canada, in: Computer-aided civil and Infrastructure engineering, 21 (2006), Nr. 1, S. 67-77.
- [34] Hofer, P.: Planung der langfristigen Erneuerungen von Wasserrohrnetzen in: 3R international, 33 (1994), Nr. 1/2, S.19-25.
- [35] Herz, R.: Alterung und Erneuerung von Infrastrukturbeständen - ein Kohortenüberlebensmodell in: Gesellschaft für Regionalforschung (Hrsg.), Jahrbuch für Regionalwissenschaft, Physica-Verlag, Heidelberg 1995.
- [36] Kottmann, A. in: Lenz, J.; John H.-J.(Hrsg.); Ertüchtigung, Sanierung, Erneuerung von Druckrohrleitungen; Hochschule-Kolleg für Ingenieure im Rohrleitungsbau; Vulkan-Verlag Essen 1996.
- [37] Ahrens, J.: Bestimmung der optimalen Rehabilitationsrate für das Wasserrohrnetz von Berlin, Vortrag zum 4. Thüringer Wasserkolloquium an der Fachhochschule Erfurt, 27.05.1999.
- [38] Schmidt, D.: Trends, Benchmarks für die Rehabilitation und Bewertung von Wasserversorgungssystemen, dargestellt am Beispiel der Landeshauptstadt Erfurt; Diss. Dresden 2002.
- [39] Brussig, P.: Die Sanierung erdverlegter Druckwasserleitungen aus Stahl und Grauguss – Untersuchungs- und Entscheidungskriterien für eine Auskleidung mit Zementmörtel in: 3R international, 33 (1994), Nr. 7, S. 350-355.
- [40] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. Sanierung von erdverlegten Guss- und Stahlrohrleitungen durch Zementmörtelauskleidung - Einsatzbereiche, Anforderungen, Gütesicherung und Prüfungen; Arbeitsblatt W 343, April 2005.

- [41] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. Rehabilitation von Gas- und Wasserrohrleitungen durch PE-Reliningverfahren mit/ohne Ringraum, Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung, Arbeitsblatt GW 320 1/2, Juni 2000.
- [42] Nowak, K.-E.: Korrosionsdiagnostik – Ein Beitrag zur qualifizierten Rehabilitation von Stahlrohrleitungen in: 3R international, 42 (2003), Nr. 6, S. 409-414.
- [43] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN ISO 2178: Nichtmagnetische Überzüge auf magnetischen Grundmetallen, Messen der Schichtdicke, Magnetverfahren, April 1995.
- [44] American Society for Testing and Materials (ASTM) Standard Test Method for Measurement of Coating Thicknesses by the Magnetic Method: Nonmagnetic Coatings on Magnetic Basis Metals, ASTM B499-96, 2002.
- [45] Kaesche, H.: Die Korrosion der Metalle, 3. Aufl., Springer-Verlag, Berlin usw. 1990.
- [46] Steinrath, H.: Untersuchungsmethoden zur Beurteilung der Aggressivität von Böden in: DVGW Fachausschuss „Korrosion Rohrnetz“ (Hrsg), Frankfurt 1966.
- [47] Käpplein, R.: Untersuchung und Beurteilung alter Gusskonstruktionen in: Stahlbau, 66 (1997), Nr. 6, S. 318-332.
- [48] American Society of Mechanical Engineers (ASME) Determining Remaining Strength of Corroded Pipelines: Supplement to B31 Code-Pressure Piping, ASME B31G (Manual), 1991
- [49] Veenker, M.: Fragen der Sicherheitsphilosophie bei der Bewertung von Wanddickenverschwächungen in: 3R international, 40 (2001), Nr. 10/11, S. 651-653.
- [50] Falter, B.; Veenker, M. in: Lenz, J.; John, H.-J. (Hrsg.): Ertüchtigung, Sanierung, Erneuerung von Druckrohrleitungen, Vulkan-Verlag, Essen 1996
- [51] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK) e. V. Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen, Teil 2: Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen mit Lining- und Montageverfahren, Arbeitsblatt A 127-2, Januar 2000.
- [52] Verband der Technischen Überwachungs-Vereine (VdTÜV) e.V. Rohrfernleitungen: Technische Richtlinien zur statischen Berechnung eingeeerdeter Stahlrohre, VdTÜV-Merkblatt 1063, Mai 1978.
- [53] Hauch, S.; Bai, Y. in: American Bureau of Shipping (Hrsg.): Bending Moment Capacity of Groove Corroded Pipes, Houston 2000.

-
- [54] Galambos, T. V.: Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 5. Aufl., John Wiley & Sons, Inc., o. O. 1998.
- [55] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 1594: Gasversorgungssysteme, Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar, Funktionale Anforderungen, Anhang B: Setzungen, September 2000.
- [56] Petersen, C.: Stahlbau - Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden 1993.
- [57] Fahrenwaldt, H. F: Festigkeitsuntersuchungen an Rohren für erdverlegte Trinkwasserleitungen, Diss. Stuttgart 1968.
- [58] Seidel, W.: Werkstofftechnik, Werkstoffe, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung, Carl Hanser Verlag, München, Wien 2005.
- [59] Murakami, Y. u. a. in: The Society of Materials Science, Japan & Elsevier Sciences Ltd (Hrsg.): Stress Intensity Factors Handbook – Volume 5, Kyodo Insatsu Kogyo Co. Ltd, Kyoto 2001.
- [60] Klecker, R. u. a.: NRC Leak-Before-Break (LBB.NRC) Analysis Method for Circumferentially Through-Wall Cracked Pipes under Axial Plus Bending Loads, Report Nr. NUREG/CR-4572, USA 1986.
- [61] Haggag; Phillips: Integrating automated ball indentation with ASME B31G code to assess integrity of corroded pipelines, Vortrag zur International Pipeline Conference IPC, Calgary, 4.-8. Okt. 2004.
- [62] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 1563: Gießereiwesen - Gusseisen mit Kugelgraphit, Februar 2003.
- [63] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN ISO 18265: Metallische Werkstoffe – Umwertung von Härtewerten, Februar 2004.
- [64] National Research Council Canada, Institute for Research in Construction (Hrsg.): Expert feedback sought to improve prediction of corrosion in water mains, Urban infrastructure rehabilitation, Collaborative project to study failure mechanisms in grey cast-iron pipes in: Construction Innovation, 9 (2004), Nr.1, S. 6.
- [65] National Research Council Canada, Institute for Research in Construction: Effect of aging water mains on water quality in distribution systems, Urban Infrastructure, research, buried utilities, 1/06, http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ui/bu/agingwater_e.html, 25. Jan. 2006.
- [66] Stock, C: Analyse mehrachsiger Eigenspannungsverteilungen im intermediären Werkstoffbereich zwischen Oberfläche und Volumen mittels energiedispersiver Röntgenbeugung, Diss. Berlin 2003.

- [67] National Research Council Canada; Institute for Research in Construction: Failures in Gray Cast Iron Distribution Pipes, Urban Infrastructure, research, buried utilities, 5/05, http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ui/bu/grayindex_e.html, 25. Jan. 2006.
- [68] o. V.: Alterung und Erneuerung städtischer Infrastrukturnetze, Forschungsprojekte des Lehrstuhls Stadtbauwesen an der TU Dresden, 8/06, http://www.tu-dresden.de/stadtbau/stbw_forschung.html, 25. Aug. 2006.
- [69] Ministerium der öffentlichen Arbeiten (Hrsg.): Centralblatt der Bauverwaltung, Jahrgang VII, Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1887.
- [70] Fachgemeinschaft Gusseiserne Rohre (Hrsg.): Gusseiserne Rohre, Entwicklung, Herstellung, Verwendung; Köln 1954.
- [71] Richter, H. W.: Instandsetzung von Rohrleitungen – Bd.1 Rehabilitation von Rohrleitungen; Vulkan-Verlag, Essen 2004.
- [72] Gesellschaft für Bildung und Technik mbH (Hrsg.): Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I + II; Paetec, Berlin 1996.
- [73] Schwaigerer, S.: Rohrleitungen, Theorie und Praxis; Springer-Verlag, Berlin usw. 1967.
- [74] Gockel, B.: Die Entwicklung von Guss- und Stahlrohren für die Wasserverteilung, Heft 10 der Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, (Hrsg.), Köln/Bonn 1986.
- [75] Mündl. Auskunft: Gespräch mit Herrn U. Müller, Leiter Qualitätswesen, Keulahütte Krauschwitz GmbH, 20.06.2005.
- [76] Ledebur, A.: Atlas zum Handbuch der Eisengießerei, Verlag Bernhard Friedrich Voigt, Weimar 1883.
- [77] Smith, W. H.: Neuere technologische Fortschritte in der Gussrohrindustrie der USA in: FGR Fachgemeinschaft Gusseiserne Rohre (Hrsg.): Rohre für Gas und Wasser, Informationen für das Gas- und Wasserfach, Nr. 8 (1973), S. 19-27.
- [78] Reeh, K.; Gockel, B.: Das Herstellen von Gussrohren war eine Kunst, Heft 12 der Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, (Hrsg.), Köln/Bonn 1988.
- [79] Fachgemeinschaft Gusseiserne Rohre (Hrsg.): Handbuch Gussrohrtechnik, Köln 1996.
- [80] Weber, H.; Hermanns, H.: Die Gussröhren-Herstellung in der festen Form und Schleuder Form, Verlag von Wilhelm Knapp, Halle (Saale), 1927.
- [81] Pasternak, M. u. a.: Fachkunde für Former und Gießer, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969.

- [82] Pohl, H.: Buderus 1935 – 1995, Band 3 der Unternehmensgeschichte, Buderus AG (Hrsg.), Wetzlar 2001.
- [83] Müller, W.: Die Entwicklung der Gussrohrverbindungen an Beispielen aus Baden-Württemberg in: Fachgemeinschaft Gusseiserne Rohre (Hrsg.): FGR Gussrohrtechnik, Nr. 19 (1984), S.19-24.
- [84] Schweizer Verband für die Materialprüfungen der Technik (Hrsg.): Schleudergussröhren der L. von Roll'schen Eisenwerke Gerlafingen, Eisenwerk Choindéz; Bericht Nr.12, Zürich 1928.
- [85] Pardun, C.: Gusseiserne Rohre für Gas- und Wasserleitungen, 1. Aufl., Verlag W. Girardet, Essen 1950.
- [86] Kittner, H. u. a.: Wasserversorgung, 2. Aufl., VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1966.
- [87] Kottmann, A.: Aus der Geschichte des gusseisernen Rohres, Heft 10 der Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, (Hrsg.), Köln/Bonn 1986.
- [88] o. V: Editorial in: Fachgemeinschaft Gusseiserne Rohre (Hrsg.): FGR Rohre für Gas und Wasser, Informationen für das Gas- und Wasserfach, Nr. 10 (1975), S. 1.
- [89] Schaffland, R.: Eigenschaften duktiler Gussrohre in: Fachgemeinschaft Gusseiserne Rohre (Hrsg.): FGR Rohre für Gas und Wasser, Informationen für das Gas- und Wasserfach, o. J. [1964?], S. 2-5.
- [90] Köhler, F.: Bedarfsentwicklung, Herstellungsverfahren und Produktionsorganisation der deutschen Stahlröhrenindustrie, Akademischer Verlag, Halle 1934.
- [91] Schuhmann, H.: Metallographie, 13. Aufl., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1991.
- [92] Wessel, H. A.: Die Geschichte des Rohres, insbesondere des Mannesmann-Rohres, und seine Bedeutung für die moderne Wasserversorgung in: Heft 10 der Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, (Hrsg.), Köln/Bonn 1986.
- [93] Stradtman, F. H.: Stahlrohrhandbuch, Vulkan-Verlag, Essen 1940.
- [94] Beratungsstelle Stahl (Hrsg.): Korrosionsschutz erdverlegter Stahlrohrleitungen, Merkblatt 424, o. O., 1968.
- [95] Grahn, E.: Die Art der Wasserversorgung der Städte des deutschen Reiches mit mehr als 5000 Einwohnern, Druck und Verlag von R. Oldenbourg, München/Leipzig 1883.
- [96] Oesten, G.; Frühling, A.: Die Wasserversorgung der Städte in: Der Wasserbau, III. Teil des Handbuchs der Ingenieurwissenschaften, Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig 1904.

- [97] Fachgemeinschaft Gusseiserne Rohre (Hrsg.): Gussrohr-Handbuch, Duktile Gussrohre und Formstücke; Vulkan-Verlag Essen 1969.
- [98] Bundesministerium des Inneren (Hrsg.): Studie über erdverlegte Trinkwasserleitungen aus verschiedenen Werkstoffen, o. O., 1971.
- [99] Bundesministerium des Inneren (Hrsg.): Studie über erdverlegte Trinkwasserleitungen aus verschiedenen Werkstoffen, Anlage 9 – Korrosion und Korrosionsschutz, o. O., 1971.
- [100] Versch.: Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, Band 1 – Rohrnetztechnik, 6. Ausgabe, Vulkan-Verlag Essen 1999.
- [101] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. FZM-Ummantelung zum mechanischen Schutz von Stahlrohren und -formstücken mit Polyolefinumhüllung, Arbeitsblatt GW 340, April 1999.
- [102] Wolf, W.: Korrosionsschutz von duktilem Gusseisen durch Spritzverzinkung mit Deckschichtbildung in: Fachgemeinschaft Gusseiserne Rohre (Hrsg.): Rohre für Wasser und Gas, Informationen für das Gas- und Wasserfach, Nr. 16 (1981), S. 17-20.
- [103] Böhm, A. u. a.: Die wissenschaftlich-technische Vervollkommnung des Sanierungsverfahrens „Auspressen mit Zementmörtel“ – ZMA-Verfahren – zur Qualitätsverbesserung von sanierten Wasserversorgungsleitungen in: wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, 28 (1978), Nr. 6, S.185-188.
- [104] Heinemann H.: Leitfaden und Normal-Entwürfe für die Aufstellung und Ausführung von Wasserleitungsprojekten für Landgemeinden, Verlagsbuchhandlung Paul Parey, Berlin 1906.
- [105] Brinkhaus, P.: Das Rohrnetz städtischer Wasserwerke – dessen Berechnung, Bau und Betrieb, Verlag von R. Oldenbourg, München 1912.
- [106] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 13108-1: Asphalt - Anforderungen, Teil 1: Asphaltbeton (Entwurf), Juni 2001.
- [107] Westdeutsche Mannesmannröhren AG Düsseldorf (Hrsg.): Werkstoffe I; 2. Aufl., Düsseldorf 1952.
- [108] Kottmann A.: Rohre und Rohrwerkstoffe in der Gas- und Wasserversorgung, Schriftenreihe Energie- und Umwelttechnik, Vulkan-Verlag, Essen 1997.
- [109] Degen H. u. a.: Die neue LKH-Muffe für gusseiserne Druckrohrleitungen in: wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, 27 (1977), Nr. 5, S. 157-161.
- [110] Wolf, W.: Das Korrosionsverhalten von Rohren aus duktilem Gusseisen in: Fachgemeinschaft Gusseiserne Rohre (Hrsg.): Rohre für Gas und Wasser, Informationen für das Gas- und Wasserfach, o. J. [1966?], S. 6-11.
- [111] Rheinische Röhrenwerke AG (Hrsg.): Stahlmuffenrohre, Mülheim/Ruhr 1950.

- [112] Fachgemeinschaft PRO AQUA STAHLROHRE e.V. (Hrsg.): Stahlrohre für Wasserleitungen, Anwenderhandbuch, Düsseldorf 1997.
- [113] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN ISO 945: Gusseisen, Bestimmung der Mikrostruktur von Graphit, September 1994.
- [114] LaQue, F. L.: The Corrosion Resistance of Ductile Iron in: Szeliga, M. J.: Corrosion of Ductile Iron Piping, A Compilation of Classic NACE Papers, NACE International, Houston 1995.
- [115] Akademischer Verein Hütte e.V. (Hrsg.): Des Ingenieurs Taschenbuch, Band I, 27. Aufl., Verlag Wilhelm Ernst und Söhne, Berlin 1942.
- [116] Eidgenössische Materialprüfanstalt an der E.T.H. Zürich (Hrsg.): Das Gusseisen, Diskussionsbericht Nr. 37, Zürich 1928.
- [117] Wesley, W. A. u. a.: Some Consequences of Graphitic Corrosion of Cast Iron, Metals and Alloys, 7 (1936), Nr. 12, S. 325.
- [118] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 10020: Begriffsbestimmungen für die Einteilung der Stähle, Juli 2000.
- [119] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 10224: Rohre und Fittings aus unlegierten Stählen für den Transport wässriger Flüssigkeiten einschließlich Trinkwasser, Technische Lieferbedingungen, Dezember 2003.
- [120] Liedtke, D: Wärmebehandlung von Stahl – Härten, Anlassen, Vergüten, Bainitisieren, Stahl-Informations-Zentrum Düsseldorf (Hrsg.), 1995.
- [121] Mündl. Auskunft: Gespräch mit Herrn M. Hofmann, Martin Hofmann Werkstofftechnik Ingenieur- und Sachverständigenbüro, Schwarza/Thür., 14.06.2005.
- [122] Röder, W.: Beitrag zum Tragverhalten erdverlegter zementmörtelgeschleuderter Stahl- und Gussleitungen und zum Grünstand der eingeschleuderten Zementmörtelschichten, Diss. Leipzig 1978.
- [123] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 877: Rohre und Formstücke aus Gusseisen, deren Verbindungen und Zubehör zur Entwässerung von Gebäuden, Anforderungen, Prüfverfahren und Qualitätssicherung, Januar 2000.
- [124] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN ISO 6506: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Brinell, Teil 1: Prüfverfahren, Juli 2005.
- [125] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 10002: Metallische Werkstoffe, Zugversuch, Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, Dezember 2001.

-
- [126] American Society for Testing and Materials (ASTM) Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness, ASTM E140-05e1, 2005.
- [127] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN ISO 18265: Metallische Werkstoffe – Umwertung von Härtewerten, Februar 2004.
- [128] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 1301: Einheiten, Umrechnungen für nicht mehr anzuwendende Einheiten, Teil 3, Oktober 1979.
- [129] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 14400/01: Gussstücke aus unlegierten Gusseisen mit Lamellengraphit, Technische Lieferbedingungen, Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, Mai 1977.
- [130] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 14400/02: Gussstücke aus unlegierten Gusseisen mit Lamellengraphit, Anwendungsrichtlinien, Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, Mai 1977.
- [131] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 14389/01: Gusseiserne Rohre für Druckwasser-Rohrleitungen, Muffenrohre Nenndruck 10 und 16 bar, Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, April 1963.
- [132] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 14400/01: Gussstücke aus unlegierten Gusseisen mit Lamellengraphit, Technische Lieferbedingungen, Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, März 1986.
- [133] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 14400/02: Gussstücke aus unlegierten Gusseisen mit Lamellengraphit, Anwendungsrichtlinien, Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, März 1986.
- [134] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 8189/01: Gussstücke aus unlegierten Gusseisen mit Kugelgraphit, Sandguss, Technische Bedingungen, Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, März 1986.
- [135] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 8189/01: Gussstücke aus unlegierten Gusseisen mit Kugelgraphit, Sandguss, Richtlinien, Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, November 1987.
- [136] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 9413: Nahtlose Stahlrohre aus unlegierten Stählen, technische Güte- und Lieferbedingungen, Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, Juli 1964.
- [137] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 9012: Nahtlose Stahlrohre, warm gewalzt; Maße, Maßabweichungen; Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, Juli 1964.

- [138] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 9414: Nahtlose Stahlrohre, kalt gezogen, kalt gewalzt, technische Güte- und Lieferbedingungen, Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, Juli 1964.
- [139] Deutsches Institut für Normung (DIN) DIN 1691: Gusseisen mit Lamellengraphit (Grauguss), Eigenschaften, Mai 1985
- [140] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 12565: Wasserversorgung, Anleitung für die statische Berechnung von Faserzement-Rohrleitungen, November 1996.
- [141] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 2413: Rohrleitungen, Stahlrohre, Berechnung der Wanddicke gegen Innendruck, Mai 1954.
- [142] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 13480-3: Metallische industrielle Rohrleitungen, Teil 3: Konstruktion und Berechnung, August 2002.
- [143] Deutsches Institut für Normung DIN 2411: Regelwerk für Graugussrohre, o. J. [1926?].
- [144] Brussig, P.: Schäden an erdverlegten Wasserleitungen, Teil 1/2 in: wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, 30 (1990), Nr. 3/4, S.62-64 und S. 95-96.
- [145] Verein deutscher Ingenieure (VDI) VDI 3822: Schadensanalyse, Blatt 3: Schäden durch Korrosion in Elektrolyten (Entwurf), Dezember 2005.
- [146] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 50929 Korrosion der Metalle, Teil 3: Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung, Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern, September 1985.
- [147] National Research Council Canada, Institute for Research in Construction (Hrsg.): IRC researchers investigate cast-iron pipe failure, Urban infrastructure in: Construction Innovation, 4 (1999), Nr. 3, S. 13.
- [148] Doyle, G.: The role of soil in the external corrosion of cast-iron water mains in Toronto, Canada, Masterarbeit Toronto 2000.
- [149] Camitz, G., Vinka, T.-G.: Corrosion of Steel and Metal-Coated Steel in Swedish Soils-Effects of Soil Parameters in: Chaler, V.; Palmer, J. D.: Effects of Soil Characteristics on Corrosion, Special technical Publication, American Society for Testing and Materials ASTM (Hrsg.), Philadelphia 1989.
- [150] Escalante, E.: Concepts of Underground Corrosion in: Chaler, V.; Palmer, J. D.: Effects of Soil Characteristics on Corrosion, Special technical Publication. American Society for Testing and Materials ASTM (Hrsg.), Philadelphia 1989.

- [151] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 12502: Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und Speichersystemen, Teil 5: Einflussfaktoren für Gusseisen, unlegierte und niedriglegierte Stähle, März 2005.
- [152] Böhler, E. u. a.: Entwicklung von Methoden zur Selektion effizienter Spülregime für unbelastete Sektoren in bestehenden Wasserversorgungsnetzen zur Vermeidung von Rostwasserbildung, Forschungsvorhaben des Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, Abschlussbericht, Dresden 2004.
- [153] Friedrich, W.: Tabellenbuch für Bau- und Holzgewerbe, Ausgabe B, 55. – 93. Aufl., Verlag Volk und Wissen GmbH, Berlin /Leipzig 1947.
- [154] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN ISO 8044: Korrosion von Metallen und Legierungen, Grundbegriffe und Definitionen, November 1999.
- [155] Gummow, R. A: The Corrosion of municipal Iron Watermains in: Szeliga, M. J.: Corosion of Ductile Iron Piping, A Compilation of Classic NACE Papers, Nomenclature of economic activities NACE International (Hrsg.), Houston 1995.
- [156] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 30676: Planung und Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes für den Außenschutz, Oktober 1985.
- [157] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 805: Wasserversorgung, Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden, März 2000.
- [158] Weckenbrock, P.: Vermeidung von Leitungsschäden – Initiative Balsibau, Vortrag zur wat Berlin 2006, 04.04.2006.
- [159] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. Bewerten von Baumaßnahmen im Bereich von Wasserversorgungsanlagen, Einflüsse und Schutzmaßnahmen, Merkblatt W 380, Mai 1993.
- [160] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 50930: Korrosion der Metalle, Korrosion metallischer Werkstoffe im Inneren von Rohrleitungen, Behältern und Apparaten bei Korrosionsbelastung durch Wässer, Teil 6: Beeinflussung der Trinkwasserbeschaffenheit, August 2001.
- [161] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) e.V. Ermittlung der erforderlichen Verlegetiefen von Wasseranschlussleitungen, Hinweis W 397, August 2004.
- [162] Leydold, J.: Grundkurs Mathematische Methoden in den Wirtschaftswissenschaften, Versicherungsmathematik, Vorlesungsskript der Wirtschaftsuniversität Wien, Department für Statistik und Mathematik, Wien 2005.

- [163] Meyna, A., Pauli, B.: Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik, Quantitative Bewertungsverfahren, Carl Hanser Verlag, München/Wien 2003.
- [164] Brussig, P.: Planung, Ausschreibug, Vergabe für einen qualitätsgerechten Rohrleitungsbau, Bestimmung des Rehabilitationsbedarfs städtischer Wasserversorgungsnetze, Vortrag zum 4. Thüringer Wasserkolloquium an der Fachhochschule Erfurt, 27. 05. 1999.
- [165] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe, Zugproben (Entwurf), Mai 2003.
- [166] Gerhold, W. F.; Amer, J.: Corrosion Behavior of Ductile Cast-Iron Pipe in Soil Environments in: Journal AWWA, American Water Works Association AWWA (Hrsg.), 68 (1976), Nr. 12, S. 674-678.
- [167] Roscher, H. u. a.: Rehabilitation von Rohrleitungen, Sanierung und Erneuerung von Rohrleitungen der Technischen Versorgung, Weiterbildendes Studium „Wasser und Umwelt“, Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.), Weimar 2004.
- [168] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 2614: Zementmörtelauskleidungen für Gussrohre, Stahlrohre und Formstücke, Verfahren, Anforderungen, Prüfungen, Februar 1990.
- [169] o. V.: Rechenansatz zur Berücksichtigung höherer Betriebsdrücke nach Netzer und Pattis (1989), Benutzerhandbuch der Software zur statischen Berechnung erdverlegter Leitungen EasyPipe98 der ingsoft-GmbH Ingenieurbüro und Software-Entwicklung, Nürnberg 2002.
- [170] Schneider, K.-J. (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure, mit Berechnungshinweisen und Beispielen, 15. Aufl., Werner-Verlag, Düsseldorf 2002.
- [171] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 28600: Druckrohre und Formstücke aus duktilem Gusseisen für Gas- und Wasserleitungen, technische Lieferbedingungen, August 1968.
- [172] o. V.: Abmessungen gusseiserner Rohre in: Brockhaus-Konversationslexikon, F.A. Brockhaus, Leipzig 1912.
- [173] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 28610: Druckrohre aus duktilem Gusseisen mit Muffe, Gas- und Wasserleitungen mit Zementmörtelauskleidung, Maße, Gewichte und Anwendungsbereiche, Januar 1983.
- [174] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 12501: Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Korrosionswahrscheinlichkeit in Böden, Teil 1: Allgemeines, August 2003.

- [175] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN EN 12501: Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Korrosionswahrscheinlichkeit in Böden, Teil 2: niedrig –und unlegierte Eisenwerkstoffe, August 2003.
- [176] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 50930: Korrosion der Metalle, Korrosion metallischer Werkstoffe im Inneren von Rohrleitungen, Behältern und Apparaten bei Korrosionsbelastung durch Wasser, Teil 2: Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit unlegierter und niedrig legierter Eisenwerkstoffe, Februar 1993.
- [177] o. V.: Korrosion und Korrosionsschutz erdverlegter Stahlrohrleitungen, Informationsschrift der Fa. SSS Korrosionsschutztechnik, SSS Korrosionsschutztechnik GmbH & Co. KG, Essen 2006.
- [178] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 50905: Korrosion der Metalle – Korrosionsuntersuchungen, Teil 2: Korrosionsgrößen bei gleichmäßiger Flächenkorrosion, Januar 1987.
- [179] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 50905: Korrosion der Metalle – Korrosionsuntersuchungen, Teil 3: Korrosionsgrößen bei ungleichmäßiger und örtlicher Korrosion ohne mechanische Belastung, Januar 1987.
- [180] o. V.: Bedienungsanleitung zum Erdungsmessgerät Geohm®C der Fa. Gossen Metrawatt GmbH, Nürnberg 2006.
- [181] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 18123: Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben, Bestimmung der Korngrößenverteilung, November 1996.
- [182] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 18121: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Wassergehalt, Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung, April 1998.
- [183] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN ISO 10390: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des pH-Wertes, Dezember 2005.
- [184] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 38409: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H) – Teil 7: Bestimmung der Säure- und Basekapazität (H7), Dezember 2005.
- [185] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 38405: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Anionen (Gruppe D), Photometrische Bestimmung des gelösten Sulfids (D 26), April 1984.
- [186] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 38405: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Anionen (Gruppe D), Bestimmung der Chlorid-Ionen (D 1), Dezember 1985.

- [187] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 38405: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Anionen (Gruppe D), Bestimmung der Sulfat-Ionen (D 5), Januar 1985.
- [188] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 50900: Korrosion der Metalle, Begriffe, Teil 2: Elektrochemische Begriffe, Juli 2002.
- [189] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 4018: Baugrund, Berechnung der Sohldruckverteilung unter Flächengründungen, Beiblatt 1: Erläuterungen und Berechnungsbeispiele, Mai 1981.
- [190] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 4019: Setzungsberechnungen bei lotrechter mittiger Belastung, Beiblatt 1: Erläuterungen und Berechnungsbeispiele, April 1979.
- [191] Witt, K. J.; Schanz, T. (Hrsg.): Wissenspeicher Geotechnik, Studienunterlagen Geotechnik der Bauhaus-Universität Weimar, 11. Aufl., Weimar 1999.
- [192] Schmidt, H. G., Seitz, J.: Grundbau, Eigenschaften von Boden und Fels in: Beton-Kalender, Band 2, Abschnitt D, Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1998.
- [193] Hahn, J.: Durchlaufträger, Rahmen, Platten und Balken auf elastischer Bettung, Werner-Verlag, Düsseldorf 1985.
- [194] Traunecker, T.: Rehabilitationsstrategien für Gas- und Wasserrohrnetze – Sammlung, Zusammenfassung und Bewertung von Modellen und Entwicklung einer angepassten Strategie, Diplomarbeit Stuttgart 2000.
- [195] Conradin F., Hahn H.-H: Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, Band 1 – Rohrnetztechnik, 6. Ausgabe, Vulkan-Verlag, Essen 1999.
- [196] Kreska, O.: Leitungssanierung mit Zementmörtelauskleidung in Hamburg in: 50 Jahre Sanierung mit Zementmörtelauskleidung in Deutschland, 3R-Sonderteil, 3R international, 44 (2005); Nr. 12, S. 689-690.
- [197] Falter, B.; Lenz, J.: Versuche an einem einfach gelenkigen Schachtanschluss mit einem Rohr aus duktilem Gusseisen in: FGR Fachgemeinschaft Gussrohrsysteme (Hrsg.): Gussrohrtechnik, Informationen der Fachgemeinschaft Gussrohrsysteme, Nr. 33 (1998), S. 5 – 13.
- [198] o. V.: Beurteilung der Reststandsicherheit und Entwicklung von Sanierungsstrategien, Forschungsvorhaben im Arbeitsgebiet Statik und Bauinformatik des Fachbereichs Bauingenieurwesen der FH Münster, <http://www2.fh-muenster.de/FB6/lehrkoerper/falter/forschung/forschung.htm>, 7.Sep.2006.
- [199] Deutsches Institut für Normung (DIN) DIN 2432: Regelwerk für Graugussrohre, o. J. [1942?].

-
- [200] Deutsches Institut für Normung (DIN) DIN 2422: Regelwerk für Graugussrohre, o. J. [1942?].
- [201] Deutsches Institut für Normung (DIN) DIN 2431: Regelwerk für Graugussrohre, o. J. [1942?].
- [202] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V DIN 2440: Stahlrohre, mittelschwere Gewinderohre, Januar 1960.
- [203] Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) TGL 14514: Stahlrohre für Wasser- und Gasleitungen, nahtlos, geschweißt, Maße, Abweichungen, Staatsverlag der DDR, Bereich Standardisierung, Juli 1964.
- [204] Nowak, K.-E. u. a.: Das LPR-Verfahren zur Abschätzung der Korrosionsbelastung in Böden, 3R international, 45 (2006), Nr. 7, S. 358-362.
- [205] Ahrens, J.: Fragebogen zur Beurteilung der Rohrzustände, <http://www.optnet.de/>, 7. Sep. 2006, BfR – Büro für Rohrnetzanalysen, Bewertung von Versorgungsnetzen Wasser/Gas, Berlin 2006.
- [206] Niehues, B.: DVGW-Schadensstatistik Wasser: Ergebnisse aus den Jahren 1997 bis 2004 in: DVGW (Hrsg.), energie | wasser-praxis, 57 (2006), Nr. 10, S. 18-23.
- [207] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 2460: Stahlrohre für Wasserleitungen, Mai 1966.