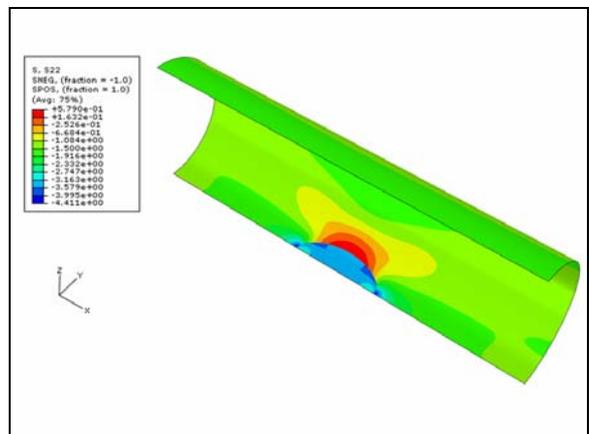
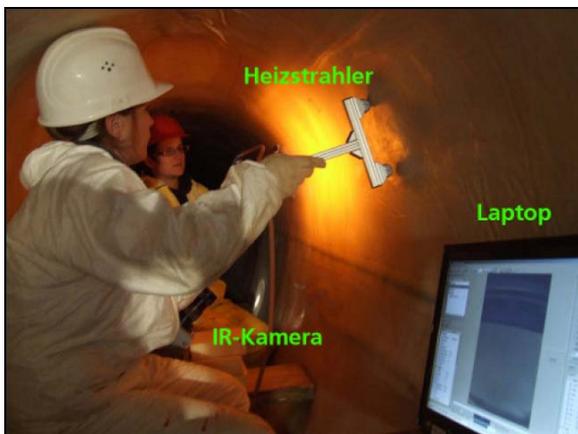


Endbericht

Abnahme von Liningmaßnahmen

*- Materialnachweise und
Bewertung der Liningqualität -*



Auftraggeber:

Ministerium für Umwelt und Naturschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz des
Landes Nordrhein-Westfalen

Bearbeitung:

IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

WISSENSCHAFTLICHE LEITUNG

Dr.-Ing. Bert Bosseler

PROJEKTLEITUNG UND BEARBEITUNG

Dipl.-Ing. Oliver Sokoll

Dipl.-Ing. Bianca Diburg

Dipl.-Ing. Sebastian Beck

BILDNACHWEIS FÜR DIE TITELSEITE

1. Reihe links: Einzug eines GFK-Schlauchliners [Foto: IKT]
rechts: Probenentnahmestelle in einer Kanalhaltung [Foto: IKT]
2. Reihe links: Messaufbau der Wärmefluss-Thermographie im Kanal [Foto: IKT]
rechts: Mit FE-Simulation ermittelte Umfangsspannung [Foto: FH Münster]

DANKSAGUNG

Den Vertretern der Netzbetreiber im IKT-Lenkungskreis danken wir für die zahlreichen Anregungen und die fachliche Diskussion:

- Stefan Berghaus, Stadt Monheim am Rhein
- Karl-Heinz Böhm, Abwasserwerk Stadt Altena
- Rüdiger Bremke, Stadtentwässerung Schwerte GmbH
- Dieter Drieschner (Sprecher), Stadt Hilden
- Uwe Dworaczek, IAB Immobilien- und Abwasserbetrieb Herford
- Thomas Feisel, Wuppertaler Stadtwerke AG
- Manfred Fiedler, Stadtentwässerung Göttingen
- Jörg Gisselmann, Technische Werke Emmerich am Rhein GmbH
- Nadine Groschupp, Stadt Alsdorf / Eigenbetrieb Technische Dienste
- Frank Großklags, Stadt Bochum
- Frank Hermanns, Stadtwerke Aachen AG
- Elke Hinrichs, Stadt Lemgo
- Volker Hülshorst, Stadtwerke Essen AG
- Beate Ihde, Stadtwerke Essen AG
- Ralph Imping, Stadt Dinslaken
- Thomas Klemm, Schwalmthalwerke AöR
- Dirk Koch, Stadtentwässerung Neuss
- Carsten Kornmaier, Stadt Herten
- Erich Kretzschmar, Stadtwerke Aachen AG
- Helmut Künnemeyer, Entsorgungsbetriebe der Stadt Warendorf
- Birgit Mucke, IAB Immobilien- und Abwasserbetrieb Herford
- Frank Restemeyer, Stadt Gladbeck
- Manfred Röttgers, Wuppertaler Stadtwerke AG
- Uwe Säck, Stadt Detmold
- Bernd Schäfer, Entwässerung Stadt Witten (ESW)
- Olaf Schmidt, Stadt Dortmund
- Andreas Schneider, Stadtentwässerungsbetrieb Düsseldorf
- Klaus Schultz, Umweltbetrieb der Stadt Bielefeld
- Georg Straff, Stadtentwässerung Köln AöR
- Andreas Vogel, Wasserverband Vorsfelde und Umgebung KdöR / Kooperation Wasser Aller Oker Leine (KOWA)
- Hermann-Josef Vogt, Entsorgungs- und Servicebetrieb Bocholt (ESB)
- Arnold Waldera, Stadt Datteln
- Thomas Wiedemann, Stadt Recklinghausen
- Olaf Wunsch, Deutsche Bahn AG

Darüber hinaus danken wir den Lenkungsmitgliedern und ihren Kommunen für die Möglichkeit zur Umsetzung der praktischen Untersuchungen in den Kanalnetzen. Ein besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. C. Körner, Stadtentwässerungsbetriebe Köln, die als Bauleiterin wesentlich zum Gelingen der in Kapitel 7 beschriebenen In-situ-Untersuchungen beigetragen hat.

Darüber hinaus danken wir den 22 süddeutschen Kommunen, die am IKT-Süd das Projekt begleitet haben, für das Einbringen ihrer besonderen Praxiserfahrungen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Falter, FH Münster, danken wir für die Analyse der möglichen Auswirkungen von geometrischen Auffälligkeiten auf die Standsicherheit von Linern in Kapitel 8.

Herrn Prof. Dr. K.-U. Koch, FH Gelsenkirchen, danken wir für die Bewertung der prüftechnischen Möglichkeiten zur Werkstoffanalyse und Harzidentifikation in Kapitel 9.

Den Sanierungsunternehmen danken wir für die konstruktive Zusammenarbeit im Rahmen der Baustellenbegleitungen und Probenentnahmen.

Den im Rahmen der Inspektionsmaßnahmen beteiligten Fachunternehmen und -instituten danken wir für die Unterstützung bei der Interpretation der vor Ort erhobenen Daten in Kapitel 7.

INHALTSVERZEICHNIS

1	VERANLASSUNG UND ZIELSTELLUNG	1
2	VORGEHENSWEISE	2
3	LINERVERFAHREN	4
3.1	HINTERGRUND	4
3.2	VOR ORT HÄRTENDES SCHLAUCHLINING	6
3.3	NORMEN, REGELWERKE UND ANFORDERUNGSPROFILE	6
3.4	EINGESETZTE MATERIALIEN.....	8
3.5	VERARBEITUNG	10
3.6	STATIK.....	13
3.7	QUALITÄTSSICHERUNG	13
4	MARKTÜBERBLICK SCHLAUCHLINERSYSTEME	15
5	AUFFÄLLIGKEITEN AN SCHLAUCHLINERN (ZUSTANDSKATALOG)	23
5.1	AUFGABENSTELLUNG	23
5.2	DATENBASIS	24
5.3	INHALTE UND AUSSAGEKRAFT.....	24
5.4	ANWENDUNGS- UND BEWERTUNGSBEISPIELE	25
5.4.1	Vorüberlegungen	25
5.4.2	Katalog-Nr. 1a „Wellige Oberflächenstruktur“, Beispiele	26
5.4.3	Katalog-Nr. 1b „Querfalten“, Beispiele.....	28
5.4.4	Katalog-Nr. 2a „Verfärbung an der Linerinnenseite“, Beispiele.....	31
5.5	BEWERTUNG VON LABORPRÜFUNGEN	33
5.5.1	Dichtheitsprüfung.....	34
5.5.2	Mechanische Prüfungen	36
5.5.3	Fazit	37
5.6	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	38
6	BAUMAßNAHMEN UND NACHBEPROBUNGEN	39
6.1	ÜBERBLICK	39
6.2	AKTUELLE BAUMAßNAHMEN.....	40
6.2.1	Untersuchungsprogramm	40
6.2.2	Baustellendokumentation und Probenentnahme	43
6.2.3	Laborprüfungen und Ergebnisse	48
6.2.4	Schlussfolgerungen	53
6.3	NACHBEPROBUNGEN NACH MEHRJÄHRIGEM BETRIEB	54
6.3.1	Untersuchungsprogramm	54
6.3.2	Auswahl der Entnahmestellen und Probenentnahme	56
6.3.3	Laborprüfungen und Ergebnisse	57

6.3.4	Schlussfolgerungen	60
6.4	REPARATUR DER PROBENENTNAHMESTELLEN.....	60
6.5	BISHERIGE VORGEHENSWEISEN BEI SOLLWERTUNTERSCHREITUNG	64
7	INNOVATIVE INSPEKTIONSTECHNIKEN UND PRÜFVERFAHREN.....	66
7.1	EINLEITUNG	66
7.2	RECHERCHE UND AUSWAHL ZERSTÖRUNGSFREIER PRÜFVERFAHREN	67
7.3	VORUNTERSUCHUNGEN AN PRÜFSTÜCKEN	68
7.4	ENTNAHME VON LINERABSCHNITTEN.....	68
7.5	MESSVERFAHREN UND -METHODEN	70
7.5.1	3D-Laserscanning.....	70
7.5.2	Temperaturmessung.....	72
7.5.3	Wärmefluss-Thermographie	74
7.5.4	Lokale Resonanzspektroskopie.....	76
7.5.5	Ultraschall-Echo-Verfahren	77
7.5.6	Impakt-Echo-Verfahren.....	78
7.6	TEMPERATURMESSUNG IN LINERSANIERTEN, NICHT BEGEHBAREN PRÜFSTRECKEN....	79
7.6.1	Aufgabenstellung	79
7.6.2	Einsatz an einem UV-härtenden GFK-Liner	79
7.6.3	Einsatz an einem warmwasserhärtenden Nadelfilz-Liner	84
7.7	TESTEINSÄTZE IN EINER LINERSANIERTEN, BEGEHBAREN PRÜFSTRECKE.....	94
7.7.1	Aufgabenstellung	94
7.7.2	Untersuchungsobjekt.....	94
7.7.3	3D-Laserscanning.....	97
7.7.4	Temperaturmessung.....	102
7.7.5	Vorarbeiten zu den weiteren Messungen.....	107
7.7.6	Wärmefluss-Thermographie	111
7.7.7	Impakt-Echo-Verfahren.....	115
7.7.8	Lokale Resonanzspektroskopie.....	120
7.7.9	Ultraschall-Echo-Verfahren	124
7.8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	131
8	STATISCHE BEWERTUNG VON AUFFÄLLIGKEITEN	135
8.1	ALLGEMEINES	135
8.2	BERECHNUNGSANNAHMEN UND -VORAUSSETZUNGEN.....	137
8.2.1	Altrohrgeometrie, Altrohrzustand I.....	137
8.2.2	Linergeometrie und Werkstoffkennwerte.....	137
8.2.3	Belastung.....	137
8.2.4	FE-Modell [126]	137
8.3	KALIBRIERUNG DES FE-MODELLS DURCH BERECHNUNG MIT EINEM STABWERKMODELL [125].....	139
8.3.1	Imperfektionen nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9].....	139

8.3.2	FE-Simulationen der Imperfektionen und Berechnung	140
8.3.3	Berechnung mit einem Stabwerkmodell [125].....	141
8.3.4	Vergleich der Berechnung FE- und Stabwerkmodell	142
8.4	STATISCHE BERECHNUNGEN MIT IN LÄNGSRICHTUNG BEGRENZTEN IMPERFEKTIONEN	143
8.4.1	Grund- und Standardmodell	143
8.4.2	Örtliche Vorverformung.....	144
8.4.3	Längsfalte	149
8.4.4	Querfalte	151
8.4.5	Bereichsweise verringerter E-Modul.....	157
8.4.6	Bereichsweise verringerte Wanddicke	159
8.5	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT	165
9	WERKSTOFFANALYSE UND -IDENTIFIZIERUNG.....	167
9.1	HINTERGRUND	167
9.2	AUSSAGEKRAFT VON DSC-ANALYSEN AN LINERPROBEN	167
9.2.1	Ergebnis einer DSC-Analyse.....	167
9.2.2	Zusammenhang Glasübergangstemperatur (T_G) und E-Modul.....	168
9.2.3	Aussagen über den Aushärtungsgrad	168
9.2.4	Aussagekraft der DSC-Messung an Linerproben.....	169
9.2.5	Fazit	169
9.3	AUSSAGEKRAFT VON IR-ANALYSEN ZUR LINERIDENTIFIZIERUNG	169
9.3.1	Hintergrund	169
9.3.2	Durchführung	169
9.3.3	Referenzdatenbank	170
9.3.4	Einsatzfähigkeit der Datenbank.....	171
9.3.5	Potential der Methode.....	174
10	SCHLUSSBETRACHTUNG UND EMPFEHLUNGEN	175
10.1	ROHRPRODUKTION ALS ZWEISTUFIGER PRODUKTIONSPROZESS	175
10.2	SANIERUNGSZIELE UND QUALITÄTSANFORDERUNGEN	176
10.3	ZUSTANDSKATALOG	176
10.4	AUFFÄLLIGKEITEN UND MÄNGEL	177
10.5	STREUUNG DER MATERIALQUALITÄT	179
10.5.1	Zuverlässigkeit der Abnahme	180
10.5.2	Handlungsalternativen.....	182
10.6	PERSPEKTIVEN FÜR ENTWICKLUNG UND ABNAHME.....	184
11	ZUSAMMENFASSUNG	186
12	LITERATUR	191

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Verfahren zur baulichen Sanierung von Entwässerungssystemen, Übersicht [13].....	4
Abb. 2:	Übersicht über Auskleidungsverfahren zur Sanierung von Entwässerungssystemen, in Anlehnung an [15].....	5
Abb. 3:	Liner-Wandkonstruktion, Beispiel [22].....	6
Abb. 4:	Vorbereitungen vor dem Einzug, Beispiel Brandenburger GFK-Liner [Fotos: IKT].....	11
Abb. 5:	Aufstellen und Aushärtung eines GFK-Liners, Beispiel System Brandenburger [40].....	11
Abb. 6:	Vorbereitung der Schlauchlinerinversion, Beispiel Insituform NF-Liner [Fotos: IKT].....	12
Abb. 7:	Beispiel 2: Einbau eines Schlauchliners, Beispiel Insituform NF-Liner.....	12
Abb. 8:	Qualitätsprüfungen an Schlauchlinerproben im Labor [Fotos: IKT].....	14
Abb. 9:	Wellige Innenoberfläche, Beispiele.....	27
Abb. 10:	Beispiele für Falten in Querrichtung.....	28
Abb. 11:	Vergleich zwischen Altrohrzustand (links) und Sanierungsergebnis (rechts), Beispiel.....	29
Abb. 12:	Verfärbungen der Linerinnenseite im gesamten Querschnitt, Beispiele.....	31
Abb. 13:	Fleckenartige Verfärbungen, DN 1200, NF-UP, Bj. 2005 / 2006 [Fotos: IKT].....	32
Abb. 14:	Beispiel eines Nadelfilz-Schlauchliners (NF-UP, DN 300, Bj. 2007), Wareneingang.....	35
Abb. 15:	Beispiel eines Nadelfilz-Schlauchliners (NF-UP, DN 300), nach Dichtheitsprüfung.....	36
Abb. 16:	Baustellendokumentation, Beispiele.....	43
Abb. 17:	Entnahme von Baustellenproben, Beispiele.....	47
Abb. 18:	Standard-Laborprüfungen an Schlauchliner-Proben.....	49
Abb. 19:	Nachbeprobung von Linern nach mehrjährigem Betrieb, Beispiele.....	57
Abb. 20:	Reparatur der Probenentnahmestellen, Beispiele vom Einbau.....	61
Abb. 21:	Reparatur der Probenentnahmestellen, Beispiele aus dem Kanal.....	62
Abb. 22:	Entnahme von Altlinern und schlauchlinersanierten Altröhren.....	69
Abb. 23:	Prinzip des flächenhaften Scannens mittels terrestrischem Laserscanner [106].....	70
Abb. 24:	Klassifizierung von Laserscannern [107].....	71
Abb. 25:	Messergebnisse eines 3D-Laserscannings [117].....	72
Abb. 26:	Messprinzip der Wärmefluss-Thermographie [111].....	74
Abb. 27:	Prüfung eines Rotorblattes mittels Wärmefluss-Thermographie [118].....	75
Abb. 28:	Aufzeichnung des Abkühlvorgangs an einem Rotorblatt aus GFK [117].....	75
Abb. 29:	Lokale Resonanzspektroskopie [112].....	76
Abb. 30:	Messprinzip Ultraschall-Echo-Verfahren [112].....	77
Abb. 31:	Messprinzip Impakt-Echo-Verfahren [113].....	78
Abb. 32:	Einstiegsschächte der Sanierungsstrecke.....	80
Abb. 33:	Eingesetzte Temperaturmesskabel.....	80

Abb. 34:	<i>Lichterkette zur UV-Härtung des Liners</i>	81
Abb. 35:	<i>Örtlicher Temperaturverlauf zu Beginn der UV-Aushärtung</i>	83
Abb. 36:	<i>Örtlicher Temperaturverlauf am Ende der UV-Aushärtung</i>	83
Abb. 37:	<i>Skizze zur Anordnung der Messtechnik für die Temperaturmessung</i>	85
Abb. 38:	<i>Ausrüstung zur Temperaturmessung</i>	86
Abb. 39:	<i>Einbau des Preliners und der Hilfsseile</i>	86
Abb. 40:	<i>Anordnung der Messkabel</i>	87
Abb. 41:	<i>Ergebnisse der Temperaturmessung [121]</i>	89
Abb. 42:	<i>Wärmeeintrag über die Haltungslänge für die Einbaudauer von 14 Stunden [121]</i>	91
Abb. 43:	<i>Entnahmestellen der Proben in den betrachteten Haltungen (2580-2590-2600)</i>	92
Abb. 44:	<i>Kenndaten der Baumaßnahme in Köln, Schnurgasse</i>	95
Abb. 45:	<i>Örtliche Randbedingungen der Baumaßnahme Köln, Schnurgasse</i>	96
Abb. 46:	<i>Vermessungsarbeiten im Bereich des Startschachtes</i>	97
Abb. 47:	<i>Durchführung des Laserscannings im Kanal</i>	98
Abb. 48:	<i>Visualisierung der Messdaten der Baumaßnahme in Leica TruView [108]</i>	99
Abb. 49:	<i>Abwicklung der Wiederholungsmessung (Amberg TMS Software) [108]</i>	99
Abb. 50:	<i>Deformationsanalyse; Abwicklung und Schnittdarstellung (Amberg TMS Software) [108]</i>	100
Abb. 51:	<i>Deformationsanalyse (Software 3DReshaper) [108]</i>	101
Abb. 52:	<i>Faltendarstellung im 3D-Oberflächenmodell [108]</i>	101
Abb. 53:	<i>Anordnung der Messkabel im Querschnitt und über die Haltungslänge [123]</i>	103
Abb. 54:	<i>Montage der Messkabel in der Haltung</i>	103
Abb. 55:	<i>Fertiggestellte Anordnung der Messkabel in der Haltung und im Schacht</i>	104
Abb. 56:	<i>Ergebnisgrafik zur Temperaturmessung mit unterschiedlichen Auswertungs- und Darstellungsformen [120]</i>	105
Abb. 57:	<i>Ergebnisse der Temperaturmessung für Querschnittsposition 1 und 5 [123]</i>	106
Abb. 58:	<i>Ergebnisse der Temperaturmessung für Querschnittsposition 2 und 4 [123]</i>	106
Abb. 59:	<i>Ergebnisse der Temperaturmessung für Querschnittsposition 3 und 6 [123]</i>	106
Abb. 60:	<i>Messaufbau der Wärmefluss-Themographie vor Ort im Kanal</i>	112
Abb. 61:	<i>Ergebnisse der Probemesststelle [111]</i>	113
Abb. 62:	<i>Ergebnisse Messfeld III [111]</i>	114
Abb. 63:	<i>Messprinzip Impakt-Echo-Verfahren [113]</i>	116
Abb. 64:	<i>Mit dem Impakt-Echo-Verfahren untersuchte Messfelder I bis IV</i>	116
Abb. 65:	<i>Durchführung des Impakt-Echo-Verfahrens im Kanal</i>	116
Abb. 66:	<i>Messraster Messfeld I [113]</i>	117
Abb. 67:	<i>B-Scans der Spalten 1 bis 5 von Messfeld I [113]</i>	118
Abb. 68:	<i>B-Scans der Spalten 1 bis 5 von Messfeld II [113]</i>	118

Abb. 69:	Messprinzip der lokalen Resonanzspektroskopie [113]	120
Abb. 70:	Bestimmung der Halbwertsbreite einer Funktion $f(x)$ [113]	121
Abb. 71:	Mit der lokalen Resonanzspektroskopie untersuchte Messfelder (Probemessfeld und Messfelder I bis III)	121
Abb. 72:	Durchführung der lokalen Resonanzspektroskopie im Kanal.....	121
Abb. 73:	Ergebnisse der Messung mit der lokalen Resonanzspektroskopie an Messfeld I [113].....	122
Abb. 74:	Ergebnisse der Messung mit der lokalen Resonanzspektroskopie an Messfeld II [113].....	123
Abb. 75:	Messprinzip Ultraschall-Echo-Verfahren [113]	125
Abb. 76:	Mit Ultraschall-Echo-Verfahren untersuchte Messfelder	125
Abb. 77:	Zeitsignal einer Messung an Messfeld I [113]	126
Abb. 78:	Ermittelte Wanddicken der Ultraschall-Echo Messung mit dem Ultraschall-PC [113] ...	127
Abb. 79:	Labor-Set-Up bei den Messungen im Kanal; oben Oszilloskop, darunter Pulser-Receiver.....	129
Abb. 80:	TRM-Messequipment [117]	129
Abb. 81:	FE-Modell DN 300 mit örtlicher Vorverformung und Ringspalt, Liner hier simuliert durch Shell-Elemente.....	138
Abb. 82:	Örtliche Vorverformung.....	139
Abb. 83:	Spaltbildung	139
Abb. 84:	Umfangsspannungen σ_φ (= S22) bei konstanter örtlicher Vorverformung	140
Abb. 85:	Kontaktspannungen	140
Abb. 86:	Verformungen	142
Abb. 87:	Last-Verschiebungskurven für einen Liner DN 300, Vergleich FE- und Stabwerkmodell	143
Abb. 88:	Verlauf der Vorverformung in Linerlängsrichtung (Prinzipskizze des Liners 10-fach überhöht dargestellt).....	144
Abb. 89:	Verlauf der örtlichen Vorverformung in Linerquerrichtung.....	145
Abb. 90:	In Längsrichtung des FE-Modells konstant verlaufende örtliche Vorverformung.....	145
Abb. 91:	In Längsrichtung des FE-Modells veränderliche Vorverformung	146
Abb. 92:	Spannungsverläufe bei örtlicher Vorverformung in Längsrichtung mit variabler Länge	147
Abb. 93:	Umfangsspannung σ_φ (= S22) des FE-Modells bei $L_V/DN = 4$	148
Abb. 94:	Längsspannung σ_x (= S11) des FE-Modells bei $L_V/DN = 4$	148
Abb. 95:	Linerquerschnitt mit Längsfalte.....	149
Abb. 96:	Verlauf der Längsfalte.....	149
Abb. 97:	Spannungsverlauf bei Faltenbildung in Längsrichtung mit variabler Länge	150
Abb. 98:	Umfangsspannung σ_φ (= S22) des FE-Modells bei $L_V/DN = 4$	151
Abb. 99:	Systembild Querfalte ungefüllt, Simulation durch Shell-Elemente	152

Abb. 100:	Systembild Querfalte, ungefüllt, Simulation durch Solid-Elemente	152
Abb. 101:	Systembild Querfalte, gefüllt, Simulation durch Solid-Elemente	153
Abb. 102:	Verlauf der Längsspannungen σ_x in der Sohle Außenseite bei Querfaltenbildung	153
Abb. 103:	Verlauf der Längsspannungen σ_x in der Sohle Innenseite bei Querfaltenbildung.....	154
Abb. 104:	Querfalte, ungefüllt, Längsspannungen σ_x (= S11)	156
Abb. 105:	Querfalte, gefüllt, Längsspannungen σ_x (= S11)	156
Abb. 106:	Systembild mit reduziertem E-Modul in einem ellipsenförmigen Bereich.....	157
Abb. 107:	Spannungsverlauf in Umfangsrichtung bei Variation der Bereichsgröße mit verringertem E-Modul	158
Abb. 108:	Spannungsverlauf (Spannungen in Sohle außen) in Längsrichtung bei Variation der Bereichsgröße mit verringertem E-Modul.....	158
Abb. 109:	Systembild verringerte Wanddicke in Umfangsrichtung.....	160
Abb. 110:	Systembild verringerte Wanddicke in Längsrichtung.....	160
Abb. 111:	Verringerte Wanddicke in Umfangsrichtung, Umfangsspannungen σ_φ (= S22).....	161
Abb. 112:	Verringerte Wanddicke in Längsrichtung, Längsspannungen σ_x (= S11)	161
Abb. 113:	Systembild verringerte Wanddicke in einem ellipsenförmigen Bereich.....	162
Abb. 114:	Umfangsspannung σ_φ (= S22) des FE-Modells bei einer Ellipsengröße $a_E / b_E = 200/100$ mm.....	162
Abb. 115:	Längsspannung σ_x (= S11) des FE-Modells bei einer Ellipsengröße $a_E / b_E = 200/100$ mm.....	163
Abb. 116:	Kalorische Effekte bei Kunststoffen [130].....	168
Abb. 117:	Präparation einer Linerprobe mit einem Skalpell, einer Säge und einer Feile	170
Abb. 118:	Infrarot-Spektroskopie	170
Abb. 119:	Vergleich des IR-Spektrums einer Linerprobe (L1290-1.2) mit einer Referenzprobe	171
Abb. 120:	Vergleich der IR-Spektren von sechs Linerproben.....	172
Abb. 121:	Übereinstimmung des IR-Spektrums mit einem Harz auf Basis iso-Phthalat / Neopentylglycol, Beispiel.....	173
Abb. 122:	Übereinstimmung des IR-Spektrums einer Linerprobe (B1954-8b) mit einem Harz auf Basis eines Vinylester.....	173
Abb. 123	Streuung der Materialeigenschaften für E bzw. σ_{TB} am Beispiel einer Normalverteilung, mit Mittelwert der Rohrqualität der Gesamtproduktion m_R und Sollwert bei 0,5 %-Fraktile	180
Abb. 124	Inhomogenitäten der Materialeigenschaften (skizziert durch schwarze Balken) für E bzw. σ_{TB} , als Abweichung von der erwarteten Normalverteilung.....	181
Abb. 125	Inhomogenitäten der Materialeigenschaften (skizziert durch schwarze Balken) für E bzw. σ_{TB} , mit angepasster Normalverteilung	182
Abb. 126	Stichprobe mit drei Proben (skizziert durch schwarze Balken) zum Nachweis einer vertrauensvollen Qualitätsverteilung im Einzelfall (gestrichelte Linie).....	183

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	<i>Wesentliche Normen und Regelwerke für vor Ort härtendes Schlauchlining</i>	7
Tab. 2:	<i>Harzsysteme; aus DWA-M 143-3 [24], verändert</i>	9
Tab. 3:	<i>Bestandteile von Schlauchlinern [24]</i>	9
Tab. 4:	<i>Glasfaser-Schlauchliner mit bauaufsichtlicher Zulassung, Stand Feb. 2009</i>	17
Tab. 5:	<i>Synthesefaser-Schlauchliner mit bauaufsichtlicher Zulassung, Stand Feb. 2009</i>	19
Tab. 6:	<i>Übersicht Schlauchliner ohne bauaufsichtliche Zulassung, Stand Feb. 2009</i>	22
Tab. 7:	<i>Gliederung des Zustandskataloges „Schlauchlinerauffälligkeiten“, vollständiger Katalog in Anhang 1</i>	25
Tab. 8:	<i>Untersuchungsumfang der Begleitung und Beprobung aktueller Baumaßnahmen bei Kanalnetzbetreibern in NRW</i>	42
Tab. 9:	<i>Überblick über die durchgeführten Laborprüfungen und deren Kriterien, in Anlehnung an [50]</i>	48
Tab. 10:	<i>Aktuelle Baumaßnahmen, Ergebnisse der Laborprüfungen</i>	52
Tab. 11:	<i>Untersuchungsumfang der Nachbeprobung von Schlauchlinern nach mehrjährigem Betrieb</i>	55
Tab. 12:	<i>Nachbeprobungen nach mehrjährigem Betrieb, Ergebnisse der Laborprüfungen</i>	59
Tab. 13:	<i>Übersicht über die durchgeführten Temperaturmessungen</i>	79
Tab. 14:	<i>Baumaßnahme Recklinghausen „Lülfstraße“, Kenndaten der Baumaßnahme</i>	84
Tab. 15:	<i>Temperaturwerte der Thermoelemente im Bereich der Schächte [120]</i>	87
Tab. 16:	<i>Ausgewählte Probenentnahmestellen in den Haltungen 2580-2590-2600</i>	91
Tab. 17:	<i>Ergebnisse der Laborprüfungen der BM „Lülfstraße“ in Recklinghausen</i>	92
Tab. 18:	<i>Übersicht über die beteiligten Projektpartner, die eingesetzten zerstörungsfreien Prüfverfahren und des Untersuchungszeitraums</i>	96
Tab. 19:	<i>Übersicht der ausgewählten Untersuchungsstellen in der sanierten Haltung</i>	109
Tab. 20:	<i>Bewertung der zerstörungsfreien Prüfverfahren auf Basis des Testeinsatzes im begehbaren Bereich</i>	134
Tab. 21:	<i>Berechnungsparameter, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck</i>	136
Tab. 22:	<i>Spannungen des Liners, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 1,5\text{ m}$</i>	141
Tab. 23:	<i>Spannungen und Verformungen des Liners DN 300, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 1,5\text{ m}$</i>	141
Tab. 24:	<i>Nachweise für den Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 1,5\text{ m}$</i>	142
Tab. 25:	<i>Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5\text{ m}$, Grund- und Standardmodell, ¼-System, 5 mm Netzgröße</i>	144
Tab. 26:	<i>Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5\text{ m}$, örtliche Vorverformung, ¼-System, 5 mm Netzgröße</i>	147
Tab. 27:	<i>Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5\text{ m}$, Längsfalte, ¼-System, 5 mm Netzgröße</i>	150

Tab. 28: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5\text{ m}$, Querfalte, $\frac{1}{2}$ - und $\frac{1}{4}$ -System, Vergleich mit Grundmodell ohne Imperfektionen..... 154

Tab. 29: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5\text{ m}$, Querfalte, $\frac{1}{2}$ - und $\frac{1}{4}$ -System, Vergleich mit Standardmodell mit örtlicher Imperfektion 155

Tab. 30: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5\text{ m}$, verringerter E-Modul, $\frac{1}{2}$ -System, 5 mm Netzgröße..... 159

Tab. 31: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5\text{ m}$, Wanddickenänderung, $\frac{1}{4}$ - und $\frac{1}{2}$ -System, 5 mm Netzgröße 163

Tab. 32: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5\text{ m}$, Wanddickenänderung, $\frac{1}{4}$ - und $\frac{1}{2}$ -System, 5 mm Netzgröße 164

Tab. 33: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5\text{ m}$, verringerte Wanddicke, $\frac{1}{2}$ -System, 5 mm Netzgröße..... 164

Tab. 34: Ergebnisse, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck, Grundmodell: keine Imperfektionen, Standardmodell: Imperfektionen nach ATV-M 127-2 [9] 166

VERZEICHNIS DES ANHANGS

- ANHANG 1:** ZUSTANDSKATALOG SCHLAUCHLINERAUFFÄLLIGKEITEN
- ANHANG 2:** AKTUELLE BAUMAßNAHMEN
– DOKUMENTATIONEN UND ERGEBNISSE DER ABNAHME
- ANHANG 3:** NACHBEPROBUNGEN
– PRÜFERGEBNISSE NACH MEHRJÄHRIGEM BETRIEB
- ANHANG 4:** STATISCHE BERECHUNGEN NACH MERKBLATT ATV-M 127-2
(FACHHOCHSCHULE MÜNSTER, FACHBEREICH BAUINGENIEURWESEN,
PROF. DR.-ING. B. FALTER)

1 Veranlassung und Zielstellung

Die Gesamtlänge des öffentlichen Kanalnetzes in Deutschland liegt laut einer Umfrage der DWA aus dem Jahre 2004 bei etwa 486.000 km, von denen ca. 20 % kurz- oder mittelfristig und weitere 21 % langfristig sanierungsbedürftig sind [1]. In Nordrhein-Westfalen (NRW) weisen die Kanäle, deren Zustand nach [2] auf einer Gesamtlänge von 49.873 km (57 %) erfasst wurde, auf mindestens 7.270 km wesentliche bauliche Schäden auf. Dies sind per Definition Kanäle, deren Schäden die Standsicherheit gefährden oder ein In- bzw. Exfiltrieren von Wasser befürchten lassen. Damit sind 14,6 % der Kanäle, für die nach den Angaben der Betreiber in NRW bis 2001 eine Zustandserfassung durchgeführt wurde, kurz- bis mittelfristig zu sanieren (vgl. RdErl. [3]). Geht man davon aus, dass auch für die verbleibenden 43 % der Kanäle eine durchschnittliche Schadensquote von 14,6 % gilt, so ergäbe sich auf Basis der bisherigen Angaben eine rechnerische schadhafte Kanalnetzlänge in NRW von insgesamt rund 12.700 km (vgl. [4]).

Zur Sanierung der schadhafte Kanäle werden in geschlossener Bauweise, d. h. ohne Störungen an der Oberfläche, insbesondere Renovierungsverfahren eingesetzt. Mit einem Anteil von 88 % sind Reliningverfahren die am häufigsten angewandten Renovierungsverfahren [1]. Als Marktführer gilt hier das Schlauchlining-Verfahren [5]. Informationen über die Qualität einer Sanierung mit dem Schlauchlining-Verfahren sind sowohl für die Bau- als auch die Gewährleistungsabnahme gefordert. Darüber hinaus bilden Erfahrungen mit der Qualität vergangener Baumaßnahmen auch die Grundlage für künftige Investitionsentscheidungen und eine Minimierung des Investitionsrisikos in der Zukunft. Fehler in der Ausführung können nur dann als zulässig oder tolerierbar gelten, wenn die Standsicherheit, Funktionsfähigkeit und Dichtheit des Bauwerkes nach der Sanierung weiterhin ausreichend gewährleistet sind (vgl. DIN EN 752 [6]). Vor diesem Hintergrund sind die methodischen Ansätze zur Bewertung von Schlauchlining-Maßnahmen im Zuge der Abnahmeprüfung zu hinterfragen. Dies betrifft u. a. die Bewertung von Auffälligkeiten und Abweichungen, wie sie aus [7], [8] z. B. als Vorverformungen, Falten, Beulen, Wellen, Ringspalte und Wanddickenschwankungen sowie fehlerhafte seitliche Anschlüsse bekannt sind.

Ziel des nachfolgend dargestellten Forschungsprojektes ist es, den Netzbetreibern in NRW eine zuverlässige, neutrale und unabhängige Orientierung zur Kontrolle der eingesetzten Linermaterialien und Bewertung von Ergebnissen aus der Abnahmeprüfung von Schlauchlining-Maßnahmen zu geben. Hierzu sollen sowohl optische Informationen aus der Begehung bzw. Kamerabefahrung als auch Erkenntnisse aus der Prüfung von Probekörpern dienen. Gegenstand sind Auffälligkeiten und Abweichungen in den Geometrie- und Materialeigenschaften sowie deren mögliche Auswirkungen auf die Standsicherheit, Funktionsfähigkeit, Dichtheit und Dauerhaftigkeit. Ergänzend sollen für weiterführende Maßnahmen zur Qualitätssicherung auch Hinweise zur Aussagekraft und Einsatzfähigkeit von zerstörungsfreien Prüfmethoden gegeben werden.

2 Vorgehensweise

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens „Abnahme von Liningmaßnahmen“ wurde eine praxisorientierte Vorgehensweise gewählt. Es wurde ein Lenkungskreis gegründet, dem insgesamt 33 Vertreter verschiedener Kanalnetzbetreiber angehören. Das IKT organisierte in regelmäßigen zeitlichen Abständen insgesamt sechs projektbegleitende Sitzungen dieses Gremiums. In diesen Veranstaltungen wurden die Zwischenergebnisse präsentiert und gemeinsam mit den Teilnehmern diskutiert. Im Zentrum stand die Erfassung von praktischen Erfahrungen und Erkenntnissen der Mitglieder und die Zusammenstellung von Hinweisen und Anregungen der Netzbetreiber, um das Projekt an den Anforderungen der Praxis auszurichten.

Im Zuge der Projektbearbeitung wurden in einem ersten Schritt umfangreiche Recherchen zum aktuellen Stand der Schlauchlinertechnik (vgl. Kapitel 3) durchgeführt. Dabei wurde neben einer allgemeinen Einführung ein Überblick über Normen, Richtlinien, Regelwerke und Anforderungsprofile gegeben. Darüber hinaus wurden Darstellungen zur Verarbeitung, zur statischen Berechnung und zu Qualitätssicherungsmaßnahmen von vor Ort härtendem Schlauchlining aufgeführt. Ein Überblick über die am Markt verbreiteten Produkttypen schließt den einleitenden Teil ab (vgl. Kapitel 4). Die Marktübersicht umfasst Systeme, die im Bereich von Hauptkanälen eingesetzt werden und stellt die Vielfalt und Unterschiede angebotener Systeme dar.

Anschließend wurden mit Blick auf die Identifikation von optischen Auffälligkeiten bei abgeschlossenen Schlauchlining-Maßnahmen ca. 200 Inspektionsvideos (ca. 10 km) sowie ca. 500 Fotos gesichtet und analysiert (vgl. Kapitel 5). In diese Untersuchung wurde auch die Datenbasis der IKT-Prüfstelle für Bauprodukte aus den Jahren 2002 bis 2008 einbezogen. Die systematische Auswertung umfasste ca. 1.800 Prüfberichte mit etwa 5.000 Schlauchlinerproben. Im Ergebnis liegt ein Zustandskatalog über die im Rahmen der Recherchen identifizierten Schlauchlinerauffälligkeiten vor (vgl. Anhang 1).

Im Anschluss folgten zahlreiche Praxiseinsätze (vgl. Kapitel 6). Es wurden zum einen zwölf aktuelle Schlauchlining-Maßnahmen begleitet, um sowohl Qualitätseinflüsse aus dem Bauablauf aufzunehmen, als auch zu untersuchen, ob und in welchem Maße die Faktoren Ort und Zeitpunkt der Probenentnahme Auswirkungen auf die Ergebnisse der Laborprüfungen zur Qualitätssicherung haben können. Vor diesem Hintergrund wurden bei diesen Baumaßnahmen Linerproben nicht nur wie allgemein üblich aus den Schächten, sondern zusätzlich auch aus den Haltungen entnommen. Im Anschluss wurden die gewonnenen Materialproben im Labor hinsichtlich der Dichtheit und der mechanischen Kennwerte untersucht und die Ergebnisse vergleichend gegenübergestellt (vgl. Kapitel 6.2 und Anhang 2). Des Weiteren wurden auch Nachbeprobungen an Schlauchlinern durchgeführt, die sich bereits seit mehreren Jahren in Betrieb befinden. Insgesamt wurden bei zehn beteiligten Netzbetreibern 57 Probekörper sowohl von nadelfilz- als auch von glasfasergetragenen Linern aus den Baujahren zwischen 1995 und 2005 entnommen und ebenfalls bezüglich der Dichtheit und der mechanischen Kennwerte untersucht. Hierbei wurde zum einen hinterfragt, ob die Qualität im Vergleich zur Bauabnahme nennenswert abweicht. Zum anderen wurde versucht, den Einfluss von Auffälligkeiten, wie z. B. Beulen und Falten, auf die Materialqualität zu ermitteln (vgl. Kapitel 6.3 und Anhang 3).

Ein neuer Weg zur Überprüfung des Sanierungsergebnisses von Schlauchlining-Maßnahmen wird durch den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren verfolgt (vgl. Kapitel 7). Ziel hierbei ist es, mögliche Schwachstellen der Schlauchlinersanierung mit Hilfe von zerstörungsfreien Prüfverfahren zu identifizieren und diese anschließend gezielt zu beproben und zerstörend zu prüfen. Zu diesem Zweck wurde zunächst eine umfangreiche Recherche geeignet erscheinender zerstörungsfreier Prüfverfahren und deren Anbieter durchgeführt. In Laboruntersuchungen sowie im Rahmen eines Praxiseinsatzes in einer sanierten Haltung wurden alle Verfahren testweise eingesetzt. Auf der Basis der Baustellenerfahrungen wurden die Prüfverfahren hinsichtlich der theoretischen Aussagekraft, der Praxistauglichkeit, der Kosten und des Aufwandes und vorliegender Verbesserungspotentiale bewertet und abschließend eine Rangfolge der Verfahren aufgestellt.

Die Bemessungsmodelle für Schlauchliner nach dem ATV-Merkblatt 127 Teil 2 [9] gehen von den zweidimensionalen Ansätzen des Kreisringmodells aus, durch die auch die Imperfektionen nur zweidimensional erfasst werden können. Mit Hilfe der Finite Element Methode sind demgegenüber auch dreidimensionale Simulationen des Tragverhaltens des Liners bei nahezu beliebiger Verteilung der Imperfektionen möglich (vgl. [10]). Vor diesem Hintergrund wurden durch die Fachhochschule Münster, Prof. Dr.-Ing. B. Falter, in [11] die Auswirkungen von Imperfektionen geometrischer und werkstofflicher Art auf die Tragfähigkeit des Liners untersucht (vgl. Kapitel 8 und Anhang 4). Dabei wurden exemplarisch für einen Liner unter Wasseraußendruck, in einem Altrohr der Nennweite DN 300 und bei Altrohrzustand I folgende Imperfektionen betrachtet: Örtliche Vorverformung, Längsfalte, Querfalte (harzhinterfüllt und mit Ausbeulung), bereichsweise verringerter Elastizitätsmodul und bereichsweise verringerte Wanddicke.

Durch die Fachhochschule Gelsenkirchen, Prof. Dr. K.-U. Koch, wurden in [12] zur Bestimmung der quantitativen und qualitativen Zusammensetzung marktüblicher Linermaterialien Proben unterschiedlicher Hersteller mit Hilfe chemischer Verfahren analysiert (vgl. Kapitel 9). Als Analyseverfahren bietet sich hierzu u. a. die Infrarotspektroskopie an. Um eine schnelle Zuordnung der Spektralbilder zu gewährleisten, wurden die Ergebnisse der Werkstoffanalysen in einer Datenbank hinterlegt. Dazu wurde im Vorfeld eine Linerdatenbank mit allen zur Identifizierung erforderlichen Kriterien aufgebaut. Aufgrund der Produktvielfalt am Markt kommt dem Aufbau und der praktischen Einsatzfähigkeit der IR-Datenbank eine besondere Bedeutung hinzu. Ergänzend wird auch die Aussagekraft der Untersuchungsmethode DSC näher hinterfragt. Dieser Methode wird nachgesagt, dass auf Grund von temperaturabhängigen Messungen der Wärmekapazität Aussagen über den Aushärtegrad des Materials und die mechanische Stabilität des eingebauten Liners getroffen werden können.

Die in den vorangestellten Kapiteln dargestellten Ergebnisse der Praxisbeobachtungen und Baustellenuntersuchungen wurden abschließend zusammengefasst. Auf Basis der Ergebnisse wurden Schlussfolgerungen und Empfehlungen aufgestellt, wie bei der Abnahme von Lining-Maßnahmen grundsätzlich vorgegangen werden sollte, und welche Schlussfolgerungen im Einzelfall aus der Dokumentation von Auffälligkeiten und Mängeln bzw. Schwankungen in den Qualitätseigenschaften gezogen werden können. Hierzu wurde ein methodischer Ansatz vorgeschlagen, mit dem mögliche Problemstellungen beschrieben und Handlungsalternativen abgeleitet werden können (vgl. Kapitel 10).

3 Linerverfahren

3.1 Hintergrund

Die Gesamtlänge des öffentlichen **Kanalnetzes** in Deutschland liegt laut einer Umfrage der DWA aus dem Jahre 2004 bei etwa 486.000 km, von denen ca. 20 % kurz- oder mittelfristig und weitere 21 % langfristig sanierungsbedürftig sind [1]. Vor dem Hintergrund des derzeitigen und zukünftigen Sanierungsbedarfs gewinnt die Auswahl eines zuverlässigen und dauerhaften Sanierungsverfahrens immer mehr an Bedeutung.

Im Zusammenhang mit dem Themengebiet Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden wird der Begriff Sanierung in DIN EN 752 [6] definiert als „Maßnahme zur Wiederherstellung oder Verbesserung vorhandener Entwässerungssysteme“. Nach [13] wird eine Unterteilung in drei Verfahrensgruppen vorgenommen: Reparatur, Renovierung und Erneuerung (vgl. Abb. 1).

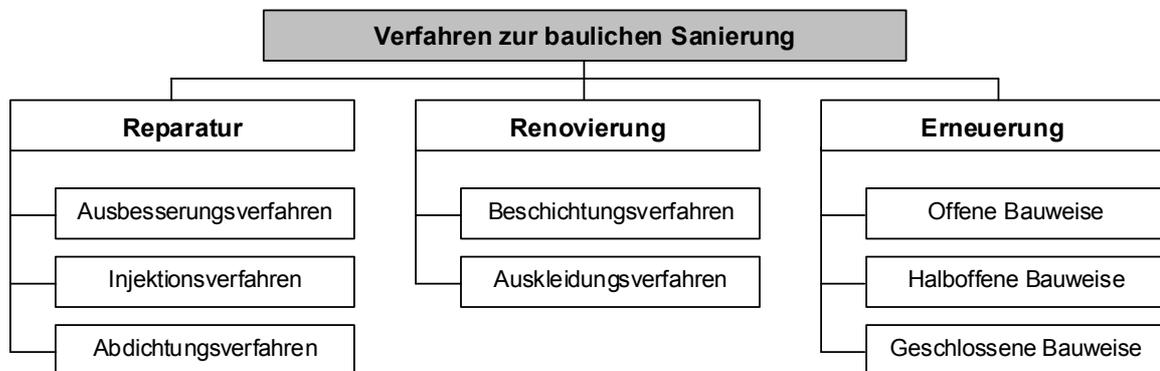


Abb. 1: Verfahren zur baulichen Sanierung von Entwässerungssystemen, Übersicht [13]

Diese Oberbegriffe werden wie folgt definiert [6]:

- **Reparaturen** sind alle Maßnahmen zur Behebung örtlich begrenzter Schäden.
- Alle Maßnahmen zur Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Abwasserleitungen und -kanälen unter vollständiger oder teilweiser Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz werden als **Renovierungen** bezeichnet.
- Unter dem Begriff **Erneuerung** wird die Herstellung neuer Abwasserleitungen und -kanäle in der bisherigen oder einer anderen Linienführung definiert, wobei die neuen Anlagen die Funktion der ursprünglichen Abwasserleitungen und -kanäle einbeziehen.

Den Verfahrensgruppen werden verschiedene Sanierungstechniken zugeordnet. Ausführliche Erläuterungen, Informationen und Beschreibungen hierzu können u. a. aus [13], [14], [15], [16], [17] entnommen werden. Linerverfahren stellen nach [13] und [15] eine Untergruppe der Auskleidungsverfahren dar und zählen damit zum Bereich der Renovierung. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Auskleidungsverfahren zeigt Abb. 2 (vgl. [15]). Es wird dabei u. a. unterschieden nach Verfahren mit Rohren oder montierten Einzelelementen, mit vorgefertigten und örtlich hergestellten (und erhärtenden) Rohren und nach Verfahren mit und ohne Ringraum. Demnach gehören zur Technikfamilie der Linerverfahren neben **vor Ort härtendem Schlauchlining** und Close-Fit-Lining z. B. auch Rohrstrang-Lining sowie Einzelrohr- und Wickelrohr-Lining [15].

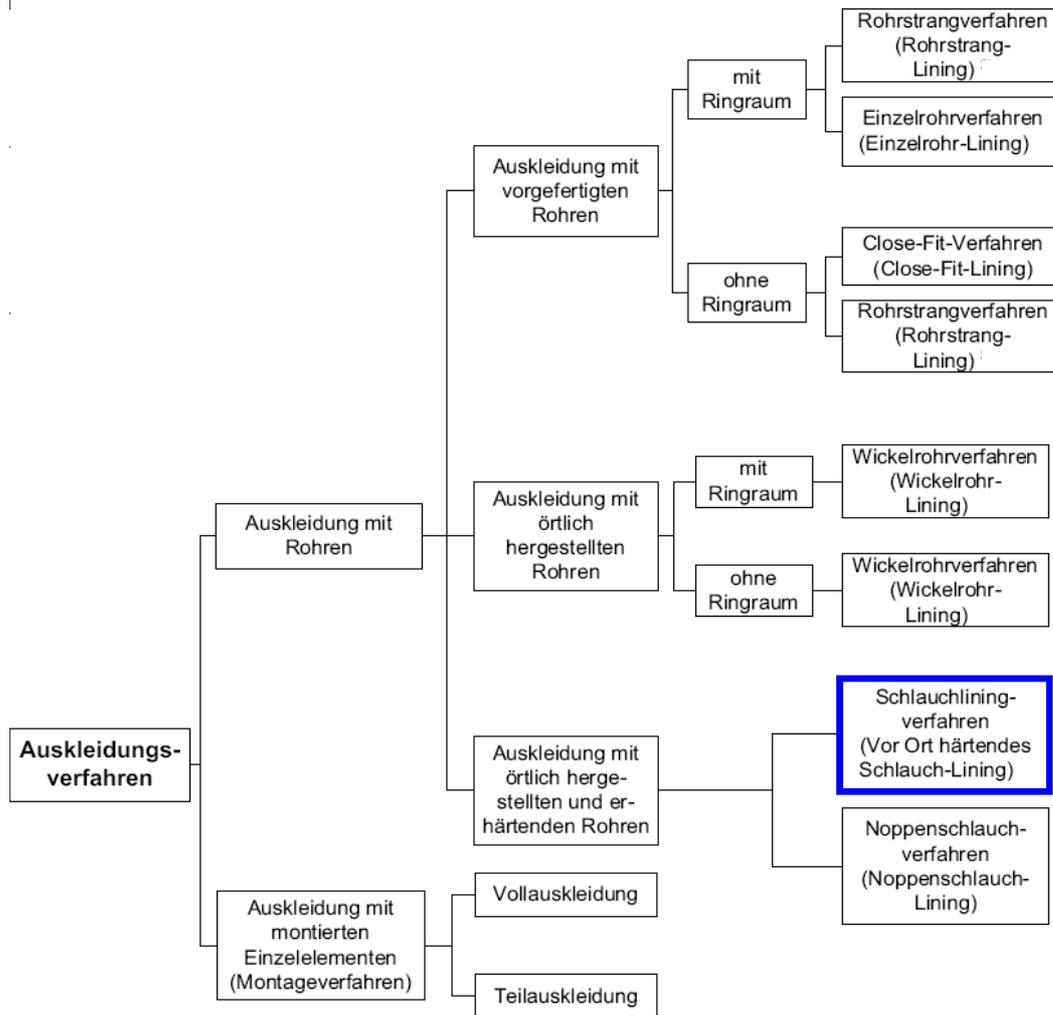


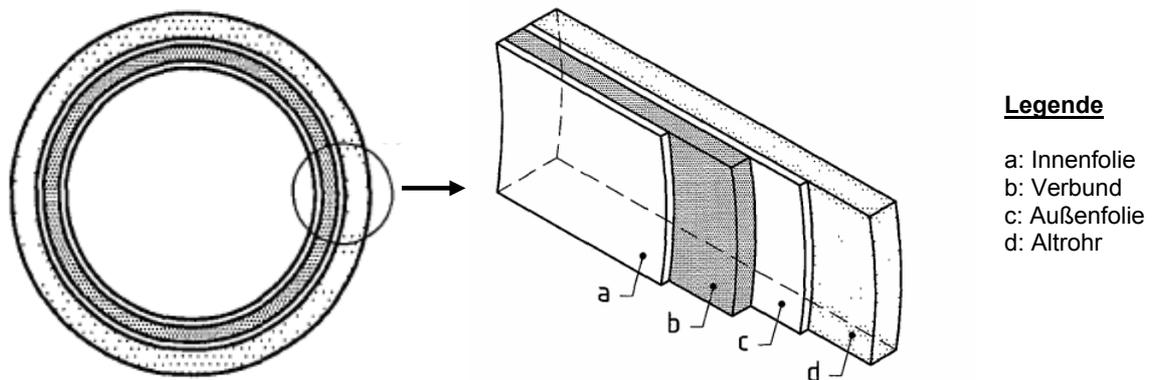
Abb. 2: Übersicht über Auskleidungsverfahren zur Sanierung von Entwässerungssystemen, in Anlehnung an [15]

Auskleidungsverfahren müssen nach [17] verschiedene Anforderungen erfüllen. Hierzu zählen u. a. die Wiederherstellung bzw. Erhöhung des Widerstandsvermögens gegen physikalische, chemische, biochemische und/oder biologische Angriffe, zur Verhinderung einer erneuten Bildung von Inkrustationen, zur Wiederherstellung und/oder Erhöhung der statischen Tragfähigkeit, der Korrosionsbeständigkeit sowie der Wasserdichtheit (vgl. auch DIN EN 752 [6]). Voraussetzungen für den Einsatz dieser Verfahrensgruppe sind zum einen die Hinnahme einer Querschnittsminderung und zum anderen die (vorübergehende) Standfestigkeit des Sanierungsobjektes während des Einbaus [17].

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen liegt der Fokus auf der Auskleidung durch „vor Ort härtende Schlauchliner“. Die technischen Hintergründe hierzu werden in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben und erläutert. Eine Übersicht der derzeit am Markt befindlichen Systeme mit den jeweiligen Kenndaten ist in Kapitel 4 dargestellt.

3.2 Vor Ort härtendes Schlauchlining

Rohre aus erhärtenden Schlauchlinern werden vor Ort, d. h. auf der Baustelle nach Einbringen in das Altrohr, hergestellt. Im Rahmen des Herstellungsprozesses wird der Liner¹ als konfektioniertes, kunstharzgetränktes Trägermaterial (Verbundwerkstoff) in Schlauchform in die zu sanierende Haltung eingebracht und unter Druck an die Innenwand angepresst. Es entsteht ein muffenloses Rohr, das mit Folien beschichtet sein kann (innen und außen). Diese Folien dienen u. a. als Einbauhilfe oder werden systemabhängig auch als integraler Bestandteil des Liners betrachtet (vgl. [18], [19], [20], [21]). In Abb. 3 ist ein Beispiel einer Liner-Wandkonstruktion dargestellt [22].



Legende

- a: Innenfolie
- b: Verbund
- c: Außenfolie
- d: Altrohr

Abb. 3: Liner-Wandkonstruktion, Beispiel [22]

3.3 Normen, Regelwerke und Anforderungsprofile

Für die Planung und Ausführung von Sanierungsmaßnahmen unter Einsatz von vor Ort härtendem Schlauchlining existieren verschiedene Normen, Regelwerke und Anforderungsprofile. In diesem Zusammenhang sind von besonderer Bedeutung die Veröffentlichungen der folgenden Institutionen:

1. Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN)
2. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)
3. Rohrleitungssanierungsverband e. V. (RSV)
4. Verband Zertifizierter Sanierungsberater für Entwässerungssysteme e. V. (VSB)

In den nachfolgend aufgeführten Normen, Regelwerken und Merkblättern (vgl. Tab. 1) sind mit Blick auf die Qualität des Sanierungsergebnisses umfangreiche Anforderungen an vor Ort härtendes Schlauchlining definiert.

¹ Nach DIN EN 13566-4 [22] ist ein Liner ein „flexibler Strumpf, bestehend aus Trägermaterial, Harzsystem, und allen Folien und/oder Verstärkungen, die vor dem Einbringen in das zu renovierende Rohr zusammengefügt werden“.

Tab. 1: Wesentliche Normen und Regelwerke für vor Ort härtendes Schlauchlining

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN)	
DIN EN 752 (2008) [6]	Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden
DIN EN 13566-1 (2003) [16]	Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungssystemen (Freispiegelleitungen) - Teil 1: Allgemeines
DIN EN 13566-4 (2003) [22]	Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungssystemen (Freispiegelleitungen) - Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining
DIN EN 13380 (2001) [23]	Allgemeine Anforderungen an Bauteile für die Renovierung von erdverlegten Abwasserleitungen und -kanälen außerhalb von Gebäuden
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)	
ATV-DVWK-M 143-1 (2004) [15]	Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 1: Grundlagen
DWA-M 143-3 (2005) [24]	Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 3: Schlauchliningverfahren (vor Ort härtendes Schlauchlining) für Abwasserleitungen und -kanäle
DWA-M 143-20 (2005) [25]	Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 20: Prüfung und Beurteilung von Sanierungsverfahren; Anforderungen Prüfkriterien und Prüfeempfehlungen – Schlauchliningverfahren und Kurzliner
ATV-DVWK-M 127-2 (2000) [9]	Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen mit Lining- und Montageverfahren
Rohrleitungssanierungsverband e. V. (RSV)	
Merkblatt RSV 1 (2006) [26]	Renovierung von Entwässerungskanälen und -leitungen mit vor Ort härtendem Schlauchlining
Verband Zertifizierter Sanierungsberater für Entwässerungssysteme e. V. (VSB)	
ZTV Nr. 5 (2003) [27]	Schlauchliningtechnik in Haltungen (drucklos)

Bereits in den 1990er Jahren erarbeitete die Hamburger Stadtentwässerung ein Anforderungsprofil für Schlauchlining, um den ausführenden Firmen einheitliche Standards vorzugeben. Ziel war es dabei, eine hohe Qualität in der Bauausführung zu erhalten [28].

Eine weitere Initiative von Netzbetreiber-Seite zur Qualitätssicherung bei Schlauchlining-Maßnahmen ging im Jahr 2003 von einigen Kommunen aus dem süddeutschen Raum aus. Veranlasst durch das vermehrte Auftreten von Qualitätsmängeln gründete sich eine Arbeitsgruppe aus insgesamt sieben Stadtentwässerungsbetrieben (Arbeitsgruppe Süddeutscher Kommunen). Im Ergebnis entstand ein Anforderungsprofil für Schlauchliner-Kanalrenovierungen, das erst kürzlich in der 3. Auflage veröffentlicht wurde [29].

Darüber hinaus erstellte die Arbeitsgruppe Süddeutscher Kommunen in Zusammenarbeit mit der Hamburger Stadtentwässerung und dem RSV im Jahr 2007 eine Zusätzliche Technische Vertragsbedingung (ZTV) für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner [30], die das zentrale Ziel verfolgt, die Prüfabläufe in den Prüfinstituten zu vereinheitlichen.

3.4 Eingesetzte Materialien

Schlauchliner bestehen im Grundsatz aus folgenden Komponenten: Trägermaterial, Harz und Folienbeschichtungen. Als **Trägermaterialien** kommen im Wesentlichen korrosionsbeständige Synthese-/ Polymerfasern (auch Nadelfilz genannt) oder Glasfasergewebe (in der Regel aus korrosionsbeständigem E-CR-Glas) zum Einsatz [17]. Weitere Unterschiede zwischen den Schlauchliningprodukten bestehen bzgl. der eingesetzten Folienbeschichtungen und der Harzsysteme.

Die heute eingesetzten **Folienbeschichtungen** bestehen in der Regel aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamid (PA) und aus Polyurethan (PUR) (vgl. Kapitel 4). Darüber hinaus werden nach [24] auch Folienbeschichtungen aus Polyvinylchlorid (PVC) sowie Kombinationen der genannten Kunststoffe eingesetzt (vgl. Tab. 3). In Abhängigkeit des Schlauchliningproduktes dient die Innenfolie in einigen Fällen lediglich als Einbauhilfe und wird nach der Aushärtung entfernt. In anderen Fällen verbleibt die Innenfolie auch nach Abschluss des Einbauprozesses weiterhin auf dem Liner. Außenfolien, sie stehen in Kontakt mit dem Altkanal, werden zum Teil werksseitig auf den Schlauch aufgebracht. Andere Systemhersteller verwenden keine werksseitige Außenfolie, sondern einen sog. Preliner. Es handelt sich dabei um einen Folienschlauch, der auf der Baustelle vor Einbau des Schlauchliners in den Kanal eingeführt wird. Ebenfalls als Preliner bezeichnet wird eine systemabhängig vor Einbau eingeführte Schutzfolie in der Rohrsohle. Sie dient beim Einzug als Gleitfolie und soll den Schlauch vor Beschädigungen schützen.

Beim Schlauchliner-Verfahren werden gewöhnlich drei verschiedene **Harzsysteme** eingesetzt: Ungesättigte Polyesterharze (UP), Epoxid-Harze (EP) und Vinylester-Harze (VE). Die chemischen Prozesse, Systemunterschiede, jeweiligen Vor- und Nachteile werden in [31] detailliert erläutert.

Bei **UP-Harzen** wird dem ungesättigten Polyester Styrol beigemischt. Es dient als Lösungsmittel und als Reaktionspartner. Infolge einer exothermen Reaktion unter Wärmeentwicklung vernetzen sich die Doppelbindungen des ungesättigten Polyesters mit dem Styrol. Chemisch eng verwandt mit den UP-Harzen sind **VE-Harze**. Sie besitzen im Vergleich zu UP-Harzen eine höhere Beständigkeit gegen chemische und thermische Belastungen sowie z. T. verbesserte mechanische Eigenschaften [31]. VE-Harzen wird ebenfalls Styrol als Reaktionspartner beigemischt. UP- und VE-Harzen werden darüber hinaus eine Vielzahl von Additiven beigefügt. Sie bewirken u. a. eine Erhöhung der Zähigkeit des Werkstoffs, Senkung der Temperaturspitzen bei der Härtung und eine Verbesserung der Benetzung der Fasern. **EP-Harze** hingegen werden ohne Mischung mit Styrol hergestellt. Im Gegensatz zu UP- und VE-Harzen weisen EP-Harze eine vergleichsweise geringe Lagerstabilität von wenigen Stunden auf [31].

Alle drei Harzklassen weisen vor der Härtung spezifische Nachteile auf bzw. können im Umgang zu gesundheitlichen Problemen führen. Dies bezieht sich bei UP- und VE-Harzen auf die Ausdünstung von Styrol. Bestandteile in EP-Harzen können Allergien auslösen [31].

Eine Übersicht der Normen und Regelwerke für verschiedene Harzsysteme kann Tab. 2 entnommen werden [24].

Tab. 2: Harzsysteme; aus DWA-M 143-3 [24], verändert

Klassifizierung in Anlehnung		
<u>UP-Harzsysteme</u> DIN 16946-2 [32], mind. Typ 1130 (thermische und mechanische Anforderungen) DIN 18820-1 [33], Gruppe 3*) (Rohstoffzusammensetzung, chem. Eigenschaften) Harze der Gruppe 3 weisen eine erhöhte Beständigkeit gegenüber kommunalem Abwasser auf *) Harze der Gruppe 2 nur bei gering chemisch und biochemisch belasteten Abwässern mit Nachweis der Tauglichkeit durch zugelassenes und unabhängiges Prüfinstitut und mit besonderem Schutz des Harz/Härtersystems vor Emulsion mit Wasser	<u>EP-Harzsysteme</u> DIN 16946-2, Typ 1020, Typ 1021, Typ 1040 [32] (thermische u. mechanische Anforderungen) Oder abwasserbeständige, hydrolysefeste, temperaturbeständige EP-Harze mit Nachweis der Eignung durch zugelassenes und unabhängiges Prüfinstitut	<u>VE-Harzsysteme</u> DIN 16946-2, mind. Typ 1130 [32] DIN 18820-1, Gruppe 5 [33]

Die Mehrzahl der Systemhersteller verwendet derzeit UP-Harze (vgl. Kapitel 4). Nach [31] liegt der Vorteil bei Verwendung dieses Harztyps zum einen in dem hervorragenden Preis-Leistungsverhältnis und zum anderen in der Lagerstabilität des nicht ausgehärteten Produktes, so dass es unter Fabrik-Bedingungen hergestellt werden kann. EP-Harze werden verstärkt im Bereich der Sanierung der (privaten) Anschlusskanalisation eingesetzt. VE-Harze finden hingegen bevorzugt in Bereichen mit hohen thermischen und chemischen Belastungen Anwendung. Die Auswahl des Harzsystems erfolgt in Abhängigkeit von den baulichen Randbedingungen und darüber hinaus von den vorhandenen thermischen, chemischen und biochemischen Belastungen [26]. Die Trägermaterialien werden mit der Harzmatrix getränkt (imprägniert). Nach dem Aushärten geht von den *Synthesefasern* keine festigkeitserhöhende oder versteifende Wirkung aus. Demgegenüber wirkt das *Glasfasergewebe* im Verbund festigkeitserhöhend [8].

Tab. 3 zeigt zusammenfassend übliche Bestandteile von vor Ort härtenden Schlauchlinern [24].

Tab. 3: Bestandteile von Schlauchlinern [24]

Schlauchlinerbestandteil	Gängige Werkstoffe
Harzsystem	UP-, VE- oder EP-Harze
Trägermaterial / Verstärkung	Synthesefasern/Polymerfasern/korrosionsbeständige Verstärkungen z. B. Glasfasern, PA (Polyamide), PAN (Acrylnitril-Polymerisate), PET (Polyethylenterephthalate), PP (Polypropylen) oder Kombinationen daraus
Folien und Beschichtungen	PE, PP, PUR, PA, PVC oder Kombinationen daraus

3.5 Verarbeitung

Schlauchliner werden entweder werksseitig imprägniert und zur Baustelle geliefert oder über mobile Tränkungsanlagen vor Ort getränkt (z. B. bei Verwendung von EP-Harzen, da sie im Gegensatz zu UP- und VE-Harzen eine kurze Reaktionszeit haben). Werksseitig harzimprägnierte Schläuche werden je nach Aushärteverfahren entweder in Kühlbehältern oder lichtundurchlässig verpackt auf die Baustelle geliefert. Bei Verwendung von UP- oder VE-Harzen sind die warmhärtenden Systeme mehrere Wochen lang, die lighthärtenden Systeme mehrere Monate ohne Qualitätseinbuße lagerstabil [31].

Als weitere wesentliche Kriterien zur Unterscheidung der Schlauchlinerverfahren sind die Art des Einbringens, Aufstellens und Aushärtens zu nennen [17]:

- Einbringen: Inversion (Umstülpen), Einziehen und Kombinationen.
- Aufstellen: Druckluft oder Wasserdruck.
- Aushärten: Warmwasser-, Wasserdampf-, UV-Härtung und Kombinationen.

Die o. a. Einbauphasen werden nachfolgend näher beschrieben:

Das **Einzugsverfahren** gliedert sich in zwei Arbeitsschritte. Zuerst wird der imprägnierte Liner im nicht-aufgeweiteten Zustand unter Einsatz einer Winde in das zu renovierende Rohr eingezogen. Im zweiten Schritt wird der Liner mit Luft- oder Wasserdruck beaufschlagt, um ihn aufzustellen und an die Altrohrwandung zu pressen (vgl. Beispiel 1). Das **Inversionsverfahren** dagegen – nach [22] auch Eversion genannt – fasst diese beiden Arbeitsschritte zusammen. Bei diesem Vorgang wird der im Einbauzustand flexible Liner unter Verwendung eines Druckmediums (Wasser oder Luft) umgestülpt bzw. in das Sanierungsobjekt eingestülpt und dabei gleichzeitig an die Altrohrwandung angedrückt (vgl. Beispiel 2). Systemabhängig werden auch beide Einbringvarianten in Kombination angewendet [21].

Bei der **Warmwasserhärtung** wird das während der Inversion genutzte Brauchwasser mittels mobilen Heizanlagen auf ca. 60 - 90 °C erhitzt. Es wird in einem Kreislauf über im Liner befindliche Schläuche zirkuliert. Die Aushärtezeit ist u. a. abhängig von der Temperatur, der Linerwanddicke, dem Harzsystem und dem Liner-Durchmesser (vgl. [19], [21], [34], [35]). Für die **Dampfhärtung** wird der aufgestellte Liner mit ca. 90 - 120 °C heißem Dampf beaufschlagt. Im Gegensatz zur Warmwasserhärtung findet i. d. R. keine interne Zirkulation statt. Der Dampf wird kontrolliert abgeleitet, um eine gleichmäßige Durchströmung sicherzustellen (vgl. [19], [21], [36], [37]). Bei der **UV-Härtung** wird in dem mit Druckluft beaufschlagten Schlauchliner z. B. durch eine Schleuse eine fahrbare UV-Lichteinheit eingelassen. Die Lichteinheit durchfährt den aufgestellten Liner mit definierter Geschwindigkeit. Dieser härtet infolge chemischer Reaktionen aus (vgl. [36], [37], [38], [39]).

Der Einbau zweier verschiedener Schlauchlinersysteme wird in den nachfolgenden Beispielen beschrieben. Auf die vor, während und nach dem Einbau durchzuführenden Maßnahmen und Prüfungen (u. a. Kalibrierung des Altkanals, Kanalreinigung, Dichtheitsprüfung, Wiederherstellung von Hausanschlüssen), die in Abhängigkeit der örtlichen Randbedingungen sehr umfangreich sein können, wird nicht eingegangen. Weiterführende Literaturquellen über diese Einbauleistungen sind u. a. [13], [14], [17], [19], [21], [22], [26], [29], [34], [35], [36], [37], [38], [39].

Beispiel 1: Brandenburger GFK-Liner, Einzugsverfahren, UV-Aushärtung

Der werkseitig imprägnierte Schlauch wird lichtgeschützt zur Baustelle geliefert (vgl. Abb. 4 a). Auf der Baustelle wird zunächst eine Schutz- und Gleitfolie (Preliner) per Seilwinde vom Start- zum Zielschacht in das zu sanierende Kanalrohr eingezogen (vgl. Abb. 4 b). Im Anschluss wird der Schlauchliner, der mit einer lichtschützenden Folie umhüllt ist, für den Einzug vorbereitet. Hierzu wird am Schlauchende mit Hilfe von Spanngurten ein sogenannter „Einzugskopf“ hergestellt (vgl. Abb. 4 c).



a) UV-geschützt verpackter Schlauchliner



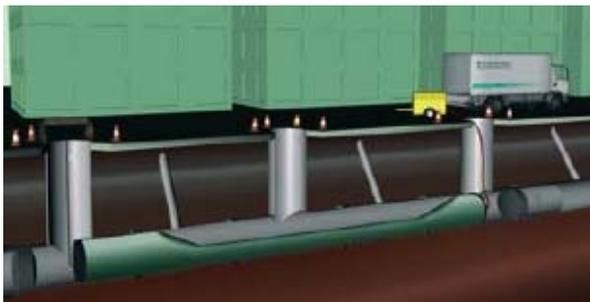
b) Einzug des Preliners



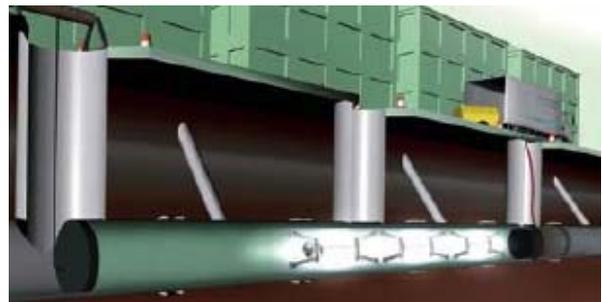
c) Herstellung des „Einzugskopf“

Abb. 4: Vorbereitungen vor dem Einzug, Beispiel Brandenburger GFK-Liner [Fotos: IKT]

Der Liner wird im nicht aufgeweiteten Zustand unter Einsatz einer Winde in das zu renovierende Rohr eingezogen und an den Enden mit sogenannten Packern verschlossen. Im nächsten Schritt wird der Liner mit Druckluft beaufschlagt, aufgestellt und an die Altrohrwand gepresst (vgl. Abb. 5 a). Unter Beibehaltung des konstanten Innendrucks wird der Schlauchliner dann mit Hilfe einer fahrbaren UV-Lichteinheit – die über eine Schleuse im Packer in den unter Druckluft aufgestellten Liner eingeführt wird – ausgehärtet (vgl. Abb. 5 b). Bestandteile der Lichteinheit sind auch eine Kamera sowie Temperatur- und Drucksensoren. Diese dienen der Prozessüberwachung und -dokumentation.



a) Aufstellen mittels Druckluft



b) Aufstellen mittels Druckluft

Abb. 5: Aufstellen und Aushärtung eines GFK-Liners, Beispiel System Brandenburger [40]

Nach kurzer Abkühlphase wird die als Einbauhilfe dienende Innenfolie entfernt. Der Schlauchliner ist ausgehärtet und die Nacharbeiten beginnen (z. B. Anbindungen in den Schächten, Öffnen der seitlichen Zuläufe).

Beispiel 2: Insituform NF-Liner, Inversionsverfahren, Warmwasser-Aushärtung

Der werkseitig mit einseitiger Folienbeschichtung gefertigte und imprägnierte Schlauchliner wird in einer Transportwanne mit Eis gelagert und zum Einbauort transportiert (vgl. Abb. 6 a). Nach dem Aufbau der Baustelleneinrichtung (z. B. der Inversionsturm, Abb. 6 b) wird zunächst ein Preliner über den Startschacht in die zu sanierende Haltung unter Einsatz von Druckluft invertiert (vgl. Abb. 6 c).



a) Anlieferung: Schlauchliner in Eis gelagert



b) Aufbau des Inversionsturms



c) Inversion des Preliners

Abb. 6: Vorbereitung der Schlauchlinerinversion, Beispiel Insituform NF-Liner [Fotos: IKT]

Im Anschluss wird der Schlauchliner mittels Wasserdruck in die Haltung eingestülpt (vgl. Abb. 7 a). In Abhängigkeit der Randbedingungen (u. a. Tiefenlage des Kanals, Größe und Gewicht des Liners) werden für den Einbau ein Inversionsturm sowie ein Förderband benötigt. Die Heizschläuche (vgl. Abb. 7 b) sind am Ende des Liners befestigt und werden im Zuge des Inversionsvorgangs in die zu sanierende Haltung eingeführt. Nachdem der Schlauch komplett eingestülpt ist, beginnt der Aushärtungsprozess. Das für die Inversion genutzte Brauchwasser wird in einer mobilen Heizanlage auf ca. 60 - 90 °C erhitzt und in einem Kreislauf über die im Liner befindlichen Heizschläuche zirkuliert (vgl. Abb. 7 c). In den (Zwischen-) Schächten wird in 30-minütigem Abstand die Temperatur gemessen und protokolliert. Nachdem die erforderliche Temperatur erreicht ist, wird diese über einen definierten Zeitraum gehalten. Die Abkühlung des Brauchwassers läuft ebenfalls kontrolliert ab, um schädliche Eigenspannungen infolge des Temperaturabfalls zu vermeiden.



a) Inversion des Schlauchliners [Foto: IKT]



b) Befestigung der Heizschläuche [Foto: IKT]



c) Heizvorgang des invertierten Liners [41]

Abb. 7: Beispiel 2: Einbau eines Schlauchliners, Beispiel Insituform NF-Liner

Nachdem der Schlauchliner ausgehärtet und die Abkühlphase beendet ist, beginnen die Nacharbeiten.

3.6 Statik

Die statische Berechnung von Schlauchliner erfolgt in der Regel nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9]. Die Bemessung erfolgt in Abhängigkeit des Altrohrzustandes. Weiterführende Literaturquellen hierzu sind u. a. [9], [42], [43], [44].

3.7 Qualitätssicherung

Im Gegensatz zu werkseitig produzierten Rohren erreichen Schlauchliner erst auf der Baustelle ihre endgültigen geometrischen sowie mechanischen Eigenschaften. Die Qualität der Ausführung ist ein bestimmendes Kriterium für die Beschaffenheit des Endprodukts [45]. Der Qualitätssicherung des fertigen Produkts kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Sie erfolgt in der Regel in drei Stufen [24]:

1. Dichtheitsprüfung auf der Baustelle unmittelbar nach dem Einbau,
2. Optische Untersuchung mittels TV-Inspektion oder Begehung,
3. Probenentnahme und labortechnische Untersuchungen an Schlauchlinerproben.

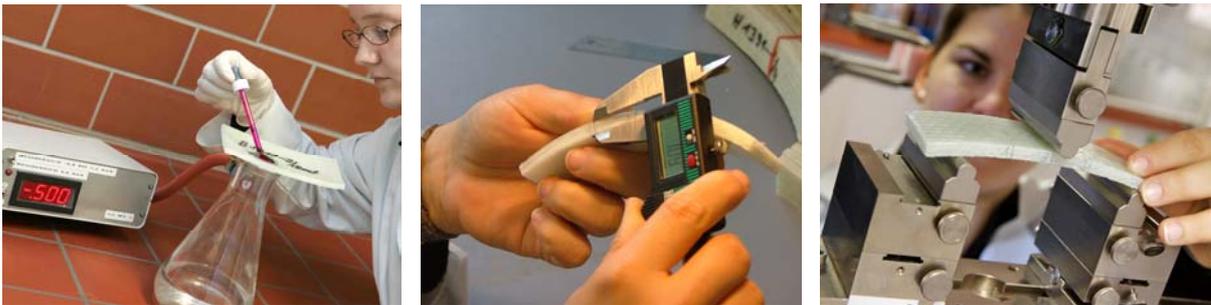
Die **Dichtheitsprüfung** auf der Baustelle erfolgt i. d. R. gemäß DIN EN 1610 [46] bzw. dem DWA Merkblatt 143-6 [47]. Der ausgehärtete Schlauchliner wird vor dem Öffnen der Hausanschlüsse auf Dichtheit überprüft. Jedoch muss bei dieser Prüfung beachtet werden, dass u. U. vorhandene Einbauhilfen mit abdichten und in diesen Fällen der eigentliche Liner mit einer Strangprüfung nicht zuverlässig auf Dichtheit überprüft werden kann.

Nach Fertigstellung sämtlicher Arbeiten am Schlauchliner (z. B. Herstellung der seitlichen Zuläufe) erfolgt üblicherweise die **optische Untersuchung** mittels TV-Fahrgewagenkamera bzw. Begehung. Hierbei wird das Produkt u. a. auf Deformationen, Faltenbildungen und weiteren Auffälligkeiten überprüft.

Am ausgehärteten Liner wird eine Materialprobe entnommen. Die Entnahme sollte im Beisein des Auftragnehmers erfolgen. Bei Kanälen nicht begehbaren Nennweite sieht die derzeitige Praxis eine **Probenentnahme** aus dem Schachtbereich vor. Der Entnahmeort wird im Vorfeld der Sanierung z. T. unter Verwendung von Stützkörpern präpariert, um die Geometrie des Altkanals zu simulieren und so eine Überdehnung des Liners zu vermeiden. Zum Einsatz kommen dabei u. a. sogenannte Jeanskappen oder Rohre aus Kunststoff bzw. Metall. Bei größeren Kanaldurchmessern und vom Kreisprofil abweichenden Geometrien (z. B. Ei-Profil) werden Materialproben auch aus dem Haltbereich entnommen.

Im Anschluss an die Probenentnahme folgt die **labortechnische Prüfung**. Die Arbeitsgemeinschaft Prüfinstitute Schlauchliner (APS) empfiehlt, grundsätzlich folgende Untersuchungen durchzuführen [45]:

- Wasserdichtheitsprüfung nach APS-Prüfrichtlinie [48], vgl. Abb. 8 a,
- Messung der statisch tragfähigen Wanddicke, vgl. Abb. 8 b,
- Mechanische Prüfung (3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 [49] mit den Modifikationen der DIN EN 13566-4 [22]), vgl. Abb. 8 c.



a) Wasserdichtheitsprüfung nach APS-Richtlinie

b) Messung der Wanddicke

c) Mechanische Prüfung, Drei-Punkt-Biegeversuch

Abb. 8: Qualitätsprüfungen an Schlauchlinerproben im Labor [Fotos: IKT]

Bei Feststellung von Qualitätsabweichungen können weitergehende Parameter bestimmt werden, wie z. B. die 24h-Kriechneigung, der Reststyrolgehalt, der Glühverlust oder die Glasübergangstemperatur. Umfangreiche Beschreibungen der Prüfungen sind u. a. in [8], [22], [25], [30], [45], [50], [51] enthalten.

Eine geringfügig abweichende Vorgehensweise bei der Beurteilung der Dichtheitsprüfung von Schlauchlinerproben wird in der ZTV für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner [30] angeführt. Nach der APS-Prüfrichtlinie gilt eine Probe als undicht, wenn ein Durchtritt der Prüflüssigkeit (Tropfen, Schaumbildung oder Feuchtigkeit) im Laminat optisch festgestellt wird. In der ZTV gilt ein Wasserdurchtritt als gegeben, sofern ein auf die Probe aufgelegtes Papier durch Feuchtigkeit verfärbt wird.

4 Marktüberblick Schlauchlinersysteme

Nachfolgend wird ein Überblick über eine Auswahl typischer am deutschen Markt angebotener Schlauchliner-Systeme gegeben, die im Bereich von Hauptkanälen ($> DN 500$)² eingesetzt werden. Den in den nachfolgenden Tabellen (Tab. 4 bis Tab. 6) aufgeführten Daten liegen umfangreiche Recherchen zu Grunde. Hierbei wurde die nachfolgend aufgeführte Vorgehensweise gewählt: Der erste Schritt umfasste die Erhebung, Sichtung und Auswertung von Literaturquellen, wie z. B. Produktkatalogen und -beschreibungen, Verfahrenshandbüchern und bauaufsichtlichen Zulassungen des DIBt³ [52]. Ergänzend wurden Verfahrensanbieter bzw. Produkthersteller befragt, um Informationslücken zu schließen sowie aktuelle technische Entwicklungen berücksichtigen zu können. Darüber hinaus wurde ein Abgleich mit bestehenden Übersichten aus der Literatur vorgenommen [50], [53], [54].

In Kapitel 3 wurde bereits deutlich, dass der Schlauchlinermarkt eine Vielzahl von Produkten und Verfahren beinhaltet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Rechercheergebnisse nach zwei wesentlichen Kriterien strukturiert:

- Kriterium 1: **Art des verwendeten Trägermaterials**
(Glasfasern bzw. Polyester-Synthesefasern),
- Kriterium 2: **Vorliegen einer bauaufsichtlichen Zulassung des DIBt.**

Kriterium 1 wurde gewählt, da sich aus dieser Materialauswahl u. a. wesentliche Unterschiede ableiten, so z. B. hinsichtlich der Konstruktion des Wandaufbaus und des Einbauorganges. Unter der Voraussetzung identischer Belastungsszenarien liegen die mechanischen Kennwerte (E-Modul und Biegespannung) glasfasergetragener Schlauchliner (GFK) im Vergleich zu synthese- bzw. nadelfilzbasierten (NF) Systemen höher. Ursache ist, dass von den Synthesefasern nach dem Aushärten keine festigkeitserhöhende oder versteifende Wirkung ausgeht. Demgegenüber wirkt das Glasfasergewebe im Verbund festigkeitserhöhend (vgl. Kapitel 3). Synthesefaserbasierte Schlauchliner werden daher bei gleichen Beanspruchungen mit größeren Wanddicken verbaut als Glasfaser-Schlauchliner.

Kriterium 2 gewinnt für öffentliche Kanalnetzbetreiber zunehmend an Bedeutung bei der Ausschreibung und Auftragsvergabe von Sanierungsmaßnahmen unter Einsatz von Schlauchlinern. So wird beispielsweise in [29] das Vorliegen einer derartigen Zulassung zwingend vorausgesetzt. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass eine bauaufsichtliche Zulassung rechtlich nur im Geltungsbereich der Landesbauordnungen, d. h. auf privatem Grund, verbindlich ist und ihre Anwendung im öffentlichen Bereich als besondere Qualitätsanforderung der Kommunen zu verstehen ist. Insgesamt besitzen derzeit fünf Glasfaser-Schlauchliner-Systeme von fünf verschiedenen Herstellern eine gültige bauaufsichtliche Zulassung, für einen Einsatz im Nennweitenbereich $> DN 500$ (vgl. Tab. 4). Dies gilt gegenwärtig auch für sieben Synthesefaser-Schlauchliner von fünf unterschiedlichen Produzenten (vgl. Tab. 5). Weitere Produkte, die (bisher) über keine gültige bauaufsichtliche Zulassung verfügen, enthält Tab. 6.

² Derzeit verfügen über 20 Schlauchlinersysteme über eine gültige DIBt-Zulassung. Einige dieser Produkte werden jedoch hauptsächlich im Bereich der privaten Kanalisation eingesetzt (DN 100 bis DN 300). Um den Marktüberblick auf den Bereich der öffentlichen Kanalisation einzugrenzen, werden nur Systeme dargestellt, die auch gemäß DIBt-Zulassung in Nennweiten $> DN 500$ eingesetzt werden können.

³ DIBt – Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Die Tabellen beinhalten vier Gliederungsebenen. Neben allgemeinen Daten über die Systeme (u. a. Bezeichnung, Trägermaterial, Harztyp) werden Informationen bzgl. des Einbauvorgangs (Installationsmethode, Aushärtung usw.) aufgeführt. Darüber hinaus sind Anwendungsbereiche und Einsatzgrenzen (z. B. Nennweitenbereich, Altrohrmaterial) dargestellt. Der letzte Tabellenabschnitt beinhaltet die mechanischen Kennwerte gemäß DIBt-Zulassung bzw. Herstellerangaben.

Die verschiedenen Systeme weichen nicht nur in technischer Hinsicht voneinander ab. Es bestehen auch Unterschiede bei der Umsetzung der Prozessabläufe, die sich an die werkseitige Produktion des Schlauchliners (getränkter Faserschlauch) bzw. der einzelnen Bestandteile (trockener Schlauch, Harz, Zusatzstoffe) anschließen. Hierzu zählen insbesondere der Transport zur Baustelle, der Linereinbau (ggf. die Mischung der Harzsysteme sowie die Trängung des Schlauchliners) sowie die erforderlichen Nacharbeiten (z. B. Auffräsen von Hausanschlüssen, Herstellung von Schachtanbindungen, Probenentnahme). Einige Schlauchlinerhersteller konzentrieren sich ausschließlich auf die Liner-Produktion. In diesem Fall wird der Einbau, ein Prozessschritt mit entscheidendem Einfluss auf die Sanierungsqualität, von spezialisierten Dienstleistern übernommen. Die Nacharbeiten werden ggf. von einem Subunternehmer ausgeführt. Andere Schlauchlinerhersteller dagegen verfügen über eigene Baukapazitäten (Personal und technische Ausrüstung) und übernehmen generell auch die Bauausführung vor Ort. Die dritte Variante stellt eine Art Mischform der beiden erstgenannten dar. Hierbei handelt es sich um Schlauchlinerhersteller, die sowohl mit eigener Technik in der Ausführung tätig sind als auch externe Anwender beliefern.

Nach [54] gibt es in Deutschland derzeit ca. 50 Anwender von Schlauchlinerverfahren für Hauptkanäle. Hiervon verfügen derzeit 41 Dienstleister [55] über ein gültiges Gütezeichen des Güteschutzes Kanalbau (RAL 961 S27). Aufgrund der hohen Anwenderanzahl werden diese nicht in den Übersichten (Tab. 4 bis Tab. 6) genannt. Die gesamte Liste der Inhaber gültiger RAL-Gütezeichen kann jedoch dem Internetauftritt des Güteschutzes Kanalbau e.V. entnommen werden (vgl. [55]).

Tab. 4: Glasfaser-Schlauchliner mit bauaufsichtlicher Zulassung, Stand Feb. 2009

Hersteller	BKP Berolina Polyester GmbH & Co. KG [38], [56]	Brandenburger Liner GmbH & Co. KG [39], [57]	IMPREG GmbH [36], [58]
Allgemeine Daten			
Schlauchlinersystem (Verfahrensbezeichnung)	Berolina-Liner bzw. Berolina-Liner "Lightspeed"	Brandenburger Liner (ADV75, ADV95, ADV120)	IMPREG-Liner GL01 ^{*8}
Systemanbieter / Anwender	eigene Bauleistung: nein Dritt-Anwender: ja	eigene Bauleistung: ja Dritt-Anwender: ja	eigene Bauleistung: nein Dritt-Anwender: ja
RAL Gütezeichen (Güteschutz Kanalbau)	RAL-GZ 961 S27.09	RAL-GZ 961 S27.18	RAL-GZ 961 S27.20
Trägermaterial	Glasfaser (E o. E-CR)	Glasfaser (E o. E-CR)	Glasfaser (E-CR)
Folienbeschichtung ^{*1} (Innenfolie ^{*2} , Außenfolie ^{*3})	Innen: Material: k. A. Außen: PE/PA/PE	Innen: PA/PE Außen: PE/PA/PE	Innen: PA/PE Außen: PE/PA/PE
Harztyp	UP oder VE	UP oder VE	UP
Einbauvorgang			
Schutzfolie / Preliner	PVC- oder PE-Schutzfolie	PVC- oder PE-Schutzfolie	PE-Gleitfolie
Installation (Einbaumethode)	Einbau: Einzug Aufstellen: Druckluft	Einbau: Einzug Aufstellen: Druckluft	Einbau: Einzug Aufstellen: Druckluft
Aushärtung	UV	UV	UV oder Dampf
Anschlussanbindung	Hutprofil	Hutprofil und weitere Verfahren mit DIBt-Zulassung	zulässig sind nur Verfahren mit DIBt-Zulassung
Anwendungsbereich / Einsatzgrenzen			
Nennweitenbereich	DN 150 - DN 1000 ^{*9}	DN 150 - DN 1000 Ei 200/300 - Ei 800/1200	DN 150 - DN 1200 Ei 250/375 - Ei 950/1425
Querschnittsform	Kreis- und Ei-Profile ^{*9}	Kreis- und Ei-Profile	Kreis- und Ei-Profile
max. Einbaulänge [m]	230	300	300
Wandstärke [mm]	3 - 11	3 - 20	4 - 14
Altrohrmaterialien	STZ, B, STB, GFK, FZ, PVC-U, PE-HD, Guss	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC-U, PE-HD, Guss	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC-U, PE-HD, Guss
Mechanische Kennwerte gemäß DIBt-Zulassung			
Zulassungsnummer	Z-42.3-336 (25.01.2007)	Z-42.3-330 (28.04.2008)	Z-42.3-365 (30.06.2007)
E-Modul [N/mm ²] (Kurzzeit)	8000 ^{*4}	7500 (ADV75), 9500 (ADV95), 10800 (ADV120) ^{*6*7}	9500 ^{*4}
E-Modul [N/mm ²] (Langzeit) ^{*5}	5500	4200 (ADV75), 5900 (ADV95), 8100 (ADV120) ^{*7}	6300
Biegespannung [N/mm ²] (Kurzzeit) ^{*6}	150	180 (ADV75), 200 (ADV95), 230 (ADV120)	180
Biegespannung [N/mm ²] (Langzeit) ^{*5}	95	100 (ADV75), 125 (ADV95), 170 (ADV120)	120

Tab 4: Glasfaser-Schlauchliner mit bauaufsichtlicher Zulassung, Stand Feb. 2009 (Fortsetzung)

Hersteller	SAERTEX multiCom GmbH [37], [59]	INPIPE SWEDEN AB [60]
Allgemeine Daten		
Schlauchlinersystem (Verfahrensbezeichnung)	SAERTEX-Liner [M-Liner (1), S-Liner (2)]	INPIPE-Liner
Systemanbieter / Anwender	eigene Bauleistung: nein Dritt-Anwender: ja	eigene Bauleistung: ja Dritt-Anwender: nein
RAL Gütezeichen (Güteschutz Kanalbau)	RAL-GZ 961 S27.17	RAL-GZ 961 S27.07
Trägermaterial	Glasfaser (E-CR)	Glasfaser (E-CR)
Folienbeschichtung* ¹ (Innenfolie* ² , Außenfolie* ³)	Innen: PA/PE Außen: PE/PA/PE	Innen: PE/PUR Außen: PE/PUR
Harztyp	UP oder VE	UP oder VE
Einbauvorgang		
Schutzfolie / Preliner	PE-Gleitfolie	PVC-U- oder PE-Schutzfolie
Installation (Einbaumethode)	Einbau: Einzug Aufstellen: Druckluft	DN 150 - 400: Einbau per Druckluft-Inversion DN 150 - 800: Einbau per Einzug Aufstellen per Druckluft
Aushärtung	UV oder Dampf	UV
Anschlussanbindung	Hutprofil oder Injektionsverfahren	zulässig sind nur Verfahren mit DIBt-Zulassung
Anwendungsbereich / Einsatzgrenzen		
Nennweitenbereich	DN 100 - DN 1200 (2) Ei 250/375 - Ei 950/1425 (2) DN 150 - DN 400 (1)	DN 150 - DN 800
Querschnittsform	Kreis-, Ei-, Kasten- und Maulprofile* ⁹	Kreisprofile
max. Einbaulänge [m]	500	200
Wandstärke [mm]	4 - 12 (2) 3 und 4 (1)	3 - 15
Altrohrmaterialien	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC-U, PE-HD, Guss	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC-U, PE-HD, Guss
Mechanische Kennwerte gemäß DIBt-Zulassung		
Zulassungsnummer	Z-42.3-350 (11.09.2007)	Z-42.3-429 (05.08.2008)
E-Modul [N/mm ²] (Kurzzeit)	12000 (2) 7000 (1)	11000 * ⁴
E-Modul [N/mm ²] (Langzeit) * ⁵	8800 (2) 3800 (1)	7700 (DN 150 - DN 375) 7900 (DN 375 - DN 800)
Biegespannung [N/mm ²] (Kurzzeit) * ⁶	250 (2) 200 (1)	280 (DN 150 - DN 375) 350 (DN 375 - DN 800)
Biegespannung [N/mm ²] (Langzeit) * ⁵	185 (2) 110 (1)	200 (DN 150 - DN 375) 250 (DN 375 - DN 800)

k. A.: keine Angabe

 *¹: Mehrschichtverbundfolie

 *²: dient als Einbauhilfe und wird vor Inbetriebnahme entfernt

 *³: inkl. außenliegender UV-Schutzfolie

 *⁴: in Anlehnung an DIN EN 1228 (Scheiteldruckversuch)

 *⁵: in Anlehnung an DIN EN 761 (Ermittlung des Abminderungsfaktors A zur Bestimmung der Langzeitwerte)

 *⁶: in Anlehnung an DIN EN ISO 178 (3-Punkt-Biegeversuch)

 *⁷: in der DIBt-Zulassung werden abweichende Kennwerte für Prüfungen in Umfangsrichtung in Anlehnung an DIN EN 1228 (Scheiteldruckversuch) aufgeführt

 *⁸: nach Herstellerangaben ist eine DIBt-Zulassung für einen neuen Schlauchliner (Bez. FZ07) beantragt

 *⁹: laut Herstellerangabe, abweichend der Angaben gemäß DIBt-Zulassung

Tab. 5: Synthesefaser-Schlauchliner mit bauaufsichtlicher Zulassung, Stand Feb. 2009

Hersteller	KMG Pipe Technologies GmbH *¹ [20], [21]	NORDITUBE Technologies AB *¹ [34], [61]	Insituform Rohrspannungstechniken GmbH [19], [62]
Allgemeine Daten			
Schlauchlinersystem (Verfahrensbezeichnung)	KM INLINER	UniLiner	Insituform
Systemanbieter / Anwender	eigene Bauleistung: ja Dritt-Anwender: ja	eigene Bauleistung: k. A. Dritt-Anwender: ja	eigene Bauleistung: ja Dritt-Anwender: nein
RAL Gütezeichen (Güteschutz Kanalbau)	RAL-GZ 961 S27.02	RAL-GZ 961 S27.23	RAL-GZ 961 S27.01
Trägermaterial	Polyester-Synthesefaser	Polyester-Synthesefaser	Polyester-Synthesefaser
Folienbeschichtung (Innenfolie, Außenfolie)	Innen: PUR Außen * ² : PE/PA/PE (Var. A), PE (Var. B)	Innen: PU Außen: keine Folie	Innen * ³ : PE (Var. A), PP (Var. B), PU (Var. C) Außen: keine Folie
Harztyp	UP oder VE	UP	UP, VE oder EP
Einbauvorgang			
Schutzfolie / Preliner	Außenfolie als Einbauschutz (s. o.)	PE-Preliner	PE-Preliner
Installation (Einbaumethode)	Hauptschlauch: Einzug * ⁴ Kalibrierschlauch: Inversion * ⁴	Inversion	Inversion
Aushärtung	Warmwasser oder Dampf	Warmwasser oder Dampf	Warmwasser oder Dampf
Anschlussanbindung	Hutprofil und weitere Verfahren mit DIBt-Zulassung	zulässig sind nur Verfahren mit DIBt-Zulassung	Hutprofil und weitere Verfahren mit DIBt-Zulassung
Anwendungsbereich / Einsatzgrenzen			
Nennweitenbereich	DN 150 - DN 1200 Ei 200/300 - Ei 800/1200	DN 100 - DN 1200	DN 100 - DN 1600 Ei 200/300 - Ei 1000/1500
Querschnittsform	Kreis- und Ei-Profile	Kreisprofile	Kreis- und Ei-Profile
max. Einbaulänge [m]	460	500	300
Wandstärke [mm]	3 - 45,6	3 - 25	3 - 50
Altrohrmaterialien	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC-U, PE-HD, Guss	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC, PE, PP, MW, Guss	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC-U, PE-HD, Guss
Mechanische Kennwerte gemäß DIBt-Zulassung			
Zulassungsnummer	Z-42.3-335 (11.06.2008)	Z-42.3-380 (15.08.2005)	Z-42.3-305 (24.11.2008)
E-Modul [N/mm ²] (Kurzzeit)	4700 * ⁵ ; 2800 * ⁷ (UP) 5200 * ⁵ ; 2200 * ⁷ (VE)	3000 * ⁷ 3500 * ⁵	2800 * ^{5*7} (UP) 2200 * ^{5*7} (VE und EP)
E-Modul [N/mm ²] (Langzeit) * ⁶	2350; 1400 (UP) 3040; 1290 (VE)	1470	1400 (UP) 1100 (VE und EP)
Biegespannung [N/mm ²] (Kurzzeit) * ⁷	36 (UP und VE)	44	28 * ⁸ (bis 9 mm) 32 * ⁸ (> 9 mm)
Biegespannung [N/mm ²] (Langzeit) * ⁶	18 * ⁶ (UP) 21 * ⁶ (VE)	18	14 * ⁸ (bis 9 mm) 16 * ⁸ (> 9 mm)

Tab. 5: Synthesefaser-Schlauchliner mit bauaufsichtlicher Zulassung, Stand Feb. 2009 (Fortsetzung)

Hersteller	RS Technik AG [35], [63], [64]	
Allgemeine Daten		
Schlauchlinersystem (Verfahrensbezeichnung)	CityLiner®	PolyLiner®
Systemanbieter / Anwender	eigene Bauleistung: nein Dritt-Anwender: ja	eigene Bauleistung: nein Dritt-Anwender: ja
RAL Gütezeichen (Güteschutz Kanalbau)	RAL-GZ 961 S27.16	RAL-GZ 961 S27.29
Trägermaterial	Polyester-Synthesefaser	
Folienbeschichtung (Innen-, Außenfolie)	Innen: PU Außen: keine Folie	Innen: PU Außen: keine Folie
Harztyp	EP	UP
Einbauvorgang		
Schutzfolie / Preliner	PVC-Preliner	PVC-Preliner
Installation (Einbaumethode)	Inversion	
Aushärtung	Warmwasser	
Anschlussanbindung	zulässig sind nur Verfahren mit DIBt-Zulassung	
Anwendungsbereich / Einsatzgrenzen		
Nennweitenbereich	DN 150 - DN 600	DN 200 - DN 1400 Ei 200/300 - Ei 1000/1500
Querschnittsform	Kreisprofile	Kreis- und Ei-Profile
max. Einbaulänge [m]	300	
Wandstärke [mm]	3 - 15	4,5 - 30
Altrohmaterialien	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC, PE, PP, Guss	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC, PE, PP, Guss
Mechanische Kennwerte gemäß DIBt-Zulassung		
Zulassungsnummer	Z-42.3-377 (03.06.2006)	Z-42.3-424 (26.03.2008)
E-Modul [N/mm ²] (Kurzzeit) * ⁵	2280 (DN 150 - DN 400) 2400 (> DN 400)	3200
E-Modul [N/mm ²] (Langzeit) * ⁶	1500 (DN 150 - DN 400) 1200 (> DN 400)	1550
Biegespannung [N/mm ²] (Kurzzeit) * ⁷	48 (DN 150 - DN 400) 55 (> DN 400)	36
Biegespannung [N/mm ²] (Langzeit) * ⁶	31 (DN 150 - DN 400) 21 (> DN 400)	17

Tab. 5: Synthesefaser-Schlauchliner mit bauaufsichtlicher Zulassung, Stand Feb. 2008 (Fortsetzung)

Hersteller	VFG - Vereinigte Filzfabriken AG [65], [66]	Per Aarsleff A/S [67]
Allgemeine Daten		
Schlauchlinersystem (Verfahrensbezeichnung)	lineTEC SP-Liner	PAA-S-Liner
Systemanbieter / Anwender	eigene Bauleistung: nein Dritt-Anwender: ja	eigene Bauleistung: k. A. Dritt-Anwender: k. A.
RAL Gütezeichen (Güteschutz Kanalbau)	k. A.	k. A.
Trägermaterial	Polyester-Synthesefaser	Polyester-Synthesefaser
Folienbeschichtung (Innen-, Außenfolie)	Innen: PU Außen: keine Folie	Innen: PE, PP o. PU Außen: keine Folie
Harztyp	EP	UP
Einbauvorgang		
Schutzfolie / Preliner	PE-Preliner	PE-Preliner
Installation (Einbaumethode)	Inversion	Inversion
Aushärtung	Warmwasser oder Dampf	Warmwasser oder Dampf
Anschlussanbindung	zulässig sind nur Verfahren mit DIBt- Zulassung	zulässig sind nur Verfahren mit DIBt- Zulassung
Anwendungsbereich / Einsatzgrenzen		
Nennweitenbereich	DN 150 - DN 750	DN 150 - DN 700
Querschnittsform	Kreisprofile	Kreisprofile
max. Einbaulänge [m]	200	k. A.
Wandstärke [mm]	4 - 18	mind. 3
Altrohrmaterialien	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC-U, PE-HD, Guss	STZ, B, STB, FZ, GFK, PVC-U, PE-HD, Guss
Mechanische Kennwerte gemäß DIBt-Zulassung		
Zulassungsnummer	Z-42.3-434 (06.02.2009)	Z-42.3-433 (05.01.2009)
E-Modul [N/mm ²] (Kurzzeit)	2700 ^{*7} 2900 ^{*5}	2800 ^{*5*7}
E-Modul [N/mm ²] (Langzeit) ^{*6}	1600	1250
Biegespannung [N/mm ²] (Kurzzeit) ^{*7}	63	28 ^{*8} (bis 9 mm) 32 ^{*8} (> 9 mm)
Biegespannung [N/mm ²] (Langzeit) ^{*6}	34	12 ^{*8} (bis 9 mm) 14 ^{*8} (> 9 mm)

k. A.: keine Angabe

^{*1}: KMG Pipe Technologie GmbH und NORDITUBE Technologies AB sind Unternehmen der SEKISUI CPT GmbH

^{*2}: Außenfolie aus PE (Variante B) ist gemäß DIBt-Zulassung integraler Bestandteil des Liners (gilt nicht für Mehrschichtverbundfolie, Var. A)

^{*3}: Innenfolien aus PE (Variante A) und PP (Variante B) sind gemäß DIBt-Zulassung integraler Bestandteil des Liners (gilt nicht für Innenfolie aus PU, Var. C)

^{*4}: System besteht aus zwei Schläuchen, die nacheinander eingebaut werden

^{*5}: in Anlehnung an DIN EN 1228 (Scheiteldruckversuch)

^{*6}: in Anlehnung an DIN EN 761 (Ermittlung des Abminderungsfaktors A zur Bestimmung der Langzeitwerte)

^{*7}: in Anlehnung an DIN EN ISO 178 (3-Punkt-Biegeversuch)

^{*8}: Die Biegespannung ist abhängig von der Wanddicke, aber unabhängig vom Harztyp

Tab. 6: Übersicht Schlauchliner ohne bauaufsichtliche Zulassung, Stand Feb. 2009

Hersteller	NORDITUBES Technologies AB [61]	Linertec GmbH [50]	EasyLiner GmbH [68], [69]
Allgemeine Daten			
Schlauchlinersystem (Verfahrensbezeichnung)	Nordiwall * ¹	Euroliner	PUR Liner (1) OF Liner (2)
Systemanbieter / Anwender	k. A.	k. A.	eigene Bauleistung: nein Dritt-Anwender: ja
RAL Gütezeichen (Güteschutz Kanalbau)	RAL-GZ 961 S27.06	k. A.	k. A.
Trägermaterial	Polyester-Synthesefaser	Glasfaser	Polyester-Synthesefaser
Folienbeschichtung (Innen-, Außenfolie)	Innen: k. A. Außen: PE	k. A.	Innen: PU (1) Polyolefin (2) Außen: keine Folie
Harztyp	UP, VE oder EP	UP	EP
Einbauvorgang			
Schutzfolie / Preliner	k. A.	k. A.	k. A.
Installation (Einbaumethode)	Inversion	k. A.	Inversion
Aushärtung	Warmwasser oder Dampf	k. A.	Kalt-/ Warmwasser (1) Dampf (2)
Anschlussanbindung	k. A.	k. A.	k. A.
Anwendungsbereich / Einsatzgrenzen			
Nennweitenbereich	DN 150 - DN 1050	k. A.	DN 150 - DN 1200 (1) DN 1000 (2)
Querschnittsform	Kreis- und Ei-Profile	k. A.	Kreisprofile
max. Einbaulänge [m]	300	k. A.	k. A.
Wandstärke [mm]	k. A.	k. A.	4,5 - 21 (1) 3 - 21 (2)
Altrohrmaterialien	k. A.	k. A.	k. A.
Mechanische Kennwerte (Herstellerangaben)			
E-Modul [N/mm ²] (Kurzzeit)	k. A.	k. A.	k. A.
E-Modul [N/mm ²] (Langzeit)	k. A.	k. A.	k. A.
Biegespannung [N/mm ²] (Kurzzeit)	k. A.	k. A.	k. A.
Biegespannung [N/mm ²] (Langzeit)	k. A.	k. A.	k. A.
Bemerkungen	k. A.	k. A.	k. A.

k. A.: keine Angabe

¹: für Freispiegelkanäle werden darüber hinaus auch die Schlauchlinersysteme NORDIPIPE und NORDICURE angeboten

5 Auffälligkeiten an Schlauchlinern (Zustandskatalog)

5.1 Aufgabenstellung

Im Zuge der Abnahme von Schlauchlining-Maßnahmen lassen sich zwei wesentliche Möglichkeiten zum Erkennen von Auffälligkeiten unterscheiden:

- die optische Zustandserfassung durch TV-Inspektion oder Begehung (i. d. R. bei der Bau- und Gewährleistungsabnahme) als Standard-Verfahren für den Kanalbau und die Kanalsanierung und
- die labortechnische Prüfung an vor Ort gewonnenen Schlauchlinerproben (i. d. R. nur bei der Bauabnahme) als spezielle Abnahmeprüfung für diese Sanierungstechnik.

Die Beurteilung der Inspektionsergebnisse hängt in hohem Maße von den Kenntnissen über die örtlichen Randbedingungen (Altrohrzustände, Sanierungsziele, eingesetzte Sanierungstechnik) ab. Allein aufgrund der optischen Informationen lässt sich kein abschließender Nachweis erbringen, dass die Sanierungsziele, wie Standsicherheit, Funktionsfähigkeit, Dichtheit und Dauerhaftigkeit, zuverlässig und vollständig erreicht worden sind. Die ergänzenden Laborprüfungen liefern hier weitere Informationen hinsichtlich der zu erwartenden mechanischen Kennwerte und der Dichtheit der Schlauchliner. Erst durch Vergleich dieser Prüfergebnisse mit den Soll-Werten aus Zulassungen, statischen Berechnungen und den konkreten Qualitätsanforderungen der Einzelmaßnahme kann die Qualität der Sanierungsleistung nachvollziehbar beurteilt werden.

Vor diesem Hintergrund bietet es sich an, als Grundlage für die Zustandserfassung bei der Bau- und Gewährleistungsabnahme die bisherigen Beobachtungen zu Auffälligkeiten an Schlauchlinern auszuwerten und in einem Zustandskatalog zusammenzufassen. Dieser Zustandskatalog kann als Orientierung für das Erkennen von Auffälligkeiten und für die einheitliche Zustandsbeschreibung dienen. Auf Grundlage dieser Zustandsbeschreibung und ggf. weiterer Untersuchungs- und Prüfergebnisse sind dann mögliche Ursachen für Auffälligkeiten zu identifizieren und die Auswirkungen mit Blick auf evtl. Mängel der Sanierungsleistung zu bewerten. Ursachenermittlung und Bewertung hängen wiederum in hohem Maße von den örtlichen Randbedingungen ab, d. h. insbesondere von den jeweiligen Sanierungszielen und den eingesetzten Sanierungstechniken und -materialien.

Ein grundsätzlicher Vorschlag für die Zuordnung möglicher Ursachen, Bewertungen und hieraus folgender Maßnahmen und ggf. ergänzender Prüfungen ist derzeit Gegenstand der Diskussion mit Netzbetreibern, Herstellern und Fachverbänden. Die Ergebnisse dieses Abstimmungsprozesses lagen bei Abschluss des hier vorgestellten Projektes noch nicht vor, so dass sich der in Anhang 1 dargestellte Zustandskatalog bestimmungsgemäß zunächst auf die Zusammenstellung und Beschreibung der in der Praxis beobachteten Auffälligkeiten beschränkt. Im Einzelnen umfasst der Zustandskatalog in Anhang 1 eine Katalogisierung von Auffälligkeiten mit Beschreibungen und fotografischen Beispielen. Hierbei handelt es sich ausdrücklich um eine Momentaufnahme von beobachteten Auffälligkeiten in den Netzen der beteiligten Betreiber, unabhängig von deren Häufigkeit und Relevanz für das gewählte Sanierungsziel.

5.2 Datenbasis

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurde zunächst anhand einer umfangreichen Recherche untersucht, welche optischen Auffälligkeiten in der Praxis überhaupt auftreten. Die Untersuchung umfasste sowohl die Sichtung und Analyse von Bildmaterial abgeschlossener Schlauchlining-Maßnahmen der beteiligten Netzbetreiber als auch die systematische Auswertung der Datenbasis der IKT-Prüfstelle für Bauprodukte. Zum Rechercheumfang zählte die Auswertung von ca. 200 Inspektionsvideos und ca. 500 Fotos, die 25 beteiligte Kanalnetzbetreiber zur Verfügung stellten. Die Recherche von Auffälligkeiten an Linerprobestücken der IKT-Prüfstelle basiert auf Sichtungen von Prüfberichten aus dem Zeitraum von November 2002 bis November 2008. Hierzu wurden ca. 1.800 Prüfberichte mit etwa 5.000 Schlauchlinerproben herangezogen, digitale Fotos betrachtet sowie eine Inaugenscheinnahme der archivierten Rückstellproben (Probe- und Reststücke) durchgeführt.

Die festgestellten optischen Auffälligkeiten wurden in einem ersten Schritt nach ihrem dominierenden Merkmal, z. B. geometrische Abweichung, Auffälligkeit an der Linerinnenwand, in Zustandsgruppen zusammengefasst und dann als einzelne Zustandsbilder mit Zustandsbeschreibungen katalogisiert. Den beteiligten Kanalnetzbetreibern wurden diese Ergebnisse im Rahmen der Projektsitzungen vorgestellt und mögliche Ursachen und Auswirkungen diskutiert. Hierbei wurde deutlich, dass die Netzbetreiber in unterschiedlicher Art und Weise mit Abweichungen von den festgelegten Anforderungen bzw. Sanierungsfehlern umgehen. Die Ansichten zur Tolerierbarkeit von Abweichungen differieren sowohl hinsichtlich der Art als auch der Ausprägung und hängen maßgeblich von den durch die Betreiber zugelassenen Einsatzbereichen für das Sanierungsverfahren sowie vom jeweiligen Sanierungsziel der Einzelmaßnahme ab.

5.3 Inhalte und Aussagekraft

Grundsätzlich wurden im Zuge der Recherche drei verschiedene Erfassungstiefen für Auffälligkeiten identifiziert. Zum einen wurden Abweichungen und Auffälligkeiten vorgefunden, die bereits ohne eine detaillierte Erfassungstiefe – d. h. mit einer einfachen Inaugenscheinnahme der Linerinnenseite – erkennbar sind (Verfärbungen, Falten, Ausbeulungen usw.). Diese Auffälligkeiten werden laut Aussage der beteiligten Netzbetreiber im Rahmen von optischen Kanaluntersuchungen mittels TV-Inspektion bzw. Begehung erkannt. Zum zweiten wurden Auffälligkeiten bzw. Abweichungen vorgefunden, die bei der optischen Inspektion im Kanal möglicherweise nur eingeschränkt bzw. erst bei detaillierter Betrachtung erkannt werden können, allerdings unter Laborbedingungen stets zum Vorschein kommen (unzureichende Tränkungen und Aushärtungen etc.). Drittens werden einige Auffälligkeiten erst im Rahmen der eigentlichen Laborprüfungen erkannt, wenn z. B. auch der Wandaufbau inspiziert wird.

Der Zustandskatalog in Anhang 1 fasst vor diesem Hintergrund die im Rahmen von In-situ-Untersuchungen und Laborprüfungen beobachteten Auffälligkeiten an Schlauchlinern entsprechend Tab. 7 zusammen.

Tab. 7: Gliederung des Zustandskataloges „Schlauchlinerauffälligkeiten“, vollständiger Katalog in Anhang 1

Zustandsgruppe	Zustandsbeschreibung
1. Geometrische Abweichungen	a) Wellige Oberflächenstruktur
	b) Querfalten
	c) Längsfalten (harzhinterfüllt)
	d) Örtlich begrenzte Vorverformungen
	e) Nachträgliche Ausbeulungen
2. Auffälligkeiten an der Linerinnenwand	a) Verfärbungen an der Linerinnenseite
	b) Nahtbereiche
	c) Innenfolien und -beschichtungen
	d) Blasen
	e) Ablösungen von Wandungsteilen
3. Offensichtliche Undichtigkeiten	a) Infiltrationen durch die Linerwand
	b) Fehlfräsungen
	c) Linerrisse
4. Lineranbindungen	a) Auffällige seitliche Zuläufe
	b) Undichte Schachtanbindungen
5. Unzureichende Tränkung	a) Unzureichend imprägnierte Fasern
6. Unzureichende Aushärtung	a) Farbänderungen an der Linerwand
7. Wandaufbau	a) Lufteinschlüsse
	b) Reinharzschichten / Harzüberschuss
	c) Unregelmäßiger Wandaufbau

Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass der Zustandskatalog auf einer außerordentlich breiten Datenbasis gründet (vgl. Kapitel 5.2) und zahlreiche der dargestellten Zustandsbilder nach Aussagen beteiligter Netzbetreiber nur selten bzw. nur in Einzelfällen auftreten. Der Zustandskatalog stellt somit das Ergebnis einer gezielten Recherche nach optischen Auffälligkeiten dar.

5.4 Anwendungs- und Bewertungsbeispiele

5.4.1 Vorüberlegungen

Eine Feststellung und Bewertung von Zustandsbildern erfordert stets die Einbeziehung der speziellen Randbedingungen der einzelnen Sanierungsmaßnahme. Dies betrifft die aus den Sanierungszielen abgeleiteten Qualitätsanforderungen ebenso wie die Abgrenzung zwischen Bau- und Gewährleistungsabnahme sowie das Gefährdungspotential wie folgt:

- **Sanierungsziele und Qualitätsanforderungen:**

Die Feststellung und Bewertung des Ist-Zustandes ist stets mit Blick auf die in der Planungsphase und/oder in der Ausschreibung festgelegten Sanierungsziele und daraus abzuleitenden Qualitätsanforderungen zu betrachten. Beispielsweise sind Faltenbildungen in radialer Richtung bei vorhandenen Lageabweichungen bzw. Muffenversätzen, Bögen oder Abwinklungen der Rohrachse (z. B. Absturzbereiche) zu erwarten. Nur wenn bei der Planung und der Ausschreibung entsprechende Gegen-

maßnahmen berücksichtigt und mit dem Auftragnehmer vereinbart worden sind (z. B. Teilausbau und -erneuerung in offener Bauweise, erweiterte Kalibrierung des Altkanals), können diese auch in der Ausführung gefordert werden. Entsprechend ist zwischen System-, Ausführungs- und/oder Planungsfehlern zu unterscheiden (vgl. [70], [71]).

- **Abgrenzung zwischen Bau- und Gewährleistungsabnahme:**
Werden Abweichungen, Mängel und/oder Schäden bei der Bauabnahme nicht angemeldet bzw. bereits akzeptiert, dann droht der Verlust des Gewährleistungsanspruchs. Dies betrifft z. B. die Bewertung von Falten und ihrer Bedeutung für die hydraulische Leistungsfähigkeit und das Ablagerungsverhalten, z. B. bei Rückstauerignissen. Einige Mängel sind wiederum erst nach einer gewissen Betriebsdauer zu erkennen (vgl. [72], [73]) und damit „versteckte Mängel“. Die Bauabnahme dient dann auch als Beweissicherung gegenüber weiteren Veränderungen, z. B. Vergrößerung von Beulen, erhöhter Abrieb, Angriff aus Hochdruckreinigung, für die Gewährleistungsabnahme.
- **Gefährdungspotential des Kanals:**
Das Gefährdungspotential ist insbesondere von Bedeutung, wenn über Wertminderung und/oder Mängelbeseitigung entschieden werden soll. Mit Blick auf die Dichtheit hängt das Gefährdungspotential z. B. von dem durchgeleiteten Medium und den zu schützenden Grundwasserleitern ab. Hinsichtlich der Standsicherheit sind z. B. die Konsequenzen bei Einsturz zu betrachten, und bezüglich der hydraulischen Leistungsfähigkeit ist u. a. die Funktion der sanierten Kanalstrecke im Gesamtnetz und die Rückstaugefährdung zu betrachten. Auch die Dauerhaftigkeit der sanierten Leitungstrecke kann vor dem Hintergrund der zugesicherten Nutzungsdauern und vereinbarten Abschreibungsfristen bei Nichterfüllung mit einem vertraglichen bzw. finanziellen „Gefährdungspotential“ verbunden sein.

In Kenntnis der Sanierungsziele und Gefährdungspotentiale sind ggf. weitere Maßnahmen festzulegen, wie Probenentnahmen, Reparatur und Vermessung. Nachfolgend werden für die Zustandsbilder 1a, 1b und 2a des Zustandskatalogs in Anhang 1 konkrete Anwendungsbeispiele vorgestellt und auch die Wechselwirkungen zu Bewertungskriterien der Standsicherheit, Dichtheit, Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit angesprochen. Derzeit werden für sämtliche Zustandsbilder auch grundsätzliche Interpretationen mit Netzbetreibern, Herstellern und Sanierungsfirmen diskutiert.

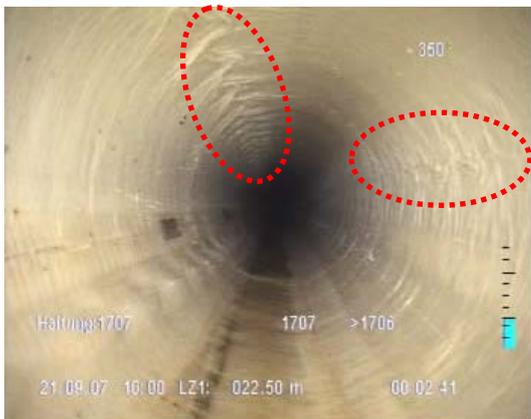
5.4.2 Katalog-Nr. 1a „Wellige Oberflächenstruktur“, Beispiele

Im Rahmen der Auswertung der Inspektionsvideos von Kanalnetzbetreibern hinsichtlich optischer Auffälligkeiten wurden in einigen Fällen auf der Liner-Innenseite deutlich erkennbare, unregelmäßige Oberflächenstrukturen beobachtet, zum Teil in der Ausprägung kleiner Falten. Diese Auffälligkeiten lassen sich in die Kategorie „Wellige Oberflächenstruktur“ einordnen. Die Beispiele 1 und 2 in Abb. 9 a und b zeigen zwei Nadelfilz-Schlauchliner der gleichen Baumaßnahme. Diese Auffälligkeiten – zu erkennen in Beispiel 1 im Scheitel- und Kämpferbereich und im zweiten Beispiel in einer Detailansicht des linken Kämpfers – wurden durch den verantwortlichen Netzbetreiber im Rahmen der Bauabnahme erfasst.

Das dritte Beispiel weist eine ähnlich auffällige Oberflächenstruktur der Linerinnenwand auf (vgl. Abb. 9 c). Bei diesem Nadelfilzliner ist speziell im linken Kämpferbereich eine wellige (faltenartige) Struktur zu erkennen. Angaben über den Kanal, wie z. B. die Nennweite, das Baujahr der Sanierung und das Datum der Inspektion, liegen in diesem Fall nicht vor.

Beispiel 4 stammt ebenfalls aus einem Abnahmevideo nach einer Sanierung. Im Unterschied zu den ersten drei Beispielen erstreckt sich bei diesem Nadelfilz-Liner eine pockenartige Oberflächenstruktur über den gesamten Querschnitt, wobei der Sohlbereich aufgrund des Abflusses nicht erkennbar ist und hierfür somit keine Aussage getroffen werden kann (vgl. Abb. 9 d).

Als mögliche Ursachen dieser optischen Auffälligkeiten sind fehlerhafte werksseitige Konfektionierungen, mangelnde Kalibrierung im Vorfeld der Sanierung, geometrische Unregelmäßigkeiten im Altrohr und ggf. radiale Schrumpfungen des Liners nach Aushärtung zu nennen. Darüber hinaus ist für Beispiel 4 auch denkbar, dass es sich hierbei um Ablagerungen an der Kanalinnenwand handelt. Eine Abgrenzung ist allein auf Basis einer TV-Inspektion nicht möglich.



a) Beispiel 1: DN 400, NF-UP, Bj. 2007



b) Beispiel 2: DN 300, NF-UP, Bj. 2007



c) Beispiel 3: DN k. A., NF-UP, Bj. k. A.



d) Beispiel 4: DN 300, NF-UP, Bj. 06/07

Abb. 9: Wellige Innenoberfläche, Beispiele

Mögliche Auswirkungen für die Standsicherheit, die Dichtheit und die Dauerhaftigkeit lassen sich auf Grundlage der optischen Information nicht ermitteln. Die erkannte Oberflächenstruktur des Schlauchliners wird sich allerdings auf die hydraulischen Eigenschaften auswirken. Eine erhöhte Formrauheit kann die Abflussleistung vermindern. Allerdings ist zu vermuten,

dass bei ausreichend starkem Gefälle und nicht vollständiger hydraulischer Auslastung des Kanals der Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Hydraulik nur von untergeordneter Bedeutung ist. Eine detaillierte Aussage und Bewertung ist aber auch in diesem Fall allein auf Basis der Inspektionsbilder und ohne Kenntnis der Netzstruktur und -hydraulik nicht möglich.

5.4.3 Katalog-Nr. 1b „Querfalten“, Beispiele

In Abb. 10 sind Bilder von Querfalten dargestellt. Diese Fotos wurden aus Bauabnahmevideos unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen – realisiert zwischen 1997 und 2005 – entnommen. Im Vergleich untereinander zeigt sich, dass die Faltengeometrien voneinander abweichen und auch in Umfangsrichtung variieren. So ist in Beispiel 1 die Sohle im Gegensatz zum Restquerschnitt faltenfrei. In Beispiel 2 gilt dies für Sohle und Scheitel. Auch in den Beispielen 3 und 4 ist die Faltenhöhe nicht konstant. Ob und inwieweit in diesen beiden Fällen auch in der Rohrsohle Falten vorhanden sind, ist aufgrund der Teilfüllung nicht zu erkennen. Auch bleibt offen, inwieweit die Querfalten harzhinterfüllt sind.



a) Beispiel 1: DN 400, GFK-UP, Bj. 2004



b) Beispiel 2: Ei 300/450, NF-UP, Bj. 1997



c) Beispiel 3: DN 250, GFK-UP, Bj. 04/05



d) Beispiel 4: DN 200, GFK-UP, Bj. 2004

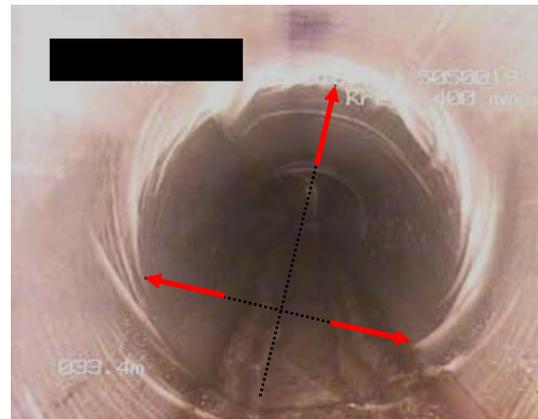
Abb. 10: Beispiele für Falten in Querrichtung

Mögliche Ursachen für Querfalten können z. B. Versätze bzw. Lageabweichungen in der Rohrverbindung, Stauchungen beim Einbau insbesondere bei Abwinklungen in der Rohrachse, Dimensionswechsel im Kanal, gekrümmte Altrrohrtrassen, Unregelmäßigkeiten im Altrrohr, Dehnungen der Schutzfolie, behinderter Einziehvorgang sowie eine lokale Verengung des Altrrohrdurchmessers sein (vgl. auch [22], [24], [74]).

In drei der in Abb. 10 beschriebenen Fälle lagen keine Informationen über den Altrohrzustand vor, so dass eine entsprechende Ursachenzuordnung nicht möglich war. Für Beispiel 1 dagegen konnte die Videodokumentation des Altrohres in Augenschein genommen werden. In Abb. 11 ist exemplarisch für die Station bei 33,40 m der Zustand vor (Bild links) und nach der Sanierung (Bild rechts) gegenübergestellt. Die gezeigte Rohrverbindung weist einen Versatz in diagonaler Richtung auf, zu erkennen am sichtbaren Rohrspiegel im Bereich zwischen 7 und 1 Uhr. Im Gegensatz dazu erstreckt sich die Querfalte im Schlauchliner zwischen 8 und 4 Uhr. Die Ausdehnung der Auffälligkeit ist also nur zum Teil deckungsgleich mit dem Versatz. Möglicherweise haben hier weitere Unregelmäßigkeiten maßgeblichen Einfluss auf die Geometrie des Schlauchliners. So ist in Abb. 11 a neben dem Versatz auch Scherbenbildung zu erkennen. Als weitere mögliche Ursache für die dargestellte Falte in radialer Richtung kann die geringe, nach unten gerichtete Abwinklung der Rohrachse in Frage kommen. Im Gesamtblick ist jedoch für diesen Fall festzustellen, dass der Vergleich der Inspektionsvideos keine eindeutige Aussage über ursächliche Zusammenhänge zwischen Altrohrzustand und Auffälligkeit zulässt.



a) DN 400, STZ, Versatz und Scherben



b) DN 400, GFK-UP, Bj. 2004

Abb. 11: Vergleich zwischen Altrohrzustand (links) und Sanierungsergebnis (rechts), Beispiel

Querfalten können in Abhängigkeit von Höhe, Anzahl, Position im Kanalquerschnitt und Ausdehnung in Umfangsrichtung einen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit bzw. Betriebstauglichkeit des sanierten Kanalabschnittes haben. Die Position der Querfalte im Kanalquerschnitt wird insbesondere mit Blick auf den Feststofftransport und die Kanalinspektion relevant. Insbesondere die in der Kanalsohle liegenden Querfalten können sich hier negativ auswirken. Darüber hinaus sind Querfalten den Einwirkungen aus HD-Reinigung stärker ausgesetzt, so dass die HD-Festigkeit für diesen Schlauchliner zu hinterfragen wäre. Die Beständigkeit von Querfalten gegenüber HD-Strahlen ist z. B. nicht Gegenstand der DIN 19523 [75], auf die z. B. das Merkblatt [26] des Rohrleitungssanierungsverbandes e. V. (RSV) verweist. Bei einer Querfalte greift der HD-Strahl jedoch i. d. R. mit einem gegenüber einer glatten Rohrwandung deutlich größeren Auftreffwinkel an, so dass in der Folge auch die Materialbelastung größer sein kann. Auch ist ein Anprall der Spüldüse bei Düsenrückzug denkbar.

Darüber hinaus kann eine Querfalte auch Einfluss auf die Kanalzustandserfassung per TV-Roboter haben. Denkbar ist, dass die Auffälligkeit als Hindernis für das Inspektionssystem wirkt und der Inspektionslauf abgebrochen werden muss. Bei Versuchen, die Querfalte unter Ausnutzung der maximalen Antriebskraft zu passieren, besteht außerdem die Gefahr des Steckenbleibens bzw. Umkippen und damit die Aussicht auf erheblichen Mehraufwand bei

der Bergung. Um die Inspektion fortsetzen zu können, steht als Alternative die Befahrung aus der Gegenrichtung zur Verfügung. Trifft der Roboter von dieser Seite auf eine zweite Blockade innerhalb des Untersuchungsobjektes, verbleibt der zwischen den Hindernissen liegende Handlungsabschnitt uninspiziert. Hinsichtlich der statischen Tragfähigkeit ist der Einfluss von Querspalten nach [8] weniger kritisch als bei Längsspalten, „da hier eine räumliche Tragwirkung in Längsrichtung unterstellt werden darf“. Weitere Angaben bzgl. Auswirkungen von Querspalten (harzhinterfüllt und mit Ausbeulungen) auf die Standsicherheit finden sich im Kapitel 8. Weitere Hinweise zu dem Umgang mit Spalten und ggf. erforderlichen Nacharbeiten sowie Sanktionen für den Auftragnehmer enthalten u. a. [22], [24], [29], [74]. Diese Hinweise gelten neben Querspalten insbesondere auch für Längsspalten und werden nachfolgend ausführlich dargestellt.

Nach DIN EN 13566-4 [22] dürfen „in geraden Rohrlängen mit konstantem Innendurchmesser Schlauchliner keine zusätzlichen Oberflächenunregelmäßigkeiten bezogen auf das Altrrohr verursachen, die max. 2 % des Nenndurchmessers oder 6 mm sind, je nachdem welcher Wert größer ist.“ Auch die jeweiligen bauaufsichtlichen Zulassungen der einzelnen Systemhersteller beinhalten diese Festlegung (vgl. Kapitel 4). Nach dem DWA Merkblatt 143-3 [24] stellen größere Faltenbildung (als in [22] festgelegt) einen Mangel dar. *„Hierbei ist zu unterscheiden, ob eine betriebliche Erschwernis entsteht oder an anderer Stelle eine Hohl-lage oder Längsfalte eintritt, die die Stabilität des Liners beeinträchtigt. Ist dies nicht der Fall, wird die Entfernung der Falte nicht empfohlen. Mängel, die zu einer betrieblichen Einschränkung führen, sind nach Absprache mit dem Auftraggeber mittels geeigneter Maßnahmen (Fräs- und Spachtelroboter) zu beseitigen. Die Aufrechterhaltung bzw. Wiederherstellung der Standsicherheit, Dichtheit und Korrosionsbeständigkeit ist dabei zu gewährleisten.“*

Im Anforderungsprofil für Schlauchliner-Kanalrenovierungen der „Süddeutschen Kommunen“ [29] werden Toleranzen und Sanktionen im Falle von Faltenbildung aufgeführt. *„Es wird hier unterschieden, ob Falten auf geraden Strecken oder in Bereichen von Bögen entstanden sind. Im Falle der Überschreitung vorgegebener Toleranzen (die sich in der Regel auf [22] beziehen) und für den Fall, dass eine Beseitigung der Faltenbildung möglich ist (das Trägermaterial beschreibt keine Falten), ohne dass die Gebrauchsfähigkeit bzw. Statik des Liners beeinträchtigt wird (ein Nachweis ist durch den Auftragnehmer zu erbringen), sind Falten auf Kosten des Auftragnehmers zu entfernen. Für den Fall, dass die Toleranzen der Faltenbildung überschritten werden und auch das Trägermaterial eine Falte beschreibt, muss die Falte bis auf eine gerade Fläche ausgefräst und die dadurch entstandene Fehlstelle dauerhaft wasserdicht verspachtelt werden. Der Liner auf der gesamten Strecke von Anfang bis Ende der Falte wird nach Vorgaben des Anforderungsprofils nicht vergütet (Gesamtkosten der Herstellung des Liners einschließlich aller Nebenkosten, z. B. Baustelleneinrichtung, Vorarbeiten, Anschlussanbindungen usw.).“*

Falten bilden sich i. d. R. beim Einbauvorgang aus und sind daher bereits bei der optischen Kontrolle im Rahmen der Bauabnahme zu erkennen. Für den Fall, dass tolerierbare Grenzen überschritten werden, die Querspalten einen Mangel darstellen und durch Abfräsen entfernt werden können (die Falten und das Abfräsen verursachen keine Laminatschwächung), ist diese Vorgehensweise mit Blick auf die Hydraulik und betriebliche Aspekte zu empfehlen. Für den Fall, dass Querspalten nicht ohne Laminatschwächung entfernbar sind und das Gefährdungspotential zunächst ein Verbleiben der Falten im Kanal gestattet, könnten auffällige Abschnitte mit zunehmender Betriebsdauer detailliert beobachtet werden. Die Gewährleis-

tungsabnahme nach vier bzw. fünf Jahren bietet hier standardmäßig eine Gelegenheit seitens der Netzbetreiber, die Betriebsfestigkeit optisch zu überprüfen. Eventuell kann auch im Vorfeld einer optischen Inspektion zunächst auf eine HD-Reinigung verzichtet werden, um auch Ablagerungen – die durch Querfalten verursacht wurden – besser zu erkennen. Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist jedoch, dass diese Beobachtungen (Querfalten) bereits im Zuge der Bauabnahme dokumentiert und für die Gewährleistungsabnahme angemeldet wurden.

5.4.4 Katalog-Nr. 2a „Verfärbung an der Linerinnenseite“, Beispiele

In Abb. 12 sind vier Beispiele für Verfärbungen an der Linerinnenseite bei Nadelfilz-Schlauchlinern dargestellt. Die Videos, aus denen die Bilder a und b entnommen wurden, entstanden innerhalb eines Jahres nach Linereinbau (Baujahre 2006/2007). Die anderen beiden Fotos zeigen Ausschnitte von zwei Linern einer Baumaßnahme aus dem Jahr 2003. Sie stammen aus einem Inspektionsvideo, aufgenommen nach ca. 4,5 Jahren Liner-Betriebsdauer, d. h. im Vorfeld der Gewährleistungsabnahme. Die Farbabweichungen treten in unterschiedlicher Ausprägung auf. In einigen Fällen sind es einzelne Flecken, die sich über Länge und Umfang annähernd gleichmäßig verteilen (vgl. Abb. 12 a und c). Im Vergleich dazu gibt es Fälle, in denen bedeutend mehr Flecken zu erkennen sind und diese so eng zusammen liegen, dass die Teilflächen miteinander zu verschmelzen scheinen. Während derartige Verfärbungen in Abb. 12 b nahezu ausschließlich oberhalb der Kämpferlinie liegen, verteilen sie sich in Abb. 12 d über den gesamten Umfang.



a) Beispiel 1: DN 300, NF-UP, Bj. 2007



b) Beispiel 2: DN 300, NF-UP, Bj. 2006



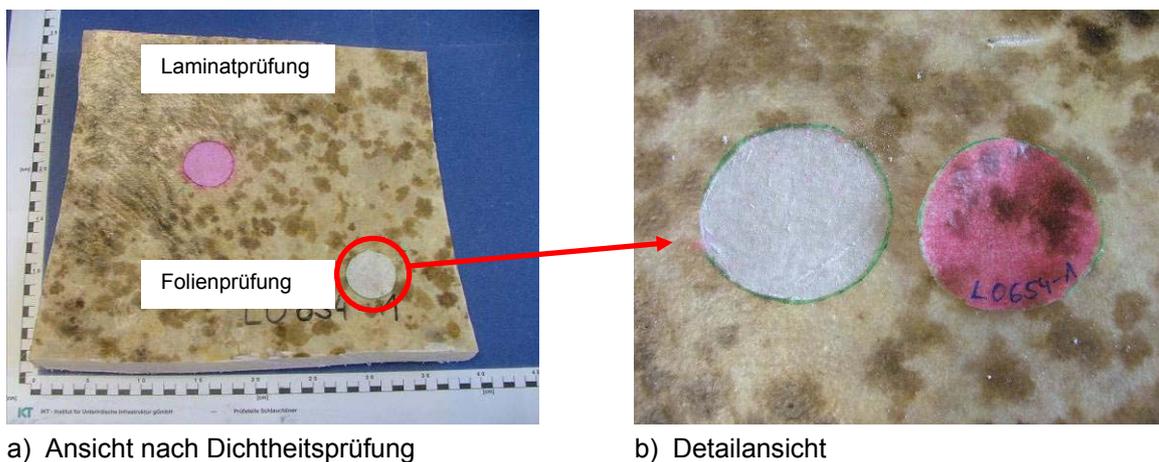
c) Beispiel 3: DN 400, NF-UP, Bj. 2003



d) Beispiel 4: DN 400, NF-UP, Bj. 2003

Abb. 12: Verfärbungen der Linerinnenseite im gesamten Querschnitt, Beispiele

Verfärbungen können nach vorliegenden Erfahrungen von Netzbetreibern verschiedene Ursachen haben. Genannt wurden zum einen irreversible Ablagerungen und zum anderen durch undichtes Laminat dringendes Grundwasser. Darüber hinaus können Verfärbungen auch aus dem Vorhandensein unterschiedlicher Schimmelpilze und Bakterien auf bzw. in der Innenbeschichtung des Schlauchliners resultieren. Dies ist das Ergebnis von biologischen Untersuchungen, die an der in Abb. 13 dargestellten Schlauchlinerprobe durchgeführt wurden und nachfolgend detaillierter beschrieben werden.



a) Ansicht nach Dichtheitsprüfung b) Detailansicht
 Abb. 13: Fleckenartige Verfärbungen, DN 1200, NF-UP, Bj. 2005/2006 [Fotos: IKT]

Im Dezember 2005 und im Januar 2006 sanierte ein Dienstleister mehrere schadhafte Haltungen unterschiedlicher Nennweiten (DN 300, DN 600, DN 700 und DN 1200). Dabei handelte es sich um Schlauchliner, bestehend aus einem Nadelfilz als Trägermaterial und einem UP-Harz, welche werkseitig getränkt zur Baustelle geliefert wurden. Vom IKT durchgeführte Dichtheitsprüfungen an Baustellenproben im Rahmen der Bauabnahme, die innerhalb der Haltungen DN 1200 aus dem Schlauchliner entnommen worden waren, zeigten, dass die Schlauchliner entsprechend der APS-Prüfrichtlinie als undicht zu bewerten sind. Es stellte sich nun die Frage, ob diese Undichtigkeiten lediglich örtlich begrenzt in den Haltungen auftreten, oder ob die gesamten Haltungen DN 1200 Undichtigkeiten in den Schlauchlinern aufweisen. Um diese Fragestellung zu klären, wurde in den Haltungen der Nennweite DN 1200 zunächst eine optische Inspektion mittels Kanalbegehung durchgeführt.

Ein Blick in den Startschacht ließ bereits im Bereich der Schachteinbindung zahlreiche dunkle Verfärbungen (Flecken) auf der Oberfläche des Schlauchliners erkennen. Bei der nachfolgenden Begehung der Haltungen zeigte sich, dass diese dunklen, fleckenartigen Verfärbungen in der gesamten Haltung vorhanden sind. Die Anzahl der verfärbten Stellen (Flecken) und darüber hinaus auch die Intensität der Verfärbungen variierten innerhalb einer Haltung.

Da zunächst vermutet worden war, dass diese Verfärbungen infolge von Undichtigkeiten in dem Schlauchliner aufgetreten sind, wurden zwei weitere Probekörpern aus den Inversionsabschnitten entnommen. Die Proben wurden nach Wareneingang mechanisch gereinigt. Auch nach dieser mechanischen Reinigung waren noch fleckenartige Verfärbungen auf der Linerinnenseite zu erkennen.

Um zu überprüfen, ob Abwasser aus dem Kanalinernen die Flecken verursacht hatte, wurde zunächst eine Dichtheitsprüfung der Innenbeschichtung durchgeführt. Hierfür wurde auf der Rückseite der Probe ein Vakuum von -0,5 bar angelegt und die Vorderseite – also die Innenbeschichtung – mit rot gefärbtem Wasser beträufelt. Nach Abschluss der Prüfung und nach

Entfernen der Innenbeschichtung zeigte sich, dass keine Prüfflüssigkeit bis auf das Laminat durchgedrungen war. Darüber hinaus war deutlich zu erkennen, dass die festgestellten Verfärbungen lediglich innerhalb der Innenbeschichtung vorhanden waren. Das darunter liegende Laminat zeigte nach dem Entfernen der Beschichtung keine Auffälligkeiten oder Verfärbungen (vgl. Abb. 13 a). Um darüber hinaus zu überprüfen, ob das Laminat Undichtigkeiten aufwies, wurde eine Dichtheitsprüfung des Laminates durchgeführt. Es zeigte sich, dass das Laminat an allen überprüften Stellen entsprechend der APS-Prüfvorschrift als dicht zu bewerten war.

Eine mögliche Ursache für die Verfärbungen innerhalb der Innenbeschichtung ist die Bildung von Schimmelpilzen. Um dies zu überprüfen, wurden Ausschnitte der Folien und des darunter liegenden Laminates (vgl. Abb. 13 b) getrennt von einander am Hygiene Institut des Ruhrgebietes auf Bakterien sowie auf Schimmelpilzsporen untersucht. Die Untersuchungsbefunde zeigten für die Innenbeschichtungen der Proben einen sehr deutlichen Schimmel- und Bakterienbefall auf. Die Laminatproben waren im Hinblick auf eine Schimmelbelastung als unauffällig zu bezeichnen, wobei eine Probe im Gegensatz zur anderen Probe jedoch einen deutlichen Bewuchs von Bakterien aufwies.

Mit Hilfe biologischer Untersuchungen konnte somit gezeigt werden, dass die fleckenartigen Verfärbungen auf der Innenseite des Schlauchliners aus dem Vorhandensein unterschiedlicher Schimmelpilze und Bakterien auf bzw. in der Innenbeschichtung resultierten. Eine durchgehende Beschädigung der Innenbeschichtung bis auf das Laminat konnte allerdings weder mit einer Dichtheitsprüfung der Beschichtung noch durch mikroskopische Aufnahmen nachgewiesen werden. Die biologischen Untersuchungen zeigten aber dennoch einen ganz vereinzelt Befall des Laminates mit Schimmelpilzen und einen vereinzelt bis massenhaften Befall mit Bakterien. Mechanische Prüfungen wurden im o. a. Fall nicht durchgeführt. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde aus dem in Beispiel 3 gezeigten Kanalabschnitt eine Linerprobe entnommen und mit Blick auf Dichtheit und insbesondere die mechanischen Kennwerte geprüft (vgl. Kapitel 6.3). Darüber hinaus wurden in diesem Fall auch die verfärbten Bereiche in Augenschein genommen. Nach dem Entfernen der Innenfolie konnten auch hier auf der Laminatoberfläche keine Verfärbungen festgestellt werden; sie blieben auf der Beschichtung haften. Es war daher zu vermuten, dass es sich hierbei ebenfalls um oberflächlichen Befall mit Schimmelpilzen bzw. Bakterien handelte. Die Prüfung der mechanischen Kennwerte bestätigte, dass zum Untersuchungszeitpunkt keine negativen Auswirkungen auf die Materialeigenschaften aufgetreten waren.

Inwieweit es durch den Pilzbefall mittel- oder langfristig zu einer substantiellen Schädigung des Schlauchliners (Langzeitauswirkungen) mit negativen Auswirkungen für die Standsicherheit, Dichtheit und Funktionsfähigkeit kommen kann, ist derzeit offen. Ggf. ist eine Verlängerung der Gewährleistungsfrist in Betracht zu ziehen. Dabei könnten u. U. vor Ablauf der Gewährleistung erneut Proben aus den Haltungen entnommen und hinsichtlich der mechanischen Kennwerte und der Dichtheit überprüft werden.

5.5 Bewertung von Laborprüfungen

Die Auswertung von Inspektionsvideos der Netzbetreiber und die Recherche von optischen Auffälligkeiten an Schlauchlinerproben liefern erste Anhaltspunkte zur vorliegenden Linerqualität. Allerdings können im Kanal nur grobe Auffälligkeiten auf der Innenseite der Linerwandung erkannt werden; eine Entscheidung, inwieweit es sich um einen Mangel oder ledig-

lich um eine unbedeutende Auffälligkeit handelt, ist allein auf dieser Basis nur selten möglich. Dies bestätigen auch die Erfahrungen aus den abnahmebegleitenden Laborprüfungen.

5.5.1 Dichtheitsprüfung

Nach der APS-Prüfrichtlinie werden zur Dichtheitsprüfung grundsätzlich drei Prüfflächen (Prüfstellen) eines Probekörpers ausgewählt. Diese sollen möglichst die Schwachstellen im Probekörper darstellen [48]. Die Auswahl folgt dabei in Abhängigkeit des Materials dem folgenden Ablauf:

- **Probekörper mit Glasfasern als Trägermaterial**

Gesucht werden gezielt mögliche Schwachstellen der Probekörper in Form von Luft-einschlüssen, wie z. B. Lunker, Poren bzw. sehr feine, langgestreckte Hohlräume (Kapillare), die eine Durchlässigkeit von Wasser (Permeabilität) ermöglichen können. Ferner werden ebenfalls auffällige Stellen klassifiziert und ausgewählt, die z. B. unregelmäßige Harztränkungen, unvollständige Aushärtungen etc. darstellen können. Da bei Glasfaser-Linern die Innenfolie i. d. R. unmittelbar nach dem Härtingsprozess entfernt wird und eine eventuell vorhandene Außenbeschichtung z. T. entfernbar ist und für die Dichtheitsprüfung auch entfernt bzw. perforiert werden muss, kann das Laminat optisch mit geringem Aufwand begutachtet werden. Die aufgeführten Auffälligkeitsmerkmale sind insbesondere dann zu erkennen, wenn die Probekörper gegen eine Lichtquelle gehalten werden. Hierbei können ggf. Lunker, unregelmäßige Tränkungen bzw. Harzverteilungen u. U. identifiziert werden. Als weitere Indizien für mögliche Qualitätsabweichungen (Undichtigkeiten) können ein vorhandener Styrolgeruch oder weiche Probekörper sein (ggf. unvollständig ausgehärtet). Nach Schätzungen der IKT-Prüfingenieure erweist sich der Großteil der zunächst vermuteten undichten Stellen auch in der Prüfung als undicht. In Einzelfällen können aber auch diese Stellen noch die Qualitätsanforderungen (Dichtheit) erfüllen.

- **Probekörper mit Synthese-Nadelfilz als Trägermaterial**

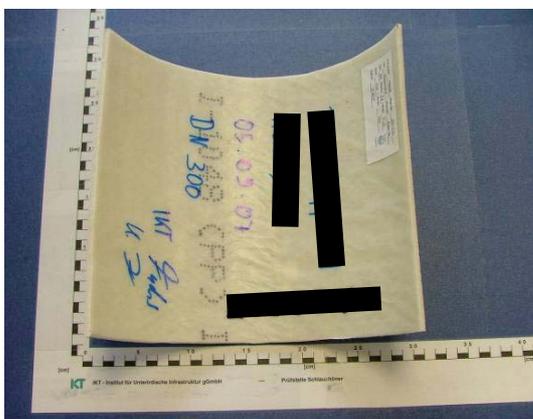
Wenn es sich bei dem Trägermaterial der Schlauchlinerprobe um Synthese-Nadelfilz handelt, werden ebenfalls von dem Soll-Erscheinungsbild abweichende Auffälligkeiten bei der Auswahl der drei Prüfflächen gesucht. Zur Bestimmung der Dichtheit werden an den Probekörpern nicht dauerhafte Beschichtungen entfernt bzw. perforiert und i. d. R. eine reine Laminatprüfung durchgeführt. Beim Entfernen bzw. Perforieren von möglichen Beschichtungen darf das Laminat nicht verletzt werden, ansonsten werden diese Prüfflächen verworfen und neue Stellen ausgewählt. Seit dem Jahr 2008 werden zwei am Markt befindliche Systeme mit sog. „integrierter Folienbeschichtung“ eingebaut (vgl. [19] und [21]). Hier werden die Innen- bzw. Außenbeschichtungen in der Prüfung nicht mehr perforiert oder eingeschnitten (vgl. Kapitel 4). Diese Systeme waren nicht Bestandteil der im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen. Im Gegensatz zu GFK-Linern ist das Laminat z. T. optisch schwieriger zu begutachten, da vorhandene Folienbeschichtungen die Sicht behindern können. Falls das Laminat trotzdem optisch auffällig ist, liegen hier u. a. vermutlich unzureichend imprägnierte Stellen vor. Diese Bereiche zeichnen sich durch im Vergleich zur restlichen Oberfläche hellere Stellen und/oder frei liegende Fasern auf der Linerrückseite (zu erkennen z. B. nach Entfernen des Preliners) oder durch marmorierte Stellen unter der Beschichtung der Line-

rinnenseite aus. Darüber hinaus wird auch hier versucht, u. a. Poren bzw. Kapillare, unzureichend gehärtete oder getränkte Bereiche zu identifizieren. Gegen eine Lichtquelle gehalten, sind diese etwaigen Stellen deutlicher zu erkennen. Auch bei nadel-filzgetragenen Probekörpern können – nach Feststellung von zunächst offensichtli-chen Schwachstellen – die Materialproben die Qualitätsanforderungen erfüllen.

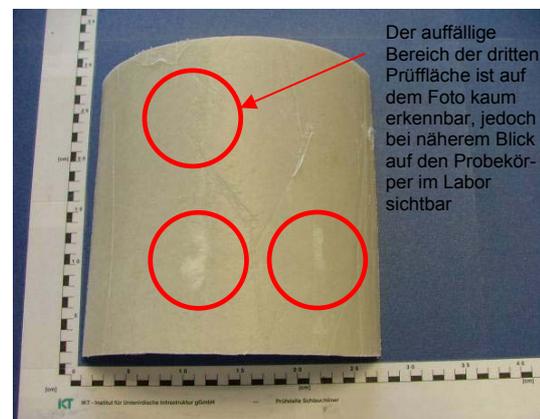
Falls keine optisch auffälligen Bereiche, die u. U. auf Schwachstellen im Probekörper hinwei-sen, vorhanden bzw. zu erkennen sind, werden drei willkürlich gewählte Prüfflächen be-stimmt.

Vor o. a. Hintergrund wurde in der Fachwelt verstärkt diskutiert, inwieweit Prüfergebnisse unterschiedlicher Prüfinstitute, die naturgemäß an unterschiedlichen Probekörpern durchge-führt werden, voneinander abweichen können und dürfen (vgl. [76], [77], [78], [79], [80], [81]). Diese besondere Problematik sei nachfolgend anhand eines anschaulichen Beispiels erläu-tert.

In Abb. 14 ist ein Probekörper eines Nadelfilz-Schlauchliners der Nennweite DN 300 darge-stellt. Die Baumaßnahme wurde im Jahr 2007 ausgeführt, der Probekörper wurde im Rah-men der Bauabnahme zwecks Materialprüfungen von der Prüfstelle für Bauprodukte des IKT untersucht. Bei dem Wareneingang im Labor scheint der Probekörper auf den ersten Blick **keine optischen Auffälligkeiten** aufzuweisen (vgl. Abb. 14 a). Bei näherer Betrachtung sind jedoch auf der Außenseite kleinere hellere Stellen zu erkennen, die ein Indiz auf eine **unzu-reichende Harz imprägnierung** sein können (vgl. Abb. 14 b). Drei dieser Stellen, bei denen ein Anfangsverdacht auf mögliche Undichtigkeiten vorlag, wurden daher zunächst für die Dichtheitsprüfung ausgewählt.



a) Innenseite des Probekörpers



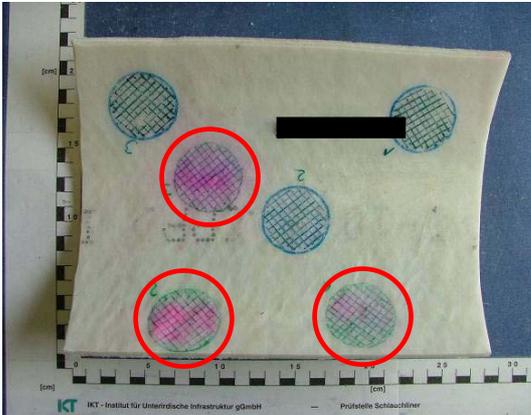
b) Außenseite des Probekörpers

Abb. 14: Beispiel eines Nadelfilz-Schlauchliners (NF-UP, DN 300, Bj. 2007), Wareneingang

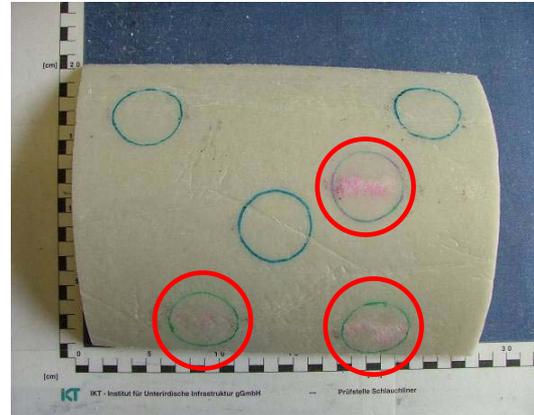
Im Ergebnis dieser ersten Dichtheitsprüfung wurde festgestellt, dass an allen **drei Prüfflä-chen** bereits nach sehr geringer Prüfzeit (<< 1 min) Tropfenbildung der roten Prüfflüssigkeit auf der Außenseite zu beobachten war. Die Bewertung des Ergebnisses lautete somit „**un-dicht**“. In Abb. 15 a und b ist der Prüfkörper nach der Dichtheitsprüfung dargestellt. Die als undicht erkannten Prüfflächen, sowohl auf der Linerinnen- als auch auf der Lineraußenseite, sind durch Kreise markiert.

Die **Dichtheitsprüfung** wurde anschließend an **drei** willkürlich gewählten **weiteren Prüfflä-chen** an demselben Probekörper wiederholt. Im Ergebnis der Wiederholungsprüfung zeigte

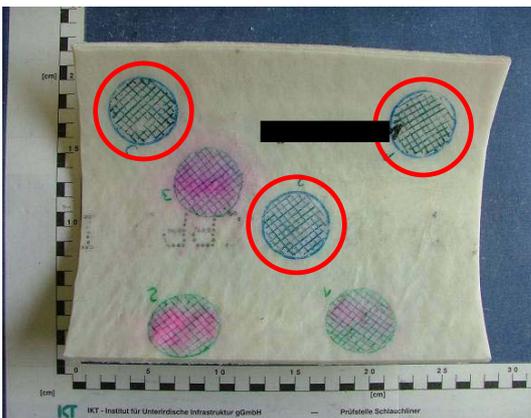
sich, dass alle drei Prüfstellen nach einer 30-minütigen Unterdrucksprüfung keine Undichtigkeiten zeigten. Auch eine rötliche Verfärbung der Innenseiten ohne Tropfenbildung – wie sie im Übrigen zulässig ist – konnte nicht beobachtet werden (vgl. Abb. 15 c und d). Das Prüfergebnis würde somit „**dicht**“ lauten.



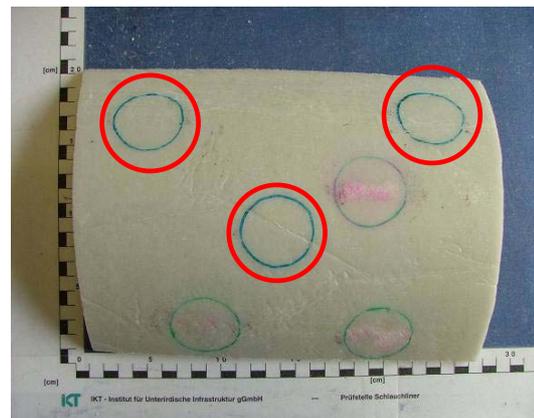
a) Innenseite nach erster Prüfung



b) Außenseite nach erster Prüfung



c) Innenseite nach zweiter Prüfung



d) Außenseite nach zweiter Prüfung

Abb. 15: Beispiel eines Nadelfilz-Schlauchliners (NF-UP, DN 300), nach Dichtheitsprüfung

Schon dieses Beispiel belegt, dass die Bestimmung der Schlauchlinerqualität von erfahrenen Prüfsingenieuren bzw. -technikern durchgeführt werden muss, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Darüber hinaus zeigt der Versuch, dass rein theoretisch eine (massiv) undichte Probe dennoch formal als „dicht“ bewertet werden kann, wenn die Streuung der Materialeigenschaften innerhalb einer Probe hoch ist und nur augenscheinlich gute Prüfflächen untersucht werden. Allerdings bleibt festzustellen, dass dies im umgekehrten Fall – ein flächenhaft dichter Probekörper wird undicht bewertet – nicht möglich ist.

5.5.2 Mechanische Prüfungen

Bereits vor der Prüfung im Drei-Punkt-Biegeversuch lassen sich plausible Annahmen treffen, ob mit unzulässigen Abweichungen der mechanischen Kennwerte von den geforderten Sollwerten zu rechnen ist. In der Prüfpraxis können beispielsweise folgende Anhaltspunkte auf eine Materialschwächung hinweisen:

- Veränderte Farbstrukturen des Liners z. B. als Anzeichen für unregelmäßige Harzverteilung bzw. -tränkung,

- Styrolgeruch bzw. bei Abtasten weiche Probekörperoberflächen z. B. als Anzeichen für unvollständige Aushärtungen,
- Blasenbildungen z. B. als Anzeichen für Überhitzungen im Härtungsprozess,
- Lufteinschlüsse z. B. als Indiz für eine Laminatschwächung.

Auch für den Fall, dass vor der Prüfung keine der o. a. Auffälligkeiten an den Probekörpern festgestellt wurden, existieren Beispiele für Sollwertunterschreitungen der mechanischen Kennwerte. Hier liegt die Ursache insbesondere in mikroskopisch kleinen Auffälligkeiten, die mit bloßem Auge nicht zu erkennen sind. Mit Blick auf die Streuungen der Materialeigenschaften ist auch in den mechanischen Prüfungen mit großen Schwankungen der Ergebnisse zu rechnen, die lediglich über die normgemäße Mittelwertbildung (vgl. [49], [22]), bei Prüfung an mehreren Prüfkörpern eines Probekörpers, scheinbar ausgeglichen werden.

5.5.3 Fazit

Die vorgenannten Zusammenhänge zeigen, dass die Ergebnisse aus der optischen Inspektion allein nicht ausreichen, um die Qualität einer Schlauchlining-Maßnahme im Zuge der Abnahmeprüfung zuverlässig zu bewerten. Viele Auffälligkeiten sind im Kanal bei einer rein optischen Begutachtung noch nicht zu erkennen; sie kommen erst unter Laborbedingungen zum Vorschein (u. a. Linerrückseiten, Wandaufbauten). Auch bestätigten sich die Annahmen aus vorangegangenen IKT-Untersuchungen aus den Jahren 2001 und 2003 (vgl. [7, 8]), dass *„intakt aussehende, funktionsfähige Schlauchliner die in der statischen Berechnung eingesetzten Materialkennwerte u. U. nicht erreichen“*. Dies gilt ebenfalls für das Kriterium der Dichtheit. Im Gesamtblick zeigte sich:

- Ca. 4 % der etwa 5.000 untersuchten Laborproben zeigten optische Auffälligkeiten, wobei der überwiegende Anteil der Kategorie „nur unter Laborbedingungen feststellbar“ zuzuordnen ist (Wandaufbauten und Linerrückseiten). Zum Teil waren diese mit erheblichen Qualitätsabweichungen verbunden. Der Anteil an Probekörpern, der die geforderten Kriterien (Dichtheit und mechanische Kennwerte) unterschritt, liegt noch höher (vgl. [50], [80], [81], [82], [83]), da hier auch kleine, nur mikroskopisch erkennbare Fehlstellen einen Einfluss haben.
- Die Prüfergebnisse zeigten in Einzelfällen erhebliche Streuungen der Materialeigenschaften, z. T. sogar in derart kleinräumigen Strukturen, dass innerhalb desselben Probekörpers deutlich unterschiedliche Prüfergebnisse erzielt wurden.
- In Einzelfällen bestehen deutliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der optischen Beurteilung der Linerqualität und der labortechnisch nachweisbaren Qualität. Optisch unauffällige Proben erfüllen nicht unbedingt die Qualitätsanforderungen (mechanische Kennwerte und Dichtheit). Andererseits ist es auch möglich, dass optisch auffällige Proben die Qualitätsanforderungen erfüllen.
- An einigen Auffälligkeiten, wie z. B. Falten und Beulen, lassen sich mechanische Prüfungen (Drei-Punkt-Biegeversuch) technisch nicht durchführen.

Im Ergebnis bleibt festzustellen, dass eine rein optische Zustandserfassung nicht als Ersatz für die Baustellenprobe fungieren kann und die beobachteten Streuungen von Materialeigenschaften zu erheblichen Qualitätsschwankungen führen können. Auch ein Zustandskatalog kann den Abnahmeprozess lediglich unterstützen und vereinheitlichen.

5.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Recherche zu Schlauchliner-Auffälligkeiten basierte zum einen auf Inspektionsvideos und -daten von Kanalnetzbetreibern und zum anderen auf der Datenbasis der IKT-Prüfstelle für Bauprodukte. Sie umfasst den Zeitraum der letzten zehn Jahre und insgesamt ca. 200 Inspektionsvideos, 500 Inspektionsfotos und 5.000 Probestücke. Darüber hinaus wurde im Rahmen der Recherchen betrachtet, ob ein Zusammenhang zwischen der optischen Beurteilung einer Linerprobe und der erreichten Linerqualität hergestellt werden kann. Hierzu wurden Probekörper von optisch unauffälligen sowie von optisch auffälligen Linerproben – aufgenommen vor den Laborprüfungen – herangezogen und den Prüfergebnissen zur Dichtheit und zu den mechanischen Kennwerten gegenübergestellt.

Auf Basis der durchgeführten Recherchen zu Auffälligkeiten bei Schlauchlinern lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Ursachen für im Labor nachgewiesene Qualitätsabweichungen sind u. a. unzureichende Aushärtungen, unregelmäßige bzw. unzureichende Imprägnierungen und Harzverteilungen, Lufteinschlüsse (Poren). Diese Auffälligkeiten sind z. T. jedoch selbst unter Laborbedingungen nur mikroskopisch erkennbar.
- Es können Unterschiede zwischen den Ergebnissen der optischen Beurteilung der Linerqualität und der labortechnisch nachweisbaren Qualität bestehen. Optisch unauffällige Proben erfüllen in Einzelfällen nicht die QS-Anforderungen (mechanische Kennwerte und Dichtheit). Aus dem Kreis der beteiligten Kanalnetzbetreiber wurde auf Basis von eigenen Erfahrungen bestätigt, dass häufig kein sicherer Zusammenhang zwischen der optischen Beurteilung und der mechanischen Qualität bzw. der Dichtheit eines Liners besteht.
- Darüber hinaus lassen sich an einigen geometrischen Auffälligkeiten, wie z. B. Falten und Beulen, mechanische Prüfungen im Drei-Punkt-Biegeversuch technisch nicht durchführen, so dass hier keine weitergehenden Aussagen zur Materialqualität getroffen werden können.
- Die Ursache für eine beobachtete Auffälligkeit lässt sich in vielen Fällen nur ermitteln, wenn neben dem Abnahmevideo auch die Ausgangssituation des Altkanals durch ein Inspektionsvideo dokumentiert wurde und zum Vergleich herangezogen werden kann.
- Um für die Zustandserfassung eine Orientierung über mögliche Auffälligkeiten und deren Beschreibung zu geben, wurde ein Zustandskatalog über Schlauchliner-Auffälligkeiten aufgestellt (vgl. Anhang 1). Dieser umfasst sowohl Auffälligkeiten im Rohrstrang als auch in den Anbindungsbereichen und basiert auf einer umfassenden Erhebung auch äußerst seltener Auffälligkeiten. Eine fortlaufende Aktualisierung wird angestrebt.
- Abweichende Prüfergebnisse verschiedener Institute lassen sich mit Streuungen der Materialeigenschaften in Verbindung bringen. An einem ausgewählten Beispiel wurde verdeutlicht, dass z. B. Ergebnisse aus Dichtheitsprüfungen selbst innerhalb eines einzelnen Probekörpers signifikant variieren können. Darüber hinaus enthält der Zustandskatalog explizit Auffälligkeiten von lokaler Ausprägung (Wanddickenschwankungen, unregelmäßig imprägnierte Fasern usw.), die auch abweichende Ergebnisse in der mechanischen Prüfung nahelegen.

6 Baumaßnahmen und Nachbeprobungen

6.1 Überblick

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 5 dargestellten Auffälligkeiten und möglichen Mängel an Schlauchlinern stellt sich die Frage, inwieweit Ort und Zeitpunkt von Probenentnahmen im Rahmen der Qualitätssicherung und Bauabnahme bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen sind. Zur Beantwortung dieser Frage wurden sowohl aktuelle Baumaßnahmen, die während des Projektzeitraums bei den beteiligten Netzbetreibern ausgeführt wurden, begleitet als auch Nachbeprobungen an seit mehreren Jahren in Betrieb befindlichen Schlauchlinern durchgeführt.

Im Rahmen der **aktuellen Baumaßnahmen** sollte insbesondere die gängige Praxis bei der Probenentnahme hinterfragt werden. So z. B. war zu klären, ob die Entnahme einer Probe im Schacht „repräsentativ“ für die gesamte Sanierungsstrecke ist. Zur Klärung dieser Fragestellung wurden die Entnahmeorte variiert, d. h. sowohl Proben aus dem Schacht als auch aus der Haltung und aus unterschiedlichen Querschnittsbereichen (Scheitel, Kämpfer, Sohle) entnommen, und die Ergebnisse der Laborprüfungen hinsichtlich der Dichtheit und der mechanischen Kennwerte vergleichend gegenübergestellt. Darüber hinaus war stichprobenhaft zu untersuchen, ob der Zeitpunkt der Prüfung einen dominierenden Einfluss auf die Prüfergebnisse der mechanischen Kurzzeit-Eigenschaften haben kann. Um diese Zielstellungen zu erreichen, wurden zwölf Schlauchlining-Maßnahmen begleitet sowie umfangreiches Probenmaterial unter Variation des Entnahmeortes gewonnen (u. a. Schacht und Haltung) und hinsichtlich seiner Dichtheit und mechanischen Kennwerte labortechnisch geprüft.

Zur **Nachbeprobung von Schlauchlinern nach mehrjährigem Betrieb** wurden zunächst Liner mit typischen Auffälligkeiten, Abweichungen und Veränderungen im Rahmen einer Recherche identifiziert. Ursprüngliches Ziel war es, jeweils eine Probe aus dem ungestörten Bereich des Liners und eine weitere Probe aus dem auffälligen Bereich (wie z. B. Falten, Beulen oder einer anderen signifikanten Störung) zu entnehmen. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde deutlich, dass diese Vorgehensweise mit Schwierigkeiten verbunden war, da z. B. Standard-Materialprüfungen an charakteristischen Auffälligkeiten, wie z. B. Falten und Beulen, technisch nahezu nicht durchführbar sind. Aus diesem Grund wurden mit Blick auf die **Erfassung der Streuung der Materialeigenschaften** auch Nachbeprobungen an Schlauchlinern durchgeführt, die optisch keine Auffälligkeiten aufwiesen (u. a. im Rahmen von Gewährleistungsabnahmen). Auch hier wurden sowohl Dichtheitsprüfungen als auch mechanische Werkstoffuntersuchungen an den entnommenen Linerproben durchgeführt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse beider Arbeitspakete zusammenfassend dargestellt. Eine umfangreiche Kenndaten-Darstellung der einzelnen Baumaßnahmen, Bildokumentationen der Baustellenbegleitungen und die Darstellung der Laboruntersuchungen sowie der Prüfergebnisse sind dem Anhang 2 und dem Anhang 3 zu entnehmen.

6.2 Aktuelle Baumaßnahmen

6.2.1 Untersuchungsprogramm

Zum Untersuchungsprogramm bei der Begleitung aktueller Baumaßnahmen zählten die Dokumentation des Bauablaufs, der Vergleich verschiedener Systeme und Vorgehensweisen der Systemanwender, die Erfassung von Besonderheiten und eine Analyse der Vorgehensweise bei der Probenentnahme. Im Ergebnis sollten mögliche Qualitätseinflüsse auf das Sanierungsergebnis festgestellt werden. Zum Untersuchungsumfang zählten insgesamt zwölf Sanierungsmaßnahmen, die bei zehn verschiedenen Netzbetreibern im Zeitraum von Januar 2008 bis Dezember 2008 durchgeführt wurden. Im Rahmen dieser zwölf Baumaßnahmen wurden insgesamt 19 Schlauchliner eingebaut. Bei einer dieser Baumaßnahmen war der Einbau gescheitert, da eine Beschädigung der Innenfolie während des Aufstellvorgangs festgestellt wurde. Diese Baumaßnahme wird daher nachfolgend nicht weiter behandelt.

Die 19 verbauten Schlauchliner unterteilen sich in elf glasfaser- und acht nadelfilzgetragene Systeme. Bei einem nadelfilzgetragenen System wurde Epoxid-Harz eingesetzt. Dieser Schlauchliner wurde darüber hinaus vor Ort mit einer mobilen Tränkungsanlage imprägniert. Die restlichen Liner wurden werkseitig mit UP-Harz imprägniert und zur Baustelle geliefert. Mit Ausnahme einer begehbaren Haltung (Ei-Profil 1000/1500) befanden sich die restlichen Lining-Maßnahmen im nicht begehbaren Bereich (18-mal). In 17 Fällen handelte es sich bei der zu sanierenden Altrohrgeometrie um Kreisprofile, bei den zwei weiteren um Ei-Profile. Neben beiden grundsätzlich verschiedenen Schlauchlinersystemen (GFK – Einzug / Nadelfilz – Inversion) wurden auch die gängigen Härtungsmethoden erfasst (licht-, dampf- oder warmwasserhärtend).

Um den Einfluss des Entnahmeortes auf das Ergebnis der Materialprüfung zu untersuchen, wurden bei den Sanierungsmaßnahmen – sofern möglich – die Baustellenproben unter Variation des Ortes entnommen. Dabei wurden bei insgesamt elf einzelnen Schlauchlinern die Probekörper sowohl aus dem Schacht- als auch aus dem Haltungsbereich entnommen. Des Weiteren wurden bei vier Schlauchlinern nur Haltungsproben entnommen. Einzelne Liner wurden im Schacht- (Anfangs-, Zwischen- und/oder Endschacht) und/oder im Haltungsbereich auch mehrfach beprobt, d. h. die Probekörper wurden sowohl aus unterschiedlichen Querschnittspositionen (Kämpfer, Sohle, Scheitel) als auch aus verschiedenen Haltungsbereichen (Anfang, Mitte, Ende) gewonnen. Bei einer der elf Linersanierungen mit Probenentnahmen aus Schacht und Haltung wurde die Schachtprobe durch ein anderes Prüfinstitut untersucht. In Tab. 8 wird der Untersuchungsumfang der Begleitung aktueller Baumaßnahmen zusammengefasst.

In den Fällen mit ausschließlicher Haltungsbeprobung konnten keine Schachtproben zum Vergleich entnommen werden, da zum einen nach Angaben des ausführenden Dienstleisters die Standardbeprobung in den Ei-Profilen aufgrund aufwendig herzustellender Stützung im Schacht i. d. R. nur aus der Haltung erfolgt. Ferner war in einem Fall (bei einem Kreisprofil) die Entnahme der Schachtprobe nicht möglich, da nur nicht prüffähiges Restmaterial im Schachtbereich vorhanden war. In einem Sonderfall wurde anstelle einer Standard-Schachtprobe eine weitere Haltungsprobe entnommen. Hierbei wurde der Liner ca. einen halben Meter in die hinter dem Endschacht liegende Haltung geführt und ausgehärtet, so dass dort eine Probe entnommen werden konnte. Bei einer weiteren Baumaßnahme wurden nur vier Schachtproben von vier verschiedenen Linern entnommen. Bei dieser größeren

Baumaßnahme war eine umfangreiche Beprobung sowohl aus Schächten als auch aus Haltungen geplant. Aufgrund der zunächst ermittelten Ergebnisse der Schachtproben (gravierende Sollwertunterschreitungen bei der Dichtheit und der Wanddicke), wurde die Maßnahme jedoch vorerst gestoppt und der Sachverhalt sollte geklärt werden. Die Haltungsproben konnten im Zeitraum der Projektbearbeitung nicht mehr entnommen werden.

Die gewonnenen Probekörper wurden auch in variierenden Zeitabständen geprüft, sofern bei den Probekörpern ausreichendes Material zur Verfügung stand. Die benötigte Größe einer prüffähigen Standard-Baustellenprobe errechnet sich überschlägig nach folgender Formel: 20 x Probendicke breit und ca. 30 cm in Längsrichtung lang. Als Richtwert für kleine Nennweiten (DN 200 bis DN 500) wird vereinfacht die Probengröße des DIN A4 Formats in Längsrichtung benutzt.

Um mindestens zwei prüffähige Probekörper zu erhalten, wurden bei der Entnahme möglichst große Linerausschnitte gewonnen, die mindestens 40 x Probendicke breit und ca. 60 cm in Längsrichtung lang waren. Bei insgesamt zehn Linern konnten auch zeitlich versetzte Prüfungen durchgeführt werden. So wurden aus den 18 entnommenen Ursprungsschachtproben 22 prüffähige Probekörper gewonnen und aus den insgesamt 36 Ursprungshaltungsproben 48 prüffähige Probekörper. Sofern zwei prüffähige Probekörper eines Linerausschnitts vorlagen, wurde einer unmittelbar nach Wareneingang geprüft und der zweite zunächst unter Laborbedingungen eingelagert (licht- bzw. wärmegeschützt) und schließlich nach 28 Tagen geprüft.

Tab. 8: Untersuchungsumfang der Begleitung und Beprobung aktueller Baumaßnahmen bei Kanalnetzbetreibern in NRW

Nr. / Anz. Liner	Fotografisches Beispielbild	Schlauchliner-system	Sanierungs-firma	Einbau-verfahren	Profil und Nennweite Altrhr	Anzahl der Schacht-proben * ¹	Anzahl der Haltungs-proben * ¹	Anzahl der Dichtheits-prüfungen	Anz. d. Drei-Punkt-Bie-geversuche * ²
BM - 01 / 2 Liner		Brandenburger, (GFK-UP)	Kanalsanierung Friedrich	Einzug / UV-Härtung	Kreis DN 300	2	6	8	12
BM - 02 / 3 Liner		Brandenburger, (GFK-UP)	Brandenburger	Einzug / UV-Härtung	Kreis DN 250, DN 300, DN 400	2	6	8	14
BM - 03 / 1 Liner		Brandenburger, (GFK-UP)	Brandenburger	Einzug / UV-Härtung	Kreis DN 300 u. DN 400	0	4	3	6
BM - 04 / 2 Liner		Brandenburger, (GFK-UP)	Frisch und Faust	Einzug / UV-Härtung	Kreis DN 300 u. DN 400	4	2	6	9
BM - 05 / 1 Liner		Insituform, (NF-UP)	Insituform	Inversion / Warmwasser-Härtung	Ei 400/600	0	2	2	2
BM - 06 / 1 Liner		RS CityLiner, (NF-EP)	Diringer und Scheidel	Inversion / Warmwasser-Härtung	Kreis DN 500	2	6	8	8
BM - 07 / 4 Liner		Norditube Uni-liner, (NF-UP)	Rainer Kiel	Inversion / Warmwasser-Härtung	Kreis DN 250 u. DN 300	4 * ³	0	4	4 * ³
BM - 08 / 2 Liner		BKP Berolina, (GFK-UP)	Arkil Inpipe	Einzug / UV-Härtung	Kreis DN 250 u. DN 400	2	2	4	6
BM - 09 / 1 Liner		Insituform, (NF-UP)	Insituform	Inversion / Warmwasser-Härtung	Kreis DN 500	1 * ⁴	4	5	5
BM - 10 / 1 Liner		iMPREG, (GFK-UP)	Stümges Kanaltechnik	Einzug / Dampf-Härtung	Kreis DN 450	1	2	3	2
BM - 11 / 1 Liner		Insituform, (NF-UP)	Insituform	Inversion / Warmwasser-Härtung	Ei 1000/1500	0	2	2	2

*¹: Eine Probe entspricht einer Linerhalbschale mit einer nennweitenabhängigen Breite und einer Länge von mind. 30 cm bzw. 60 cm. / *²: Bei ausreichendem Proben-Umfang (mind. zwei prüffähige Probekörper) wurden die mechanischen Prüfungen zeitlich versetzt wiederholt (t=0d und t=28d). / *³: Die mechanischen Kurzzeit-Eigenschaften wurden bei 3 von 4 Probekörpern (komplette Linerabschnitte von ca. 30 cm Länge / keine Linerhalbschalen) im Scheiteldruckversuch in Anlehnung an DIN EN 1228 bzw. mit der Ringbiegefestigkeitsprüfung in Anlehnung an DWA-M 143-20 ermittelt. / *⁴: Die Schachtprobe wurde durch ein anderes Prüfinstitut untersucht.

6.2.2 Baustellendokumentation und Probenentnahme

Im Rahmen der Baubegleitung und Baustellendokumentation wurden u. a. systemabhängige Unterschiede in den Prozessabläufen erfasst (vgl. Abb. 16). Dies betraf z. B. Vorbereitungsmaßnahmen (Kanalreinigung, Baustelleneinrichtung etc.), das Vorgehen bei Einbau und Aushärtung sowie erforderliche Nacharbeiten. Auch die Vorgehensweise bei der Baustellenbeobachtung wurde beobachtet. Umfassende fotografische Dokumentationen der einzelnen Baumaßnahmen finden sich in Anhang 2.



a) Einziehen eines Schlauchliners, Beispiel Brandenburger-Liner (GFK-UP)



b) Inversion eines Schlauchliners, Beispiel Insituform-Liner (NF-UP)



c) Tränkung des Liners auf der Baustelle, Beispiel RS CityLiner (NF-EP)



d) Vorbereitung des Stützkörpers zur Entnahme einer Schachtprobe

Abb. 16: Baustellendokumentation, Beispiele

Folgende wesentliche Auffälligkeiten, Besonderheiten und Erkenntnisse konnten im Rahmen der Baustellenbegleitung und -dokumentation beobachtet werden:

- Z. T. standen die ausführenden Firmen einer Baustellenbegleitung durch das IKT zunächst ablehnend gegenüber. Es wurde u. a. darauf verwiesen, dass die Arbeitsabläufe unabhängig von der Baumaßnahme stets identisch seien bzw. seit Bestehen des Verfahrens ausreichend optimiert worden wären und eine weitergehende Analyse deshalb nicht nötig sei. Allerdings wurde auch angemerkt, dass hoher Leistungsdruck infolge des beobachteten Preisverfalls auch Qualitätseinschränkungen bei der Arbeitsausführung einschließlich Umsetzung der Arbeitssicherheitsbestimmungen mit sich bringen kann.

- Laut Aussage der ausführenden Fachfirmen werden zum Teil von Auftraggeberseite, insbesondere durch die beteiligten Ingenieurbüros, in der Planungsphase (Ausschreibung) und bei notwendigen Vorbereitungsmaßnahmen bereits eklatante Fehler gemacht, die das Sanierungsergebnis negativ beeinflussen können. Diese Zusammenhänge konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens allerdings nicht weiter untersucht werden.
- In einem Fall hatte die ausführende Sanierungsfirma abweichend von den Angaben in der Ausschreibung den Schlauchliner eines anderen Anbieters mit identischem Trägermaterial und Harz geliefert und eingebaut. Es erfolgte keine Abstimmung mit dem Auftraggeber. Darüber hinaus lag zum Zeitpunkt des Einbaus lediglich die Statik des Auftragnehmers vor. Termindruck verhinderte die rechtzeitige Prüfung der Statik durch ein externes Ingenieurbüro. Die spätere Prüfung der Statik zeigte, dass eine von der Ausschreibung und dem Altrohrzustand abweichende Nennsteifigkeit gewählt und damit selbst die Mindest-Wanddicke gemäß DIBt-Zulassung deutlich unterschritten worden war.
- Entgegen der Annahme wurde bei einer Maßnahme anstehendes Grundwasser beim Härtungsvorgang festgestellt. Die Temperaturmessungen in den Schächten während der Warmwasser-Härtung lieferten hierauf entsprechende Hinweise. Die Härtungszeit wurde dementsprechend verlängert.

Neben vorbereitenden Maßnahmen (z. B. Kalibrierung des Altkanals, ggf. erforderliche Fräsarbeiten, Einmessen der Anschlüsse) und dem eigentlichen Einbau des Liners zählt die Qualitätssicherung zu den wesentlichen Schritten der Schlauchlinersanierung. Hintergrund der hervorzuhebenden Bedeutung der Qualitätssicherung von vor Ort härtenden Schlauchlinern ist, dass es sich nicht um werksseitig gefertigte Endprodukte handelt. Das eigentliche Kanalrohr entsteht mit seinen endgültigen Geometrie- und Werkstoffeigenschaften erst auf der Baustelle, auf der in jedem Einzelfall unterschiedliche Randbedingungen vorherrschen können.

Im Zuge der Baustellenbegleitungen wurden die Vorgehensweisen bei der Probenentnahme zwecks Standard-Qualitätssicherung (Entnahme einer Materialprobe) erfasst und analysiert. Dabei wurde deutlich, dass i. d. R. bereits in der Ausschreibung festgelegt worden war, an welchem Ort (i. d. R. im Schacht) eine „repräsentative“ Baustellenprobe des Liners zu entnehmen ist. Diese Entnahme sollte idealerweise im Beisein des Bauherrn oder des zuständigen Bauüberwachers erfolgen (z. B. Ingenieurbüro), ebenso wie die Beauftragung der Prüfinstitute und der Versand der Baustellenproben an das Prüfinstitut. Die Beauftragung sowie der Versand wurden allerdings z. T. auch von den Sanierungsfirmen selbst veranlasst, so dass sich in diesen Fällen firmenseitige Einflussversuche somit nicht ausschließen lassen [50].

Zur eindeutigen Zuordnung der Baustellenprobe wurden zwei wesentliche Maßnahmen durchgeführt. Zum einen wurden die vor Ort entnommenen Proben eindeutig beschriftet. Hierzu notwendige Angaben sind u. a. Auftraggeber, Stadt, Gemeinde, Datum, Nennweite, Schacht-Nr., Haltungs-Nr., Position im Kanal (vgl. Abb. 17 d). Darüber hinaus wurden sogenannte Probenbegleitscheine ausgefüllt, in denen alle Angaben zur Probenidentifikation und zu den Eingangswerten der statischen Berechnung enthalten sind. Diese Probenbegleitscheine stehen auf der Homepage des IKT zum Download zur Verfügung (siehe www.ikt.de).

Damit der neu eingebaute Schlauchliner nicht unmittelbar nach erfolgter Härtung beschädigt wird und ein erhöhter Aufwand für die Probenentnahme im nicht begehbaren Bereich der Haltung vermieden werden kann, wird nach derzeitigen Stand der Technik die Baustellenprobe bei Kreisprofilen i. d. R. aus dem Schachtbereich entnommen. Bei Ei-Profilen erfolgt die Probenentnahme aufgrund aufwendig herzustellender Stützkonstruktionen im Schacht z. T. auch aus der Haltung (i. d. R. zw. 3 und 5 Uhr, da hier die größte Beulbelastung vorhanden ist [vgl. [19]]).

Um die Geometrie und die Aushärtebedingungen des Altröhres zu simulieren, wurde in die für die Probenentnahme vorgesehenen Schächte beim Linereinbau ein Stützrohr oder Stützschlauch installiert. Hierzu verwendete Materialien waren u. a. Kunststoffrohre, (gewickelte) Stahlrohre, Gewebe- oder Jeansschläuche sowie Halbschalen (die auf das Schachtgerinne gesetzt werden). Die Auswahl der Stützkonstruktion erfolgte i. d. R. von der ausführenden Sanierungsfirma. In einem Fall wurde allerdings beobachtet, dass die Baustellenprobe ohne Stützmedium aus einem Endschacht entnommen wurde. Nach Erfahrungen der Prüfstelle für Bauprodukte des IKT stellen derartige Vorgehensweisen keinen Einzelfall dar. Eine fehlende Stützung kann beim Aufstellen unter einem Druckmedium (Luft oder Wasser) zu einer Aufweitung des Liners und somit zu einer Verfälschung der Ergebnisse zu Ungunsten des Auftragnehmers führen (Undichtigkeiten, geringere mechanische Kennwerte).

Bei den Maßnahmen, bei denen der eingebaute Schlauchliner über mehrere Haltungen verlief – unabhängig von der Härtungsmethode – wurde die Standard-Baustellenprobe aus einem Zwischenschacht entnommen.

In weiteren Fällen, es war entweder kein Zwischenschacht vorhanden oder diese(r) war(en) für eine Entnahme der Materialprobe ungeeignet, erfolgte die Beprobung am Start- und/oder Endschacht. Hier war jedoch die Einbau- und Härtungsmethode bedeutend für die Örtlichkeit. Bei (invertierten) Linern, die thermisch härten (Warmwasser oder Dampf), wurde die Materialprobe i. d. R. aus dem Endschacht entnommen, da am Startschacht einbaubedingt kein ausreichender Platz vorhanden ist und somit dort kein prüffähiges Material gewonnen werden kann.

Bei lichthärtenden Systemen konnten die Proben sowohl aus dem Start- als auch aus dem Zielschacht entnommen werden, sofern ausreichendes Material zur Verfügung stand. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die UV-Lichterkette mit ausreichender Dauer im betroffenen Schacht verweilte.

Eine besondere Herausforderung stellte die (zusätzliche) Probenentnahme im Haltungsbe-
reich dar. In Abb. 17 sind Beispielbilder zur Art und Vorgehensweise der Probenentnahme aus dem Haltungsbe-
reich dargestellt (manuell geführte Geräte / Roboter). Nachfolgend werden die angewendeten Methoden ausführlich beschrieben.

- **Entnahme mittels Fräsroboter im nicht begehbaren Bereich (vgl. Abb. 17 a)**

Unter Zuhilfenahme eines Fräsroboters kann eine Probenentnahme im gesamten Haltungsbe-
reich und darüber hinaus in jeder Querschnittsposition (Sohle, Kämpfer und/oder Scheitel) erfolgen. In den Linerabschnitten wurden dabei vier Schnitte gesetzt (je zwei in Längs- und in Querrichtung), so dass ein rechteckiger Probekörper gewonnen wurde. Geringfügig mehr Aufwand kann bei einer Entnahme im Sohlbereich entstehen, da hier im Gegensatz zum Kämpfer und Scheitel die Probekörper nicht von allein herausfallen. Die gelösten Probestücke wurden im Anschluss mit dem Roboter

zum nächst gelegenen Schacht geschoben und dort entnommen. Die Dauer für Entnahme und Reparatur lag dabei zwischen einer und zwei Stunden, je nach Schwierigkeit bei der Entnahme (u. a. Liner beim Fräsen nicht vollständig durchtrennt). Des Weiteren mussten z. T. zu einem späteren Zeitpunkt noch Nacharbeiten erfolgen (z. B. Ausbau der Schalungskörper und ggf. Fräsarbeiten nach der Reparatur, vgl. Kapitel 6.4). Die zusätzlichen Kosten je Haltungsprobe können auf ca. 500 bis 1.000 Euro pro Probekörper inklusive Reparatur beziffert werden.

- **Händische Entnahme am Haltungsanfang in nicht begehbaren Profilen (vgl. Abb. 17 b)**

In einigen Fällen wurde bei der Entnahme der Haltungsproben im nicht begehbaren Bereich auf den Einsatz eines Fräsroboters verzichtet. Stattdessen wurden die Proben aus dem Schachtbereich heraus händisch mit einem Trennschleifer aus dem Haltungsanfang entnommen (ca. 50 cm vom Schacht entfernt, je nach Armlänge des Facharbeiters). In einem Sonderfall wurde eine spezielle Halte-Verlängerung für den Trennschleifer (ca. 2,5 m langer Stahlstab am Trennschleifer befestigt) benutzt, um eine Entnahme ca. 3 Meter vom Schacht entfernt zu ermöglichen. Bei der Beprobung am Haltungsanfang händisch aus dem Schachtbereich heraus konnten die Kosten im Vergleich zum Einsatz eines Fräsroboters deutlich reduziert werden, da der Aufwand geringer war. Die Kosten lagen so zwischen 300 bis 500 Euro pro Haltungsprobekörper, wobei der Großteil für die Reparatur veranschlagt wurde.

- **Händische Entnahme in begehbaren Profilen**

In begehbaren Profilen kann die Haltungsbeprobung händisch im gesamten Haltungs-bereich mittels Trennschleifer erfolgen. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde dies auch bei einer aktuellen Baumaßnahme im begehbaren Bereich praktiziert; darüber hinaus erfolgte eine Nachbeprobung im begehbaren Bereich, bei der ebenfalls eine händische Entnahme erfolgte (vgl. Kapitel 6.3). Die Dauer und Kosten für Probenentnahme und Reparatur sind zwar grundsätzlich vergleichbar mit denen der händischen Entnahme aus dem Schachtbereich, allerdings fällt zusätzlicher arbeitssicherheitstechnischer Aufwand an (vgl. [84]).

Die Reparatur der Entnahmestellen wird in Kapitel 6.4 ausführlich beschrieben.



a) Kanalroboter mit Fräskopfaufsatz zur Entnahme von Haltungsproben



b) Entnahme einer Haltungsprobe, händisch aus dem Schachtbereich



c) Material aus dem Schacht, Probekörper und Jeansschlauch



d) Beschriftung eines Probekörpers auf der Baustelle

Abb. 17: Entnahme von Baustellenproben, Beispiele

Zu der Entnahme der Baustellenproben können abschließend folgende Erfahrungen festgehalten werden:

- Die entnommenen Probekörper wurden z. T. nicht direkt an das zuständige Prüflabor geschickt, sondern verblieben zunächst in der Hand des Auftragnehmers und wurden erst zu einem späteren Zeitpunkt versendet (z. T. erst Wochen später).
- Der Auftraggeber bzw. der zuständige Bauüberwacher (z. B. Ingenieurbüro) war bei der Entnahme in einigen Fällen nicht vor Ort. An dieser Stelle muss jedoch berücksichtigt werden, dass häufig die Auftraggeber bzw. zuständigen Bauüberwacher mit dem IKT-Forschungspersonal abgesprochen haben, diese Aufgabe im Zuge der Begleitung zu übernehmen. Wie aus Gesprächen mit den ausführenden Dienstleistern hervorging, erfolgt jedoch oftmals die Probenentnahme ohne Beisein des Auftraggebers. Außerdem ist der zuständige Bauüberwacher während des Einbaus häufig nur sehr kurz oder gar nicht vor Ort.
- Im Rahmen der Bauüberwachung ist zu überprüfen, ob die Anforderungen des Netzbetreibers eingehalten werden (z. B. Einbau der bestellten Materialien). Voraussetzung hierfür ist zum einen entsprechendes Know-how des Überwachers und zum anderen auch eine angemessene Vergütung der zu erbringenden Leistung. Aus der Sicht einiger Netzbetreiber wird für die Bauüberwachung in der Regel ein zu geringes Budget eingeplant. Demnach ist ein angemessener Leistungsumfang nach den Ansätzen in HOAI-Verträgen (3 % der Gesamtkosten) nicht realisierbar. Für die Bauüberwachung sollten 8 - 9 % der Gesamtkosten veranschlagt werden.
- Häufig wurde beobachtet, dass die aus der im Schacht vorhandenen Stützung entnommene Probe deutliche mehr Prüfmaterial ergeben hat als erforderlich (vgl. Abb. 17 c). In einigen Fällen konnte so der Auftragnehmer wählen, welches Probestück an das Prüfinstitut übergeben wurde. Vor dem Hintergrund einer möglichst repräsentativen Probe (bzw. mit Schwachstellen) muss diese Vorgehensweise seitens der Auftraggeber überdacht werden.

An dieser Stelle kann bereits festgehalten werden, dass die im Rahmen der Laborprüfungen ermittelten Qualitätsabweichungen zahlreiche Ursachen (z. B. aus Altrohrzustand oder aus dem gesamten Linerprozess) haben können, die durch eine alleinige Baustellenbegleitung

(Besonderheiten beim Einbau und die Vorgehensweise bei der Probenentnahme) nicht zu beleuchten sind.

6.2.3 Laborprüfungen und Ergebnisse

Zum Prüfumfang der zahlreich entnommenen Probekörper sämtlicher begleiteter Baumaßnahmen zählten u. a. die **Standard-Laborprüfungen**. Diese sind die Wasser-Dichtheitsprüfung nach der APS-Richtlinie (vgl. Abb. 18 a), die Messung der statisch tragfähigen Wanddicke und die Ermittlung der mechanischen Kurzzeit-Eigenschaften im Drei-Punkt-Biegeversuch (E-Modul und Biegespannung) (vgl. Abb. 18 b). Probekörper, die als Kreisring – d. h. Linerabschnitte von min. 30 cm Länge – entnommen wurden, sind nach Wareneingang geteilt worden (i. d. R. in zwei Halbschalen - Sohle und Scheitel). Eine Übersicht über die durchgeführten Laborprüfungen ist in Tab. 9 abgebildet. Darüber hinaus werden in dieser Tabelle gültige Normen und weitere Erläuterungen zu den Materialprüfungen aufgeführt.

Tab. 9: Überblick über die durchgeführten Laborprüfungen und deren Kriterien, in Anlehnung an [50]

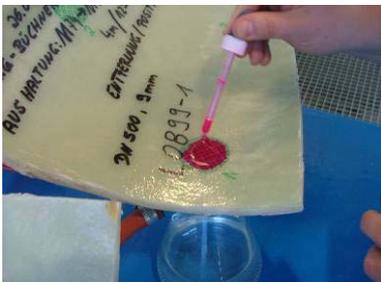
<p>E-Modul (Kurzzeit-Biegemodul)</p> <ul style="list-style-type: none"> Schlauchliner müssen tragfähig sein gegen Lasten wie Grundwasser, Straßenverkehr und Erddruck. Der Elastizitätsmodul ist ein Kennwert für die Tragfähigkeit. Ist der E-Modul zu gering, kann die Standsicherheit gefährdet sein. <u>Prüfmethode:</u> Der Kennwert wird im Drei-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 [49] und DIN EN 13566-4 [22] ermittelt. 	<p>Wanddicke (mittlere Verbunddicke)</p> <ul style="list-style-type: none"> Der Mindestwert wird in der statischen Berechnung festgelegt. Die Wanddicke und der E-Modul bestimmen gemeinsam die Steifigkeit des Liners. Eine zu geringe Wanddicke kann die Standsicherheit gefährden. <u>Prüfmethode:</u> Mit einer Präzisionsschieblehre wird die mittlere Verbunddicke nach DIN EN 13566-4 [22] gemessen.
<p>Biegespannung beim ersten Bruch (Kurzzeit-σ_{FB})⁴</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Biegespannung kennzeichnet den Punkt, an dem Schlauchliner wegen zu hoher Spannung versagen. Wenn der Kennwert der Biegespannung zu gering ist, können Schlauchliner brechen, noch bevor die zulässige Verformung erreicht ist. <u>Prüfmethode:</u> Durch eine Laststeigerung im Drei-Punkt-Biegeversuch werden die Probekörper bis zum Versagen belastet. Die Prüfung erfolgt nach DIN EN ISO 178 [49] und DIN EN 13566-4 [22] (Kurzzeit-Biegefestigkeit). 	<p>Wasser-Dichtheit (nach APS-Richtlinie [48])</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Innenbeschichtungen werden eingeschnitten und die Außenfolien entfernt, sofern diese vorhanden sind.* Auf drei Prüfflächen mit Abmessungen von jeweils $\varnothing 45 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ wird rot gefärbtes Wasser (z. B. Rhodamin B) auf die Innenseite aufgetragen. Auf der Liner-Außenseite wird ein Unterdruck von 0,5 bar aufgebracht. Schlauchliner gelten als undicht, wenn die Prüfflüssigkeit (bzw. Tropfen, Schaum oder Feuchtigkeit) an mindestens einer Prüffläche durchdringt (Laminatverfärbungen sind zulässig). Die Prüfdauer beträgt 30 Minuten.

* Systeme mit einer Innen- bzw. Außenbeschichtung als integraler Linerbestandteil waren nicht Gegenstand der Untersuchungen.

⁴ Im vorliegenden Bericht wird die Biegespannung beim ersten Bruch zur Vereinfachung nachfolgend als Biegespannung bezeichnet.

In einem Sonderfall – es handelte sich um drei Schachtproben einer Baumaßnahme – wurde statt des Drei-Punkt-Biegeversuchs ein Kurzzeit Scheiteldruckversuch in Anlehnung an DIN EN 1228 [85] und die Ringbiegefestigkeitsprüfung in Anlehnung an DWA-M 143-20 [25] durchgeführt, um die mechanischen Kurzzeit-Eigenschaften (E-Modul und Biegespannung) zu bestimmen (vgl. Abb. 18 c). Im Gegensatz zur Vorgehensweise beim Drei-Punkt-Biegeversuch wurden hierzu komplette Linerabschnitte, die nicht in Linerhalbschalen getrennt wurden, in Umfangsrichtung geprüft.

Weitere durchgeführte Prüfungen (wie z. B. 24h-Kriechneigung, IR-Spektroskopie, DSC-Analyse, Reststyrolgehalt), die ebenfalls im Rahmen der Laboruntersuchungen durchgeführt wurden, werden z. T. in Kapitel 9 weitergehend behandelt. Auf die nachfolgende Darstellung der ermittelten Ergebnisse haben diese Untersuchungen nur geringfügigen Einfluss, jedoch sind diese Untersuchungen zur Interpretation und Analyse bei festgestellten Qualitätsdefiziten von Bedeutung.



a) Dichtheitsprüfung nach APS-Richtlinie



b) 3-Punkt Biegeversuch in Anl. an DIN EN ISO 178



c) Scheiteldruckversuch in Anlehnung an DIN EN 1228

Abb. 18: Standard-Laborprüfungen an Schlauchliner-Proben

Nach Abschluss sämtlicher Standard-Laborprüfungen zwecks Qualitätssicherung im Rahmen der Bauabnahme können folgende **Ergebnisse** festgehalten werden:

- Von 53 Dichtheitsprüfungen wurden in acht Fällen (bei acht von 19 Linern) Undichtigkeiten nachgewiesen. Die acht als undicht bewerteten Linerproben unterteilen sich in drei von 18 Schachtproben und fünf von 35 Haltungsproben. Die fünf undichten Haltungsproben stammen von fünf verschiedenen Baumaßnahmen (3-mal NF und 2-mal GFK). Die drei undichten Schachtproben entstammen von drei verschiedenen Linern einer Baumaßnahme (3-mal NF).
- Die Verbunddickenmessung an 70 Probekörpern ergab in zehn Fällen Unterschreitungen der vertraglich vereinbarten Sollwanddicke. Die zehn Fälle unterteilen sich in eine von 48 Haltungsproben und neun von 22 Schachtproben. Es muss hier jedoch beachtet werden, dass ein Großteil der Proben mit Wanddickenunterschreitung Planungsfehler zur Ursache hat. So hatten z. B. Auftragnehmer entgegen den eigenen statischen Berechnungen Liner mit geringeren Wanddicken bestellt und eingebaut.
- In 70 durchgeführten mechanischen Prüfungen erfüllten 67 Prüfkörper die Sollwerte beim E-Modul. Die drei Fälle, bei denen die geforderten Kennwerte nicht erreicht wurden, betreffen eine von 22 Schachtproben und zwei von 48 Haltungsproben (1-mal GFK und 2-mal NF). Von den drei Prüfkörpern gehören zwei zum gleichen Liner, der mehrfach beprobt wurde (je eine Haltungs- und eine Schachtprobe).

- Die geforderte Biegespannung wurde in 13 von 70 Fällen nicht erreicht. Dabei sind eine von 22 Schachtproben und zwölf von 48 Haltungsproben betroffen.
- Es wurde mindestens eine Sollwert-Unterschreitung (wenn auch z. T. nur geringfügig) bei neun von 15 im Haltungsbereich beprobten Linern bei mindestens einer Haltungsprobe festgestellt (Wanddicke, Dichtheit, E-Modul, Biegespannung).
- Ein Einfluss aus der Wahl des Probenentnahmeschachtes (Probe aus dem oberen oder unteren Schacht bzw. Zwischenschacht) sowie des eingesetzten Stützmediums (u. a. Jeansschlauch, Stahlrohr) auf das Ergebnis der Standard-Qualitätssicherung wurde nicht festgestellt.

Nach zeitgleicher Probenentnahme sowohl im Haltungs- als auch im Schachtbereich (**Vergleich des Entnahmeortes**) sowie Mehrfach-Beprobung einzelner Querschnitte (Sohle, Kämpfer, Scheitel) kann folgendes Fazit gezogen werden:

- Es wurde festgestellt, dass **Schachtproben nicht generell schlechtere Kennwerte liefern als Haltungsproben**. Für die Hypothese, dass *„der Schlauchliner im Kanal sicher in Ordnung ist, wenn die Schachtprobe ihr Soll erfüllt, da im Schachtbereich ungünstigere Verhältnisse vorliegen als im Haltungsbereich“* [77] liegen mehrere Gegenbeispiele vor.
- Es liegen Prüfergebnisse vor, bei denen die Schachtproben höhere mechanische Kennwerte aufweisen als die zugehörigen Haltungsproben. Auch der umgekehrte Fall, dass die Haltungsproben höhere Kennwerte aufweisen als die zugehörigen Schachtproben, wurde beobachtet. Darüber hinaus liegen ebenfalls Ergebnisse vor, bei denen Schacht- und Haltungsproben annähernd vergleichbare Ergebnisse liefern.
- Insgesamt wurde eine **breite Streuung der mechanischen Kennwerte** vorgefunden. Dies gilt ebenso für die Kriterien der Dichtheit und insbesondere der Wanddicke. Mehrfach beprobte Liner zeigten abweichende Ergebnisse (> 20 %) der mechanischen Kennwerte sowohl unter Variation von Ort (Schacht, Haltungsanfang, Haltungsmitte, Haltungsende) als auch im Bereich des identischen Querschnitts (Sohle, Kämpfer, Scheitel) auf. Beispielsweise wurde bei einem achtfach beprobten Liner (2-mal Schacht und 6-mal Haltung) die höchsten und geringsten mechanischen Kennwerte aus dem gleichen Querschnitt ermittelt (Scheitel und Kämpfer).
- Jeder Probekörper wird zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte im Drei-Punkt-Biegeversuch in fünf Prüfkörper, die eine Prüfserie bilden, zersägt. Vor der Prüfung wird je 6-mal an definierten Stellen der Schnittkanten mit einer Präzisionsschieblehre die statisch tragende Wanddicke gemessen. Prüfkörper, die den Mittelwert der sogenannten Verbunddicke der Prüfserie um mehr als 10 % unter- bzw. überschreiten, werden bei der Ermittlung der mechanischen Kennwerte verworfen. Die verbleibenden Prüfkörper (im Idealfall also fünf Stück) werden einzeln auf die Prüfmaschine im Drei-Punkt-Biegeversuch aufgelegt und für jedes dieser Prüfstücke die Kennwerte ermittelt (E-Modul und Biegespannung). Von den bestimmten Kennwerten wird im Anschluss ein Mittelwert gebildet, der den endgültigen Wert darstellt. Auch hier wurde eine breite Streuung der Messwerte beobachtet. Die Kennwerte der Prüfkörper einer Prüfserie variieren z. T. über 100 % (unabhängig vom eingesetzten Trägermaterial und dem Harztyp). Mit Ausnahme weniger Probekörper wurden Abweichungen von

mindestens 10 bis 20 % nahezu an jeder Prüfserie festgestellt. Bemerkenswert ist dabei die Tatsache, dass die Prüfkörper aus dem gleichen Probekörper stammen und somit nur wenige Zentimeter in der Kanalhaltung auseinander liegen.

- Bei vier von elf im Haltungs- und Schachtbereich beprobten Schlauchlinern traten Undichtigkeiten nur in der Haltung auf (2-mal GFK / 2-mal NF), die zugehörigen Schachtproben waren dicht.
- Die Ergebnisse führten seitens der beteiligten Kanalnetzbetreiber z. T. zu Schwierigkeiten bei der Abnahme. Häufig wiesen mehrfach beprobte Liner sowohl Proben mit als auch ohne Sollwertunterschreitung auf. So wurde diskutiert, welche Probe maßgebend ist und als repräsentativ bezeichnet werden kann. Vorgehensweisen bei Unterschreitung der Sollwerte werden in Kapitel 6.5 weitergehend behandelt.

Die Prüfergebnisse, die unter **Variation der Zeit** ermittelt wurden (Prüfungen zum Zeitpunkt $t=0d$ und $t=28d$), lieferten zusammenfassend folgende Ergebnisse:

- Im Vergleich der Ergebnisse aus beiden Prüfungen waren i. d. R. nur geringe Unterschiede der mechanischen Kurzzeit-Kennwerte zu beobachten. Auf eine zweifache Dichtheitsprüfung wurde verzichtet.
- In den seltenen Fällen, in denen die beiden Proben (0d, 28d) ein deutlich unterschiedliches Verhalten zeigten, kann dies nicht zweifelsfrei auf zeitliche Einflüsse zurückgeführt werden. Diese Veränderungen können auch darin begründet sein, dass breite Streuungen der Kurzzeit-Kennwerte auch im Bereich des gleichen Probekörpers vorhanden sein können (s. o.).

Nachfolgend werden in Tab. 10 die Ergebnisse der Laborprüfungen zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung der Baumaßnahmen und die Ergebnisdarstellungen sind Anhang 2 zu entnehmen.

Tab. 10: Aktuelle Baumaßnahmen, Ergebnisse der Laborprüfungen

Liner Nr.	Sollwerte	Ergebnisse Schacht	Ergebnisse Haltung
Nr. 1 (BM 01) DN 300 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 220 Wanddicke [mm]: 2,45 mm	dicht 13.823 350,88 4,47	2 x dicht 12.510; 13.246; 13.258; 11.607 250,92; 266,72; 286,12; 255,04 4,78; 4,68; 4,64; 5,10
Nr. 2 (BM 01) DN 300 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 220 Wanddicke [mm]: 2,45	dicht 15.655 329,44 4,03	2 x dicht 11.950; 12.117; 15.177; 12.471; 13.499; 14.098 156,45; 236,53; 298,85; 224,10; 293,69; 246,77 4,40; 4,87; 4,57; 4,86; 4,68; 4,09
Nr. 3 (BM 02) DN 250 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 220 Wanddicke [mm]: 3,5	dicht 13.112 294,82 3,89	2 x dicht 12.013; 13.525; 12.258; 11.219 221,26; 235,12; 245,40; 225,23 4,15; 4,00; 4,19; 4,39
Nr. 4 (BM 02) DN 300 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 220 Wanddicke [mm]: 3,5	keine Schachtprobe entnommen	2 x dicht 10.722; 12.054; 12,491; 13,142 183,50; 202,59; 225,69; 229,72 4,35; 4,24; 4,19; 4,04
Nr. 5 (BM 02) DN 400 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 220 Wanddicke [mm]: 4,2	dicht 13.113 196,24 5,56	2 x dicht 10.128; 11.731; 11.467; 11.798 125,13; 169,89; 142,89; 172,43 6,04; 6,04; 5,92; 5,90
Nr. 6 (BM 03) DN 300 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 220 Wanddicke [mm]: 4,00	keine Schachtprobe entnommen	3 x dicht 10.098; 8.943; 10.267; 11.007; 15.237; 15.229 146,48; 118,91; 158,50; 146,70; 324,61; 334,91 4,78; 4,83; 4,74; 4,53; 4,48; 4,26
Nr. 7 (BM 04) DN 400 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 220 Wanddicke [mm]: 5,6	2 x dicht 15.809; 15.161; 15.052; 18.867 340,56; 347,86; 332,32; 369,14 5,60; 5,56; 5,62; 5,40	dicht 15.847 342,65 5,74
Nr. 8 (BM 04) DN 300 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 220 Wanddicke [mm]: 5,6	2 x dicht 14.273; 13.222; 15.058 271,02; 295,51; 306,25 4,80; 4,86; 4,83	undicht 13.595; 303,27 4,94
Nr. 9 (BM 05) Ei 400/600 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: 28 Wanddicke [mm]: 9,00	keine Schachtprobe entnommen	1 x dicht / 1 x undicht 3.284; 3.251 33,17; 31,82 11,03; 10,39
Nr. 10 (BM 06) DN 500 NF-EP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.400 Biegespannung [MPa]: 55 Wanddicke [mm]: 6,00	2 x dicht 2.140; 2.491 59,49; 67,84 9,78; 9,78	5 x dicht / 1 x undicht 2.433; 2.591; 2.456; 2.403; 1.839; 2.641 68,79; 76,02; 66,26; 66,53; 46,17; 78,17 9,85; 9,73; 9,71; 9,28; 9,76; 9,72
Nr. 11 (BM 07) DN 250 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 3.500 Biegespannung [MPa]: 44 Wanddicke [mm]: 6,50	undicht 5.317 45,49 4,65	keine Haltungsprobe entnommen
Nr. 12 (BM 07) DN 250 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 3.000 Biegespannung [MPa]: 44 Wanddicke [mm]: 6,50	dicht 4.409 51,37 4,92	keine Haltungsprobe entnommen
Nr. 13 (BM 07), DN 300, NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 3.500 Biegespannung [MPa]: 44 Wanddicke [mm]: 6,50	undicht 6.922 48,02 4,61	keine Haltungsprobe entnommen
Nr. 14 (BM 07) DN 250 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 3.500 Biegespannung [MPa]: Wanddicke [mm]: 6,50	undicht 6.365 52,60 4,64	keine Haltungsprobe entnommen
Nr. 15 (BM 08) DN 400 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 7.985 Biegespannung [MPa]: 170 Wanddicke [mm]: 3,32	dicht 13.352; 13.416 359,81; 301,22 5,03; 4,47	dicht 13.198; 13.545 319,35; 296,38 4,86; 5,18
Nr. 16 (BM 08) DN 250 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 7.985 Biegespannung [MPa]: 170 Wanddicke [mm]: 2,07	dicht 11.352 228,79 5,31	dicht 11.476 236,32 5,35
Nr. 17 (BM 09) DN 500 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: 28 Wanddicke [mm]: 7,20	dicht * 4.359 * 48,1 * 7,67 *	3 x dicht / 1 x undicht 3.386; 3.603; 3.772; 3.377 34,86; 37,29; 34,96; 31,76 8,25; 7,97; 7,52; 7,87
Nr. 18 (BM 10) DN 450 GFK-UP Dampf-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 180 Wanddicke [mm]: 4,00	dicht 16,619 307,96 4,36	1 x dicht / 1 x undicht 12.776 307,96 4,36
Nr. 19 (BM 11) Ei 1000/1500 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: 32 Wanddicke [mm]: 29,10	keine Schachtprobe entnommen	2 x dicht 3.650; 3.489 39,00; 37,00 32,62; 31,95

* Die Schachtprobe wurde durch ein anderes Prüfinstitut untersucht.

6.2.4 Schlussfolgerungen

Nach insgesamt zwölf Begleitungen aktueller Baumaßnahmen inklusive der Entnahme und labortechnischen Überprüfung von Schacht- und Haltungsproben können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Im Rahmen des Projektes konnten Gegenbeispiele für die These gefunden werden, dass Schachtproben grundsätzlich schlechtere Materialkennwerte liefern als Haltungsproben (vgl. [76] und [77]).
- Bei neun von 15 im Haltungsbereich beprobten Linern wurde mindestens eine Sollwert-Unterschreitung (Dichtheit, Wanddicke, E-Modul oder Biegespannung) im Haltungsbereich festgestellt, auch wenn diese z. T. nur minimal waren.
- Bei vier verschiedenen Baumaßnahmen (2-mal GFK u. 2-mal NF) wurde festgestellt, dass die Schachtproben die Dichtheitsprüfungen bestanden haben, die zugehörigen Haltungsproben dieses Kriterium jedoch nicht erfüllen konnten. Darüber hinaus wurde bei einer weiteren Baumaßnahme, bei der nur Haltungsproben entnommen wurden, eine Undichtigkeit ermittelt. Im Ergebnis traten bei fünf von elf Baumaßnahmen (fünf von 15 Linern) Undichtigkeiten nur an den Prüfkörpern aus dem Haltungsbereich auf.
- Im Gesamtblick zeigten mehrfach beprobte Liner z. T. erhebliche Streuungen (> 20 %) der mechanischen Kennwerte sowohl unter Variation von Ort (Schacht, Haltungsanfang, Haltungsmitte, Haltungsende) als auch im Bereich des identischen Querschnitts (Sohle, Kämpfer, Scheitel). Auch die Ergebnisbreite der jeweiligen (fünf) Prüfkörper einer Probenserie zeigten Abweichungen von z. T. über 100 %.
- Die Ergebnisse des Forschungsprojekts legen die Vermutung nahe, dass die derzeitige Art der Beprobung bei starker Streuung der Materialeigenschaften als unzureichend für die Abnahme der gesamten Lining-Maßnahme bezeichnet werden muss, da hier die Standard-Beprobung als Einzelbeprobung im Schacht lediglich einen zufälligen, nicht aussagekräftigen Einzelwert darstellt.
- Daraus folgt, dass auch die in einigen Fällen praktizierte Vorgehensweise einer Wiederholungsprüfung bei Sollwertunterschreitungen (Entnahme einer weiteren Baustellenprobe), nicht als repräsentativ anzusehen ist, sondern vielmehr unverändert eine „zufällige“ Stichprobe darstellt.
- Qualitätsabweichungen können zahlreiche Ursachen haben (z. B. aus dem Altrohrzustand oder aus dem gesamten Lining-Prozess). Diese Ursachen für Qualitätsabweichungen und vorhandene Streuungen können durch die Bauabnahme allein nur selten oder gar nicht erfasst werden.
- Mehrfach beprobte Liner mit unterschiedlichen Ergebnissen führten bei den Netzbetreiber zu Problemen bei der Abnahme, da unklar war, welche Prüfungen maßgebend sind.
- In den Gremiumssitzungen wurde darauf verwiesen, dass mit Renovierungsverfahren sanierte Kanäle laut DIN EN 752 [6] dieselben Anforderungen erfüllen müssen, wie ein neugebauter Abwasserkanal. Schlauchliner müssen somit über die gesamte Länge und den gesamten Umfang die Qualitätsanforderungen erfüllen.

- Die Haltungsbeprobung kann in Abhängigkeit von den örtlichen Randbedingungen mit technischen Schwierigkeiten verbunden sein.
- Die Probenentnahme aus der Haltung wird von vielen Netzbetreibern kritisch betrachtet, da geeignete Verfahren zur Reparatur der Entnahmestellen zu fehlen scheinen (vgl. Kapitel 6.4).

Die rein optische Beurteilung der erreichten Linerqualität erscheint nur bedingt möglich. Im Rahmen des Projektes wurde daher auch die Frage untersucht, ob **zerstörungsfreie Prüfmethoden** die Identifikation von Schwachstellen ermöglichen (vgl. Kapitel 7). Diese Stationen könnten dann gezielt beprobt und zerstörend geprüft werden. Ziel der „erweiterten“ Inspektion ist die Untersuchung von Eigenschaften wie z. B. Bauteilgeometrie (Falten, Beulen, Wanddicke), Breite des Ringspaltes, Lunker, Materialdichte, Delamination, Dichtheit und mechanische Kennwerte.

6.3 Nachbeprobungen nach mehrjährigem Betrieb

6.3.1 Untersuchungsprogramm

An den Nachbeprobungen von Schlauchlinern nach mehrjährigem Betrieb beteiligten sich insgesamt zehn Kanalnetzbetreiber. Es wurden insgesamt 20 Schlauchliner nachbeprob und dabei 33 Probekörper entnommen. Die 20 Liner unterteilen sich in neun nadelfilz- und elf glasfasergetragene Systeme. Des Weiteren wurden umfangreiche Nachbeprobungen im Rahmen der Gewährleistungsabnahme bei einem einzelnen Netzbetreiber durchgeführt. Dabei wurden insgesamt 25 weitere Probekörper aus 17 Haltungen entnommen, vier glasfasergetragene und 21 nadelfilzgetragene.

Bei den Altkanälen der Nachbeprobungen handelte es sich in 29 Fällen um Kreisprofile im Nennweitenbereich zwischen DN 200 und DN 600. Darüber hinaus wurden fünf Schlauchliner aus vier Ei-Profilen mit Nennweiten zwischen 250/375 bis 900/1350 nachbeprob. Die Einbauzeitpunkte der einzelnen Maßnahmen lagen zwischen dem Jahr 1995 und dem Jahr 2005. In zwei Fällen musste auf weitere Nachbeprobungen verzichtet werden, da erst vor Ort ein Kraftschluss des Liners mit dem vorhandenen Altrohr festgestellt wurde bzw. (unerwartet) infiltrierendes Grundwasser aufgrund der Reparaturrisiken die Entnahme verhinderte.

Ziel der Nachbeprobungen war zum einen die Untersuchung der Linerqualität an charakteristischen Auffälligkeiten, wie z. B. Falten, Beulen und frei liegenden Fasern. Zum anderen diente die Nachbeprobung zur Einschätzung von Einflüssen aus Materialalterung (z. B. im Rahmen von Gewährleistungsabnahmen).

In Tab. 11 wird der Untersuchungsumfang der Nachbeprobungen zusammengefasst. Weitere Informationen enthält Anhang 3.

Tab. 11: Untersuchungsumfang der Nachbeprobung von Schlauchlinern nach mehrjährigem Betrieb

Nr. / Bj.	Fotografisches Beispielbild	Schlauchlinersystem	Sanierungs-firma	Profil und Nennweite Altrohr	Hintergrund der Nachbeprobung	Anzahl der Proben u. der Liner	Anzahl der Dichtheitsprüfungen	Anz. d. Drei-Punkt-Biegeversuche
NB - 01 / Bj. 2000		Saertex, (GFK-UP)	Brochier	Kreis DN 400	Kl. Falten / Einschätzung der Materialalterung	4 Proben aus einem Liner	4	8* ¹
NB - 02 / Bj. 2002		Euroliner, (GFK-UP)	Scheiff	Kreis DN 400	Frei liegende Faserschichten	2 Proben aus einem Liner	2	1
NB - 03 / Bj. 2001 u. 2002		Brandenburger, (GFK-UP)	Win-line	Kreis DN 200 u. DN 250	Ablösungen der Linerwandung	7 Proben aus drei Linern	4	0
NB - 04 / Bj. 2002		Inpipe, (GFK-UP)	R+S Rohrtechnik	Ei 275/375	Frei liegende Faserschichten	2 Proben aus einem Liner	3	1
NB - 05 / Bj. 2005		Euroliner, (GFK-UP)	Linertec	Kreis DN 300 u. DN 500	Gewährleistungsabnahme	3 Proben aus zwei Linern	3	3
NB - 06 / Bj. 2003		KM Inliner, (NF-UP)	KMG	Kreis DN 400	Flecken, off. Undichtigkeiten / Gewährleistungsabnahme	2 Proben aus zwei Linern	2	2
NB - 07 / Bj. 1995 bis 2004		Insituform, KM Inliner, (NF-UP) / RS CityLiner (NF-EP)	Insituform, KMG, Diringer und Scheidel	Ei 300/450 bis Ei 900/1350	Falten und Beulen / Einschätzung der Materialalterung	6 Proben aus fünf Linern	6	4
NB - 08 / Bj. 2004		Saertex, (GFK-UP)	k. A.	Kreis DN 400	Kl. Falten u. Beulen / Gewährleistungsabnahme	4 Proben aus drei Linern	4	4
NB - 09 / Bj. 1998		KM Inliner, (NF-UP)	KMG	Kreis DN 400	Einschätzung der Materialalterung	2 Proben aus zwei Linern	2	2
NB - 10 / Bj. 2002 bis 2004		Insituform (NF-UP), Brandenburger (GFK-UP)	k. A.	Kreis DN 200 bis DN 600	Gewährleistungsabnahme	25 Proben aus 17 Hal-tungen * ²	25	25

k. A. = keine Angabe / *¹: Die mechanischen Prüfungen wurden in diesem Fall zeitlich versetzt wiederholt (t=0d und t=28d). / *²: Die 25 entnommenen Proben entstammen aus 17 verschiedenen Kanalhaltungen. Die Anzahl der beprobten Liner ist nicht bekannt.

6.3.2 Auswahl der Entnahmestellen und Probenentnahme

Um schlauchlinersanierte Abschnitte mit Auffälligkeiten für die Nachbeprobung auswählen zu können, wurden zunächst TV-Inspektionsdaten und Inspektionsvideos der Netzbetreiber ausgewertet (vgl. Kapitel 5, Zustandskatalog im Anhang 1 und Abb. 19 a) und mögliche Entnahmestellen hinsichtlich weiterer Randbedingungen überprüft. Dies betraf u. a. den Querschnitt des Kanals, so ist z. B. in kleinen Ei-Profilen die Entnahme mit hohem technischen Aufwand verbunden, sowie den Abgleich mit den Ergebnissen der Altrohrinspektion zur Vermeidung kritischer Situationen, z. B. bei vorherigem Bodeneinbruch. Die Entnahmestellen an Auffälligkeiten betrafen im Einzelnen folgende Bereiche:

- In zwei Fällen waren im Rahmen der TV-Inspektion deutlich frei liegende Fasern im Kanalquerschnitt zu erkennen (vgl. Abb. 19 b).
- Im Vorfeld einer Nachbeprobung zeigte das Inspektionsvideo Ablösungen von Faserschichten bei mehreren Kanalhaltungen einer Baumaßnahme.
- In einem Fall zeigte die TV-Untersuchung im Rahmen einer Gewährleistungsabnahme fleckenartige Verfärbungen sowie offensichtliche Undichtigkeiten in mehreren Haltungen einer Baumaßnahme.
- Zwei Nachbeprobung bezogen sich auf Falten und Beulen (je einmal NF und einmal GFK), die im Zuge der Auswertung von Inspektionsvideos der Netzbetreiber identifiziert wurden.

Ergänzend wurden Nachbeprobungen an Schlauchlinern ohne optische Auffälligkeiten durchgeführt (z. B. im Rahmen von Gewährleistungsabnahmen). Hintergrund für diese Vorgehensweise war, dass z. T. Laborprüfungen an charakteristischen Auffälligkeiten wie z. B. Falten und Beulen, mit Standard-Prüfverfahren (Drei-Punkt-Biegeversuch) nicht durchführbar sind.

Aus diesem Grund wurden die (fünf) Prüfkörper von Materialproben mit auffälligen Strukturen, wie z. B. Falten und Beulen, aus den Randbereichen der Linerabschnitte herausgesägt, die keine geometrische Abweichungen aufzeigten. Diese Vorgehensweise war allerdings nicht an jedem entnommenen Probekörper möglich, da z. T. nicht ausreichend falten- bzw. beulenfreies Material zur Verfügung stand. Die Dichtheitsprüfungen jedoch konnten an diesen Proben i. d. R. durchgeführt werden.

Die einzelnen Nachbeprobungen wurden vor Ort begleitet (vgl. Abb. 19 c). Dabei wurden Besonderheiten bei der Probenentnahme und bei der Reparatur erfasst (vgl. Anhang 3). Die Entnahme erfolgte wie bereits in Kapitel 6.2.2 beschrieben entweder per Fräsroboter, im begehbaren Bereich händisch mittels Trennschleifer, aber auch z. T. händisch aus dem Schachtbereich heraus am Haltungsanfang in nicht begehbaren Profilen (vgl. Abb. 19 d).



a) Auswertung eines Inspektionsvideos zur Auswahl der Entnahmestellen



b) „Igel“-artige Oberflächenstruktur im Scheitelbereich des Liners



c) Nachbeprobung in einem Wirtschaftsweg mit dem Kanalroboter



d) Kanalroboter im Einsatz, Bergung einer Materialprobe aus dem Schacht

Abb. 19: Nachbeprobung von Linern nach mehrjährigem Betrieb, Beispiele

6.3.3 Laborprüfungen und Ergebnisse

Aus insgesamt 57 entnommenen Schlauchliner-Ausschnitten wurden 61 prüffähige Probekörper gewonnen und im Labor hinsichtlich der Dichtheit nach der APS-Prüfrichtlinie und der mechanischen Kennwerte im Drei-Punkt-Biegeversuch untersucht (vgl. Kapitel 6.2.3).

Die Ergebnisse der Laborprüfungen lassen sich wie folgt zusammenfassen (auffällige und nicht auffällige Proben gemeinsam):

- Bei 20 von 54 auf Dichtheit geprüften Probekörpern lautete das Prüfergebnis „undicht“ (37 % der Prüfkörper).
- In 40 von 52 durchgeführten Drei-Punkt-Biegeversuchen konnten die Ergebnisse der E-Moduln mit Sollwerten verglichen werden. In 33 Fällen wurden die geforderten Kennwerte beim E-Modul eingehalten, bei sieben Prüfkörpern wurden die Sollwerte unterschritten.
- In 39 von 52 durchgeführten Drei-Punkt-Biegeversuchen konnten die Ergebnisse der Biegespannung mit Sollwerten verglichen werden. In 24 Fällen wurden die geforderten Kennwerte der Biegespannung eingehalten, bei 15 Prüfkörpern wurden die Sollwerte unterschritten.

- Bei 42 von 54 durchgeführten Verbunddickenmessungen konnten die Ergebnisse mit Sollwerten verglichen werden. In 34 Fällen wurden die geforderten Waddicken eingehalten, bei 8 Prüfkörpern wurden die Sollwerte unterschritten.

Der hohe Anteil nicht bestandener Prüfungen rührt insbesondere aus der Tatsache, dass vor allem Auffälligkeiten betrachtet wurden, die bereits optisch Schwachpunkte für die Dichtheit oder mechanische Leistungsfähigkeit erwarten ließen. So war in zwei Fällen Undichtigkeit zu erwarten, da bereits aus dem TV-Inspektionsvideo Hinweise wie Tropfenbildung im Laminat bzw. deutlich zu erkennende, nicht imprägnierte Fasern vorlagen.

Ausnahmen sind allerdings möglich: So zeigte die TV-Inspektion in einem Fall einen Schaden in Form von Faserablösungen in mehreren Haltungen und die Dichtheitsprüfungen bestätigten dennoch die Dichtheit. Allerdings war der Querschnitt soweit geschwächt, dass eine mechanische Prüfung nicht mehr möglich war.

In anderen Fällen zeigten sich erst durch die Probenentnahme weitere Auffälligkeiten, so z. B. auf der Linerrückseite als deutliche Schwächungen der Struktur oder hinter dem beprobten Liner als vorangegangene Linersanierungen (Liner auf Liner).

Im Zuge der Gewährleistungsabnahme wurde darüber hinaus deutlich, dass auch erhebliche Haftungsschwierigkeiten auftreten können. Zahlreiche Sanierungsfirmen existierten zum Zeitpunkt der Gewährleistungsabnahme nicht mehr, so dass keine Haftungsansprüche mehr geltend gemacht werden können. Einige Netzbetreiber begegnen diesem Risiko durch eine vorgezogene Gewährleistungsabnahme.

Nachfolgend werden in Tab. 12 die Ergebnisse der Laborprüfungen zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung der Nachbeprobungen und die Ergebnisdarstellungen sind Anhang 3 zu entnehmen.

Tab. 12: Nachbeprobungen nach mehrjährigem Betrieb, Ergebnisse der Laborprüfungen

Baujahr, Liner	Sollwerte	Ergebnisse Haltung
NB - 01, Bj. 2000 DN 400 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: k. A.* ¹ Biegespannung [MPa]: k.A.* ¹ Wanddicke [mm]: k. A.	dicht 10.098; 10.393; 10.267; 11.596; 15.237; 12.028; 10.166; 10.094 146,48; 188,99; 158,50; 224,65; 324,61; 251,37; 141,00; 137,84 4,78; 3,55; 4,74; 4,43; 4,48; 2,66; 4,06; 3,38
NB - 02, Bj. 2002 DN 300 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 8.500 Biegespannung [MPa]: 200 Wanddicke [mm]: 4,20	1 x undicht * ² / 1 x dicht n. p. * ^{2*3} ; 16,368 n. p. * ^{2*3} ; 423,47 n. p. * ^{2*3} ; 3,06
NB - 03, Bj. 2001 / 2002 DN 200 u. DN 250 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 220 Wanddicke [mm]: k. A.	4 x dicht 4 x n. p. * ^{3*4} 4 x n. p. * ^{3*4} 4 x n. p. * ^{3*4}
NB - 04, Bj. 2002 Ei 250/375 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: ~7.800 Biegespannung [MPa]: 130 Wanddicke [mm]: 4,60	1 x dicht / 1 x undicht * ² 6,378; n. p. * ^{2*3} 253,39; n. p. * ^{2*3} 5,76; n. p. * ^{2*3}
NB - 05, Bj. 2005 DN 300 u. DN 500 * ⁵ GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 8.500 Biegespannung [MPa]: 200 Wanddicke [mm]: 3,50 u. 5,0	3 x dicht 11.124; 10.751; 15.589 243,83; 242,21; 295,50 5,81 (gef. 3,5); 5,85 (gef. 5,0); 4,04 (gef. 5,0)
NB - 06, Bj. 2003 DN 400 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: 36 Wanddicke [mm]: 6,00	1 x undicht * ⁶ / 1 x dicht 4,495; 4,229 49,15; 50,39 7,40; 7,99
NB - 07, Bj. 2004 Ei 900/1350 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: 36* ⁷ Wanddicke [mm]: 19,00	2 x dicht 4.111; 3.592 37,05; 35,17 18,85; 18,29
NB - 07, Bj. 1995 Ei 350/525 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: k. A. Wanddicke [mm]: k. A.	1 x dicht n. p. n. p. n. p.
NB - 07, Bj. 1999 Ei 300/450 NF-EP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: k. A. Wanddicke [mm]: k. A.	1 x dicht n. p. n. p. n. p.
NB - 07, Bj. 1996 Ei 400/600 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: 36 Wanddicke [mm]: k. A.	2 x dicht 3,881; 2,914 60,04; 31,35 12,83; 11,25
NB - 08, Bj. 2004 DN 400 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 12.000 Biegespannung [MPa]: 350* ⁷ Wanddicke [mm]: 4,00	4 x dicht 15.834; 14.564; 16.651; 15.232 398,23; 340,69; 344,35; 351,37 4,26; 4,43; 4,62; 4,22
NB - 09, Bj. 1998 DN 400 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: k. A. Biegespannung [MPa]: k. A. Wanddicke [mm]: k. A.	1 x dicht / 1 x undicht 2,300; 2,720 31,91; 58,75 8,52; 10,49
NB - 10, Bj. 2003 DN 250 GFK-UP UV-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 9.500 Biegespannung [MPa]: 150 Wanddicke [mm]: 4,20	4 x dicht 14.119; 13.649; 11.760; 10.352 256,16; 240,94; 205,43; 210,97 4,51 (gef. 4,90); 3,75; 4,49; 4,22
NB - 10, Bj. 2004 DN 200 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: 36* ⁷ Wanddicke [mm]: 4,70	4 x undicht / 1 x dicht 2,067; 2,713; 3,082; 3,733; 3,187 38,85; 27,46; 33,17; 33,90; 31,32 4,00 (gef. 2,30); 6,69; 7,33; 7,25; 7,56
NB - 10, Bj. 2002 DN 200 u. DN 250 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: 36* ⁷ Wanddicke [mm]: 4,50	7 x undicht / 1 x dicht 2,563; 3,863; 3,921; 3,376; 3,047; 2,618; 3,423; 3,910 33,09; 48,32; 42,26; 38,69; 32,64; 34,86; 42,07; 37,33 7,60 (gef. 6,0); 6,10; 5,61; 6,20; 6,23; 5,72; 5,59; 9,79 (gef. 7,50)
NB - 10, Bj. 2003 DN 250 u. DN 400 NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: 36* ⁷ Wanddicke [mm]: 4,50 u. 6,0	1 x undicht / 3 x dicht 3,333; 3,027; 4,130; 4,432 37,13; 36,69; 44,85; 46,33 6,25 (gef. 4,50); 5,49 (gef. 4,50); 7,26 (gef. 6,00); 7,07 (gef. 6,00)
NB - 10, Bj. 2002 DN 200 (Hausanschluss-Liner) NF-UP Warmwasser-Härtung	Dichtheit: dicht E-Modul [MPa]: 2.800 Biegespannung [MPa]: 36* ⁷ Wanddicke [mm]: k. A.	4 x undicht 3,516; 3,501; 3,190; 3,408 45,78; 44,91; 48,91; 47,01 4,91; 4,35; 4,68; 4,95

k. A. = keine Angabe (Sollwerte liegen nicht vor)

n. p. = nicht prüfbar (Aufgrund der Probenstruktur bzw. -geometrie war kein 3-Punkt-Biegeversuch möglich)

^{*1}: Es konnte nicht ermittelt werden, welches Linersystem des Herstellers eingesetzt wurde. Jedoch ist bekannt, dass die Kennwerte beim E-Modul mindestens 7.000 MPa bzw. 12.000 MPa und bei der Biegespannung mindestens 200 MPa oder 350 MPa, je nach eingesetztem System, betragen.

^{*2}: Die Probekörper weisen deutlich zu erkennende unzureichend imprägnierte Bereiche auf.

^{*3}: Es kann davon ausgegangen werden, dass die mechanischen Kennwerte signifikant unterschritten werden, da die Probekörper händisch biegsam sind.

^{*4}: Die Probekörper weisen abgelöste Faserschichten auf.

^{*5}: Während der Probenentnahme wurde festgestellt, dass ein zweiter Liner (DN 500) über den ersten verbaut war.

^{*6}: Die Probe wurde aus einem Bereich entnommen, in dem eine Undichtigkeit im Rahmen der TV-Inspektion vermutet wurde (Tropfenbildung im Laminat). Im Labor zeigte sich ein Haarriss auf der Linerrückseite.

^{*7}: Die Werte für die Kurzzeit-Biegespannung waren zum Einbaupunkt 350 MPa bzw. 36 MPa; die Werte wurden in der Zwischenzeit auf 250 MPa bzw. 32 (28 für Wanddicken ≤ 9 mm) MPa abgemindert.

6.3.4 Schlussfolgerungen

Im Ergebnis der durchgeführten Nachbeprobungen lassen sich optische Auffälligkeiten nicht zuverlässig mit einer Veränderung der mechanischen Kennwerten bzw. der Dichtheit in Verbindung bringen. Die Bewertung von Auffälligkeiten ist entsprechend als Einzelfallbetrachtung anzusehen (vgl. Zustandskatalog im Anhang 1). Tendenzen sind jedoch vorhanden, so sind z. B. fleckenartige Verfärbungen scheinbar ohne Einfluss auf die Dichtwirkung und mechanischen Kennwerte, während freiliegende Fasern als Hinweis für mangelnde Harztränkung und daraus folgend möglicher Undichtigkeit und geringer mechanischer Widerstandsfähigkeit angesehen werden können. Im Zuge der Nachbeprobungen von optisch unauffälligen Altlinern konnten auch hier z. T. Streuungen und Inhomogenitäten der Materialeigenschaften festgestellt werden. Besondere Unsicherheiten für die Netzbetreiber bestehen – wie bei der Haltungsbeprüfung bei Bauabnahme – hinsichtlich einer dauerhaften Reparatur der Probenentnahmestellen.

6.4 Reparatur der Probenentnahmestellen

Nach der Entnahme von Materialproben aus der Haltung waren im Anschluss die Fehlstellen fachgerecht zu verschließen bzw. zu reparieren. Bei den beteiligten Netzbetreibern bestanden erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Dauerhaftigkeit dieser „Reparaturmaßnahmen“. Dies betrifft sowohl die Bewertung dieser Beschädigung der sanierten Rohrleitungsstrecke als auch die Frage nach geeigneten Reparaturverfahren. Die Erfahrungen und Ansichten der Netzbetreiber gehen hier weit auseinander.

Im Rahmen der o. a. Probenentnahmen wurden verschiedene Verfahren zur Reparatur der Probenentnahmestellen angewendet. Abb. 20 zeigt Beispielbilder aus den Verfahrenseinsätzen.



a) Vorbereitung des Kanalroboters zum Setzen des Schalungselementes



b) Schalungselement auf dem Kanalroboter, Vorbereitung der Reparatur



c) Anmischen des Verpressharzes, Zwei Komponenten Epoxid-Harz



d) Händisches Auftragen des Verpressharzes auf den Packer

Abb. 20: Reparatur der Probenentnahmestellen, Beispiele vom Einbau

Für die Reparatur der Probenentnahmestellen wurden als Reparaturverfahren eingesetzt:

- Innenmanschetten (vgl. Abb. 21 a),
- Kurzliner (vgl. Abb. 21 b) und
- Injektions- und Spachtelverfahren (vgl. Abb. 21 c und d).

Die eingesetzten Reparaturverfahren werden nachfolgend beschrieben und gültige Normen, Richtlinien, Regelwerke und weitere Literaturverweise aufgeführt.

Reparatur mit Innenmanschetten

Bei der Reparatur mittels Innenmanschette kommen sowohl Manschetten aus Edelstahl als auch aus PVC zum Einsatz. Die Dichtungsfunktion der Innenmanschetten kann durch Epoxid-Harz, Mörtel oder eine Elastomerdichtung erzielt werden. Verfahrensabhängig wird vor dem Einbau das jeweilige Dichtmittel auf der Außenseite der Innenmanschette aufgetragen, diese so präpariert auf einen Versetzpacker geschoben und mit zunächst reduziertem Durchmesser in den Kanal eingebracht. Nach korrekter Positionierung an der Entnahmestelle wird der Versetzpacker mit Luft gefüllt und somit die Manschette aufgeweitet und dauerhaft an der Entnahmestelle verspannt. Verfahrensabhängig wird die dauerhafte Verspannung der Innenmanschette erst nach vollständiger Aushärtung des Dichtmittels erzielt, es kommen aber ebenfalls Verfahren zum Einsatz, bei denen keine Aushärtung erforderlich ist (Elastomerdichtung) und der Packer unmittelbar nach der Applikation wieder aus der Haltung entfernt wird.

Weiterführende Literaturquellen sowie Normen und Richtlinien über den Einsatz von Innenmanschetten sind u. a. [13], [14], [17], [86], [87].

Reparatur mit Kurzlinern

Bei der Reparatur mittels Kurzliner wird ein der Entnahmestelle entsprechend konfektioniertes und mit Reaktionsharz getränktes Trägermaterial, Glasfasergewebe oder Polyesterneidelfilz, auf einen Versetzpacker aufgewickelt und mit diesem in die zu sanierende Haltung eingebracht. Unter Zuhilfenahme einer TV-Kamera wird der Packer an der Entnahmestelle positioniert und dort mit Luft gefüllt, so dass die Gewebemanschette unter einem verfahrenabhängigen Druck, der z. B. in einer Größenordnung von etwa 0,7 bar liegt, an die Innenwand

des Inliners angepresst wird. In dieser Position verbleibt der Packer bis zur vollständigen Aushärtung des Reaktionsharzes.

Wesentliche Normen, Regelwerke und Merkblätter sowie weiterführende Literaturquellen zur Reparatur mit Kurzlinern sind u. a. [13], [14], [17], [86], [87].

Reparatur mit Injektions- und Spachtelverfahren

Der Vorgang der Injektion beschreibt in Anlehnung an DIN 4093 [88] das Einbringen von pumpfähigen Injektionsmitteln unter Druck in z. B. Risse und dahinter liegende Hohlräume im umgebenden Baugrund, um so eine abdichtende Wirkung zu erzielen. Je nach vorliegendem Schadensbild kommen bei dem Verfahren Materialien unterschiedlichen Fließvermögens zum Einsatz. Diese werden z. B. in begehbaren Kanälen manuell mit geeignetem Werkzeug auf die Entnahmestelle aufgebracht oder in Kanälen kleineren Durchmessers mit Hilfe von Packern oder auch Roboterverfahren in die Entnahmestelle unter Zuhilfenahme von Schalungselementen injiziert bzw. darauf gespachtelt. Neben einer Injektionseinrichtung verfügen die eingesetzten Roboter z. T. über Fräs-, Bohr- und Spachteleinrichtungen. Nach vollständiger Aushärtung des Injektionsmaterials wird ggf. eine eingesetzte Schalung wieder entfernt und ggf. die sanierte Stelle noch nachbearbeitet (z. B. Abfräsen von Harzüberschuss).

Ausführliche Informationen über den Einsatz von Injektions- und Spachtelverfahren finden sich u. a. in [13], [14], [17], [87], [89].



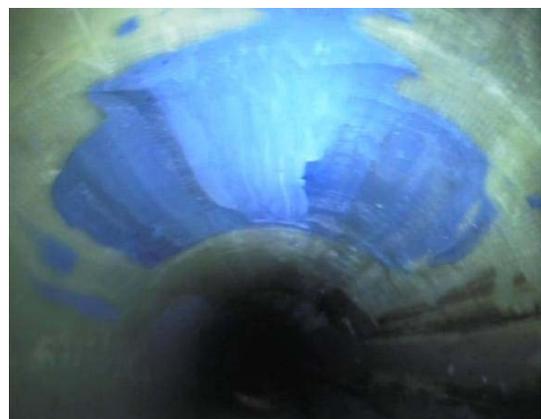
a) Innenmanschette



b) Kurzliner



c) Probenentnahmestelle vor Reparatur



d) Probenentnahmestelle nach Reparatur, Verpressharz mit Roboter injiziert

Abb. 21: Reparatur der Probenentnahmestellen, Beispiele aus dem Kanal

Nicht aufgeführt bei den Reparaturverfahren ist die Sanierungsmethode „GFK-Handlaminat“. Während der Projektbearbeitung wurde diese Methode nicht angewendet. Seitens der beteiligten Netzbetreiber wurde angemerkt, dass bzgl. der Eignung weiterer Informationsbedarf vorhanden ist.

Probenentnahmen im begehbaren Bereich sowie in unmittelbarer Nähe zum Schacht im nicht begehbaren Bereich vereinfachten die Reparatur der Entnahmestellen und senkten somit Aufwand und damit verbunden die Kosten. Vor diesem Hintergrund wurden die Proben in nicht begehbaren Kanälen häufig aus dem Haltungsanfang entnommen, sofern keine andere Entnahmestelle z. B. mit Blick auf optische Auffälligkeiten vorgesehen war.

Aussagen über die Dauerhaftigkeit der Reparaturstellen sind an dieser Stelle nicht möglich, da etwaige Untersuchungen nicht Bestandteil der Projektbearbeitung waren. Prinzipiell muss jedoch beachtet werden, dass an Reparaturverfahren im Rahmen der Abnahme (Bau- und Gewährleistungsabnahme) vergleichbare Anforderungen bzgl. der Dichtheit zu stellen sind, wie bei Renovierungsverfahren (vgl. [6]). Bzgl. der mechanischen Eigenschaften gilt, dass der statische Nachweis nach [9] nicht ohne Weiteres auf Reparaturverfahren übertragbar ist. Darüber hinaus wird für Reparaturverfahren, wie z. B. Innenmanschetten, Injektionen oder Kurzliner, heute üblicherweise von einer ansetzbaren Nutzungsdauer von maximal 15 Jahren ausgegangen, während für Schlauchliner z. T. auch über 50 Jahre angesetzt werden.

Hinsichtlich weiterer Informationen zum Einsatz von Reparaturverfahren sei auf den aktuellen IKT-Warentest „Reparaturverfahren für Hauptkanäle“ verwiesen [90], in dem die o. a. gängigen Reparaturverfahren derzeit umfassend getestet werden, allerdings nicht für den speziellen Anwendungsfall „Schlauchliner-Reparatur“. Die Veröffentlichung der Ergebnisse wird für Jahresmitte 2009 erwartet.

6.5 Bisherige Vorgehensweisen bei Sollwertunterschreitung

Im Rahmen der In-situ-Untersuchungen wurden für den Fall der Sollwertunterschreitung verschiedene Vorgehensweisen der Kanalnetzbetreiber beobachtet, die auch in den Gremiumssitzungen diskutiert wurden. Folgende grundsätzliche Vorgehensweisen lassen sich unterscheiden:

- **Statische Neu-Berechnungen mit aus den Laborprüfungen ermittelten Ergebnissen bei Unterschreitung der mechanischen Kennwerte**

Im Falle der Unterschreitung des geforderten E-Moduls, der Biegespannung und/oder der statisch tragenden Wanddicke werden durch den Auftragnehmer statische Neuberechnungen mit den im Labor ermittelten Ergebnissen durchgeführt. Dabei wird überprüft, ob unter diesen Bedingungen dennoch die geforderten Nachweise und Sicherheitswerte eingehalten werden können. In der Praxis wird häufig unterstellt, dass bei minimalen Unterschreitungen der Kennwerte die Standsicherheit i. d. R. noch nachgewiesen werden kann.

- **Wiederholungsprüfung an einer weiteren Probe bei festgestellter Undichtigkeit und/oder bei Unterschreitung der mechanischen Kennwerte**

Insbesondere bei festgestellten Undichtigkeiten (aber auch bei Unterschreitung der mechanischen Kennwerte) wird häufig eine Wiederholungsprüfung durchgeführt. Hierzu wird i. d. R. aus dem Haltungsbereich eine weitere Materialprobe entnommen und diese im Labor erneut geprüft. Werden die geforderten Eigenschaften erreicht, gilt die Wiederholungsprüfung als maßgebend für das gesamte Ergebnis.

- **Durchführung ergänzender Prüfungen (wie z. B. Reststyrolgehalt, IR-Spektroskopie, 24h-Kriechneigung, DSC-Analyse) bei Unterschreitung der mechanischen Kennwerte**

Falls die mechanischen Kennwerte bei der Standard-Baustellenprobe sowie ggf. auch bei der Wiederholungsprüfung die Sollwerte unterschreiten, werden ergänzende Prüfungen durchgeführt, um weitere Aussagen zum Aushärtegrad, der Tränkungsdichte und der Materialbeständigkeit zu erhalten. Insbesondere gestattet die IR-Analyse den Nachweis, ob tatsächlich der bestellte Harztyp geliefert und eingebaut wurde. In Abhängigkeit von den Ergebnissen können weitere Maßnahmen veranlasst werden (z. B. Nach-Härtung des Liners, Reparatur, Erneuerung).

- **Einbau eines zweiten Liners über den ersten Liner bei festgestellter Undichtigkeit und/oder bei Unterschreitung der mechanischen Kennwerte**

Sofern hydraulisch ausreichend Reserven vorhanden sind, besteht die Möglichkeit, einen zweiten Liner über den ersten einzubauen. Der zweite Liner muss dabei allein die gleichen statischen Anforderungen erfüllen wie der erste Liner (vgl. [91]).

- **Herausfräsen des gesamten Liners und Erneuerung der Sanierung nach festgestellter Undichtigkeit und/oder bei Unterschreitung der mechanischen Kennwerte**

Sofern hydraulisch keine ausreichenden Reserven vorhanden sind und ein hohes Gefährdungspotential besteht (z. B. Wasserschutzgebiet), wurden nach Aussage der am Projekt beteiligten Netzbetreiber auch bereits komplette Linerabschnitte herausgefräst und durch einen neuen Liner ersetzt. Diese Vorgehensweise ist jedoch besonders im nicht begehbaren Bereich extrem aufwendig, so dass die Kosten die der Sanierung überschreiten können. Auch sind Folgeschäden für das Altrohr zu erwarten, da beim Fräsvorgang die Substanz des Altkanals angegriffen werden kann.

Führen die o. a. Maßnahmen für den Auftraggeber nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis und/oder werden weitere Risiken gesehen, werden derzeit folgende weitere Handlungsoptionen erwogen:

- Die Abnahme wird zunächst verweigert und dem Auftragnehmer Zeit eingeräumt, etwaige Mängel zu beseitigen (z. B. Beseitigung von grobe Falten, Reparatur, Erneuerung der Sanierung).
- Die Gewährleistung wird ggf. verlängert, auffällige Bereiche werden regelmäßig beobachtet.
- Ein Teil der zu zahlenden Auftragssumme wird einbehalten (Wertminderung). Voraussetzung hierfür ist, dass ein wertmindernder Mangel vorliegt, z. B. durch Unterschreitung der vertraglich vereinbarten Sollwerte mit vertretbarem Sicherheitsverlust.
- Die Kosten für den Liner sind durch den Auftragnehmer zu übernehmen, so dass auf eine Vergütung komplett verzichtet wird. Voraussetzung hierfür ist, dass ein wesentlicher Mangel (Schaden) vorliegt, z. B. durch Unterschreitung der vertraglich vereinbarten Sollwerte, so dass auch bei Nachbemessung mit den neu ermittelten Kennwerten die geforderten Sicherheitsbeiwerte nicht gegeben sind.

Die Festlegung einer Vergütungsminderung im Falle eines Mangels kann bereits in der Ausschreibung festgelegt sein. Hier bietet beispielsweise das Anforderungsprofil süddeutscher Kommunen über „Schlauchliner-Kanalrenovierung“ [29] eine erste Orientierung. Andererseits ist nicht auszuschließen, dass derartige Festlegungen auf Anbieterseite auch zu einer kalkulierbaren „Mängeloptimierung“ führen.

7 Innovative Inspektionstechniken und Prüfverfahren

7.1 Einleitung

Zum Schutz der Umwelt vor Verschmutzung durch Abwasser werden Anlagen zur Sammlung und Ableitung von Regen- und Schmutzwasser gebaut und betrieben. Diese Einrichtungen sind nicht nur zu planen und zu bauen, sie müssen auch jederzeit betriebsbereit sein. Dies wird gewährleistet durch Maßnahmen zur Instandhaltung (vgl. [92], [93]). Nach [15] sind unter dem Begriff Instandhaltung sowohl Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Soll-Zustandes als auch zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes zu verstehen, d. h. Wartung, Zustandserfassung und Sanierung. Das DWA-Merkblatt 149-2 aus dem Jahr 2006 [94] beinhaltet als Definition der Zustandserfassung „Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des baulichen/betrieblichen, hydraulischen und umweltrelevanten Ist-Zustandes von Entwässerungssystemen“ und fasst unter dem Begriff Inspektion „Untersuchungen zur Erfassung des baulichen/betrieblichen Zustandes“ zusammen.

Die Inspektion von Kanälen ist eine der wesentlichen Aufgaben der Stadtentwässerung (vgl. [95]). Dabei ist sie nicht nur Grundlage für die Sanierungsplanung, sondern bildet auch einen wesentlichen Prozessbaustein der Bauabnahme (vgl. [15], [24], [29], [95], [96], [97]). In der Regel beinhaltet die Zustandserfassung eine rein optische Inspektion. In Abhängigkeit der Nennweite kommen hierfür TV-Roboter zum Einsatz oder es wird eine Begehung durchgeführt. Weiterführende Informationen zur standardmäßigen Inspektion sind den Literaturquellen [6], [13], [94], [98], [99], [100], [101] zu entnehmen. Die Inspektion der Rohrleitung sowie des umgebenden Bodenkörpers sind mit Hilfe zahlreicher geophysikalischer Verfahren (vgl. [102], [103]) möglich. Zur Verformungsmessung an Abwasserkanälen stehen ebenfalls etablierte Verfahren, wie z. B. Lichtring- und Lasermessverfahren (vgl. [104]) zur Verfügung.

Zur Bau- und Gewährleistungsabnahme von Schlauchlinersanierungen kommen in der Regel die TV-Kamerabefahrung für nicht begehbare Querschnitte und die Inaugenscheinnahme im Zuge der Kanalbegehung bei begehbaren Querschnitten zum Einsatz. Ergänzend werden bei der Bauabnahme durch die standardmäßige Probenentnahme im Schacht und Untersuchung dieser Einzelprobe im Labor stichprobenartig die relevanten Eigenschaften des Liners, wie z. B. der Kurzzeit-E-Modul, die Kurzzeit-Biegespannung, die statisch tragfähige Linerwanddicke und die Dichtheit überprüft. Auf der Grundlage der im Rahmen dieses Vorhabens begleiteten aktuellen Baumaßnahmen und Nachbeprobungen (vgl. Kapitel 6) sowie der Auswertung der zugehörigen Laborergebnisse ist jedoch fraglich, ob diese Vorgehensweise eine hinreichende Beurteilung der jeweiligen Sanierungsmaßnahme erlaubt.

Zum einen ist kritisch zu hinterfragen, ob die gewonnene Einzelprobe im Schacht repräsentativ für die gesamte Sanierungsstrecke ist. Die gesammelten Erfahrungen aus den im Rahmen des Vorhabens begleiteten Baumaßnahmen sowie der IKT-Prüfstelle für Schlauchliner zeigen prägnant, dass die Linerqualität Schwankungen unterworfen ist. Die ermittelten Materialeigenschaften des Liners weisen unabhängig vom Ort der Probenentnahme, wie z. B. im Schacht, in der Haltung und in verschiedenen Querschnittsbereichen, Unterschiede auf, das heißt, die Materialeigenschaften des Liners können stark streuen. Diese Streuungen erstrecken sich dabei sowohl in Längsrichtung als auch über den Querschnitt des Liners. Hierbei ist bisher keine Tendenz hinsichtlich der Größe und Richtung der Streuung auszumachen. Auch für die Hypothese, dass die Standardprobe aufgrund der ungünstigeren Verhältnisse

im Schacht grundsätzlich schlechtere mechanische Kennwerte und damit ein Ergebnis auf der „sicheren Seite“ liefert, wurden Gegenbeispiele aufgeführt.

Zum anderen liefert auch der Einsatz der o. g. Inspektionsverfahren an schlauchlinersanierten Kanälen nur in begrenztem Umfang Aussagen über die Linerqualität. Während optische Auffälligkeiten, wie z. B. Quer- und Längsfalten, Ablösungen der Innenfolie, frei liegende Fasern, Beulen und Wellen im Zuge der Inspektion zwar ggf. erkannt werden können, ist eine Bewertung dieser Auffälligkeiten hinsichtlich eines Einflusses auf die Standsicherheit, Funktionsfähigkeit und Dichtheit des Liners kaum möglich. Insbesondere bleiben die statisch relevanten Eigenschaften des Liners, wie z. B. der E-Modul, die Biegespannung, die Linerwanddicke, ein möglicher Ringspalt sowie Dichtheit des Liners und deren Verteilung in Längsrichtung und über den Querschnitt verborgen.

7.2 Recherche und Auswahl zerstörungsfreier Prüfverfahren

Ein neuer Weg zur Überprüfung des Sanierungsergebnisses ergibt sich durch den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren. Ziel hierbei ist es, mögliche Schwachstellen der Schlauchlinersanierung mit Hilfe von zerstörungsfreien Prüfverfahren zu identifizieren und ggf. gezielt zu beproben und zerstörend zu prüfen.

Zu diesem Zweck wurden durch eine umfangreiche Recherche in der Fachliteratur, im Internet, sowie durch Besuche von Fachveranstaltungen, wie z. B. Messen und Seminare, Kontakte zu Fachinstituten, Anbietern und Dienstleistern von zerstörungsfreien Prüfverfahren geknüpft. Die recherchierten Verfahren werden in der Regel standardmäßig in anderen Fachbereichen, wie z. B. der Biomedizintechnik, der Vermessung im Berg- und Tunnelbau und der Schadensanalyse von großen, gut zugänglichen Bauteilen eingesetzt. Im Rahmen von Besuchen der oben genannten Institutionen im gesamten Bundesgebiet wurde in Fachgesprächen sondiert, ob das jeweilige Verfahren für einen Einsatz an Schlauchlinern in Frage kommen könnte. Die recherchierten zerstörungsfreien Prüfverfahren wurden hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit bzw. Übertragbarkeit auf den hier vorliegenden Anwendungsfall hinterfragt und bewertet und Prüfverfahren für eine weitere Betrachtung ausgewählt bzw. verworfen. Aus der Summe der zusammengestellten Verfahren wurden folgende zerstörungsfreie Prüfverfahren und zugehörige Institutionen für eine erste Untersuchung an Probenmaterial im Labor ausgewählt:

- 3D-Laserscanning (DMT, Essen),
- Temperaturmessung mittels Glasfaserkabeln (OSSCAD, Bergisch Gladbach),
- Wärmefluss-Thermographie (Fraunhofer Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut, Braunschweig),
- Impakt-Echo-Verfahren (Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart),
- Lokale Resonanzspektroskopie (Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart),
- Ultraschall-Echo-Verfahren (Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart),
- Ultraschall-Echo-Verfahren (Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik IBMT, St. Ingbert) und
- Mikrowellen-Verfahren (Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken).

7.3 Voruntersuchungen an Prüfstücken

Zur Abklärung der grundsätzlichen Eignung der ausgewählten zerstörungsfreien Prüfverfahren für den Einsatz an Schlauchlinerprodukten wurden zunächst unterschiedliche Linerproben an die recherchierten Fachinstitute zur Durchführung von Voruntersuchungen verschickt. An den Linerproben aus Nadelfilz und GFK wurde unter Laborbedingungen untersucht, ob die unterschiedlichen Verfahren eine erfolgreiche Überprüfung, wie z. B. eine Detektion von Fehlstellen, eine Wanddickenbestimmung oder 3D-Laser-Vermessung ermöglichen.

Die Laborversuche lassen laut Rückmeldung der beauftragten Fachinstitute den Schluss zu, dass alle ausgewählten zerstörungsfreien Prüfverfahren grundsätzlich an Schlauchlinern eingesetzt werden können. Das Mikrowellen-Verfahren (vgl. [105]) des Fraunhofer Instituts für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) ist jedoch in der derzeitigen vorliegenden Messkonfiguration nicht in einer Vor-Ort-Messung einsetzbar. Für den speziellen Anwendungsfall im Kanal hätte laut Auskunft des IZFP ein Manipulator gebaut werden müssen, der sich an die Krümmung der Rohrwand anpasst. Dies war in der Kürze der Zeit nicht realisierbar. Auf Basis dieser Einschätzung wurde eine weitergehende Untersuchung für sechs der sieben zerstörungsfreien Verfahren im Praxiseinsatz beschlossen.

Die ausgewählten zerstörungsfreien Prüfverfahren wurden bislang nicht im Bereich der Abwasserkanalisation bzw. an Schlauchlinersanierungen entsprechender Netze eingesetzt. Die zur Verfügung stehende Gerätetechnik ist dementsprechend nicht für eine Anwendung unter den spezifischen Verhältnissen im Kanal ausgelegt. Insbesondere erlaubt die Mehrzahl der Prüfverfahren aufgrund der Größe der Gerätetechnik und einer fehlenden Automatisierung keinen Einsatz im nicht begehbaren Bereich. Die Temperaturmessung stellt hier eine Ausnahme dar. Aufgrund einer möglichen Integration des Einziehvorgangs der Glasfaserkabel in die Einbauabläufe des Liners ist in diesem speziellen Fall auch eine Anwendung im nicht begehbaren Bereich möglich.

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Anwendungsgrenzen der Verfahren wurde die Temperaturmessung mittels Glasfaserkabeln für zusätzliche Praxiseinsätze im Rahmen von Schlauchliner-Sanierungen an nicht begehbaren Abwasserkanälen festgelegt (vgl. Kapitel 7.6). Alle anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren wurden ausschließlich unter Praxisbedingungen im begehbaren Bereich (vgl. Kapitel 7.7) getestet.

Die für den Praxiseinsatz ausgewählten zerstörungsfreien Prüfverfahren werden nachfolgend in Kapitel 7.5 hinsichtlich ihrer Arbeitsweise und ihres Messprinzips kurz beschrieben. Die jeweiligen Verfahrensbeschreibungen sind den Fachberichten der Projektpartner und durch die Projektpartner zur Verfügung gestellten Literaturquellen [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [117], und [118] entnommen.

7.4 Entnahme von Linerabschnitten

In der ursprünglichen Projektausrichtung (vgl. [115]) war es geplant für spätere statische Untersuchungen vollständige Linerabschnitte aus in Betrieb befindlichen Schlauchlinerstrecken zu gewinnen. Entsprechend wurden Linerabschnitte z. T. samt Altrohr aus einem nicht begehbaren Bereich in offener Bauweise entnommen. Es handelt sich hierbei um insgesamt zwölf schlauchlinersanierte Kanalabschnitte mit einer Länge von jeweils ca. einem Meter. Diese zwölf Abschnitte unterteilen sich zum einen in sieben glasfasergetragene Schlauchliner, die in Altröhren aus Beton der Nennweite DN 300 verbaut waren (vgl. Abb. 22 a). Dar-

über hinaus wurden zum anderen fünf nadelfilzgetragene Schlauchlinerabschnitte entnommen, die ebenfalls in Betonrohren mit einer Nennweite DN 500 eingebaut waren (vgl. Abb. 22 b).

Zum Ausbau des Altkanals wurde jeweils eine offene Baugrube (ca. 10 m²) bis zum im Erdreich liegenden Kanal hergestellt (vgl. Abb. 22 c und d). Mit der Schaufel eines Baggers wurde der Kanal partiell auseinander gerissen. Die dabei gewonnenen Teilabschnitte von ca. 1 m Länge ohne augenscheinliche Beschädigungen wurden mit der Schaufel geborgen und auf der Straßenoberfläche gelagert. Es konnten somit geeignet erscheinende Linerabschnitte für Untersuchungen einer ggf. noch zu beauftragenden zweiten Projektphase gewonnen werden (vgl. Abb. 22 e und f).



a) Altrohre und Schlauchliner, DN 300, Beton, GFK-UP-Liner



b) Altrohre und Schlauchliner, DN 500, Beton, NF-UP-Liner



c) Ansicht des Baugrubenverbaus



d) Lagerung der Probekörper zum Abtransport im Lieferwagen

Abb. 22: Entnahme von Altlinern und schlauchlinersanierten Altrohren

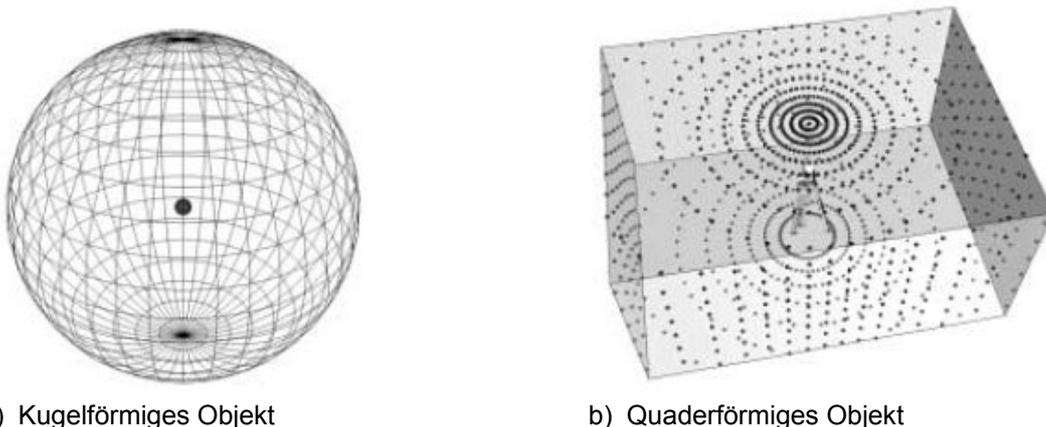
Das Probenmaterial wurde gegen thermische Einflüsse bzw. UV-Licht geschützt gelagert.

7.5 Messverfahren und -methoden

7.5.1 3D-Laserscanning

Zu den klassischen Verfahren zur geometrischen Objekterfassung hat sich nach [106] seit einiger Zeit das terrestrische Laserscanning⁵ etabliert (vgl. [116]). Dabei können Objekte in Lage, Größe und Form automatisch, berührungslos und nahezu vollständig erfasst werden. Das Mess-System liefert eine Punktwolke, in der das Objekt durch eine Vielzahl von Einzelpunkten, bestehend aus dreidimensionalen Koordinaten und einem Intensitätswert, beschrieben wird (man spricht dann vom terrestrischen 4D-Laserscanning). Diese Punktwolken können an einem Computer visualisiert und weiterverarbeitet werden. Im Unterschied zu anderen Messverfahren werden bei der Erfassung mittels Laserscanning die Objekte durch ein regelmäßiges und somit flächenhaftes Raster dokumentiert und nicht, wie sonst üblich, über repräsentative Punkte. Eine Modellbildung erfolgt im post-processing, also im Nachgang zur eigentlichen Messung. Dabei werden aus einer Vielzahl von Objektpunkten mittels Algorithmen geometrische Elemente berechnet.

Bei der 3D-Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern ist die Bestimmung der Koordinaten jedes einzelnen Punktes mit einem Tachymeter vergleichbar (vgl. Abb. 23). Ausgehend vom Scannerstandpunkt werden eine Schrägdistanz sowie Werte für Horizontal- und Vertikalwinkel gemessen. Die Abtastung, d. h. die Ermittlung der Vertikal- bzw. Horizontalwerte kann auf verschiedene Arten erfolgen. Neben einer Abtastung durch Servomotoren, die den Laser bewegen, können durch Servomotoren rotierende Planspiegel oder ein kontinuierlich rotierender Spiegelpolygon eingesetzt werden. Die Hersteller nutzen häufig eine Kombination aus verschiedenen Abtastarten. Zum Beispiel verfügt das Mess-System Zoller+Fröhlich IMAGER 5006 für die Strahlableitung in der vertikalen (primäre Ablenkung) über einen kontinuierlich rotierenden Spiegel und für die Bestimmung der Horizontalwinkel (sekundäre Ablenkung) über einen Servomotor.



a) Kugelförmiges Objekt

b) Quaderförmiges Objekt

Abb. 23: Prinzip des flächenhaften Scannens mittels terrestrischem Laserscanner [106]

Die derzeit auf dem Markt erhältlichen Laserscanner lassen sich nach [107], bedingt durch ihre Bauart, klassifizieren. Entscheidend sind hier die Art der Koordinatenermittlung und das Gesichtsfeld. Die Koordinatenermittlung kann durch reine Winkelmessung (Triangulations-

⁵ Es gibt terrestrisches Laserscanning, bei dem ein Messgerät z. B. vor einem Gebäude installiert und das Objekt damit punktweise abgetastet wird. Daneben gibt es das Luft gestützte Laserscanning Airborne Laserscanning, bei dem die Sensoren in einem Flugzeug oder Hubschrauber installiert werden (vgl. [116]).

verfahren) sowie durch Winkel- und Streckenmessung (Polarverfahren) erfolgen (vgl. Abb. 24).

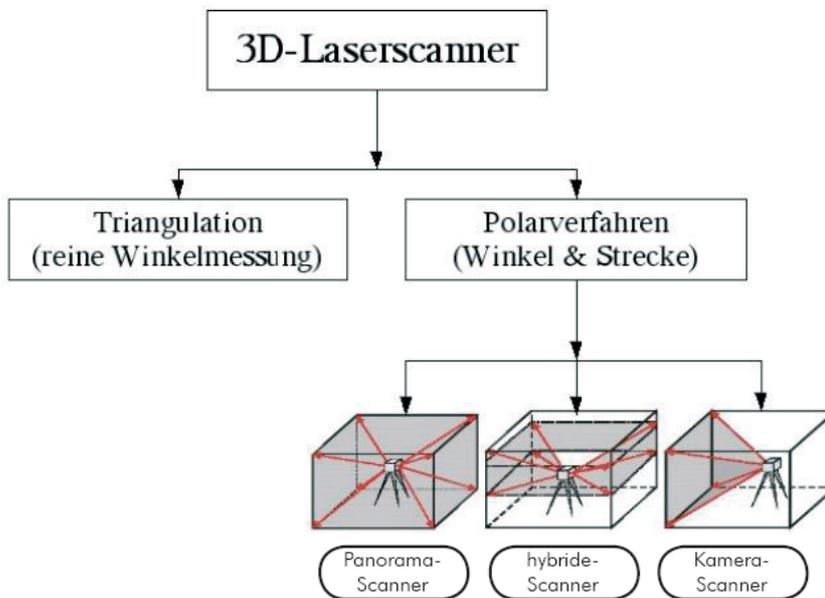


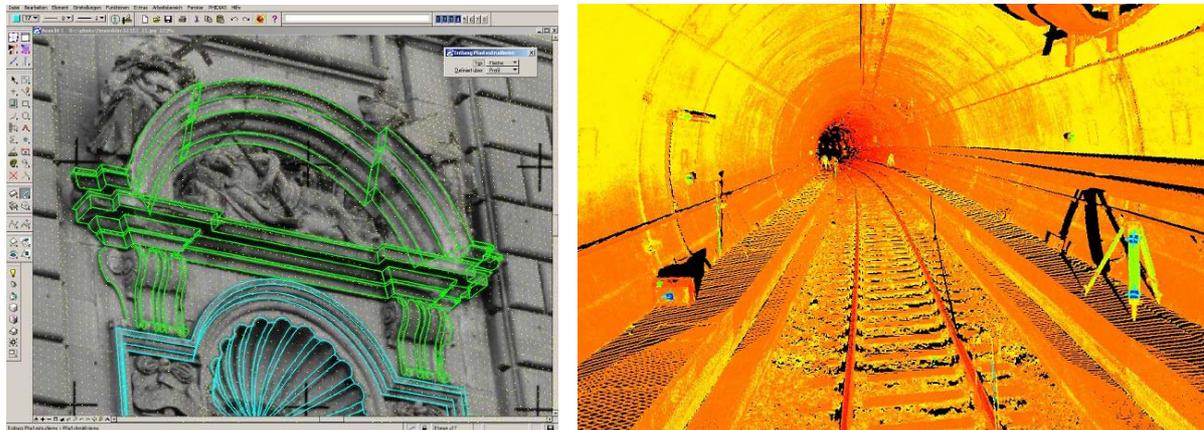
Abb. 24: Klassifizierung von Laserscannern [107]

Die mit dem Polarverfahren arbeitenden Scanner lassen sich nach ihrem Gesichtsfeld weiter einteilen in Kamera-, Panorama- und hybride Scanner. Nachfolgend wird ausschließlich der Panorama-Scanner vorgestellt, der auch im Rahmen des Projektes (vgl. Kapitel 7.7.3) eingesetzt wurde. Das Gesichtsfeld eines Panorama-Scanners (z. B. Z+F Imager 5006) ist nahezu uneingeschränkt (außer direkt unter dem Instrument). Durch einen rotierenden und 45° gegen die horizontale Rotationsachse geneigten Spiegel werden in vertikaler Ebene Profile erfasst. Zudem dreht sich der Scanner um seine eigene Achse, nach einer Rotation um 180° ist ein kompletter 360° Scan erfolgt.

Bei der Distanzmessung kommen je nach Hersteller unterschiedliche Verfahren, wie z. B. das Impulslaufzeit- und das Phasenvergleichsverfahren zum Einsatz. Mit dem Phasenvergleichsverfahren wird die Strecke anhand der Phasendifferenzen der im Anfangspunkt kontinuierlich abgestrahlten und nach Reflexion im Endpunkt wieder empfangenen harmonischen elektromagnetischen Schwingungen bestimmt (vgl. [Deumlich u. Staiger, 2002] in [107]). Die Entfernungsmessung mit dem Phasenvergleichsverfahren erfordert drei Bauteile (Sender, Empfänger und Phasendetektor). Der Sender erzeugt eine sinusförmige elektromagnetische Welle. Nachdem das Signal vom Sender über das Objekt zum Empfänger gelangt ist, hat das Signal in Abhängigkeit von der Länge der Strecke eine Phasenverschiebung erfahren. Die Bestimmung der Strecke wird aus der Anzahl der ganzen Wellen und dem Reststück bestimmt. Im Gegensatz zum Impulslaufzeitverfahren ist die Messrate beim Phasendifferenzverfahren sehr hoch (ca. 500.000 Punkte/s), die Reichweite mit ca. 100 m geringer. Aus dem Grad der Reflexion des Streckenmesssignals bzw. dem Bild einer Digitalkamera ergibt sich der Intensitätswert.

Zur Auswertung und Darstellung der Messergebnisse stehen entsprechende Tools zur Verfügung. Zum Beispiel ermöglichen die Tools Leica Publisher und TruView, der kostenlos von der DMT zur Verfügung gestellt wird, eine Visualisierung über einen Internet Browser. Für eine Nutzung ist lediglich die Übergabe der Ergebnisse aus dem Publisher erforderlich. Die

Handhabung ist einfach und erlaubt aufgrund der nachträglichen Bearbeitungsmöglichkeiten, wie z. B. Einfügen von Bemaßungen, Abgreifen von Koordinaten, Längen und Höhen oder Einfügen von Textbeschreibungen, eine individuelle Auswertung der Messdaten. Insbesondere ist es möglich, die durchgeführten Scans von verschiedenen definierten Standorten aus zu betrachten. Abb. 25 zeigt beispielhaft die Messergebnisse bzw. die Auswertungen von 3D-Laserscannings für zwei Anwendungsfälle aus der Architektur und aus dem Tunnelbau.



a) Anwendung in der Architektur

b) Anwendung im Tunnelbau

Abb. 25: Messergebnisse eines 3D-Laserscannings [117]

Fazit

Das 3D-Laserscanning scheint aufgrund seiner Verfahrensspezifikation für einen Einsatz in begehbaren Abwasserkanälen geeignet. Aufgrund der vielfältigen und detaillierten Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeiten der Messergebnisse könnte das Verfahren ggf. im Rahmen von Schlauchliner-Sanierungsmaßnahmen für die Ist-Aufnahme des Altkanals vor der Sanierung und die Abnahme des Liners nach der Sanierung eingesetzt werden. Beispielsweise könnten die Messinformationen, wie z. B. Querschnittsabweichungen und Verformungen des Kanals bzw. des Liners, für die Konfektionierung des Liners oder die Deformationsanalyse im Nachgang der Sanierung herangezogen werden. Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang die Erkennung und Vermessung von optischen Auffälligkeiten des Liners, wie z. B. von Falten, Wellen und Beulen. Außerdem kann durch Differenzbildung der Messungen vor und nach der Sanierung ggf. der Abstand zwischen der Innenoberfläche des Altrohres und des Liners bestimmt werden. In Kombination mit anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren, die eine Bestimmung der Linerwanddicke ermöglichen, wäre so die Bestimmung von Ringspaltmaßen denkbar.

7.5.2 Temperaturmessung

Im Allgemeinen versteht man unter Temperatursensoren elektronische Bauelemente (Heiß- und Kaltleiter, Thermoelemente etc.), die einen Temperaturwert an einem Ort punktuell messen. Diese punktuell messenden Sensoren sind allerdings für die Messung eines räumlichen Temperaturprofils mit hunderten von Messstellen nicht praktikabel. Eine Möglichkeit bietet die Infrarotmessung, die die emittierte, temperaturabhängige Wärmestrahlung eines Körpers misst.

Eine neue, innovative Messtechnik ist die faseroptische Raman Temperaturmessung (engl. DTS für Distributed Temperature Sensing). Als Messwertempfänger dient eine Quarzglasfa-

ser, die in Form eines robusten Lichtwellenleiterkabels ausgeführt ist. Mit Hilfe von Laserlicht in Kombination mit einem optischen Radar kann das räumliche Temperaturbild auch von im Betriebszustand nicht zugänglichen Messobjekten gemessen werden.

Das Messsystem besteht aus einem optoelektronischen Gerät (Radar) und einem Lichtwellenleiter-Kabel (LWL-Kabel) als linienförmiger Temperatursensor. Das Radar arbeitet mit Laserlicht, welches in das Sensorkabel eingekoppelt wird. Wärmeeinwirkungen am Sensorkabel bewirken thermische Molekülschwingungen innerhalb des Glasfasermaterials, die zu einer Lichtstreuung (Raman-Streuung) des Laserlichtes führen. Ein Teil dieser Raman-Streuung wird von der Glasfaser zum Auswertegerät zurückgeführt und mit Hilfe von Photodetektoren in ein elektrisches Signal gewandelt. Da die Lichtintensität des Raman-Streulichtes proportional zur thermischen Molekülschwingung ist, kann die Temperatur des Glasfaserkabels berechnet werden. Den zugehörigen Temperaturmessort erhält man nach dem Prinzip optischer Rückstreuungsmessverfahren (engl. Optical Time Domain Reflectometry). Aus der Laufzeitdifferenz zwischen dem Aussenden und dem Empfang optischer Impulse wird der Einwirkungsort der Temperatur ermittelt.

DTS-Geräte der neusten Generation arbeiten mit Pulsaserdioden der Laserklasse 1M und stellen keine Gefährdung für Mensch und Umwelt dar. Diese Gerätetechnik ermöglicht es, die Temperatur entlang einer Faserstrecke bis zu 8 km Länge lückenlos, mit einer örtlichen Auflösung bis zu 0,5 m, einer Messzeit zwischen 10 s und 60 s und einer Temperaturgenauigkeit von etwa 1 K (abhängig von Messzeit und Reichweite) zu messen. Per Visualisierungssoftware können die Temperaturwerte in ein thermographisches Bild (Temperatur als Funktion des Messortes und der Messzeit) überführt und dem Messobjekt zugeordnet werden. Bei einem LWL-Kabel mit einer Länge von z. B. 500 m können bis zu 1.000 Messpunkte entlang der Verlegeanordnung erfasst werden. In Kombination mit der Visualisierungssoftware kann das räumliche Temperaturprofil des Messobjektes in Echtzeit abgebildet werden. Zusätzlich bieten DTS-Geräte die Möglichkeit, bis zu vier Sensorkabel an das Auswertegerät anzuschließen. Intern befindet sich ein mikrooptischer Schalter, der das Laserlicht nacheinander auf die verschiedenen Sensorkabel (Messkanäle) koppelt. Bei einer Messzeit von z. B. 30 s pro Messkanal beträgt die Gesamtmesszeit pro Messzyklus (bei vier Messkanälen) 2 Minuten. Die DTS-Messtechnik hat sich in den letzten Jahren in verschiedenen Branchen und Applikationen etabliert. In der Energietechnik kann z. B. der thermische Belastungszustand von Hochspannungskabeln überwacht werden. Faseroptische Temperatursensoren ermöglichen die Leckageüberwachung über große Reichweiten entlang von Öl-, Gas- und Fernwärmeleitungen oder bei der Brandmeldung die schnelle und zuverlässige Alarmierung von Brandereignissen [109].

Fazit

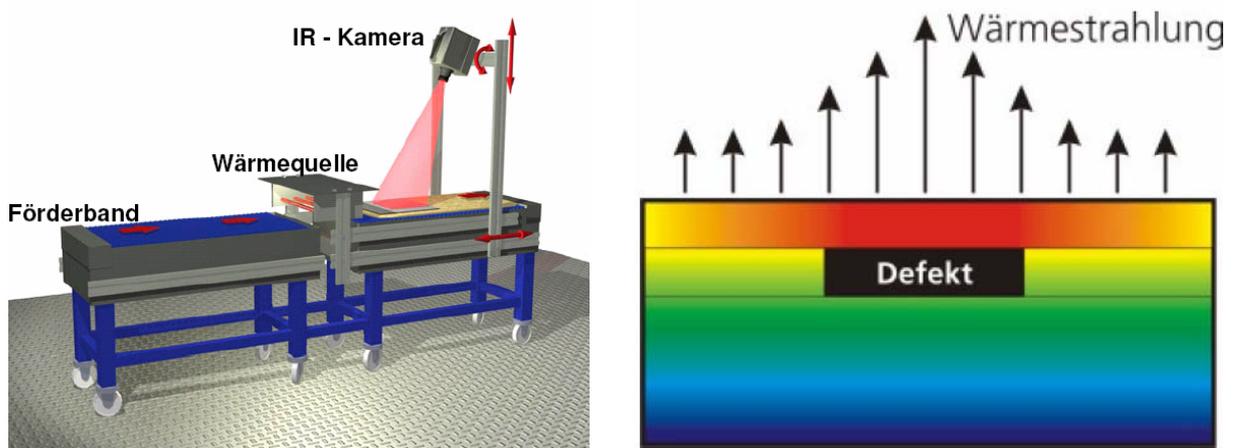
Die Temperaturmessung mittels Glasfaserkabeln liefert einen viel versprechenden Ansatz für eine mögliche Kontrolle und Steuerung des Härtungsvorgangs von Linern. Durch Einzug von Glasfaserkabeln in Haltungslängsrichtung in verschiedenen Querschnittspositionen, wie z. B. Scheitel und Sohle, erscheint es möglich, den zeitlichen und örtlichen Verlauf der Temperatur bei der Härtung des Liners über eine oder mehrere Haltungslängen online zu messen und aufzuzeichnen. Das Verfahren könnte somit eine sinnvolle Erweiterung und Ergänzung der punktuellen, standardmäßigen Temperaturmessung im Schacht zur Kontrolle des Aushärtungsvorgangs durch die Sanierungsfirmen darstellen. Außerdem könnten die Messdaten im

Nachgang der Sanierung ggf. auch zu einer Erkennung und Auswahl von Schwachstellen des Liners für eine gezielte Beprobung und zerstörende Prüfung herangezogen werden.

7.5.3 Wärmefluss-Thermographie

Die Wärmefluss-Thermographie ist eine Prüfmethode (vgl. [110]), mit der von außen nicht sichtbare Fehlstellen sichtbar gemacht werden können. Dazu werden durch den Herstellungsprozess bedingte oder von außen induzierte Wärmeflüsse im Prüfobjekt ausgenutzt, die sich an Fehlstellen anders verhalten als in fehlerfreien Bereichen. Diese Unterschiede im Wärmefluss spiegeln sich in der Temperaturverteilung an der Oberfläche der Prüfobjekte wider. Mit einer Thermographie-Kamera (Wärmebildkamera) kann man diese Temperaturverteilung und damit die Fehlstellen sichtbar machen. Da es sich um ein bildgebendes Verfahren handelt, können viele bewährte Verfahren der klassischen Bildverarbeitung für eine automatische Fehlererkennung übernommen werden.

Als aktives Thermographieverfahren wird (vgl. [111]) vor allem die sogenannte Wärmefluss- oder Online-Thermographie eingesetzt. Hierbei werden die Messobjekte mit einem Wärmeimpuls möglichst homogen erwärmt, der bei geeigneten Materialeigenschaften (Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) Temperaturunterschiede an defekten Bereichen des Werkstücks hervorruft, die dann im Thermographiebild nachgewiesen werden können. Der Wärmeimpuls kann in vielen Fällen dadurch erzeugt werden, dass die Objekte auf einem Förderband unter einem Heizstrahler hindurch bewegt werden. Anschließend wird die Abkühlungsphase mit einer Thermographiekamera beobachtet (vgl. Abb. 26 a). Falls sich bei dem Untersuchungsmaterial Defekte, wie z. B. Luftblasen oder Fremdkörper, unter der Oberfläche befinden, durch die der Wärmefluss in die Tiefe behindert ist, so zeichnen sich diese Bereiche auf der Oberfläche in der Regel durch eine lokal höhere Temperatur ab. Diese werden als sogenannte „Hot Spots“ bezeichnet (vgl. Abb. 26 b).



a) Schematischer Versuchsaufbau zur Online-Thermographie

b) Wärmestrahlung bei Probe mit einem Defekt

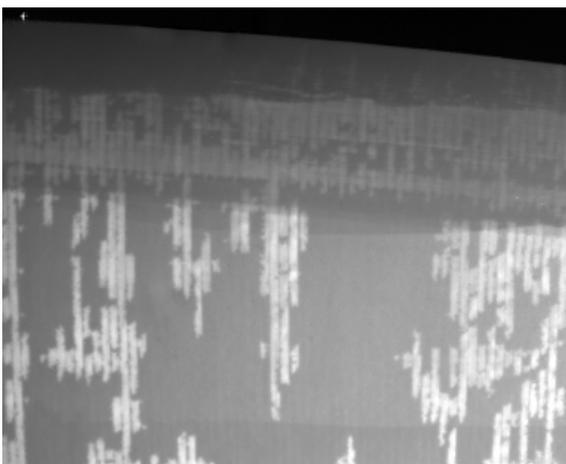
Abb. 26: Messprinzip der Wärmefluss-Thermographie [111]

Mit der Förderbandgeschwindigkeit bzw. der Erwärmungszeit werden die eingebrachte Wärmemenge und damit die Eindringtiefe des Verfahrens bestimmt, die materialabhängig bis zu wenigen Zentimetern betragen kann. Da die in das Material eindringende und an den Defekten teilweise reflektierte Wärmefront je nach der Tiefenlage der Defekte eine bestimmte Zeit benötigt, kann durch den Abstand der Kamera zur Wärmequelle der Kontrast der Wärmebilder optimiert werden.

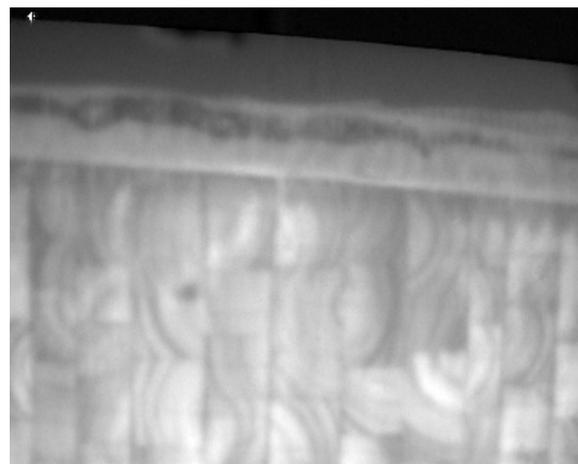
Die Wärmefluss-Thermographie wird bereits standardmäßig zur Detektion von Fehlstellen an Rotorblättern aus GFK für Windkraftanlagen eingesetzt (vgl. Abb. 27). Abb. 28 zeigt beispielhaft die an einem Rotorblatt aus GFK visualisierten inneren, versteifenden Strukturen sowie geschwächte Bereiche verursacht durch Lufteinschlüsse.



Abb. 27: Prüfung eines Rotorblattes mittels Wärmefluss-Thermographie [118]



a) Wärmebild unmittelbar nach Erwärmung zeigt Lufteinschlüsse



b) Wärmebild nach 5 Minuten zeigt versteifende Strukturen

Abb. 28: Aufzeichnung des Abkühlvorgangs an einem Rotorblatt aus GFK [118]

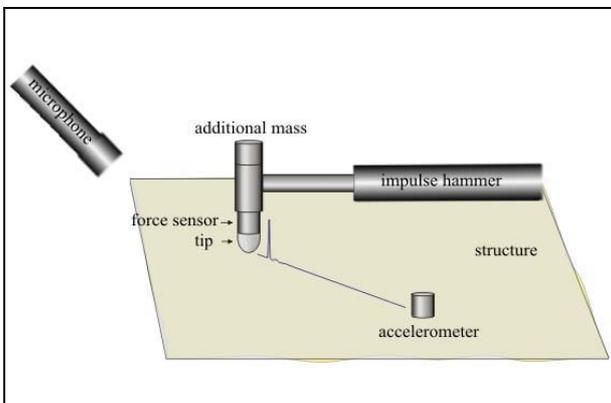
Fazit

Die Wärmefluss-Thermographie wird bereits standardmäßig in der Qualitätssicherung von Rotorblättern aus GFK für Windkraftanlagen eingesetzt. Mit dieser Methode können unzureichende Harztränkungen, Delaminationen, Hohlstellen und andere Materialfehler an Rotorblättern aus GFK detektiert werden. Die Ähnlichkeit des untersuchten Faserverbundwerkstoffs mit den Schlauchlinerprodukten legt die Vermutung nahe, dass die Wärmefluss-Thermographie auch für den Einsatz an Schlauchlinern mit Trägermaterialien bestehend aus Polyester-Synthesefasern oder Glasfasern geeignet sein könnte. Eine zerstörungsfreie Prüfung von begehbaren Schlauchlinern und Identifikation von Schwachstellen mit Hilfe der Wärmefluss-Thermographie erscheint somit möglich.

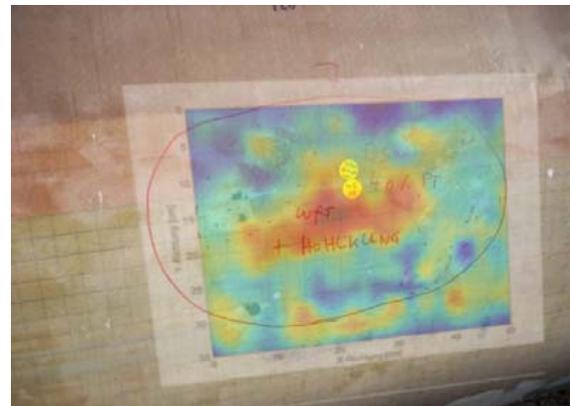
7.5.4 Lokale Resonanzspektroskopie

Die lokale Resonanzspektroskopie orientiert sich (vgl. [112]) an manuellen Klopfprüfungen (z. B. Coin-Tapping-Tests), die u. a. in der Luft- und Raumfahrt angewandt werden. Das Bauteil wird mit einem geeigneten Gegenstand abgeklopft und der dadurch angeregte Klang bewertet. Diese Verfahren sind meist sehr einfach manuell durchführbar (vgl. Abb. 29 a).

Wird ein Objekt von außen einmalig zum Schwingen angeregt, so schwingt es in seinen Eigenfrequenzen, die von Struktur und Geometrie abhängen. In der Fertigungstechnik von Metall- und Keramikbauteilen können so fehlerhafte Werkstücke schnell aussortiert werden. Die lokale Resonanzspektroskopie funktioniert ähnlich. Der Unterschied ist, dass die zu untersuchenden Bauteile in der Regel größer sind und nur lokal in der Gegend der Klanganregung schwingen. Das Verfahren reagiert sensitiv auf Schädigungen, die sich in unmittelbarer Nähe der Klanganregung befinden und erlaubt so eine Lokalisierung von Schädigungen.



a) Messprinzip



b) Ergebnisse der Auswertung der Anregungssignale auf einer Delamination in GFK

Abb. 29: Lokale Resonanzspektroskopie [112]

Der durch einen Hammer-Impakt erzeugte Klang ändert sich, wenn sich das Anregungssignal des Hammers ändert. Da die Eigenschaften des Hammers von einem Messpunkt zum nächsten gleich bleiben, sind Änderungen in der Form des Anregungssignals auf strukturelle Änderungen im Innern des zu untersuchenden Bauteils zurückzuführen. Im Fall von oberflächennahen Delaminationen in mehrschichtig aufgebauten Bauteilen, kommt es zu einer Verlängerung der Kontaktzeit des Hammers mit der Oberfläche, da die Delamination durch den Hammer zusammengedrückt wird, bevor dieser zurückfedert. Diese veränderte Kontaktsteifigkeit führt zur Anregung anderer Frequenzen als im ungeschädigten Bauteil, die sich in einer Klangänderung widerspiegeln. Diese Klangänderung ist sowohl hörbar als auch über eine Frequenzanalyse der mit einem Mikrofon aufgezeichneten Signale messbar.

Eine Aufzeichnung des Anregungssignals des Hammers über einen Kraftaufnehmer erlaubt eine Auswertung der Kontaktzeit und liefert zusätzliche Informationen über die Struktur des Bauteils. In Abb. 29 b sind die Halbwertsbreiten der Anregungen auf einem delaminierten GFK-Bauteil dargestellt. Die Delamination zeigt sich als roter Bereich mit verlängerten Kontaktzeiten.

Das Verfahren eignet sich vor allem für die Detektion und Lokalisierung von Delaminationen in mehrschichtigen dickeren Bauteilen, die flach unter der Oberfläche liegen. Die Sensitivität des Verfahrens nimmt für Delaminationen in größerer Tiefe ab.

Fazit

Die lokale Resonanzspektroskopie erlaubt eine Lokalisierung von Schädigungen in Bauteilen. Insbesondere in mehrschichtigen Bauteilen ist abhängig von der Tiefenlage eine Detektion von Delaminationen und strukturellen Änderungen möglich. Dieses Prüfverfahren wird bereits standardmäßig zur Schadenserkennung an Schicht-Bauteilen aus GFK, wie z. B. Rotorblättern von Windkraftanlagen, eingesetzt. Es erscheint möglich, mit Hilfe der lokalen Resonanzspektroskopie in begehbaren Querschnitten schlauchlinersanierter Haltungen Stellen mit veränderter bzw. geschwächter Struktur zu identifizieren.

7.5.5 Ultraschall-Echo-Verfahren

Das Ultraschall-Echo-Verfahren ist (vgl. [112]) ein etabliertes Verfahren in vielen Industriezweigen. Ein Ultraschallimpuls wird von einem geeigneten Sensor in das zu untersuchende Material übertragen. Die Ultraschallwellen breiten sich im Material aus und werden an Materialübergängen (Impedanzänderung) reflektiert. Die Reflexionen werden auf der gleichen Seite des Materials vom selben oder einem zweiten Sensor wieder aufgenommen (vgl. Abb. 30).

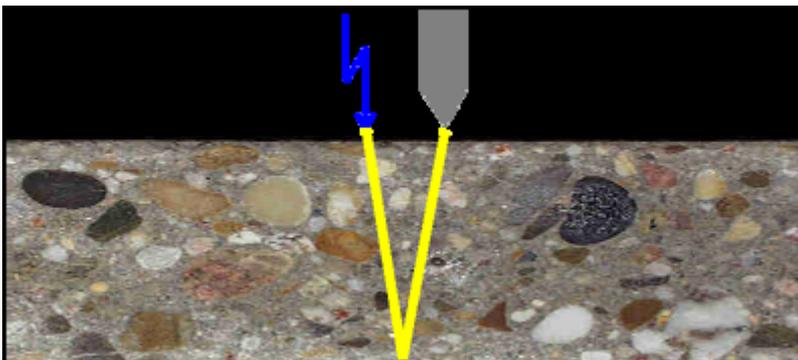


Abb. 30: Messprinzip Ultraschall-Echo-Verfahren [112]

Aus der Laufzeit der reflektierten Wellen kann, bei bekannter Schallgeschwindigkeit im Material, die Tiefe von Materialübergängen überprüft werden. Bei unbekannter, jedoch einheitlicher Schallgeschwindigkeit des Materials kann eine Dickenänderung durch den Vergleich benachbarter Punkte registriert werden.

Beim Verbund von zwei unterschiedlichen Materialien hängt die Stärke des Echos davon ab, wie stark die Materialien sich in ihren akustischen Eigenschaften unterscheiden. Sehr stark sind die Unterschiede zwischen Festkörpern und Luft. Delaminationen zeigen sich demzufolge als besonders starke Reflexionen.

Fazit

Das Ultraschall-Echo-Verfahren wird zur Bestimmung von Wanddicken unterschiedlicher Materialien eingesetzt. Vorrangig kommt dieses Verfahren bislang an Werkstoffen mit relativ gleichmäßigen Strukturen, wie z. B. Metall oder Betonbauteilen zur Anwendung. Auch an Verbundwerkstoffen, wie z. B. GFK wird das Verfahren bereits erfolgreich eingesetzt. Es erscheint möglich, das Ultraschall-Echo-Verfahren in begehbaren Querschnitten ebenfalls zur Wanddickenbestimmung von Schlauchlinern mit schichtartigem Aufbau einzusetzen.

7.5.6 Impakt-Echo-Verfahren

Das Impakt-Echo-Verfahren ist (vgl. [112]) eine Mischung aus den bereits vorgestellten Verfahren der lokalen Resonanzspektroskopie und des Ultraschall-Echo-Verfahrens. Die Anregung von Ultraschallwellen erfolgt über einen Impakt mit einem Hammer oder einer Stahlkugel. Im Gegensatz zur lokalen Resonanzspektroskopie wird hier der Körperschall mit Hilfe eines piezoelektrischen Sensors aufgezeichnet. In homogenen Schichten bilden sich durch mehrfach reflektierte Wellen Resonanzen aus, die mit der Schichtdicke korrespondieren.

Die Datenauswertung erfolgt im Frequenzbereich. Durch Ermittlung der Resonanzfrequenzen kann über die Formel in Abb. 31 auf die Bauteildicke geschlossen werden, sofern die Kompressionswellen-Geschwindigkeit bekannt ist oder separat gemessen werden kann.

Das Verfahren findet derzeit vor allem im Bauwesen zur Bestimmung der Minderdicken von Tunnelinnenschalen Anwendung, eignet sich aber in der Regel erst für Bauteildicken von mehr als 10 cm.

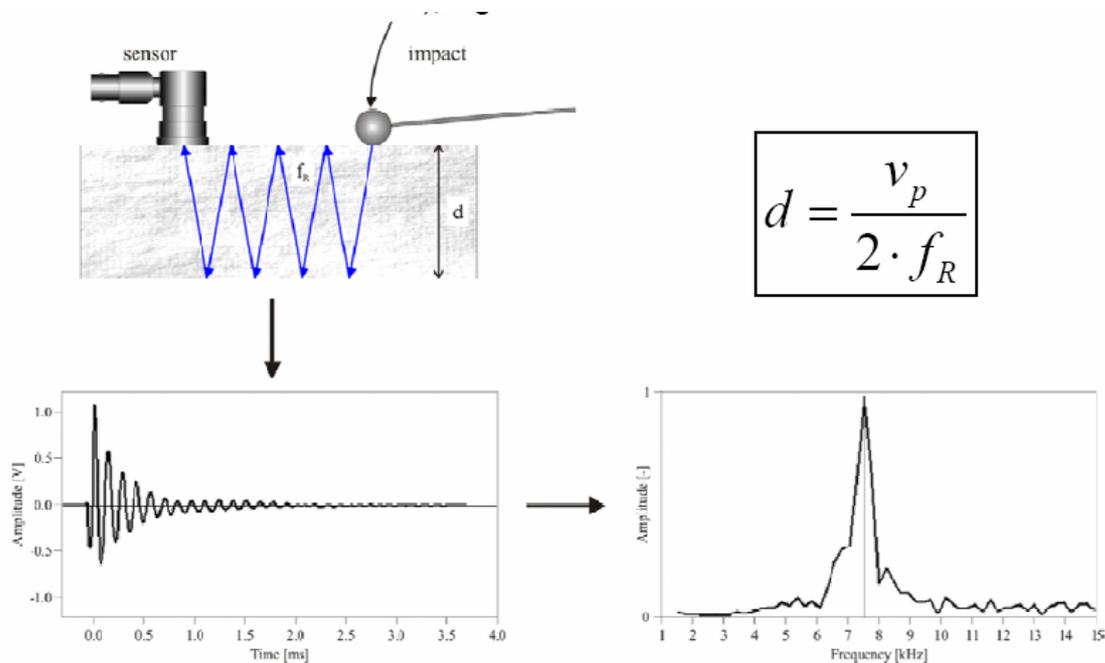


Abb. 31: Messprinzip Impakt-Echo-Verfahren [113]

Fazit

Das Impakt-Echo-Verfahren ermöglicht als eine Mischung aus der lokalen Resonanzspektroskopie und des Ultraschall-Echo-Verfahrens eine Lokalisierung von Fehlstellen und eine Wanddickenbestimmung an Bauteilen. Bislang kommt dieses Verfahren vornehmlich bei der Schadensanalyse von dicken Betonbauteilen zur Anwendung. Es erscheint jedoch möglich, das Impakt-Echo-Verfahren in begehbaren Querschnitten zur Schadensdetektion und Wanddickenbestimmung an Schlauchlinern einzusetzen.

7.6 Temperaturmessung in linersanierten, nicht begehbaren Prüfstrecken

7.6.1 Aufgabenstellung

Schlauchliner härten durch Zugabe von Energie in Form von Licht oder Wärme (Wasserdampf oder Warmwasser) aus. Der dabei entstehende Temperaturanstieg des Liners wird in der Regel von der ausführenden Firma stichprobenartig gemessen und für die Überwachung des Härtungsprozesses des Liners herangezogen. Diese Messungen werden bei warmhärtenden Linersystemen derzeit zumeist punktuell (z. B. in Schachtnähe) durchgeführt. Die Dokumentation der Messdaten erfolgt an einzelnen Messstellen (Anfangs- und Endschacht, Heißwasserzulauf) kontinuierlich und an Zwischenschächten in zeitlichen Abständen von ca. 30 bis 60 Minuten. Bei UV-härtenden Linersystemen sind in der Regel einzelne punktuelle Temperatursensoren an der Lichterkette angeordnet.

Die Anwendung der faseroptischen Temperaturmessung bei Schlauchlinersanierungen liefert neue Perspektiven. Ziel dieses Messverfahrens ist es, kontinuierlich den Härtungsprozess über die gesamte Haltungslänge während der Einbauphase zu überwachen und zu dokumentieren.

Um die grundsätzliche Eignung dieses optischen Messverfahrens für den beschriebenen Anwendungsfall zu untersuchen, wurden drei Sanierungen begleitet. In den Kanalnetzen der Städte Köln (2007 und 2008) und Recklinghausen (2008) wurden die Sanierungen mit UV-härtendem Glasfaser-Liner und warmwasserhärtendem Nadelfilz-Liner messtechnisch begleitet. Neben der Querschnittsform konnten dabei auch die Nennweite bzw. Querschnittshöhe, der Linertyp, das Härtungsverfahren, die Art des Linereinbaus und die Anzahl der eingesetzten Sensorkabel im Querschnitt variiert werden (vgl. Tab. 13). Die beiden Messeinsätze im nicht begehbaren Bereich werden in den nachfolgenden Kapiteln 7.6.2 und 7.6.3, der Einsatz im begehbaren Bereich in Kapitel 7.7.4 dargestellt.

Tab. 13: Übersicht über die durchgeführten Temperaturmessungen

Ort der Sanierung	Datum	Querschnitt	Linertyp	Härtung/ Einbau	Sensorenzahl im Querschnitt
Niederländer Ufer Köln	19.11.2007	Kreisprofil DN 300	GFK-Liner Saertex	UV Einzug	2
Lülfstraße Recklinghausen	17.04.2008	Kreisprofil DN 500	Nadelfilz-Liner Insituform	Warmwasser Inversion	2
Schnurgasse Köln	25.-28.11.2008	Eiprofil B/H 1000/1500	Nadelfilz-Liner Insituform	Warmwasser Inversion	6

7.6.2 Einsatz an einem UV-härtenden GFK-Liner

Untersuchungsobjekt

Der erste Testeinsatz der Temperaturmessung an Linern mit Hilfe von Glasfaserkabeln fand in Köln im November 2007 statt. Bei diesem Einsatz sollte zunächst grundsätzlich untersucht werden, ob der Einbau einzelner Sensorkabel im Zuge des Linereinbaus möglich ist und ob diese dann Temperaturmesswerte liefern. Als einzelne Sensorkabel wurden zum einen ein Glasfaserkabel als gerade Stichleitung im Scheitel, zum anderen ein in Schlaufen gelegtes Glasfaserkabel (Sensormatte) in der Sohle in die Haltung eingebracht.

In Zusammenarbeit mit den Stadtentwässerungsbetrieben Köln wurde die Temperaturmessung während der UV-Erhärtungsphase eines Liners durchgeführt. Die Sanierung am Niederländer Ufer fand am 19.11.2007 durch die Firma Frisch und Faust aus Berlin in einem Nachteinsatz statt. Zur Sanierung des Altrohres aus Steinzeug der Nennweite DN 350 mit Altrohrzustand III kam ein UV-härtender GFK-Liner der Firma Saertex mit einer Wanddicke von 5 mm zum Einsatz. In die zu sanierende Haltung mit einer Länge von ca. 59 m münden insgesamt 8 seitliche Zuläufe. Der Startschacht der Sanierungsstrecke liegt im Straßenbereich, der Zielschacht im Bereich des Gehwegs (vgl. Abb. 32).



a) Startschacht



b) Zielschacht

Abb. 32: Einstiegsschächte der Sanierungsstrecke

Messanordnung

Der Lichtwellenleiter (Temperatursensor) für den Sohlbereich wurde in eine Glasfasermatte gebettet, die mit einem LWL-Stecker konfektioniert wurde. Als Schutz für die faseroptische Zuleitung an die Glasfasermatte wurde der Lichtwellenleiter in einen etwa 8 m langen Schutzschlauch mit ca. 8 mm Durchmesser gebettet. Der Lichtwellenleiter (vgl. Abb. 33 a) wurde zunächst geradlinig entlang der Matte verlegt und am Mattenende in Rückwärtsrichtung schlaufenförmig zurückgeführt. Mit der schlaufenförmigen Anordnung des Sensorkabels konnte die Ortsauflösung der Messmethode von 1 m auf 0,25 m erhöht werden.



a) Schlaufenanordnung im Sohlbereich



b) Anordnung als Stichleitung im Scheitelbereich

Abb. 33: Eingesetzte Temperaturmesskabel

Im Vorfeld des Linereinzugs wurde das Temperaturmesskabel in Scheitellage mit Hilfe von Klebeband in Abständen von ca. 2 m am Liner fixiert (vgl. Abb. 33 b). Der Lichtwellenleiter

(Temperatursensor) befand sich innerhalb einer Hohlader aus einem Edelstahlröhrchen, die Hohlader wurde mit einem speziellen Mantel auf 4 mm Außendurchmesser verstärkt.

Das Temperaturmessgerät befand sich während der Messdurchführung in der Nähe des Startschachtes. Von dort aus erfolgte die faseroptische Verbindung (Stichleitung) zu den beiden Sensorkabeln im Sohl- und Scheitelpbereich. Die beiden Messkabel in Scheitel und Sohle wurden am Zielschacht mittels LWL-Stecker zu einer Stichleitung verbunden. Die Gesamtlänge des Sensorkabels betrug ca. 342 m, wovon 282 m als Vorlauf und 60 m im Kanal vom Start- zum Zielschacht gegen Fließrichtung für die Scheitelmessung am Liner verwendet wurden.

Durchführung

Nach Abschluss der vorbereitenden Kanalreinigung wurde mit Hilfe der Reinigungsdüse ein Zugseil vom Ziel- in Richtung Startschacht transportiert. An diesem Zugseil wurde die Schutz- bzw. Gleitfolie befestigt und händisch in Fließrichtung des Kanals eingezogen, an der wiederum das Temperaturmesskabel in Form einer Sensormatte für die Rohrsohle angebracht war. Das Messelement lag somit unter der Schutzfolie und wurde gemeinsam mit der Folie in den Startschacht eingeführt und Richtung Zielschacht gezogen.

Der Liner wurde von der Firma Saertex konfektioniert und getränkt auf die Baustelle geliefert. Mittels Zugseil wurde der Liner vom Ziel- zum Startschacht gegen die Fließrichtung eingezogen. Zum Aufstellen des Liners mit Druckluft von ca. 600 mbar wurden die Enden des Liners mit Packern verschlossen. Der zur Messung vorbereitete Liner wurde von einem Arbeiter am Zielschacht in die Haltung eingeführt und mit einer elektrischen Winde in die Haltung eingezogen. Der Einzug verlief augenscheinlich weitestgehend ohne Probleme und Störungen. Unmittelbar vor Erreichen des Startschachtes war im Gerinne ein Verdrehen der Gleitfolie zu erkennen.

Nach Anschluss der Messtechnik an die Messwerterfassung wurde die Lichterkette (vgl. Abb. 34) aus acht Lampen à 400 Watt in die Haltung eingeführt und händisch Richtung Zielschacht bewegt. Am Ende der Haltung angekommen, wurden die Lichter gezündet und die Lichterkette nun automatisch in Richtung Startschacht zurückgezogen. Die Lichterkette wurde mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,6 Metern pro Minute gezogen, so dass der gesamte Aushärtevorgang des Liners nach ca. 2 Stunden abgeschlossen war.



a) Ansicht im Schacht



b) Bergung aus dem Schacht

Abb. 34: Lichterkette zur UV-Härtung des Liners

Über die Dauer des Härtungsvorgangs wurden die Temperaturen entlang der Glasfaserkabel im Scheitel und in der Sohle messtechnisch erfasst und aufgezeichnet. Zusätzlich wurde durch die Einbaufirma die Temperatur an der Lichterkette gemessen. Während der Aushärtung wurden an der ca. 1,5 m langen Lichterkette permanent vier Temperaturmesswerte aufgenommen. Zu diesem Zweck sind drei Temperatursensoren zwischen den einzelnen Leuchtelementen angeordnet. Der vierte Sensor misst die Temperatur am Ende der Lichterkette. Die gemessenen Temperaturen liegen bei etwa 30 °C am ersten Sensor, 80 °C am zweiten Sensor, 50 °C am dritten und 30 °C am letzten Sensor. Nach Ankunft der Lichterkette am Startschacht wurden der Packer sowie die übrige Gerätetechnik aus der Haltung geborgen. Abschließend wurde der Liner im Bereich der Hausanschlüsse sowie der Schächte geöffnet.

Messergebnisse

Der erste Testeinsatz von Glasfaserkabeln zur Temperaturmessung an Linern konnte erfolgreich durchgeführt werden. Ein Einbau des Sensorkabels im Scheitel und der Sensormatte in der Sohle konnte im Zuge des Einzugs der Schutzfolie bzw. des Liners realisiert werden. Das Sensorkabel im Rohrscheitel lieferte über die gesamte Haltungslänge, die handgefertigte Sensormatte in der Rohrsohle über ca. 50 % der Haltungslänge verwertbare Temperaturmesswerte. Die Messausfälle in der Sensormatte wurden durch ein seitliches Verrutschen der Glasfasermatte beim Einziehvorgang der Schutzfolie verursacht. Beim anschließenden Einzug und Aufstellen des Liners mit Druckluft wurde die Glasfasermatte gequetscht und das Sensorkabel an den ungeschützten Stellen durchtrennt.

Abb. 35 und Abb. 36 zeigen den örtlichen Temperaturverlauf entlang der Haltung zu Beginn und am Ende des Aushärtungsvorgangs mit UV-Licht. Während der Härtungsdauer des Liners konnte die Bewegung der Lichterkette in der Haltung über die Temperaturmessung verfolgt werden. Zusätzlich konnte mit den verbleibenden Sensorkabeln in Sohle und Scheitel eine Erwärmung des Liners gemessen werden. Die aus der Temperaturverteilung (vgl. Abb. 36) zu entnehmenden Tiefpunkte der Messkurve sind möglicherweise auf kaltes Regenwasser zurückzuführen, das sich während der Härtungsphase in den Seiteneinläufen staute und auf den Liner einwirkte.

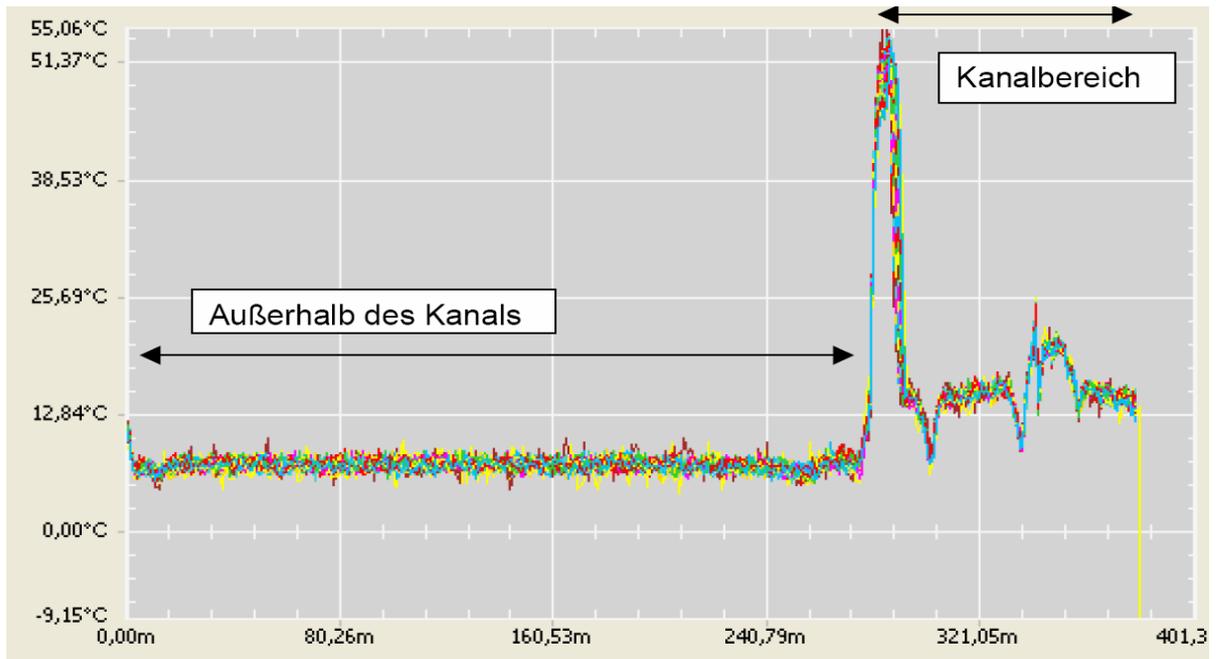


Abb. 35: Örtlicher Temperaturverlauf zu Beginn der UV-Aushärtung

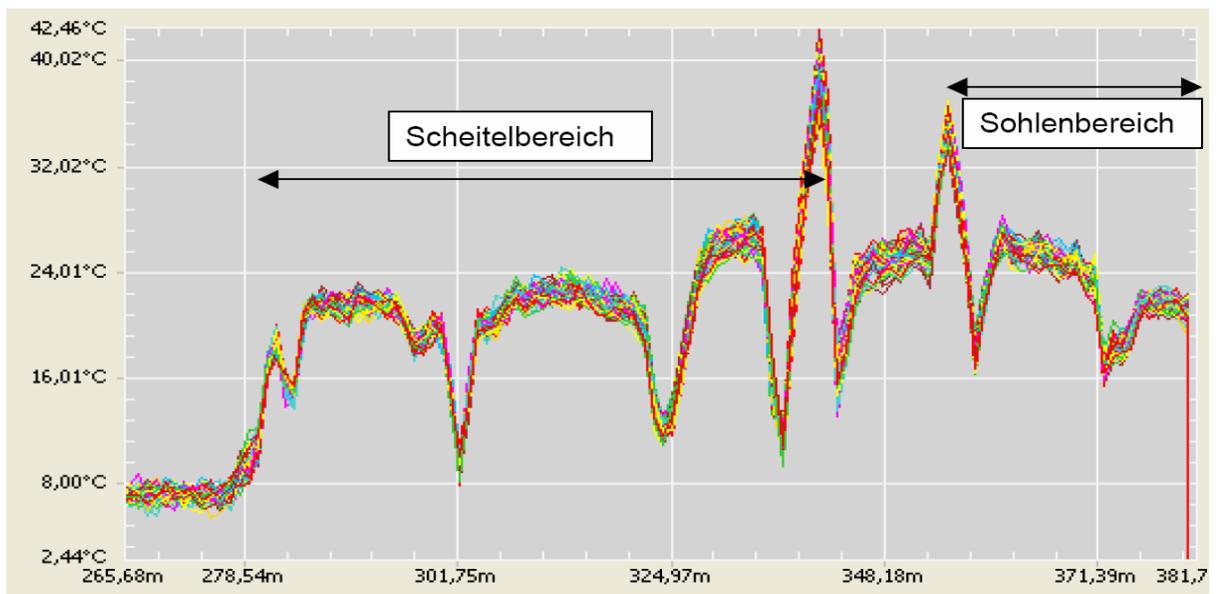


Abb. 36: Örtlicher Temperaturverlauf am Ende der UV-Aushärtung [119]

7.6.3 Einsatz an einem warmwasserhärtenden Nadelfilz-Liner

Untersuchungsobjekt

In Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt der Stadt Recklinghausen, der Insituform Rohr-
sanierungstechniken GmbH und der OSSCAD GmbH & Co. KG wurden am 17. April 2008 im
Zuge einer Schlauchlinersanierung Temperaturmessungen mit Hilfe von Glasfaserkabeln
durchgeführt.

Die Baumaßnahme in der Lülffstraße im Ortsteil Recklinghausen-Suderwich umfasste sechs
Haltungen eines Mischwassersammlers mit einer Länge von insgesamt ca. 300 m. Als
Schlauchliner wurde ein Insituform-Nadelfilz-Liner mit Warmwasserhärtung und einer Wand-
dicke von ca. 9 mm gewählt. Von den zu sanierenden Kanalabschnitten aus Betonrohren mit
Kreisprofil der Nennweite DN 500 wurden zwei aneinandergrenzende Haltungen mit einer
Gesamtlänge von ca. 100 m für die Temperaturmessung ausgewählt. Tab. 14 stellt die we-
sentlichen Kenndaten der Sanierungsmaßnahme in einer Übersicht dar.

Tab. 14: Baumaßnahme Recklinghausen „Lülffstraße“, Kenndaten der Baumaßnahme

Baumaßnahme	Einbaudatum	Altrohr	Nennweite	Beanspruchung	Einbaulänge
Recklinghausen, Lülffstraße	17. April 2008	Beton MW-System	DN 500 Kreisprofil	Keine Verkehrs- last; Kanal ver- läuft unter Bür- gersteig	ca. 300 m
Linerhersteller	Anwender	Trägermaterial	Harztyp	Installation	Härtung
Insituform Rohr- sanierungstechni- ken GmbH	Insituform Rohr- sanierungstechni- ken GmbH	Nadelfilz	UP	eine Inversion über ca. 300 m	Warmwasser

Ausgehend vom mittleren Schachtbauwerk (2590) wurden gemäß Abb. 37 pro angrenzende
Haltung jeweils zwei Messkabel geradlinig in Rohrsohle und Rohrscheitel zwischen Preliner
und Liner installiert. An diesem Schacht wurde auch die Messwerterfassung einschließlich
Messrechner positioniert. Die beschriebene Messanordnung wurde gewählt, um durch sepa-
rate, voneinander unabhängige Stichleitungen sicherzustellen, dass auch bei Fehlern oder
Störungen in einem Messkabel weiterhin Messdaten aus jeder Haltung erfasst werden kön-
nen.

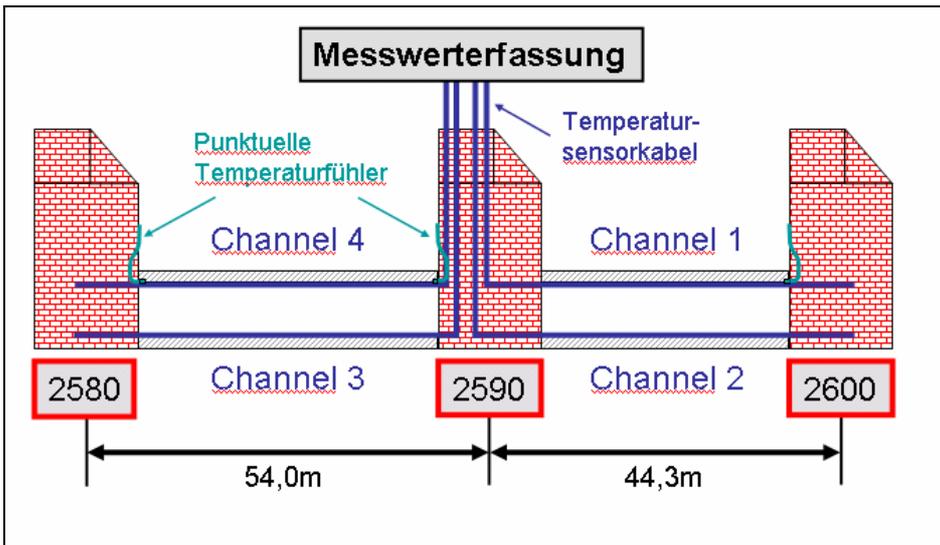


Abb. 37: Skizze zur Anordnung der Messtechnik für die Temperaturmessung

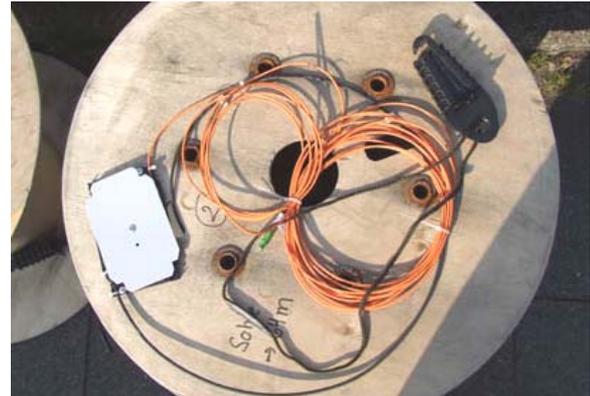
Die vier in die Haltungen einzubringenden Messkabel wurden im Vorfeld der Sanierungsmaßnahme auf die erforderlichen Längen zugeschnitten, mit den Anschlüssen zum Messrechner versehen und zur Vereinfachung der Handhabung auf der Baustelle jeweils einzeln auf Trommeln aufgewickelt. Vorbereitend wurden Haken an den Schachtwänden angebracht, um an diesen die Messkabel für die Scheitellage mit Hilfe von Spannklemmen zu fixieren. Abb. 38 stellt die zur Temperaturmessung eingesetzte Ausrüstung dar.

Mit Inversion des Preliners (vgl. Abb. 39) per Luftdruck wurden zwei Hilfsseile in die zu sanierenden Haltungen eingebracht, die später zum Einzug der Messkabel in die Haltungen genutzt wurden. Die Hilfsseile wurden im Messschacht (2590) durch Aufschneiden des Preliners geborgen und durchtrennt. Anschließend wurde an jedem der freien Enden ein Messkabel fixiert. Durch Einholen der Hilfsseile wurden die Messkabel händisch vom Messschacht zum Anfangs- bzw. Endschacht der Messstrecke eingezogen. Die komplette Installation einschließlich aller Vorbereitungsarbeiten dauerte ungefähr 2 Stunden.

Unmittelbar nach Abschluss der Installation der Messkabel wurde mit dem Einbau des Nadel filz-Liners und der Temperaturmessung begonnen (vgl. Abb. 40). Der Liner wurde mit einem Wasserdruck von ca. 0,5 – 0,7 bar invertiert. Das Aufheizen des Prozesswassers auf 80 °C dauerte ca. 5,5 Stunden. Mit einer Aushärtezeit von ca. 4 Stunden und einer Abkühlzeit von ungefähr 4,5 Stunden war der Einbauvorgang des Liners nach insgesamt 14 Stunden abgeschlossen. Die Temperatur wurde über die gesamte Prozessdauer in 2-Minuten-Abständen online gemessen und mit Hilfe des Messrechners aufgezeichnet.



a) Aufgetrommelte Messkabel



b) Anschluss an der Kabeltrommel zum Messrechner



c) Klemme zum Abspannen der Kabel im Scheitel



d) Begleitfahrzeug mit Messrechner

Abb. 38: Ausrüstung zur Temperaturmessung

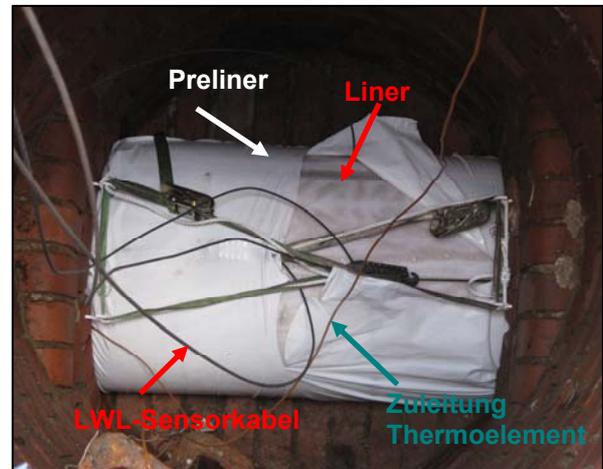


Abb. 39: Einbau des Preliners und der Hilfsseile

Zum Vergleich der Messergebnisse wurde - parallel zur innovativen Temperaturmessung mit Lichtwellenleiter-Kabeln über die gesamte Haltungslänge - eine standardmäßige, punktuelle Temperaturkontrolle durch den Linerhersteller⁶ mittels Thermoelementen im Bereich der

⁶ Die Fa. Insituform Rohrsanierungstechniken GmbH ist sowohl der Linerhersteller als auch der bauausführende Dienstleister.

Schächte durchgeführt. Die Thermoelemente wurden zwischen Preliner und Altrohr in unmittelbarer Nähe des jeweiligen Schachtes im Scheitelbereich der Haltung positioniert (vgl. Abb. 37). Während der Härtingsphase wurde die Temperatur stündlich gemessen (vgl. Tab. 15).



a) Positionierung der Messkabel im Scheitel und in der Sohle

b) Fixierung der Messkabel im Schacht 2590

Abb. 40: Anordnung der Messkabel

Tab. 15: Temperaturwerte der Thermoelemente im Bereich der Schächte [120]

Uhrzeit / Messzeit	Kesseltemperatur		Schacht 2580	Schacht 2590	Schacht 2600
	Vorlauf	Rücklauf	T _{Thermoelement}	T _{Thermoelement}	T _{Thermoelement}
1:00 / 632 min	90,0 °C	83,0 °C	60 °C	58 °C	60 °C
2:00 / 692 min	90,0 °C	84,0 °C	62 °C	60 °C	62 °C
3:00 / 752 min	90,0 °C	84,0 °C	65 °C	62 °C	64 °C
4:00 / 812 min	90,0 °C	84,0 °C	67 °C	64 °C	66 °C
5:00 / 872 min	90,0 °C	84,0 °C	68 °C	65 °C	67 °C

Ergebnisse der Temperaturmessung

Während der Dauer der Messkampagne konnte über die gesamte Strecke von ca. 100 m und über den gesamten Zeitraum von 14 Stunden die Temperatur in Abhängigkeit des Messortes und -zeitpunktes erfolgreich erfasst und aufgezeichnet werden. Abb. 41 stellt die gemessenen Temperaturen bzw. Temperaturverläufe in den Haltungen 2580-2590-2600 grafisch dar.

Abb. 41 Ia bis IVa zeigen für jedes Messkabel die Überlagerung aller in 2-Minuten-Intervallen gemessenen Temperaturverläufe in Abhängigkeit des Messortes. Auf der x-Achse ist jeweils der Messort, auf der y-Achse die gemessene Temperatur aufgetragen. Mit einer Messdauer von ca. 14 Stunden und 2-Minuten-Messintervallen umfasst jede Schar ungefähr 420 Temperaturkurven. Jede einzelne Temperaturkurve beschreibt die gemessenen Temperaturen an jedem Messort der Haltung zu einem ausgewählten Zeitpunkt. Der Kurvenschar ist insbesondere zu entnehmen, welche Maximal-Temperaturen an unterschiedlichen Messorten erreicht wurden.

Abb. 41 Ib bis IVb zeigen für jede der vier Sticleitungen die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung (x-Achse: Zeitpunkt, y-Achse: Ort). Die Temperaturwerte werden in verschiedenen Farben (RGB-Farben) von blau (kalt) zu rot (heiß) dargestellt. Die Darstellungsform des räumlichen thermographischen Bildes (Temperaturbild) ermöglicht es, für jeden Messort die erreichte Temperatur und ihre zugehörige Wirkungsdauer abzulesen. Temperatur und Dauer sind Indikatoren für die eingebrachte Energie während des Härtungsvorgangs und gleichzeitig wesentliche Einflussgrößen für die Härtung eines Liners. Die 15 Temperaturwerte der standardmäßigen, punktuellen Temperaturmessung sind entsprechend ihres Messortes und Messzeitpunktes in den thermographischen Bildern des jeweiligen Scheitelbereiches dargestellt (vgl. Abb. 41 Ib-IVb).

Haltung 2590-2600 (rechte Haltung)

In Abb. 41 Ia ist zu erkennen, dass die gemessenen Maximaltemperaturen im Scheitel (Umhüllende der Kurvenschar) über die Haltungslänge schwanken. Sie liegen zwischen 66 °C und 73 °C. Darüber hinaus zeigt Abb. 41 Ib, dass die Temperatur sowohl in Abhängigkeit des Ortes als auch des Zeitpunktes variiert. Es sind Bereiche in der Haltung zu identifizieren, in denen das maximale Temperaturniveau (roter Bereich) länger andauert als in anderen Bereichen.

In Abb. 41 IIa ist zu erkennen, dass in der Sohle Schwankungen der Maximaltemperatur zwischen 57 °C und 71 °C vorliegen und somit stärker ausfallen als im Scheitelbereich (s. o.). Wiederum sind in Abb. 41 IIb Bereiche mit unterschiedlich hohen Temperaturniveaus und Wirkungsauern zu erkennen.

In der betrachteten Haltung 2590 – 2600 treten um ca. 2 °C höhere Maximaltemperaturen im Scheitel auf als in der Sohle. Als Ursache ist zu vermuten, dass heißes Wasser erwartungsgemäß nach oben steigt und sich im Scheitelbereich sammelt. Außerdem liegt die Schwankungsbreite der Maximaltemperaturen mit 14 °C im Vergleich zu 7 °C im Sohlbereich doppelt so hoch wie im Scheitelbereich.

Der Vergleich von Abb. 41 Ib und Abb. 41 IIb verdeutlicht anhand der Farbverteilung (stärker ausgeprägte Rot-Bereiche in Abb. 41 Ib), dass im Scheitelbereich tendenziell höhere Temperaturen erreicht wurden als im Sohlbereich und dieses Niveau auch über längere Zeit gehalten werden konnte.

Haltung 2580-2590 (linke Haltung)

Ähnliche Beobachtungen, wie oben beschrieben, gelten auch für die Haltung 2580 – 2590. In Abb. 41 IIIa und Abb. 41 IVa ist zu erkennen, dass die gemessenen Maximaltemperaturen im Scheitel und in der Sohle wiederum über die Haltungslänge schwanken. Sie liegen zwischen 61 °C und 70 °C in der Sohle sowie 59 °C und 71 °C im Scheitel.

Darüber hinaus zeigen Abb. 41 IIIb und Abb. 41 IVb, dass die Temperatur sowohl in Abhängigkeit des Ortes als auch des Zeitpunktes variiert. Es sind jeweils Stationen zu erkennen, in denen das maximale Temperaturniveau (roter Bereich) länger andauert als in anderen Bereichen.

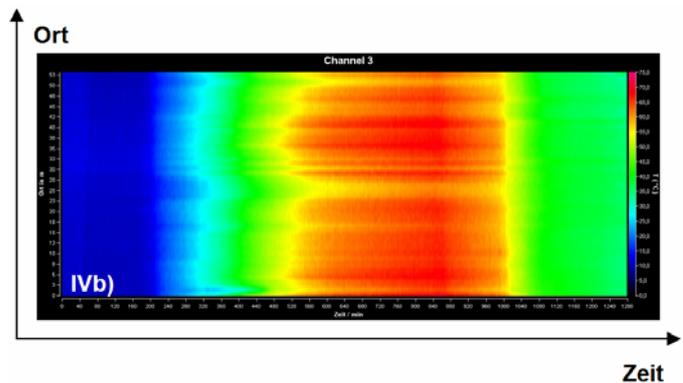
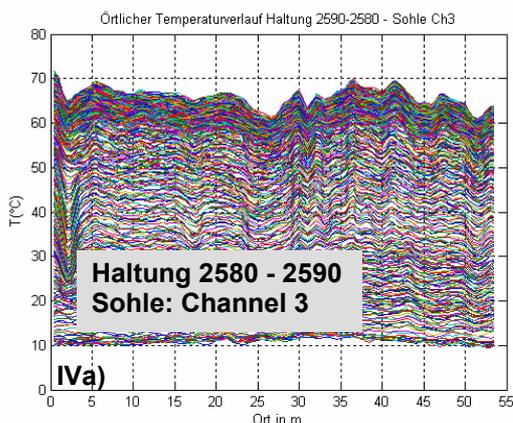
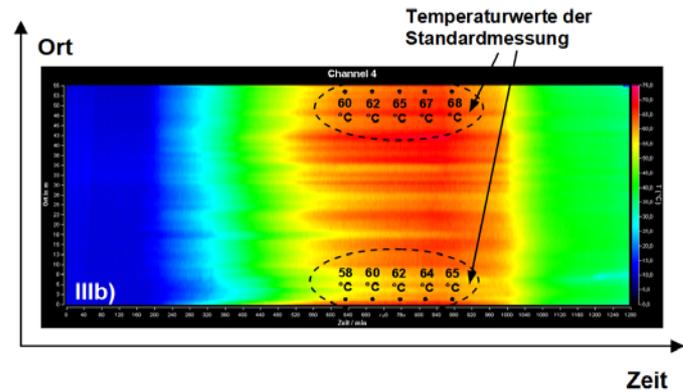
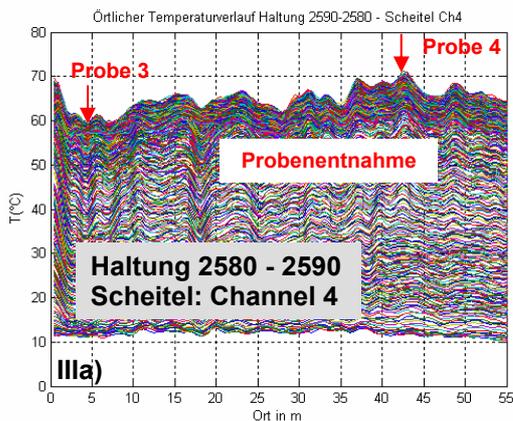
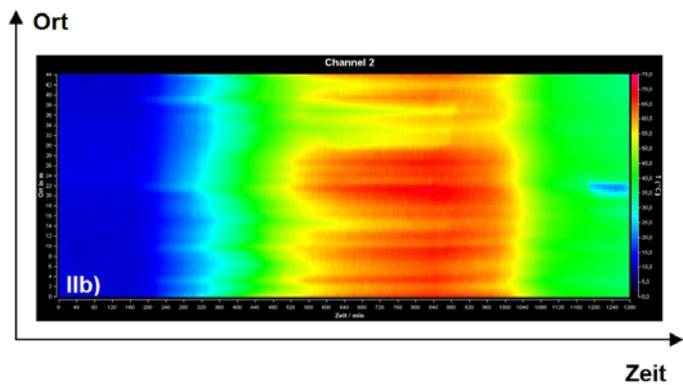
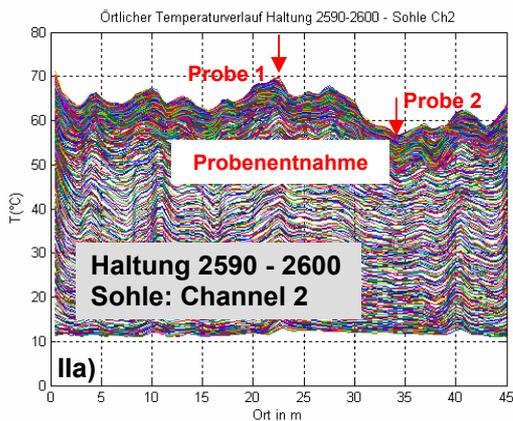
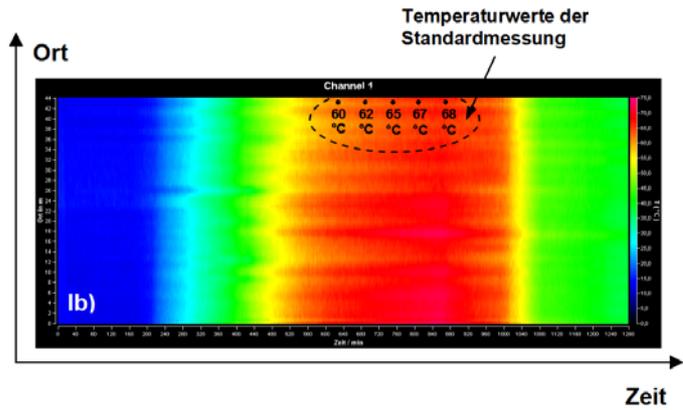
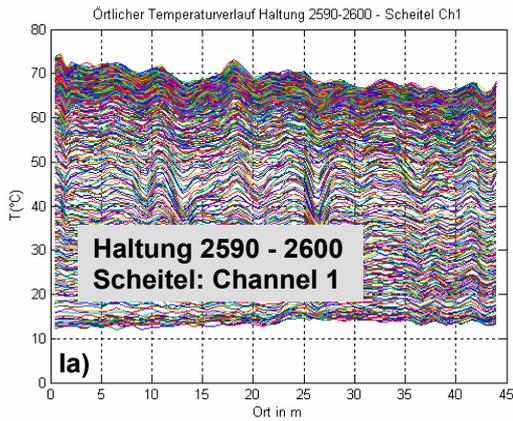


Abb. 41: Ergebnisse der Temperaturmessung [121]

I-IVa) Überlagerung aller in 2-Minuten-Intervallen gemessenen Temperaturverläufe in Abhängigkeit des Messortes über eine Messdauer von ca. 14 Stunden
 I-IVb) Darstellung der gemessenen Temperatur in Abhängigkeit von Messort und -zeitpunkt sowie der Werte (mit Ort und Zeit) der Standard-Temperaturmessung

In der Haltung 2580-2590 weist der Scheitel um ca. 1 °C niedrigere Maximaltemperaturen auf als die Sohle. Die Schwankungsbreiten der Maximaltemperaturen liegen mit 9 °C in der Sohle und 12 °C im Scheitel in einer ähnlichen Größenordnung. Im Vergleich der Temperaturbilder (Abb. 41 IIIb und Abb. 41 IVb) fällt bei Betrachtung verschiedener Stationen auf, dass die maximale Temperatur nicht in allen Fällen im Scheitel aufgetreten ist. Als Ursache kommen z. B. Umwälzvorgänge innerhalb des Prozesswassers, die Sohlage der an verschiedenen Stationen platzierten Auslassöffnungen für das heiße Wasser sowie Abweichungen in den Altrohr-Bedingungen in Frage.

Bei Gegenüberstellung der gemessenen Temperaturen konnte festgestellt werden, dass die Messwerte der Temperaturmessung im Scheitelbereich und der standardmäßigen, punktuellen Temperaturmessung des Linerherstellers im Schacht (vgl. Abb. 41 Ib und IIIb) innerhalb ähnlicher Größenordnungen liegen.

Laut Angaben des Linerherstellers (vgl. [122]) liegen die auftretenden Schwankungen entlang der Haltung bei der Warmwasser-Härtung innerhalb zulässiger Toleranzen und stellen kein Problem für die Linerqualität dar. Demnach wurden keine das Material schädigenden Temperaturen von über 140 °C gemessen. Für die ordnungsgemäße Härtung des Liners sind laut Herstellerangaben Temperaturen gemäß Qualitätsmanagement-Handbuch von über 50 °C zu erreichen. Nach Mitteilung des Linerherstellers sind in diesem Handbuch Systemvorgaben zu Härtungszeiten gestaffelt nach den tatsächlich erreichten Temperaturen vorgegeben. Diese Soll-Temperaturen und Soll-Härtungszeiten seien bei dieser Sanierungsmaßnahme in allen Messpunkten erreicht und überschritten worden. Entsprechende Hinweise auf die erreichte Qualität des Liners liefern auch die Ergebnisse der Laborprüfungen an den entnommenen Materialproben (vgl. Abschnitt Nachbeprobung).

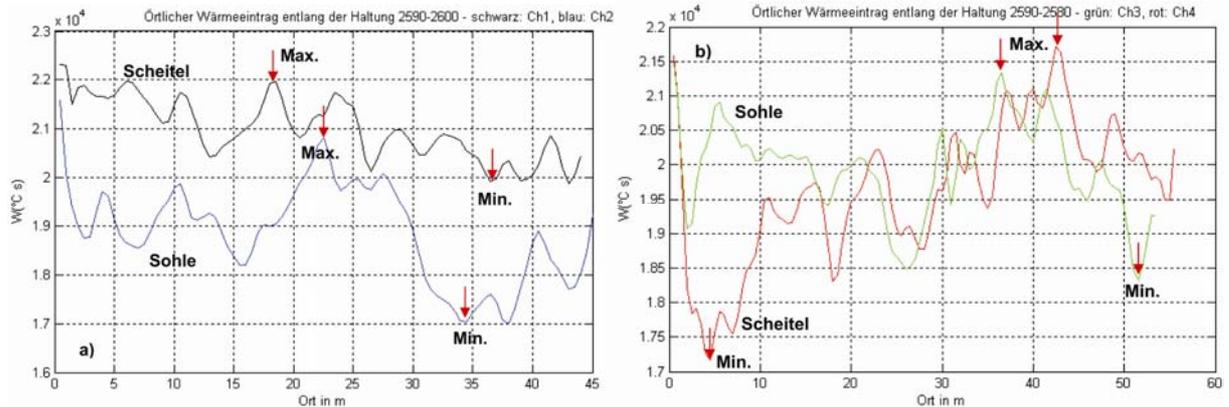
Nachbeprobung

Um einen möglichen Einfluss der ungleichmäßigen Temperaturverteilung auf die Härtung sowie die Dichtheit und die mechanischen Kennwerte des Liners zu untersuchen, wurden ausgewählte Stellen in der Haltung beprobt.

Auswahl der Probestellen anhand des Wärmeeintrages

Für die Auswahl der Probenentnahmestellen wurde der Wärmeeintrag – also das Produkt aus Temperatur und Zeit – ausgewertet. Abb. 42 stellt für beide Kanalabschnitte den Wärmeeintrag im Scheitel- und Sohlbereich über die Haltungslänge dar. Da im Wesentlichen der qualitative Verlauf des Wärmeeintrags für die Bestimmung der Hoch- und Tiefpunkte von Interesse ist, wurde das zugrunde gelegte Zeitintervall der Messung vereinfachend zu 1 normiert. Der tatsächliche örtliche Wärmeeintrag ergibt sich durch Multiplikation des jeweiligen Funktionswertes mit der Einbaudauer von 14 Stunden (50.400 Sekunden).

In Abb. 42 sind für jeden Messkanal die Maxima und Minima des örtlichen Wärmeeintrags gekennzeichnet. Anhand Abb. 42a ist zu erkennen, dass der Wärmeeintrag entlang der Haltung 2590 – 2600 im Scheitel stets höher ist als in der Sohle. Dieses war aufgrund der etwas höheren Maximaltemperaturen im Scheitelbereich auch zu erwarten. Der Ort des geringsten Wärmeeintrags liegt in der Sohle (Channel 2) ca. 34 m vom Schacht 2590 entfernt. Der größte Wärmeeintrag in der Sohle tritt in einer Entfernung von ca. 22 m von Schacht 2590 auf.



a) Haltung 2590-2600, Messwerte aus Scheitel und Sohle (Channel 1 und 2)

b) Haltung 2580-2590, Messwerte aus Sohle und Scheitel (Channel 3 und 4)

Abb. 42: Wärmeeintrag über die Haltungslänge für die Einbaudauer von 14 Stunden [121]

Entlang der Haltung 2580-2590 ist der Wärmeeintrag im Scheitelbereich gemäß Abb. 42 b nicht stets höher als der Wärmeeintrag im Sohlbereich. Im vorderen Kanalabschnitt bis etwa 15 m besitzt der Scheitel im Vergleich zur Sohle einen deutlich kleineren Wärmeeintrag. Der Wärmeeintrag ist im Scheitel in ca. 5 m Entfernung vom Schacht 2590 am geringsten. Das Maximum des Wärmeeintrags im Scheitel findet in einem Abstand von ca. 42 m vom Schacht 2590 statt.

Auf der Basis der Auswertung der Temperaturmessdaten wurden aufgrund der großen Abweichungen zwischen maximalem und minimalem Wärmeeintrag in den jeweiligen Funktionskurven für die Probenentnahme vier Stationen gemäß Tab. 16 ausgewählt. Die unterschiedlichen Entfernungen der Probeentnahmestelle 4 und der Stelle der gemessenen Maximaltemperatur zum Messschacht 2590 von 39 m bzw. 42 m ergeben sich aufgrund der Lageabweichung des Messkabels im Scheitel. Aufgrund der horizontalen und vertikalen Lageabweichung des Messkabels (Durchhängen bzw. seitliche Verschiebung) wies das Messkabel eine ca. 3 m größere Länge als die Haltung auf. Dieser Fehler wurde bei der Auswahl der Probeentnahmestelle berücksichtigt und dementsprechend der Ort der Probeentnahme um ca. 3 m in Richtung Messschacht verschoben.

Tab. 16: Ausgewählte Probenentnahmestellen in den Haltungen 2580-2590-2600

Probe	Haltung	Lage	Channel	Entfernung von 2590
1	2590-2600	Sohle	2	21,5 m
2	2590-2600	Sohle	2	34,0m
3	2580-2590	Scheitel	4	5,0 m
4	2580-2590	Scheitel	4	39,0 m

Am 07.08.2008 wurden von einer Fachfirma an den o. g. vier Stellen (vgl. Abb. 43) mit ermitteltem größtem und geringstem Wärmeeintrag Linerproben entnommen und die Probenentnahme durch das IKT begleitet.

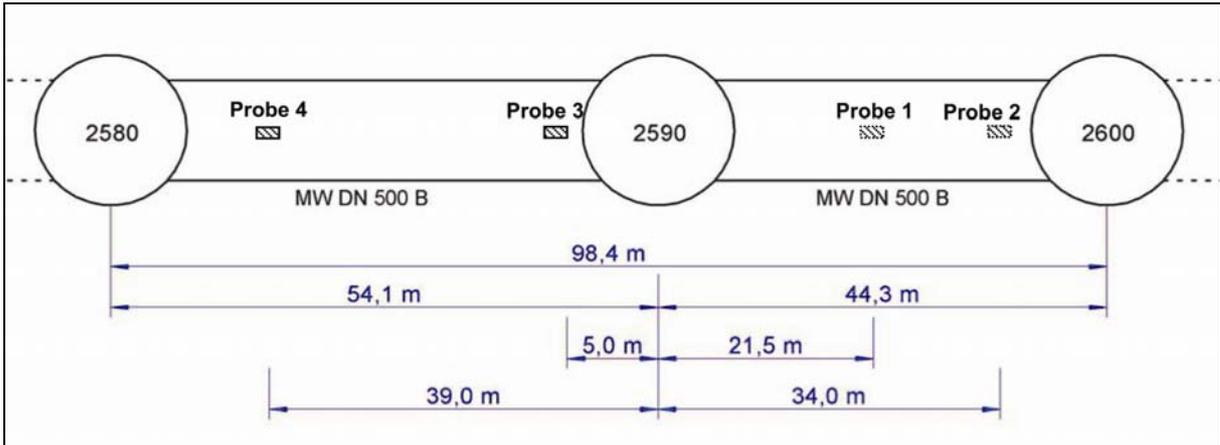


Abb. 43: Entnahmestellen der Proben in den betrachteten Haltungen (2580-2590-2600)

Die Entnahmestellen wurden im Anschluss unter Einsatz eines Robotersystems mit einem Zwei-Komponenten-EP-Harz wieder verschlossen. An den gewonnenen Probestücken wurden durch die IKT-Prüfstelle die mechanischen Kennwerte und die Dichtheit im Labor überprüft. Tab. 17 stellt die Ergebnisse der Laborprüfungen an den entnommenen Proben dar.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Laborprüfungen gegenübergestellt. Probe 1 weist einen größeren E-Modul und eine größere Biegespannung auf als Probe 2. Allerdings fällt die Wanddicke bei Probe 1 geringer aus als für Probe 2. Beide Proben erfüllen gleichermaßen das Dichtheitskriterium nach APS-Prüfrichtlinie [48]. Probe 3 ist im Gegensatz zur Probe 4 undicht, weist aber höhere mechanische Kennwerte bei einer geringeren Wanddicke auf.

Die Laborergebnisse zeigen, dass in diesem Beispiel kein Zusammenhang zwischen dem Wärmeeintrag bzw. der Temperatur und den Laborergebnissen nach Tab. 17 zu erkennen ist (Anm.: Temperaturen und Härtingszeiten lagen nach Herstellerangaben innerhalb der Vorgaben). Neben der Härtung, die mit Hilfe des örtlichen Wärmeeintrags, der Temperaturmesswerte und deren zeitlichen Verläufen abgeschätzt werden kann, beeinflussen auch noch weitere Faktoren, wie z. B. die Harztränkung oder die Wanddicke, die Dichtheit des Liners oder den E-Modul und die Biegespannung.

Tab. 17: Ergebnisse der Laborprüfungen der BM „Lülfstraße“ in Recklinghausen

Probenbezeichnung	Dichtheit nach APS-Prüfrichtlinie	E-Modul Kurzzeit [MPa]	Biegespannung Kurzzeit [MPa]	Wanddicke [mm]
Sollwerte	dicht	2.800	28,00	7,2
Haltung 2590 nach 2600				
Probe 1, Sohle $T \approx 70^\circ\text{C}$	dicht	3.772	34,96	7,52
Probe 2, Sohle $T \approx 57^\circ\text{C}$	dicht	3.377	31,76	7,87
Haltung 2590 nach 2580				
Probe 3, Scheitel $T \approx 59^\circ\text{C}$	undicht	3.603	37,29	7,97
Probe 4, Scheitel $T \approx 72^\circ\text{C}$	dicht	3.386	34,86	8,25

Fazit und Ausblick

Der Testeinsatz im Kanalnetz der Stadt Recklinghausen beim Einbau von Schlauchlinern ist als erfolgreich zu bewerten. Die eingesetzten Sensorkabel lieferten über die gesamte Länge während der kompletten Erhärtungsphase verwertbare Messergebnisse. Im Zuge der Temperaturmessung konnten ungleichmäßige Temperaturverteilungen über die Haltungslängen sowie zwischen Scheitel und Sohle festgestellt werden. Es traten Temperaturdifferenzen von ca. 8 °C bis 13 °C über die Haltungslänge und ca. 2 °C bis 10 °C zwischen Scheitel und Sohle auf. Laut Angaben des Linerherstellers (vgl. [122]) liegen die aufgetretenen Schwankungen entlang der Haltung bei der Warmwasser-Härtung innerhalb zulässiger Toleranzen und stellen kein Problem für die Linerqualität dar. Bei Gegenüberstellung der gemessenen Temperaturen konnte festgestellt werden, dass die Messwerte der Temperaturmessung mit LWL-Kabeln im Scheitelbereich und der standardmäßigen, punktuellen Temperaturmessung des Linerherstellers im Schacht innerhalb ähnlicher Größenordnungen liegen.

Der Testeinsatz liefert erste Hinweise für eine Anwendung der Temperaturmessung mit Glasfaserkabeln im Bereich des Schlauchlinings. Der Einsatz zeigt, dass das Messverfahren grundsätzlich geeignet ist, den zeitlichen und örtlichen Temperaturverlauf während des Linereinbaus online zu kontrollieren und aufzuzeichnen. Verbesserungspotentiale beim Einsatz der Glasfaserkabel liegen zum einen in der Zuordnung der Mess- und Haltungspunkte durch Einmessen signifikanter Punkte im Kanal, wie z. B. Haltungsanfang, Haltungsende oder Hausanschlüsse mit Hilfe von Kältespray. Weitere Verbesserungsmöglichkeiten zeigten sich zum anderen bei der Positionierung und Lagesicherung der Sensormesskabel im Scheitel. Für zukünftige Messeinsätze sollten die Temperaturmesskabel während der Inversion des Liners nachgespannt oder - falls der Kanal begehbar ist - mit Hilfe von Dübeln in der gewünschten Lage fixiert werden.

Die bestmögliche Positionierung der Temperaturmesskabel könnte mit einer Integration in den Liner erzielt werden, bei gleichzeitiger Reduzierung der Montageleistungen und der Materialkosten in der Sensorausführung. Allerdings bedarf dieser Innovationsschritt weiterer experimenteller und fertigungstechnischer Entwicklungen, die im Rahmen eines eigenständigen F&E-Vorhabens entwickelt, erprobt und optimiert werden sollten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Messmethode einen viel versprechenden Ansatz für eine kontinuierliche Überwachung und Dokumentation des Härtungsprozesses bei Schlauchlinersanierungen liefert. Auf der Basis der Messwerte kann der Temperatureintrag während des Aushärtevorgangs über die gesamte Haltungslänge oder Sanierungsstrecke überwacht und ggf. gesteuert werden. Mögliche Fehler bei der Härtung des Liners durch zu geringen Wärmeeintrag können so ggf. frühzeitig erkannt und durch entsprechende Gegenmaßnahmen behoben werden.

Insbesondere für die Überwachung besonderer Baumaßnahmen, wie z. B. Düker oder Bachquerungen mit ggf. lokalen Schwankungen der Umgebungstemperatur durch Grund- bzw. Oberflächenwasser bietet die Temperaturmessung eine sehr gute Möglichkeit, den Härtungsprozess des Liners während der Sanierung über die gesamte Länge zu kontrollieren und zu dokumentieren. Um die gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse zu vertiefen, sollten weitere Praxiseinsätze erfolgen.

7.7 Testeinsätze in einer linersanierten, begehbaren Prüfstrecke

7.7.1 Aufgabenstellung

Ziel der Testeinsätze im begehbaren Bereich war es, die auf der Basis der Recherche zusammengestellten und bislang ausschließlich im Labor getesteten zerstörungsfreien Prüfverfahren auch im praktischen Einsatz vor Ort auf ihre grundsätzliche Eignung und Anwendbarkeit zu untersuchen. Außerdem sollten durch einen Einsatz in einem weiteren, diesmal begehbaren Kanal zusätzliche Erfahrungen zur Temperaturmessung mittels Glasfaserkabeln gesammelt werden. Zu diesem Zweck wurden am Beispiel einer ausgewählten Schlauchliner-Sanierungsmaßnahme die unterschiedlichen Prüfverfahren unter den dort vorliegenden Baustellenbedingungen eingesetzt. Der Einsatz des jeweiligen Verfahrens wurde durch Fachfirmen bzw. -institute aus den Bereichen der Vermessung, elektrooptischer Sensorsysteme, Biomedizintechnik und Materialprüfung durchgeführt und durch das IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur wissenschaftlich begleitet, dokumentiert und bewertet. Die Durchführung der Prüfungen erfolgte dabei vor, während oder nach der Sanierung der Kanalstrecke im Schlauchliningverfahren. Je nach Verfahren wurde entweder die gesamte Haltung betrachtet oder es wurden ausgewählte Stellen im Kanal überprüft.

7.7.2 Untersuchungsobjekt

Als Untersuchungsobjekt zum praktischen Test ausgewählter zerstörungsfreier Prüfverfahren an Schlauchlinersanierungen wurde von den Stadtentwässerungsbetrieben Köln eine aktuelle Sanierungsmaßnahme im Altstadt-Gebiet zur Verfügung gestellt.

Die zu sanierende Kanalstrecke liegt ca. 2 km südlich vom Kölner Dom und ca. 400 m westlich vom Rhein entfernt. Die Sanierungsstrecke beginnt im Kreuzungsbereich der Straßen Schnurgasse und Ankerstraße und setzt sich östlich in Richtung Perlengraben (Zufahrt zur Severinsbrücke) fort. Die Sanierungsstrecke mündet über ein Verbindungsbauwerk in einen Hauptsammler. Die wichtigsten Kenndaten zum Sanierungsobjekt werden in Abb. 44 zusammenfassend dargestellt.

Die Sanierungsmaßnahme umfasst zwei Haltungen eines Mischwassersammlers mit einer Länge von insgesamt 105 m. Der zu sanierende Kanalabschnitt besteht aus Mauerwerk mit einem begehbaren Ei-Profil. Nach ungefähr 71 m weitet sich das Profil ab dem Zwischenschacht von B/H 1000/1500 auf B/H 1100/1630 auf. Als Schlauchliner wurde ein Nadelfilz-Liner der Firma Insituform Rohrsanierungstechniken GmbH mit Warmwasserhärtung und einer Wanddicke von 36 mm vor und 39 mm nach der Aufweitung der Kanalstrecke gewählt.

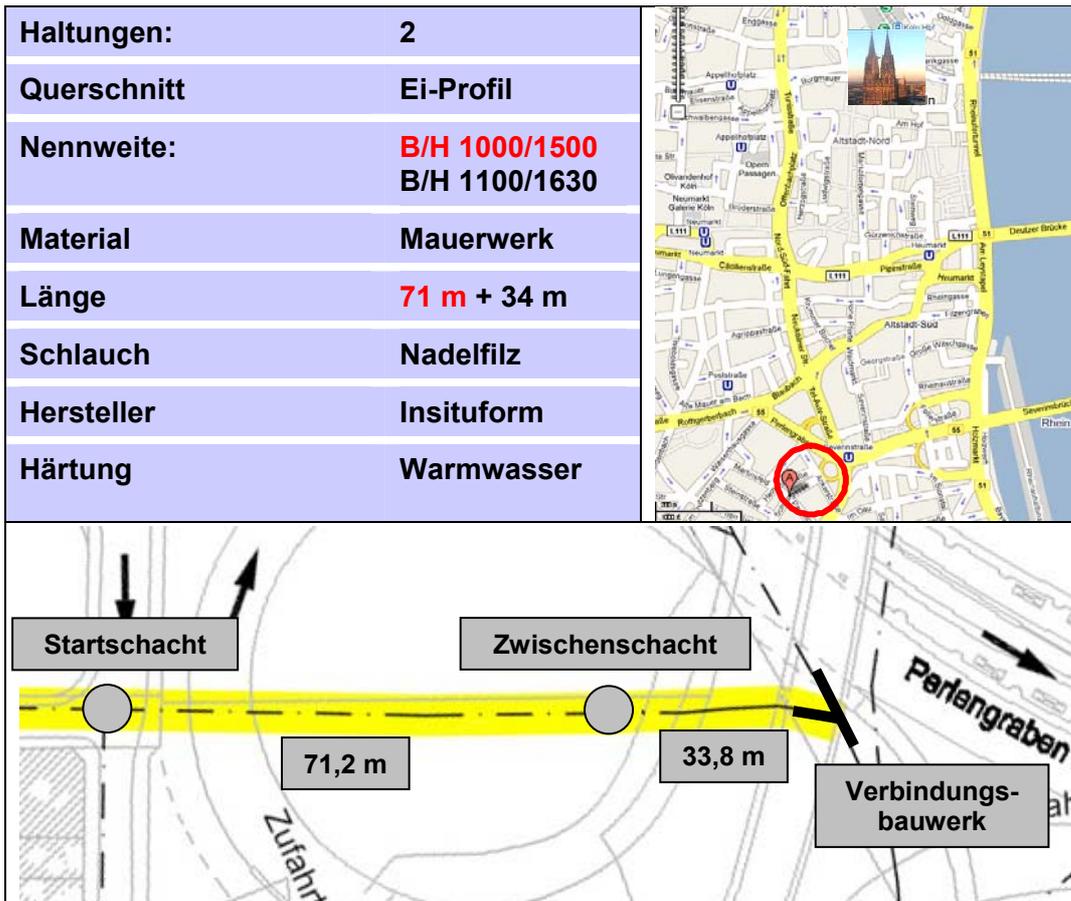
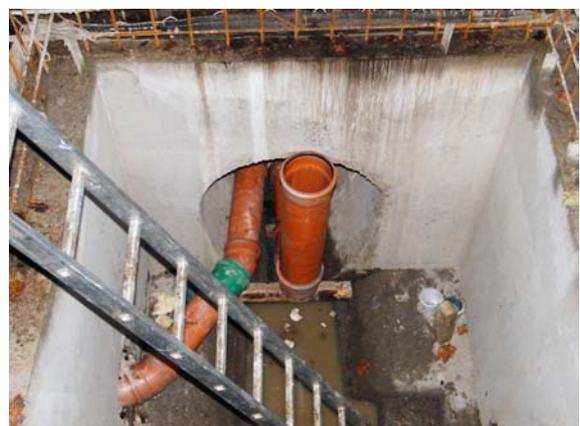


Abb. 44: Kenndaten der Baumaßnahme in Köln, Schnurgasse

Abb. 45 gibt eine fotografische Übersicht der örtlichen Randbedingungen der Baumaßnahme im Bereich des Startschachtes. Der Startschacht im Kreuzungsbereich der Schnurgasse und der Ankerstraße wurde im Vorfeld der Sanierungsmaßnahme in Ort betonweise neu erstellt. Zur Durchführung der Sanierung wurde die Betondecke des Schachtes zunächst ausgespart und so die Zugänglichkeit der Sanierungsstrecke für den Liner sichergestellt. Während der gesamten Sanierung und Durchführung der zerstörungsfreien Prüfverfahren wurde die Kanalstrecke durch Aufbau einer Wasserhaltung durch Umpumpen im Netz oberhalb der Baumaßnahme und eine Abmauerung der zulaufenden Haltung komplett abwasserfrei gehalten.



a) Startschacht im Kreuzungsbereich Schnurgasse/Ankerstraße



b) Blick von oben in den Startschacht



c) Abmauerung des zulaufenden Kanals im Startschacht



d) Blick in die abgehende, zu sanierende Kanalstrecke

Abb. 45: Örtliche Randbedingungen der Baumaßnahme Köln, Schnurgasse

Für den Test-Einsatz der zerstörungsfreien Prüfverfahren wurde ausschließlich die erste Haltung mit einer Länge von ca. 71 m und den Abmessungen von B/H 1000/1500 ausgewählt (vgl. Abb. 44). Die Sanierung sowie der Einsatz der zerstörungsfreien Prüfverfahren fanden im Zeitraum vom 18.11. - 15.12.2008 statt. Mit Berücksichtigung der Probenentnahme am 17.12.2008 dauerte der Praxiseinsatz der unterschiedlichen Verfahren vor Ort insgesamt 15 Arbeitstage. Der Praxiseinsatz wurde vom IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur terminlich koordiniert und geplant und die erforderlichen Vorbereitungsarbeiten und Untersuchungen in diesem Zeitraum wissenschaftlich begleitet und dokumentiert. Während des gesamten Untersuchungszeitraums wurde der Einstieg in den Kanal und die Durchführung der zerstörungsfreien Prüfverfahren durch Personal der Firma Weitz & Co. GmbH unter arbeitssicherheitstechnischen Gesichtspunkten abgesichert. Tab. 18 stellt die eingesetzten Verfahren, die ausführenden Firmen und den Untersuchungszeitraum in einer Übersicht dar.

Tab. 18: Übersicht über die beteiligten Projektpartner, die eingesetzten zerstörungsfreien Prüfverfahren und des Untersuchungszeitraums

Projektpartner	Verfahren	Untersuchungszeitraum
DMT	3D-Laserscanning	18.11. und 01.12.2008
OSSCAD	Temperaturmessung	Vorbereitung 19. - 24.11.2008 Messung 25. - 28.11.2008
Fraunhofer WKI	Wärmefluss-Thermographie	02.12.2008
MPA Stuttgart	Impakt-Echo-Verfahren Resonanzspektroskopie Ultraschall-Echo-Verfahren	04. - 05.12.2008
Fraunhofer IBMT	Ultraschall-Echo-Verfahren	15.12.2008

7.7.3 3D-Laserscanning

Aufgabenstellung

Ziel des Praxiseinsatzes des 3D-Laserscannings in Köln war es, zu untersuchen, ob dieses Messverfahren grundsätzlich für einen Einsatz im begehbaren Kanal und im Speziellen für einen Einsatz in schlauchlinersanierten Haltungen geeignet ist. Zu diesem Zweck wurden jeweils ein Scan vor und ein Scan nach der Sanierung durchgeführt. Diese sollten im Wesentlichen zur Bestandsaufnahme bzw. Ist-Erfassung der zu sanierenden Kanalstrecke und zur Deformationsanalyse des Schlauchliners herangezogen werden. Insbesondere sollte überprüft werden, inwieweit die Messergebnisse Aussagen über den Abstand zwischen der Innenoberfläche des Altrohres und des Liners erlauben. In Kombination mit anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren, die eine Bestimmung der Linerwanddicke ermöglichen, wäre so ggf. die Bestimmung von Ringspaltmaßen denkbar.

Durchführung

Die Vermessungen durch die Firma DMT fanden am 18.11.2008 und 01.12.2008 in der ersten Haltung der Kanalstrecke vom Startschacht bis zum Zwischenschacht statt. Die nachfolgenden Beschreibungen und Ergebnisdarstellungen sind weitestgehend dem Bericht der DMT (vgl. [108]) entnommen.

Der Ist-Zustand des Kanals vor der Sanierung wurde mit dem Panorama-Laserscanner IMAGER 5006 der Firma Zoller + Fröhlich erfasst. Das Mess-System erfasst den Raum 360° horizontal und 310° vertikal. Der Bereich direkt unterhalb des Scanners wird nicht erfasst. Die geometrische Aufnahme erfolgte durch 15 Standpunkte, jeweils in Abständen von ca. 5 m. Zur Einhaltung des gleichmäßigen Abstandes wurde zuvor eine Stationierung in den Kanalabschnitt in Form einer Farbmarkierung eingebracht. Pro Standpunkt wurden von dem Mess-System rund 34 Millionen Punkte aufgenommen (Auflösungsstufe ‚high‘; Messzeit pro Scan 3,5 min). Der Scanner wurde für jeden Standpunkt auf einem im Kanal verkeilten Brett aufgestellt und horizontaliert. Abb. 46 und Abb. 47 stellen die Vermessungsarbeiten im Schacht und in der Haltung bildlich dar.



a) Einmessen der Position des Scanners in der Haltung



b) Scannen des Schachtbereiches

Abb. 46: Vermessungsarbeiten im Bereich des Startschachtes



a) Positionierung des Scanners im Kanal



c) Markierung der Stationspunkte im Kanal



b) Kugelprisma zur tachymetrischen Einmessung des Scanners

Abb. 47: Durchführung des Laserscannings im Kanal

Der Abstand von 5 m zwischen den einzelnen Scannerpositionen ist durch die hohe Messdichte für die Erfassung der jeweiligen Kanalabschnitte ausreichend. Jede einzelne Punktwolke wird zunächst in einem scannereigenen lokalen Koordinatensystem geführt. Für die geometrische Beschreibung und Deformationsanalyse wurden die Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Dazu wurden im Straßenbereich (Ankerstraße) drei Vermessungspunkte vermarktet und deren Koordinaten durch eine Netzmessung bestimmt. Beide Anschlussmessungen, sowohl vor als auch nach dem Inlinereinbau, erfolgten in gleicher Weise, wobei für die zweite Messung (01.12.2008) die drei vermarkten Vermessungspunkte der ersten Messung als Anschlusspunkte verwendet wurden.

Messergebnisse und Auswertung

Zunächst erfolgte die Koordinatenberechnung der im Felde mit Überbestimmungen durchgeführten Messungen durch eine Ausgleichsrechnung (GeoTec Programm PAN, V2.60X). Der Koordinatenanschluss erfolgte hierbei für beide Messungen an drei von Mitarbeitern der DMT im Nahbereich des Schachtes 67440041 (Startschacht) neu gesetzten Vermessungspunkten (Nägel in Asphalt). Die einzelnen Punktwolken wurden über die Prismenpositionen auf dem Scanner sowie das Kugelprisma mittels Koordinatentransformation miteinander verknüpft und georeferenziert. Für die Messepochen vor und nach der Sanierung lag die mittlere Standardabweichung bei 4 mm bzw. 5 mm. In beiden Fällen ergibt sich so eine Gesamtpunktwolke mit rund 470 Mio. Punkten. Zur Visualisierung werden diese mit der Software Leica Cyclone aufbereitet und in sogenannte TruViews (vgl. Abb. 48) konvertiert. Mit Hilfe des Internet Explorer PlugIns Leica TruView ist es möglich, diese Daten an jedem PC darzu-

stellen. Das Plugin ermöglicht, dem Anwender Ansichten zu speichern, Abstände und Koordinaten zu messen sowie Beschriftungen zu erstellen.

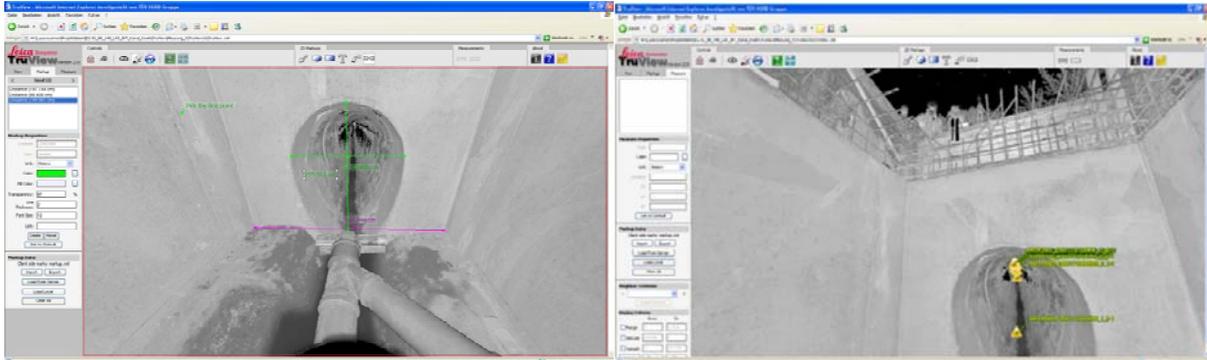


Abb. 48: Visualisierung der Messdaten der Baumaßnahme in Leica TruView [108]

Die Punktwolken wurden entlang der Kanalachse und anhand eines theoretischen Profils in die Ebene abgewickelt. Die berechnete Abwicklung gibt auf der Grundlage der gemessenen Intensitätswerte die Oberflächenbeschaffenheit der Kanalinnenseite wieder. Sowohl die im Inliner erkennbaren Nähte als auch die ausgebildeten Unregelmäßigkeiten in Form von (überwiegend Längs-, weniger Quer- oder Diagonal-) Falten lassen sich in den Darstellungen in der Regel gut erkennen. Ausnahmen ergeben sich, wenn Faltenkanten direkt auf den Scanner ausgerichtet sind und somit trotz ausgeprägter Faltenhöhe eine relativ geringe Auftrefffläche für den Laser bilden. Beispielhaft wird in Abb. 49 die Abwicklung der Wiederholungsmessung (Messung nach der Sanierung) dargestellt.

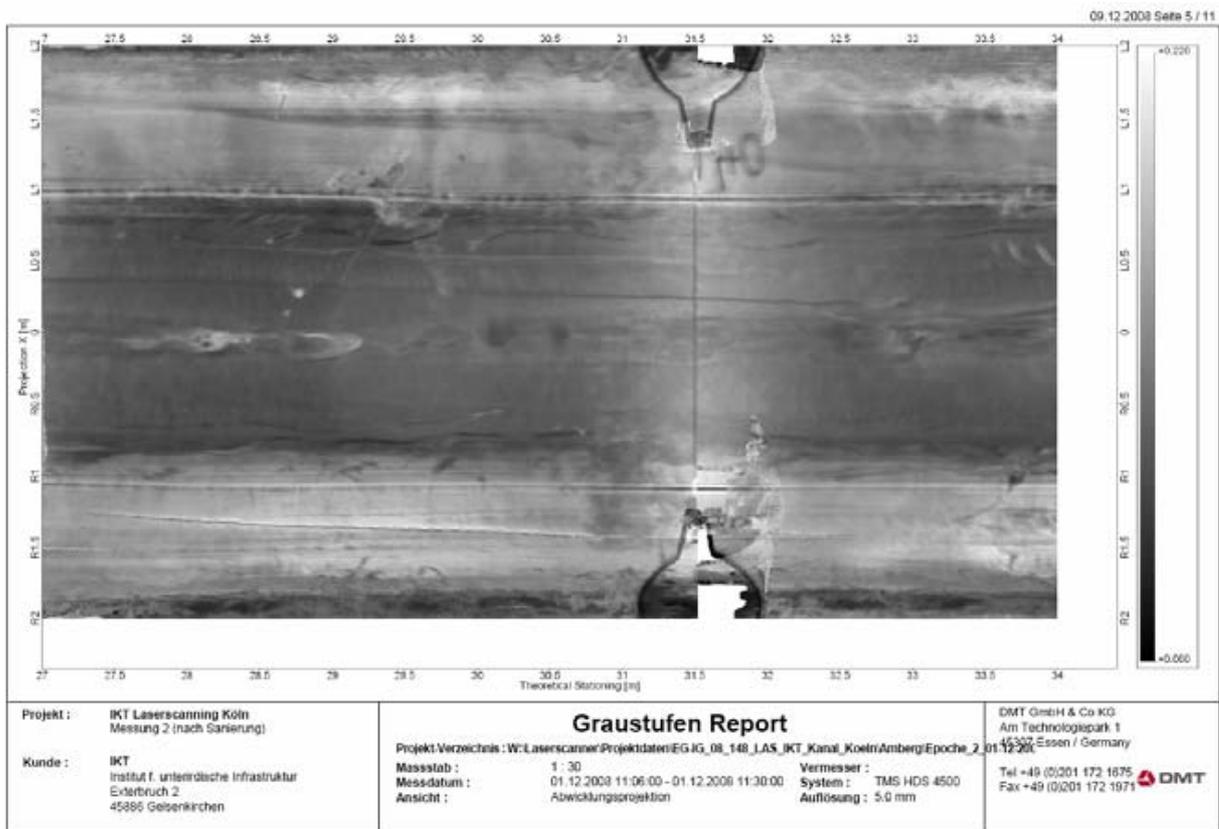


Abb. 49: Abwicklung der Wiederholungsmessung (Amberg TMS Software) [108]

Als weitere Auswertung wurden aus den berechneten Abwicklungen der ersten und zweiten Messepoche die Differenzen berechnet und eine farbcodierte Deformationsanalyse erstellt (vgl. Abb. 50). Die von der DMT gewählte Skala weist in den blauen Farbbereichen Differenzen zwischen erster und zweiter Messung von bis zu 2,5 cm aus. Darüber hinausgehende Differenzen werden farblich abgestuft von gelb bis rot ausgewiesen. Es ist zu berücksichtigen, dass die absoluten Differenzangaben sowohl die feste Ausbildung des Inliners als auch eventuell bei der Einbringung bzw. dem Aushärten entstandene Ringspalte beinhalten können. Im unteren Bereich auftretende höhere Differenzmaße sind durch Restmaterial und vorhandenes Wasser im Inliner zu erklären.

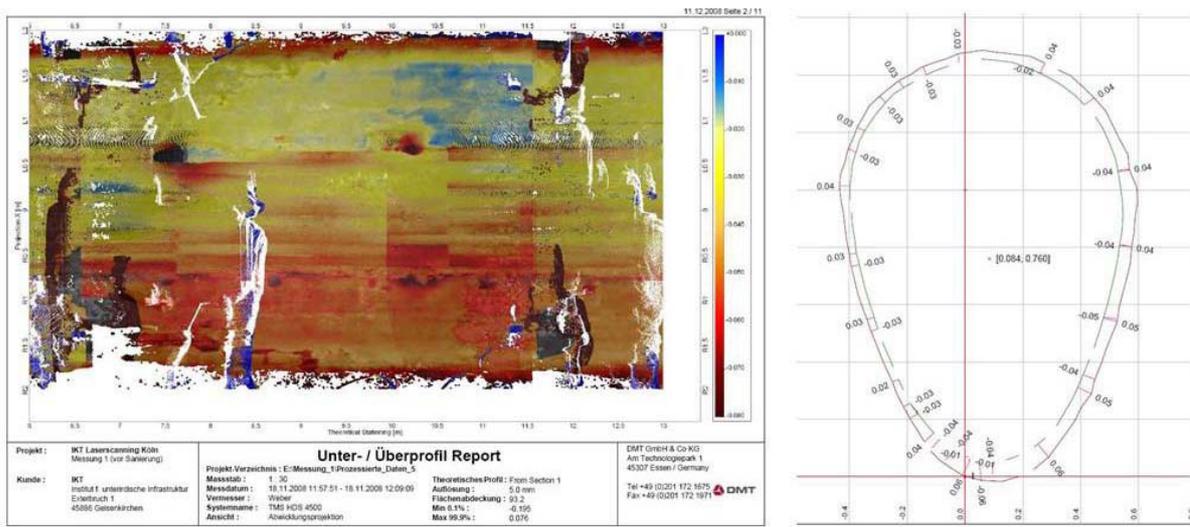


Abb. 50: Deformationsanalyse; Abwicklung und Schnittdarstellung (Amberg TMS Software) [108]

Weiß erscheinende Flächen sind bedingt durch fehlende Messwerte in einer der beiden Messungen, hier oftmals durch vom Scanner erfasstes Messpersonal, erzeugt worden. Durch bisher unbekannte Messeffekte im Nahbereich des Scanners (bis zu einer Entfernung von ca. 1 m), die möglicherweise auf den Auftreffwinkel des Messstrahls in Verbindung mit der Materialbeschaffenheit der Inlineroberfläche zurückzuführen sind, konnten Teile der Messdaten der Wiederholungsmessung bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden. Ergänzende Daten aus den jeweils benachbarten Scans führen zu leichten Abstufungen in der Differenzdarstellung. Durch Optimierung des Messverfahrens sowie der Filteralgorithmen in der Auswertung soll zukünftig eine Verbesserung der Differenzdarstellung erreicht werden. Ergänzend zu den Abwicklungen wurden aus dieser Deformationsanalyse Schnitte durch die beiden Messepochen erzeugt, welche die absolute Lage der beiden Oberflächen zueinander darstellen.

Nach einer weiteren Filterung der Messdaten wurde aus den Daten jeweils eine Dreiecksvermaschung berechnet (rund 470.000 Dreiecke pro Epoche). Diese sind Grundlage einer 3D-Deformationsanalyse. Eine farbcodierte Visualisierung verdeutlicht auch hier (vgl. Abb. 51) vollflächig die Differenzen der gemessenen Oberflächen, die aus frei wählbarer Perspektive betrachtet werden können (z. B. Seitenansichten und Draufsicht). Ergänzend können Maße für beliebig wählbare Einzelpunkte abgegriffen und angezeigt werden.



Abb. 51: Deformationsanalyse (Software 3DReshaper) [108]

Zur Modellierung von Falten, Rissen oder anderen Anomalitäten mit vergleichbar kleinen Ausmaßen ist die Maschenweite der Dreiecksvermaschung ausreichend klein zu wählen. Die hierbei für eine einheitliche Darstellung eines größeren Messbereichs notwendige hohe Rechnerleistung ist zurzeit grenzlastig. Daher kann das Prinzip bzw. die Machbarkeit gegenwärtig nur exemplarisch an einem Datenausschnitt (vgl. Abb. 52) demonstriert werden.

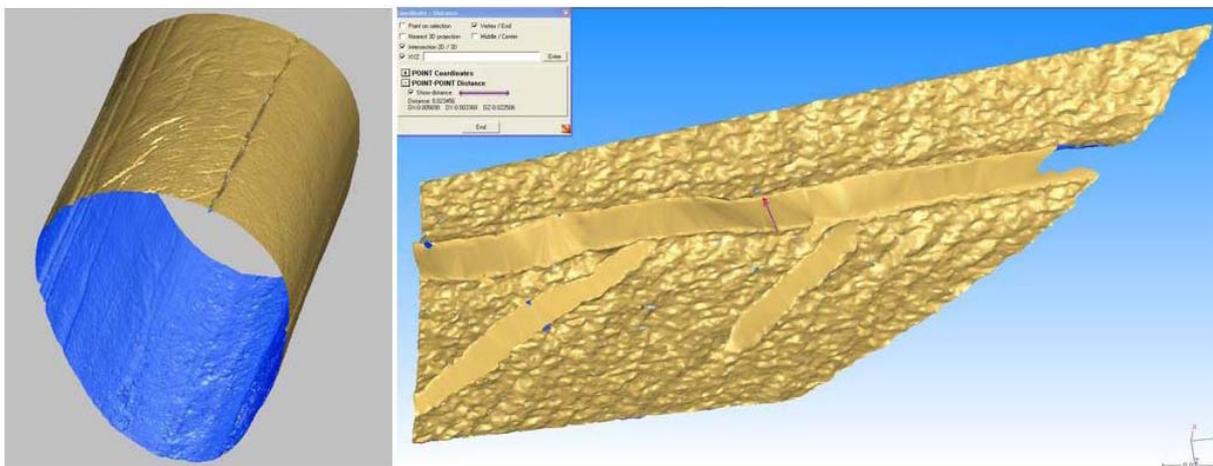


Abb. 52: Faltendarstellung im 3D-Oberflächenmodell [108]

Bewertung des Messeinsatzes

Der Praxiseinsatz des 3D-Laserscannings in Köln kann als erfolgreich bewertet werden. Bei beiden Messungen vor und nach der Sanierung konnte die komplette Haltung – bis auf wenige Punkte des Kanals – erfasst werden. Die Vermessung der Haltung mit einer Länge von ca. 70 m dauerte bei beiden Einsätzen rund vier Stunden einschließlich des Aufbaus der Messgeräte und des Einmessens der erforderlichen Geländepunkte. Zur Durchführung der Messungen wurden von der DMT jeweils vier ausführende Personen eingesetzt. Die Kosten für die Vermessung einer Haltung betragen rund 5.000 €, also ungefähr 10.000 € pro Mess-tag.

Mit Hilfe des 3D-Laserscannings ist es möglich, vollständig die Schalenoberfläche des Altkanals bzw. des Liners zu erfassen. Allerdings erlaubt dieses Messverfahren in der jetzigen

Messkonfiguration keine Ermittlung von Ringspaltmaßen. Für diesen Anwendungsfall ist die Messgenauigkeit des Verfahrens nicht ausreichend groß. Mit Messgenauigkeiten von 4 bis 5 mm pro Scan und schlechtestenfalls von 8 bis 10 mm bei der Differenzbildung zwischen dem ersten und zweiten Scan liegt der Fehler in einer Größenordnung, in der sich in der Regel auch die zu bestimmenden Ringspaltmaße bewegen.

Verbesserungspotential ergibt sich somit insbesondere bei der Messgenauigkeit des Verfahrens. Limitierender Faktor für den Einsatz des Verfahrens ist unter anderem auch die Nennweite des zu untersuchenden Kanals. Kleinere Nennweiten als der untersuchte Kanal mit einer Höhe von 1,5 m sind laut Auskunft der DMT aufgrund der Auflösung des Scanners derzeit nicht untersuchbar. Dementsprechend sind derzeit keine Messungen im nicht begehbaren Bereich möglich. Für einen Einsatz in kleinen Nennweitenbereichen ist die Gerätetechnik entsprechend weiterzuentwickeln, zu verkleinern und zu automatisieren.

7.7.4 Temperaturmessung

Aufgabenstellung

Zur weitergehenden Überprüfung der Temperaturmessung mittels Glasfaserkabeln (Lichtwellenleiter-Kabeln) wurde ein dritter Einsatz dieses Messverfahrens im Kanal durchgeführt. Im Gegensatz zur ersten und zweiten Messung bei Schlauchlinersanierungen in Abwasserkanälen der Nennweite DN 300 und DN 500 (vgl. Kapitel 7.6.2 und 7.6.3) wurde die Temperaturmessung nun in einem begehbaren Ei-Profil B/H 1000/1500 durchgeführt. Ziel dieses Einsatzes war es zum einen, zu überprüfen, ob auch eine händische Verlegung der Kabel durch Andübeln an der Rohrwandung des Altkanals möglich ist und entsprechende Messergebnisse liefert. Durch diese Installationsmethode ergab sich insbesondere die Möglichkeit, die Sensordichte im Querschnitt durch Montage von zusätzlichen Sensorkabeln in den Kämpferbereichen zu erhöhen und so differenziertere Aussagen zum Temperaturverlauf in unterschiedlichen Querschnittshöhen zu erzielen. Zum anderen sollten die Ergebnisse der Temperaturmessung und mögliche Aussagen zur Härtung des Liners auch einen Abgleich und eine Interpretation der weiteren zerstörungsfreien Prüfverfahren ermöglichen.

Durchführung

Aus dem Messeinsatz in Recklinghausen liegen Erkenntnisse vor, dass es bereits in relativ kleinen Querschnitten, wie z. B. DN 500, zu Temperaturunterschieden zwischen Sohle und Scheitel kommen kann. Um mögliche Temperaturunterschiede in Abhängigkeit von der Höhe und der Lage im Querschnitt erfassen zu können, wurden für die Messung im begehbaren Ei-Profil insgesamt sechs Messpositionen über den Querschnitt verteilt angeordnet (vgl. Abb. 53). Die Messkabel befanden sich jeweils im Scheitel, in der Sohle sowie in den linken und rechten Kämpferbereichen in den Höhendrittelpunkten, also in 0,5 m und 1,0 m Höhe.

Die Messkabel wurden sowohl in Schleifenform als auch als Stichleitung über die Haltung angeordnet (vgl. Abb. 53). Bei den Messkabeln in den Querschnittspositionen 1 bis 6 handelt es sich um eine metallische Ausführung in Form einer Hohlader als Edelstahlröhrchen mit Edelstahladrähten zur Zugentlastung. Zusätzlich wurde ein spezielles Lichtwellenleiter-Kabel (LWL-Kabel) mit einer verstärkten Kunststoffmantelkonstruktion getestet (Kabel 3').

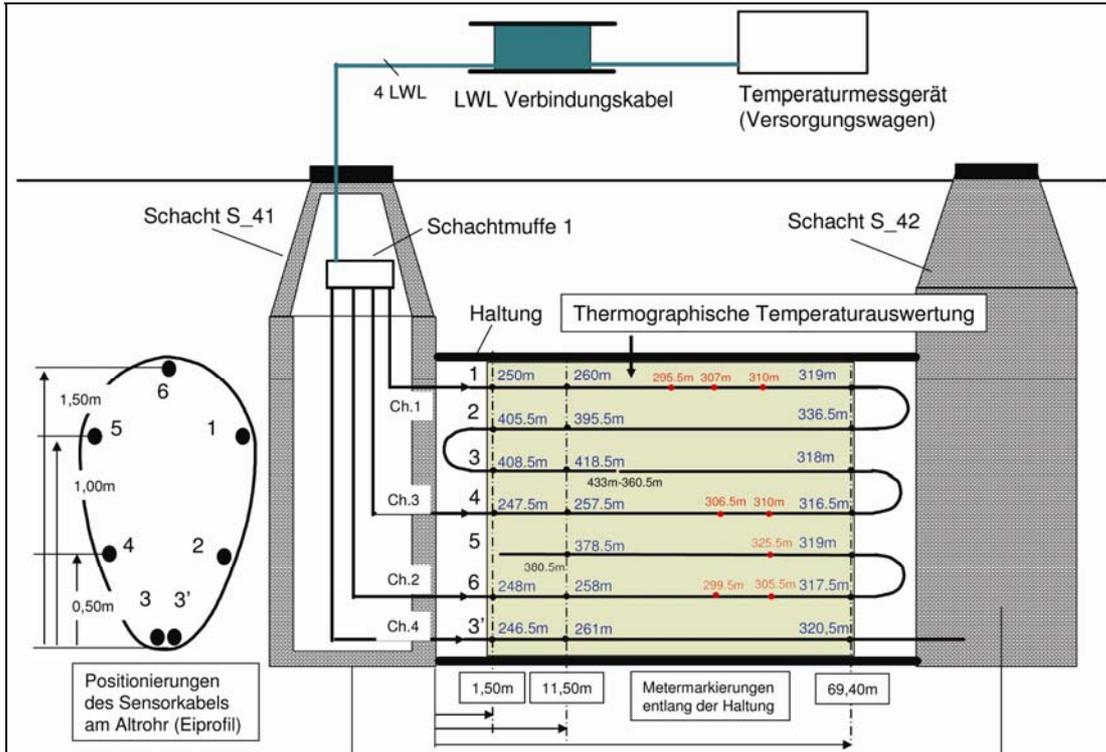


Abb. 53: Anordnung der Messkabel im Querschnitt und über die Haltungslänge [123]

Die Glasfaserkabel wurden im Vorfeld der Sanierung über einen Zeitraum von vier Arbeitstagen händisch im Kanal verlegt. Zu diesem Zweck wurden über die gesamte Haltungslänge mit Hilfe einer Bohrmaschine Löcher im Abstand von ca. 50 cm gebohrt und die Messkabel mit Dübeln an der Kanalwand befestigt. Abb. 54 zeigt das eingesetzte Equipment sowie die Montage der Messkabel in der Haltung.



a) Kabeltrommel mit Glasfaserkabel



c) Bohren von Löchern in die Altrohrwand



b) Dübel zur Befestigung der Messkabel an der Altrohrwand



d) Befestigung eines Messkabels an der Altrohrwand

Abb. 54: Montage der Messkabel in der Haltung

Die Messkabel wurden am Haltungsanfang aus dem Kanal geführt und am Schachteingang in einer Wandmuffe abgelegt (vgl. Abb. 55). Als Verbindungskabel zum Messgerät wurde ein robustes LWL-Kabel mit vier Sensorfasern verwendet, das am Schachteingang in der Wandmuffe mit den Messkabeln aus der Haltung verbunden wurde. Zur Temperaturmessung kam ein vierkanaliges Temperaturmessgerät zum Einsatz. Während der mehrtätigen Aufzeichnungen befand sich das Messgerät im Versorgungswagen der Sanierungsfirma.



a) Messkabel in den sechs Querschnittspositionen



b) Anschluss der Messkabel an eine Wandmuffe im Startschacht

Abb. 55: *Fertiggestellte Anordnung der Messkabel in der Haltung und im Schacht*

Vor Beginn der Temperaturmessung wurden signifikante Punkte im Kanal, wie z. B. die Anfangs- und Endstationen der Haltung, mit Hilfe von Kältespray eingemessen. Diese Vorgehensweise sollte eine bessere Zuordnung der Temperaturmesswerte zu den zugehörigen Positionen in der Haltung sicherstellen.

Die Temperaturmessung in vier Messkanälen (vgl. Channel 1-4 in Abb. 53) dauerte für jedes Messkabel ca. 30 Sekunden, so dass sich für den gesamten Messzyklus aller 4 Kanäle eine Messdauer von 120 Sekunden ergab. Die örtliche Auflösung der Temperaturmessung betrug 0,5 m. Mit ca. 840 Messorten über die Haltungslänge von ca. 70 m und 9.000 Messzeitpunkten wurden während der Temperaturmessung über den Sanierungszeitraum von ca. 75 Stunden insgesamt ca. 7.560.000 Einzelwerte produziert.

Messergebnisse und Auswertung

Die Temperaturmessung während der Sanierung und Aushärtung des Liners wurde ausgewertet. Die Ergebnisse wurden für jede der sechs Querschnittspositionen graphisch dargestellt [121]. Aufgrund der hohen Anzahl der Messdaten und der komplizierten Anordnung der Messkabel in der Haltung wurden für die Darstellung der Messergebnisse verschiedene Darstellungsformen in einer Grafik (vgl. Abb. 56) kombiniert.

Diese Ergebnisgrafik setzt sich jeweils aus zwei Teilen zusammen. Der linke Teil umfasst eine Übersichtsdarstellung der Haltung (A), der Sensoranordnung und des betrachteten Sensorkabels (B) und gibt somit eine Übersicht zur Lage der Messkabel über die Haltungslänge und im Querschnitt. Im rechten Teil der Ergebnisgrafik werden der örtliche (C) und zeitliche Temperaturverlauf (E) sowie das thermographische Bild (D) dargestellt. Er gibt also die Temperaturmesswerte in unterschiedlichen Auswertungs- bzw. Darstellungsformen wieder.

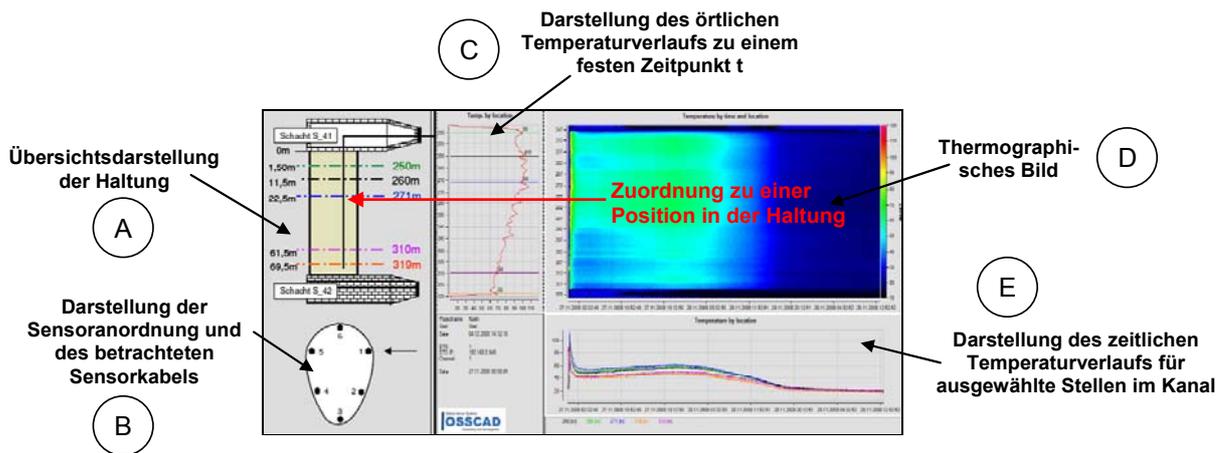


Abb. 56: Ergebnisgrafik zur Temperaturmessung mit unterschiedlichen Auswertungs- und Darstellungsformen [123]

Beide Darstellungen zur Lage der Messkabel im linken Teil dienen im Wesentlichen der besseren Orientierung bei der Betrachtung und Interpretation der dargestellten Temperaturmesswerte im rechten Teil der Ergebnisgrafik (vgl. Abb. 56). In der Querschnittsdarstellung (B) ist beispielsweise markiert, welches Sensorkabel bei der Auswertung der Temperaturmesswerte im rechten Teil der Ergebnisgrafik betrachtet wird. Darüber hinaus erlaubt die Übersichtsdarstellung der Haltung (A) eine Zuordnung der Messergebnisse im rechten oberen Teil der Ergebnisgrafik zu den zugehörigen Positionen in Längsrichtung der Haltung. In der Darstellung des örtlichen Temperaturverlaufs zu einem festen Zeitpunkt t (C) und des thermographischen Bildes (D) lassen sich somit die Ortskoordinaten (vgl. roter Pfeil in Abb. 56) des Temperaturmesskabels den zugehörigen Positionen in der Haltung zuweisen.

In der Darstellung des örtlichen Temperaturverlaufs zu einem festen Zeitpunkt t (C) ist auf der Abszisse die am jeweiligen Ort gemessene Temperatur in °C, auf der Ordinate die Ortskoordinate in Metern dargestellt. Als fester Zeitpunkt wurde der Start der exothermen Reaktion, zu erkennen an lokalen, sprunghaften Temperaturanstiegen, ausgewählt.

Zur Veranschaulichung des zeitlichen Temperaturverlaufs (E) wurden die im Vorfeld der Sanierung mit Hilfe von Eisspray eingemessenen Positionen entlang des jeweiligen Sensorkabels für eine explizite Betrachtung herangezogen. Auf der Abszisse ist die Zeit, auf der Ordinate die Temperatur in °C aufgetragen. Die Temperaturkurven der unterschiedlichen Positionen in Haltungslängsrichtung sind in verschiedenen Farben dargestellt.

Das thermographische Bild (D) zeigt für das ausgewählte Sensorkabel die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung (Abszisse: Zeitpunkt, Ordinate: Ort). Die Temperaturwerte sind in verschiedenen Farben (RGB-Farben) von blau (kalt) zu rot (heiß) dargestellt. Die Darstellungsform des räumlichen thermographischen Bildes (Temperaturbild) ermöglicht es, für jeden Messort die erreichte Temperatur und ihre zugehörige Wirkungsdauer abzulesen.

Nachfolgend werden die Messergebnisse für jede der sechs Querschnittspositionen dargestellt (vgl. Abb. 57 bis Abb. 59) und die wichtigsten Kernaussagen zusammenfassend dargestellt.

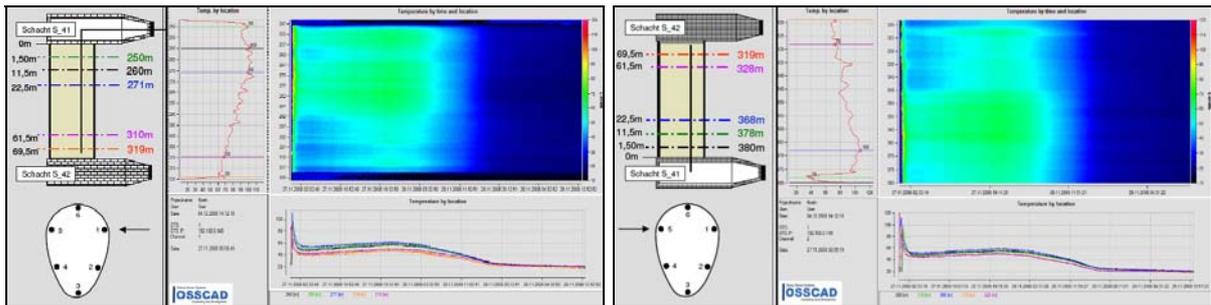


Abb. 57: Ergebnisse der Temperaturmessung für Querschnittsposition 1 und 5 [123]

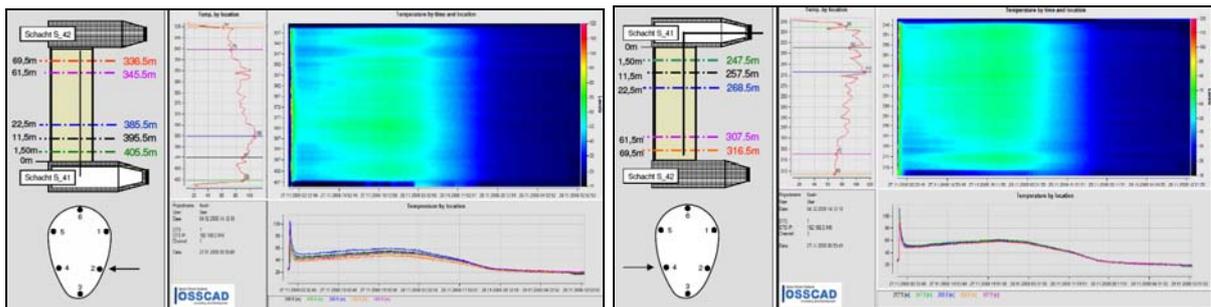


Abb. 58: Ergebnisse der Temperaturmessung für Querschnittsposition 2 und 4 [123]

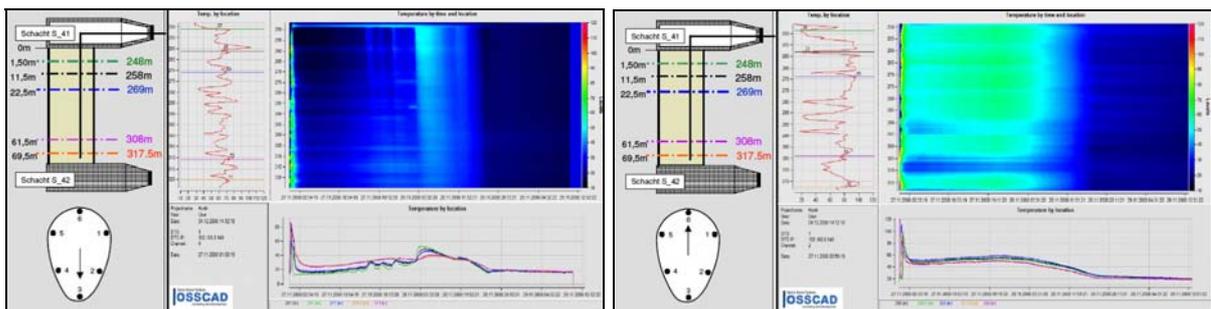


Abb. 59: Ergebnisse der Temperaturmessung für Querschnittsposition 3 und 6 [123]

Folgende Kernaussagen zu den Ergebnissen der Temperaturmessung können festgehalten werden [123]:

1. Im Sohlbereich liegt gegenüber den anderen Sensorabschnitten ein deutlich geringerer Wärmeeintrag vor.
2. Die Temperaturverläufe von den beiden gegenüberliegenden Kämpferbereichen liefern in etwa vergleichbare Ergebnisse. Dagegen zeigen die beiden oberen Kämpferbereiche (1 m Höhe) im Vergleich zu den beiden unteren Kämpferbereichen (0,5 m Höhe) eine inhomogenere Temperaturverteilung.
3. In Längsrichtung der Haltung (von Schacht S_41 in Richtung Schacht S_42) nimmt die Temperatur mit einem räumlichen Temperaturgradienten von $< 0,2^\circ/\text{m}$ ab.
4. Zu Beginn der Aushärtungsphase liegt ein schneller Temperaturanstieg ($\approx 40^\circ/\text{min}$) mit hohen absoluten Temperaturwerten (bis 120°C) am Altrohr vor. Die exothermen Reaktionen konzentrieren sich zunächst auf einen sehr kleinen Linerbereich (0,5 m; tendenziell im hinteren Bereich des Schachtes S_42) und breiten sich dann Stück für Stück (vgl. Abb. 59) entlang des Liners aus.
5. Nach wenigen Minuten (zwischen 3 min und 18 min nach dem Start der exothermen Reaktion) fällt die Temperatur mit einem deutlich kleineren Temperaturgradienten

($\approx 1,6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$) ab und erreicht während des Aushärtungsprozesses einen mittleren Temperaturwert von $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Allerdings zeigen die Temperaturaufzeichnungen auch, dass dieser Temperaturwert von $60 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht an allen Linerstellen erreicht wird. Diese Unregelmäßigkeiten werden in den thermographischen Bildern durch die Farbe hellblau ($< 50 \text{ }^\circ\text{C}$) bzw. dunkelblau ($< 40 \text{ }^\circ\text{C}$) visualisiert. Oberhalb von $50 \text{ }^\circ\text{C}$ folgt die Farbe grün.

- Die Auswertung der Temperaturmessung in Bezug auf die markierten Stellen im Liner, die bei der Begehung vom 28.11.2008 optische Auffälligkeiten zeigten (vgl. Tab. 19), korrelieren nicht mit den dargestellten, gemessenen Temperatureauffälligkeiten. Da es sich um Beulen, Riefen, Falten usw., also oberflächliche, durch den Einbau verursachte Auffälligkeiten handelt, war ein Zusammenhang zum Wärmeeintrag nicht zu erwarten.

Bewertung des Messeinsatzes

Der Messeinsatz ist als erfolgreich zu bewerten. Die händische Verlegung der Messkabel mittels Dübeltechnik ist für einen Einsatz im begehbaren Bereich geeignet; sie ist jedoch sehr zeit- und personalaufwendig. Insgesamt waren 3 bis 4 ausführende Personen über einen Zeitraum von 4 Tagen mit der händischen Montage der Messkabel an der Altrohrwand beschäftigt. Die eigentliche Messung während des Einbaus und der Aushärtung des Liners hingegen erfolgt automatisch, auch ohne Messpersonal vor Ort. Die Kosten für den Messeinsatz in Köln belaufen sich auf insgesamt rund 6.750 €.

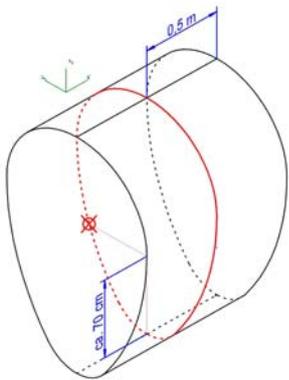
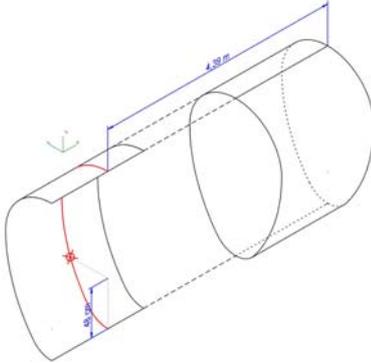
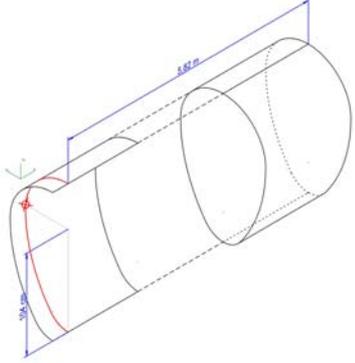
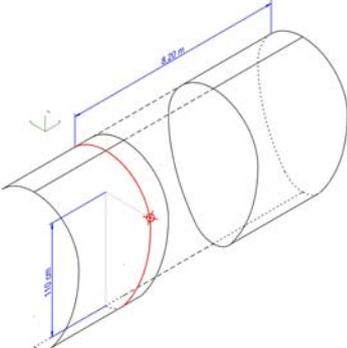
Die erzielten Messergebnisse bestätigen die Erfahrungen und Erkenntnisse der vorhergehenden Temperaturmessungen. Es sind wiederum ungleichmäßige Temperaturverteilungen sowohl in Längsrichtung des Liners als auch über die Höhe des Querschnitts festzustellen. Insbesondere die Temperaturunterschiede über die Haltungshöhe zwischen Scheitel, Sohle und den Kämpferbereichen fallen bei diesem großen Profil mit einer Querschnittshöhe von 1,5 m deutlich aus. Im Vergleich zu den bisherigen Temperaturmessungen konnte bei diesem Messeinsatz eine exotherme Reaktion zu Beginn des Aushärtungsvorgangs messtechnisch erfasst werden. Die Temperatur steigt zunächst in wenigen Bereichen des Liners sprunghaft auf Werte von bis zu $120 \text{ }^\circ\text{C}$ an und breitet sich dann Stück für Stück in Längsrichtung des Liners aus.

7.7.5 Vorarbeiten zu den weiteren Messungen

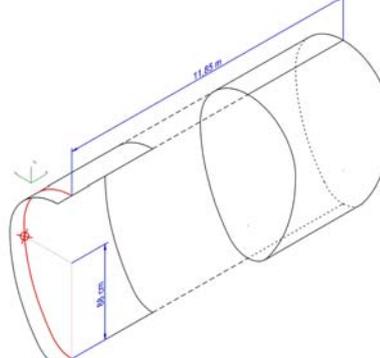
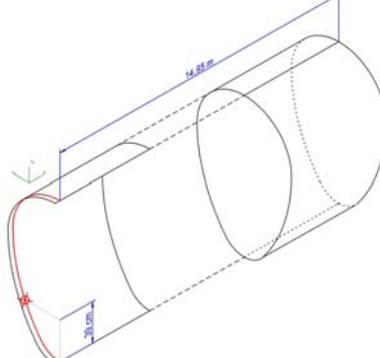
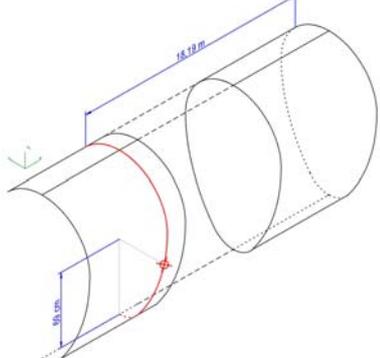
Im Gegensatz zum 3D-Laserscanning und der Temperaturmessung, bei denen die Untersuchung der Kanalstrecke jeweils über die gesamte Haltungslänge erfolgte, war aufgrund der Ergebnisse der Voruntersuchungen an Laborproben mittels Wärmefluss-Thermographie, Impakt-Echo-Verfahren, lokaler Resonanzspektroskopie und Ultraschall-Echo-Verfahren abzusehen, dass nur ausgewählte Stellen im Kanal überprüfbar sind. Ursache hierfür ist, dass die oben genannten Verfahren bei einem Messvorgang nicht – wie z. B. der Laserscanner – den Kanal rundum über den ganzen Querschnitt erfassen, sondern abhängig vom Sensor lediglich punktuell messen bzw. kleine Ausschnitte der Kanalwand aufnehmen. Um im vorgegebenen Untersuchungszeitraum von 1-2 Tagen pro Verfahren dennoch aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten, wurden unterschiedliche Stellen im Kanal zur weiteren Untersuchung ausgewählt.

Im Rahmen einer Begehung des sanierten Kanals wurden diese Stellen durch die Bauleiterin der Stadtentwässerungsbetriebe Köln durch optische Inaugenscheinnahme festgelegt und farblich markiert. Die Untersuchungsstellen wurden durch das IKT eingemessen und deren Lage in der Haltung bzw. im Querschnitt sowie optische Auffälligkeiten dokumentiert. Tab. 19 stellt die ausgewählten Untersuchungsstellen in einer Übersicht dar. Abhängig vom Messverfahren wurde um die ausgesuchten Untersuchungsstellen ein Messfeld bzw. ein Messraster gelegt, um die Durchführung der Messungen zu vereinfachen bzw. die Messergebnisse den untersuchten Stellen im Kanal bei der Auswertung zuweisen zu können. Zur Durchführung des Impakt-Echo-Verfahrens, der lokalen Resonanzspektroskopie sowie des Ultraschall-Echo-Verfahrens wurde in jedes der ausgewählten Messfelder ein Messraster mit einem Abstand von 5 cm gelegt. Bei Messfeldern mit einer Größe von 50 x 70 cm bis 80 x 80 cm ergibt sich eine Anzahl von 165 bis 289 Messpunkten pro Messfeld.

Tab. 19: Übersicht der ausgewählten Untersuchungsstellen in der sanierten Haltung

Foto	Lage in der Haltung	Beschreibung
		<p><u>Probemesstelle</u></p> <p>Auffälligkeit: Inhomogene Struktur im Anfangsbereich des Liners</p> <p>Gut zugängliche Stelle in Schachtnähe</p> <p>Lage: Kämpfer oben rechts</p>
		<p><u>Messstelle I</u></p> <p>Auffälligkeit: Beule</p> <p>Lage: Kämpfer unten rechts</p>
		<p><u>Messstelle II</u></p> <p>Auffälligkeit: Riefen</p> <p>Lage: Kämpfer oben rechts</p>
		<p><u>Messstelle III</u></p> <p>Auffälligkeit: Keine</p> <p>Glatte Oberfläche, keine sichtbaren Fehlstellen</p> <p>Lage: Kämpfer oben links</p>

Tab. 19: Übersicht der ausgewählten Untersuchungsstellen in der sanierten Haltung (Fortsetzung)

Foto	Lage in der Haltung	Beschreibung
		<p>Messstelle IV</p> <p>Auffälligkeit: Falte kurz über der Naht</p> <p>Lage: Kämpfer rechts</p>
		<p>Messstelle V</p> <p>Auffälligkeit: Flicken zum Verschließen der Einfüllöffnung für die Harztränkung</p> <p>Lage: Kämpfer unten rechts</p>
		<p>Messstelle VI</p> <p>Auffälligkeit: Keine</p> <p>Lage: Kämpfer links im Nahtbereich des Liners</p>

7.7.6 Wärmefluss-Thermographie

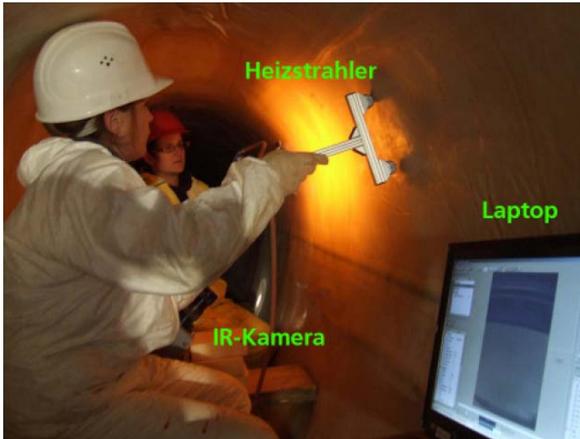
Aufgabenstellung

Die nachfolgenden Beschreibungen und Ergebnisdarstellungen sind weitestgehend dem Bericht des Fraunhofer WKI entnommen [111]. Mittels Wärmefluss-Thermographie können von außen nicht sichtbare innere Materialstrukturen und Fehlstellen sichtbar gemacht werden. Dieses Verfahren wird standardmäßig bei der Qualitätssicherung von Rotorblättern aus GFK für Windkraftanlagen eingesetzt. Mit dieser Methode können unzureichende Harztränkungen, Delaminationen, Hohlstellen und andere Materialfehler an Rotorblättern detektiert werden. Die Ähnlichkeit des untersuchten Faserverbundwerkstoffs mit den Schlauchlinerprodukten legt die Vermutung nahe, dass die Wärmefluss-Thermographie auch für den Einsatz an Schlauchlinern mit Trägermaterial bestehend aus Polyester-Synthesefasern oder Glasfasern geeignet ist. Ziel des Praxiseinsatzes in Köln ist es, die grundsätzliche Eignung des Verfahrens unter den Bedingungen im Kanal an einem Nadelfilz-Liner zu testen und zu überprüfen, ob innere Materialstrukturen und ggf. Fehlstellen mit Hilfe der Wärmefluss-Thermographie in situ identifiziert werden können.

Durchführung

Für die Untersuchungen wurde eine gekühlte Thermographiekamera im mittleren Infrarot-Wellenlängenbereich (3 – 5 μm) mit einer Temporaufösung von ca. 20 mK, einer Bildwiederholrate von ca. 100 Hz und einer Ortsauflösung von 640 x 512 Pixel verwendet. Im Vorfeld des Aufheiz- und Messvorgangs wurde die Thermographiekamera an jeder Untersuchungsstelle so ausgerichtet, dass die Markierung der zu untersuchenden Stelle (gelbes Kreuz) möglichst mittig im Bildausschnitt erfasst wird. Die Eckpunkte der von der Kamera erfassten Fläche des Liners wurden ermittelt, markiert und für das Probemessfeld und die Messfelder I bis III jeweils geradlinig verbunden. Für Messfeld IV und V wurde die von der Kamera erfasste Fläche mit mehr als vier Stützpunkten markiert und durch eine Ausgleichskurve verbunden. Die Markierung der von der Kamera erfassten Fläche soll insbesondere die Auswertung der Wärmebilder sowie den Abgleich mit den Ergebnissen der weiteren zerstörungsfreien Prüfverfahren vereinfachen.

Im Falle der Vor-Ort-Messung im linersanierten Kanal wurde die Erwärmung der untersuchten Messstellen manuell mit einem Heizstrahler durchgeführt (vgl. Abb. 60 a). Dazu wurde ein schnell reagierender Zwilling-Carbonstrahler verwendet, der in einem Abstand von 20 cm möglichst gleichmäßig über die Oberfläche geführt wurde. Da die Oberfläche des Liners nicht beschädigt werden durfte, wurde diese in einer Zeit von etwa 40 - 50 s auf eine Temperatur von maximal 50 °C erwärmt. Anschließend wurde die Abkühlung der Oberfläche für etwa vier Minuten mit der Thermographiekamera (vgl. Abb. 60 b) auf dem angeschlossenen Laptop aufgezeichnet.



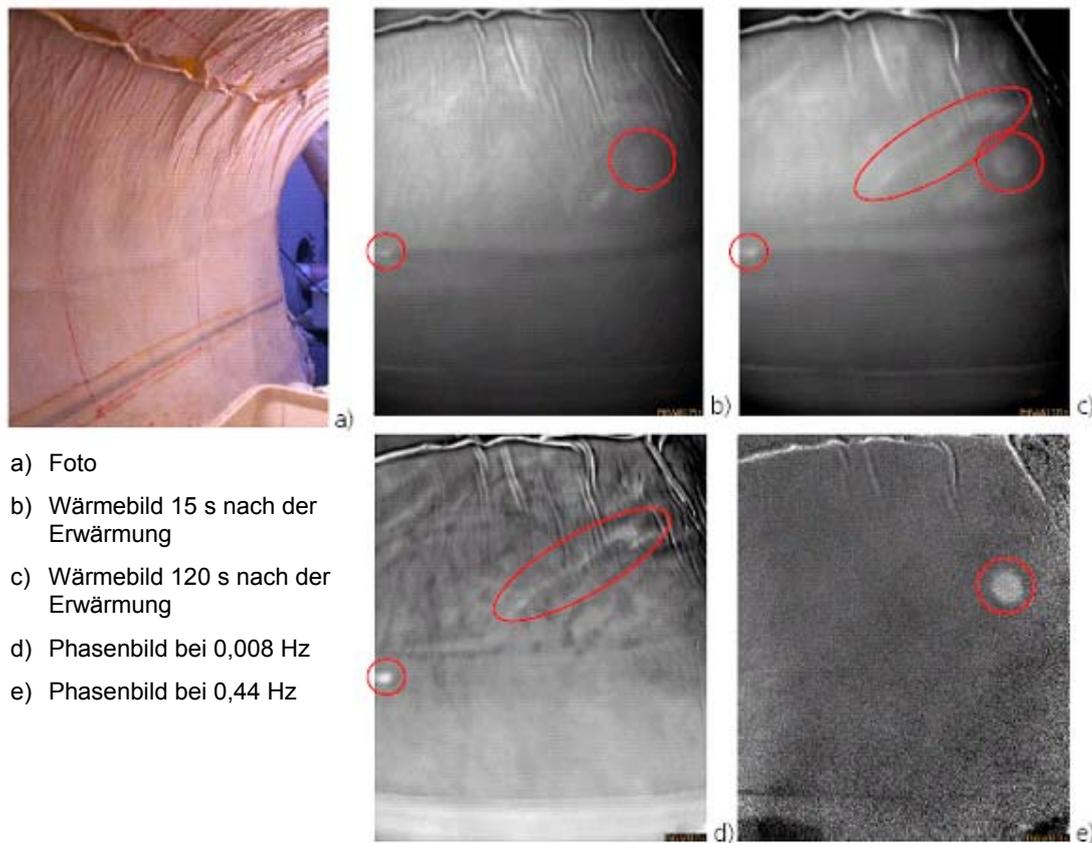
a) Messequipment während des Aufheizvorgangs b) Thermographiekamera

Abb. 60: Messaufbau der Wärmefluss-Themographie vor Ort im Kanal

Messergebnisse und Auswertung

Zur Auswertung der so entstandenen Zeitserien wurden dann die Informationen von Einzelbildern zum Zeitpunkt des größten Temperaturkontrastes der Defekte ausgewertet. Außerdem wurde für eine weitergehende Auswertung der aufgenommenen Thermographiesequenzen zusätzlich auch die sogenannte Puls-Phasen-Thermographie (PPT) angewandt. Diese Technik kann immer dann eingesetzt werden, wenn die Abkühlphase eines ruhenden Messobjektes für eine gewisse Zeit mit der Thermographiekamera beobachtet werden kann. Bei der PPT werden im Gegensatz zur oben beschriebenen Auswertung im Zeitbereich die Informationen der gesamten Zeitserie zur Auswertung herangezogen. Um das Zeitverhalten des Thermographiesignals zu verstehen, kann der vor der Messung eingebrachte, zeitlich begrenzte Wärmeimpuls als aus vielen sinusförmigen Signalen verschiedener Frequenz zusammengesetzter Wärmeimpuls betrachtet werden. Mit Hilfe einer zeitlichen Fourier-Transformation kann dann die gesamte Zeitserie pixelweise in sogenannte Amplituden- und Phasenbilder im Frequenzbereich überführt werden. Dadurch können oft zusätzliche Informationen, insbesondere über die Tiefenlage der Fehler, gewonnen werden. Diesbezüglich sind insbesondere die Phasenbilder interessant, da in diesen die Laufzeit der thermischen Wellen bis zum Fehler gespeichert ist und somit die verschiedenen Tiefenebenen besser voneinander getrennt werden können. Dabei enthalten Phasenbilder bei niedrigen Frequenzen, entsprechend einer längeren Erwärmungszeit, vor allem Informationen aus größeren Tiefen und Phasenbilder bei höheren Frequenzen vor allem oberflächennahe Informationen. Weitere Vorteile sind eine oftmals kontrastreichere Abbildung der Defektgeometrie und ein geringerer Einfluss von einer inhomogenen Erwärmung und Emissionsgradunterschieden der Oberfläche.

Beispielhaft werden nachfolgend die Messergebnisse für zwei von sieben untersuchten Messstellen im Kanal vorgestellt.

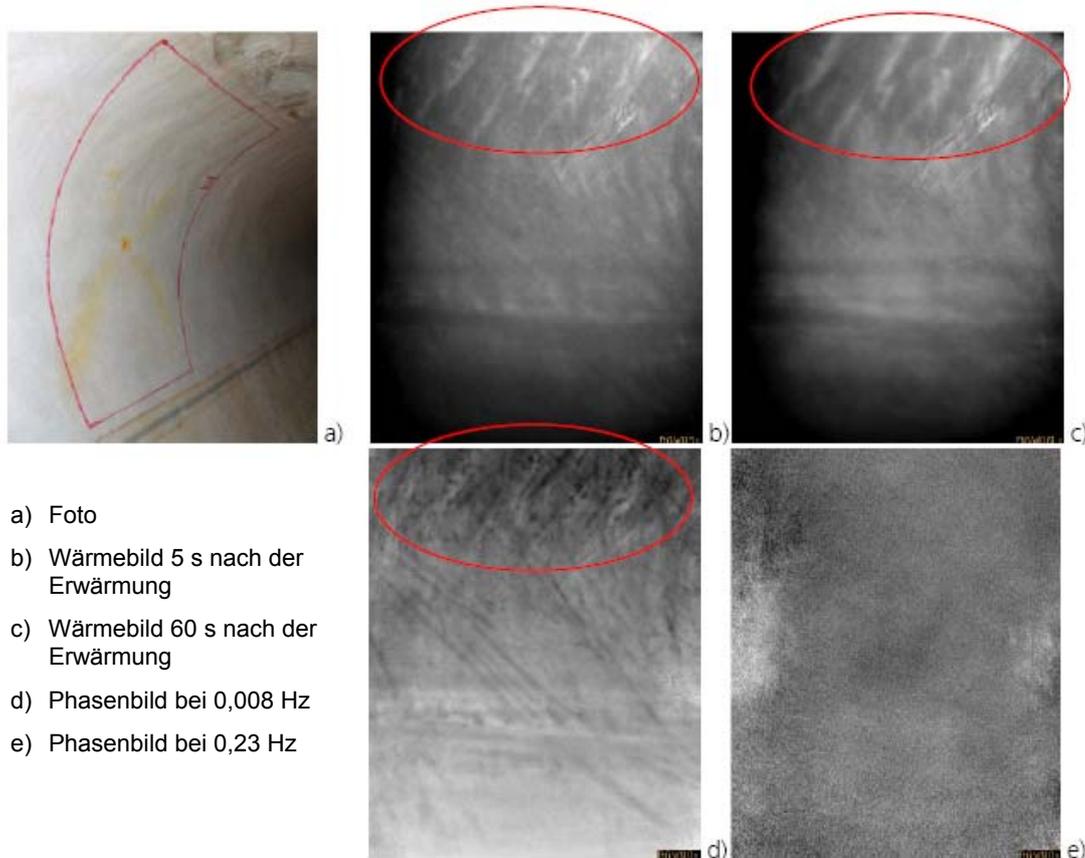


- a) Foto
- b) Wärmebild 15 s nach der Erwärmung
- c) Wärmebild 120 s nach der Erwärmung
- d) Phasenbild bei 0,008 Hz
- e) Phasenbild bei 0,44 Hz

Abb. 61: Ergebnisse der Probemessstelle [111]

Für die erste Untersuchung vor Ort wurde eine Probemessstelle nahe dem Einstiegschacht ausgewählt (vgl. Abb. 61 a). Zunächst fiel auf, dass das rot markierte Messfeld (vgl. Abb. 61 a) wegen der sehr komplizierten Messgeometrie und des verwendeten Weitwinkelobjektives (Bildwinkel $88 \times 77^\circ$) stark verzerrt wird. Da in diesem Fall auch nur die vier Ecken des Messfeldes markiert und durch gerade Linien verbunden wurden, ist das tatsächliche Messfeld noch verzerrter als in Abb. 61 dargestellt. In Abb. 61 b, c sind zwei Wärmebilder zum Zeitpunkt von 15 bzw. 120 s nach der Erwärmungsphase dargestellt. Im ersten Wärmebild fallen bereits zwei rot eingekreiste Stellen auf, bei denen es sich vermutlich um Delaminationen oder Hohlstellen handelt. Zum späteren Zeitpunkt, der einer größeren Tiefe entspricht, kommt noch eine weitere verborgene längliche Struktur dazu, bei der es sich eventuell ebenfalls um eine Hohlstelle handeln könnte. Auch bei der schon in Abb. 61 a visuell auffälligen horizontalen Erhebung in der Bildmitte könnte es sich den Wärmebildern nach um eine Hohlstelle handeln. Durch die laterale Wärmediffusion sehen Wärmebilder zu einem späteren Zeitpunkt im Übrigen immer unschärfer aus als oberflächennahe Bilder.

Die in Abb. 61 c umrandeten Strukturen lassen sich mit Hilfe der PPT kontrastreicher abbilden. So sind in dem Phasenbild bei 0,008 Hz (vgl. Abb. 61 d), das dem Phasenbild bei der größtmöglichen Eindringtiefe entspricht, zwei Strukturen deutlicher zu erkennen. Die sehr auffällige kreisförmige Struktur auf der rechten Seite liegt nach dem Phasenbild bei 0,44 Hz (vgl. Abb. 61 e) sehr dicht unter der Oberfläche.



- a) Foto
- b) Wärmebild 5 s nach der Erwärmung
- c) Wärmebild 60 s nach der Erwärmung
- d) Phasenbild bei 0,008 Hz
- e) Phasenbild bei 0,23 Hz

Abb. 62: Ergebnisse Messfeld III [111]

Bei der in Abb. 62 a dargestellten Messstelle III waren optisch keine Fehlstellen sichtbar, die Oberfläche war glatt. Auf den Wärmebildern fallen insbesondere die hellen bzw. wärmeren Bereiche am oberen Bildrand auf (vgl. Abb. 62 a, b). Auch bei dem Phasenbild bei 0,008 Hz finden sich diese hier dunklen Strukturen wieder (vgl. Abb. 62 c). Die Phasenbilder bei höheren oberflächennahen Frequenzen (vgl. Abb. 62 e) geben leider keine weiteren Aufschlüsse. Gegebenenfalls gibt die Untersuchung der entnommenen Proben Aufschlüsse über die Herkunft dieser Strukturen. Die im linken und rechten Randbereich von Abb. 62 e sichtbaren hellen/dunklen Strukturen sind durch störende Reflexionen durch die an der Messung beteiligten Personen entstanden.

Bewertung des Messeinsatzes

Der Praxiseinsatz zeigte, dass ein Einsatz der Wärmefluss-Thermographie an Schlauchlinern im Kanal grundsätzlich möglich ist. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass einige auffällige Stellen, die ggf. auf verborgene Defekte hinweisen könnten, bei den thermographischen Untersuchungen vor Ort gefunden werden können. Allerdings ist offen, welche Art von auffälligen Strukturen detektiert wurde.

Die erforderlichen Geräte konnten in die begehbbare Haltung eingebracht und dort zur Messung eingesetzt werden. Die Positionierung der Wärmekamera und die Ausrichtung auf die Kanalwand waren aufgrund der beengten Verhältnisse im Kanal schwierig. Zum Teil führten der geringe Abstand der Kamera zur Kanalwand und die Schrägstellung der Kamera zu erheblichen Verzerrungen der Wärmebilder. Auch die händische Führung des Wärmestrahlers – insbesondere über Kopf – erschwerten eine homogene Erwärmung der zu untersuchenden

Linerwand. Zur Durchführung der Messung im Kanal waren insgesamt drei ausführende Personen erforderlich: Eine Person, die den Laptop bedient und die Aufzeichnung der Messung startet, zwei weitere Personen, die den Wärmestrahler zur Erwärmung des Liners an der Kanalwand entlang führen. Die Kamera arbeitet nach erfolgter Positionierung und Ausrichtung auf die Messstelle automatisch. Insgesamt konnten in dem zur Verfügung stehenden Zeitraum von einem Arbeitstag sieben von zehn ausgewählten Stellen im Kanal mittels Wärmefluss-Thermographie untersucht werden. Die Kosten für den Messeinsatz vor Ort belaufen sich auf rund 6.000 €/Messtag.

Wegen der relativ hohen Materialstärke des Liners und der schwierigen Messbedingungen vor Ort ist zu vermuten, dass die eingebrachte Wärmeenergie nicht ausreichte, um das Material bis zur Rückseite vollständig zu durchdringen. Zum jetzigen Zeitpunkt steht die Validierung der Messergebnisse noch aus. Hierzu wurde an den sieben untersuchten Messstellen Probenmaterial des Liners gewonnen, das für weitere Untersuchungen und einen Abgleich der Ergebnisse zur Verfügung steht.

In der derzeitigen Messkonfiguration ist die Wärmefluss-Thermographie lediglich in begehbaren Querschnitten einsetzbar. Es erscheint jedoch denkbar, die Erwärmungs- und Aufnahmetechnik mit einem angepassten Equipment grundsätzlich auch in einem speziellen fernsteuerbaren Messwagen einzusetzen. Dies wäre insbesondere für eine Anwendung in nicht begehbaren Kanälen mit wesentlich kleineren Querschnitten unumgänglich.

7.7.7 Impakt-Echo-Verfahren

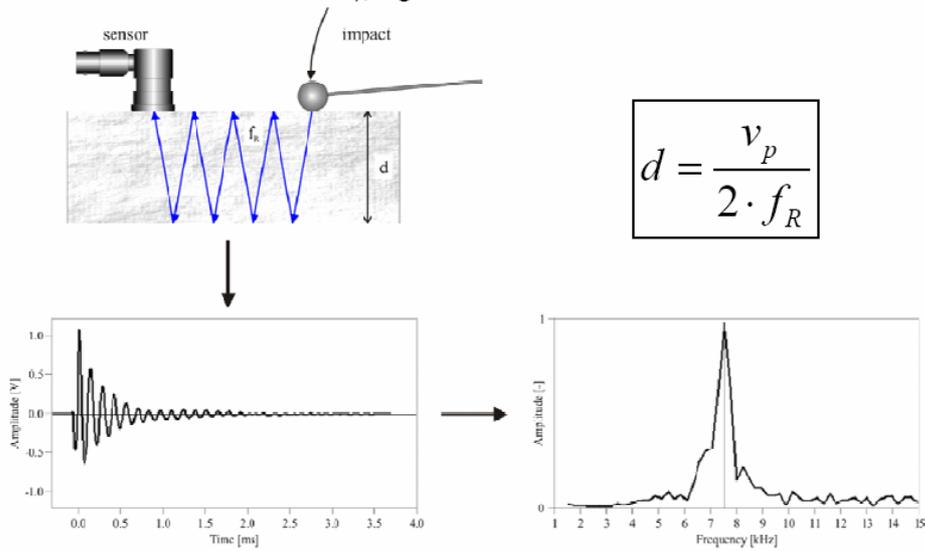
Aufgabenstellung

Das Impakt-Echo-Verfahren ermöglicht als eine Mischung aus der lokalen Resonanzspektroskopie und des Ultraschall-Echo-Verfahrens eine Lokalisierung von Fehlstellen und eine Wanddickenbestimmung an Bauteilen. Bislang kommt dieses Verfahren vornehmlich bei der Schadensanalyse von dicken Betonbauteilen zur Anwendung. Es erscheint jedoch möglich, das Impakt-Echo-Verfahren in begehbaren Querschnitten zur Schadensdetektion und Wanddickenbestimmung an Schlauchlinern einzusetzen. Ziel des Praxiseinsatzes in Köln ist es, die grundsätzliche Eignung des Verfahrens unter den Bedingungen im Kanal an einem Nadelfilz-Liner zu testen und zu überprüfen, ob ggf. Fehlstellen mit Hilfe des Impakt-Echo-Verfahrens identifiziert und die Wanddicke des Liners bestimmt werden können.

Durchführung

Die nachfolgenden Beschreibungen und Ergebnisdarstellungen sind weitestgehend dem Bericht der MPA Stuttgart entnommen [113]. Für die Impakt-Echo-Messungen wurde ein Impakt-Echo-Gerät, bestehend aus Notebook und einem Ultraschallsensor KS94B der Fa. MMF verwendet. Der Impakt wurde mit einer Stahlkugel $\varnothing = 8$ mm von Hand generiert (vgl. Abb. 63). Als Software für die Durchführung der Messungen sowie zur Auswertung und Darstellung der Messergebnisse fand das Programm IEDA Verwendung. Das Messgerät sowie die Software IEDA wurden von der Universität Stuttgart sowie der TTI GmbH – TGU Smartmote entwickelt. Die Auflösung im Zeitbereich betrug $\Delta t = 4$ μ s, dies entspricht einer Abtastrate von 250 kHz. Die Aufnahmezeit betrug $t = 8,192$ ms pro Messsignal. Für die Auswertung

der Messungen wurden die Zeitsignale einer Fourier-Transformation (FFT mit Hanning Fenster) unterzogen. Die Frequenzauflösung betrug dabei $\Delta f = 125$ Hz.



$$d = \frac{v_P}{2 \cdot f_R}$$

Abb. 63: Messprinzip Impakt-Echo-Verfahren [113]

Das Impakt-Echo-Verfahren wurde an den Messfeldern I bis IV eingesetzt (vgl. Abb. 64).

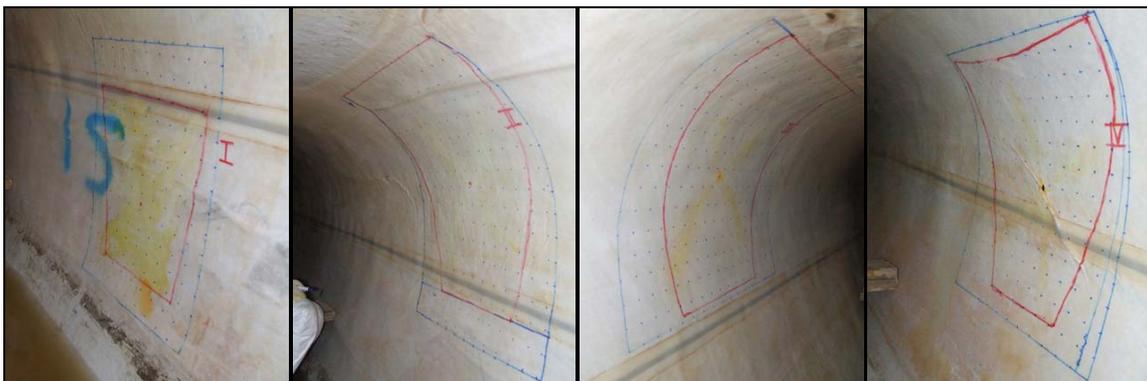


Abb. 64: Mit dem Impakt-Echo-Verfahren untersuchte Messfelder I bis IV



Abb. 65: Durchführung des Impakt-Echo-Verfahrens im Kanal

Für die Messungen wurde der Sensor auf den jeweiligen Messpunkt auf dem Liner gedrückt und mit der Stahlkugel in der unmittelbaren Nähe ein Impakt erzeugt (vgl. Abb. 65). Nach der Einschwingphase bildet sich dabei, durch mehrfache Schallreflexion zwischen Oberfläche und reflektierender Grenzfläche bzw. Rückwand, eine stehende, d. h. resonante akustische Welle aus. Deren Resonanzfrequenz erlaubt bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit eine Aussage über die Tiefe des Reflektors. Im vorliegenden Fall kann sie mittels der Formel in Abb. 63 berechnet werden. Die Parameter stellen hierbei die Reflexionstiefe d , die Schallgeschwindigkeit des Liners c_p (hier ca. 2.600 m/s) und die Resonanzfrequenz f_R dar.

Messergebnisse und Auswertung

Beispielhaft werden hier die Ergebnisse der Messfelder I und II dargestellt. Messfeld I besteht aus 11 Spalten und 14 Zeilen (vgl. Abb. 66). Der Abstand zwischen den Messpunkten beträgt 5 cm.

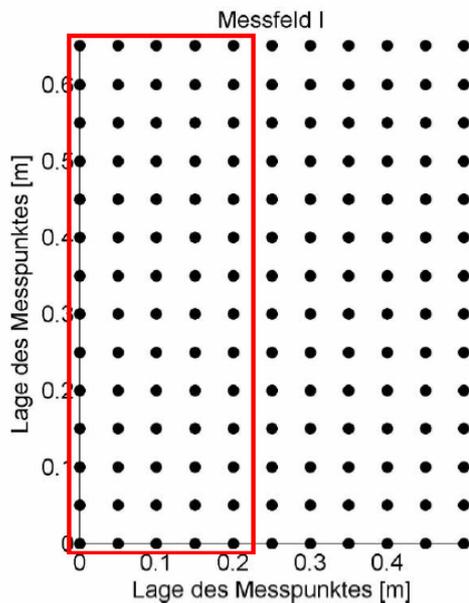


Abb. 66: Messraster Messfeld I [113]

Die Ergebnisse der Messung am Messfeld I sind spaltenweise von links nach rechts dargestellt. Die ersten 5 Spalten des Messfeldes I sind in Abb. 67 zu sehen. Sie entsprechen den Messpunkten im roten Kasten in Abb. 66. Die Ergebnisse der anderen Spalten sehen sehr ähnlich aus und sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Dargestellt sind farbcodierte B-Scans der Amplitudenspektren der gemessenen Signale. Auf der x-Achse ist die Frequenz, auf der y-Achse die Lage der Messpunkte in Metern aufgetragen. Die Amplituden sind farbcodiert, von blau für kleine Amplituden bis rot für große Amplituden. Die Frequenz mit der größten Amplitude liegt bei etwa 3,0 kHz bis 3,5 kHz. Nach konventioneller Auswertung (vgl. Formel in Abb. 63) würde das, bei einer Schallgeschwindigkeit im Liner von 2.600 m/s, einer Dicke von 35 bis 41 cm entsprechen. Diese Dicke tritt sowohl für den Liner als auch im Altrohr nicht auf. Die starke Resonanz ist auf eine Eigenschwingung des Liners zurückzuführen, die durch die Geometrie des Liners vorgegeben und deshalb an allen Stellen in etwa gleich groß ist. Darüber hinaus sind zusätzliche starke Amplituden zwischen 0 und 0,5 m zu erkennen. Diese liegen bei Frequenzen zwischen 12 kHz und 16 kHz. Es ist anzunehmen, dass an diesen Stellen der Verbund zwischen Liner und ursprünglichem Kanal

sehr gut ist und somit die Gesamtdicke des sanierten Kanals gemessen worden ist. Bei einer angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit von 3.500 m/s würde das einer Dicke von ca. 15 cm entsprechen.

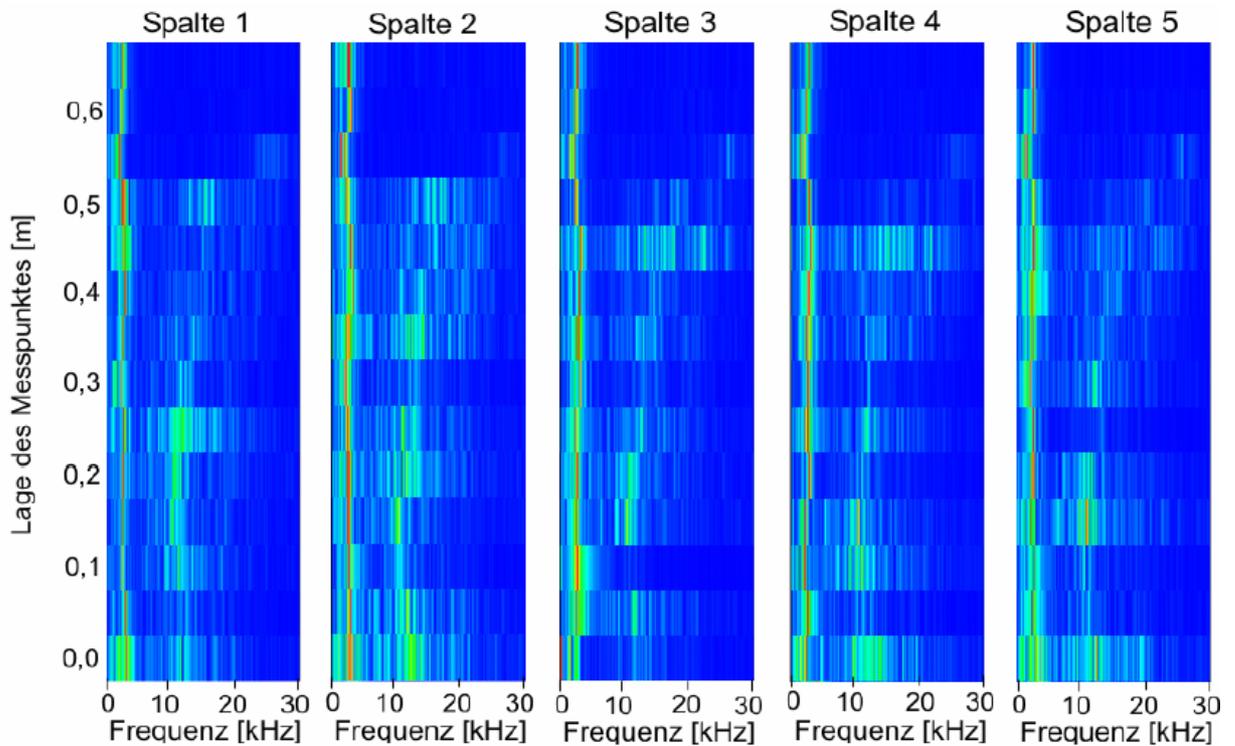


Abb. 67: B-Scans der Spalten 1 bis 5 von Messfeld I [113]

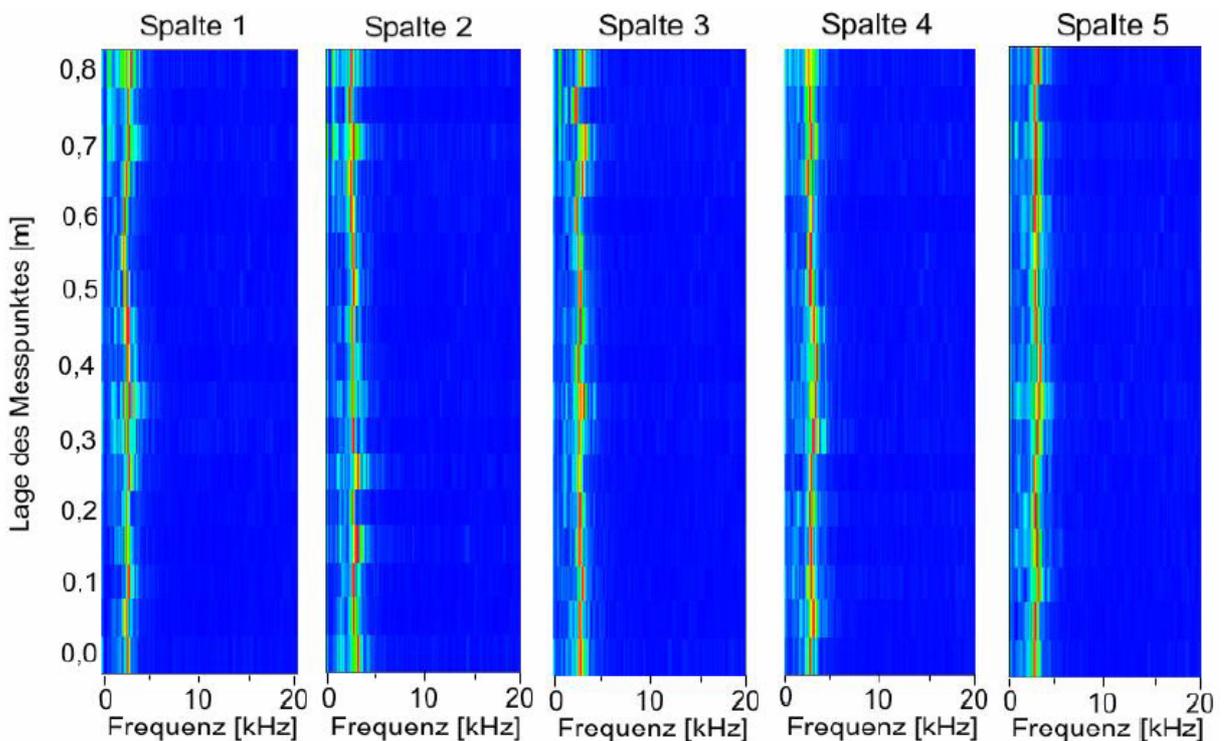


Abb. 68: B-Scans der Spalten 1 bis 5 von Messfeld II [113]

Bei allen anderen Messfeldern (vgl. Abb. 68) konnte die Resonanz bei 12 kHz nicht mehr beobachtet werden, was darauf schließen lässt, dass der Verbund von Liner und ursprünglicher Kanalwand sehr viel schlechter ist bzw. dass hier ein Ringspalt vorliegt.

Die Linderdicke selbst konnte nicht bestimmt werden, da das Verfahren für sehr viel dickere Bauteile ausgelegt ist. Das Auflösungsvermögen hängt von den eingeleiteten Frequenzen durch den Impakt ab. Die eingeleiteten Frequenzen hängen wiederum von der Kugelgröße des Hammers ab. Selbst bei einer Anregung mit der kleinsten verfügbaren Stahlkugel (Durchmesser 8 mm) ist bei einer Linderdicke von wenigen Zentimetern bereits der Grenzbereich des Auflösungsvermögens des Verfahrens erreicht.

Weiterführende Untersuchungen der Eigenschwingungen des Liners könnten evtl. zu einer differenzierteren Aussage über die Linerqualität führen, sind aber sehr aufwendig und müssten in der Regel für jeden Rohrdurchmesser und -querschnitt separat in komplexen Modellierungen berechnet werden.

Bewertung des Messeinsatzes

Der Praxiseinsatz zeigte, dass ein Einsatz des Impakt-Echo-Verfahrens an Schlauchlinern im Kanal grundsätzlich möglich ist. In der verwendeten Konfiguration erscheint es möglich, über die Änderung im Frequenzgehalt einen Ringspalt zwischen Liner und Altkanal zu detektieren. Es könnten somit ggf. qualitative Aussagen (Ja/Nein) zur Existenz eines Ringspalttes getroffen werden. Angaben zur Größe des Ringspalttes sind auf der Basis der durchgeführten Auswertungen nicht möglich.

Ebenso können auf der Grundlage der Messergebnisse und der durchgeführten Auswertungen keine Aussagen über auffällige oder geschwächte Strukturen in der Linerwand gemacht werden. Um weitergehende Angaben zur Linerqualität treffen zu können, sind sehr aufwendige Untersuchungen und Modellierungen hinsichtlich der Eigenschwingungen des Liners erforderlich.

Eine Bestimmung der Linerwanddicke war mit der gewählten Messkonfiguration nicht möglich. Bei erneuten Messungen mit leicht veränderter Konfiguration (z. B. mit kleinerer Stahlkugel) könnte möglicherweise die Linderdicke bestimmt werden.

Aufgrund der relativ kleinen Gerätetechnik konnte diese problemlos in den Kanal eingebracht und eingesetzt werden. Während einer Messdauer von ca. fünf Stunden konnten vier Messfelder mit rund 870 Rasterpunkten untersucht werden. Zur Durchführung der Messung vor Ort waren insgesamt zwei ausführende Personen erforderlich: Eine Person, die den Sensor führt und das Bauteil mit dem Hammer zu Schwingungen anregt, eine weitere Person, die mit Hilfe des PC-Tablets die Messung online kontrolliert und aufzeichnet. Die Kosten für den Messeinsatz vor Ort belaufen sich auf rund 3.500 € pro Messtag.

Zum jetzigen Zeitpunkt steht die Validierung der Messergebnisse noch aus. Hierzu wurde an den sieben untersuchten Messstellen Probenmaterial des Liners gewonnen, das für weitere Untersuchungen und einen Abgleich der Ergebnisse zur Verfügung steht. Aufgrund der händischen Messausführung und einer fehlenden Automatisierung ist dieses Verfahren derzeit nur in begehbaren Kanälen einsetzbar.

7.7.8 Lokale Resonanzspektroskopie

Aufgabenstellung

Die lokale Resonanzspektroskopie erlaubt eine Lokalisierung von Schädigungen in Bauteilen. Insbesondere in mehrschichtigen Bauteilen ist – abhängig von der Tiefenlage – eine Detektion von Delaminationen und strukturellen Änderungen möglich. Dieses Prüfverfahren wird bereits standardmäßig zur Schadenserkennung an Schicht-Bauteilen aus GFK, wie z. B. Rotorblättern von Windkraftanlagen eingesetzt. Es erscheint möglich, mit Hilfe der lokalen Resonanzspektroskopie in begehbaren Querschnitten schlauchlinersanierter Haltungen Stellen mit veränderter bzw. geschwächter Struktur zu identifizieren. Ziel des Praxiseinsatzes in Köln ist es, die grundsätzliche Eignung des Verfahrens unter den Bedingungen im Kanal an einem Nadelfilz-Liner zu testen und zu überprüfen, ob ggf. Fehlstellen mit Hilfe der lokalen Resonanzspektroskopie identifiziert werden können.

Durchführung

Die nachfolgenden Beschreibungen und Ergebnisdarstellungen sind weitestgehend dem Bericht der MPA Stuttgart entnommen [113]. Für die lokale Resonanzspektroskopie wurde ein Modalanalysegerät der Firma LMS in Verbindung mit einem Notebook und der Datenerfassungssoftware LMS Pimento verwendet. Die Anregung erfolgte über einen Impulshammer der Firma Kistler und die Aufzeichnung mit einem Mikrofon der Firma PCB. Die Datenauswertung wurde mit Matlab durchgeführt. Die lokale Resonanzspektroskopie ist dem Impakt-Echo-Verfahren ähnlich. Mit einem speziellen Impulshammer wird ein Bauteil zu Schwingungen angeregt. Diese Schwingungen erzeugen einen Klang, der mit Hilfe eines Mikrofons aufgezeichnet wird (vgl. Abb. 69). Der Klang ändert sich bei strukturellen Veränderungen im Material. Diese Klangänderung ist in einer Änderung des Frequenzgehaltes des Signals erkennbar.

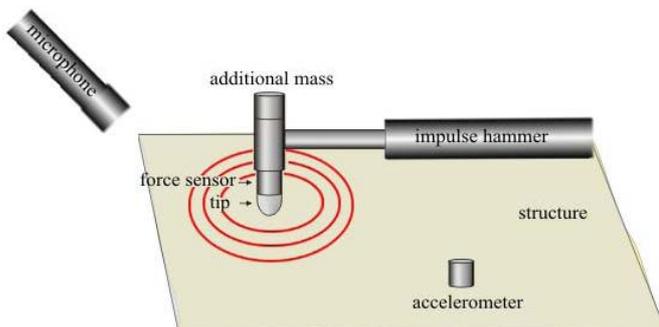


Abb. 69: Messprinzip der lokalen Resonanzspektroskopie [113]

Zusätzlich zu den Klangsignalen wird über einen Kraftaufnehmer im Hammerkopf das Anregungssignal an jedem Punkt aufgezeichnet. Die Kontaktzeit der Anregung ändert sich, wenn das Material härter oder weicher wird. Die Auswertung der Hammersignale macht vor allem oberflächennahe Delaminationen oder Luftpneinschlüsse sichtbar. Je näher ein Defekt an der Oberfläche liegt, umso sensibler reagieren die Hammeranregungen darauf. Die Hammersignale sind idealerweise Gaußkurven. Zur Darstellung der Hammersignale wird deren Halbwertsbreite bestimmt. Die Halbwertsbreite ist die Breite bei halber Höhe des Signals (vgl. Abb. 70).

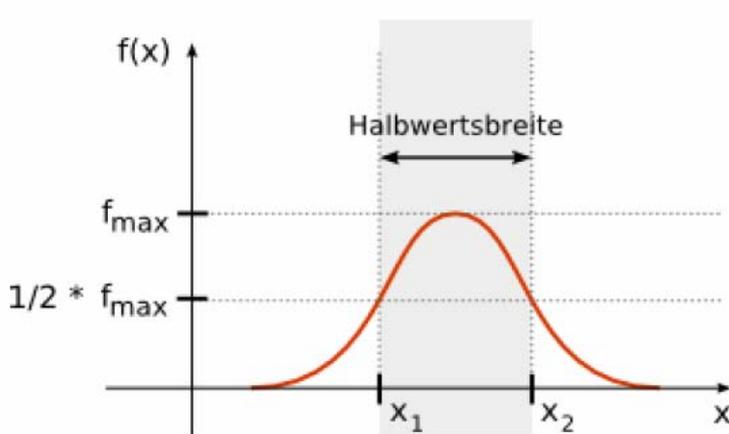


Abb. 70: Bestimmung der Halbwertsbreite einer Funktion $f(x)$ [113]
 x : Zeit in ms; $f(x)$: Kraft in N

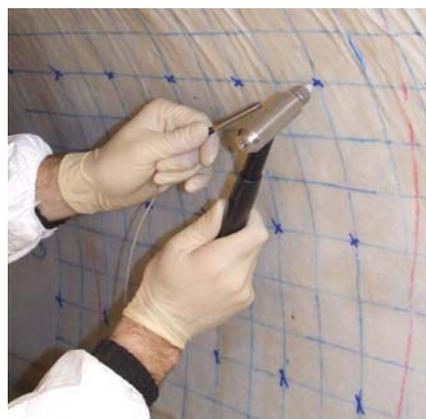
Die lokale Resonanzspektroskopie wurde am Probemessfeld und an den Messfeldern I bis III durchgeführt (vgl. Abb. 71). Abb. 72 zeigt die Durchführung der Messung im Kanal.



Abb. 71: Mit der lokalen Resonanzspektroskopie untersuchte Messfelder (Probemessfeld und Messfelder I bis III)



a) Gesamtansicht

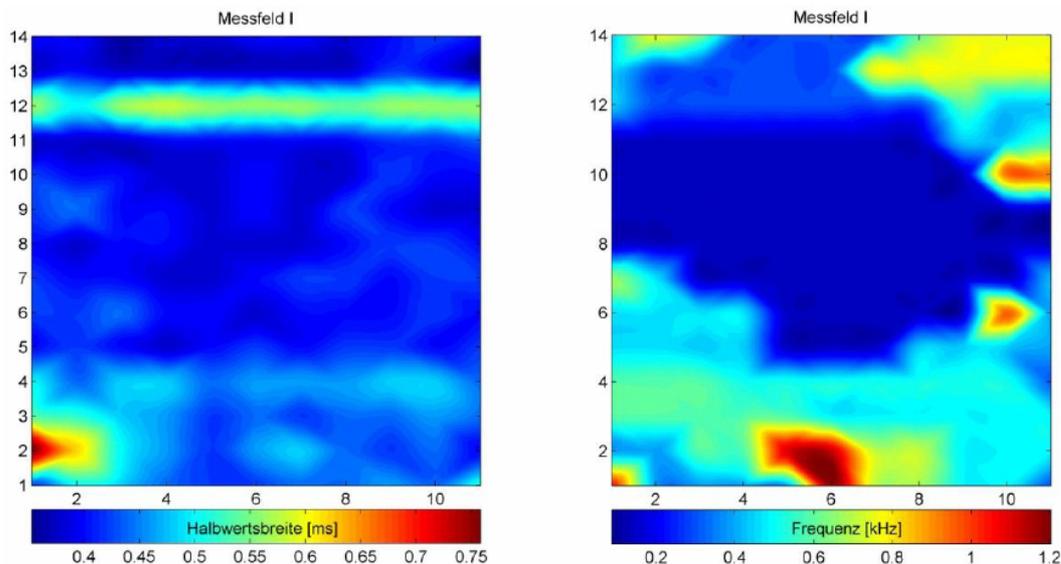


b) Detailansicht

Abb. 72: Durchführung der lokalen Resonanzspektroskopie im Kanal

Messergebnisse und Auswertung

Beispielhaft werden hier die Ergebnisse der Messungen an den Messfeldern I und II dargestellt. In Abb. 73 links sind die Halbwertsbreiten an jedem Messpunkt des Messfeldes I flächig dargestellt. Das Messfeld I besteht aus 11 Messspalten und 14 Messzeilen. Die Messpunkte liegen jeweils im Abstand von 5 cm. Auf der x- und y-Achse sind die jeweiligen Messpunkte aufgetragen. Die Halbwertsbreite ist farbcodiert, von blau für sehr schmal (härtere Bereiche des Materials) bis rot für sehr breit (weichere Bereiche des Materials), dargestellt. Entlang der Zeile 12 ist eine Verbreiterung der Klangsignale gegenüber den Zeilen darüber und darunter zu erkennen. Ein Vergleich mit dem Foto des Messfeldes (vgl. Abb. 71) liefert als Ursache die gut sichtbare Naht des Liners. Die Naht verursacht demzufolge eine Verlängerung der Anregungszeit, ist also weicher als die darüber und darunter liegenden Bereiche. Zusätzlich dazu sind die Hammeranregungen der unteren Messzeilen 1 bis 4 etwas breiter, das Material demnach weicher als der Rest des Messfeldes. Oberflächlich war in diesen Bereichen keine Materialveränderung zu erkennen. Die vergrößerten Halbwertsbreiten deuten aber auf eine innere Schwächung des Materials hin.



a) Halbwertsbreiten der Hammeranregungen an Messfeld I

b) Maximalfrequenz der Amplitudenspektren der Klangsignale an Messfeld I

Abb. 73: Ergebnisse der Messung mit der lokalen Resonanzspektroskopie an Messfeld I [113]

Die Auswertung der Klangsignale erfolgt im Frequenzbereich. Da die Messungen durch ständiges Hämmern bei Schalungsarbeiten am Schacht gestört wurden, mussten die Daten so gut wie möglich von Störgeräuschen befreit werden. Die Auswertung und Interpretation der Klangsignale ist nicht ganz einfach. In diesem Fall wurde für jeden Messpunkt die Frequenz mit maximaler Amplitude ausgewählt, da diese relativ gut die Lage der Hauptenergie widerspiegelt. Die Klangsignale in Abb. 73 b zeigen in etwa das gleiche Bild wie die Hammeranregungen. In den unteren Messzeilen bis etwa Zeile 5 werden im Vergleich zu den Messreihen 6 bis 11 höhere Frequenzen registriert. Zwischen Zeile 6 und 10 werden hauptsächlich tiefe Frequenzen angeregt, die mit Erreichen der Naht bei Zeile 12 wieder ansteigen.

Während die Halbwertsbreiten der Anregungssignale sensibler auf Materialveränderungen reagieren, die näher an der Oberfläche liegen, zeigen die Klangsignale auch Veränderungen in größerer Tiefe.

Die Ergebnisse für Messfeld II sind in Abb. 74 a dargestellt. Messfeld II besteht aus 13 Messspalten und 17 Messzeilen. In den Halbwertsbreiten der Hammeranregungen ist in Zeile 4 wieder eine Erhöhung zu erkennen, die mit der Lage der Naht des Liners übereinstimmt. Zusätzlich dazu werden Bereiche mit vergrößerten Halbwertsbreiten bei Zeile 9 und 10 deutlich. Hier war äußerlich keine Schädigung des Liners sichtbar. Vermutlich sind hier Lufteinschlüsse im Liner zu finden oder Delaminationen von Linerschichten. Aufgrund der großen Halbwertsbreite ist die Schädigung nahe der Oberfläche zu vermuten.

Die Maximalfrequenzen der Amplitudenspektren sind in Abb. 74 b zu sehen. Hier zeichnet sich der Bereich in der Mitte des Feldes durch erhöhte Frequenzen aus. Diese liegen um die Bereiche herum, die in den Anregungssignalen durch erhöhte Halbwertsbreiten aufgefallen sind. Es ist zu vermuten, dass sich hier Änderungen in Linderdicke oder -qualität abzeichnen. Eine Beprobung des Liners an dieser Stelle ist sinnvoll, um die Eigenschaften des Liners an dieser Stelle im Labor genau zu untersuchen.

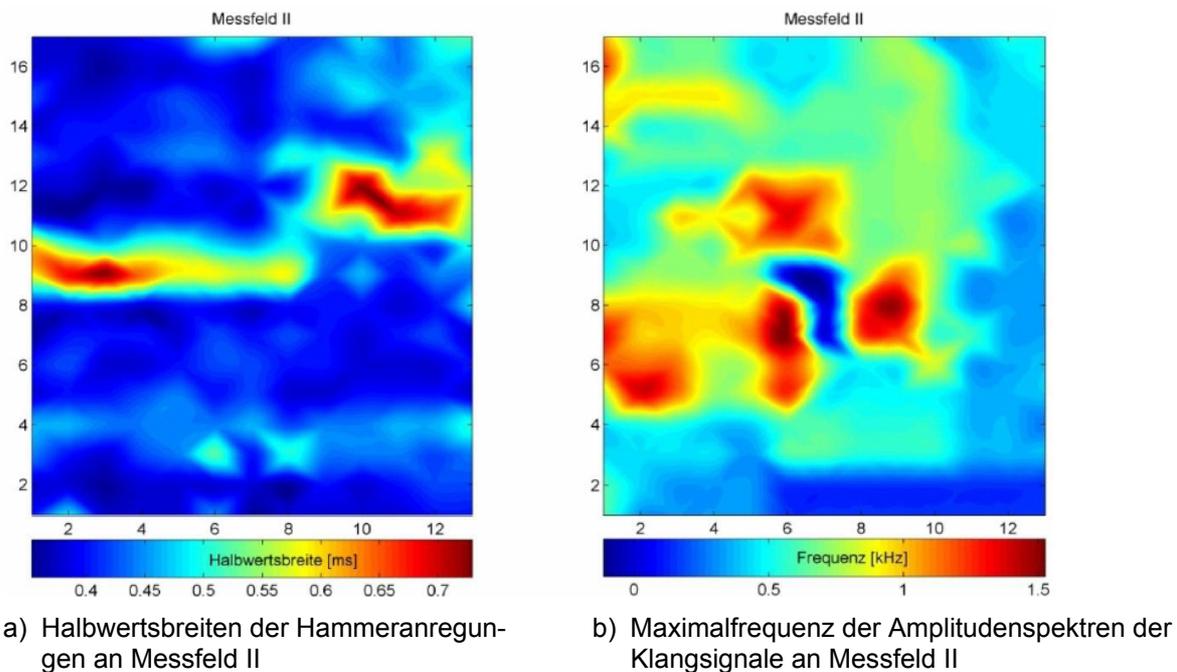


Abb. 74: Ergebnisse der Messung mit der lokalen Resonanzspektroskopie an Messfeld II [113]

Bewertung des Messeinsatzes

Der Praxiseinsatz zeigte, dass ein Einsatz der lokalen Resonanzspektroskopie an Schlauchlinern im Kanal grundsätzlich möglich ist. Mit der lokalen Resonanzspektroskopie erscheint es möglich, ggf. oberflächennahe Inhomogenitäten im Liner über die Auswertung des Anregungssignals zu detektieren. Eventuelle Materialänderungen, wie z. B. die Naht des Liners, konnten in den Auswertungen erkannt werden. Möglicherweise zeigen sich auch Lufteinschlüsse in den Laminaten und Delaminationen der Linerschichten in verlängerten Anregungssignalen. Über eine tieferegehende Auswertung der Klangsignale könnte es möglich

sein, sowohl die oberflächennahen als auch tieferliegende Strukturveränderungen, wie Delaminationen und Luft einschüsse des Liners zu detektieren.

Aufgrund der relativ kleinen Gerätetechnik konnte diese problemlos in den Kanal eingebracht und eingesetzt werden. Während einer Messdauer von ca. fünf Stunden konnten vier Messfelder mit rund 880 Rasterpunkten untersucht werden. Zur Durchführung der Messung vor Ort waren insgesamt 2 ausführende Personen erforderlich. Eine Person, die den Mikrofonsensor führt und das Bauteil mit dem Hammer anschlägt, eine weitere Person, die mit Hilfe des PC-Tablets die Messung online kontrolliert und aufzeichnet. Die Kosten für den Messeinsatz vor Ort belaufen sich auf rund 3.500 € pro Messtag.

Schwächen zeigt das Verfahren, wenn Störgeräusche in der Umgebung die Messung überlagern. Während des Einsatzes im Kanal musste die Messung aufgrund von Schalungsarbeiten am Startschacht punktuell unterbrochen werden.

Zum jetzigen Zeitpunkt steht die Validierung der Messergebnisse noch aus. Hierzu wurde an den sieben untersuchten Messstellen Probenmaterial des Liners gewonnen, das für weitere Untersuchungen und einen Abgleich der Ergebnisse zur Verfügung steht. Dies ist insbesondere sinnvoll, um so bei zukünftigen Messungen genauere Aussagen über Art und Tiefenlage von Schädigungen machen zu können. Die Anwendungsgrenzen der lokalen Resonanzspektroskopie liegen aufgrund der händischen Messdurchführung und einer fehlenden Automatisierung im begehbaren Bereich von Kanalisationsnetzen.

7.7.9 Ultraschall-Echo-Verfahren

7.7.9.1 MPA Stuttgart

Aufgabenstellung

Die nachfolgenden Beschreibungen und Ergebnisdarstellungen sind weitestgehend dem Bericht der MPA Stuttgart entnommen [113]. Das Ultraschall-Echo-Verfahren wird zur Bestimmung von Wanddicken von unterschiedlichen Materialien eingesetzt. Vorrangig kommt dieses Verfahren bislang an Werkstoffen mit relativ gleichmäßigen und homogenen Strukturen, wie z. B. Metall oder Betonbauteilen zur Anwendung. Es erscheint möglich, das Ultraschall-Echo-Verfahren in begehbaren Querschnitten ebenfalls zur Wanddickenbestimmung von Schlauchlinern mit schichtartigem Aufbau einzusetzen. Ziel des Praxiseinsatzes in Köln ist es, die grundsätzliche Eignung des Verfahrens unter den Bedingungen im Kanal an einem Nadelfilz-Liner zu testen und zu überprüfen, ob ggf. die Wanddicke und deren Verteilung über den Querschnitt mit Hilfe des Ultraschall-Echo-Verfahrens bestimmt werden können.

Durchführung

Das Ultraschall-Echo-Verfahren ist, im Gegensatz zum Impakt-Echo-Verfahren und der lokalen Resonanzspektroskopie, ein Laufzeitverfahren, d. h. die hier aufgezeichneten Signale werden im Zeitbereich betrachtet. Das Messprinzip ist in Abb. 75 zu sehen. Über einen Sensor wird ein Ultraschallsignal in das Bauteil eingebracht. An Materialunterschieden, wie Fehlstellen oder der Rückwand des Bauteils, werden die Wellen reflektiert und mit demselben oder einem zweiten Sensor aufgezeichnet.

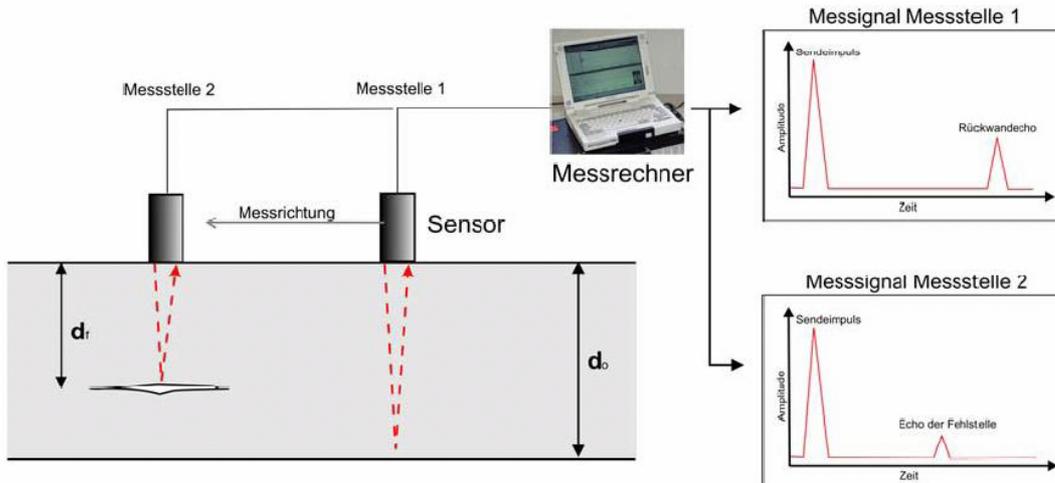
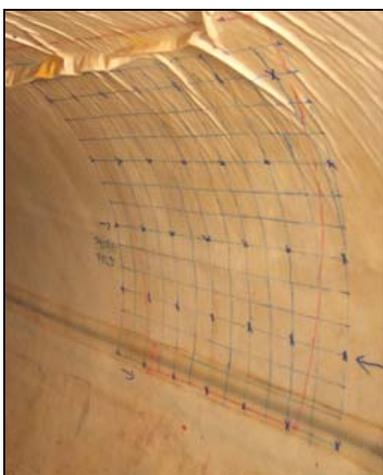


Abb. 75: Messprinzip Ultraschall-Echo-Verfahren [113]

Aus der zeitlichen Lage t der Echos kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit v im Medium eine Defekttiefe oder Dicke d des Bauteils über die Formel $d = v \cdot t/2$ bestimmt werden.

Beim eingesetzten Ultraschall-Gerät handelt es sich um eine Eigenentwicklung des IWB/MPA zur Überprüfung dickwandiger GFK-Bauteile. Das Gerät besteht aus einem PC, der einen leistungsstarken Pulser/Receiver enthält. Die Aufzeichnung und Auswertung der Daten erfolgt über eine speziell dafür entwickelte Software. Es wurden Ultraschallsensoren der Firma Panametrics eingesetzt. Dieses Gerät verwendet Longitudinalwellen (P-Wellen) zur Schadensdetektion. Das Ultraschall-Echo-Verfahren wurde am Probemessfeld und an Messfeld I durchgeführt (vgl. Abb. 76).



a) Probemessfeld



b) Messfeld I

Abb. 76: Mit Ultraschall-Echo-Verfahren untersuchte Messfelder

Messergebnisse und Auswertung

Der Ultraschall-PC wurde speziell für die Anwendung an dicken GFK-Bauteilen am IWB/MPA entwickelt. Das Material des Liners stellt in etwa die gleichen Anforderungen an ein Prüfsystem wie GFK. Das System besteht aus einem Industrie-PC, in dem ein Ultraschall-Pulser/Receiver eingebaut ist. Daran wird ein Ultraschallsensor angeschlossen. Der Ultraschallsensor verfügt über eine breite Koppelfläche und muss in der Regel über ein geeigne-

tes Koppelmittel an das Prüfobjekt angekoppelt werden. Am Probefeld wurde eine Methode der trockenen Ankopplung verwendet, welche an der MPA Universität Stuttgart entwickelt wurde. Wesentlich besser waren die Ergebnisse bei der Verwendung eines konventionellen nassen Koppelmittels, das dann für die Messungen am Messfeld I gewählt wurde. Das Messfeld I wurde aus Zeitgründen nicht vollständig durchgemessen. Von den eigentlich 14 Messzeilen wurden nur 11 erfasst. Aufgezeichnet wird das Ultraschallsignal über die Zeit. In Abb. 77 ist dargestellt, wie ein solches Zeitsignal an einem Messpunkt aussieht. Zum Zeitpunkt 0 ist ein starkes Signal zu erkennen. Dieses ist der Sendepuls, der vom Sensor immer mit aufgezeichnet wird. Nach etwa 0,3 ms tritt ein sehr starkes Signal auf, das der Reflexion der Wellen an der Rückwand des Liners zuzuordnen ist. Nach der doppelten Zeit ist ein weiteres schwaches Signal zu erkennen, das von den Wellen erzeugt wird, die ein weiteres Mal durch den Liner gelaufen sind. Zur flächigen Darstellung der Ergebnisse wurde nun an jedem Messpunkt des Messfeldes I der Zeitpunkt des Rückwandechos bestimmt. Aus dem Zeitpunkt wird anschließend über die Formel in Abb. 63 die Wanddicke berechnet. Die benötigte Schallwellengeschwindigkeit hierfür wurde im Labor nachträglich auf etwa 2.600 m/s bestimmt.

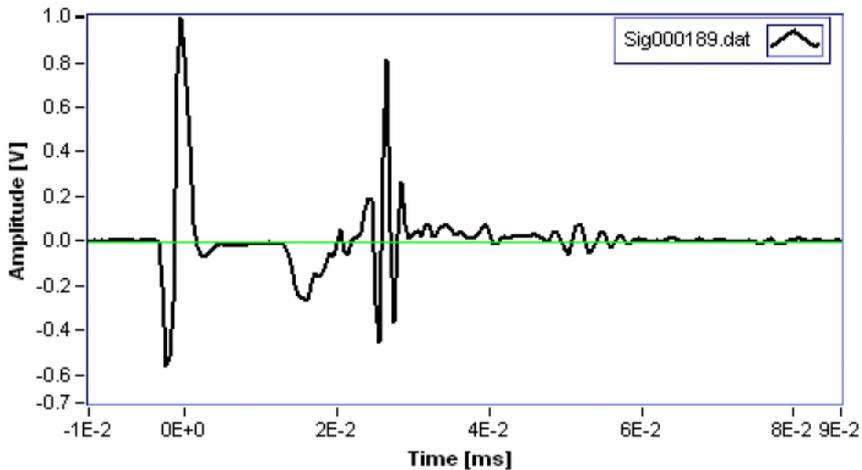


Abb. 77: Zeitsignal einer Messung an Messfeld I [113]

Die Ergebnisse der flächigen Auswertung sind in Abb. 78 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass der Liner in den meisten Bereichen eine Dicke von 36 mm bis 42 mm hat und somit in etwa in der zu erwartenden Größenordnung liegt. Die blauen Bereiche deuten auf Minderdicken bzw. auf Delaminationen der unterschiedlichen Lagen des Liners hin.

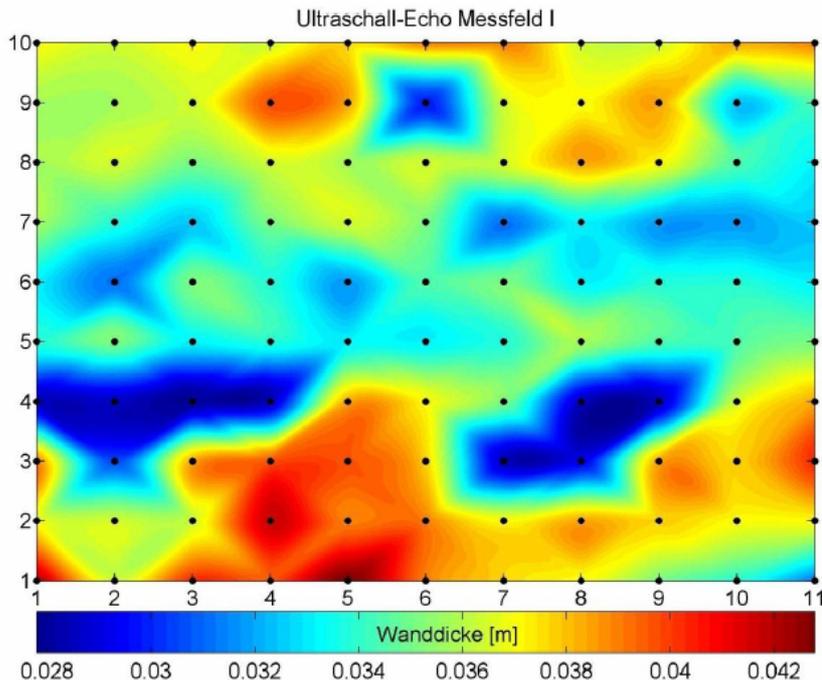


Abb. 78: Ermittelte Wanddicken der Ultraschall-Echo Messung mit dem Ultraschall-PC [113]

Bewertung des Messeinsatzes

Der Praxiseinsatz zeigte, dass ein Einsatz des Ultraschall-Echo-Verfahrens an Schlauchlinern im Kanal grundsätzlich möglich ist. Die Messergebnisse legen die Vermutung nahe, dass das Verfahren für eine Bestimmung von Wanddicken an Schlauchlinern geeignet sein könnte. Durch Einsatz des Ultraschall-Echo-PC könnte es ggf. mit Hilfe des Ultraschall-Echo-Verfahren außerdem möglich sein, Minderdicken oder tieferliegende Delaminationen im Liner zu orten.

Zum jetzigen Zeitpunkt steht die Validierung der Messergebnisse noch aus. Hierzu wurde an den sieben untersuchten Messstellen Probenmaterial des Liners gewonnen, das für weitere Untersuchungen und einen Abgleich der Ergebnisse zur Verfügung steht. Dies ist insbesondere sinnvoll, um so bei zukünftigen Messungen genauere Aussagen über Art und Tiefenlage von Schädigungen machen zu können.

Aufgrund der kurzen Messdauer vor Ort ist keine verbindliche Aussage über die Tagesleistung möglich. Aufgrund der ähnlichen Vorgehensweise wie beim Impakt-Echo-Verfahren und der lokalen Resonanzspektroskopie ist von einem ähnlichen Untersuchungsumfang von ca. fünf Messfeldern mit ca. 870 Rasterpunkten pro Messtag auszugehen. Zur Durchführung der Messung vor Ort waren insgesamt zwei ausführende Personen erforderlich: Eine Person, die den Ultraschallsensor führt und eine weitere Person, die mit Hilfe des PCs die Messung online kontrolliert und aufzeichnet. Die Kosten für den Messeinsatz vor Ort belaufen sich auf rund 3.500 € pro Messtag.

Das verwendete Ultraschallgerät wurde an der Universität Stuttgart (IWB/MPA) speziell für die Anwendung an dicken Kunststofflaminate entwickelt, die besondere Anforderungen an Hard- und Software stellen. Dadurch, dass die Ultraschallsensoren über eine Silikonpaste angekoppelt wurden, konnten besonders aussagekräftige Signale aufgezeichnet werden. Zur Beschleunigung der Messungen könnte auch auf eine trockene Ankopplung der Sensoren

zurückgegriffen werden, die an anderen Materialien schon erfolgreich angewandt wird. Die trockene Ankopplung ist im Moment für GFK-Werkstoffe optimiert, kann aber mit Hilfe einiger Tests auch an das Linermaterial angepasst werden. Eine schnelle Überprüfung größerer Flächen wäre dann möglich. Das Ultraschall-Echo-System ist außerdem ebenfalls für die automatisierte Messung mit Hilfe eines Roboters ausgelegt. Eine automatisierte Prüfung von Kanälen mit geringerem Querschnitt, die nicht mehr begehbar sind, könnte hierüber realisiert werden.

7.7.9.2 Fraunhofer IBMT

Durchführung

Im Rahmen des Vor-Ort-Einsatzes in Köln wurde das Ultraschall-Verfahren ebenfalls durch das Fraunhofer Institut für Biomedizinische Technik (IBMT) durchgeführt. Die nachfolgenden Beschreibungen und Ergebnisdarstellungen sind weitestgehend dem Bericht des Fraunhofer IBMT entnommen [114]. Bei den Messungen wurden zwei unterschiedliche Gerätekonfigurationen verwendet:

- Labor-Set-Up bestehend aus einem Pulser-Receiver und einem Oszilloskop
- TRM (Transmit-Receive-Modul) mit Laptop

Das Labor-Set-Up (vgl. Abb. 79) besteht aus einem Pulser-Receiver von Olympus (Typ 5800PR) und einem Oszilloskop von Hewlett Packard (Typ 54520A). Das hier beschriebene Labor-Set-Up wird standardmäßig am IBMT für Ultraschallmessungen verwendet, für die noch kein spezielles System (Produkt) entwickelt wurde. Im Wesentlichen dient es bei Machbarkeitsuntersuchungen zur Ermittlung der für eine Messung erforderlichen Parameter und Auswerteverfahren.

Bei den Messungen in Köln wurde ein weiteres System eingesetzt, das primär für Ultraschall-Anwendungen im Bereich der Automobilindustrie entwickelt wurde. Bei diesen Anwendungen handelt es sich um Abstands-, Füllstands- oder Durchflussmessungen. Das TRM genannte Gerät ist eine kompakte Sende-Empfangs-Elektronik, die über eine serielle Schnittstelle an einen Laptop angeschlossen werden kann (vgl. Abb. 80). Das DSP (Digitaler Signal Prozessor) basierte System kann hinsichtlich der Ultraschallparameter frei eingestellt werden und erlaubt bei der Signalauswertung einen Stand-Alone-Betrieb, d. h. es muss nicht mit einem Rechner verbunden werden. Es wird am IBMT als Entwicklungsplattform für neue Ultraschallanwendungen genutzt. Dabei werden die Empfangssignale aus dem TRM über die serielle Schnittstelle an einen Laptop zur Visualisierung übertragen und auf dem Display als A-Scan dargestellt. Über Labview-VIs werden die Parameter wie Frequenz, Signalform und Verstärkung eingestellt.



Abb. 79: Labor-Set-Up bei den Messungen im Kanal; oben Oszilloskop, darunter Pulser-Receiver



a) TRM in einem blauen Gehäuse angeschlossen an einen Laptop
 b) Messungen mit dem TRM vor Ort

Abb. 80: TRM-Messequipment [118]

Bewertung des Messeinsatzes

Die in Köln durchgeführten Messungen konnten nicht in dem geplanten Umfang und mit dem erwarteten Erfolg durchgeführt werden. Ursprünglich war vorgesehen, dass auf einer Kanal-länge von 35 m an mehreren bereits vormarkierten Stellen (Messraster) gemessen wird. Allerdings erwies sich das Handling mit den Geräten im Kanal als sehr schwierig, so dass nur wenige Messungen an einer Stelle durchgeführt werden konnten, deren Auswertung vor Ort nicht möglich war.

Bezüglich des Handlings der Geräte, ist anzumerken, dass es für das Messpersonal des IBMT die erste Gelegenheit war, außerhalb des Labors in einem Abwasserkanal zu messen. Die Messung mit den beiden Gerätekonfigurationen gestaltete sich als sehr unhandlich bzw. nicht erfolgreich, was nicht nur auf die fehlende Praxiserfahrung des messenden Personals zurückzuführen war, sondern auch auf die örtlichen Umstände. Gründe hierfür liegen sehr wahrscheinlich in einer nicht ausreichend glatten Innen- und Außenwand des Liners.

Der Ultraschallwandler wird bei der Messung an der zugänglichen Innenwand des Liners über ein geeignetes Koppelmittel (Vaseline, Gel etc.) angekoppelt, das verhindert, dass sich zwischen der Wandleroberfläche und der Wand ein Luftspalt befindet, über den kein Schall eingekoppelt werden kann. Die Koppelfläche zwischen Wandler und Wand muss dazu hinreichend glatt sein, damit der Schall möglichst gleichmäßig und ohne zu große Streuverluste eingekoppelt werden kann. Inwieweit die Rauigkeit bzw. Beschaffenheit der Linerinnenwand die Messung beeinträchtigt, muss durch weitere Untersuchungen quantifiziert werden.

Für eine hinreichende Reflexion an der Außenwand des Liners muss die Oberfläche zum Kanalmaterial (hier Mauerwerk) ebenfalls hinreichend glatt sein. Messungen an Proben im Labor haben gezeigt, dass eine zu stark aufgeraute Oberfläche die Messung behindert oder ganz unmöglich macht. Auch hier sind weiterführende quantitative Untersuchungen durchzuführen. Außerdem muss geprüft werden, ob es möglich ist, durch ein geeignetes Zusatzmaterial bzw. eine spezielle Beschichtung auf der Außenwand eine glatte Reflexionsschicht zu erzeugen. Denkbar wären z. B. Metallfolien in Bänderform im Kämpferbereich.

Die im Vorfeld der Praxiseinsätze durchgeführten Messungen im Labor an Linerproben aus GFK und Nadelfilz waren erfolgreich. Mit Hilfe des Ultraschall-Echo-Verfahrens war es möglich, mit beiden Gerätekonfigurationen Linerwanddicken an Probenmaterial im Labor zu bestimmen. Für einen Einsatz im Kanal ist es nun erforderlich, die Gerätetechnik auf die besonderen Bedingungen des Kanals anzupassen. Der Praxiseinsatz in Köln lieferte vor diesem Hintergrund wertvolle Informationen für eine Weiterentwicklung und Modifizierung der vorhandenen Gerätetechnik.

Fazit und Ausblick

Die Ultraschalltechnik hat in vielen technischen und medizinischen Anwendungen aufgrund ihrer Robustheit und Zuverlässigkeit als Messmethode für die unterschiedlichsten physikalischen und physiologischen Größen einen hohen Stellenwert. Ihr Einsatz zur Dickenmessung und Charakterisierung von Linern steht allerdings erst am Anfang. Die bislang im Labor und vor Ort durchgeführten Wanddickenmessungen an Linern mit Ultraschall können wie folgt zusammengefasst und bewertet werden:

1. Eine Messung der Wanddicke von Linern ist mit Ultraschall prinzipiell möglich.
2. Eine erfolgreiche Messung der Wanddicke hängt von der Oberflächenbeschaffenheit (innen und außen) und der inneren Struktur des Liners ab.
3. Das bislang verwendete Laborequipment ist wegen der umständlichen Handhabbarkeit für Messungen im Kanal wenig geeignet.
4. Eine Dickenmessung mit dem TRM ist grundsätzlich möglich, das System muss aber für die Anwendung im Kanal entsprechend weiterentwickelt werden.

In weiterführenden Untersuchungen sollten die folgenden Fragen beantwortet und Aufgaben erledigt werden:

1. Ist es möglich die Außenwand des Liners so zu präparieren, dass eine glatte Fläche für eine gute Schallreflexion entsteht (z. B. Beschichtung mit einer Metallfolie)?

2. Die für die quantitative Dickenmessung im Kanal erforderliche Kalibrierung auf die Schallgeschwindigkeit im Linermaterial kann in situ an Proben vorgenommen werden, die beim Öffnen von Zugängen und Zuläufen anfallen.
3. Im Rahmen von Reihenuntersuchungen sollten die unterschiedlichen Linermaterialien akustisch charakterisiert und klassifiziert werden (akustische Impedanz, Schallgeschwindigkeit, Dämpfung). Dabei sollten auch die in Frage kommenden Ultraschallfrequenzen und Sendesignale sowie die jeweils zu sendende Energie (Leistung) in Abhängigkeit von Material und Probendicke spezifiziert werden.
4. In Abhängigkeit der Spezifikationen aus Punkt 3 sollte ein TRM basiertes System so umgerüstet werden, dass es als Demonstrator für praktische Messungen im Kanal eingesetzt werden kann.
5. Es sind verschiedene Signalverarbeitungsmethoden zu untersuchen, die für eine vollautomatische Auswertung der Messsignale benutzt werden können.
6. Auf der Grundlage der Ergebnisse aus den Punkten 4 und 5 wäre ein mögliches (Markt-) Produkt zu spezifizieren und seine Chancen am Markt auszuloten.
7. Messungen an einer nicht ausgehärteten Linerprobe legen nahe, dass mit Hilfe des Ultraschalls nicht nur eine quantitative Erfassung der Wanddicke möglich ist, sondern auch eine Qualitätskontrolle nach dem Einziehen des Liners bzw. nach einer längeren Standzeit (Alterung) möglich sein könnte. Hierzu müssen allerdings weitere Untersuchungen angestellt werden.

7.8 Zusammenfassung und Ausblick

Die sechs ausgewählten zerstörungsfreien Prüfverfahren konnten im Praxiseinsatz alle ihre grundsätzliche Eignung für den Einsatz an Schlauchlinersystemen nachweisen. Es stehen somit Verfahren zur Verfügung, die prinzipiell

- eine 3D-Vermessung des Altrohres zur Konfektionierung des Liners,
- eine Erfassung des zeitlichen und örtlichen Temperaturverlaufs während der Sanierung und somit
- eine Kontrolle und ggf. Steuerung des Aushärtungsvorgangs,
- eine 3D-Vermessung der Lineroberfläche einschließlich optischer Auffälligkeiten, wie Falten, Wellen und Beulen,
- eine Detektion von Fehlstellen und geschwächten Strukturen, wie z. B. Hohlstellen und Delaminationen,
- eine Detektion von Ringspalten zwischen Altrohr und Liner sowie
- eine Bestimmung der Linerwanddicke

ermöglichen und somit ggf. eine gezielte Identifizierung möglicher Schwachstellen des Liners erlauben.

Die getesteten zerstörungsfreien Prüfverfahren wurden auf der Basis der Baustellenerfahrungen hinsichtlich ihrer theoretischen Aussagekraft, ihrer Praxistauglichkeit, Aufwand und

Kosten sowie vorhandenem Verbesserungspotential bewertet und der klassischen Standard-Probenentnahme gegenübergestellt. In Tab. 9 ist die Bewertung der zerstörungsfreien Prüfverfahren hinsichtlich der oben genannten Aspekte sowie die sich daraus ergebende Rangfolge der Verfahren dargestellt.

Die Temperaturmessung mittels Glasfaserkabeln ist als einziges der getesteten zerstörungsfreien Prüfverfahren baubegleitend einsetzbar. Sie ermöglicht eine Online-Überwachung und Aufzeichnung der auftretenden Temperaturen in Längsrichtung und - je nach Anordnung der Messkabel - über den Querschnitt des Liners während der gesamten Dauer der Sanierung. Eine Kontrolle bzw. ggf. Steuerung des Härtungsvorgangs des Liners ist somit möglich. Im Gegensatz zu den anderen untersuchten zerstörungsfreien Prüfverfahren ist die Temperaturmessung bereits jetzt in allen Nennweitenbereichen einsetzbar. Die Installation der Messkabel in der Haltung ist aufwendig. Die Vorbereitungsarbeiten durch bis zu 4 ausführende Personen dauerten für den Vor-Ort-Einsatz in Köln ungefähr 4 Tage. Im nicht begehbaren Bereich ist der Einzug der Kabel, z. B. im Scheitel- und Sohlbereich weniger aufwendig und durch 2 ausführende Personen für 2 ausgewählte Haltungen innerhalb eines halben Tages umsetzbar. Der Messaufwand während der Sanierung ist verhältnismäßig gering, die Messung läuft – falls gewünscht – nach Start der Messwerterfassung auch ohne Messpersonal vor Ort. Die Kosten für den Messeinsatz in Köln liegen bei ca. 6.750 €. Verbesserungspotential zeigte sich vor allem bei der Lagesicherung der Kabel im nicht begehbaren bzw. in der Reduzierung des Montageaufwandes im begehbaren Bereich. Beides könnte durch eine werksseitige Integration der Messkabel in den Linern ausgeräumt werden.

Die anderen zerstörungsfreien Verfahren werden ausschließlich zur Überprüfung des Sanierungsergebnisses nach Abschluss der Sanierung eingesetzt und sind in der vorliegenden Gerätekonfiguration derzeit nur im begehbaren Nennweitenbereich einsetzbar. Eine Miniaturisierung der Gerätetechnik und Automatisierung wird zum jetzigen Zeitpunkt lediglich für das Ultraschall-Echo-Verfahren der MPA Stuttgart und die Wärmefluss-Thermographie des Fraunhofer WKI in Aussicht gestellt. Die Prüfverfahren erlauben eine punktuelle bzw. flächenhafte Überprüfung ausgewählter Stellen des Liners. Die Durchführung der jeweiligen Messungen ist mit großem zeitlichen Aufwand verbunden, in einem Tageseinsatz konnten jeweils ca. 5 Messraster mit etwa 800 Messpunkten bzw. 7 Messfelder untersucht werden. Die Auswertung der Messergebnisse ist für alle Verfahren aufwendig und kann weitestgehend erst im Nachgang der Messung im Büro erfolgen.

Das Ultraschall-Echo-Verfahren erlaubt für ausgewählte Stellen die punktuelle Bestimmung von Linerwanddicken. Zur Durchführung der Messung waren vor Ort 2 ausführende Personen erforderlich, der Personalaufwand und die Prüfkosten mit rund 2.400 € bis 3.500 € liegen im mittleren Bereich. Mit Hilfe des Impakt-Echo-Verfahrens ist eine Detektion von Ringspalten (Ja/Nein) zwischen Liner und Altrohr und ggf. auch eine Bestimmung von Linerwanddicken möglich. Bei der Messdurchführung ist mit einem mittleren Personalaufwand von 2 ausführenden Personen und mittleren Prüfkosten von rund 3.500 € pro Messtag zu rechnen. Auffällige Strukturen, Inhomogenitäten und geschwächte Strukturen der Linerwand – auch in verschiedenen Tiefenlagen – sind mittels Wärmefluss-Thermographie und der lokalen Resonanzspektroskopie detektierbar. Der Personalaufwand und die Prüfkosten fallen bei der Wärmefluss-Thermographie (3 ausführende Personen, ca. 6.000 €/Messtag) hoch, bei der lokalen Resonanzspektroskopie (2 ausführende Personen, ca. 3.500 €/Messtag) mittel aus.

Das 3D-Laserscanning ermöglicht eine vollständige Erfassung der Schalenoberfläche des Liners. Aufgrund der zu geringen Messgenauigkeit des Verfahrens ist jedoch keine Bestimmung des Abstandes zwischen der Innenoberfläche des Altrohres und des Liners und in der Folge auch nicht die angestrebte Bestimmung von Ringspaltmaßen möglich.

Alle eingesetzten Prüfverfahren des Praxiseinsatzes in Köln bedürfen noch einer umfangreichen Validierung der erzielten Ergebnisse. Hierzu sind detaillierte, weiterführende Untersuchungen erforderlich. Beispielsweise könnte ein Abgleich der identifizierten auffälligen Bereiche und Strukturen, detektierten Ringspalte sowie der gemessenen Linerwanddicken anhand der aus dem Kanal entnommenen Proben bzw. im Kanal erfolgen. Diese sehr aufwendige Überprüfung der Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfverfahren war nicht Bestandteil dieses Forschungsvorhabens und steht zum jetzigen Zeitpunkt noch aus. Vor einem standardmäßigen Einsatz an Schlauchlinersanierungen im begehbaren Bereich sind diese offenen Fragen zu lösen.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass zahlreiche zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Verfügung stehen, die ein hohes Potential für eine Anwendung an Schlauchlinersystemen besitzen. Allerdings stellen die zerstörungsfreien Prüfverfahren zum jetzigen Stand der Gerätetechnik (noch) keine Alternative zur bisherigen Probenentnahme (vgl. Kapitel 10) für eine Überprüfung der erreichten Sanierungsqualität dar. Für einen standardmäßigen Einsatz sind die Verfahren hinsichtlich der erzielten Ergebnisse zu validieren, weiterzuentwickeln und größtenteils die Gerätetechnik zu verkleinern bzw. zu automatisieren. Die Prüfverfahren könnten dann eine sinnvolle Ergänzung zur bisherigen Qualitätssicherung in Form der optischen Inspektion und der Laborprüfung an entnommenen Linerproben darstellen.

Tab. 20: Bewertung der zerstörungsfreien Prüfverfahren auf Basis des Testeinsatzes im begehbaren Bereich

Verfahren	Theoretische Aussagekraft	Praxis-tauglichkeit	Aufwand/Kosten	Verbesserungspotential	Bemerkungen
Standard-Probenentnahme	+++	-	+++	+	Entnahme durch Sanierungsfirma (i. d. R. im Beisein des Auftraggebers)
	mech. Kennwerte Dichtigkeit	i.d.R. nur 1 x Schachtprobe Streuung nicht erfasst	ger. Aufwand f. Entnahme Standard-Laborprüfung einschließlich Auswertung < 300 €/Probe	Materialstreuung erfassen Entnahme-/Reparaturmeth. für Haltungsproben	
Baubegl. Temperaturmessung	+	++	-	+++	3-4 ausführende Personen automatische Messung ca. 4 Tage Vorbereitung ca. 4 Tage Messung
	Temperaturverlauf Wärmeeintrag	etabliertes Messverfahren Einsatz in allen Nennweiten zahlreiche Messpunkte Ergebnisvalidierung unklar	Vorbereitung aufwändig hoher Personalaufwand geringer Messaufwand aufwändige Auswertung ca. 6.750 €/Messeinsatz	Lagesicherung Kabel Integration Kabel in Liner Validierung	
Ultraschall-Echo	++	-	-	+++	nur nach Linereinbau einsetzbar 2 ausführende Personen ca. 5 Messraster/Tag
	Wanddicke	nur begehbare Kanäle Prüfung ausgew. Stellen Ergebnisvalidierung unklar	mittl. Personalaufwand große Messdauer aufwändige Auswertung ca. 2.400 - 3.500 €/Messtag	(Geräteweiterentwicklung) Automatisierung Validierung	
Impakt-Echo	++	-	-	++	nur nach Linereinbau einsetzbar 2 ausführende Personen ca. 5 Messraster/Tag
	Ringspalt detektierbar (Wanddicke)	nur begehbare Kanäle Prüfung ausgew. Stellen Ergebnisvalidierung unklar	mittl. Personalaufwand große Messdauer aufwändige Auswertung ca. 3.500 €/Messtag	Automatisierung Validierung	
Thermographie	+	-	--	+++	nur nach Linereinbau einsetzbar 3 ausführende Personen ca. 7 Messfelder/Tag
	Inhomogenitäten	nur begehbare Kanäle Prüfung ausgew. Flächen Ergebnisvalidierung unklar	hoher Personalaufwand große Messdauer aufwändige Auswertung ca. 6.000 €/Messtag	Miniaturisierung Automatisierung Validierung	
3D-Laser-scanning	++	--	--	++	nur nach Linereinbau einsetzbar 4 ausführende Personen 4 h Messung für 1 Haltung
	Vollständige Erfassung der Schalenoberfläche	etabliertes Messverfahren nur begehbare Kanäle Messgenauigkeit für Wand/Ringspalt zu gering	hoher Personalaufwand geringe Messdauer aufwändige Auswertung ca. 10.000 €/Messtag	Miniaturisierung Automatisierung Messgenauigkeit	
Resonanzspektroskopie	+	-	-	++	nur nach Linereinbau einsetzbar 2 ausführende Personen ca. 5 Messraster/Tag
	Inhomogenitäten	nur begehbare Kanäle Prüfung ausgew. Stellen Ergebnisvalidierung unklar	mittl. Personalaufwand große Messdauer aufwändige Auswertung ca. 3.500 €/Messtag	Automatisierung Validierung	

8 Statische Bewertung von Auffälligkeiten

Liner sind aus statischer Sichtweise sogenannte „schlanke Tragkonstruktionen“, die bei Vorhandensein von Wasseraußendruck für vergleichsweise hohe Druckkräfte zu dimensionieren sind. Unter „vergleichsweise“ ist zu verstehen, dass die Wanddicken üblicherweise klein ausgeführt werden, der E-Modul von Kunststoffen gering ist und zudem die Kriecheigenschaften des Werkstoffs zu berücksichtigen sind. Die Nachweise sind für alle in [9] definierten Altrohrzustände I bis III zu führen. Eine Zusammenfassung der Berechnungsansätze findet sich in [10].

Die Bemessungsmodelle für Schlauchliner nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9] gehen von den zweidimensionalen Ansätzen des Kreisringmodells aus, durch die auch die Imperfektionen nur zweidimensional erfasst werden können. Mit Hilfe der Finite Element Methode sind demgegenüber auch dreidimensionale Simulationen des Tragverhaltens des Liners bei nahezu beliebiger Verteilung der Imperfektionen möglich (vgl. [11]). Durch die FH Münster, Prof. Dr.-Ing. B. Falter, wurden in den folgenden dargestellten statischen Berechnungen mögliche Einflüsse von Imperfektionen geometrischer und werkstofflicher Art und deren Auswirkungen auf die Tragfähigkeit des Liners auf der Basis von 3D-Simulationen untersucht [11]. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

8.1 Allgemeines

Die folgenden Imperfektionen, die bei einer Abnahme von Liningmaßnahmen festzustellen sind, werden exemplarisch für einen Liner unter Wasseraußendruck in einem Altrohr der Nennweite DN 300 (Altrohrzustand I) untersucht:

1. Örtliche Vorverformung w_v (vgl. Kapitel 8.4.2),
2. Längsfalte (vgl. Kapitel 8.4.3),
3. Quersfalte, gefüllt und ungefüllt (vgl. Kapitel 8.4.4),
4. bereichsweise verringerter Elastizitätsmodul (vgl. Kapitel 8.4.5) und
5. bereichsweise verringerte Wanddicke (vgl. Kapitel 8.4.6).

Zum Versatz mit Faltenbildung s. experimentelle Untersuchungen Alberding/Falter [124]. Im Unterschied zu den ungünstigen Festlegungen im ATV-Merkblatt 127-2 [9] traten bei den Beulversuchen keine verringerten kritischen Lasten auf.

Seitenanschlüsse werden im Rahmen dieser Untersuchungen nicht näher betrachtet. Die Untersuchungen werden für einen Synthesefaser-Liner mit isotropem Werkstoffverhalten geführt. Sie sind nicht auf den GfK-Liner mit unidirektionaler Orientierung der Fasern zu übertragen. Zwischen Altrohr und Liner wird stets der Mindestwert des Ringspaltens von $w_s = 0,5 \%$ des Radius für Schlauchliner nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9] angesetzt. Die übrigen vorgesehenen Imperfektionen (örtliche Vorverformung, Längsfalte, Quersfalte, verringerter E-Modul und verringerte Wanddicke) werden im Rahmen der Untersuchungen einzeln betrachtet und bezüglich ihrer Ausdehnung variiert.

In Tab. 21 ist eine Übersicht der Berechnungsvariationen gegeben.

Tab. 21: Berechnungsparameter, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck

Imperfektion	Parameter/Variation	Wasser- außendruck	Örtliche Vorver- formung	Ringspalt	Liner FE- Modelltyp System
		h_{W, S_0}	w_v	w_s	
		m	% / mm	% / mm	
1. örtliche Vorverformung	$w_v = 2\%$ Öffnungswinkel $\alpha = 40^\circ$ konstant Kalibrierung des Modells mit dem Programm Linerb [125]	1,5	2% / 3 mm	0,5% / 0,74 mm	shell, ¼-System
	$w_v = 0 - 2\%$ Öffnungswinkel $\alpha = 40^\circ$ in Rohrlängsrichtung veränderlich	5,0	0 bis 2% / 0 bis 3 mm	0,5% / 0,74 mm	
2. Längsfalte	Höhe $h_F = 0 - 20$ mm Öffnungswinkel $\alpha_F = 10^\circ$ in Rohrlängsrichtung veränderlich	5,0	-	0,5% / 0,74 mm	shell, ¼-System
3. Querfalte	a) Höhe $h_F = 0 - 20$ mm, unge- füllt Öffnungswinkel $\alpha_F = 10^\circ$	5,0	-	0,5% / 0,74 mm	shell, ½-System
	b) Höhe $h_F = 0 - 20$ mm, unge- füllt Öffnungswinkel $\alpha_F = 10^\circ$				solid, ¼-System
	c) Höhe $h_F = 0 - 20$ mm, gefüllt Öffnungswinkel $\alpha_F = 10^\circ$				
4. bereichsweise verringertes E-Modul	$0,5 \cdot E_L$ und $1 \cdot E_L$ Stufe, ellipsenförmig	5,0	-	0,5% / 0,74 mm	shell, ½-System
5. bereichsweise verringerte Wanddicke	a) $0,5 \cdot s_L$ bis $1 \cdot s_L$ Umfangsrichtung	5,0	-	0,5% / 0,74 mm	solid, ¼-System
	b) $0,5 \cdot s_L$ bis $1 \cdot s_L$ Längsrichtung				
	c) $0,5 \cdot s_L$ und $1 \cdot s_L$ Stufe, ellipsenförmig				shell, ½-System

8.2 Berechnungsannahmen und -voraussetzungen

8.2.1 Altrohrgeometrie, Altrohrzustand I

Geometrie	Kreisquerschnitt DN 300 (= Innendurchmesser d_i) starre Ummantelung
-----------	---

8.2.2 Linergeometrie und Werkstoffkennwerte

Geometrie	Kreisprofil mit Außendurchmesser Liner = Innendurchmesser Altrohr
Wanddicke	$s_L = 5,0 \text{ mm}$
Werkstoff	Nadelfilz mit Epoxidharz getränkt
Elastizitätsmodul	$E_L = 1.400 \text{ N/mm}^2$ (Langzeit)
Biegespannung	$\sigma_{bZ,L} = 18 \text{ N/mm}^2$ (Langzeit)
Druckfestigkeit	$\sigma_{D,L} = 25 \text{ N/mm}^2$ (Langzeit)
Querdehnzahl	$\mu = 0,35$
Einbau	Schlauchverfahren, nicht verklebt

8.2.3 Belastung

Wasseraußendruck	$h_{W,So} = 1,5 \text{ m}$ für Modellkalibrierung $h_{W,So} = 5,0 \text{ m}$ für Variantenberechnungen
------------------	---

8.2.4 FE-Modell [126]

Die Untersuchungen zur Erfassung der Auswirkungen von in Längsrichtung begrenzten Imperfektionen sind anhand eines räumlichen Finite Element Modells möglich.

Das 3-D-Modell besteht aus dem Altrohr DN 300 und dem Liner mit einer Nennwanddicke von 5 mm. Der Liner und das Altrohr werden als Shellelemente (Schalenkörper) aus einer halben Kreiszylinderschale mit einem Innendurchmesser des Altrohres von 300 mm (DN 300) und einem Außendurchmesser des Liner von

$$d_{a,Liner} = 300 - 2 \cdot w_s = 300 - 2 \cdot 0,5 \cdot 147,5 / 100 = 298,5 \text{ mm}^7$$

durch Extrusion bzw. Rotation generiert (vgl. Abb. 81). Zur Vereinfachung des Modells wird das Altrohr als starre Ummantelung (rigid body) mit einem Referenzpunkt simuliert.

Bei den Imperfektionen Querfalte und bereichsweise verringerte Wanddicke wird der Liner durch Solid-Elemente generiert.

Die Modelllänge beträgt 900 mm (= 3 · DN). Zur Reduktion des Rechenaufwandes wird in Umfangs- und z. T. in Längsrichtung die Symmetrie der Belastung und des Systems genutzt, d. h. es wird ein Viertel- bzw. ein halbes Modell abgebildet.

Ein Viertelsystem wird in den Berechnungen mit örtlicher Vorverformung, Längsfalte, Querfalte mit Solid-Elementen und Wanddicke mit Solid-Elementen zugrunde gelegt. Bei den Im-

⁷ Innendurchmesser Altrohr abzüglich 0,5 % des Linerradius als Ringspalt

perfektionen mit lokal begrenzten Störungen, wie bereichsweise verringerter E-Modul und verringerte Wanddicke sowie Querfalte mit Shell-Elementen, wird ein halbes Systems ohne Symmetriebedingung in der Mittelachse generiert.

Das Altrohr ist mit dem Referenzpunkt verbunden und dort unverschieblich gehalten (alle sechs Freiheitsgrade behindert). Der Liner ist an den Enden und an der Schnittkante in Längsrichtung mit den Symmetriebedingungen „Lagerung senkrecht zur Schnittebene und Verhinderung der Verdrehung“ gehalten (vgl. Abb. 81). Hiermit wird der Anschluss an die übrige Struktur simuliert.

Nach Merkblatt ATV-M 127-2 [9] sind in der statischen Berechnung für Altrohrzustand I eine Spaltbildung $w_s = 0,5 \%$ des Linerradius ($w_s = 0,5 \cdot 147,5 / 100 = 0,74 \text{ mm}$) und eine örtliche Vorverformung $w_v = 2 \%$ des Linerradius ($w_v = 2 \cdot 150 / 100 = 3 \text{ mm}$) als Mindestwerte anzusetzen. Der Ringspalt wird den FE-Berechnungen stets zugrunde gelegt. Die örtliche Imperfektion w_v und die anderen Variationsmöglichkeiten (Faltenbildung, verringerter E-Modul und Wanddicke) werden jeweils unabhängig voneinander betrachtet.

Zwischen Liner und Altrohr wird ein reibungsloser Kontakt angesetzt. Dabei wird das Altrohr als „Mastersurface“ definiert, um eine Durchdringung des Altrohres durch den Liner zu verhindern.

Die Beanspruchung aus einem Außendruck wird als hydrostatischer Druck auf den Liner aufgebracht (vgl. Abb. 81). Da Altrohrzustand I untersucht wird, werden die Erd- und Verkehrslasten weiterhin dem Altrohr-Bodensystem zugewiesen. Sie treten daher in den statischen Berechnungen des Liners nicht auf.

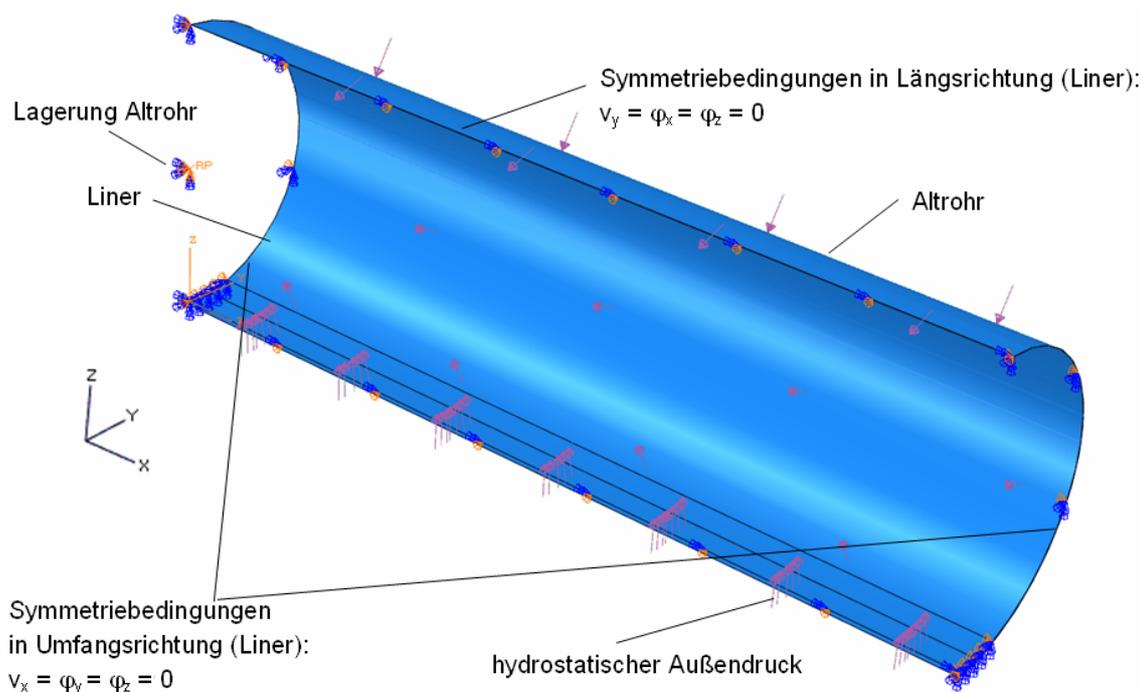


Abb. 81: FE-Modell DN 300 mit örtlicher Vorverformung und Ringspalt, Liner hier simuliert durch Shell-Elemente

Die Diskretisierung der einzelnen Modell-Parts erfolgt mit Elementen des Typs S4R (Shell-elemente) und des Typs C3D8R (Solidelemente) [126]. Den Berechnungen wird i. d. R. eine

Elementgröße von 5 mm zugrunde gelegt. Voruntersuchungen zeigen, dass für die Querfalte eine Netzverfeinerung im Bereich der Querfalte auf 2,5 mm / 1 mm erforderlich ist. In den Berechnungen wird das vergleichsweise geringe Eigengewicht des Liners vernachlässigt. Es wird ein linear elastisches Materialgesetz zugrunde gelegt. Der Elastizitätsmodul wird mit dem Abminderungsfaktor für Langzeiteinflüsse reduziert (vgl. Kapitel 8.2.2).

8.3 Kalibrierung des FE-Modells durch Berechnung mit einem Stabwerkmodell [125]

8.3.1 Imperfektionen nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9]

Zur Kalibrierung des FE-Modells wird das Programm Linerb [125] verwendet, dabei werden die Mindestwerte der Vorverformungen nach dem Merkblatt ATV-M 127-2 [9], Abschnitt 6.3.1.1 angesetzt:

- Vorverformungen: 1. Örtliche Vorverformung (vgl. Abb. 82):
 - Stich: $w_v = 2\%$ des Linerradius (Mindestwert nach [9])
 - Lage: in der Sohle, Öffnungswinkel: $2\varphi_1 = 40^\circ$
- 2. Spaltbildung (vgl. Abb. 83):
 - $w_s = 0,5\%$ des Linerradius (Mindestwert nach [9])

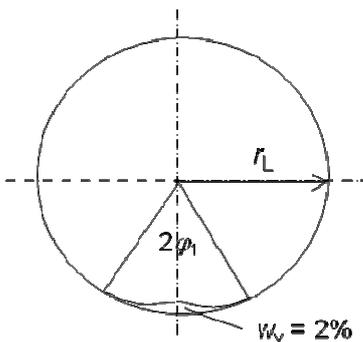


Abb. 82: Örtliche Vorverformung

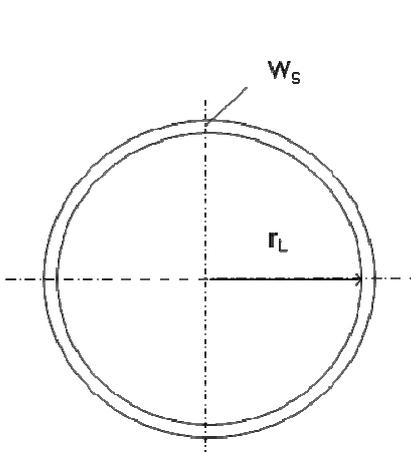


Abb. 83: Spaltbildung

8.3.2 FE-Simulationen der Imperfektionen und Berechnung

Die örtliche Vorverformung nach Abb. 82 wird in zwei Genauigkeitsstufen durch einen Bogen und vier Bögen (vgl. Abb. 81) erfasst. Die Geometrie der vier Bögen basiert auf der folgenden Gleichung für die örtliche Vorverformung in [127]:

$$w_v(\varphi) = w_v \cdot \cos^2 \frac{\pi \cdot \varphi}{2 \cdot \varphi_1} \tag{8-1}$$

Gültigkeitsbereich: $-\varphi_1 \leq \varphi \leq +\varphi_1$

mit: φ_v = Lage der Vorverformung (0° = Scheitel, 180° = Sohle)

$2\varphi_1$ = Öffnungswinkel (Inspektionsergebnis oder geschätzt)

Der Einfluss auf die Umfangsspannungen für einen Wasseraußendruck von 1,5 m WS wird überprüft. Die Umfangsspannungen und die Kontaktkräfte sind in Abb. 84 und Abb. 85 dargestellt.

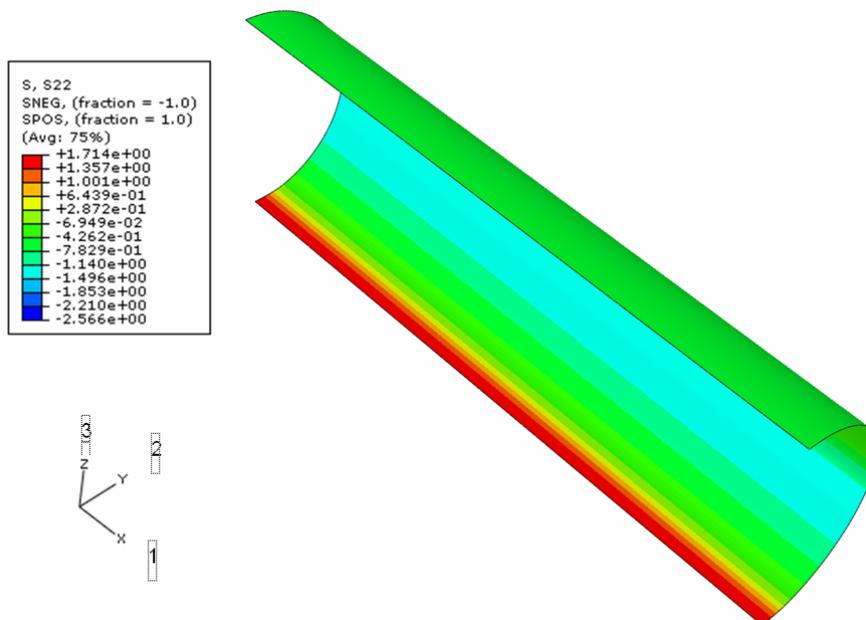


Abb. 84: Umfangsspannungen $\sigma_\varphi (= S22)$ bei konstanter örtlicher Vorverformung

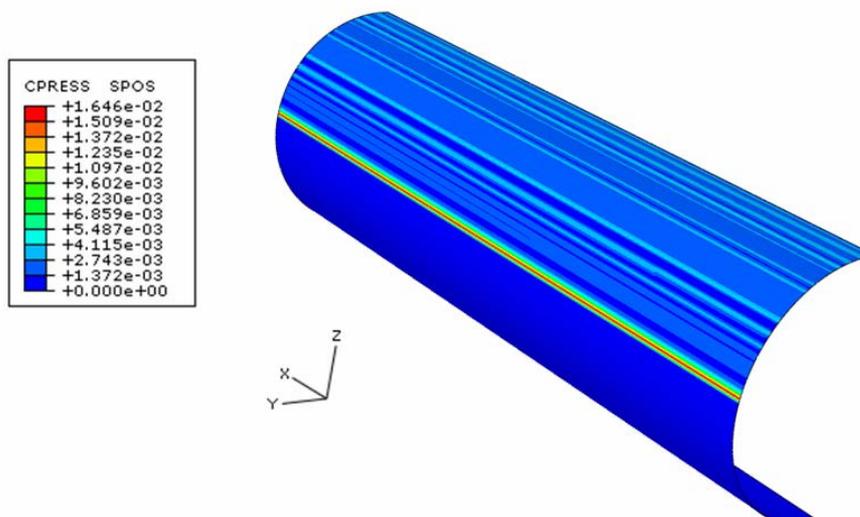


Abb. 85: Kontaktspannungen

Die Umfangsspannungen in Scheitel, Kämpfer und Sohle auf der Linerinnen- und -außenseite sind Tab. 22 zu entnehmen.

Tab. 22: Spannungen des Liners, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 1,5 \text{ m}$

		FE-Modell	
		ca. 5 / 7,5 mm	ca. 10 / 10 mm
Elementgröße B/H		ca. 5 / 7,5 mm	ca. 10 / 10 mm
Modellierung w_v		4 Bögen	1 Bogen
		N/mm ²	N/mm ²
Umfangsspannungen innen	Scheitel	-0,30	-0,30
	Kämpfer	-1,35	-1,39
	Sohle	+1,71	+1,62
Umfangsspannungen außen	Scheitel	-0,58	-0,58
	Kämpfer	+0,46	+0,49
	Sohle	-2,57	-2,48

Der Einfluss der Darstellung der Imperfektion durch einen bzw. vier Bögen ist gering. Die Kontaktspannungen sind in den Kämpferpunkten maximal (vgl. Abb. 85).

8.3.3 Berechnung mit einem Stabwerkmodell [125]

Die Ergebnisse der Berechnungen mit einem Stabwerkprogramm nach Theorie II. Ordnung sind in Tab. 23 zusammengefasst (vgl. auch Anhang 4).

Tab. 23: Spannungen und Verformungen des Liners DN 300, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 1,5 \text{ m}$

Anhang	Linerwanddicke	Wasseraußendruck	Biegezugspannung	Druckspannung	Elastische Verformung
	s_L	$h_{W,So}$	σ_{bz}	σ_D	w_u
	mm	m	N/mm ²	N/mm ²	mm
4	5,0	1,5	+1,74	-2,53	2,14

Die kritische Belastung ergibt sich durch Laststeigerung zu 13,4 m (vgl. Abb. 87).

8.3.4 Vergleich der Berechnung FE- und Stabwerkmodell

Spannung

Ein Vergleich der Spannungen in Scheitel, Kämpfer und Sohle in Umfangsrichtung zeigt, dass die Abweichungen der beiden Modelle minimal sind (vgl. Tab. 24).

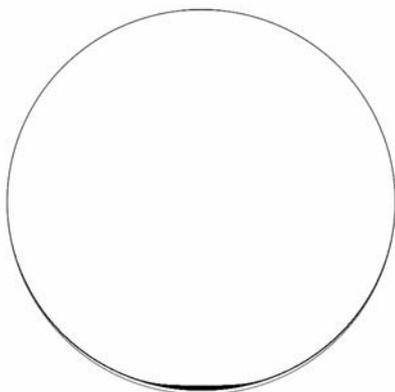
Tab. 24: Nachweise für den Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 1,5 \text{ m}$

		Stabwerkmodell	FE-Modell		Abweichung FE- /Stabwerkmodell	
Elementgröße B/H (~)		-	5 / 7,5	10 / 10	-	-
Modellierung w_v		Gl. (1)	4 Bögen	1 Bogen	4 Bögen	1 Bogen
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%
Umfangsspannungen innen	Scheitel	-0,29	-0,30	-0,30	+3,4	+3,4
	Kämpfer	-1,34	-1,35	-1,39	+1,0	+3,7
	Sohle	+1,74	+1,71	+1,62	-1,7	-6,9
Umfangsspannungen außen	Scheitel	-0,57	-0,58	-0,58	+1,8	+1,8
	Kämpfer	+0,44	+0,46	+0,49	+4,5	+11,1
	Sohle	-2,53	-2,57	-2,48	+1,6	-2,0

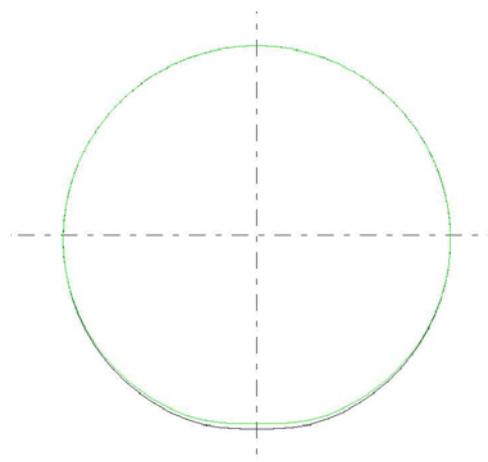
Aus der Vergleichsberechnung geht hervor, dass die Abweichungen der Spannungen bei Verwendung von vier Bögen geringer sind. Das Modell mit vier Bögen wird den Variationsberechnungen zur örtlichen Vorverformung zugrunde gelegt (vgl. Kapitel 8.4.2).

Verformung

Die maximalen elastischen Verformungen entstehen in der Sohle und betragen im FE-Modell $w_u = 2,19 \text{ mm}$ und mit Stabwerkmodell $w_u = 2,14 \text{ mm}$ (vgl. Abb. 86).



a) FE-Modell



b) Stabwerkmodell

Abb. 86: Verformungen

Stabilität

Ferner wird die Beullast durch Laststeigerung ermittelt und in Last-Verschiebungskurven dargestellt (vgl. Abb. 87). Dabei wird die Last in aufeinanderfolgenden Schritten um je 1,5 m WS gesteigert, in jedem Lastschritt wird vom Programm [126] Gleichgewicht erzielt.

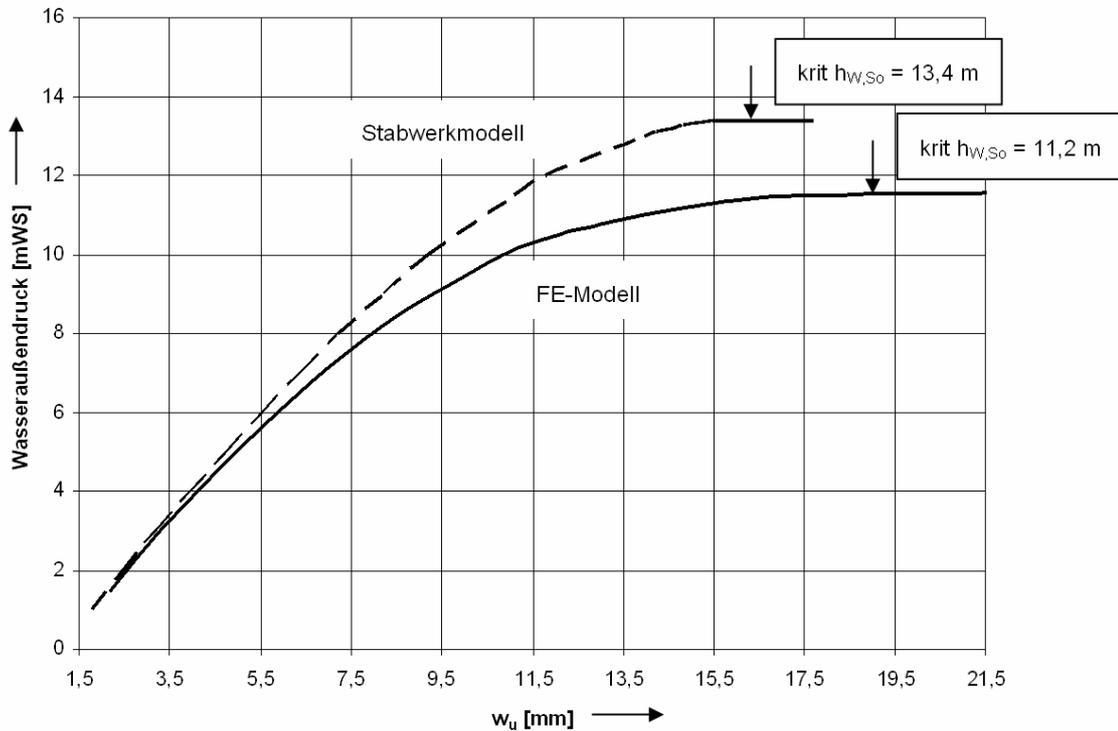


Abb. 87: Last-Verschiebungskurven für einen Liner DN 300, Vergleich FE- und Stabwerkmodell

Für Grundwasserstände > 4 m weichen die Last-Verschiebungskurven der beiden Berechnungen leicht voneinander ab. Dies ist auf das etwas steifere Stabwerksmodell (Polygon) zurückzuführen (vgl. hierzu [128]).

8.4 Statische Berechnungen mit in Längsrichtung begrenzten Imperfektionen

8.4.1 Grund- und Standardmodell

Die Ergebnisse der statischen Berechnungen mit den einzeln betrachteten Imperfektionen werden in Bezug zu den folgenden zwei Modellen gesetzt:

- Grundmodell: Liner ohne Imperfektionen,
- Standardmodell: Liner mit Imperfektionen nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9].

Beide Modelle werden durch Shell-Elemente simuliert. Die resultierenden Spannungen sind Tab. 25 zu entnehmen.

Tab. 25: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5 \text{ m}$, Grund- und Standardmodell, 1/4-System, 5 mm Netzgröße

		Grundmodell	Standardmodell
		N/mm ²	N/mm ²
Umfangsspannungen	außen	-1,65	-8,93
	innen	-1,24	+6,03
Längsspannungen	außen	-0,58	-3,13
	innen	-0,43	2,11

Die Spannungen des Grundmodells liegen deutlich unter den Spannungen des Standardmodells.

8.4.2 Örtliche Vorverformung

Die örtliche Vorverformung von $w_v = 2\%$ des Linerradius wird in Längsrichtung wie folgt variiert:

- über die angenommene Rohrlänge von 900 mm (= 3 DN) konstant angenommene Vorverformung (Festlegung M 127-2 [9]), vgl. Abb. 88 bis Abb. 90,
- über die Rohrlänge veränderliche Vorverformung von $L_v / DN = 4,0$ mit $a/b/c = 300/300/300 \text{ mm}$ ($a = b = 1 \cdot DN$) bis $L_v / DN = 0,4$ mit $a/b/c = 30/30/840 \text{ mm}$ ($a = b = 0,1 \cdot DN$), vgl. Tab. 26.

Die Vergleiche erfolgen für einen Wasseraußendruck von 5 m WS.

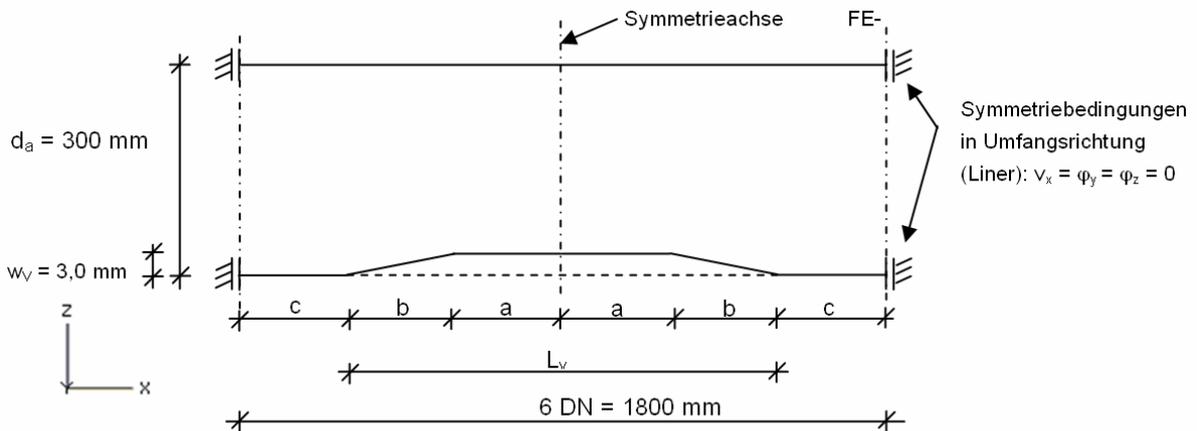


Abb. 88: Verlauf der Vorverformung in Längsrichtung (Prinzipische Skizze des Liners 10-fach überhöht dargestellt)

Die Vorverformung ist in einen konstanten Bereich mit $w_v = 2\%$ des Linerradius (Bereich a) und einen linear verlaufenden Übergangsbereich (Bereich b) unterteilt. Gewählt wurde $a = b$, damit ist $L_v = 4 \cdot a$.

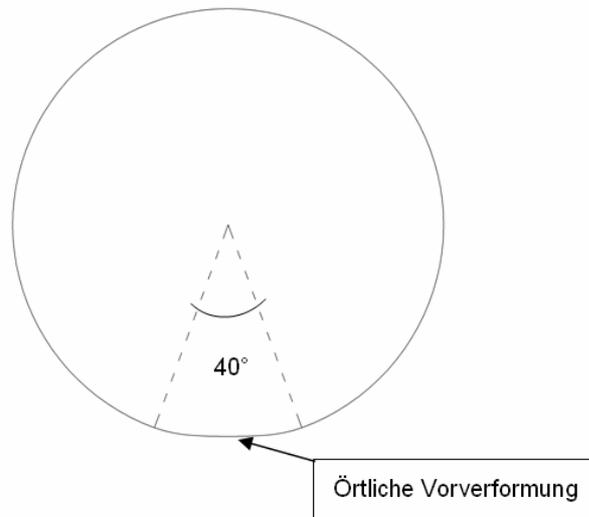


Abb. 89: Verlauf der örtlichen Vorverformung in Linierrichtung

Der Öffnungswinkel von 40° wird nicht variiert. Er entspricht der ungünstigen Festlegung (~ kleinste Beullast) im ATV-Merkblatt 127-2 [9].

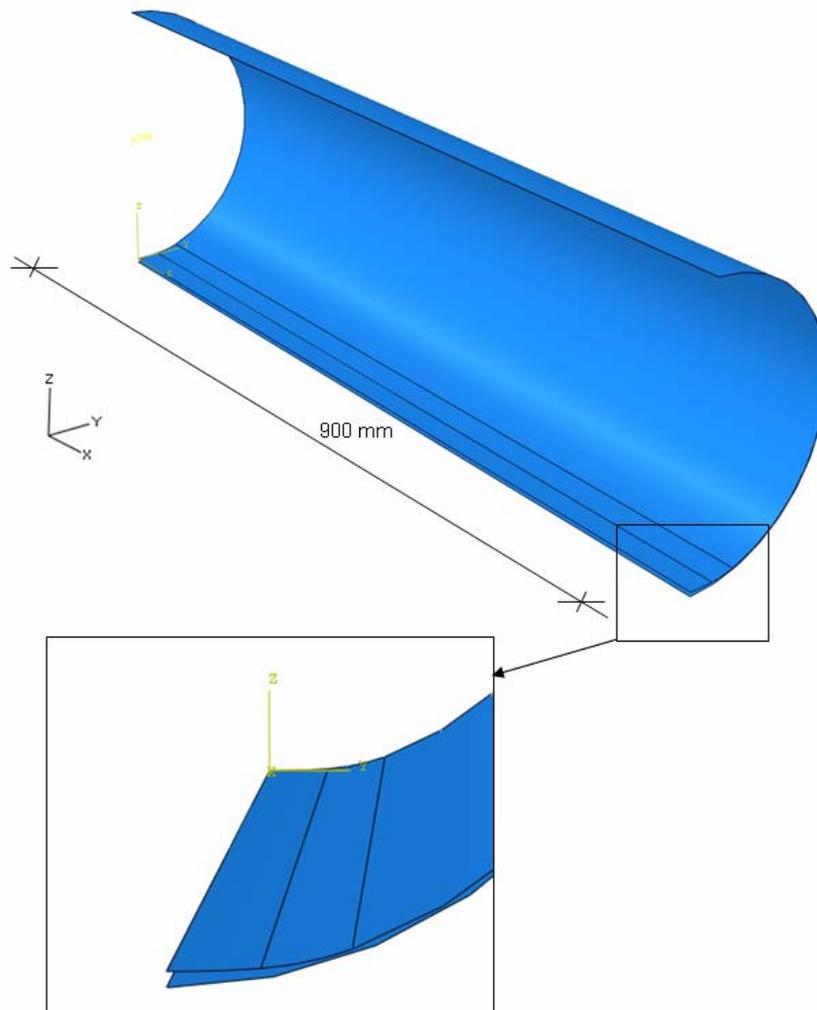


Abb. 90: In Längsrichtung des FE-Modells konstant verlaufende örtliche Vorverformung

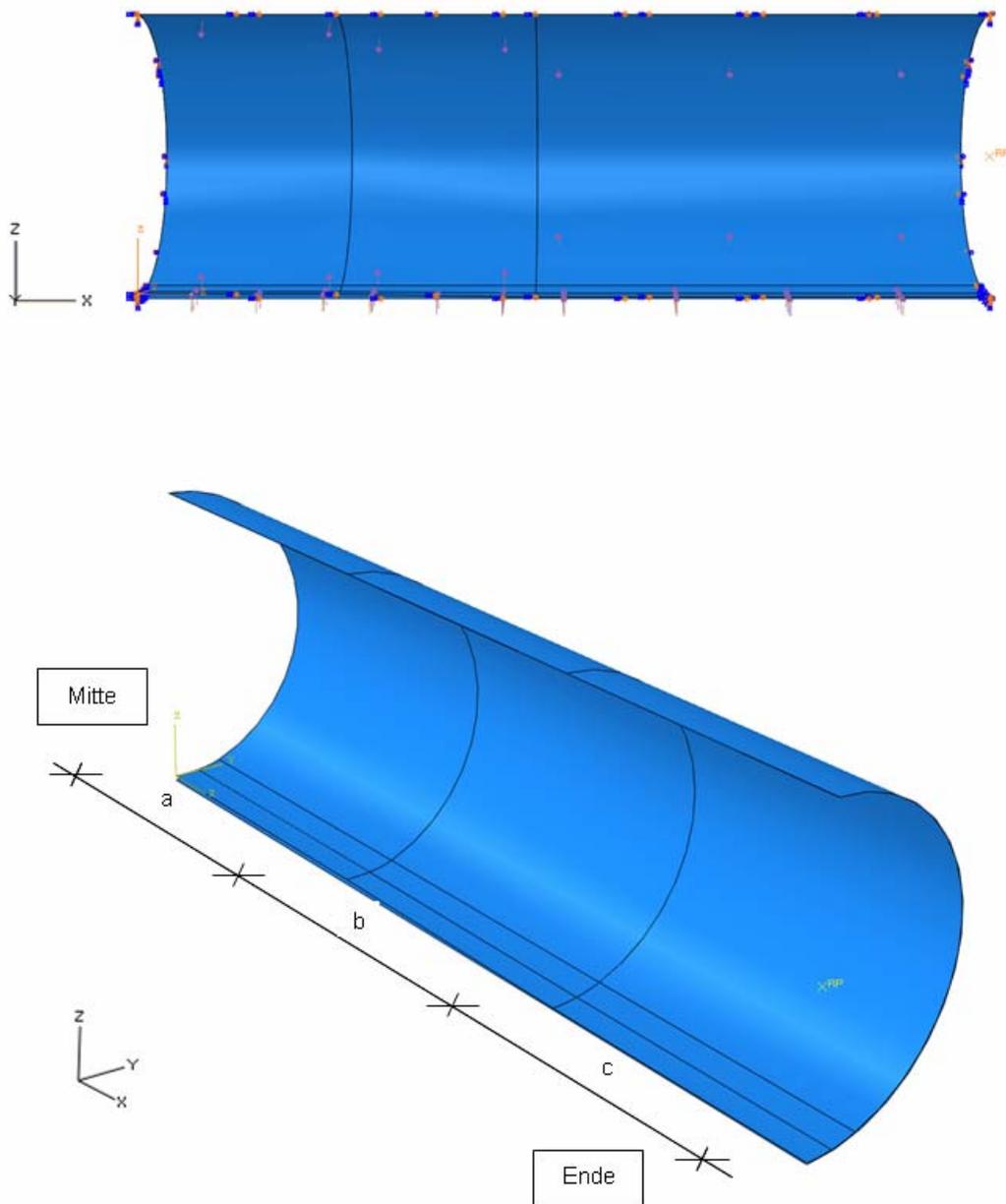


Abb. 91: In Längsrichtung des FE-Modells veränderliche Vorverformung

Die Spannungen im Liner bei in Längsrichtung veränderlicher Vorverformung sind Tab. 26 zu entnehmen.

Tab. 26: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5\text{ m}$, örtliche Vorverformung, $\frac{1}{4}$ -System, 5 mm Netzgröße

Verhältnis	Modell	Aufteilung	Umfangsspannungen σ_φ		Längsspannungen σ_x	
			außen	innen	außen	innen
L_v/DN	-	a/b/c	N/mm ²			
-	-	mm				
∞	Stabwerk ⁸	-	-9,41	6,68	-	-
∞	Finite Element Modell	a = 900	-8,93	6,03	-3,13	2,11
4,0		300/300/300	-8,66	5,75	-3,33	1,80
3,6		270/270/360	-7,86	4,95	-2,99	1,57
3,2		240/240/420	-7,77	4,87	-2,98	1,53
3,0		225/225/450	-7,61	4,70	-2,92	1,48
2,8		210/210/480	-7,65	4,74	-2,96	1,51
2,4		180/180/540	-7,48	4,57	-2,93	1,50
2,0		150/150/600	-7,33	4,40	-2,91	1,51
1,3		100/100/700	-6,75	3,79	-2,72	1,50
1,2		90/90/720	-6,62	3,64	-2,67	1,50
1,0		75/75/750	-6,42	3,38	-2,60	1,50
0,7		50/50/800	-6,01	2,81	-2,50	1,51
0,4		30/30/840	-5,35	2,09	-2,42	1,56

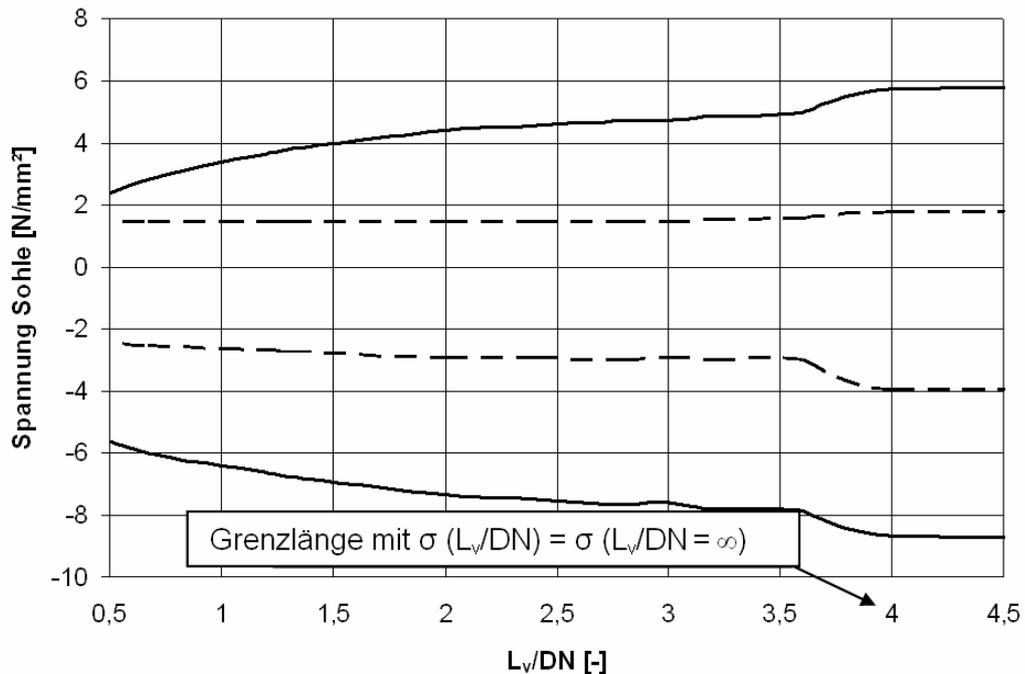


Abb. 92: Spannungsverläufe bei örtlicher Vorverformung in Längsrichtung mit variabler Länge

⁸ vgl. Anhang 4

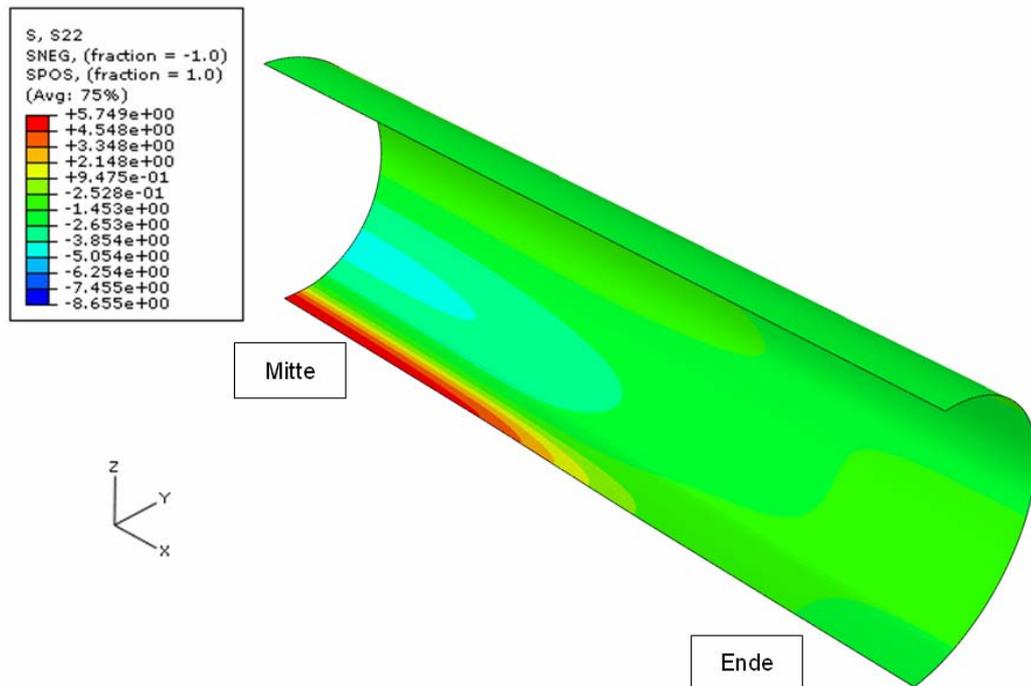


Abb. 93: Umfangsspannung σ_{φ} (= S22) des FE-Modells bei $L_V/DN = 4$

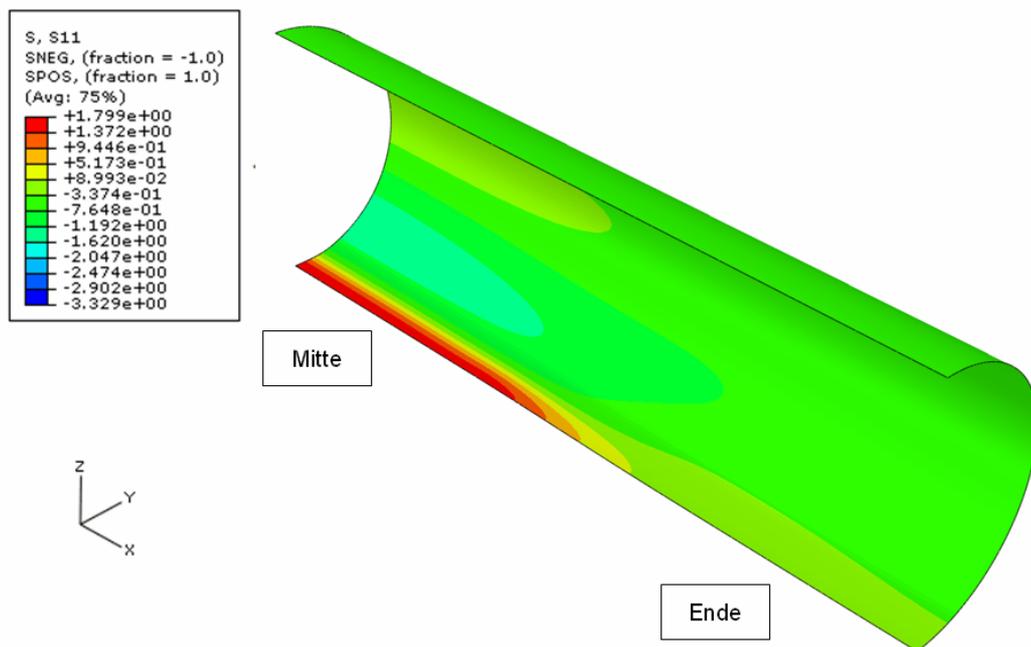


Abb. 94: Längsspannung σ_x (= S11) des FE-Modells bei $L_V/DN = 4$

Ein Vergleich der Spannungen in der Sohle in Umfangsrichtung zeigt, dass bei einer in Längsrichtung konstant verlaufenden Vorverformung die maximalen Spannungen entstehen und dieser Ansatz auf der sicheren Seite liegt (vgl. Tab. 26 und Abb. 92).

Im Bereich $L_V/DN = 2,0$ bis $0,4$ verringern sich die Druckspannungen von $7,33 \text{ N/mm}^2$ auf $5,35 \text{ N/mm}^2$. Für Verhältnisse $L_V/DN \geq 4,0$ liegen die Spannungen im Bereich der Werte für eine konstant verlaufende örtliche Vorverformung.

8.4.3 Längsfalte

Die Längsfalte wird mit einer Faltenhöhe von 20 mm und einem Öffnungswinkel von 10° simuliert (vgl. Abb. 95).

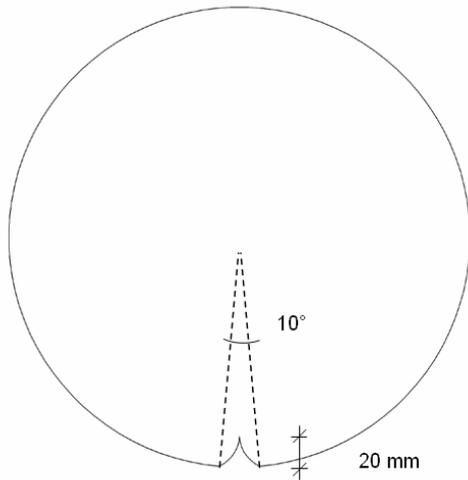


Abb. 95: Linerquerschnitt mit Längsfalte

Die Länge der Falte in Längsrichtung des Liners wird wie im Kapitel 8.4.2 von $L_V / DN = 4,0$ bis $L_V / DN = 0,4$ variiert (vgl. Abb. 96).

Der Öffnungswinkel von 10° und die Faltenhöhe von 20 mm bleiben konstant.

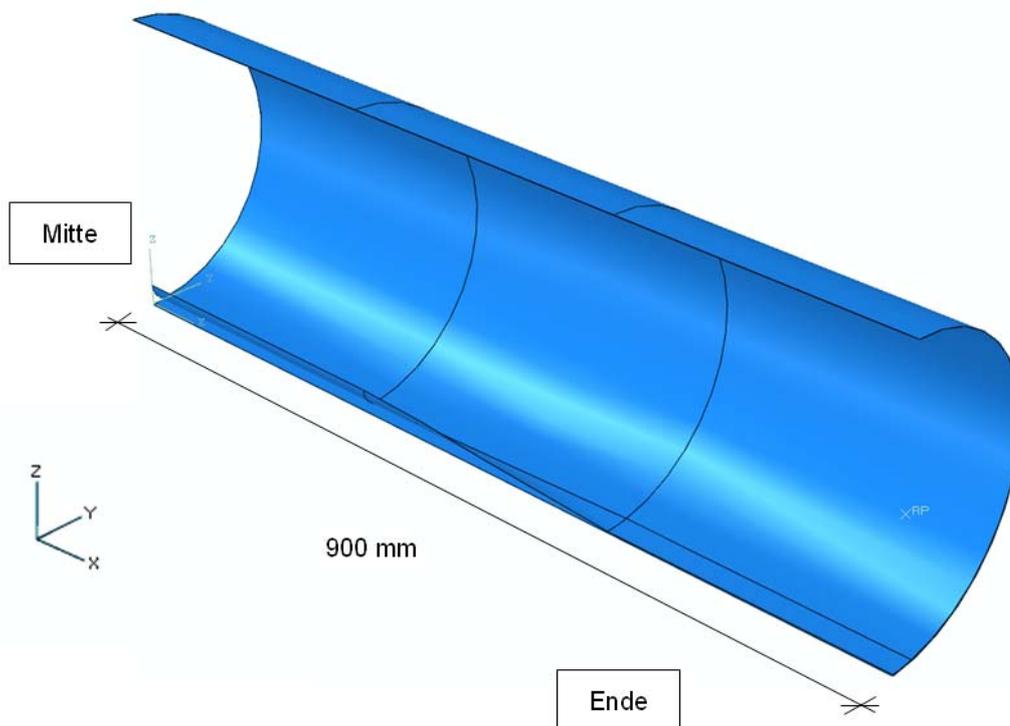


Abb. 96: Verlauf der Längsfalte

In der Tab. 27 sind die Spannungen in Umfangs- und Längsrichtung aufgeführt (vgl. auch Abb. 97 und Abb. 98).

Tab. 27: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{w,so} = 5 \text{ m}$, Längsfalte, $\frac{1}{4}$ -System, 5 mm Netzgröße

Verhältnis	Modell	Aufteilung	Umfangsspannungen σ_ϕ		Längsspannungen σ_x	
			außen	innen	außen	innen
L_v/DN	-	a/b/c	N/mm ²			
-	-	mm				
∞	Stabwerk ⁹	-	-38,1	37,7	-	-
∞	Finite Element Modell	a = 900	-30,4	30,0	-10,6	10,5
4,0		300/300/300	-31,6	31,2	-10,6	11,9
2,8		210/210/480	-31,2	30,9	-8,95	12,9
2,0		150/150/600	-28,9	28,5	-6,81	13,8
1,3		100/100/700	-22,9	22,5	-6,70	12,9
1,0		75/75/750	-17,6	17,3	-6,3	11,3
0,7		50/50/800	-13,3	10,6	-5,09	7,96
0,4		30/30/840	-9,42	5,14	-3,39	5,13
Standardmodell		-	-8,93	6,03	-3,13	2,11

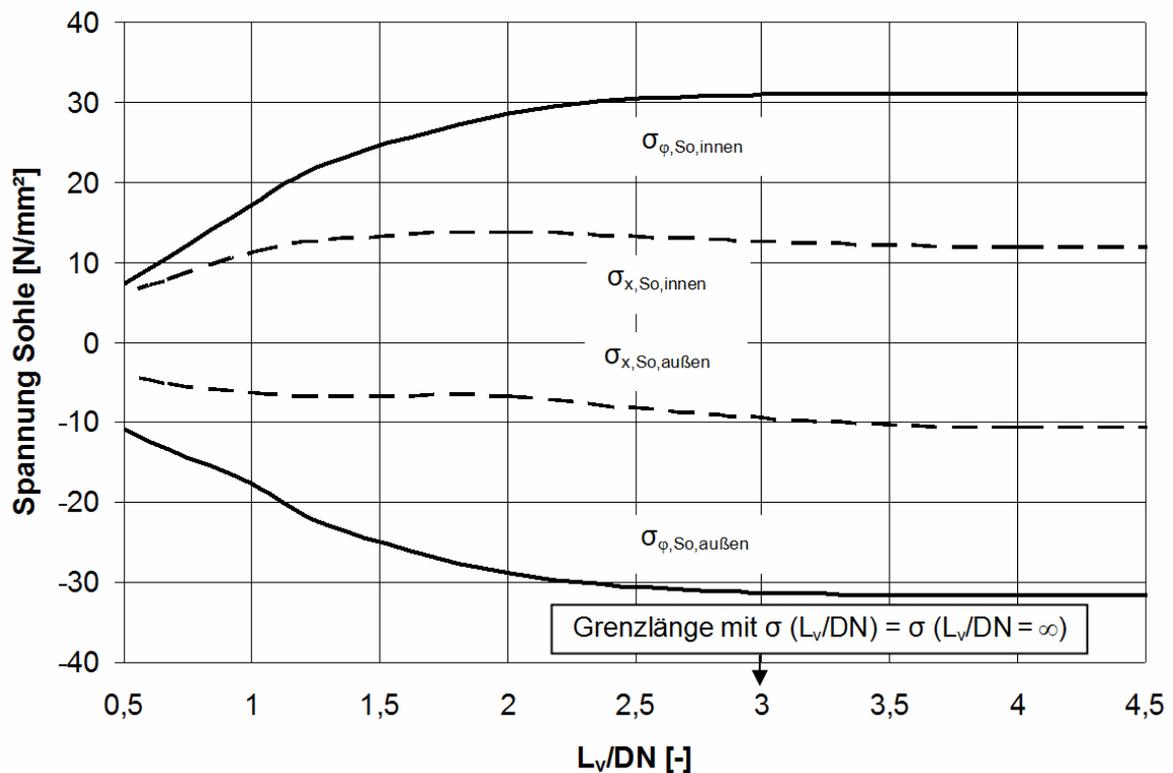


Abb. 97: Spannungsverlauf bei Faltenbildung in Längsrichtung mit variabler Länge

⁹ vgl. auch Anhang 4

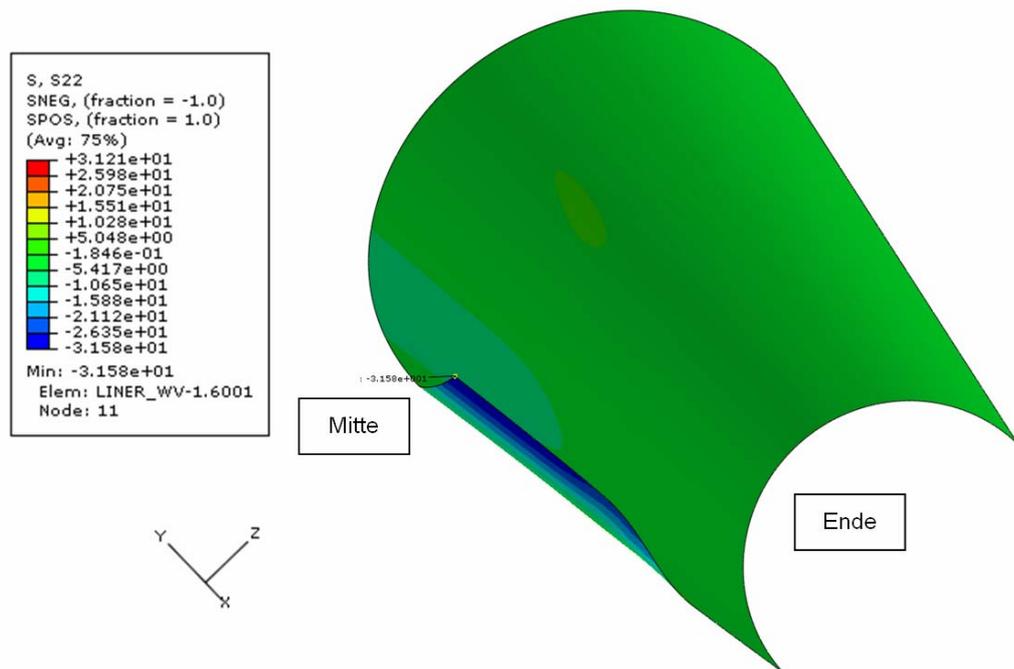


Abb. 98: Umfangsspannung σ_{φ} ($= S22$) des FE-Modells bei $L_V/DN = 4$

Bei Variation der Länge der Längsfalte ist festzustellen, dass die Spannungen für ein Verhältnis $L_V/DN \geq 3,0$ einen Maximalwert erreichen. Dies ist auch der Wert, für den der Ansatz einer konstanten durchlaufenden Längsfalte und somit eines 2-D-Modells gerechtfertigt ist.

Im Bereich $L_V/DN = 2,8$ bis $0,4$ verringern sich die Druckspannungen von $31,2 \text{ N/mm}^2$ auf $9,4 \text{ N/mm}^2$.

Bei einer kurzen Längsfalte $L_V/DN = 0,4$ erhöhen sich allerdings die Druckspannungen gegenüber einem Liner ohne Verformung von $\sigma_D = 1,6 \text{ N/mm}^2$ auf $9,4 \text{ N/mm}^2$.

Die Spannungen liegen über den Spannungen aus dem Standardmodell mit Imperfektionen nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9].

8.4.4 Querfalte

Im FE-Modell wird eine Querfalte mit einer Höhe von 20 mm und einer halben Breite von 15 mm (Gesamtöffnungswinkel = 10°) in zwei Varianten untersucht:

- ungefüllte Falte (vgl. Abb. 100 und Abb. 101) und
- mit Harz gefüllte Falte (vgl. Abb. 102).

Die Modellierung des Liners im FE-Modell erfolgt für die ungefüllte Falte sowohl mit Shell-Elementen (Schale) als auch mit Solid-Elementen (Körper) (vgl. Abb. 100 und Abb. 101). Die gefüllte Falte wird mit solid-Elementen simuliert (vgl. Abb. 102).

Der Öffnungswinkel und die Faltenhöhe werden nicht variiert.

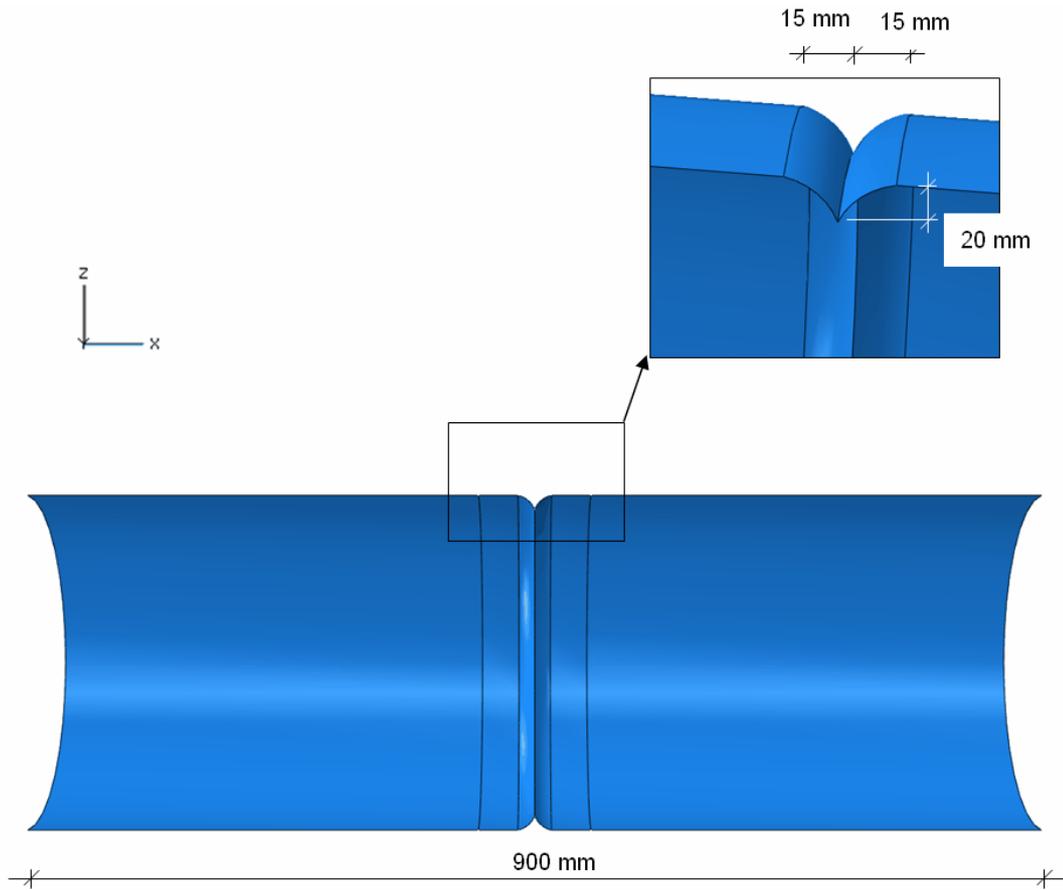


Abb. 99: Systembild Querfalte ungefüllt, Simulation durch Shell-Elemente

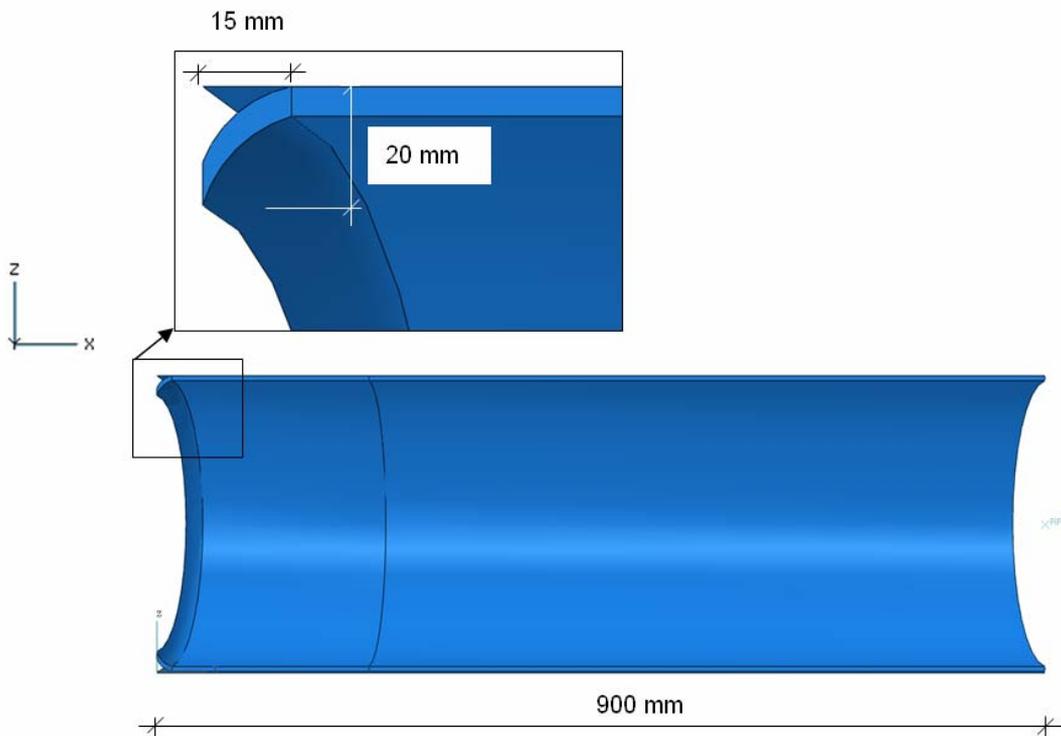


Abb. 100: Systembild Querfalte, ungefüllt, Simulation durch Solid-Elemente

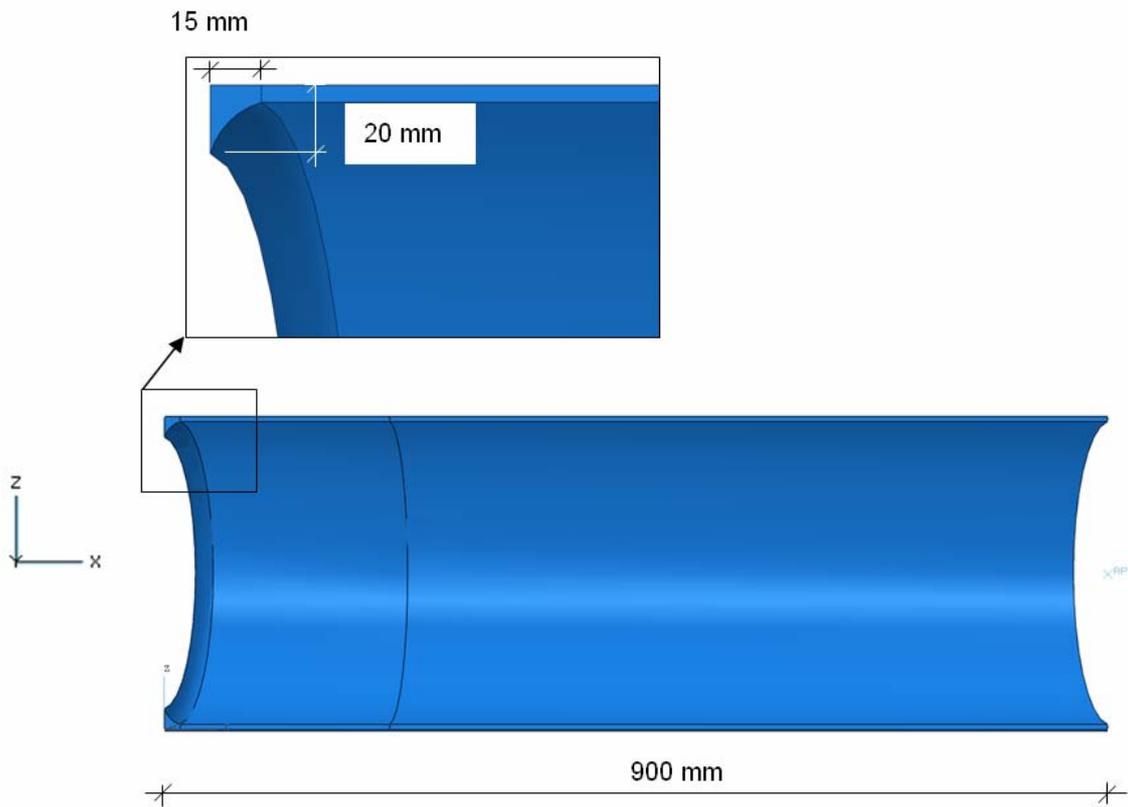


Abb. 101: Systembild Querfalte, gefüllt, Simulation durch Solid-Elemente

In Abb. 102 und Abb. 103 lässt sich ablesen, dass eine gefüllte und ungefüllte Querfalte die Längsspannungen im Bereich der Falte erhöhen.

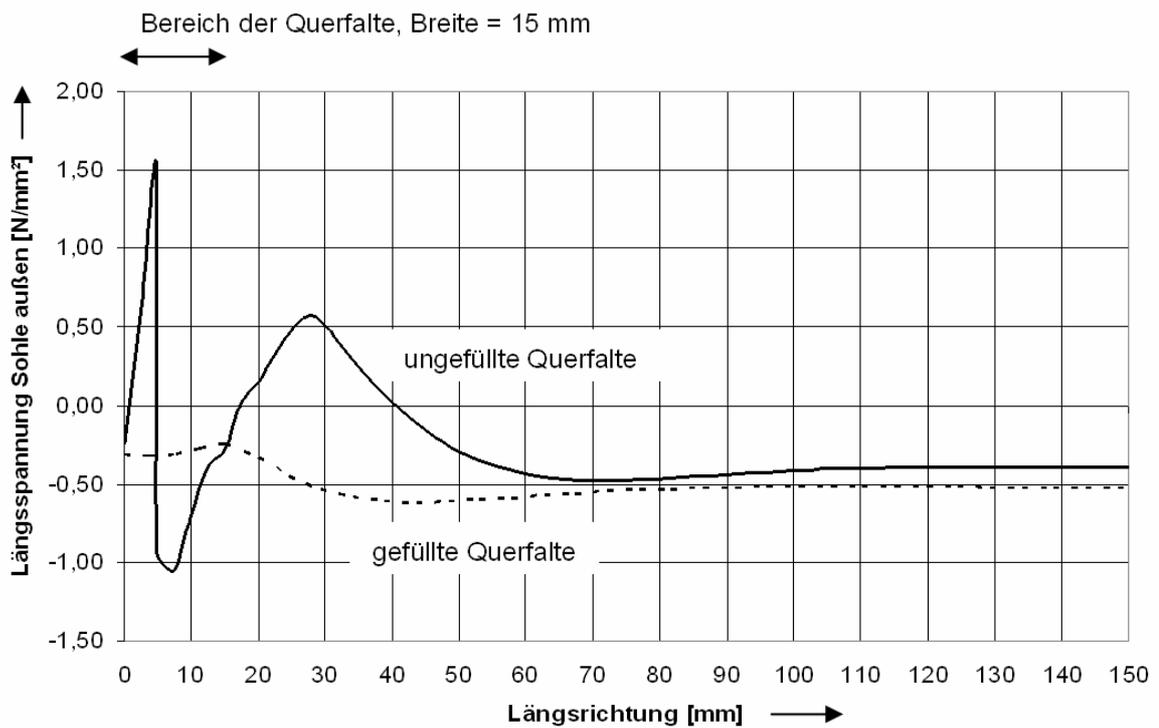


Abb. 102: Verlauf der Längsspannungen σ_x in der Sohle Außenseite bei Querfaltenbildung

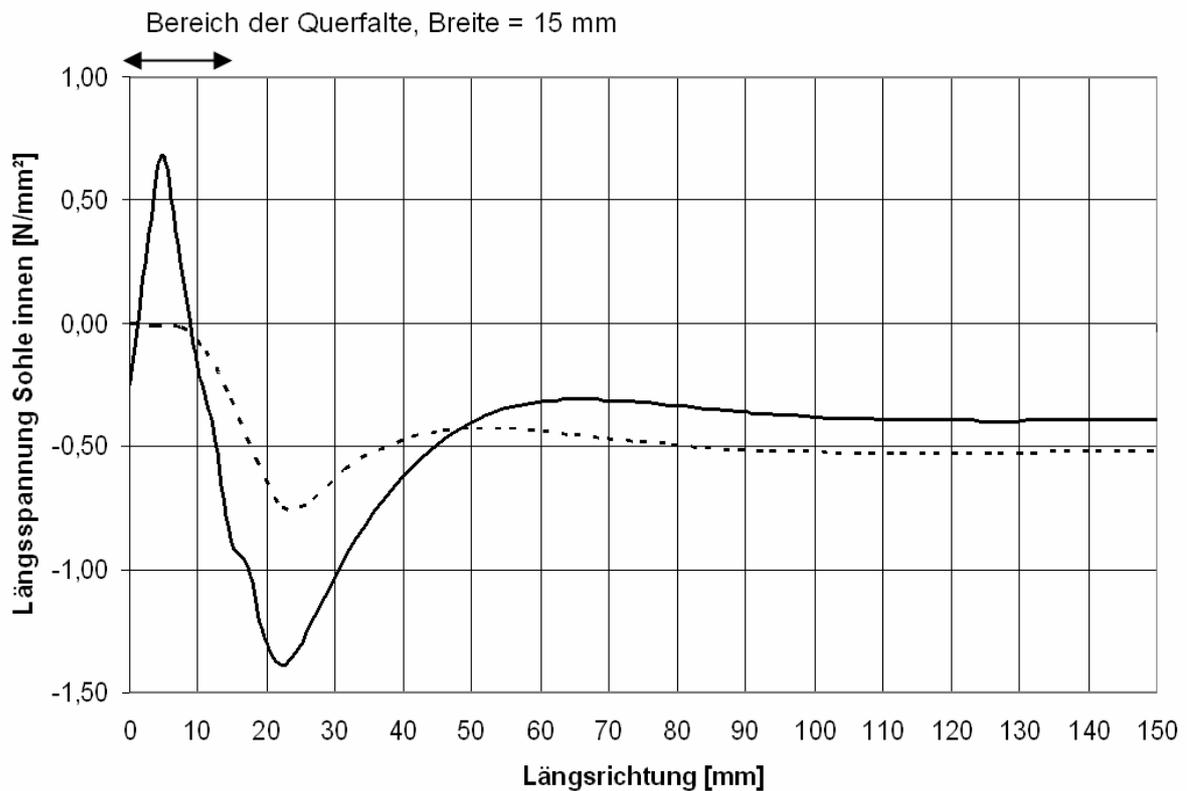


Abb. 103: Verlauf der Längsspannungen σ_x in der Sohle Innenseite bei Querfaltenbildung

Die resultierenden Umfangs- und Längsspannungen werden in Bezug zu den Spannungen eines Liners ohne Faltenbildung (Grundmodell) und eines Liners mit den Imperfektionen nach ATV-M 127-2 [9] (Standardmodell) gesetzt (vgl. Tab. 28 und Tab. 29).

Tab. 28: Spannungen im Liner, Altrohrrzustand I, Wasseraußendruck $h_{w,so} = 5\text{ m}$, Querfalte, $\frac{1}{2}$ - und $\frac{1}{4}$ -System, Vergleich mit Grundmodell ohne Imperfektionen

		Grundmodell	Querfalte ungefüllt, Shell		Querfalte ungefüllt, Solid		Querfalte gefüllt, Solid	
Abstand der Querfalten		-	900 mm		1800 mm		1800 mm	
Netzgröße ¹⁰ [mm]		5 mm	2,5 / 1,0 / -		3,3 / 2,5 / 2,5		5,2 / 4,8 / 2,5	
		N/mm ²	N/mm ²	% ¹¹	N/mm ²	% ¹¹	N/mm ²	% ¹¹
Umfangsspannungen	außen	-1,65	-6,07	+268	-3,22	+95	-1,46	-12
	innen	-1,24	+3,01	+143	-2,50	+102	-1,48	+19
Längsspannungen	außen	-0,58	-4,37	+653	+1,52	+162	-0,62	+7
	innen	-0,43	+3,70	+614	-1,41	+228	-0,79	+84

¹⁰ Im Bereich der Falte: 1. Wert: Umfangsrichtung, 2. Wert: Längsrichtung, 3. Wert: über Linerwanddicke

¹¹ Die Abweichung der Spannungen (Maximalwerte) im Liner mit Querfalte wird auf die Maximalwerte des Grundmodells (Liner ohne Imperfektionen) bezogen.

In Umfangsrichtung ist bei einer ungefüllten Querfalte eine Erhöhung der Spannungen festzustellen. Bei einer gefüllten Querfalte mit gleichen Werkstoffkennwerten der Füllung liegen die maximalen Spannungen näherungsweise im Bereich der Spannungen des Liners ohne Querfalte.

Tab. 29: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5 \text{ m}$, Querfalte, $\frac{1}{2}$ - und $\frac{1}{4}$ -System, Vergleich mit Standardmodell mit örtlicher Imperfektion

		Standardmodell	Querfalte ungefüllt, Shell		Querfalte ungefüllt, Solid		Querfalte gefüllt, Solid	
Abstand der Querfalten		-	900 mm		1800 mm		1800 mm	
Netzgröße ¹² [mm]		5 mm	2,5 / 1,0 / -		3,3 / 2,5 / 2,5		5,2 / 4,8 / 2,5	
		N/mm ²	N/mm ²	% ¹³	N/mm ²	% ¹³	N/mm ²	% ¹³
Umfangsspannungen	außen	-8,93	-6,07	-32	-3,22	-64	-1,46	-84
	innen	+6,03	+3,01	-50	-2,50	-59	-1,48	-75
Längsspannungen	außen	-3,13	-4,37	+39	+1,52	-51	-0,62	-80
	innen	2,11	+3,70	+75	-1,41	-33	-0,79	-62

Bezogen auf das Standardmodell mit Imperfektionen nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9] liegen nur bei der ungefüllten Querfalte mit Shell-Elementen höhere Längsspannungen vor.

In Umfangsrichtung sind sowohl bei einer ungefüllten als auch bei einer gefüllten Querfalte im Vergleich zum Standardmodell geringere Spannungen festzustellen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Spannungen nur für die Querfalte ohne den Einfluss durch weitere Imperfektionen untersucht wurden.

Es ist anzumerken, dass die Modelllänge ab einem bestimmten Grenzwert keine Auswirkungen mehr haben dürfte, da nach der Schalentheorie Randstörungen i. d. R. rasch abklingen. Es wird davon ausgegangen, dass die Modellierung mit Shell-Elementen für den Fall Querfalte ungefüllt keine ausreichende Genauigkeit liefern.

Die Auswirkungen auf die kritische Belastung werden hier nicht untersucht.

¹² Im Bereich der Falte: 1. Wert: Umfangsrichtung, 2. Wert: Längsrichtung, 3. Wert: über Linerwanddicke

¹³ Die Abweichung der Spannungen (Maximalwerte) im Liner mit Querfalte wird auf die Maximalwerte des Standardmodells (Liner mit Imperfektionen nach ATV-M 127-2 [9]) bezogen (Betragswerte).

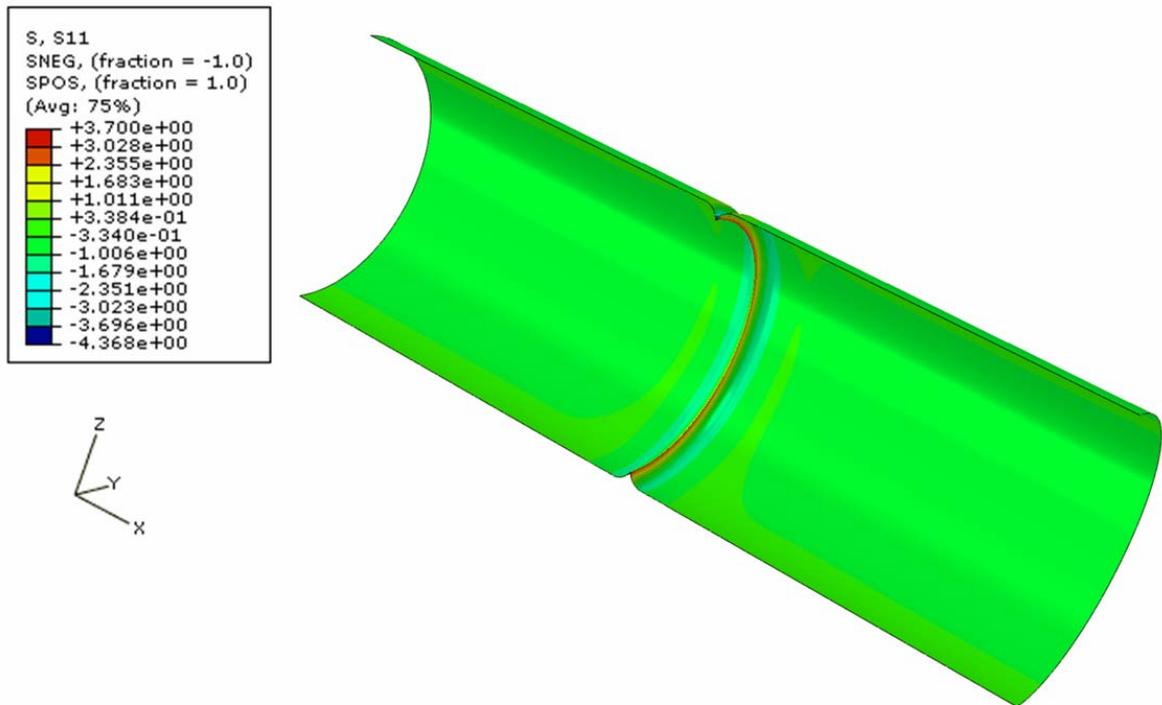


Abb. 104: Querfalte, ungefüllt, Längsspannungen $\sigma_x (= S11)$

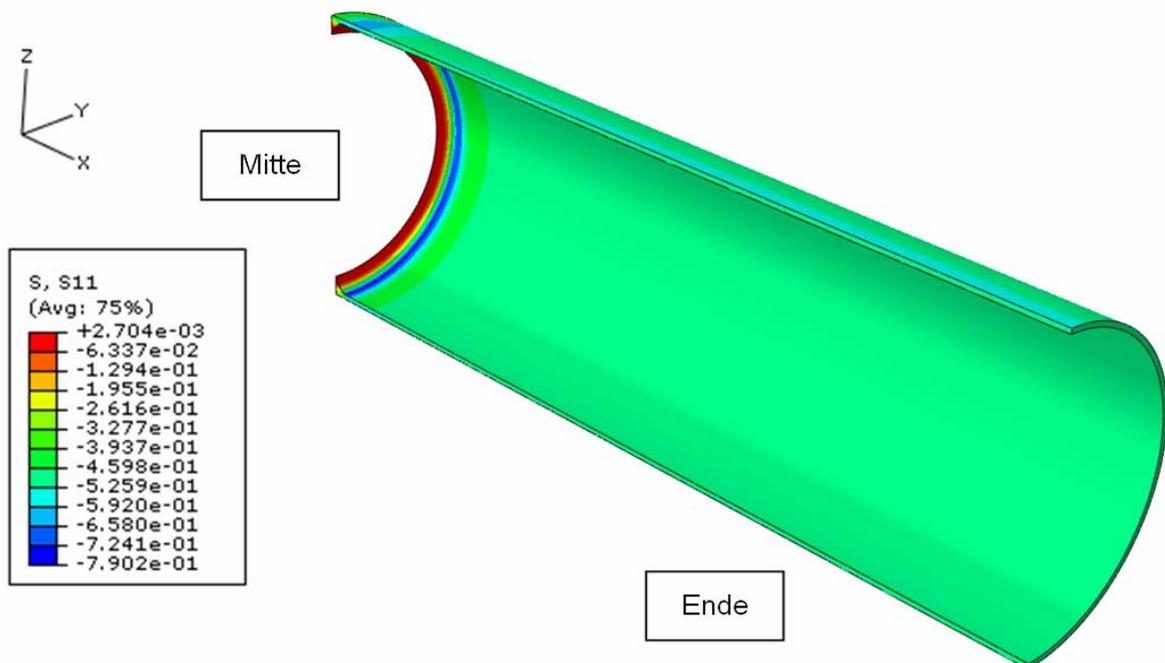


Abb. 105: Querfalte, gefüllt, Längsspannungen $\sigma_x (= S11)$

8.4.5 Bereichsweise verringerter E-Modul

Das Linermaterial kann Schwankungen im E-Modul enthalten. Die Auswirkung auf die Standsicherheit des Liners wird im FE-Modell durch Reduktion des E-Moduls in einem Bereich des Liners auf 50% des Ausgangswertes untersucht.

Der E-Modul wird in Längsrichtung wie folgt variiert und für einen Wasseraußendruck von 5 m WS verglichen:

- über die Rohrlänge veränderliche Länge der Ellipse von $a_E = 200$ mm bis $a_E = 800$ mm (vgl. Tab. 30).

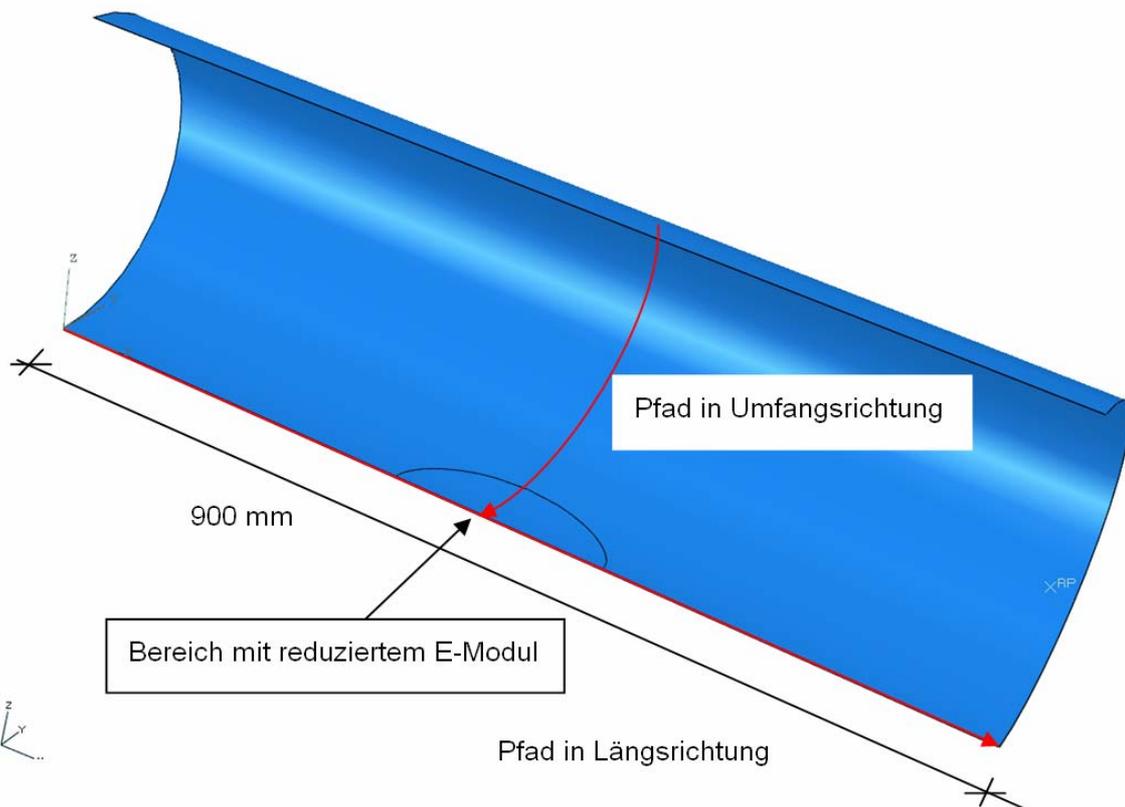


Abb. 106: Systembild mit reduziertem E-Modul in einem ellipsenförmigen Bereich

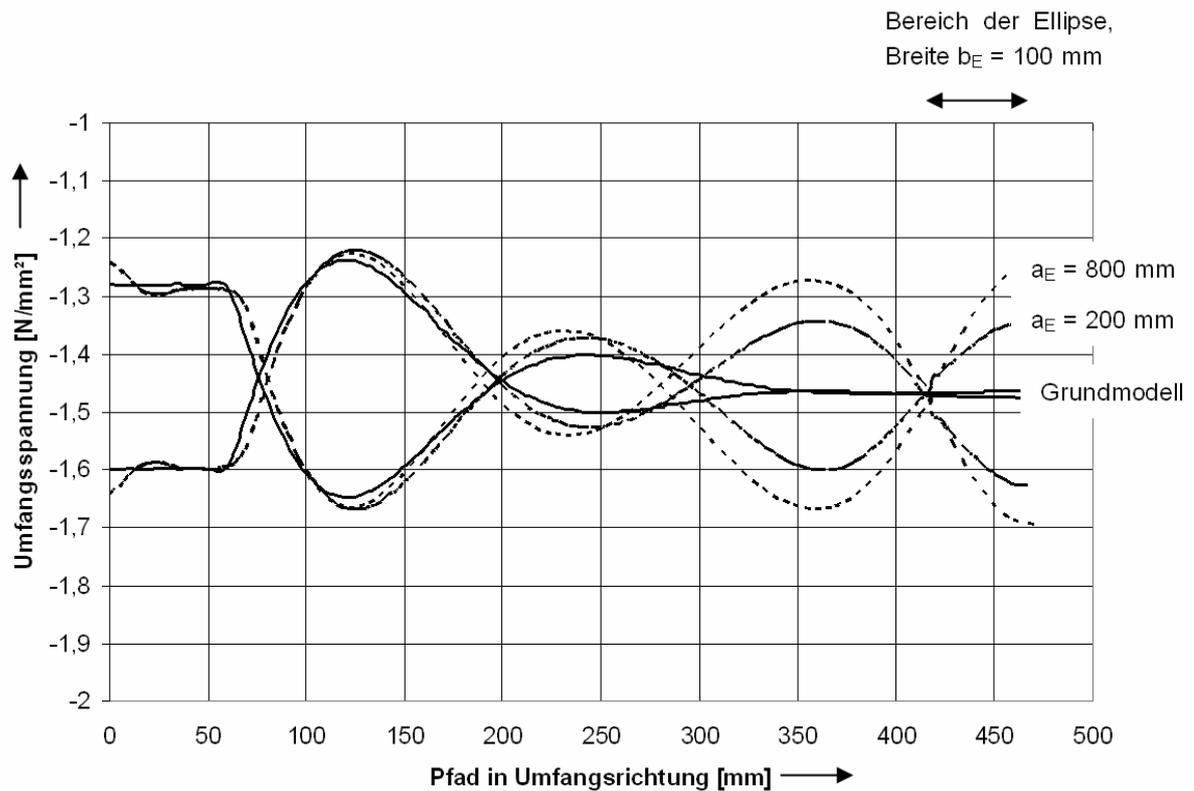


Abb. 107: Spannungsverlauf in Umfangsrichtung bei Variation der Bereichsgröße mit verringertem E-Modul

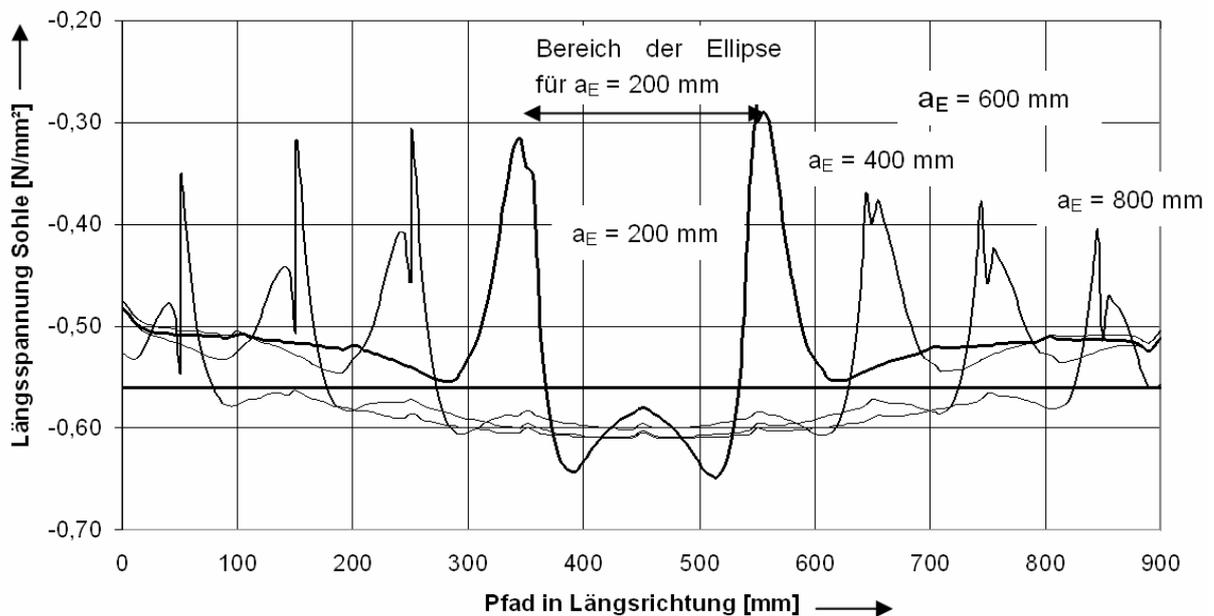


Abb. 108: Spannungsverlauf (Spannungen in Sohle außen) in Längsrichtung bei Variation der Bereichsgröße mit verringertem E-Modul

Der nicht symmetrische Spannungsverlauf ist auf ein unsymmetrisches FE-Netz zurückzuführen.

In Tab. 30 werden die jeweiligen Maximalwerte verglichen.

Tab. 30: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5 \text{ m}$,
verringertes E-Modul, $\frac{1}{2}$ -System, 5 mm Netzgröße

Aufteilung		Umfangsspannungen σ_ϕ		Längsspannungen σ_x	
Werte	Ellipsenlänge	außen	innen	außen	innen
-	mm	N/mm ²			
Maximal- werte	Grundmodell ¹⁴	-1,65	-1,65 (K) -1,24 (S)	-0,58	-0,43
	∞	-1,70	-1,68	-0,60	-0,43
	800	-2,16	-1,96	-0,66	-0,76
	600	-2,16	-2,07	-0,65	-0,79
	400	-2,17	-2,11	-0,69	-0,81
	200	-2,11	-2,10	-0,75	-0,85
	Standardmodell	-8,93	6,03	-3,13	-2,11

Den Ergebnissen der FE-Berechnung bei Variation der Ellipsenlänge a_E ist zu entnehmen, dass die Größe des Bereiches annähernd nicht ins Gewicht fällt. Gegenüber dem Grundmodell mit konstantem E-Modul $E_L = 1400 \text{ N/mm}^2$ erhöhen sich die Spannungen im sprunghaften Übergangsbereich. Eine weitere Verfeinerung des Modells mit einem linearen Verlauf in die Ellipse hinein würde diese Spannungsspitzen glätten.

Wird im Bereich der Sohle ein verringertes E-Modul über die ganze Modelllänge angenommen, zeigt sich, dass die Spannungen nicht von den Werten des Grundmodells abweichen.

Ein verringertes E-Modul wirkt sich mehr auf die kritische Belastung (Stabilität) als auf die Spannungen aus.

Verglichen mit dem Standardmodell mit Imperfektionen nach ATV-M 127-2 [9] sind die Spannungen bei verringertem E-Modul geringer. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Spannungen nur für Verringerung des E-Moduls ohne den Einfluss durch weitere Imperfektionen untersucht wurden.

Weitere Parameterstudien sind zu den Streuungen des E-Moduls erforderlich.

8.4.6 Bereichsweise verringerte Wanddicke

Bei Prüfungen von Linerproben werden z. T. Wanddickenstreuungen festgestellt. In den FE-Modellen wird von einer Verringerung der Wanddicke auf der Innenseite des Liners ausgegangen.

Untersuchungen zu in Umfangs- und Längsrichtung wellenförmigen Wanddickenstreuungen sind in [129] wiedergegeben.

¹⁴ Grundmodell mit konstantem E-Modul $E_L = 1400 \text{ N/mm}^2$

a) Rechteckförmiger Bereich

Im FE-Modell wird in einem Teilbereich eine um 50% reduzierte Wanddicke des Liners angenommen. Die Wanddicke nimmt in Umfangsrichtung von der Sohle zum Kämpferbereich von 2,5 mm linear auf 5 mm zu, im Kämpfer-Scheitelbereich bleibt sie konstant 5 mm (vgl. Abb. 109). Ferner wird getrennt eine lineare Abnahme der Wanddicke von 5 mm auf 2,5 mm in Längsrichtung untersucht (vgl. Abb. 110).

Die Simulationen des Liners erfolgen anhand von Solid-Elementen.

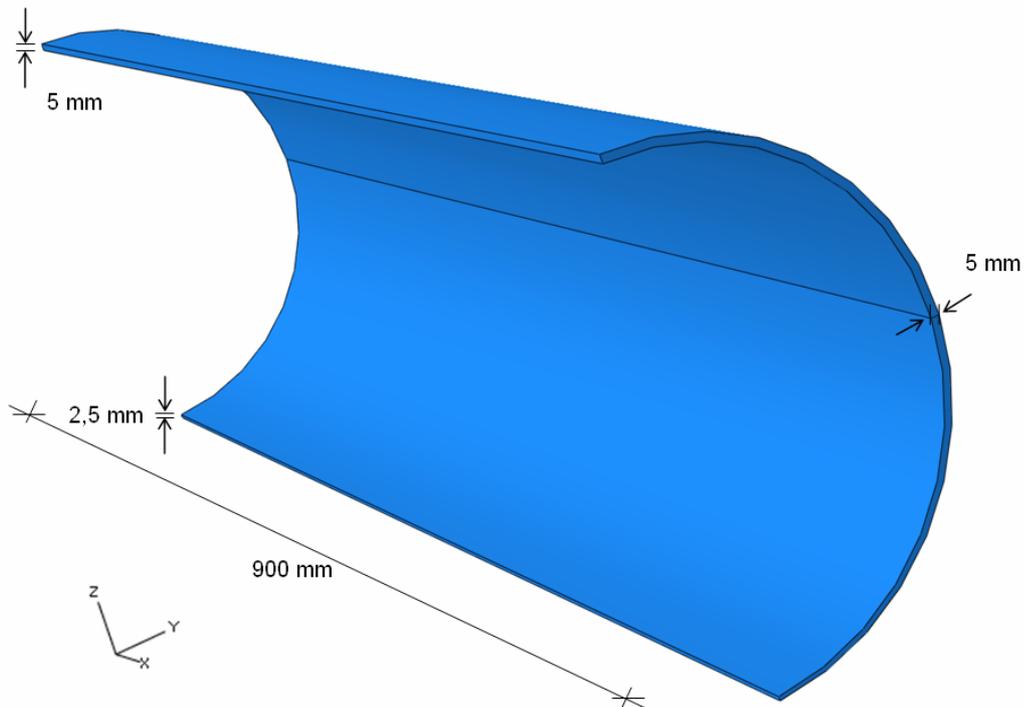


Abb. 109: Systembild verringerte Wanddicke in Umfangsrichtung

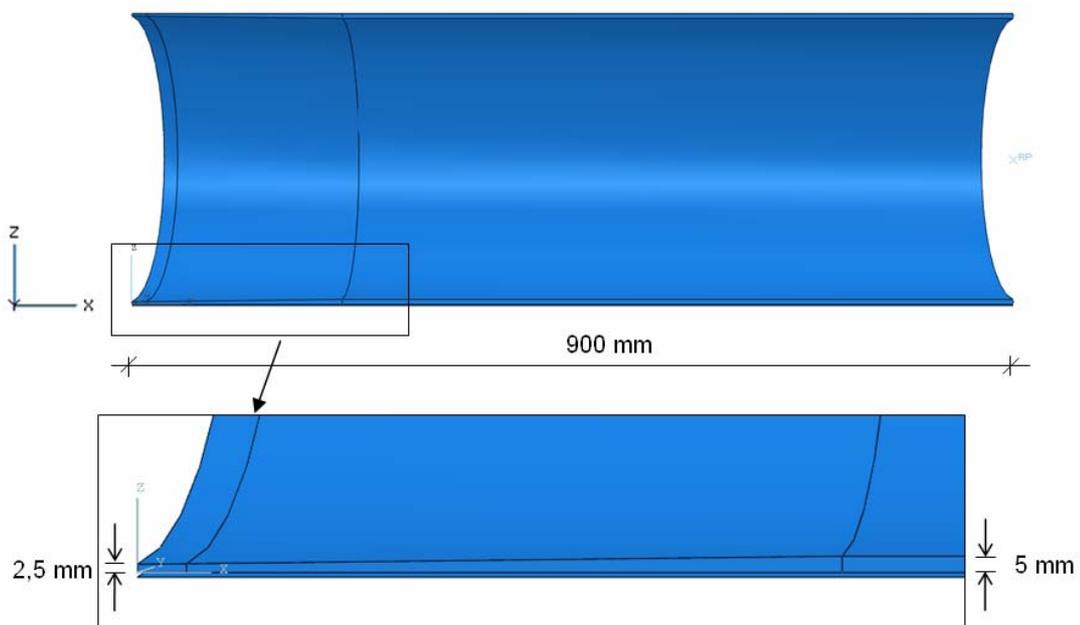


Abb. 110: Systembild verringerte Wanddicke in Längsrichtung

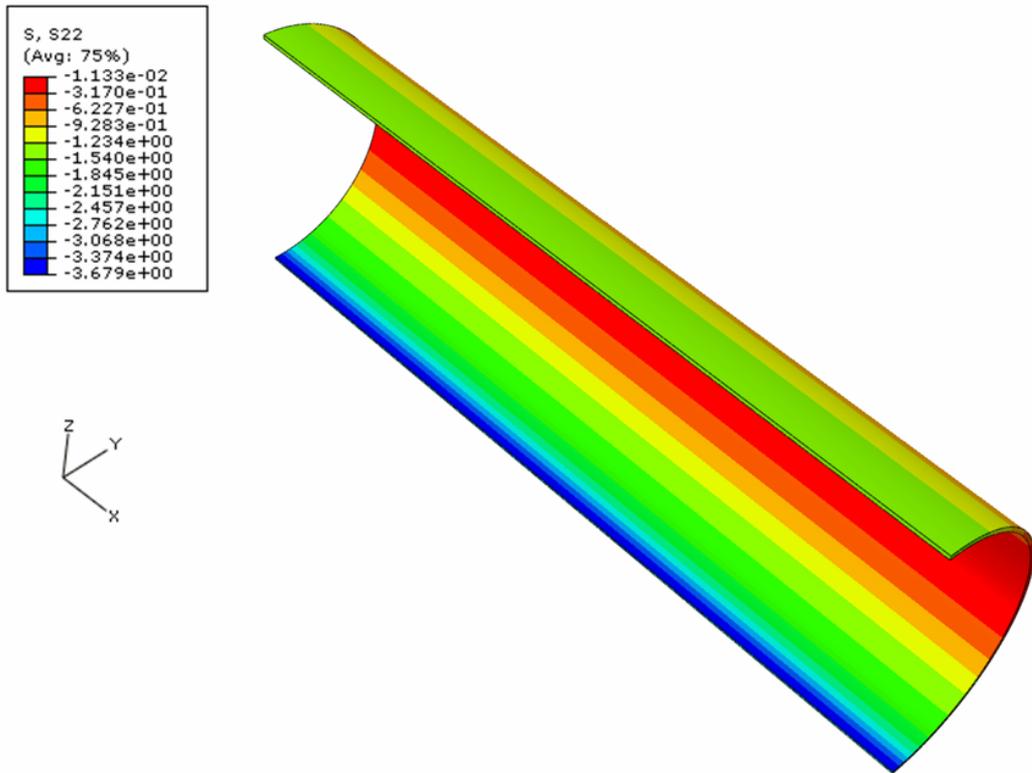


Abb. 111: Verringerte Wanddicke in Umfangsrichtung, Umfangsspannungen σ_φ (= S22)

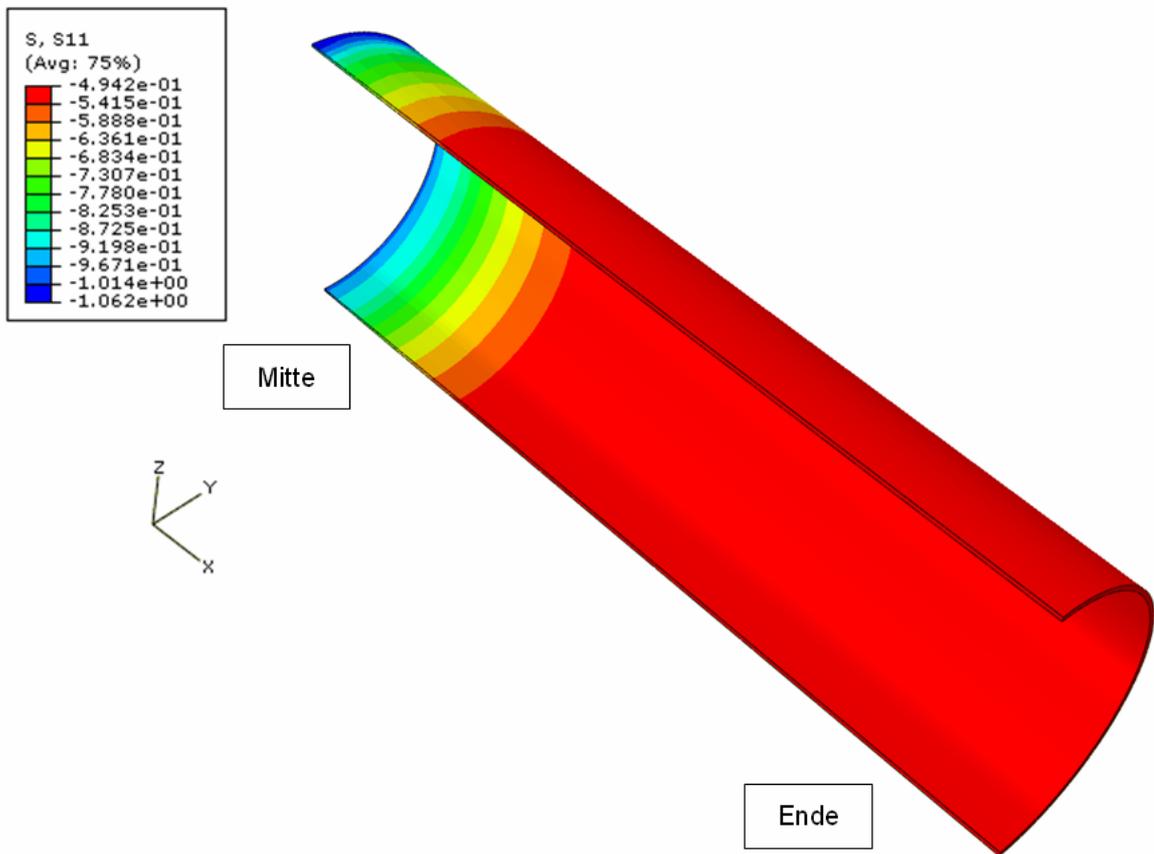


Abb. 112: Verringerte Wanddicke in Längsrichtung, Längsspannungen σ_x (= S11)

b) Ellipsenförmiger Bereich

Mit Hilfe von Shell-Elementen wird eine in einem ellipsenförmigen Bereich verringerte Wanddicke betrachtet (vgl. Abb. 113). Der Übergang von 5 mm auf 2,5 mm Wanddicke erfolgt hierbei sprunghaft.

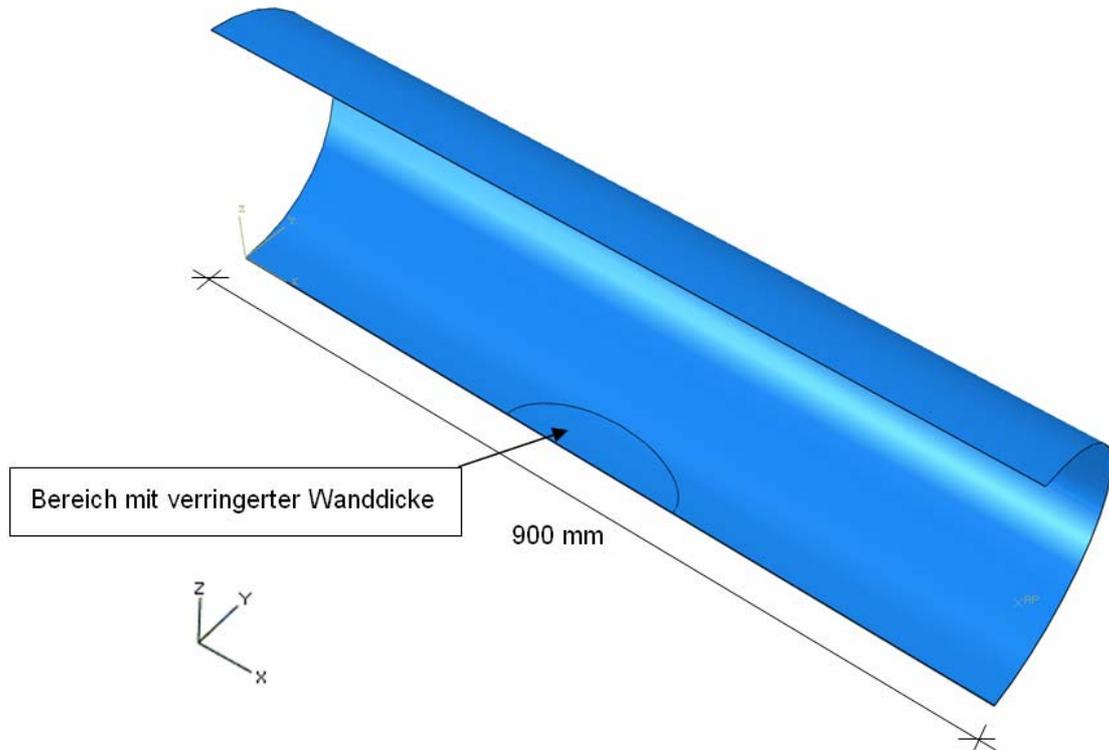


Abb. 113: Systembild verringerte Wanddicke in einem ellipsenförmigen Bereich

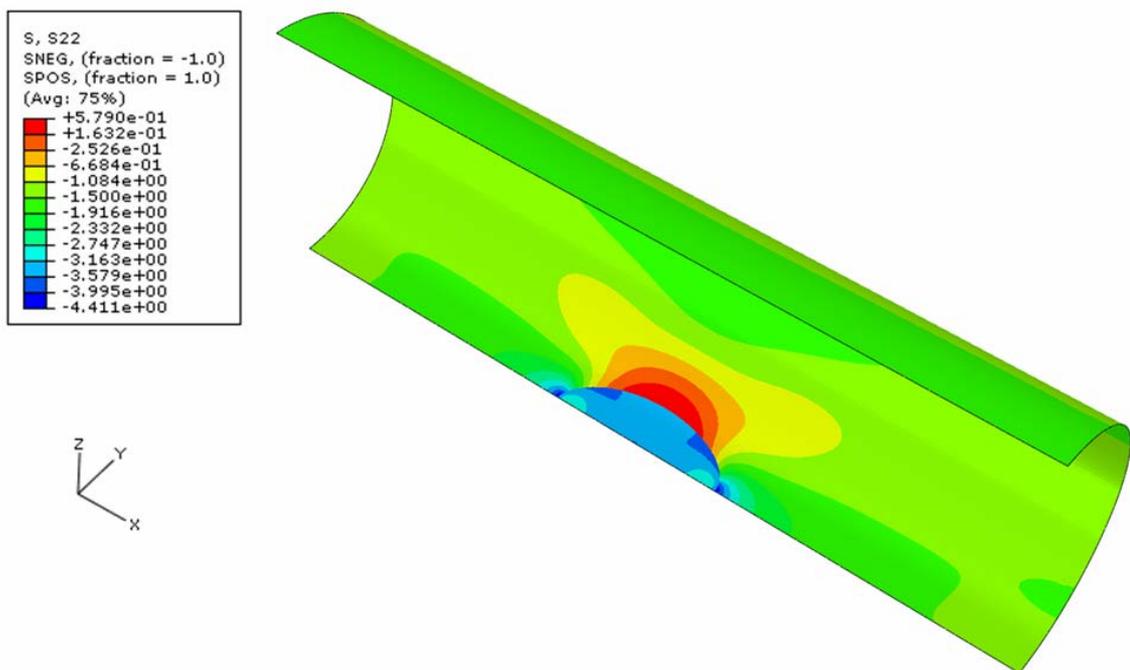


Abb. 114: Umfangsspannung σ_φ ($= S22$) des FE-Modells bei einer Ellipsengröße $a_E / b_E = 200/100$ mm

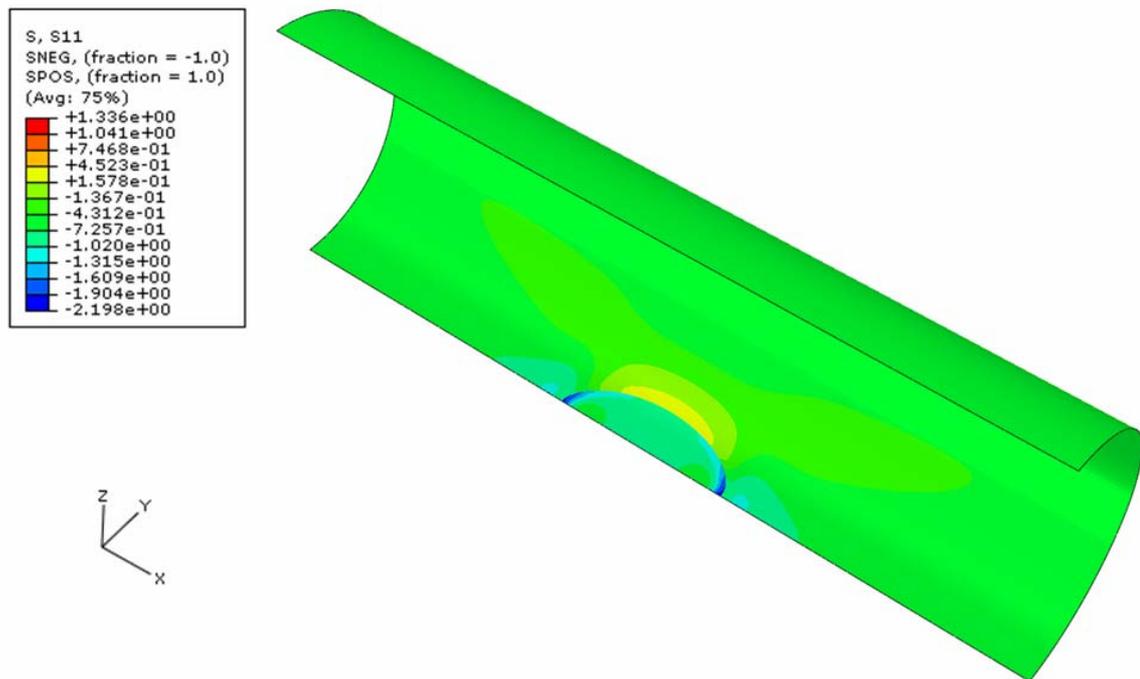


Abb. 115: Längsspannung $\sigma_x (= S11)$ des FE-Modells bei einer Ellipsengröße $a_E / b_E = 200/100$ mm

Die resultierenden Umfangs- und Längsspannungen werden in Bezug zu den Spannungen eines Liners mit konstanter Wanddicke und eines Liners mit Imperfektionen nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9] gesetzt (vgl. Tab. 31 und Tab. 32).

Tab. 31: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5$ m, Wanddickenänderung, $1/4$ - und $1/2$ -System, 5 mm Netzgröße

Variation		Grundmodell	Wanddicke über Umfang geändert		Wanddicke in Längsrichtung geändert		Wanddicke bereichsweise ellipsenförmig geändert	
Elementtyp		shell	solid		solid		shell	
		N/mm ²	N/mm ²	% ¹⁵	N/mm ²	% ¹⁵	N/mm ²	% ¹⁵
Umfangsspannungen	außen	-1,65	-2,09	+27	-2,79	+69	-3,43	-108
	innen	-1,24	-3,68	+197	-2,79	+125	-4,41	+255
Längsspannungen	außen	-0,58	-0,75	+29	-1,06	+83	+1,34	+131
	innen	-0,43	-1,30	+202	-1,00	+132	-2,20	+412

Eine Wanddickenverringering erhöht die Spannungen im Liner. Bei der bereichsweise ellipsenförmig geänderten Wanddicke tritt ebenfalls wie beim verringerten E-Modul im sprunghaften Übergangsbereich eine Spannungserhöhung auf.

¹⁵ Die Abweichung der Spannungen (Maximalwerte) im Liner mit verringerter Wanddicke wird auf die Maximalwerte des Grundmodells (Liner ohne Imperfektionen) bezogen.

Tab. 32: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5 \text{ m}$, Wanddickenänderung, $\frac{1}{4}$ - und $\frac{1}{2}$ -System, 5 mm Netzgröße

Variation		Standardmodell	Wanddicke über Umfang geändert		Wanddicke in Längsrichtung geändert		Wanddicke bereichsweise ellipsenförmig geändert	
Elementtyp		shell	solid		solid		shell	
		N/mm ²	N/mm ²	% ¹⁶	N/mm ²	% ¹⁶	N/mm ²	% ¹⁶
Umfangsspannungen	außen	-8,93	-2,09	-76	-2,79	-69	-3,43	-62
	innen	6,03	-3,68	-39	-2,79	-54	-4,41	-27
Längsspannungen	außen	-3,13	-0,75	-76	-1,06	-66	+1,34	-57
	innen	2,11	-1,30	-38	-1,00	-52	-2,20	+4

Verglichen mit dem Standardmodell mit Imperfektionen nach ATV-Merkblatt 127-2 [9] sind die Spannungen geringer. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Spannungen nur für Verringerung der Wanddicke ohne den Einfluss durch weitere Imperfektionen untersucht wurden. Ferner wird die Wanddicke in Längsrichtung wie folgt variiert und für einen Wasseraußendruck von 5 m WS verglichen:

- über die Rohrlänge veränderliche Länge der Ellipse von $a_E = 200 \text{ mm}$ bis $a_E = 800 \text{ mm}$ (vgl. Tab. 33).

Tab. 33: Spannungen im Liner, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck $h_{W,So} = 5 \text{ m}$, verringerte Wanddicke, $\frac{1}{2}$ -System, 5 mm Netzgröße

Aufteilung		Umfangsspannungen σ_ϕ		Längsspannungen σ_x	
Werte	Ellipsenlänge	außen	innen	außen	innen
-	mm	N/mm ²			
Maximalwerte	Grundmodell ¹⁷	-1,65	-1,65 (K) -1,24 (S)	-0,58	-0,43
	800	-4,14	-8,38	-1,49	-2,69
	600	-4,14	-6,95	-1,49	-2,37
	400	-3,90	-6,23	-1,48	-2,31
	200	-3,43	-4,41	+1,34	-2,20
	Standardmodell ¹⁷	-8,93	6,03	-3,13	-2,11

Den Ergebnissen der FE-Berechnung bei Variation der Ellipsenlänge a_E ist zu entnehmen, dass sich die Größe des Bereiches vor allem auf die Umfangsspannungen auswirkt. Gegenüber dem Grundmodell mit konstanter Wanddicke $s_L = 5 \text{ mm}$ erhöhen sich die Spannungen im sprunghaften Übergangsbereich.

¹⁶ Die Abweichung der Spannungen (Maximalwerte) im Liner mit verringerter Wanddicke wird auf die Maximalwerte des Standardmodells (Liner mit Imperfektionen nach ATV-M 127-2) bezogen (Betragswerte).

¹⁷ Grundmodell und Standardmodell mit konstanter Wanddicke $s_L = 5 \text{ mm}$

8.5 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden die Einflüsse von örtlich begrenzten Imperfektionen eines Schlauchliners auf die Tragfähigkeit anhand eines 3D-Finite Element Modells untersucht. Die folgenden Imperfektionen wurden beispielhaft an einem Synthesefaserliner der Nennweite DN 300 mit einer Wanddicke von 5 mm untersucht:

1. Örtliche Vorverformungen von 3 mm ($w_v = 2\%$ des Linerradius, 40° Ausdehnung) mit variabler Länge,
2. Längsfalte mit einer Höhe von 20 mm mit variabler Länge,
3. Querfalte mit einer Höhe von 20 mm
 - a) ungefüllt (Shell-Elemente),
 - b) ungefüllt (Solid-Elemente),
 - c) mit Harz gefüllt (Solid-Elemente),
4. Unterschreitung des E-Moduls um 50 % in einem ellipsenförmigen Bereich mit 100 mm Breite und variabler Länge,
5. Unterschreitung der Sollwanddicke um 50 % mit
 - a) linearem Verlauf von 5 mm auf 2,5 mm in Umfangsrichtung,
 - b) linearem Verlauf von 5 mm auf 2,5 mm in Längsrichtung und
 - c) in einer ellipsenförmigen Fläche mit 100 mm Breite und variabler Länge.

Die Berechnungen sind im Prinzip auch auf andere Nennweiten übertragbar. In allen Berechnungen wurde ein konstanter Ringspalt von 0,5 % des Linerradius angenommen. Als Belastung wurde ein Außendruck aus 1,5 m bzw. 5,0 m Grundwasser über der Linersohle zugrunde gelegt.

Der Einfluss der Imperfektionen auf die Tragfähigkeit des Liners wurde ermittelt. Dabei wurden Grenzlängen der Imperfektionen in Längsrichtung definiert, für die das 2-D Modell gültig bzw. eine Untersuchung mit einem 3-D Modell erforderlich ist. Die Spannungen in der Linerwand infolge der einzelnen Imperfektionen wurden mit den Ergebnissen des Grundmodells (keine Imperfektionen) und des Standardmodells (Imperfektionen nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9]) verglichen. Maßgebend war der Vergleich mit dem Standardmodell, da der Imperfektionsansatz nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9] auch gewisse begrenzte Ungenauigkeiten des Linereinbaus mit abdecken muss. Es ist jedoch zu beachten, dass keine Überlagerung der hier betrachteten Imperfektionen 2. bis 5. mit der örtlichen Imperfektion nach ATV-Merkblatt 127-2 [9] erfolgte.

Die Verringerung der Wanddicke und des E-Moduls in einem ellipsenförmigen Bereich führen im FE-Modell zu sprunghaften Spannungsänderungen und zu ungünstigen Spannungsspitzen im Übergangsbereich an den Rändern der Ellipse. Eine weitere Verfeinerung des Modells mit einem linearen Verlauf in die Ellipse hinein würde diese Spannungsspitzen glätten.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass sich die Imperfektionen ungünstig auswirken, jedoch gegenüber dem Standardmodell nach ATV-M 127-2 [9] mit Ausnahme der Imperfektion aus der Längsfalte geringere Spannungen entstehen. Allerdings ist zu beachten, dass keine Überlagerung der einzeln betrachteten Imperfektionen mit der örtlichen Vorverformung untersucht wurde. Im Falle von Imperfektionen 2. bis 5. ist jeweils im Einzelfall zu entscheiden, ob diese durch die Vorverformung von 2% des Standardmodells abgedeckt und damit keine weitere Berechnung mehr erforderlich ist. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in Tab. 34 zusammengefasst.

Tab. 34: Ergebnisse, Altrohrzustand I, Wasseraußendruck, Grundmodell: keine Imperfektionen, Standardmodell: Imperfektionen nach ATV-M 127-2 [9]

Imperfektion	Parameter/Variation	Vergleich der Spannungen mit dem Grundmodell ($w_v = 0$)	Vergleich der Spannungen mit dem Standardmodell ($w_v = 2\%$)	Gültigkeit des 2-D Modells / Grenzlänge
		Abweichung [%]	Abweichung [%]	
1. Örtliche Vorverformung	$w_v = 2\%$ Öffnungswinkel $\alpha = 40^\circ$ konstant	0	0	+
	$w_v = 0 - 2\%$ Öffnungswinkel $\alpha = 40^\circ$ in Rohrlängsrichtung veränderlich	↑	↓	+ / $L_v / DN \geq 4$ ¹⁸
2. Längsfalte	Höhe $h_F = 0 - 20$ mm Öffnungswinkel $\alpha_F = 10^\circ$ in Rohrlängsrichtung veränderlich	↑	↑ -14 bis + 525	+ / $L_v / DN \geq 3$ ¹⁸
3. Quersfalte	a) Höhe $h_F = 0 - 20$ mm, ungefüllt Öffnungswinkel $\alpha_F = 10^\circ$	↑ + 143 bis + 653	↓ - 50 bis + 75	-
	b) Höhe $h_F = 0 - 20$ mm, ungefüllt Öffnungswinkel $\alpha_F = 10^\circ$	↑ + 95 bis + 228	↓ - 64 bis - 33	-
	c) Höhe $h_F = 0 - 20$ mm, gefüllt Öffnungswinkel $\alpha_F = 10^\circ$	↑ - 12 bis + 84	↓ - 84 bis - 62	-
4. bereichsweise verringerter E-Modul	$0,5 \cdot E_L$ und $1 \cdot E_L$ Stufe, ellipsenförmig	↑ + 28 bis + 97	↓ - 76 bis - 60	-
5. bereichsweise verringerte Wanddicke	a) $0,5 \cdot s_L$ bis $1 \cdot s_L$ Umfangsrichtung	↑ + 27 bis + 202	↓ - 76 bis - 38	+
	b) $0,5 \cdot s_L$ bis $1 \cdot s_L$ Längsrichtung	↑ + 69 bis + 132	↓ - 69 bis - 52	-
	c) $0,5 \cdot s_L$ und $1 \cdot s_L$ Stufe, ellipsenförmig	↑ - 108 bis + 412	↓ - 62 bis + 4	-

↑ = erhöhte Spannungen, ↓ = geringere Spannungen, 0 = näherungsweise gleiche Spannungen
+ = gültig, - = nicht gültig

¹⁸ 2-D-Modell liegt i. d. R. auf der sicheren Seite

9 Werkstoffanalyse und -identifizierung

9.1 Hintergrund

Die Ergebnisse in [8] zeigen, dass Qualitätsnachweise des Bieters hinsichtlich der Lieferqualität des Materials bereits in der Ausschreibung gefordert und spätestens vor der Vergabe überprüft werden sollten. Dabei sollte insbesondere kontrolliert werden können, ob bei der Herstellung des Schlauches auch die vertraglich vereinbarten Produkte verwendet werden. Dies ist im Rahmen der Bauüberwachung auf der Baustelle für den Auftraggeber nur sehr schwer nachzuvollziehen. Auch durch die Kontrolle der Lieferscheine der Ausgangsmaterialien ist die Identifikation der Materialien u. U. nicht eindeutig möglich. Eine einfache Kontrollmöglichkeit bietet z. B. ein Vergleich der IR-Spektralanalyse von dem auf der Baustelle verwendeten Harz mit einer Reinharzprobe des im Angebot beschriebenen Materials. Ziel im Rahmen des Forschungsvorhabens war es, marktübliche Linermaterialien sowohl als Reinharz- als auch als Baustellenprobe zusammenzustellen und infrarotspektroskopisch zu untersuchen und auf der Basis der Untersuchungsergebnisse eine Linerdatenbank zur Identitätskontrolle von Linern aufzubauen. Die nachfolgenden Beschreibungen und Ergebnisdarstellungen sind dem Bericht der Fachhochschule Gelsenkirchen, Prof. Dr. K.-U. Koch, entnommen [12]:

Im Verlauf der zusammengefassten Untersuchungen wurde deutlich, dass aufgrund der großen Produktvielfalt dem Aufbau und der praktischen Einsatzfähigkeit der IR-Datenbank eine besondere Bedeutung zukommt. Ergänzend war auch die Aussagekraft der Untersuchungsmethode DSC näher zu hinterfragen. Dieser Methode wird nachgesagt, dass auf Grund von temperaturabhängigen Messungen der Energieaufnahme Aussagen über den Aushärtegrad des Materials und die mechanische Stabilität des eingebauten Liners getroffen werden können. Auf die angestrebten Vorversuche zu TGA-GC-MS-Messungen wurde zugunsten dieser praxisnahen Ausrichtung und Erweiterung der IR- und DSC-Messungen verzichtet.

9.2 Aussagekraft von DSC-Analysen an Linerproben

9.2.1 Ergebnis einer DSC-Analyse

In der DSC-Analyse wird die Energieaufnahme einer sehr geringen Probenmenge (ca. 10 mg) in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Die Diagramme (vgl. Abb. 116) zeigen zunächst einen Sprung an der Stelle der Glasübergangstemperatur T_G (Trennung zwischen sprödem und gummi-elastischem Bereich) und anschließend einen sog. Peak, dessen Flächengröße häufig als Nachhärtungspotential bzw. fehlende Aushärtung interpretiert wird.

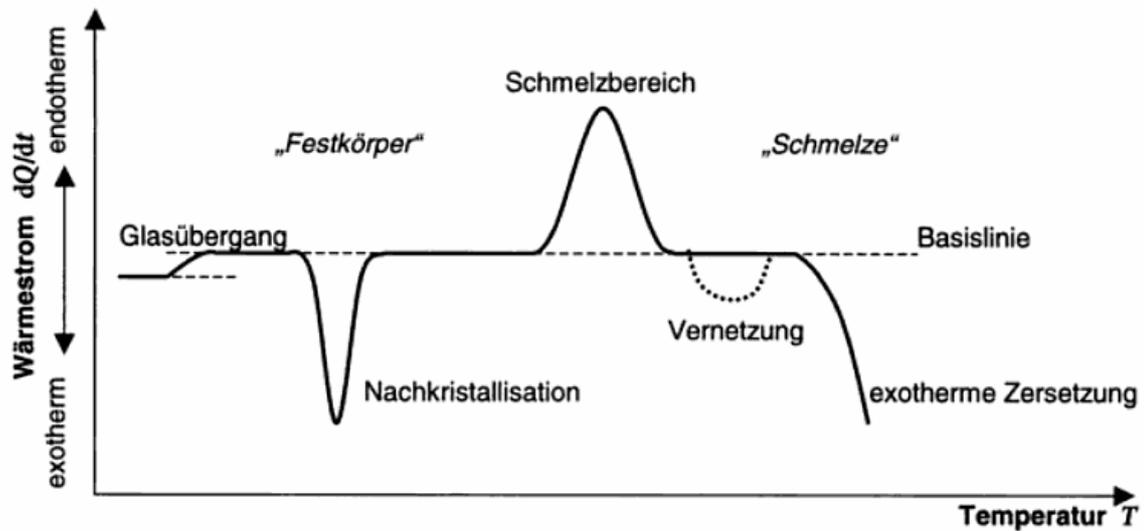


Abb. 116: Kalorische Effekte bei Kunststoffen [130]

9.2.2 Zusammenhang Glasübergangstemperatur (T_G) und E-Modul

Ein verlässlicher Zusammenhang zwischen T_G und E-Modul lässt sich ausschließlich an unter Laborbedingungen – d. h. keine Mischfehler und damit bei definiertem Polymerisationsgrad – hergestellten idealen Reinharz-Proben ermitteln. Bei realen Baustellenproben kann über die DSC keine Aussage über einen E-Modul getroffen werden, da über diese Methode keine Aussage über den Anteil an Verstärkungsfüllstoff getroffen werden kann. Reale Baustellenproben weisen häufig eine inhomogene Verteilung des Verstärkungsfüllstoffes auf. Eine weitere wichtige Einflussgröße bei der Beurteilung der mechanischen Kennwerte ist außerdem über die DSC-Messung nicht zugänglich. Es handelt sich hierbei um die Ankopplung der Fasermaterialien an die Matrix. Daher ist mit dieser Methode bei vorheriger Kenntnis des Harztyps maximal eine Aussage über das Vorhandensein eines ausgehärteten Matrixharzes, nicht jedoch über dessen mechanische Eigenschaften möglich.

9.2.3 Aussagen über den Aushärtungsgrad

Die Fläche des Peaks bei einer Nachreaktion des Harzes ist abhängig von der Anzahl und der Art der bei der Reaktion gebildeten chemischen Bindungen. Dies macht unmittelbar deutlich, dass die Peakfläche bei Kenntnis der chemischen Natur des Harzes (allein die Bezeichnung als z. B. „Epoxidharz“ reicht nicht aus) maßgeblich von der der Messung unterworfenen Harzmenge abhängt. Da insbesondere bei realen Linerproben der Harzanteil in der Probe stark variieren kann, liegt eine Gleichung mit zwei Unbekannten vor, die über die Bestimmung eines Parameters so nicht lösbar ist. Selbst bei einer parallelen Bestimmung des Füllstoffgehalts über andere Methoden werden deutliche Schwankungen auftauchen, da die Probe für die DSC-Untersuchung mit ca. 10 mg so gering ist, dass bereits eine Probenentnahme wenige Millimeter neben der für die Füllstoffgehalte entnommenen Probe zu anderen Füllstoffgehalten führen kann und somit eine quantitative Zuordnung der Peakfläche zu den beim Aufheizen neu gebildeten Bindungen nahezu unmöglich wird. Über die Methode DSC ist lediglich bei Vorliegen eines Reaktionspeaks die Aussage zulässig, dass eine Reaktion stattgefunden hat, allerdings nicht, in welchem Ausmaß. Beim Fehlen des Peaks ist es wie-

derum möglich, dass wegen der geringen Probenmenge so wenig Harz in der Messprobe ist, dass ein nur unerhebliches oder aber gar kein Signal zu beobachten ist.

9.2.4 Aussagekraft der DSC-Messung an Linerproben

Wird an einer In-situ-Linerprobe der T_G bestimmt, lässt eine signifikante¹⁹ Abweichung des Messwertes vom Soll-Muster der Reinharz-Daten²⁰ vermuten, dass die Probe nur unzureichend ausgehärtet ist. Allerdings können auch folgende Ursachen für Abweichungen des T_G vorliegen:

1. zu geringer Harzanteil in der Messprobe
2. fehlerhafte Rezepturbestandteile (falsches Harz, falscher Härter)
3. Fremdstoffbestandteile in der Rezeptur
4. ggf. Füllstoffeinflüsse.

9.2.5 Fazit

Die Ergebnisse einer DSC-Analyse bieten sehr gute Anhaltspunkte für die Qualitätskontrolle im Rahmen der Produktentwicklung und -verbesserung. Im Vorfeld dieser Messungen werden gezielt Rezepturänderungen (Harzrezeptur, Füllstoffanteil etc.) herbeigeführt und dann die Kennwerte (mechanische Kennwerte, T_G etc.) bestimmt. Die Grenzen ihrer Aussagekraft erlauben für In-situ-Proben allerdings keine gerichtsfeste Abnahmeuntersuchung der Ausführungsqualität von Schlauchlinern.

9.3 Aussagekraft von IR-Analysen zur Lineridentifizierung

9.3.1 Hintergrund

Bei der Infrarot-Spektroskopie handelt es sich um ein Verfahren der optischen Spektroskopie mit dem, ähnlich dem Verfahren der Bilderkennung, anhand von Referenzproben auf die Identität unbekannter Materialien geschlossen werden kann. Dieses Verfahren ähnelt dem Abgleich von Fingerabdrücken von einem Tatort mit denen aus einer Kartei. In der Fachterminologie wird daher auch der Spektralbereich von 500 cm^{-1} bis 2000 cm^{-1} als „Fingerprint-Bereich“ bezeichnet.

Im vorliegenden Forschungsprojekt sollte dieses Verfahren auf den Bereich der Schlauchlinermaterialien angewendet werden. Verschiedene Referenzmaterialien sollten hierzu IR-spektroskopisch untersucht und in eine Datenbank eingepflegt werden. Mit Hilfe dieser Datenbank sollte es dann möglich sein, Linerproben aus einer Haltung sowohl hinsichtlich des Harztyps als auch des Herstellers zu identifizieren.

9.3.2 Durchführung

Präparation der Probe und Messung:

Mit einem Skalpell, einer Säge oder einer Feile werden je nach Linerkonsistenz und -geometrie aus dem mittleren Querschnittsbereich einer Linerprobe, die für die IR-Spektroskopie notwendigen Probenmengen präpariert (vgl. Abb. 117).

¹⁹ Die Signifikanz der Messwerte ist vorher zu untersuchen.

²⁰ Ein Prüfmuster vom den Liner-Herstellern mit korrekter Aushärtung, korrektem Harz-zu-Füllstoff-Verhältnis muss von den Prüflaboratorien als Standard zuvor gemessen werden.



Abb. 117: Präparation einer Linerprobe mit einem Skalpell, einer Säge und einer Feile

Trotz sorgfältiger Auswahl der Probenbereiche lässt es sich nicht vermeiden, je nach Probenstück unterschiedliche Verhältnisse zwischen dem ausgehärteten Tränkharz und dem Trägermaterial (Polyester-Synthesefaser, Glasfaser) bzw. Füllstoff zu erhalten, da diese Inhaltsstoffe über den Probenquerschnitt in einer realen Baustellenprobe nie gleichmäßig verteilt sind. Die präparierte Probe wird anschließend mit einem Infrarot-Spektrometer (z. B. der Firma Nicolet, IR-Nicolet 4700) unter Zuhilfenahme einer Diamant-ATR-Einrichtung gemessen (vgl. Abb. 118).



Abb. 118: Infrarot-Spektroskopie

Die so erhaltenen Spektren werden mit den ebenfalls nach dieser Art und Weise gemessenen und in der Datenbank vorliegenden Referenzspektren verglichen.

9.3.3 Referenzdatenbank

Die im Projektrahmen aufgebaute Referenzdatenbank umfasst mittlerweile Spektren von 71 unterschiedlichen Materialien. Diese schlüsseln sich wie folgt auf:

- Polyesterharze 22
- Vinylesterharze 7
- Epoxidharze 21
- Sonstige 21

Bei den Polyesterharzen enthält die Datenbank vier Spektren von Harzen auf Basis von ortho-Phthalat, neun Spektren von Harzen auf Basis von iso-Phthalat sowie sieben selbst ausgehärtete Polyester- und Vinylharze vom Harzhersteller. Die Rubrik „Sonstige“ umfasst drei Silikat/Polyurethanharze und vier Kurzlinerharze auf Basis von Epoxidharzen sowie Harzrohstoffe (13 flüssige Ausgangsmaterialien für Epoxidharze) und Hilfsstoffe (ein Polyesterfilz).

9.3.4 Einsatzfähigkeit der Datenbank

Wie Abb. 119 zeigt, kann mit sehr guter Genauigkeit die Baustellenprobe (rote Kurve) mit derjenigen aus der Referenzdatenbank in Übereinstimmung gebracht werden (blaue Kurve).

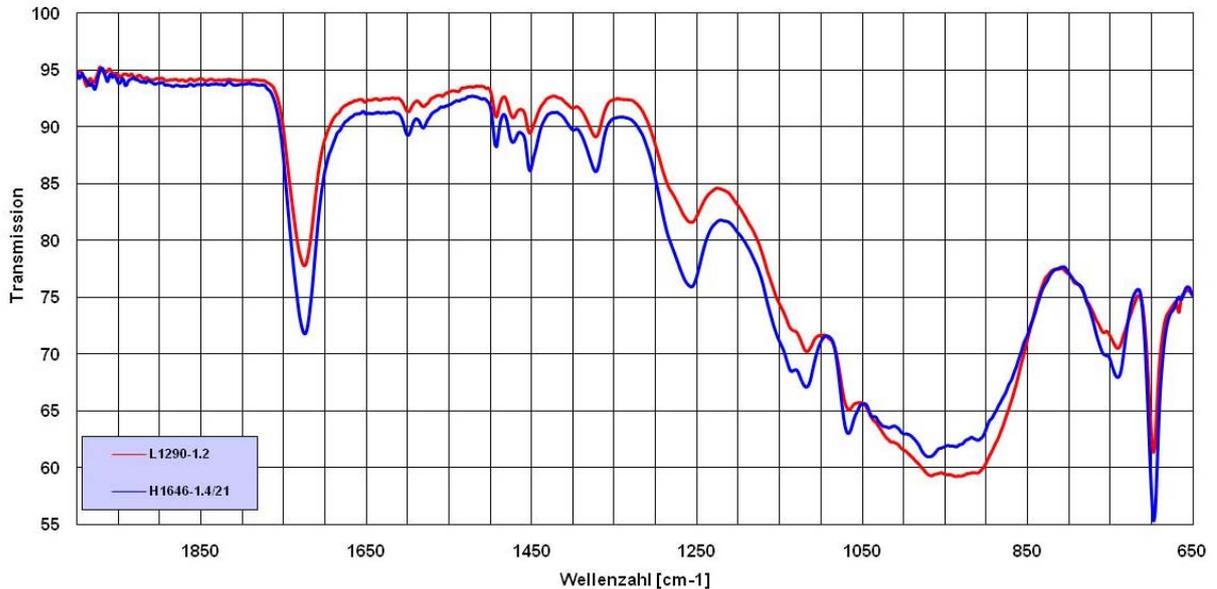
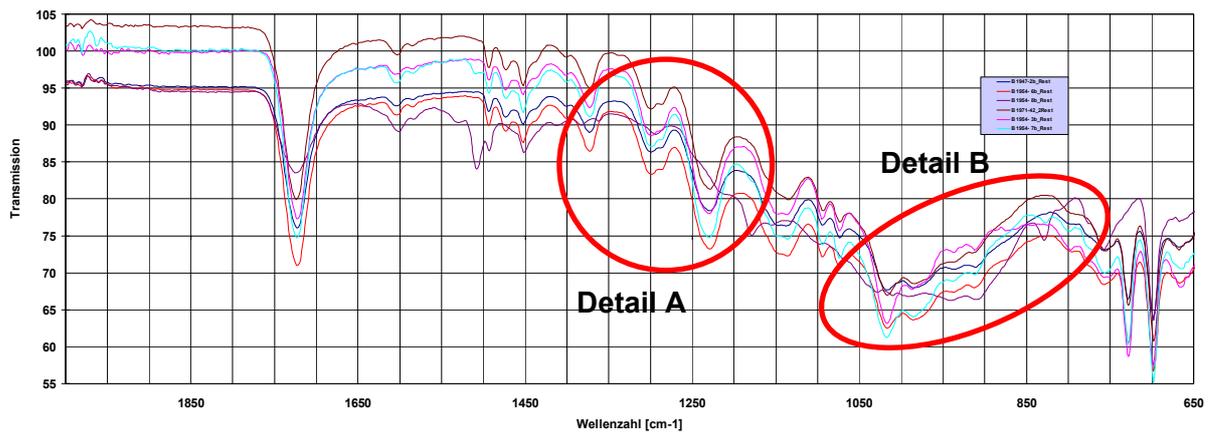


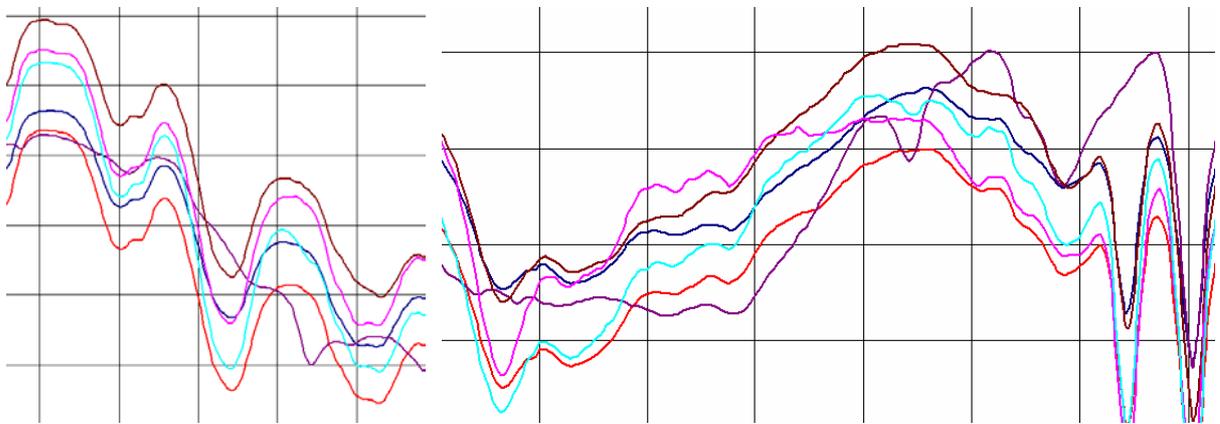
Abb. 119: Vergleich des IR-Spektrums einer Linerprobe (L1290-1.2) mit einer Referenzprobe, (Datenbankspektrum, H1646-1.4/21, ortho-Phthalat- / Neopentylglycolharz)

Bei den dargestellten IR-Spektren (Fingerprint-Bereich) handelt es sich um Proben eines ortho-Phthalat/Neopentylglycolharzes eines bestimmten Herstellers. Die Zuordnung konnte aufgrund des umfangreichen Referenzmaterials mit sehr großer Sicherheit getroffen werden. Interessanterweise gab der Netzbetreiber allerdings an, ein Harz auf Basis von iso-Phthalat / Neopentylglycol eingesetzt zu haben. Das Beispiel zeigt, dass es die aufgebaute Datenbank zulässt, die beiden unterschiedlichen Harztypen voneinander zu unterscheiden und eindeutig dem anderen Harztyp zuzuordnen.

Ein ebenfalls sehr beispielhaftes Ergebnis konnte bei einer anderen Untersuchung erzielt werden. Hier sollten Harztyp und Hersteller von sechs Schlauchlinermaterialien (Baustellenproben) zugeordnet werden. Abb. 120 zeigt den Vergleich der sechs Materialien im IR-Spektrum (Fingerprint-Bereich).



a) Gesamtansicht



b) Detail A

c) Detail B

Abb. 120: Vergleich der IR-Spektren von sechs Linerproben, Proben: B1947-2b Rest, B1954-3b Rest, B1954-6b Rest, B1954-7b Rest, B1954-8b Rest und B1971-42 2Rest; die Probe B1954-8b Rest weicht von den anderen ab (siehe Detail)

Es wird deutlich, dass das Spektrum einer Probe (B1954-8b Rest) von den restlichen fünf Proben (B1947-2b Rest, B1954-3b Rest, B1954-6b Rest, B1954-7b Rest und B1971-42 2Rest) abweicht. Bei den fünf übereinstimmenden Materialien konnten sowohl der Harzhersteller als auch der Harztyp bestimmt werden. Es handelte sich jeweils um ein Harz auf Basis iso-Phthalat / Neopentylglycol (vgl. Abb. 121).

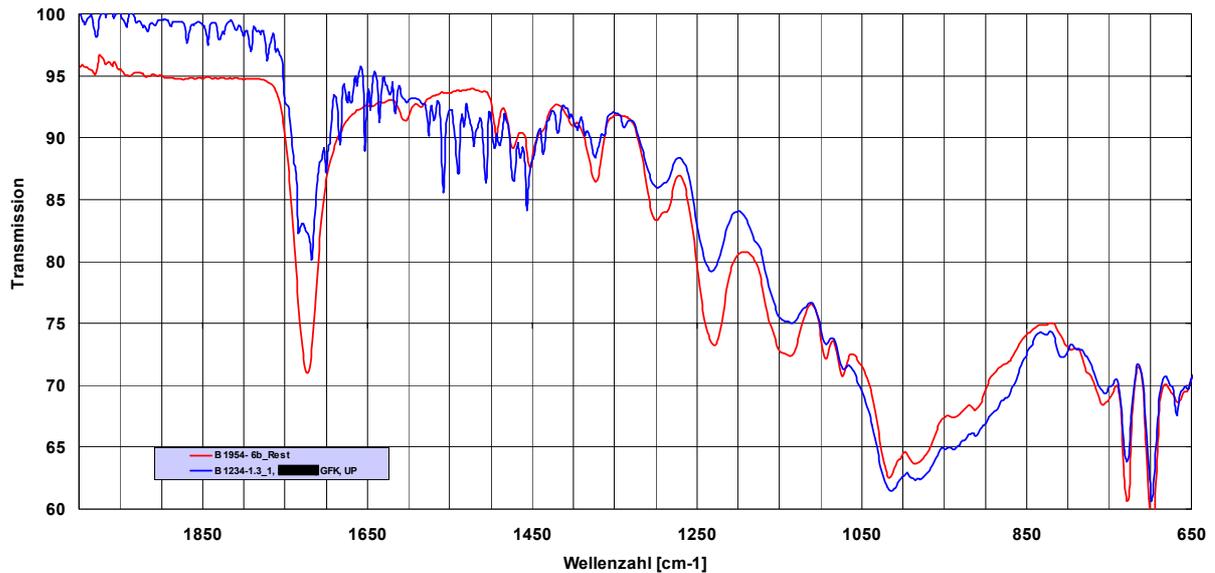


Abb. 121: Übereinstimmung des IR-Spektrums mit einem Harz auf Basis iso-Phthalat / Neopentylglycol, Beispiel Probe 1954-6b Rest
(gilt für die Proben: B1947-2b Rest, B1954-3b Rest, B1954-6b Rest, B1954-7b Rest und B1971-42 2Rest)

Die 6. Probe zeigte allerdings keine Überstimmung mit diesem Referenzmaterial. Beim Vergleich des Spektrums von Probe B1954-8b mit den Datenbankspektren stellte sich heraus, dass es sich vielmehr um ein Harz auf der Basis eines Vinylester handelte. Wie die beiden Grafiken zeigen, konnte sämtliche Zuordnungen mit sehr großer Sicherheit getroffen werden.

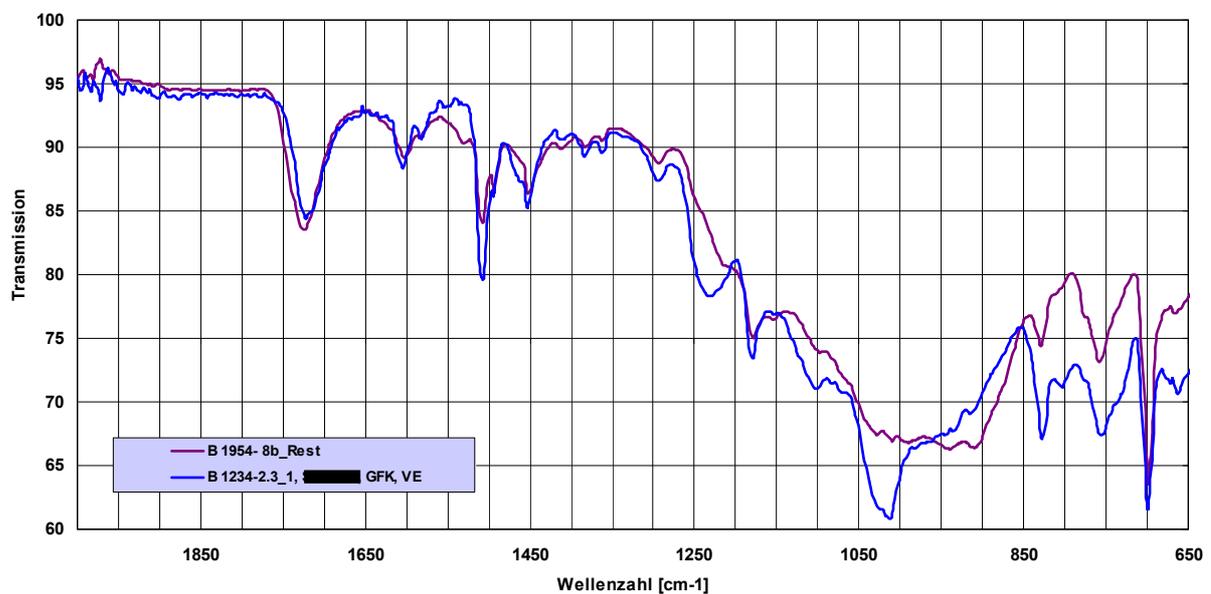


Abb. 122: Übereinstimmung des IR-Spektrums einer Linerprobe (B1954-8b) mit einem Harz auf Basis eines Vinylester

Es lässt sich zusammenfassen, dass bereits jetzt mit Hilfe der bestehenden Datenbank eine sehr gute Zuordnung von unbekanntem Baustellenproben zum jeweiligen Harztyp möglich ist. Aus einer Reihe von Baustellenproben können von einer Ausschreibung abweichende Harztypen identifiziert und zugeordnet werden.

9.3.5 Potential der Methode

Es besteht über die derzeitige Leistungsfähigkeit der Datenbank hinaus weiteres Potential, diese Methode auszubauen. Insbesondere sollte dies durch Vergleichsmessungen von Baustellenproben mit

- Harzmischungen (aufgrund der Bildüberlagerungen in der derzeitigen Datenbank nicht hinterlegt) und
- Rezepturunregelmäßigkeiten (in der derzeitigen Datenbank prinzipiell hinterlegt; es fehlen allerdings Rezepturoffenlegungen der Hersteller)

angestellt werden.

Ohne eine genaue Kenntnis der entsprechenden Harzrezepturen (insbesondere der Art der Inhaltsstoffe) stößt die Methode der IR-Spektroskopie an gewisse Grenzen bezüglich der Einsatzmengen von Verunreinigungen. In der Fachwelt wird diese Grenze mit ca. 5 % angegeben. Diese Mengengrenze ist allerdings stark abhängig vom Spektralbereich und von der betrachteten funktionellen Gruppe des Moleküls.

Eine weitere wirtschaftliche Grenze besteht in der Zunahme der Messzeit bei der Suche nach geringen Verunreinigungskonzentrationen.

Wie bereits eingangs erwähnt, enthält die für die Messung präparierte Probe unterschiedliche Mengen an ausgehärtetem Tränkharz und Verstärkungsfüllstoff, so dass auch hier ohne genauere Rezepturkenntnis (Soll-Ist-Vergleich genügt, es ist keine Rezepturoffenlegung notwendig) gewisse Intensitätsunterschiede beobachtet werden. Diese Tatsache nimmt keinen Einfluss auf die Zuordnung der Baustellenprobe zu den jeweiligen Referenzproben. Allerdings werden Schwierigkeiten gesehen, Aussagen zum Aushärtegrad der jeweiligen Probe zu treffen sowie beim jetzigen Stand der Datenbank Unregelmäßigkeiten bei der Verwendung der Harze (Verhältnis Harz/Füllstoff) aufzuklären.

Die Durchführung eines derartigen Messprogramms böte die Chance, präzisere Aussagen über eine datenblattgemäße Verarbeitung der Harze zu treffen. Insbesondere könnte die Sensibilität der Messmethode für den Einsatz von Verschnittkomponenten und Verstärkungsfüllstoffen erarbeitet werden.

10 Schlussbetrachtung und Empfehlungen

Die in dieser Arbeit dargestellten Praxisbeobachtungen und Baustellenuntersuchungen unterstreichen, dass bei zufälliger Auswahl von Baustellenproben an neu eingebauten Linern die daraus gewonnenen Prüfkörper zum Teil erhebliche abnahmerelevante Schwankungen der Produktqualität aufwiesen. Bei neun von 15 unmittelbar nach Einbau im Haltungsbereich beprobten Linern zeigte sich mindestens eine – wenn auch z. T. geringe – Sollwertunterschreitung. Bei Nachbeprobungen an älteren Linern verschärfte sich dieser Eindruck noch. Auch wurden zum Teil Sollwertunterschreitungen an Haltungsproben beobachtet, obwohl die entsprechenden Schachtproben die Qualitätsprüfungen bestanden hatten. Materialstreuungen zeigte auch der Vergleich zwischen Probekörpern desselben Rohrquerschnitts (z. B. Kämpfer links/rechts). Eine weitergehende Auswertung von ca. 200 Inspektionsvideos und 1.800 Prüfberichten zu ca. 5.000 Schlauchlinerproben zeigte darüber hinaus, dass erhebliche Unterschiede zwischen dem optischen Eindruck und der labortechnisch überprüfbaren Qualität bestehen können. Piloteinsätze zerstörungsfreier Prüfverfahren ließen allerdings erkennen, dass diese Verfahren noch keine zuverlässige Alternative zum bisherigen Vorgehen der Abnahme mit Probenentnahme und Laborprüfung bieten.

Vor diesem Hintergrund stellt sich nun die Frage, wie bei der Abnahme von Lining-Maßnahmen grundsätzlich vorgegangen werden sollte, und welche Schlussfolgerungen im Einzelfall aus der Dokumentation von Auffälligkeiten und Mängeln bzw. Schwankungen in den Qualitätseigenschaften gezogen werden können. Nachfolgend soll hierzu ein methodischer Ansatz vorgeschlagen werden, mit dem die Problemstellung beschrieben und Handlungsalternativen abgeleitet werden können.

10.1 Rohrproduktion als zweistufiger Produktionsprozess

Die intensive Baustellenbegleitung von zwölf Schlauchlining-Maßnahmen bestätigte, dass die Produktion eines Schlauchliner-Rohres für den Einsatz in Hauptkanälen i. d. R. aus zwei wesentlichen, nahezu unabhängigen Produktionsschritten besteht. Zunächst wird der Schlauchliner im Werk als konfektioniertes, kunstharzgetränktes Trägermaterial in Schlauchform gefertigt und auf die Baustelle geliefert²¹. Im zweiten Schritt wird der Schlauchliner in das Altrohr eingebracht, dort unter Wasser- oder Luftdruck aufgestellt und zu einem Rohr ggf. auch unter Einsatz von Dampf- oder UV-Strahlung ausgehärtet. Erst im Zuge der Aushärtung erhält das Schlauchliner-Rohr seine endgültigen Geometrie- und Werkstoffeigenschaften als Neurohr im Altrohr-Boden-System, so dass Qualitätsabweichungen bzw. -auffälligkeiten, die ggf. erst in der zweiten Prozessphase entstehen, auch erst im eingebauten Zustand am fertiggestellten Produkt erkannt werden können. Ein ähnliches Fertigungsrisiko findet sich auch im Neubau, wenn z. B. in offener Bauweise das gesamte Rohr-Boden-System neu erstellt wird und Undichtigkeiten oder Verlegefehler erst an der überschütteten Leitung erkannt werden. Eine stets vollständig mängelfreie Herstellung („Null-Ausschuss“) eines Schlauchliner-Rohres bzw. neugebauten Rohr-Boden-Systems ist allerdings in industrieller Fertigung schon allein aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen nie zu erwarten²².

²¹ Dies gilt bei Einsatz von UP- und VE-Harzen. In Hauptkanälen stellt dies den Regelfall dar.

²² Ziel ist es i. d. R., die Mängelquote mit vertretbarem Aufwand zu senken, weil diese mit entsprechenden Kosten für die Mängelbeseitigung verbunden ist. Je niedriger die angestrebte Mängelquote, desto mehr Aufwand ist für die Qualitätssicherung zu erwarten. Die Kosten für eine Reduzierung von Mängeln (z. B. durch erhöhte Qualitätssicherung) sollten daher die Kosten für die ansonsten notwendige Mängelbeseitigung unterschreiten.

Größere Schwankungen im Herstellungsprozess eines Schlauchliner-Rohres als bei Herstellung von Neurohren im Werk mit anschließendem Einbau als Rohr-Boden-System sind insbesondere aufgrund der äußeren Produktionsbedingungen und hier insbesondere der ungleichmäßigen Altrohr-Bedingungen zu erwarten²³. Bei Rohrherstellung im Werk wird Mängeln i. d. R. durch Qualitätsprüfung im Werk mit Aussonderung minderwertiger Erzeugnisse begegnet. Spät erkannte Einbaufehler lassen sich aber auch hier meist nur mit großem Aufwand beheben.

Somit muss das Erkennen und Beseitigen von Fehlern in der Schlauchliner-Rohrproduktion auch den zweiten Teil der Rohr-Produktion, den Einbauprozess vor Ort, umfassen. Entsprechende Maßnahmen sind grundsätzlich bereits im Rahmen der internen Qualitätssicherung der ausführenden Firmen zu erwarten. Dies betrifft neben der eigentlichen Verhinderung bzw. Beseitigung von Mängeln auch die Ausbesserung der ggf. betroffenen Linerabschnitte mit dem Ziel einer durchgängigen Neurohrqualität.

10.2 Sanierungsziele und Qualitätsanforderungen

Die Diskussion des in Anhang 1 dargestellten Zustandskatalogs mit den Mitgliedern des Lenkungskreises der Netzbetreiber zeigte deutlich, dass die an einen vor Ort aushärtenden Liner zu stellenden Qualitätsanforderungen in engem Zusammenhang zu Wirtschaftlichkeitsüberlegungen zu sehen sind. Dies betrifft z. B. die zu erwartende Nutzungsdauer des Kanals und den bisherigen Altrohr-Zustand. So können sich im Einzelfall die Forderungen gemäß DIN EN 752 [6] nach vollständiger Wiederherstellung des Sollzustandes relativieren, wenn z. B. die Beseitigung von Muffenversätzen nicht als Gegenstand der Sanierungsaufgabe vereinbart wird und hieraus evtl. resultierende Querspalte als geometrische Imperfektion akzeptiert werden. Orientierung zu konkreten Kennwerten und Maßzahlen für Qualitätsanforderungen geben hier insbesondere die Regelwerke von DIN und DWA (vgl. [6], [9], [15], [16], [22], [23], [24], [25]) sowie ergänzende Dokumente von Verbänden und Interessengruppen (vgl. [26], [27], [29]).

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Sanierungsziele und Qualitätsanforderungen eng mit den örtlichen Randbedingungen verbunden sein können und der Zustand eines Schlauchliners bei Bauabnahme oder späterer Zustandserfassung im Betrieb auch stets vor diesem Hintergrund zu bewerten ist.

10.3 Zustandskatalog

Grundlage für die Zustandsbewertung bei Bauabnahme, Gewährleistungsabnahme oder während des späteren Betriebs sind die Ergebnisse einer Erfassung des Schlauchliner-Zustands und die Kenntnisse besonderer Qualitätsanforderungen oder -einschränkungen (vgl. Kapitel 10.2). Der in Anhang 1 dargestellte Zustandskatalog kann dabei als Orientierung für das Erkennen von Auffälligkeiten und für die einheitliche Zustandsbeschreibung dienen. Auf Grundlage dieser Zustandsbeschreibung und ggf. weiterer Untersuchungs- und Prüfergebnisse sind dann mögliche Ursachen für Auffälligkeiten zu identifizieren und die Auswirkungen mit Blick auf evtl. Mängel der Sanierungsleistung zu bewerten. Ursachenermittlung

²³ Besondere Parallelen zeigen sich hier auch zum Neubau in geschlossener Bauweise, denn auch dort wird das endgültige Rohr-Boden-System u. a. durch die von Außen vorgegebenen, möglicherweise ungleichmäßigen Bodenbedingungen bestimmt.

und Bewertung hängen in hohem Maße von den örtlichen Randbedingungen bzw. jeweiligen Sanierungszielen ab.

Ein grundsätzlicher Vorschlag für die Zuordnung möglicher Ursachen, Bewertungen und hieraus folgender Maßnahmen und ggf. ergänzender Prüfungen zu den einzelnen Zustandsbildern des Zustandskatalogs ist Gegenstand aktueller Diskussion mit Netzbetreibern, Herstellern und Fachverbänden. Die Ergebnisse dieses Abstimmungsprozesses lagen bei Abschluss des hier vorgestellten Projektes noch nicht vor, so dass sich der in Anhang 1 dargestellte Zustandskatalog bestimmungsgemäß zunächst auf die Zusammenstellung und Beschreibung der in der Praxis beobachteten Auffälligkeiten beschränkt, unabhängig von deren Häufigkeit und Relevanz für das gewählte Sanierungsziel.

10.4 Auffälligkeiten und Mängel

Ca. 4 % der untersuchten Laborproben zeigten optische Auffälligkeiten. Zum Teil waren diese mit erheblichen Qualitätsabweichungen verbunden. Einige waren nur unter Laborbedingungen feststellbar. Die Qualität des Liners ist bei Abnahme der Baumaßnahme somit unbedingt stichprobenhaft zu untersuchen. Hierzu bietet sich die Laborprüfung von einzelnen oder mehreren Schachtproben²⁴ bzw. Proben an optischen Auffälligkeiten (Begehung/TV-Befahrung) an. Bei unzureichenden Ergebnissen werden ggf. ergänzende Maßnahmen erforderlich. Folgende Betrachtungsfälle werden unterschieden:

- **Auffälligkeit:** Auffälligkeiten zeigen Eigenschaften, die von den grundsätzlich erwarteten Produkteigenschaften abweichen. Sie können vertraglich zugelassen sein (vgl. Vorverformungen nach dem ATV-Merkblatt 127-2 [9] oder Faltenbildung nach DIN EN 13566-4²⁵ [22]) und auch tolerierbare Auswirkungen auf die Erreichung einzelner oder mehrerer Sanierungsziele, d. h. Dichtheit, Funktionsfähigkeit, Standsicherheit und Dauerhaftigkeit, haben.
- **Mangel:** Führen die Auswirkungen einer Auffälligkeit zu nicht tolerierbaren Abweichungen von einem oder mehreren vertraglichen Sanierungszielen, so liegt ein Mangel vor. In Abhängigkeit seines Ausmaßes kann ggf. unterschieden werden zwischen einem nur wertmindernden Mangel, mit hinnehmbaren geringeren Sicherheiten bzw. höheren Versagenswahrscheinlichkeiten oder Einschränkungen der Dauerhaftigkeit, und einem schädlichen Mangel, bei dem ein Sanierungsziel vollständig verfehlt wird und Maßnahmen zur Mängelbehebung unbedingt erforderlich sind, z. B. Reparatur oder erneute Renovierung.

Die Auswirkungen einer Auffälligkeit bzw. eines Mangels lassen sich für die einzelnen Sanierungsziele wie folgt betrachten:

- **Funktionsfähigkeit**

Insbesondere geometrische Auffälligkeiten, wie Falten oder Beulen, können zu einer Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit führen. Als Abflusshindernisse reduzieren sie z. B. die hydraulische Leistungsfähigkeit und führen möglicherweise zu erhöhten Ab-

²⁴ Als Schachtproben gelten Liner-Proben, die nach Abschluss des Aushärtungsprozesses im Schachtbereich gewonnen werden. Die eigentliche Sanierungsstrecke wird hierbei nicht geschädigt.

²⁵ Auf geraden Strecken dürfen nach DIN 13566-4 [22] keine Faltenbildungen entstehen, die größer als 6 mm oder 2 % des Kanaldurchmessers sind, der größere Wert ist maßgebend.

lagerungen. Für die üblicherweise zulässigen Verformungen sind diese Effekte jedoch meist vernachlässigbar. So zeigten Untersuchungen in [131], dass mit Blick auf das Ablagerungsverhalten bei einer Einschnürung von 2,5 % und einem Teilfüllungsgrad von 50 % (Gefälle 2,5 ‰) die kritischen Sohlschubspannungen noch überschritten werden. Auch ist die Verminderung der hydraulischen Leitungsfähigkeit nahezu proportional zur Querschnittsverengung und somit i. d. R. vernachlässigbar. Im Zweifel kann z. B. durch Vergleich strömungstechnischer 1D-Simulationen mit den Anforderungen aus der Netzhydraulik entschieden werden, inwieweit es sich um einen wertmindernden oder sogar schädlichen Mangel handelt. In Grenzfällen können die geometrischen Auffälligkeiten auch als Grundlage für die Berechnung vermessen werden (vgl. Kapitel 7.1).

- **Dichtheit**

Insbesondere eine unzureichende Harztränkung und -verteilung im Linermaterial, Lufteinschlüsse (Poren) sowie Fehlfräsungen und fehlerhafte Anbindungen können die Dichtfunktion des Liners beeinträchtigen. In der Folge sind Ex- und Infiltrationen zu erwarten, mit Auswirkungen auf Boden, Grundwasser bzw. die Abwasserreinigung.

Für Linersysteme reicht eine Strangprüfung nach DIN EN 1610 [46] auf der Baustelle zum Nachweis der Dichtheit grundsätzlich nicht aus, da der Strang i. d. R. durch andere, nicht dauerhafte Systemkomponenten bzw. Einbauhilfen (Preliner, nicht-integrierte Innen-/Außenbeschichtung, zusätzliche Vliesschichten) vorübergehend abgedichtet werden kann. Undichtigkeiten der eigentlichen Dichtkonstruktionen können so nicht erkannt werden. Zur Bauabnahme der Dichtfunktion des sanierten Kanalabschnittes wird eine getrennte Betrachtung von Systemen mit und ohne integrierte Folienbeschichtung (innen/außen) vorgeschlagen:

- a) Linersysteme ohne integrierte²⁶ Folienbeschichtung

Für Linersysteme ohne integrierte Folienbeschichtung sollte eine Dichtheitsprüfung nach der APS-Richtlinie [48] durchgeführt werden. Undichtigkeiten belegen einen Mangel. Inwieweit es sich um einen wertmindernden oder sogar schädlichen Mangel handelt, ist im Einzelfall aufgrund des tatsächlichen Gefährdungspotentials zu entscheiden.

- b) Linersysteme mit integrierter Folienbeschichtung

Linersysteme mit integrierter Folienbeschichtung erhalten bereits durch die dauerhafte, abdichtende Wirkung der Folienbeschichtung eine nennenswerte Dichtwirkung gegen Außen- und Innenwasserdruck. Das Maß der erforderlichen Haftzugfestigkeit zwischen Liner- und Folienbeschichtung hängt unmittelbar mit den zu erwartenden Bau- und Betriebsbelastungen zusammen. Die Folie darf sich während des Einbaus, aber auch durch die späteren Außen- oder Innenwasserdrücke nicht vom Liner lösen. Innenfolien können ansonsten Abflusshindernisse bilden; auch bei Außenfolien ist es denkbar, dass die Folie an Fehlstellen im Altrohr unter Innendruck überdehnt und reißt.

²⁶ Als integrierte Folien gelten Folien, deren Beständigkeit gegenüber Bau- und Betriebsbelastungen über die erwartete Nutzungsdauer entsprechend nachgewiesen ist.

Vor diesem Hintergrund ist zu hinterfragen, welche Verfahren sinnvoller Weise zur Überprüfung des Haftverbundes zwischen einer Polyolefin-Folienbeschichtung und dem Laminat eingesetzt werden sollten. In Anlehnung an die Erfahrungen mit der Beschichtung von Abwasserschächten (vgl. [132]) liegt es nahe, Haftzugprüfungen an ausgewählten Prüfflächen durchzuführen und die Ergebnisse mit vertraglichen Vereinbarungen bzw. den Annahmen der statischen Berechnung zu vergleichen (z. B. 0,5 bar Innendruck, 0,1 bar Außenwasserdruck).

Die Dichtheitsprüfung sollte nach APS-Richtlinie [48] durchgeführt werden. Die integrierte Folienbeschichtung wird dabei nicht durchtrennt. Undichtigkeiten belegen einen Mangel. Inwieweit es sich um einen wertmindernden oder sogar schädlichen Mangel handelt, ist im Einzelfall aufgrund des tatsächlichen Gefährdungspotentials zu entscheiden.

- **Standicherheit**

Insbesondere Abweichungen in den geplanten Geometrie- und Werkstoffeigenschaften, wie Wanddickenschwankungen, Faltenbildung oder Tränkungsfehler, können die Standicherheit eines Liners beeinträchtigen. Zur Bewertung der Standicherheit eines Liners sollten zunächst anhand der Inspektionsergebnisse optische Auffälligkeiten von Geometrie und Oberflächeneigenschaften identifiziert werden. Ggf. sind zusätzliche Probekörper aus besonders auffälligen Bereichen zu gewinnen. Hinsichtlich der Bewertung von Imperfektionen sei auf Kapitel 8, bezüglich der Bewertung mechanischer Kennwerte auf Kapitel 10.5 verwiesen.

- **Dauerhaftigkeit**

In [133] werden für Maßnahmen der Wasserversorgung und Abwasserableitung Basis-Untersuchungszeiträume bzw. Rechenwerte für die durchschnittliche Nutzungsdauer von 60 Jahren vorgeschlagen. Für den vorliegenden Anwendungsfall ist zu hinterfragen, inwieweit Auffälligkeiten des Liners möglicherweise langfristig zu einer Beeinträchtigung der Standicherheit, Dichtheit oder Funktionsfähigkeit führen können. Dies betrifft insbesondere Angriffspunkte für betriebsbedingte oder zeitabhängige Beanspruchungen, wie z. B. Abrieb und Geräteinsatz bei Reinigungs- und Reparaturmaßnahmen sowie Wurzelwuchs. Insbesondere mögliche Werkstoffveränderungen durch Hochdruckreinigung sind hier zu beachten (vgl. [134]).

10.5 Streuung der Materialqualität

Die Auswertung von ca. 1.800 Prüfberichten mit etwa 5.000 Schlauchlinerproben sowie die Begleitung von zwölf aktuellen Baumaßnahmen zeigten, dass in der Praxis teilweise starke Streuungen der Linerrohr-Qualität festzustellen sind. In Einzelfällen zeigten sich sogar innerhalb einzelner Probekörper (ca. DIN A4-Größe) derart unterschiedliche Werkstoffeigenschaften, dass die mechanischen Kennwerte der entnommenen Prüfstücke um 100 % voneinander abwichen und mehrere dichte und undichte Materialbereiche unmittelbar nebeneinander lagen. Vor diesem Hintergrund sind insbesondere die Auswirkung von Streuungen auf die Zuverlässigkeit der Abnahme zu bewerten und mögliche Handlungsalternativen zu erörtern.

10.5.1 Zuverlässigkeit der Abnahme

Für die Bemessung von Tragwerken, Bauwerken und Rohrleitungen im konstruktiven Ingenieurbau, der Geotechnik und im Pipelinebau ist die Betrachtung der Zuverlässigkeit von Bemessungswerten für Einwirkungen und Auswirkungen traditionell von hoher Bedeutung. Sie hat Eingang in die europäischen und internationalen technischen Regeln gefunden (vgl. [135], [136], [137]) und ist auch Gegenstand von Forschung und Lehre im Bauwesen [138], [139]. Für den Fall der Bemessung von Produkten und Verfahren für den unterirdischen Leitungsbau und die Leitungsinstandhaltung wurden entsprechende Sicherheitskonzepte in [9] und [140] unter Berücksichtigung der Arbeiten von Fuchs [141], [142]) zur probabilistischen Zuverlässigkeitstheorie und ihre Anwendung auf im Erdboden verlegte Leitungen berücksichtigt. Die wesentlichen Zusammenhänge aus [141] und [142] können auch im vorliegenden Fall berücksichtigt werden.

Die bei der Abnahme beobachteten Unterschiede in den Materialeigenschaften mehrerer Liner-Proben einer Baumaßnahme lassen sich aufgrund der Laborergebnisse auf Streuungen der Materialeigenschaften bzw. auf Inhomogenitäten der Bauteileigenschaften zurückführen. Die Begriffe Streuungen und Inhomogenitäten werden für den vorliegenden Anwendungsfall wie folgt voneinander abgegrenzt:

- Streuungen** sind verfahrenstechnisch bedingte Schwankungen einzelner Materialeigenschaften, wie z. B. des E-Moduls und der Biegespannung beim ersten Bruch („Biegespannung“), und grundsätzlich unvermeidlich. Das Maß der Streuungen spiegelt sich in der Breite der Zufallsverteilung der Gesamtproduktion des Herstellers wider. Abb. 123 verdeutlicht dies anhand der Normalverteilung der Qualitätseigenschaften, z. B. E und σ_{FB} . Der angestrebte Mittelwert der Rohreigenschaften m_R wird teilweise über- und teilweise unterschritten. Vom Hersteller wird erwartet, dass der Sollwert in einem ausreichenden Sicherheitsabstand so festgelegt ist, dass z. B. nur 0,5 % oder 5 % der Rohrproduktion die Dichtheitskriterien nicht erfüllen bzw. den Sollwert der mechanischen Kennwerte unterschreiten (sog. 0,5 %- bzw. 5 %-Fraktile)²⁷.

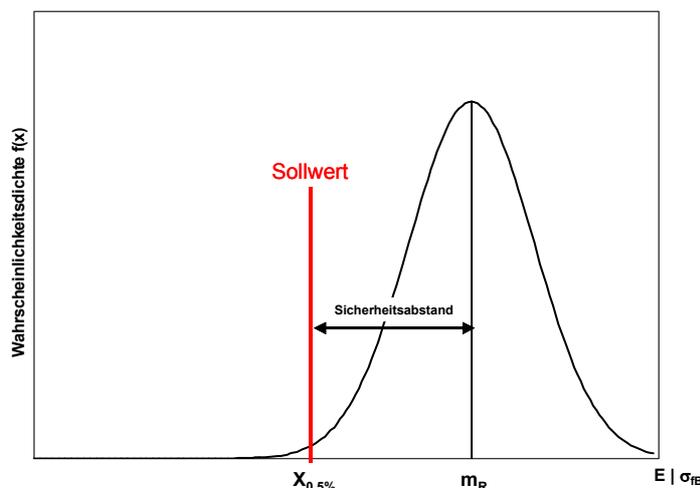


Abb. 123: Streuung der Materialeigenschaften für E bzw. σ_{FB} am Beispiel einer Normalverteilung, mit Mittelwert der Rohrqualität der Gesamtproduktion m_R und Sollwert bei 0,5 %-Fraktile²⁷

²⁷ Die 5 %-Fraktile wird üblicherweise in DIBt-Zulassungen für die Zuverlässigkeit der mechanischen Kennwerte angesetzt. Eine 0,5 %-Fraktile könnte z. B. in Anlehnung an die 3/3-Regel der Dichtheitsprüfung an Probestücken angenommen werden.

Einflüsse auf die Streuungen der Materialeigenschaften können sich z. B. durch Schwankungen im Verfahrensablauf, Qualitätsschwankungen der Ausgangsmaterialien und die Empfindlichkeit von Prozess und Material gegenüber schwankenden Umweltbedingungen ergeben und sollten den Herstellern bekannt sein.

- Inhomogenitäten** sind Ungleichförmigkeiten mit Blick auf das Erreichen der vorgegebenen Qualitätsanforderungen. Es handelt sich um eine zweiwertige Qualitätsbetrachtung, d. h. eine ausschließliche Unterscheidung in das Überschreiten oder Unterschreiten der vertraglich vereinbarten Sollwerte bzw. das Erfüllen oder Nichterfüllen der vereinbarten Dichtheitskriterien. Kommt es zu einer Unterschreitung der Sollwerte, liegt ein Mangel vor.

Besteht seitens des Auftraggebers Vertrauen in den Hersteller und seine Produktion, z. B. weil aus eigener Erfahrung oder aufgrund externer Informationen ausreichende Sicherheit hinsichtlich der Güte der Qualitätsverteilung besteht, und geht von Mängeln kein außergewöhnliches Gefährdungspotential aus, so wird in der Regel auf umfassende Abnahmeprüfungen beim Einbau verzichtet. Meist beschränkt sich der Auftraggeber auf eine einfache stichprobenartige Kontrolle der eingebauten Qualität, z. B. durch Prüfung einer einzelnen Schachtprobe. Liegt das Prüfergebnis dieser Stichprobe über dem Sollwert, wird der Produktion auch in diesem Fall vertraut.

Problematisch wird die Situation erst, wenn der Auftraggeber häufiger als erwartet Stichprobenergebnisse erzielt, die unter dem Sollwert liegen. Im Fall der in Kapitel 6 dargestellten Baustellenanalysen waren z. B. schon innerhalb einzelner Chargen, d. h. einzelner Halbstrecken, auch ohne optische Qualitätsunterschiede nennenswerte Schwankungen mit echten Inhomogenitäten, d. h. parallele Sollwertüber- und -unterschreitungen, zu beobachten. Abb. 124 skizziert diesen Zusammenhang beispielhaft.

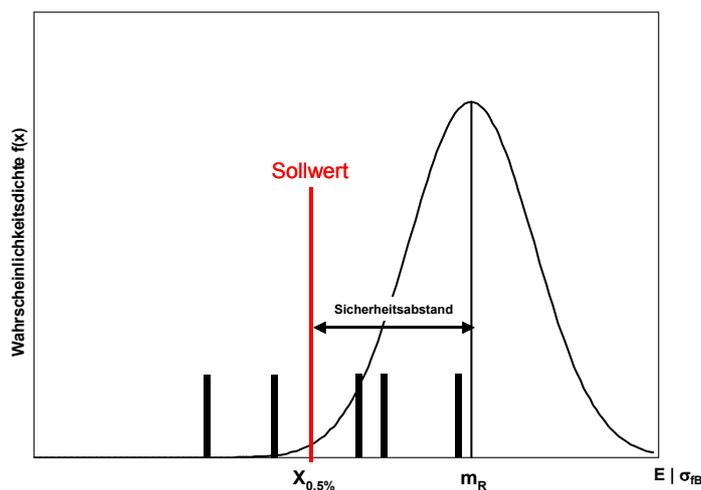


Abb. 124: *Inhomogenitäten der Materialeigenschaften (skizziert durch schwarze Balken) für E bzw. σ_{tB} , als Abweichung von der erwarteten Normalverteilung²⁷*

Als zufällige Häufung der Ergebnisse unterhalb der 0,5 %-Fraktile oder wiederholte Messfehler lassen sich diese Beobachtungen nicht begründen, denn die Irrtumswahrscheinlichkeit bei nicht bestandener Prüfserie beträgt für eine Prüfung an drei Stellen selbst bei einer 0,5 %-Fehlerfraktile der Produktion mit Forderung von 3 bestandenen von 3 Prüfungen lediglich 1,5 %. Auch bei 5 %-Fehlerfraktile der Produktion mit Forderung von 2 bestandenen von

3 Prüfungen beträgt dieses Risiko nur 0,8 %. Wird die Prüfung darüber hinaus bei Nichtbestehen an anderer Stelle wiederholt, reduziert sich das Irrtumsrisiko noch weiter auf unter 0,02 % bzw. 0,01 %.²⁸

Da in die Erhebung mehr als 20 unterschiedliche Schlauchlining-Maßnahmen bei 19 Netzbetreibern eingingen, wird allerdings auch nicht von einem systematisch bewussten Einbau minderer Qualität ausgegangen. Statt dessen ist zu schließen, dass in den relevanten Fällen der Mittelwert der Gesamtproduktion des Herstellers m_R zwar über dem Sollwert liegt, aber möglicherweise vor Ort niedriger als erwartet ausfiel oder insgesamt mit größerer Streuung als erwartet produziert wurde (vgl. Abb. 125).

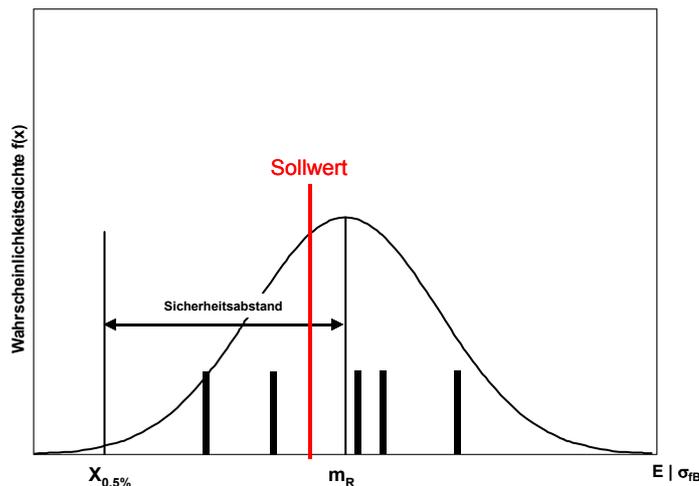


Abb. 125: Inhomogenitäten der Materialeigenschaften (skizziert durch schwarze Balken) für E bzw. σ_{fB} , mit angepasster Normalverteilung²⁷

10.5.2 Handlungsalternativen

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigen, dass auf Auftraggeberseite im Einzelfall nachvollziehbare Unsicherheiten bzw. Misstrauen bestehen können, ob das angebotene Produkt tatsächlich den zu erwartenden Qualitätseigenschaften mit vertretbaren Streuungen, d. h. ohne qualitätsrelevante Inhomogenitäten, entspricht. Liegt ein solches Misstrauen bei einzelnen Produkten vor, stellt sich die Frage, wie den damit verbundenen Unsicherheiten der Auftraggeber begegnet werden kann.

Fünf Handlungsalternativen bieten sich im Umgang mit diesen Produkten an:

1. Sollwert-Verringerung

Der Auftraggeber kann seine Erwartungen an künftige Belastungen herabsetzen oder auch andere Sicherheitsvorkehrungen und Belastungsbeschränkungen herbeiführen, so dass die Sollwerte verringert werden können. Auch der Auftragnehmer kann auf eine Sollwert-Verringerung hinwirken, z. B. indem er nachweist, dass in der statischen Berechnung eine reduzierte Festigkeit durch eine größere Wanddicke ausgeglichen werden kann oder Sicherheitsreserven in der statischen Berechnung ange-

²⁸ Dies lässt sich mathematisch anschaulich nachvollziehen: Bei einer wiederholten zweiwertigen Prüfung handelt es sich um eine „BERNOULLI-Kette“. Ist nach der Wahrscheinlichkeit $P(A)$ für das Ereignis A gefragt, dass bei einer BERNOULLI-Kette von n Versuchen wenigstens x -mal, jedoch höchstens y -mal das Ereignis E (Einzelwahrscheinlichkeit p) auftritt, so gilt

$$P(A) = \sum_{x \leq k \leq y} b(n; p; k) = \sum_{x \leq k \leq y} \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n-k}$$

. Dies führt zu den o. a. Werten.

setzt und ein erneuter Nachweis geführt wird.

Dieses Vorgehen lässt allerdings unberücksichtigt, dass nur im Falle zu geringer Wanddicken eine rein geometrisch-statische Argumentation möglich ist. Übermäßige Minderungen der Werkstoffkennwerte, d. h. E-Modul und Biegespannung, lassen grundsätzlich darauf schließen, dass vor Ort insgesamt andere Werkstoffeigenschaften vorliegen, als gemäß Vertrag bzw. Zulassung vereinbart waren. Somit können neben den in der Statik ausgewiesenen mechanischen Kennwerten auch andere Werkstoffeigenschaften, insbesondere mit Blick auf die Dauerhaftigkeit des Materials, durch die veränderte Einbauqualität bzw. die Produktionsbedingungen in Mitleidenschaft gezogen worden sein. Eine alleinige Korrektur statischer Kennwerte berücksichtigt diese Risiken nicht.

2. Schärfere Abnahmeprüfungen

Im Rahmen einer erweiterten Abnahmeprüfung mit vergrößertem Stichprobenumfang kann für das infrage stehende Produkt abgesichert werden, ob trotz Qualitätsschwankungen der Gesamtproduktion zumindest die im Rahmen der betrachteten Baumaßnahme eingebaute Liniestrecke den Qualitätsanforderungen ohne kritische Ausreißer entspricht (vgl. gestrichelte Linie in Abb. 126). Hierzu sollten mindestens drei Proben an unterschiedlichen Liniestellen entnommen werden. Werden ausschließlich Proben im Schachtbereich²⁹ verwendet, sollten diese unterschiedliche Umfangsbereiche repräsentieren³⁰.

Kritisch an dieser Lösung ist zum einen die massive Erhöhung des Prüfaufwandes. Zum anderen ändert die schärfere Abnahmeprüfung nichts an der Ausgangssituation, d. h. es ist weiterhin mit Qualitätsmängeln in gleichem Umfang zu rechnen. Diese werden lediglich häufiger erkannt, so dass sich auch die Häufigkeit der Mängelbeseitigung erhöhen wird.

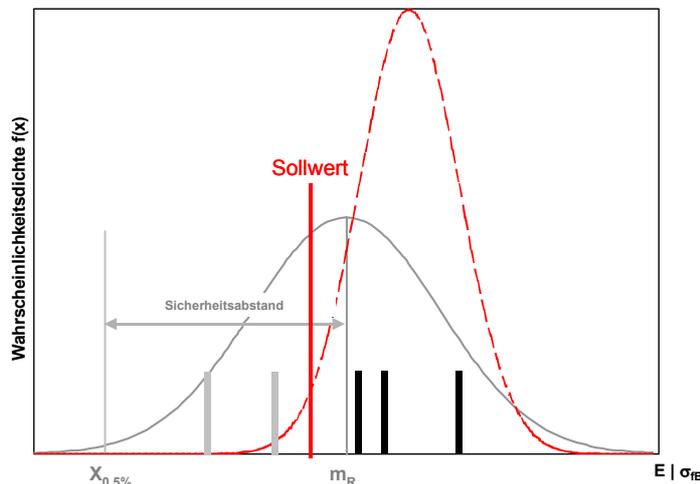


Abb. 126: Stichprobe mit drei Proben (skizziert durch schwarze Balken) zum Nachweis einer vertrauensvollen Qualitätsverteilung im Einzelfall (gestrichelte Linie)

²⁹ Der Schachtbereich kann auch auf den Beginn der nächsten Haltung ausgedehnt werden, wenn diese ursprünglich noch nicht Sanierungsgegenstand ist und daher eine Probenentnahme auch dort das Sanierungsobjekt nicht schädigt.

³⁰ In den Baustellenuntersuchungen wurden Qualitätsschwankungen sowohl über die Haltungslänge als auch über den Linienumfang festgestellt. Da nicht nachgewiesen wurde, ob die Längs- oder Umfangsrichtung einen stärkeren Einfluss auf die Schwankungsbreite hat, wird die Betrachtung der Streuung für die Beprobung zunächst auf den Umfangsbereich im Schacht eingeschränkt.

3. Produktwechsel

Bewertet der Auftraggeber die Situation z. B. aufgrund erhöhten Gefährdungspotentials grundsätzlich als inakzeptabel, kann er auch auf einen weiteren Einsatz des Produktes verzichten und – sofern verfügbar – auf ein anderes zuverlässigeres Produkt oder Verfahren ausweichen. Allerdings schränkt er damit seine Wahlmöglichkeiten ein, so dass höhere Kosten die Folge sein können.

4. Weiterentwicklung der Produktqualität

Die Sollwert-Unterschreitungen können unmittelbar verringert werden, indem durch eine Weiterentwicklung des Produktes die mittlere Einbauqualität deutlich erhöht wird und z. B. durch Einsatz prozess-unempfindlicherer Materialien auch die Streuung für die Gesamtproduktion verringert wird. Entsprechend erhöht sich insgesamt der Anteil der qualitativ ansprechenden Linerabschnitte und damit die Zuverlässigkeit der Lieferung.

5. Entwicklung stabilerer Produktionsprozesse

Sollwert-Unterschreitungen können theoretisch auch ohne Produktänderung verringert werden, wenn allein der Produktionsprozess stabiler und mit geringeren Ergebnisstreuungen gefahren wird.

Während die Handlungsoptionen 1 bis 3 mit erheblichen Kosten- bzw. Qualitätsrisiken verbunden sind und keine unmittelbare Qualitätsverbesserung darstellen, bieten die Handlungsoptionen 4 und 5 echte Perspektiven für eine langfristige Qualitätsverbesserung. Allerdings sind derartige Veränderungen der Produktqualität bzw. Produktionsstabilität erst dann für die Abnahme relevant, wenn die damit verbundenen Verbesserungen auch anhand umfassender Baustellenauswertungen belegt wurden und damit ein entsprechendes Vertrauen auf Auftraggeberseite entsteht.

10.6 Perspektiven für Entwicklung und Abnahme

Um mögliche Fehlerquellen und Verbesserungspotentiale einzelner Produkte zu erkennen und auch mögliche Streuungen der Materialeigenschaften zu verringern, empfiehlt es sich, den gesamten Prozess der Linerherstellung und des Einbaus vor Ort näher zu analysieren. Dies betrifft sämtliche Herstellungsphasen, wie z. B. die Rohstoffverarbeitung (Harz und Trägermaterial), den Tränkungsprozess im Werk oder auf der Baustelle sowie den eigentlichen Einbauvorgang einschließlich Anbindung des Liners an das bestehende Kanalnetz. Konstruktive Produktveränderungen wurden u. a. bereits durch Einsatz integrierter Folienbeschichtungen in [19] und [21] dokumentiert.

Eine Option zur produktionsintegrierten Nutzung zerstörungsfreier Prüf- bzw. Messverfahren konnte mit der Temperaturmessung unter Einsatz von Glasfaserkabeln bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens erprobt werden (vgl. Kapitel 7). Damit ist es möglich, den zeitlichen und örtlichen Temperaturverlauf innerhalb eines Liners während der Aushärtung zu kontrollieren und aufzuzeichnen. Typische Einsatzbereiche wären besondere Baumaßnahmen mit lokalen Schwankungen der Umgebungstemperatur durch Grund- bzw. Oberflächenwasser, wie z. B. Düker oder Bachquerungen. Die Handhabbarkeit vor Ort zeigt allerdings noch Optimierungsbedarf, z. B. hinsichtlich der Vorbereitung und Montage der Kabel an der Altrohrwand. Eine werksseitige Integration der Messkabel in den getränkten Harzschlauch könnte hier Abhilfe schaffen. Die Weiterverfolgung und Umsetzung dieser Messtechnik liegt entsprechend bei den Herstellern von Schlauchlinersystemen.

Besondere Perspektiven für die Abnahme von Lining-Maßnahmen ergeben sich bei Weiterentwicklung der in Kapitel 7 dargestellten zerstörungsfreien Prüfverfahren. Insbesondere eine flächenhafte Untersuchung (Abscannen) des Liners böte hier die Möglichkeit zum zerstörungsfreien und flächendeckenden Qualitätsnachweis. Darüber hinaus wäre eine vollständige statistische Betrachtung der Produktionsqualität im Sinne einer Zuverlässigkeitsanalyse möglich, so dass der Aufwand für die Abnahme der eigentlichen Bauleistung reduziert werden könnte. Eine vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Linerherstellern, Sanierungsfirmen und Auftraggebern kann diese Entwicklung unterstützen. Forschungsprojekte können hierzu die methodischen Wege aufzeigen; eine Festlegung produktbezogener Kennwerte liegt letztlich im Ermessen der Marktteilnehmer.

11 Zusammenfassung

Die Gesamtlänge des öffentlichen Kanalnetzes in Deutschland liegt laut einer Umfrage der DWA aus dem Jahre 2004 bei etwa 486.000 km, von denen ca. 20 % kurz- oder mittelfristig und weitere 21 % langfristig sanierungsbedürftig sind [1]. Vor dem Hintergrund des derzeitigen und zukünftigen Sanierungsbedarfs gewinnt die Auswahl eines zuverlässigen und dauerhaften Sanierungsverfahrens immer mehr an Bedeutung. Die Ausgaben für die Kanalsanierung in Deutschland betragen im Jahr 2003 bereits rund 1,60 Milliarden Euro. Zukünftig müssen nach [1] für die Sanierung der kurz- und mittelfristig zu behebenden Schäden in der öffentlichen Kanalisation voraussichtlich weitere 50 bis 55 Milliarden Euro veranschlagt werden.

Darüber hinaus ist aufgrund eines zu erwartenden Anstiegs des durchschnittlichen Alters der Kanalisation in den nächsten Jahren von einer Zunahme des Sanierungsbedarfs auszugehen. Rund 30 % des Kanalisationsnetzes sind nach [143] bis zu 25 Jahre, weitere 36 % sind zwischen 26 und 50 Jahre alt. Allein in den neuen Bundesländern sind über 50 % der Kanäle noch aus der Zeit vor dem Zweiten Weltkrieg. Diese Zahlen allein deuten auf einen erheblichen Anstieg der Ausgaben für die Kanalsanierung in Zukunft hin.

In Nordrhein-Westfalen (NRW) weisen die Kanäle, deren Zustand nach [2] auf einer Gesamtlänge von 49.873 km (57 %) erfasst wurde, auf mindestens 7.270 km wesentliche bauliche Schäden auf. Damit sind 14,6 % der Kanäle, für die nach den Angaben der Betreiber in NRW bis 2001 eine Zustandserfassung durchgeführt wurde, kurz- bis mittelfristig zu sanieren (vgl. RdErl. [3]). Geht man davon aus, dass auch für die verbleibenden 43 % der Kanäle eine durchschnittliche Schadensquote von 14,6 % gilt, so ergäbe sich auf Basis der bisherigen Angaben eine rechnerische schadhafte Kanalnetzlänge in NRW von insgesamt rund 12.700 km (vgl. [4]).

Für die anstehenden bzw. bereits durchgeführten Sanierungen der kurz- und mittelfristig zu behebenden Schäden gilt nach [5] das Schlauchlinerverfahren als das am häufigsten angewandte Renovierungsverfahren.

Die Netzbetreiber sehen sich also in den nächsten Jahren mit Investitionsentscheidungen für Sanierungsmaßnahmen im Schlauchlinerverfahren von erheblichen Ausmaßen konfrontiert. Grundlage für sichere Investitionsentscheidungen und eine Minimierung des Investitionsrisikos sind in erster Linie zuverlässige und nachvollziehbare Informationen über die Qualität der durchgeführten Sanierung. Neben dem grundsätzlichen Vertrauen in das Sanierungsverfahren werden hier insbesondere zuverlässige und nachvollziehbare Instrumente zur Bewertung der Linerqualität sowohl im Rahmen der Bau- als auch Gewährleistungsabnahme gefordert.

Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es somit, den Kanalnetzbetreibern in NRW eine zuverlässige, neutrale und unabhängige Orientierung zur Kontrolle der eingesetzten Linermaterialien und Bewertung von Ergebnissen aus der Abnahmeprüfung von Schlauchlining-Maßnahmen zu geben. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden zunächst die gängigen Anbieter und Verfahren sowie die technischen Regelwerke zur Sanierung im Schlauchlinerverfahren zusammengestellt, die derzeitige Vorgehensweise der Abnahme von Liningmaßnahmen detailliert untersucht und analysiert, Einflüsse von Auffälligkeiten auf die Standsicherheit betrachtet und auch neue Ansätze und Perspektiven zur Überprüfung des

Sanierungsergebnisses betrachtet. Abschließend wurden auf der Basis der gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse Empfehlungen für den zukünftigen Umgang mit Schlauchlinersystemen bei der Abnahme gegeben, ein Zustandskatalog von Schlauchlinerauffälligkeiten erarbeitet und der verbleibende Handlungsbedarf aufgezeigt.

In einem ersten Schritt wurde zunächst der aktuelle Stand der Schlauchliner-Technik (vgl. Kapitel 3) zusammengefasst. Hierzu zählten u. a. die Darstellung von Normen, Regelwerken und Anforderungsprofilen, eine Beschreibung der eingesetzten Materialien und deren Verarbeitung sowohl im Werk als auch vor Ort und der Qualitätssicherung nach Einbau. Ein aktueller Marktüberblick über die derzeit in Deutschland verfügbaren Produkte rundet die Hintergrundinformationen ab (vgl. Kapitel 4).

Im nächsten Schritt wurde anhand einer umfangreichen Recherche untersucht, welche optischen Auffälligkeiten an Schlauchlinern in der Praxis überhaupt auftreten (vgl. Kapitel 5). Diese Recherche zu Schlauchliner-Auffälligkeiten basierte zum einen auf Inspektionsvideos und -daten von Kanalnetzbetreibern und zum anderen auf der Datenbasis der IKT-Prüfstelle für Bauprodukte. Sie umfasst den Zeitraum der letzten zehn Jahre und insgesamt ca. 200 Inspektionsvideos, 500 Inspektionsfotos und 5.000 Probestücke. Darüber hinaus wurde im Rahmen der Recherche betrachtet, ob ein Zusammenhang zwischen der optischen Beurteilung einer Linerprobe und der erreichten Linerqualität nachgewiesen werden kann. Hierzu wurden Probekörper von optisch unauffälligen sowie von optisch auffälligen Linerproben – aufgenommen vor den Laborprüfungen – herangezogen und die Prüfergebnisse zur Dichtigkeit und zu den mechanischen Kennwerten vergleichend gegenübergestellt. Dabei wurde aufgezeigt, dass die Ergebnisse aus der optischen Inspektion allein nicht ausreichen, um die Qualität einer Schlauchlining-Maßnahme im Zuge der Abnahmeprüfung zu bewerten. Viele Auffälligkeiten sind darüber hinaus im Kanal bei einer rein optischen Begutachtung noch nicht zu erkennen; sie kommen erst unter Laborbedingungen zum Vorschein, z. B. durch Begutachtung der Linerrückseiten und Wandaufbauten³¹.

Um für die Zustandserfassung eine Orientierung über mögliche Auffälligkeiten und deren Beschreibung zu geben, wurde ein Zustandskatalog von Schlauchliner-Auffälligkeiten aufgestellt (vgl. Anhang 1). Dieser umfasst sowohl Auffälligkeiten im Rohrstrang als auch in den Anbindungsbereichen und basiert auf einer umfassenden Erhebung auch äußerst seltener Auffälligkeiten. Der aufgestellte Zustandskatalog ist derzeit Gegenstand einer aktuellen Diskussion mit Netzbetreibern, Herstellern und Fachverbänden.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung von zwölf aktuellen Baumaßnahmen³² wurde insbesondere die gängige Praxis bei der Probenentnahme hinterfragt (vgl. Kapitel 6). So z. B. war zu klären, ob die Entnahme einer Probe im Schacht repräsentativ für die gesamte Sanierungsstrecke ist. Zur Klärung dieser Fragestellung wurden die Entnahmeorte variiert und sowohl Proben aus dem Schacht als auch aus der Haltung und unterschiedlichen Querschnittsbereichen (Scheitel, Kämpfer, Sohle) entnommen und die Ergebnisse der Laborprü-

³¹ Als Ursachen für im Labor nachgewiesene Qualitätsabweichungen können u. a. unzureichende Aushärtungen, unregelmäßige bzw. unzureichende Imprägnierungen und Harzverteilungen sowie Lufteinschlüsse (Poren) genannt werden. Diese Auffälligkeiten sind z. T. jedoch selbst unter Laborbedingungen nur mikroskopisch erkennbar.

³² Bei einer der zwölf Baumaßnahmen war der Einbau gescheitert, da eine Beschädigung der Innenfolie beim Aufstellvorgang festgestellt wurde.

fungen hinsichtlich der Dichtheit und der mechanischen Kennwerte vergleichend gegenübergestellt (vgl. Anhang 2). Weiterhin wurde stichprobenhaft untersucht, ob der Zeitpunkt der Prüfung einen signifikanten Einfluss auf die Prüfergebnisse der mechanischen Kurzzeit-Eigenschaften haben kann.

Im Ergebnis zeigte sich, dass bei neun von 15 im Haltungsbereich beprobten Linern aktueller Baumaßnahmen mindestens eine Sollwert-Unterschreitung (Dichtheit, statisch tragende Wanddicke (Verbundwanddicke), E-Modul oder Biegespannung beim ersten Bruch) im Haltungsbereich festgestellt wurde, wenn auch z. T. nur mit geringer Ausprägung. Es konnten ferner Gegenbeispiele für die Hypothese gefunden werden, dass Schachtproben grundsätzlich schlechtere Materialkennwerte liefern als Haltungsproben (vgl. [76] und [77]). Mehrfach beprobte Liner zeigten des Weiteren z. T. erhebliche Streuungen von mehr als 20 % der mechanischen Kennwerte und unterschiedliche Ergebnisse bei der Dichtheitsprüfung sowohl unter Variation des Ortes (Schacht, Haltungsanfang, Haltungsmitte, Haltungsende) als auch der Querschnittsposition (Sohle, Kämpfer, Scheitel). Auch die Ergebnisse der Prüfung innerhalb einer Prüfkörperserie einer einzelnen Materialprobe zeigten zum Teil untereinander signifikante Streuungen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Standardbeprobung im Schacht lediglich einen zufälligen Einzelwert darstellt. Ein Einfluss des Zeitpunkts der Materialprüfung auf die mechanischen Kurzzeit-Eigenschaften wurde nicht beobachtet.

Zur Nachbeprobung von Schlauchlinern nach mehrjährigem Betrieb wurden zunächst Liner mit typischen Auffälligkeiten, Abweichungen und Veränderungen im Rahmen einer Recherche identifiziert. Ziel der Nachbeprobungen war die Untersuchung der Linerqualität an diesen charakteristischen Auffälligkeiten. Mit Blick auf die Erfassung der Streuung der Materialeigenschaften wurden auch Nachbeprobungen an Schlauchlinern durchgeführt, die optisch keine Auffälligkeiten aufwiesen. Dies wurde z. B. durchgeführt, um auch mögliche Einflüsse aus dem Betrieb im Rahmen von Gewährleistungsabnahmen berücksichtigen zu können. Bei den Nachbeprobungen wurden sowohl Dichtheitsprüfungen als auch mechanische Werkstoffuntersuchungen an den entnommenen Linerproben durchgeführt (vgl. Anhang 3).

Im Ergebnis dieser Untersuchungen lassen sich optische Auffälligkeiten nicht zuverlässig mit einer Veränderung der mechanischen Kennwerte bzw. der Dichtheit in Verbindung bringen. Die Bewertung von Auffälligkeiten ist entsprechend als Einzelfallbetrachtung anzusehen (vgl. Zustandskatalog im Anhang 1). Tendenzen sind jedoch vorhanden, so sind z. B. fleckenartige Verfärbungen scheinbar ohne Einfluss auf die Dichtwirkung und mechanischen Kennwerte, während frei liegende Fasern als Hinweis für mangelnde Harztränkung und daraus folgend mangelnde Dichtheit und mechanische Widerstandsfähigkeit angesehen werden können. Im Zuge der Nachbeprobungen von optisch unauffälligen Altlinern zeigte sich, dass auch hier z. T. Streuungen und Inhomogenitäten der Materialeigenschaften festgestellt werden konnten.

Im Gesamtblick der in den Kapiteln 5 und 6 dargestellten Ergebnisse aus In-situ-Untersuchungen und der Auswertung der Datenbasis der IKT-Prüfstelle lässt sich feststellen, dass die Materialeigenschaften einzelner Schlauchliner-Rohre stark streuen können. Dies betrifft sowohl die Eigenschaften in Längsrichtung als auch über den Querschnittsumfang. Es wurden darüber hinaus z. T. starke Streuungen in kleinräumigen Strukturen erkannt, dass sogar innerhalb desselben Probekörpers deutlich unterschiedliche Prüfergebnisse erzielt wurden. Die Qualität des Liners kann darüber hinaus nicht allein durch die optische Inspektion bewertet werden, so dass sich die Frage stellte, inwieweit der Einsatz innovativer zerstö-

rungsfreier Prüfmethode weitere Qualitätsaussagen zulässt. Im Rahmen eines Praxiseinsatzes wurden sechs zerstörungsfreie Prüfverfahren getestet.

Der Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren in Labor- und In-situ-Tests zeigte, dass diese Verfahren ein hohes Potential für eine Anwendung an Schlauchlinersystemen besitzen. Allerdings stellen die zerstörungsfreien Prüfverfahren zum jetzigen Stand der Gerätetechnik (noch) keine Alternative zur Probenentnahme für eine Überprüfung der erreichten Sanierungsqualität dar. Für einen standardmäßigen Einsatz sind die Verfahren hinsichtlich der erzielten Ergebnisse zu validieren, weiterzuentwickeln und größtenteils die Gerätetechnik zu verkleinern bzw. zu automatisieren. Die Prüfverfahren könnten dann eine sinnvolle Ergänzung zur bisherigen Qualitätssicherung und Abnahme in Form der optischen Inspektion und der Laborprüfung an entnommenen Linerproben darstellen.

Die Bemessungsmodelle für Schlauchliner nach dem ATV-Merkblatt 127 Teil 2 [9] gehen von den zweidimensionalen Ansätzen des Kreisringmodells aus, durch die auch die Imperfektionen nur zweidimensional erfasst werden können. Mit Hilfe der Finite Element Methode sind demgegenüber auch dreidimensionale Simulationen des Tragverhaltens des Liners bei nahezu beliebiger Verteilung der Imperfektionen möglich (vgl. [10]). Im Rahmen der in Kapitel 8 dargestellten statischen Berechnungen wurden mögliche Einflüsse von Imperfektionen auf die Linerqualität auf der Basis von 3D-Simulationen untersucht. Durch die Fachhochschule Münster, Prof. Dr.-Ing. B. Falter, wurden die Auswirkungen von Imperfektionen geometrischer und werkstofflicher Art auf die Tragfähigkeit des Liners betrachtet (vgl. [11]). In den statischen Untersuchungen wurden die Imperfektionen in Form einer örtlichen Vorverformung, einer Längsfalte, einer Quersfalte (sowohl mit Harz gefüllt als auch ungefüllt), eines bereichsweise verringerten E-Moduls und einer bereichsweise verringerten Wanddicke exemplarisch für einen Liner unter Wasseraußendruck in einem Altrohr der Nennweite DN 300 (Altrohrzustand I) untersucht.

Im Ergebnis der statischen Untersuchungen kann festgestellt werden, dass sich die hier untersuchten Imperfektionen ungünstig auswirken, jedoch gegenüber dem Standardmodell nach ATV-M 127-2 [9] mit Ausnahme der Imperfektion aus der Längsfalte geringere Spannungen entstehen. Allerdings ist zu beachten, dass keine Überlagerung der einzeln betrachteten Imperfektionen mit der örtlichen Vorverformung untersucht wurde. Im Falle der untersuchten Imperfektionen mit Ausnahme der örtlichen Vorverformung ist jeweils im Einzelfall zu entscheiden, ob diese durch die Vorverformung von 2 % des Standardmodells abgedeckt und damit keine weitere Berechnung mehr erforderlich ist.

Eine einfache Identifikation der gelieferten Schlauchlinermaterialien bietet z. B. ein Vergleich der IR-Spektralanalyse von dem auf der Baustelle verwendeten Harz mit einer Reinharzprobe des im Angebot beschriebenen Materials. Ziel im Rahmen des Forschungsvorhabens war es, marktübliche Linermaterialien sowohl als Reinharz- als auch als Baustellenprobe zusammenzustellen und auf der Basis der Untersuchungsergebnisse eine Linerdatenbank zur Identitätskontrolle von Linern aufzubauen. Ergänzend war auch die Aussagekraft der Untersuchungsmethode DSC näher zu hinterfragen. Dieser Methode wird nachgesagt, dass auf Grund von temperaturabhängigen Messungen der Wärmekapazität Aussagen über den Aushärtegrad des Materials und die mechanische Stabilität des eingebauten Liners getroffen werden können. Durch die Fachhochschule Gelsenkirchen, Prof. Dr. K.-U. Koch, wurden hierzu entsprechende Untersuchungen zur Werkstoffanalyse und -identifizierung durchgeführt [12].

Im Ergebnis wurde eine IR-Datenbank mit unterschiedlichen Harztypen aufgebaut, die die Zuordnung von unbekanntem Baustellenproben zum jeweiligen Harztyp ermöglicht. Aus einer Reihe von Baustellenproben können nun von einer Ausschreibung abweichende Harztypen identifiziert und zugeordnet werden. Die Ergebnisse einer DSC-Analyse bieten wiederum sehr gute Anhaltspunkte für die Qualitätskontrolle im Rahmen der Produktentwicklung und -verbesserung. Bei diesen Messungen werden gezielt Rezepturänderungen (Harzrezeptur, Füllstoffanteil etc.) herbeigeführt und die sich daraus ergebenden Kennwerte (mechanische Kennwerte, T_G etc.) bestimmt. Die Grenzen ihrer Aussagekraft bezüglich der mechanischen Kennwerte des Liners erlauben für In-situ-Proben allerdings keine gerichts-feste Abnahmeuntersuchung der Ausführungsqualität von Schlauchlinern.

In Kapitel 10 wird im Rahmen eines methodischen Ansatzes der Frage nachgegangen, wie bei der Abnahme von Lining-Maßnahmen grundsätzlich vorgegangen werden sollte, und welche Schlussfolgerungen im Einzelfall aus der Dokumentation von Auffälligkeiten und Mängeln bzw. Schwankungen in den Qualitätseigenschaften gezogen werden können. Als Empfehlung für die Bau- und Gewährleistungsabnahme werden die Rohrproduktion als zweistufiger Prozess betrachtet, Sanierungsziele und Qualitätsanforderungen hinterfragt und die Problemstellung auf einen Zustandskatalog und die Festlegung von Auffälligkeiten und Mängeln zurückgeführt. Der Streuung der Materialeigenschaften kommt mit Blick auf die möglichen Handlungsoptionen bei der Abnahme eine besondere Bedeutung zu. Abschließend werden weitere Perspektiven für die Entwicklung der Schlauchlining-Produkte und die Abnahme der Bauleistungen angeführt.

12 Literatur

- [1] Berger, C.; Lohaus, J.: Zustand der Kanalisation - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2004. Korrespondenz Abwasser, Abfall 2005 (52) Nr. 5, S. 528-539.
- [2] Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitung von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem (Selbstüberwachungsverordnung Kanal - SüwV Kan). Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land NRW, Nr. 49: S. 64-67; Düsseldorf 1995.
- [3] Anforderungen an den Betrieb und die Unterhaltung von Kanalisationsnetzen. RdErl. des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft v. 03.01.1995; Ministerialblatt für das Land NRW, Nr. 14: S. 251-253; Düsseldorf 1995.
- [4] Bosseler, B.; Birkner, T.; Sokoll, O.; Brüggemann, T.: Umsetzung der Selbstüberwachungsverordnung Kanal (SüwV Kan) bei kommunalen Netzbetreibern und Wasserverbänden in Nordrhein-Westfalen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW; IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur; Gelsenkirchen, Dezember 2003.
- [5] Sangster, T.; Downey, D.: 35 Jahre Schlauchlining – Ein Verfahren erobert den Markt. 4. Deutscher Schlauchlinertag; Nürnberg, 30. März 2006.
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 752 Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. Beuth Verlag; Berlin, April 2008.
- [7] Bosseler, B.; Schlüter, M.; Meyer, P.: Untersuchung der Qualität ausgeführter Kanalsanierungen am Beispiel des Schlauchrelinings. Endbericht zum Forschungsvorhaben, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW; IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur; Gelsenkirchen, März 2001.
- [8] Bosseler, B.; Schlüter, M.; Waade, L.: Qualitätseinflüsse Schlauchliner – Stichproben-Untersuchung an sanierten Abwasserkanälen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW; IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur; Gelsenkirchen, Dezember 2003.
- [9] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK): ATV-M 127-2 Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen mit Lining- und Montageverfahren. GFA, Hennef, Januar 2000.
- [10] Fachhochschule Münster: Statische Berechnung der Auskleidung eines Betonsammlers DN 2500 mit PE-HD-Noppenplatten (2004).
- [11] Falter, B.; Hildebrandt, S.: Einfluss von Imperfektionen auf Rohrleitungen am Beispiel der Nennweite DN 300 unter Außenwasserdruck, Altrohrzustand I. Teilbericht zum vorliegenden Forschungsprojekt; Fachhochschule Münster; Fachbereich Bauingenieurwesen; Münster 2009.

- [12] Koch, K.-U.: Werkstoffanalyse und -identifizierung. Teilbericht zum vorliegenden Forschungsprojekt; Fachhochschule Gelsenkirchen; Fachbereich Angewandte Naturwissenschaften - Organische Chemie und Polymere, Recklinghausen 2009.
- [13] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen. 3. Auflage; Ernst & Sohn Verlag; Berlin, November 1998.
- [14] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Arbeitshilfen – Abwasser. www.arbeitshilfen-abwasser.de; Stand 25. November 2008.
- [15] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK): ATV-DVWK-M 143-1 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 1: Grundlagen. Hennef, August 2004.
- [16] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 13566-1 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) - Teil 1: Allgemeines. Beuth Verlag; Berlin, April 2003.
- [17] Bosseler, B.; Diburg, B.: Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen in Rehabilitation von Rohrleitungen - Sanierung und Erneuerung von Ver- und Entsorgungsnetzen. Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt; Bauhaus-Universität Weimar; 2., überarbeitete Auflage; September 2008.
- [18] Insituform Rohrsanierungstechniken GmbH: Coating als integraler Bestandteil des Insituform-Linersystems: Jetzt doppelte Sicherheit. Fachartikel vom 06. November 2008; veröffentlicht unter www.unitracc.de.
- [19] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „Insituform“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 100 bis DN 1600 Kreis- und Eiprofilquerschnitte. Zulassungsnummer: Z-42.3-305; Berlin, 24. September 2008.
- [20] Norditube Technologies GmbH: Schlauchliner-System von Norditube zu 100 % dicht. Fachartikel vom 28. Juli 2008; veröffentlicht unter www.unitracc.de.
- [21] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „KM-INLINER“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 150 bis DN 1200 und 200/300 mm bis 800/1290 mm. Zulassungsnummer: Z-42.3-335; Berlin, 11. Juni 2008.
- [22] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 13566-4 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) - Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining. Beuth Verlag; Berlin, April 2002.
- [23] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 13380 Allgemeine Anforderungen an Bauteile für die Renovierung von erdverlegten Abwasserleitungen und -kanälen außerhalb von Gebäuden. Beuth Verlag; Berlin, Oktober 2001.

- [24] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): DWA-M 143-3 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 3: Schlauchliningverfahren (vor Ort härtendes Schlauchlining) für Abwasserleitungen und -kanäle. Hennef, November 2005.
- [25] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): DWA-M 143-20 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 20: Prüfung und Beurteilung von Sanierungsverfahren; Anforderungen, Prüfkriterien und Prüfeempfehlungen - Schlauchliningverfahren und Kurzliner. Hennef, November 2005.
- [26] RSV - Rohrleitungssanierungsverband e. V.: Merkblatt 1 Renovierung von Entwässerungskanälen und -leitungen mit vor Ort härtendem Schlauchlining – Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung. Essen, Dezember 2006.
- [27] Verband Zertifizierter Sanierungs-Berater für Entwässerungssysteme e. V. (VSB): ZTV 5 - Schlauchliningtechnik in Haltungen (drucklos). Mühldorf am Inn, April 2003.
- [28] Hamburger Stadtentwässerung (HSE): Anforderungsprofil / Zulassungsbedingungen für Schlauchreliningverfahren. Hamburg, in der Fassung von Oktober 2000.
- [29] Arbeitsgruppe Süddeutscher Kommunen; RSV - Rohrleitungssanierungsverband e. V.: Anforderungsprofil für Schlauchliner-Kanalrenovierungen; 3. Auflage vom 20. Oktober 2008.
- [30] Arbeitsgruppe Süddeutscher Kommunen; Hamburger Stadtentwässerung und RSV - Rohrleitungssanierungsverband e.V.: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (ZTV) für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner; in der Fassung vom 03. Dezember 2007.
- [31] Lorenz, R.: Ungesättigte Polyesterharze oder Epoxidharze im Kanalrohrrelining – Ein Vergleich. 3R international (42) Heft 1/2003; S. 58-62.
- [32] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 16946-2 Reaktionsharzformstoffe – Gießharzformstoffe – Typen. Beuth Verlag; Berlin, März 1989.
- [33] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18820 Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA) – Aufbau, Herstellung und Eigenschaften. Beuth Verlag; Berlin, März 1991.
- [34] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „UniLiner“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 100 bis DN 1200. Zulassungsnummer: Z-42.3-380; Berlin, 15. August 2005.
- [35] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „RS-CityLiner“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 150 bis DN 600. Zulassungsnummer: Z-42.3-377; Berlin, 06. Juli 2006.
- [36] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „iMPREG-Liner“ zur Sanierung

- schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 150 bis DN 1200. Zulassungsnummer: Z-42.3-365; Berlin, 07. Mai 2007.
- [37] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „SAERTEX-Liner“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 100 bis DN 1200. Zulassungsnummer: Z-42.3-350; Berlin, 11. September 2007.
- [38] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „Berolina Liner“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 100 bis DN 800. Zulassungsnummer: Z-42.3-336; Berlin, 25. Januar 2007.
- [39] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „Brandenburger Liner“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 150 bis DN 1000 und 200/300 mm bis 800/1200 mm. Zulassungsnummer: Z-42.3-330; Berlin, 28. April 2008.
- [40] TKT Jens und Lutz Meißner GbR: Einbau eines Brandenburger GFK-Liners. www.tkt-troisdorf.de; Stand 26. November 2008.
- [41] Insituform Technologies, Inc: How Insituform® Cured-in-Place Pipe (CIPP) is Installed. www.insituform.com; Stand 26. November 2008.
- [42] Falter, B.; Hoch A.; Wagner, V.: Hinweise und Kommentare zur Anwendung des Merkblatts ATV-DVWK 127-2 für die statische Berechnung von Linern. Korrespondenz Abwasser, Abfall (50) Nr. 4, S. 451-463.
- [43] Doll, H.: Statische Berechnungen von Schlauchlinern auf der Grundlage des ATV-Merkblattes M 127 Teil 2. 3R international (46) Heft 10/2007, S. 639-641.
- [44] Wagner, V.: Statische Berechnung von Linern – Ein historischer Rückblick. Korrespondenz Abwasser, Abfall (55) Nr. 9, S. 977-983.
- [45] Merten, A.: Qualitätsprüfung von Schlauchlinern. 3R international (46) Heft 10/2007, S. 636-637.
- [46] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1610 Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen. Beuth Verlag; Berlin, Oktober 1997.
- [47] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV): ATV-M 143-6 Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen - Teil 6: Dichtheitsprüfungen bestehender erdüberschütteter Abwasserleitungen und -kanäle und Schächte mit Wasser, Luftüber- und Unterdruck. GFA, Hennef, Juni 1998.
- [48] APS Arbeitskreis Prüfinstitute Schlauchliner: APS-Prüfrichtlinie - Wasserdichtheit von Baustellenproben aus vor Ort härtenden Schlauchlinern. Download unter www.ikt.de; Stand 01. Dezember 2008.
- [49] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 178 Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften. Beuth Verlag; Berlin, April 2006.

- [50] Waniek, R.-W.; Homann, D.: IKT-LinerReport 2008 - Schlauchlinerqualität: Tendenz uneinheitlich. Sonderdruck bi Umweltbau 1/09; www.ikt.de.
- [51] Homann, D.; Kaltenhäuser, G.: Prüfmethode bei vor Ort härtendem Schlauchlining. Vortrag auf dem Kanalisationsforum in Bern - Praxisgerechter Betrieb und Unterhalt von Entwässerungsanlagen; Bern 2006; www.vsa.ch/uploads/media/11_Kaltenhaeuser.pdf.
- [52] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Zulassungen von Sanierungsverfahren für Abwasserleitungen. Internetauftritt des DIBt; www.dibt.de; Stand 20. November 2008.
- [53] Zech, H.: Schlauchliner – Ein Überblick. 3R international (46) Heft 10/2007, S. 620-621.
- [54] Dilg, R.: Schlauchliner im Sammler – Verfahren, Regelwerke, Materialien, Einbau- / Aushärtetechniken und Entwicklungen. 3R international (46) Heft 10/2007, S. 621-627.
- [55] Güteschutz Kanalbau e. V.: Angaben des Güteschutz Kanalbau e. V. über gültige RAL-Gütezeichen 961. Internetauftritt; www.kanalbau.com; Stand 21. November 2008.
- [56] BKP Berolina Polyester GmbH & Co. KG: Internetauftritt. www.bkp-berolina.de; Stand 03. Dezember 2008.
- [57] Brandenburger Liner GmbH & Co. KG: Internetauftritt. www.brandenburger.de; Stand 02. Dezember 2008.
- [58] iMPREG GmbH: Internetauftritt. www.impreg.de; Stand 02. Dezember 2008.
- [59] Saertex multiCom GmbH: Internetauftritt. www.saertex-multicom.com; Stand 04. Dezember 2008.
- [60] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „INPIPE-Liner“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 100 bis DN 800. Zulassungsnummer: Z-42.3-429; Berlin, 05. August 2008.
- [61] SEKISUI CPT GmbH: Internetauftritt. www.cptlink.com; Stand Dezember 2008.
- [62] Insituform Rohrsanierungstechniken GmbH: Internetauftritt. www.insituform.de; Stand Dezember 2008.
- [63] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „RS-PolyLiner“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 200 bis DN 1400. Zulassungsnummer: Z-42.3-424 vom 26. März 2008.
- [64] RS Technik AG: Internetauftritt. www.rstechnik.com; Stand 01. Dezember 2008.
- [65] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „lineTEC SP-Liner“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 150 bis DN 750. Zulassungsnummer: Z-42.3-434 vom 06. Februar 2009.

- [66] Vereinigte Filzfabriken AG: Internetauftritt. www.vfg-linetec.de; Stand 04. Dezember 2008.
- [67] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das Schlauchliningverfahren mit der Bezeichnung „PAA-S-Liner“ zur Sanierung schadhafter erdverlegter Abwasserleitungen im Nennweitenbereich von DN 150 bis DN 700. Zulassungsnummer: Z-42.3-433 vom 05. Januar 2009.
- [68] I.S.T. GmbH: Internetauftritt; www.ist-web.com; Stand Dezember 2008.
- [69] Kröhnoff, T.: E-Mail von Herrn Kröhnoff bzgl. der Marktübersicht Schlauchlining vom 21. Februar 2008.
- [70] Bezela, W.: Anforderungen an die Planung von Kanalsanierungen. 3R international (46) Heft 10/2007, S. 629-631.
- [71] Heinlein, M.: Ausschreibung und Vergabe von Kanalsanierungsmaßnahmen zur Sicherung von Qualität und Investition. 3R international (46) Heft 10/2007, S. 632-635.
- [72] Ax, T.: Das Gewährleistungsrecht der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB/B). Korrespondenz Abwasser, Abfall 2008 (55) Nr. 8, S. 883-885.
- [73] Hanich, K. A.: Welchen Qualitätsstandard erfordert eine „mangelfreie Leistung“? Interview im RO-KA-TECH Journal 03/2008, S. 36-37.
- [74] John, H.-J.; Lenz, J.: Fehler in der Kanalsanierung, Erkennen – Vermeiden. Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau an der Fachhochschule Oldenburg; Band 14; 2. Auflage; Vulkan-Verlag; Essen, 2006.
- [75] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 19532 Anforderungen und Prüfverfahren zur Ermittlung der Hochdruckstrahlbeständigkeit und -spülfestigkeit von Rohrleitungsteilen für Abwasserleitungen und -kanäle. Beuth Verlag; Berlin, August 2008.
- [76] Winkler, U.: Lange Schlauchliner-Lebensdauer: Mehr als eine Annahme – Der 6. Deutsche Schlauchlinertag. Fachartikel zum 6. Deutschen Schlauchlinertag 2008 in Mainz; Korrespondenz Abwasser, Abfall (55) 2008 Nr. 11, S. 1190-1191.
- [77] Heinlein, M.: Schlauchliner – Reports der Prüfinstitute. Vortrag am 6. Deutschen Schlauchlinertag in Mainz, April 2008. bi UmweltBau Kongressausgabe / 2008, S. 19-21.
- [78] Insituform Rohrsanierungstechniken GmbH: IRT-Report der Prüfergebnisse 2007 – Prüfergebnisse der Insituform Rohrsanierungstechniken GmbH (IRT). Insituform Special; Sonderausgabe 03 – Februar 2008; www.insituform.de.
- [79] Böhne, W.; Lage, U.: Schlauchliner-Qualität – Abweichende Prüfergebnisse, Gegenüberstellung von Linerprüfergebnissen unterschiedlicher Prüflabors am Beispiel von Nadelfilzlinern. bi UmweltBau 4/07, S. 64-66.
- [80] Waniek, R.-W.; Homann, D.: Besser als im Vorjahr, IKT-LinerReport 2007. Sonderdruck bi UmweltBau 1/08; www.ikt.de.

- [81] Waniek, R.-W.; Homann, D.: Glas klar im Vorteil?, IKT-LinerReport 2006. Sonderdruck bi UmweltBau 2/07; www.ikt.de.
- [82] Waniek, R.-W.; Homann, D.: Die Spanne weitet sich, IKT-LinerReport 2004/2005. Sonderdruck bi UmweltBau 1/06; www.ikt.de.
- [83] Waniek, R.-W.; Homann, D.: Ergebnisse von der Baustelle, IKT-LinerReport 2003/2004. Sonderdruck bi UmweltBau 5/04; www.ikt.de.
- [84] Bundesverband der Unfallkassen (BUK): GUV-R 126 Sicherheitsregeln für Arbeiten in umschlossenen Räumen von abwassertechnischen Anlagen. Berlin, Juni 2007.
- [85] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1228 Kunststoff-Rohrleitungssysteme, Rohre aus glasfaserverstärktem duroplastischen Kunststoffen (GFK), Ermittlung der spezifischen Anfangs-Ringsteifigkeit. Beuth Verlag; Berlin, August 1996.
- [86] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK): ATV-DVWK-M 143-7 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 7: Reparatur von Abwasserleitungen und -kanälen durch Kurzliner und Innenmanschetten. Hennef, April 2003.
- [87] Jung, P.: Kanalsanierung. 1. Auflage; Vogel Buchverlag; Würzburg, Januar 1998.
- [88] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 4093 Baugrund - Einpressen in den Untergrund - Planung, Ausführung, Prüfung. Beuth Verlag; Berlin, September 1987.
- [89] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK): ATV-DVWK-M 143-8 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 8: Injektionsverfahren zur Abdichtung von Abwasserleitungen und -kanälen. Hennef, August 2004.
- [90] Kaltenhäuser, G.: Was leisten Reparaturverfahren, was nicht? - IKT-Warentest beginnt ... eNewsletter August 2006, www.ikt.de.
- [91] Wacker, R.: Linerstatik – Hinweise aus der Praxis (Linerstressing – Notes from practice). 3R International (46) Heft 1-2/2007, S. 40-46.
- [92] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK): ATV-DVWK-A 199-1 Dienst- und Betriebsanweisung für das Personal von Abwasseranlagen - Teil 1: Dienstanweisung für das Personal von Abwasseranlagen. GFA, Hennef, Juli 2002.
- [93] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): DWA-A 199-2 Dienst- und Betriebsanweisung für das Personal von Abwasseranlagen - Teil 2: Betriebsanweisung für das Personal von Kanalnetzen und Regenwasserbehandlungsanlagen. Hennef, Juli 2007.
- [94] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): DWA-M 149-2 Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion. Hennef; November 2006.

- [95] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): DWA-A 147 Betriebsaufwand für die Kanalisation, Betriebsaufgaben und Häufigkeiten. Hennef; April 2005.
- [96] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK): ATV-DVWK-A 139 Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen. GFA, Hennef, Juni 2001.
- [97] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): Arbeitsblatt DWA-A 139 Einbau- und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen (Entwurf). Hennef, Mai 2008.
- [98] Sokoll, O.: Pilotstudie – Inspektion teilgefüllter Kanäle. Endbericht zum Forschungsvorhaben, im Auftrag des Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW; IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur; Gelsenkirchen, Mai 2007.
- [99] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 13508-1 Zustandserfassung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag; Berlin, Februar 2004.
- [100] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV): ATV-M 143-2 Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen - Teil 2: Optische Inspektion. GFA, Hennef, April 1999.
- [101] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV): ATV-M 149 Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden. GFA, Hennef, April 1999.
- [102] Endbericht zum Forschungsvorhaben „Quantitative Inspektion von Abwasserkanälen und -leitungen mittels geophysikalischer Verfahren“. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW; IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur; Gelsenkirchen, September 2003.
- [103] Redmann, A.: Kanal- und Baugrunderkundung im nicht begehbaren Bereich - Voruntersuchungen. Endbericht zum Forschungsvorhaben, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW; IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur; Gelsenkirchen, Juni 2007.
- [104] Sokoll, O.: Erfahrungsbericht - Lasergestützte Querschnittsvermessung von nicht begehbaren Kanälen mit dem System „Clearline Profiler“. Im Auftrag von Clean Flow Systems, Neuseeland; IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur; Gelsenkirchen, Februar 2005.
- [105] Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP): Ergebnisbericht „Untersuchung von Rohrlinerproben von IKT mit Mikrowellen“. Saarbrücken, Februar 2009; unveröffentlicht.
- [106] DMT GmbH GB Exploration & Geosurvey – Ingenieurvermessung und Geomonitoring: Interner Bericht. 2008; unveröffentlicht.

- [107] Weber, M.: Untersuchung der Software JRC Reconstructor zur Registrierung von Punktwolken. Diplomarbeit FH Bochum; 2007; unveröffentlicht.
- [108] DMT GmbH GB Exploration & Geosurvey – Ingenieurvermessung und Geomonitoring: Messbericht „Dreidimensionale Erfassung eines Kanals in Köln (Ankerstraße; Haltung: 67440041 – 67440042) vor und nach Durchführung einer Sanierungsmaßnahme, mit dem Ziel einer Deformationsanalyse“. Essen, Dezember 2007; unveröffentlicht.
- [109] OSSCAD - Optical Sensor Systems Consulting and Development GmbH & Co. KG. Internetauftritt; <http://www.ossCAD.de>; Stand Oktober 2008.
- [110] Brocke, H.; Aderhold, J.: Wärmefluss-Thermographie zur Qualitätskontrolle in der Produktion. Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Institut für Holzforschung (WKI); Braunschweig.
- [111] Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Institut für Holzforschung (WKI): Untersuchungsbericht „Thermographische Untersuchungen zur „Abnahme von Lining-Maßnahmen“ – Vor-Ort-Einsatz in Köln“. Braunschweig, Januar 2009; unveröffentlicht.
- [112] Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart: Verfahrensbeschreibungen zur lokalen Resonanzspektroskopie, zum Ultraschall-Echo- und Impakt-Echo-Verfahren. Stuttgart, August 2008, unveröffentlicht.
- [113] Universität Stuttgart – Institut für Werkstoffe im Bauwesen: Ergebnisdokumentation „ZfP-Messungen an Schlauchinnenlinern zur Kanalsanierung“. Stuttgart, Januar 2009; unveröffentlicht.
- [114] Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik IBMT: Projektbericht „Ultraschall-Wandstärkemessung Liner in Köln (15. Dezember 2008). St. Ingbert, Februar 2009; unveröffentlicht.
- [115] Forschungsantrag zum vorliegenden Projekt „Abnahme von Liningmaßnahmen - Materialnachweise und Bewertung der Linerqualität“. IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, unveröffentlicht.
- [116] Informationen zum Laserscanning; Internetauftritt. <http://de.wikipedia.org/wiki/Laserscanning>; Stand 11. März 2009.
- [117] DMT GmbH GB Exploration & Geosurvey – Ingenieurvermessung und Geomonitoring: Vortrag von Herrn Kuchenbecker zum Messeinsatz in Köln im Rahmen der 6. Lenkungskreissitzung in Gelsenkirchen am 15.01.2009; unveröffentlicht.
- [118] Fraunhofer Wilhelm-Kaluditz-Institut für Holzforschung: Vortrag von Herrn Burkhard Plinke zur Wärmefluss-Thermographie im Rahmen der 6. Lenkungskreissitzung am 15.01.2009 in Gelsenkirchen, unveröffentlicht.
- [119] OSSCAD - Optical Sensor Systems Consulting and Development GmbH & Co. KG: Auswertung der Temperaturmessdaten zur Baumaßnahme Niederländer Ufer in Köln. Bergisch Gladbach, November 2007; unveröffentlicht.
- [120] Insituform Rohr-sanierungstechniken GmbH: Aushärtebericht zur Baumaßnahme in Recklinghausen-Suderwich, Lülffstraße am 17./18.04.2008; unveröffentlicht.

- [121] OSSCAD - Optical Sensor Systems Consulting and Development GmbH & Co. KG: Auswertung der Temperaturmessdaten zur Baumaßnahme Lulfstraße in Recklinghausen. Bergisch Gladbach, November 2008; unveröffentlicht.
- [122] Insituform Rohrsanierungstechniken GmbH: E-Mail-Korrespondenz mit Hr. Zinnecker vom 28.11.2008 bis 12.02.2009 bezüglich Anmerkungen und Korrekturen zum Entwurf des Berichtes.
- [123] OSSCAD - Optical Sensor Systems Consulting and Development GmbH & Co. KG: Auswertung der Temperaturmessdaten zur Baumaßnahme Schnurgasse in Köln. Bergisch Gladbach, November 2008; unveröffentlicht.
- [124] Falter, B.; Alberding, M.: Zeitabhängiges Beulverhalten von U-Linern aus PE-HD. 3R international 36 (1997), S. 534-541.
- [125] Linerb 7.20 (2008).
- [126] Abaqus/Standard; Version 6.8.3; Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.; Handbuch; 2008.
- [127] New developments in liner design due to ATV-M 127-2. Beitrag zur NoDig am 27. April – 02. Mai 2008 in Dallas, Texas.
- [128] Falter, B.: Structural Design of Linings. Underground Infrastructure Research: Municipal, Industrial and Environmental Applications. Knight & Thomson (eds), pp. 49 - 58 © 2001, Swets & Zeitlinger, Lisse.
- [129] Zhao, W.; Hall, D.: 3D Modeling of pipe liners with thickness variations. No-Dig 2004, New Orleans, Louisiana.
- [130] Frick, A.; Stern, C.: DSC-Prüfung in der Anwendung. Hanser-Verlag; München, Wien, 2006; S. 16.
- [131] Rathke, K.: Konzept zur Beurteilung der Auswirkungen von Faltenbildungen bei Linern auf das Abfluss- und Transportverhalten. Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Fachgebiet Hydraulik, Quantitative Wasserwirtschaft; Höxter 2008, unveröffentlicht.
- [132] Bosseler, B.; Puhl, R. : Beschichtungsverfahren zur Sanierung von Abwasserschächten, IKT – Institut für unterirdische Infrastruktur; im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW; Gelsenkirchen, Februar 2005, www.ikt.de.
- [133] LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). Kulturbuchverlag; Berlin 2005.
- [134] Bosseler, B.; Schlüter, M.: Kanalreinigung -Düsen, Drücke, Hochdruckstrahlen-; IKT – Institut für unterirdische Infrastruktur; im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW; Gelsenkirchen, Dezember 2004, www.ikt.de.
- [135] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1990 Grundlagen der Tragwerksplanung. Beuth Verlag; Berlin, Oktober 2002.

- [136] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1997 Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. Beuth Verlag; Berlin, Oktober 2005.
- [137] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 16708 Erdöl- und Erdgasindustrie – Rohrleitungstransportsysteme – Zuverlässigkeitsanalysen. Englische Fassung; Beuth Verlag; Berlin, August 2006.
- [138] Ruhr-Universität Bochum: Arbeitsbericht Sonderforschungsbereich SFB 398, Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte unter Schädigungs- und Deteriorationsaspekten. Periode 1998-2001, Juli 2001.
- [139] Bauhaus-Universität Weimar: Graduiertenkolleg 1462 „Bewertung gekoppelter numerischer Partialmodelle im Konstruktiven Ingenieurbau“. Vorhabensbeschreibung; gefördert durch die DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft; 2008; <http://www.uni-weimar.de/cms/bauing/forschung/grk1462/problemstellung.html>; eingesehen am 14. Januar 2009.
- [140] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK): ATV-DVWK-A 127 Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen. 3. Auflage; GFA, Hennef, August 2000.
- [141] Fuchs, W.: Zuverlässigkeitsanalyse von Rohrleitungen aus unbewehrtem Beton. Dissertation; Technische Universität München, 1982.
- [142] Fuchs, W.: Grundzüge der probabilistischen Zuverlässigkeitstheorie und ihre Anwendung auf im Erdboden verlegte Rohre. KA Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall (31) 1984 Nr.6, S. 523-527.
- [143] Berger, C.; Lohaus, J.; Wittner, A.; Schäfer, R.: Zustand der Kanalisation in Deutschland. Ergebnisse der ATV-DVWK Umfrage 2001; KA Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall; (49) 2002 Nr. 3, S. 302-311.