



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Simon zum Felde

Wanddickenbestimmung an komplexen Faserverbundstrukturen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Simon zum Felde
**Wanddickenbestimmung an komplexen
Faserverbundstrukturen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

In Zusammenarbeit mit:
Firma Siebert + Knipschild GmbH
Abteilung Rohrreparatur
Bergstücken 25
22113 Oststeinbek

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Schäfer
Zweitprüfer: Dipl. Ing. Haacker

Abgabedatum: 29.02.2016

Zusammenfassung

Simon zum Felde

Thema der Bachelorthesis

Wanddickenbestimmung an komplexen Faserverbundstrukturen

Stichworte

Schlauchliner, Rohrrehabilitation, Wanddickenbestimmung, äußere Reinharzschichten, Auswirkungen äußerer Reinharzschichten, Faserverbundkunststoffe, 3-Punkt-Biegeversuch, Kennwertermittlung, Glasfaser, Synthefaser, Klassische Laminattheorie, Finite Elemente Methode, Prüfeempfehlung zur Bestimmung der Wanddicke

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Wanddickenbestimmung an Schlauchlinerproben, welche unterschiedlich ausgeprägte äußere Reinharzschichten aufweisen. Geltende Normen und Regelwerke zur Kennwertermittlung an Schlauchlinerproben werden auf ihre Aussagen bezüglich äußerer Reinharzschichten verglichen und interpretiert. An Labor- und Baustellenproben wird der Einfluss von unterschiedlich dicken äußeren Reinharzschichten bestimmt. Auf Basis der Ergebnisse wird eine Prüfeempfehlung zur Wanddickenbestimmung gegeben, die Schlauchlinerproben mit ausgeprägten äußeren Reinharzschichten berücksichtigt. Im Rahmen einer Fehlerbetrachtung werden Auswirkungen möglicher Messfehler auf die E-Modulermittlung beschrieben.

Simon zum Felde

Title of the paper

Definition of wall thickness at complex composites

Keywords

Pipe lining, Pipe rehabilitation, Definition of wall thickness, Outer pure resin layer, Effects of outer pure resin layer, Composite materials, 3-point bending test, Determination of characteristics, Glass fibre, Synthetic fibre, Classical laminate theory, Finite element method, Audit recommendation for the definition of wall thickness

Abstract

This report includes the definition of wall thickness at pipe lining samples, which show pronounced outer pure resin layers. Applicable standards and regulations for determination of characteristics of pipe lining samples are compared and interpreted. The influence of various outer pure resin layers will be defined by the test of laboratory and construction site samples. An audit recommendation for the definition of wall thickness for samples with pronounced outer pure resin layers is given, based on the results of the analysis. This includes a description of the expected effects of possible errors in the definition of wall thickness at pipe lining samples.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Formelzeichen	IV
Abkürzungsverzeichnis	VI
Geräteverzeichnis	VII
1. Aufgabenstellung der Bachelorarbeit	1
2. Thematische Einleitung	1
3. Faserverbundkunststoffe	2
3.1 Lamine	2
3.1.1 Unterscheidung der verschiedenen Lamine	3
3.2 Synthesefaserverbunde	5
3.3 Glasfaserverbunde	5
3.3.1 Glasfasern	6
3.3.1.1 Rovings	7
3.3.1.2 Wirrfasern.....	7
3.3.1.3 Gewebe	8
3.3.1.4 Unidirektionales Gewebe (Gelege).....	9
4. Schlauchliner	10
4.1 Allgemein	10
4.2 Schlauchliner-Wand-Konstruktion von Glasfaserlinern	15
4.3 Äußere Reinharzschichten an Glasfaserlinern.....	16
5. Mechanische Eigenschaften von Schlauchlinern	18
5.1 Relevante Materialkennwerte in der Qualitätssicherung	18
5.1.1 Elastizitätsmodul	18
5.1.2 Biegespannung	19
6. Vergleich von Normen und Regelwerken zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte an Schlauchlinern	20
6.1 3-Punkt-Biegeversuch.....	20
6.1.1 DIN EN ISO 178 : 2011.....	21

6.1.3 DIN EN ISO 11296-4 : 2011	22
6.1.4 DWA-A 143-3 : 2014.....	25
6.2 Ergebnis des Vergleichs der Normen und Regelwerke	25
6.3 Bewertung der Ergebnisse des Vergleichs der Normen und Regelwerke	27
7. Ermittlung des Einflusses von äußeren Harzschichten an Linerproben	28
7.1 Ermittlung des Einflusses von äußeren Harzschichten an Laborproben	28
7.1.1 Materialproben	28
7.1.2 Herstellung von Laborproben	31
7.1.3 Versuchsdurchführung	32
7.1.3.1 Messen	33
7.1.3.2 Protokollieren.....	34
7.1.3.3 Versuchsdurchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Labor-Linerproben	35
7.1.3.4 Versuchsdurchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 14126 an planaren Probekörpern.....	36
7.1.3.5 Versuchsdurchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 178 an Harzproben	36
7.1.3.6 Versuchsdurchführung des Abreißversuchs nach 4624 an Labor-Linerproben	37
7.1.4 Ergebnisse der Prüfungen an Laborproben	38
7.1.4.1 Ergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Labor-Linerproben	38
7.1.4.2 Ergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 14126 an planaren Proben	40
7.1.4.3 Ergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 178 an Harzproben	41
7.1.4.4 Ergebnisse des Haftabzugversuchs nach DIN EN ISO 4624 an Labor-Linerproben	41
7.1.5 Bewertung der Ergebnisse der Laborproben	42
7.1.5.1 Bewertung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Labor-Linerproben	42
7.1.5.2 Bewertung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 14126 an planaren Glasfaserproben	44
7.1.5.3 Bewertung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 178 an Harzproben	44

7.1.5.4 Bewertung des Abreißversuchs nach DIN EN ISO 4624 an Labor-Linerproben	45
7.2 Ermittlung des Einflusses von äußeren Harzschichten an Baustellenproben ..	46
7.2.1 Materialproben	46
7.2.2 Versuchsdurchführung an Baustellenproben.....	46
7.2.2.1 Versuchsdurchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Baustellenproben	46
7.2.3 Ergebnisse der Kennwertermittlung an Baustellenproben	47
7.2.3.1 Ergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Baustellenproben	47
7.2.4 Bewertung der Ergebnisse der Prüfung von Baustellenproben	47
7.2.4.1 Bewertung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Baustellenproben	47
7.3 Analytische Kennwertermittlung	49
7.3.1 Kennwertermittlung mittels klassischer Laminattheorie	49
7.3.3.1 Beispielrechnung der klassischen Laminattheorie an Liner 5.....	52
7.3.2 Kennwertermittlung mittels finiter Elemente Methode	55
7.3.3 Ergebnisse der analytischen Kennwertermittlung	57
7.3.3.1 Ergebnisse der Kennwertermittlung mittels klassischer Laminattheorie und finiter Elemente Methode	57
7.7.4 Bewertung der Ergebnisse der analytischen Kennwertermittlung.....	59
7.4 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	60
8. Prüfpfehlung zur Ermittlung der Wanddicke	61
9. Fehlerbetrachtung	63
9.1 Bestimmung der Messunsicherheit.....	63
9.1.1 Verbundwanddicke	64
9.2 Auswirkungen der möglichen Fehler.....	68
10. Zusammenfassung	69
11. Danksagung	71
Literaturverzeichnis.....	VIII
Anhang	XII
Eidesstattliche Erklärung.....	XIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mikroskopie einer Schlauchlinerprobe.....	6
Abbildung 2 Freilegen der einzelnen Glasfaserschichten einer Schlauchlinerprobe.....	6
Abbildung 3: Unidirektionale Verstärkungen (Rovings).....	7
Abbildung 4: Wirrfasermatte.....	8
Abbildung 5: Leinwandbindung [9].....	9
Abbildung 6: Körperbindung [9].....	9
Abbildung 7: Atlasbindung [9].....	9
Abbildung 8: Hochdruckreinigung des Sanierungsabschnitts [19].....	10
Abbildung 9: TV-Inspektion des Sanierungsabschnitts [19].....	11
Abbildung 10: Trockenhaltung des Sanierungsabschnitts [19].....	11
Abbildung 11: Einzug der Gleitfolie in den Sanierungsabschnitt [19].....	12
Abbildung 12: Einzug des Liners in den Sanierungsabschnitt [19].....	12
Abbildung 13: Aufstellen des Liners durch den Überdruck [19].....	13
Abbildung 14: UV-Härtung des aufgestellten Liners durch die Lichterkette [19].....	13
Abbildung 15: Öffnen von zuvor geschlossenen Zuläufen [19].....	14
Abbildung 16: Detaillierter möglicher Wandaufbau eines Glasfaserschlauchliners.....	15
Abbildung 17: Linerprobe mit vollständig geschlossener Reinharzschicht.....	16
Abbildung 18: Linerprobe mit äußerer Reinharzschicht mit feinem Haarriss.....	17
Abbildung 19: Linerprobe mit Spalten in der äußeren Reinharzschicht.....	17
Abbildung 20: Linerprobe mit unterbrochener Reinharzschicht.....	17
Abbildung 21: Linerprobe mit Lufteinschlüssen in der Reinharzschicht.....	17
Abbildung 12: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit angelegter Tangente.....	18
Abbildung 23: 3-Punkt-Biegeversuch Prinzipskizze [1.4]	21
Abbildung 24: Prüfanordnung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 [2.2].....	23
Abbildung 25: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 1.....	29
Abbildung 26: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 2.....	29
Abbildung 27: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 3.....	30
Abbildung 28: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 4.....	30
Abbildung 29: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 5.....	30

Abbildung 30: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 6.....	30
Abbildung 31: Glasfaser-Lagenaufbau Glasfaserplatte.....	30
Abbildung 32: Labor-Linerproben vor und nach Harzauftrag.....	32
Abbildung 33: Prinzipskizze der verwendeten Prüfmaschine ZWICK Z010/TN2S.....	33
Abbildung 34: Messstellen zur Wanddicken- und Breitenbestimmung an Schlauchlinerproben.....	33
Abbildung 35: Verwendeter digitaler Messschieber	34
Abbildung 36: Harz-Probekörper für den 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178.....	37
Abbildung 37: Probekörper mit aufgeklebten Stempeln für den Abreißversuch.....	37
Abbildung 38: Versuchsaufbau des Abreißversuchs.....	37
Abbildung 39: Interlaminares Versagen in der Strukturschicht der Abreißprobe.....	45
Abbildung 40: Koordinatensystem und Bezeichnungen für die Berechnung mit klassischer Laminattheorie [4.1].....	49
Abbildung 41: Dickenbestimmung der einzelnen Lagen an Liner 5.....	52
Abbildung 42: Zusammenbau in CATIA V5 R19.....	55
Abbildung 43: Krafterleitungsstelle ANSYS Workbench R16.1 Academic (Ansicht ISO).....	56
Abbildung 44: Auflagerstellen ANSYS Workbench R16.1 Academic (Ansicht von unten).....	56
Abbildung 45: Visualisierung des Spannungsverlaufs von Liner 5 mittels finiter Elemente Methode.....	58
Abbildung 46: Visualisierung der Gesamtverformung an Liner 5 mittels finiter Elemente Methode.....	58
Abbildung 47: Visualisierung der Spannungen im Querschnitt von Liner 5 mittels finiter Elemente Methode.....	59
Abbildung 48: Mikroskopieuntersuchung einer Probe mit einer Reinharzschichtdicke von 14 %.....	62
Abbildung 49: Feinschnitt einer Schlauchlinerprobe mit auffälligen Lufteinschlüssen der äußeren Reinharzschicht.....	62
Abbildung 50: Probekörper 2 Wanddickenbestimmung Stelle 1.....	66
Abbildung 51: Probekörper 2 Wanddickenbestimmung Stelle 2.....	66
Abbildung 52: Probekörper 2 Wanddickenbestimmung Stelle 3.....	66
Abbildung 53: Probekörper 3 Wanddickenbestimmung Stelle 1.....	66
Abbildung 54: Probekörper 3 Wanddickenbestimmung Stelle 2.....	66
Abbildung 55: Probekörper 3 Wanddickenbestimmung Stelle 3.....	66
Abbildung 56: Mikroskopieuntersuchung von Probekörper 3 in Breitenrichtung.....	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften unterschiedlicher Glasfasertypen [4.2].....	6
Tabelle 2: Alternative Breiten der Probekörper beim 3-Punkt-Biegeversuchh nach DIN EN ISO 11296-4.....	24
Tabelle 3: Zusammenfassender Vergleich der Regelwerke und der DIBt Zulassungsanforderung.....	26
Tabelle 4: Kennwerte der Strukturschichten des verwendeten Labor-Probenmaterials.....	28
Tabelle 5: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an Liner 1.....	38
Tabelle 6: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an Liner 2.....	38
Tabelle 7: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an Liner 3.....	39
Tabelle 8: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an Liner 4.....	39
Tabelle 9: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an Liner 5.....	40
Tabelle 10: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an der Glasfaserplatte.....	40
Tabelle 11: Ergebnisse der E-Modulbestimmung am aufgetragenen Harz.....	41
Tabelle 12: Ergebnisse des Abreißversuchs nach DIN EN ISO 4624.....	41
Tabelle 13: Vergleich der Kennwerte des verwendeten Harzes VUP 4714 BET.....	44
Tabelle 14: Verwendete Baustellenproben für den 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 11296-4.....	46
Tabelle 15: Ergebnisse der verwendeten Baustellenproben.....	47
Tabelle 16: Gegenüberstellung der unterschiedlich ermittelten Faktoren.....	47
Tabelle 17: Anwendung des Faktors auf Baustellenproben.....	48
Tabelle 18: An Liner 5 mit klassischer Laminat Theorie und 3-Punkt Biegeversuch ermittelte Gesamt-E-Moduln.....	57
Tabelle 19: Ergebnisse der Gesamtwanddickenbestimmung des Ringversuchs.....	64
Tabelle 20: Ergebnisse der Verbundwanddickenbestimmung des Ringversuchs.....	65
Tabelle 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Wanddickenbestimmungen an den Probekörpern 2 und 3.....	67
Tabelle 22: Entstehende Fehlbewertung des E-Modus bei einem möglichen Messfehler von +/- 6,2 %.....	68

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
E	MPa	Elastizitätsmodul
$E_{ }$	MPa	Elastizitätsmodul in Faserrichtung
E_{\perp}	MPa	Elastizitätsmodul senkrecht zur Faserrichtung
$E_{ }^{(1)}$	MPa	Elastizitätsmodul in Faserrichtung von Schicht 1
$E_{\perp}^{(1)}$	MPa	Elastizitätsmodul senkrecht zur Faserrichtung von Schicht 1
$E_{ }^{(2)}$	MPa	Elastizitätsmodul in Faserrichtung von Schicht 2
$E_{\perp}^{(2)}$	MPa	Elastizitätsmodul senkrecht zur Faserrichtung von Schicht 2
G	MPa	Schubmodul
$G_{ \perp}$	MPa	Schubmodul
ν	–	Querkontraktion
$\nu_{ \perp}$	–	Querkontraktion (parallel/senkrecht)
$\nu_{\perp }$	–	Querkontraktion (senkrecht/parallel)
σ	$\frac{N}{mm^2}$	Spannung
σ_{f1}	$\frac{N}{mm^2}$	Spannung am ersten Modulermittlungspunkt
σ_{f2}	$\frac{N}{mm^2}$	Spannung am zweiten Modulermittlungspunkt
σ_{max}	$\frac{N}{mm^2}$	Maximalspannung
σ_b	$\frac{N}{mm^2}$	Bruchspannung
$\bar{\sigma}_1$	$\frac{N}{mm^2}$	Gemittelte im Verbund wirkende Spannung in Richtung 1
$\bar{\sigma}_2$	$\frac{N}{mm^2}$	Gemittelte im Verbund wirkende Spannung in Richtung 2
σ_v	$\frac{N}{mm^2}$	Vergleichsspannung nach „von Mises“
$\bar{\tau}_{12}$	$\frac{N}{mm^2}$	Gesamtschubspannung
ε	%	Dehnung
ε_{f1}	%	Dehnung am ersten Modulermittlungspunkt
ε_{f2}	%	Dehnung am zweiten Modulermittlungspunkt
ε_b	%	Bruchdehnung
$\bar{\varepsilon}_1$	%	Gesamtverformung in Richtung 1
$\bar{\varepsilon}_2$	%	Gesamtverformung in Richtung 2
ε_{1s}	%	Dehnung der Strukturschicht in Richtung 1
ε_{2s}	%	Dehnung der Strukturschicht in Richtung 2
ε_{ges}	%	Gesamtdehnung
$\bar{\gamma}_{12}$	%	Gesamtschubverformung
γ_{12s}	%	Schubverformung der Strukturschicht
F	N	Kraft
F_{max}	N	Maximalkraft
L	mm	Auflagerabstand
b	mm	Probenbreite
h	mm	Probendicke

s	mm	Durchbiegung
M	Nm	Angreifendes Moment
W	m^3	Widerstandsmoment
e_m	mm	Mittlere Verbunddicke
L_1	mm	Auflagerpunkte des unbelasteten Probekörpers
L_2	mm	Wahre Stützweite
h_m	mm	Mittlere Gesamtwanddicke
R_2	mm	Krümmungsradius des Probekörpers im Mittelpunkt seiner Dicke
l	mm	Probekörperlänge
V	mm	Höhendifferenz zwischen dem Mittelpunkt des unbelasteten Probekörpers und dessen Auflagerpunkten
t_k	mm	Dicke der k-ten Schicht
t	mm	Gesamtdicke
t_{str}	mm	Strukturschichtdicke
t_H	mm	Harzschichtdicke
Q_{ijk}	MPa	Steifigkeitskoeffizient
Q_H	MPa	Steifigkeitsmatrix Harz
Q_{UD}	MPa	Steifigkeitsmatrix der unidirektional verstärkten Schicht
\bar{Q}_{ij}	MPa	Element ij der Steifigkeitsmatrix
Q_{ij0}	MPa	Element ij der unidirektional verstärkten Schicht
D	-	Rechnerische Größe $1 - \nu_{ \perp} * \nu_{\perp }$
D_1	-	Rechnerische Größe $1 - \nu_{ \perp}^{(1)} * \nu_{\perp }^{(1)}$
D_2	-	Rechnerische Größe $1 - \nu_{ \perp}^{(2)} * \nu_{\perp }^{(2)}$

Abkürzungsverzeichnis

DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ISO	Internationale Organisation für Normung
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DWA	Deutscher Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
VSB	Verband zertifizierter Sanierungsberater
FVK	Faserverbundkunststoff
FEM	Finite Elemente Methode
A	Arbeitsblatt
E-Modul	Elastizitätsmodul
EP	Epoxid
UP	Ungesättigter Polyester
VE	Vinylester
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
PET	Polyethylenterephthalat
AR	Alkaliresistent
E	Elektro
R/S	Resistance/Strength
C	Corrosion
PA	Polyamid
PAN	Acrylnitril-Polymerisat
PP	Polypropylen
HM	High modulus
UHM	Ultra high modulus
UD	Unidirektionales Laminat
M	Wirrfaserlaminat
MW	Mischlaminat
FM oder FMU	Wickellaminat
F	Rovingstränge
U	Gelege
UV	ultraviolett
VUP	Viapal Ungesättigter Polyester
MEKP	Methyl Ethyl Keton Peroxid

Geräteverzeichnis

Software:

Windows 2000 Version 5.0

Mac OS X Lion 10.7.5

Microsoft Office 2011

TestXpert

CATIA V5 R19

Ansys Workbench R 16.1 Academic

Geräte:

Prüfmaschine ZWICK Z010/TN2S Typ: 1445MOPS

Digitalmikroskop VHX 700 F

Barcol-Messgerät GYZJ 934-18599

Doppelschleifmaschine Parkside PDS 200

Kreissäge Clipper CM 50

Schnellverascher Typ SVD 95/P

Muffelofen Nabertherm L3/C6

Ofen Heraeus Typ UT6200

Digitalwaage Sartorius BL310

Digitalwaage Sartorius QT6100

Messschieber Mitutoyo Absolute (digital) Serial No. 09094012

Kamera Canon PowerShot SX20IS

Cuttermesser

Stahllineal

Feile

Schleifpapier Körnung P 80

Pipette

Pappbecher

Malerwalze

Permanentmarker

1. Aufgabenstellung der Bachelorarbeit

Thema: Wanddickenbestimmung an komplexen Faserverbundstrukturen.

Zielsetzung der Arbeit ist es, den Einfluss äußerer Reinharzschichten auf die Ermittlung des Kennwerts E-Modul der Tragschicht an Glasfaser-Schlauchlinern zu ermitteln.

Auf Basis der Ergebnisse soll eine Empfehlung zur Ermittlung von Wanddicken an komplexen Schlauchlinerlaminatstrukturen gegeben werden.

2. Thematische Einleitung

Seit Anfang der 1980er Jahre werden in Deutschland Abwasserkanäle mittels Schlauchlinern saniert. Während früher zur Sanierung grabende Verfahren Einsatz fanden, finden heute Schlauchliner, die das schadhafte Altrohr als Formgeber nutzen, Anwendung. Eine Sanierung nach DIN EN 752-5 stellt eine Wiederherstellung des Kanals dar und kann als Renovierung, Reparatur oder Erneuerung erfolgen [17]. Heute beträgt der Anteil der Glasfaserliner im Rohr-sanierungsbereich circa 80 %. Während früher die typischen Schlauchlinersysteme, ähnlich wie bei Handlaminaten, lagenweise aufgebaut waren, werden die Laminatstrukturen aufgrund von konstruktiven Erwägungen der Hersteller immer komplexer. Das Vorprodukt, der flexible Glasfaser-Schlauchträger, entsteht werksseitig und wird auf der Baustelle in Verbindung mit Reaktionsharzen durch örtliche Aushärtung zum Endprodukt. Da das Endprodukt, das Schlauchlinerrohr, im Kanal entsteht wo keine optimalen Herstellbedingungen vorhanden sind, werden nach der Herstellung auf der Baustelle Proben entnommen, an denen die Kennwerte des Schlauchlinerrohrs ermittelt werden. Anhand dieser Kennwerte wird in akkreditierten Prüflaboratorien überprüft, ob die Schlauchliner die Systemangaben der Anbieter erfüllen. Aufgrund der oftmals schwierigen Einbaubedingungen und der Fehlstellen im Altrohr kann es zu Inhomogenitäten in der Materialstruktur des Schlauchliners kommen. Die richtige Bestimmung der Wanddicken ist für die ermittelten Kennwerte ausschlaggebend, da beispielsweise bei der Ermittlung des E-Moduls die Wanddicke in der dritten Potenz in die Berechnung mit eingeht. Da die geltenden Regelwerke und Normen den möglichen tragenden Effekt von physikalisch vorhandenen äußeren Reinharzschichten nicht berücksichtigen, kommt es in Prüflaboratorien immer wieder zu Fehlbewertungen der Materialeigenschaften von Schlauchlinerproben. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Wanddickenbestimmung an komplexen Faserverbundkunststoffen (FVK) wie sie in Schlauchlinern ihren Einsatz finden. Es soll untersucht werden wie die Wanddicken von Schlauchlinern an komplexen Faserverbundstrukturen bestimmt werden können.

3. Faserverbundkunststoffe

Faserverbundkunststoffe bestehen aus einer Kunststoffmatrix (Duroplast oder Thermoplast) und Verstärkungs- oder Trägerfasern (Glas-, Kohlenstoff-, Aramid- oder Synthesefaser). Die Faser ist von der Matrix umschlossen und haftet durch Adhäsions- und Kohäsionskräfte an ihr. Bei verstärkten Kunststoffen wird in vielen Fällen eine gezielte Verstärkung in eine bestimmte Richtung angestrebt. Somit ist dieser Werkstoff im Gegensatz zu unverstärkten Kunststoffen oder Metallen anisotrop, d.h. seine Eigenschaften werden richtungsabhängig. Die Aufgaben der beiden Komponenten Matrix und Faser gliedern sich wie folgt:

- Matrix:
- Kräfte in die Fasern einleiten (bei verstärkenden FVK)
 - Kräfte von Faser zu Faser überleiten (bei verstärkenden FVK)
 - Die geometrische Lage der Fasern und die äußere Bauteilgestalt sichern
 - Die Faser vor Umgebungseinflüssen schützen [4.7]
- Fasern:
- Festigkeitsgeber bei Verstärkungsfasern
 - Trägermaterial für das Harz bei Synthesefaserverbunden (nicht verstärkend)

3.1 Lamine

Lamine sind schichtweise aufgebaute Verbundwerkstoffe aus Glas-, Synthese-, Aramid- oder Kohlenstofffaser, die fest mit einer Matrix aus thermo- oder duroplastischem Werkstoff verbunden sind. Im Schlauchlinerbereich werden ausschließlich duroplastische Matrixwerkstoffe wie beispielsweise Epoxidharz (EP-Harz) des Typs 1040-0 gemäß DIN 16946-2, ungesättigte Polyesterharz (UP-Harz) der Gruppe 3 gemäß DIN 18820-1 Tabelle 1 bzw. des Typs 1140 gemäß DIN 16946-2 und Vinylesterharz (VE-Harz) des Typs 1310 gemäß DIN 16946-2 gewählt [8]. Lamine setzen sich aus Einzelschichten oder unterschiedlich übereinander gelegten Schichten zusammen, die unterschiedliche und richtungsabhängige mechanische Eigenschaften haben und somit die Schichtstruktur charakterisieren. Im Folgenden werden unterschiedliche Lamine und Laminatkomponenten beschrieben.

3.1.1 Unterscheidung der verschiedenen Lamine

Je nach Einsatzzweck können mithilfe von verschiedenen Laminataufbauten unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten und -profile geschaffen werden. So unterscheidet man Lamine nach verschiedenen Kriterien:

Nach Aufbau:

- Volllaminat: Das Bauteil charakterisiert sich durch vollständige Einbettung von verstärkenden oder harztragenden Fasern in eine Matrix (Faserverbund).
- Sandwichlaminat: Das Bauteil besteht aus zwei Laminatschichten aus Faserverbundkunststoff, welche die Innen- und Außenseite des Laminats bilden, wobei die Zwischenschicht aus beispielsweise Papierwaben, Schaumstoffen oder Balsaholz besteht, was das Sandwichlaminat gegenüber dem Volllaminat dicker, leichter und verformungsstabiler macht.

Nach Material der verwendeten Fasern:

- Glasfaserlaminat (GFK): Als verstärkende Fasern werden Textilglasfasern verwendet, die abhängig von der Ausführung ein E-Modul von 70000 MPa bis 86000 MPa aufweisen. Unterschieden wird in E-Glas, R/S Glas (hochfestes Glas), C-Glas (gute chemische Beständigkeit), ECR-Glas (gute säurebeständige E-Glasfaser) und AR-Glas (alkalihaltige Glasfaser) [4.2]. ECR-Glas ist durch seine gute Säurebeständigkeit der gebräuchlichste Fasertyp im Schlauchliningbereich.
- Synthefaserlaminat: Es werden Fasern aus Polyethylenterephthalat (PET), Polyamid (PA), Acrylnitril-Polymerisat (PAN) und Polypropylen (PP) oder Kombinationen daraus verwendet, die im Schlauchliningbereich meist in Form von Filzen zum Einsatz kommen und als Trägermaterial für das Harz (Matrix) dienen [3.4].
- Kohlenstofffaserlaminat: Hier werden Fasern aus Kohlenstoff mit extrem hoher Festigkeit, Steifigkeit und geringer Bruchdehnung verwendet. Abhängig von der Ausführung erreichen diese Fasern ein E-Modul von 250000 MPa bis 660000 MPa. Unterschieden wird in HT (high tenacity = standard), IM (intermediate modulus = mittelsteif), HM (high modulus = hochsteif) und UHM (ultra high modulus = ultrasteif) [4.3].
- Aramidfaserlaminat: Hier werden Fasern aus dem Werkstoff Aramid verwendet. Aramidfasern sind lineare, organische Polymere mit hoher Festigkeit und Steifigkeit, bei denen kovalente Bindungen entlang der Faserachse orientiert sind. Die theoretische Steifigkeit liegt bei ca. 200000 MPa [4.4].

Kohlenstoff- und Aramidfasern werden im Schlauchliningbereich nicht eingesetzt.

Nach der Ausrichtung der verwendeten Fasern:

- Unidirektionales Laminat (UD): In UD-Laminaten liegen die Fasern in der Matrix parallel zueinander. Dadurch entsteht ein Verbund mit viel höherer Festigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung als quer dazu [4.5].
- Gewebelaminat: Lamine aus sich rechtwinklig kreuzenden Fäden und Rovings mit daher bidirektionaler Verstärkungswirkung [4.2].
- Wirrfaserlaminat (M): Glasfaserlamine, in denen die Fasern (Matten oder geschnittene Rovings) keine bestimmte Orientierung haben [6.1].
- Mischlaminat (MW): Glasfaserlamine, in denen abwechselnd Wirrfaserschichten und gerichtete Gewebe verwendet werden [6.2].
- Wickellaminat (FM oder FMU): Glasfaserlamine, in denen zwischen den gewickelten Schichten aus Rovingsträngen (F) Lagen aus Wirrfasern (M) oder Gelegen (U) vorhanden sind [6.3].

Nach Material des verwendeten Harzes:

- Ungesättigte Polyesterharze (UP): Sind Reaktionsharze, die exotherm durch Copolymerisation zu Duroplasten vernetzen [5.1].
- Epoxidharze (EP): Gehören zu den Reaktionsharzen, die mit Aminen oder Anhydriden durch Polyaddition zu duroplastischen Formstoffen vernetzen [5.3].
- Vinylesterharze (VE): Gehören zu den Reaktionsharzen, die durch Copolymerisation zu duroplastischen Formstoffen vernetzen können. Sie besitzen im Vergleich zu UP-Harzen teilweise günstigere mechanische und thermische Eigenschaftswerte, sowie eine höhere chemische Beständigkeit [5.3].
- Phenol-Formaldehydharze: Vernetzen endotherm durch Polykondensation von Phenol und Formaldehyd zu duroplastischem Formstoff [5.4].
- Polyurethane: Vernetzen exotherm durch Polyaddition von Diolen beziehungsweise Polyolen mit Polyisocyanaten [20].

Eine Tauglichkeit für den Einsatz im kommunalen Abwasserbereich muss bei jedem Harz gegeben sein. Nur dann, wenn das Harz eine genügende chemische Beständigkeit zeigt, darf es als Harzsystem für den Schlauchliner verwendet werden.

3.2 Synthesefaserverbunde

Der Synthesefaserverbund besteht aus Harz und einem Synthesefaservlies, das typischerweise die Wanddicke des Synthesefaserverbunds aufbaut. In der DIBt-Zulassung der Synthesefaser-Schlauchliner sind bestimmte Flächengewichte und Wanddicken vorgeschrieben, die eingehalten werden müssen. Außerdem müssen Synthesefaser-Schlauchliner nach DIBt-Zulassung durch Warmhärtung aushärten. Im Schlauchlining werden UP-, VE-, und EP-Harze verwendet, die je nach gewünschter Eigenschaft ausgewählt werden. Die genannten Harzsysteme können an UV-Licht, Wasserdampf oder warmen Wasser abhängig gehärtet werden. Die eingesetzten Vliese bestehen aus Polyethylenterephthalat (PET), Polyamid (PA), Acrylnitril-Polymerisat (PAN) und Polypropylen (PP), oder Kombinationen daraus [3.4]. Diese weisen niedrigere mechanische Eigenschaften auf als das Harz und sind deswegen, im Gegensatz zu Glasfasern (Verstärkungsmaterial), das Trägermaterial. Dadurch sind die Eigenschaften bei Synthesefaserverbunden richtungsunabhängig. Da die Matrix bei Synthesefaserverbunden das tragende Element der Struktur ist, haben äußere Reinharzschichten vergleichbare Eigenschaften wie die Faserverbundmatrix, wodurch keine signifikanten Auswirkungen bei der E-Modulbestimmung entstehen können. Aus diesem Grund werden Synthesefaserlinersysteme in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

3.3 Glasfaserverbunde

Glasfaserverbunde können aus einer oder aus mehreren Einzellagen von Glasfasern, die übereinandergelegt, mit Harz getränkt und fest mit der Matrix verbunden sind bestehen. Diese Glasfaserlagen lassen sich unterteilen in Wirrfaserlagen, Rovings, Gewebe und Gelege. In Abbildung 1 ist zu erkennen wie eine typische Schlauchlinerprobe unter dem Mikroskop aussehen kann. In Abbildung 2 wurden mithilfe des Kalzinierungsversuchs an der selben Probe die einzelnen Glasfaserlagen freigelegt.

Abbildung 2 von links oben nach rechts unten: Gewebe, Wirrfasermatte, Gewebe, Wirrfasermatte, Gewebe, Wirrfasermatte, Gewebe, Wirrfasermatte.



Abbildung 1: Mikroskopie einer Schlauchlinerprobe

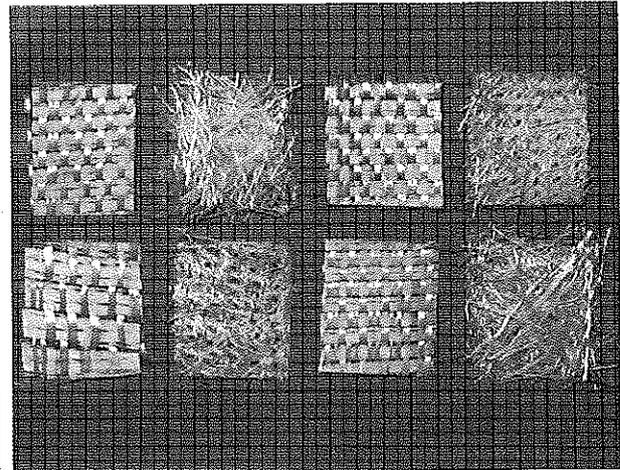


Abbildung 2: Freilegen der einzelnen Glasfaserschichten einer Schlauchlinerprobe

3.3.1 Glasfasern

Glasfasern sind typischerweise das Verstärkungsmaterial im Glasfaserverbund (Durchmesser einer Glasfaser: 3,5-24 μm [4.2]). Sie nehmen im System als eine von zwei Komponenten (Harz/Faser) die größten Kräfte auf und wirken sich somit verstärkend für den Verbund aus. Aufgrund ihrer amorphen Struktur sind sie isotrop. Glasfasern werden unter dem Namen Textilglasfasern zusammengefasst und haben abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung unterschiedliche Eigenschaften, die in Tabelle 1 verdeutlicht werden. Dabei hat E-Glas gute elektrische Isolationseigenschaften, AR-Glas ist eine alkalihaltige Glasfaser, die besonders alkaliresistent ist, R/S ist hochfestes Glas (eng. resistance, strength), C-Glas hat eine gute und ECR-Glas (eng. electrical + chemical resistance) eine sehr gute chemische Korrosionsbeständigkeit durch eine borfreie Struktur. Deswegen darf im Schlauchlinerbereich nur ECR- Glas gemäß DIN EN ISO 2078 und DIN 1259 verwendet werden, welches der DIN EN 14020 Teil 1–3 entspricht. [3.4]

Eigenschaften unterschiedlicher Glasfasertypen

	E-Glas	R/S Glas	C-Glas	ECR-Glas	AR-Glas
Dichte [$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$]	2,6	2,53	2,52	2,72	2,68
Zugfestigkeit [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]	3400	4400	2400	3440	3000
E-Modul [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]	73000	86000	70000	73000	73000
Bruchdehnung [%]	< 4,8	< 4,6	< 4,8	< 4,8	< 4,4
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [$^{\circ}\text{K}^{-1}$]	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 1: Eigenschaften unterschiedlicher Glasfasertypen [4.2]

Aufgrund von starken kovalenten Bindungen zwischen Silizium und Sauerstoff besitzen Glasfasern relativ hohe E-Modulwerte.

3.3.1.1 Rovings

Rovings sind Stränge aus parallel angeordneten Endlosfasern, die sich in Faserorientierung im Verbund verstärkend auswirken. Sie werden entweder axial oder in Umfangsrichtung angeordnet, um im System in der Hauptrichtung der wirkenden Kräfte unterstützend zu wirken. Durch die parallel angeordneten Fasern entsteht ein Verbund mit hohem Glasgehalt, der in Faserrichtung eine hohe Festigkeit und Steifigkeit aufweist. Deswegen sind Rovings (unidirektionale Verstärkungen) bezüglich ihrer Eigenschaften anisotrop und somit orthotrop. Sie werden im Schlauchlining eingesetzt um die mechanischen Eigenschaften des Schlauchliners konstruktiv in der Hauptbeanspruchungsrichtung zu verstärken. Beispielhaft zeigt Abbildung 3 Rovings, die aus einer Schlauchlinerprobe entnommen wurden und das Produkt in axialer Richtung verstärkt haben.

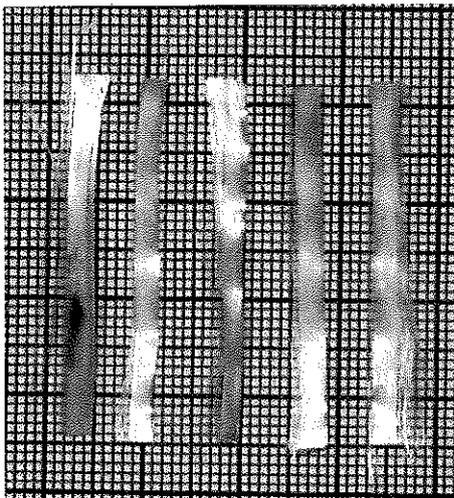


Abbildung 3: Unidirektionale Verstärkungen (Rovings)

3.3.1.2 Wirrfasern

Wirrfasermatten weisen keine bevorzugte Faserorientierung auf. Die Fasern sind in alle Richtungen der Ebene gleich orientiert. Somit sind die Kennwerte dieser Schichten in alle Richtungen der Ebene gleich und sehr stark von der Glasmenge der Wirrfaserlage abhängig. Sie sind aufgrund der möglichen kürzeren Faserlänge und keiner klaren Orientierung der Fasern, den quasiisotropen Schichten (beispielsweise Gewebe) bezüglich der Steifigkeit und Festigkeit unterlegen. [5.5] Die Länge der Fasern beträgt in der Regel 10–50 mm. Sie finden in Mischlaminaten und Wirrfaserlaminaten ihre Anwendung. Wirrfaserlagen werden zwischen Gewebelagen oder Rovings, aber auch an der Außen- und Innenwand des Schlauchlinerrohrs eingesetzt. Als vließgebundene Reinharzschichten können diese

harzreichen Schichten das eigentlich tragende Laminat vor chemischen Angriffen oder abrasiven Belastungen schützen. Abbildung 4 zeigt eine Wirrfasermatte aus dem Schlauchliningbereich.

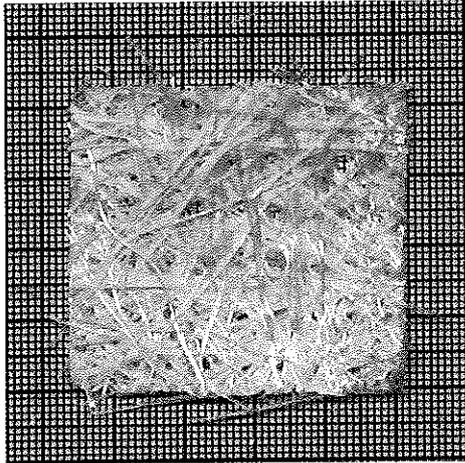


Abbildung 4: Wirrfasermatte

3.3.1.3 Gewebe

Gewebe bestehen aus Rovings, die im Schlauchliningbereich meist senkrecht mit einander verwebt sind. Damit ist eine Gewebeschicht aus mechanischer Sicht ein orthotroper Werkstoff mit Kett- und Schussrichtung als Orthotropieachsen [4.6]. Die Gewebeeigenschaften lassen sich primär durch die Wahl der Bindungsart (Art und Verkreuzung von Kett- und Schussfaden) beeinflussen. „Die Bindung entscheidet, wie oft ein Faden auf einer bestimmten Länge verkreuzt wird. Man spricht hier von Flottierung“ [5.6]. So besitzt ein Gewebe eine hohe Flottierung, wenn ein Roving über mehrere mögliche Verkreuzungsstellen nicht verkreuzt wird. Man unterscheidet zwischen drei verschiedenen Grundbindungen:

- 1) Leinwandbindung
- 2) Körperbindung
- 3) Atlasbindung

Die Leinwandbindung weist die kleinste Fadenflottierung und eine hohe Verschiebefestigkeit auf und wird bei Schlauchlinern am häufigsten eingesetzt. Bei gleichzeitigem Absinken der Verschiebefestigkeit nimmt die Fadenflottierung über die Körperbindung zur Atlasbindung zu [5.6]. In den Abbildungen 5–7 werden die verschiedenen Gewebearten gezeigt.

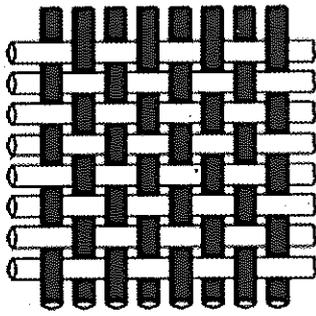


Abbildung 5: Leinwandbindung [9]

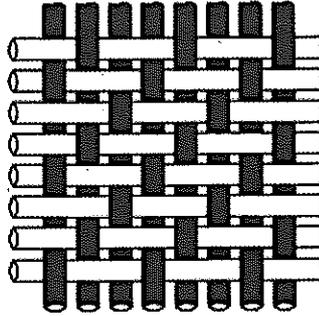


Abbildung 6: Körperbindung [9]

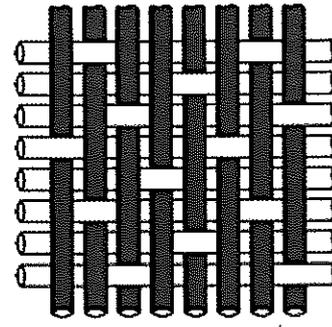


Abbildung 7: Atlasbindung [9]

3.3.1.4 Unidirektionales Gewebe (Gelege)

Unidirektionale Gewebe sind eine spezielle Gewebeart, bei der die Kettfäden ein Flächengewicht von 95 % und die Schussfäden von 5 % aufweisen. Die dünnen Schussfäden dienen nur zur Fixierung der Kettfäden. Ihre mechanischen Eigenschaften sind vergleichbar mit denen der unidirektionalen Verstärkungen (Rovings). Somit weisen sie eine hohe Steifigkeit und Festigkeit in Längsrichtung auf. In Querrichtung lassen sie sich nicht beanspruchen.

4. Schlauchliner

4.1 Allgemein

Das Schlauchliner-Verfahren ist ein Verfahren zur grabenlosen Sanierung von schadhaften, unterirdischen Abwasserkanälen. Um eine weitere Schadensbildung zu vermeiden, wird ein mit Reaktionsharz getränkter Schlauch, der die Länge und den Innendurchmesser des zu sanierenden Altrohrs aufweist, durch einen Einstiegsschacht in das Altrohr eingezogen oder inversiert. Der schon eingezogene Schlauch wird im Kanal durch Wasser- oder Luftdruck aufgestellt und schmiegt sich mit seiner Außenwand im bestmöglichen Fall optimal an den Innendurchmesser des zu sanierenden Altrohrs an. Anschließend wird der aufgestellte Schlauchliner durch Warm-, Kalt- oder Lichthärtung (UV-Licht) ausgehärtet. Die Verfahrensschritte beim Einbau von Glasfaserschlauchlinern werden mit den Abbildungen 8–15 beschreiben und gliedern sich wie folgt:

1. Hochdruckreinigung und Freimachen von Hindernissen des Sanierungsabschnitts vor dem Linereinbau.

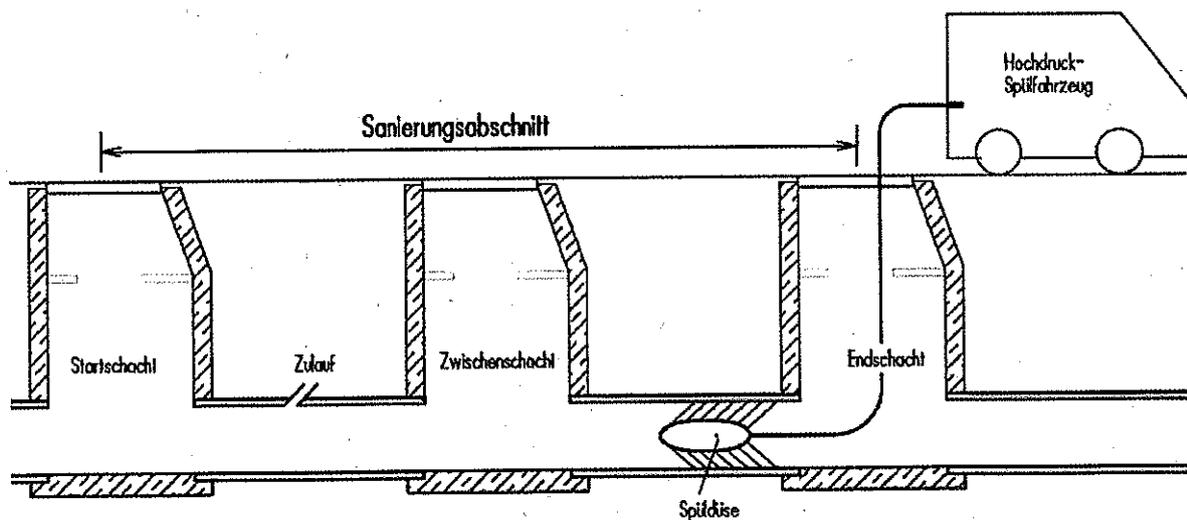


Abbildung 8: Hochdruckreinigung des Sanierungsabschnitts. [19]

2. Überprüfen der Hindernisfreiheit durch TV-Inspektion

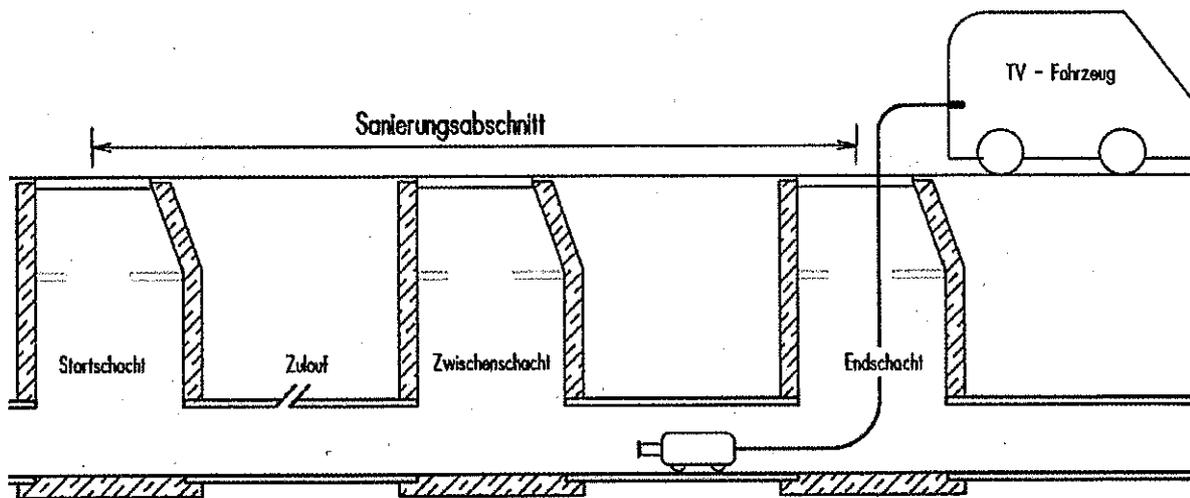


Abbildung 9: TV-Inspektion des Sanierungsabschnitts [19]

3. Einbringen eines Absperrkissens zur Wasserhaltung und einer Pumpe für anfallendes Abwasser. Dadurch wird sichergestellt, dass der zu sanierende Abschnitt trocken und abwasserfrei bleibt.

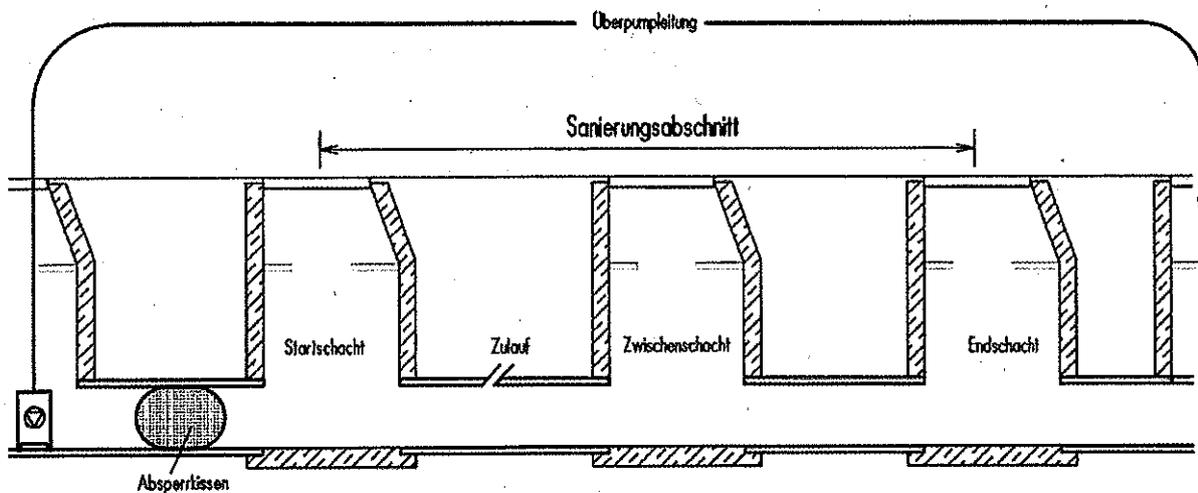


Abbildung 10: Trockenhaltung des Sanierungsabschnitts [19]

4. Einzug der Gleitfolie, um den Liner beim Einzug vor Beschädigungen zu schützen.

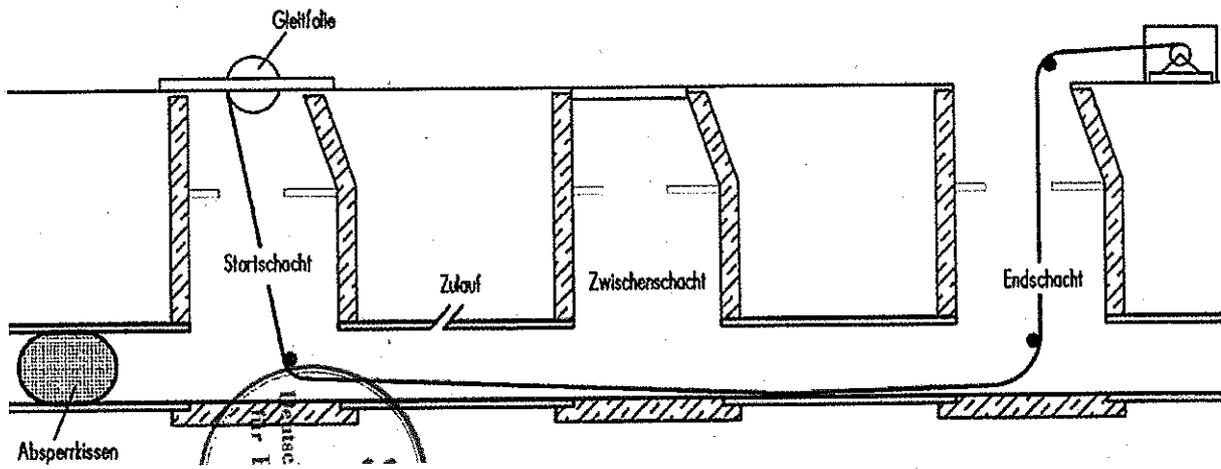


Abbildung 11: Einzug der Gleitfolie in den Sanierungsabschnitt [19]

5. Einzug des Liners aus dem Transportcontainer mithilfe der Winde.

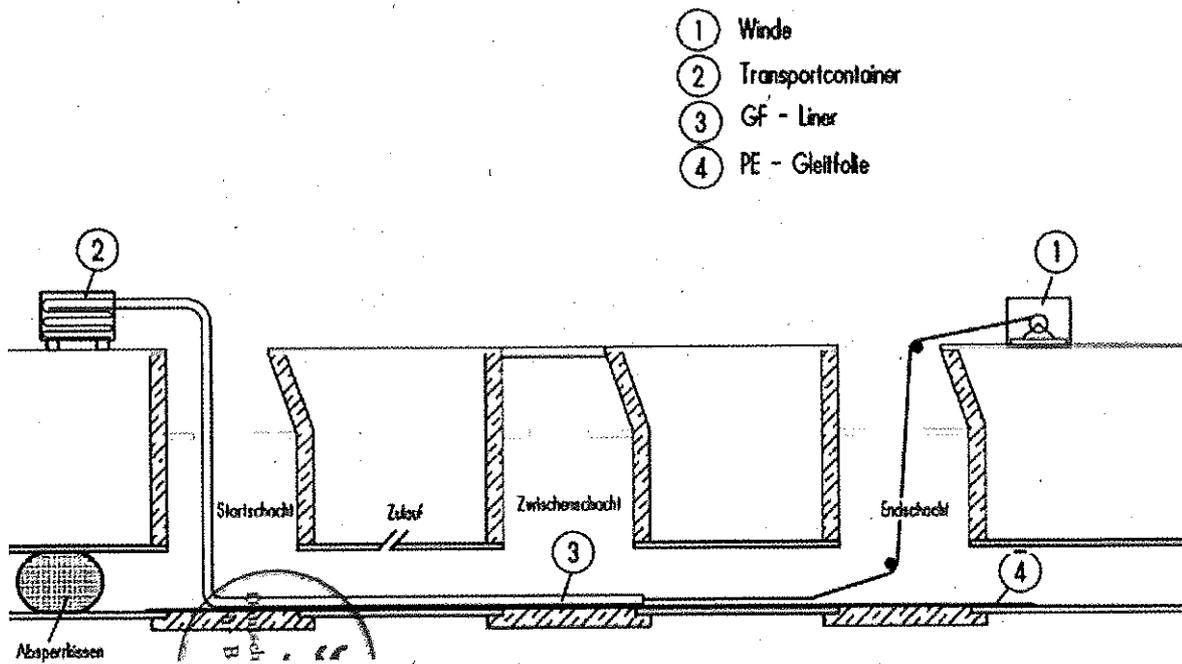


Abbildung 12: Einzug des Liners in den Sanierungsabschnitt [19]

6. Aufstellen des Liners durch den im Schlauchliner erzeugten Überdruck.

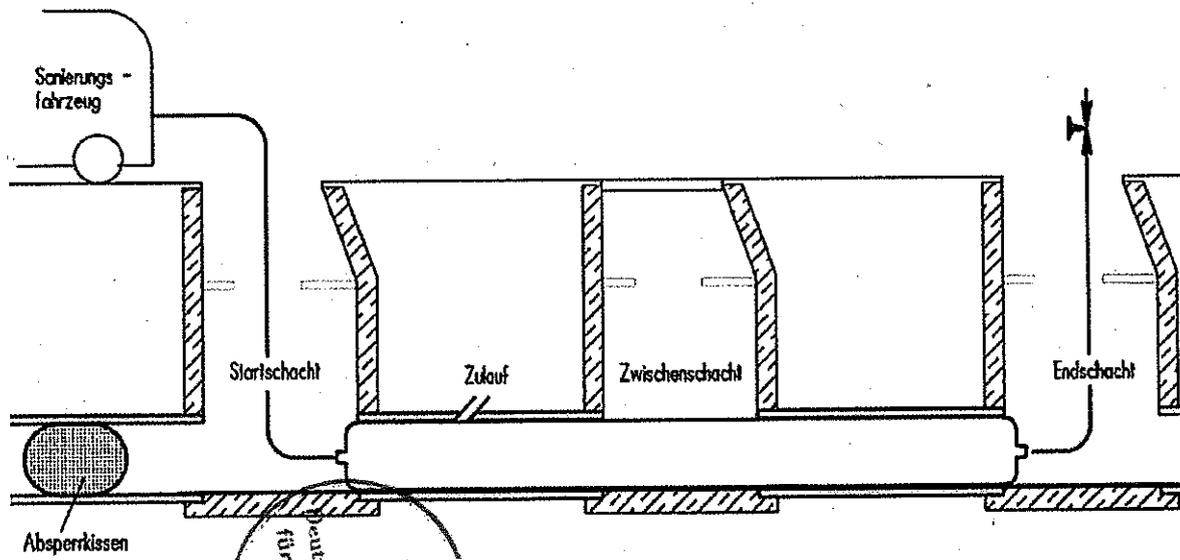


Abbildung 13: Aufstellen des Liners durch den Überdruck [19]

7. UV-Härtung des Liners durch das Durchziehen der Lichterkette mit vorgegebener Geschwindigkeit.

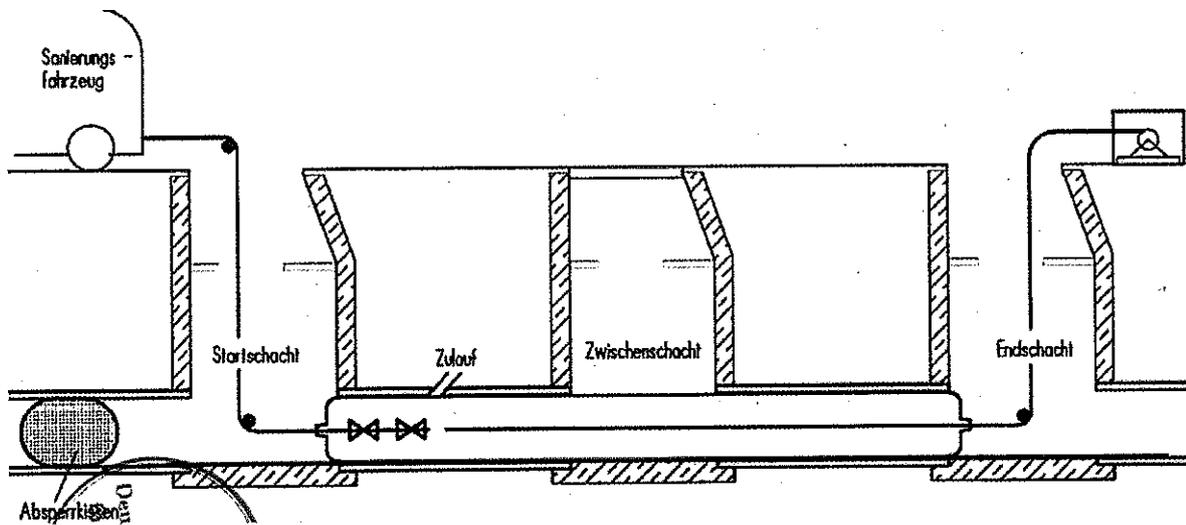


Abbildung 14: UV-Härtung des aufgestellten Liners durch die Lichterkette [19]

8. Nach der Aushärtung wird der Liner geöffnet, die Lichterkette herausgezogen und die Zuläufe werden geöffnet.

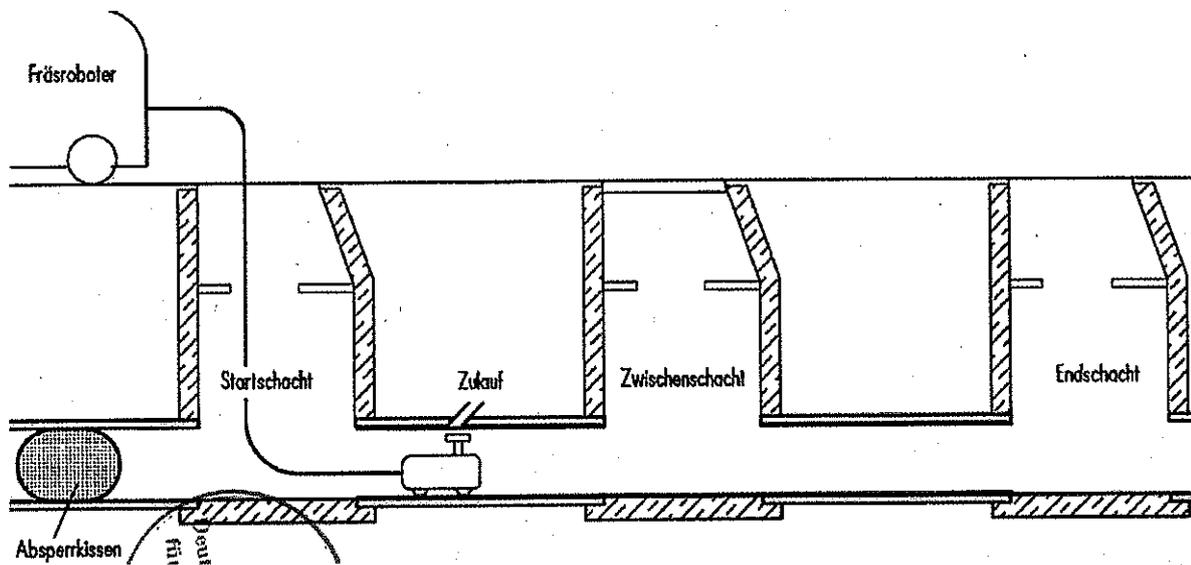


Abbildung 15: Öffnen von zuvor geschlossenen Zuläufen [19]

Generell sollten an eine durch einen Schlauchliner sanierte Leitung die gleichen Anforderungen wie an eine neue Haltung (Zwischen zwei Schächten) gestellt werden können. Konkret lassen sich diese in der hydraulischen Leistungsfähigkeit, der Dichtigkeit, der korrekten Anbindung der Anschlüsse, der Dauerhaftigkeit des verwendeten Baustoffes und den mechanischen Eigenschaften manifestieren [7.1]. Gemäß den Zulassungen der jeweiligen Schlauchliner sind nach dem Aushärteprozess Proben zu entnehmen, die in akkreditierten Prüflaboratorien zu untersuchen sind. Laut DWA-A 143-3 ist die Probenentnahme vorzugsweise in der Haltung durchzuführen. Proben aus der Haltung sind immer repräsentativ für das Bauwerk. Um das neu entstandene Bauwerk nicht zu beschädigen werden Proben außerhalb der Haltung oftmals aus dem Schachtbereich entnommen. Abweichende Prozessbedingungen in der Linerherstellung können zu abweichenden Eigenschaften des entnommenen Probenmaterials führen. So können dadurch beispielsweise Reinharzschichtausbildungen oder Abweichungen in der Wanddicke entstehen, was die Kennwertermittlung zusätzlich erschwert.

4.2 Schlauchliner-Wand-Konstruktion von Glasfaserlinern

Das Schlauchlinerrohr besteht in den meisten Fällen aus der Innenfolie/Beschichtung, die das Aufstellmedium beim Einbau vom Harz trennt, der Verschleißschicht, dem Laminat und der Außenfolie, die das Harzsystem vor Grundwasserbeeinträchtigungen schützen soll. Häufig kommt es zur Bildung einer ungewollten äußeren Reinharzschicht. Abbildung 16 zeigt die typische Schlauchliner-Wand-Konstruktion.

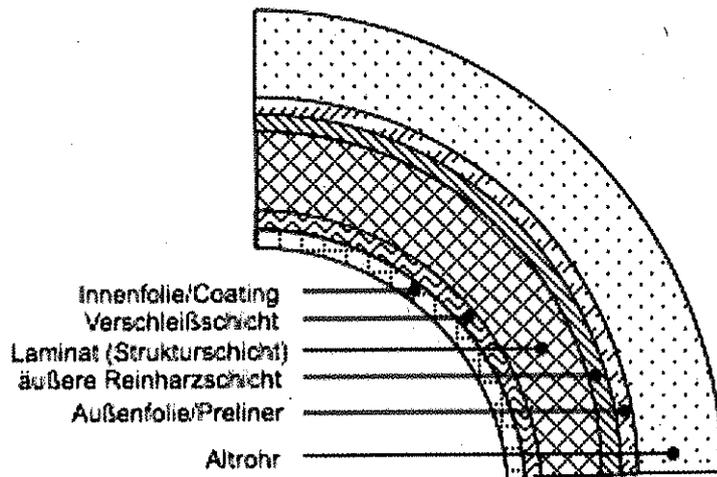


Abbildung 16: Detaillierter möglicher Wandaufbau eines Glasfaserschlauchliners

Die statisch tragende Dicke des Laminats (Strukturschicht) wird normativ mit der Verbundwanddicke e_m beschrieben. Sie errechnet sich aus der Gesamtwanddicke h_m durch Subtraktion von statisch nicht-tragenden Schichten, wie Coatings, die integraler Bestandteil des Laminats sind. Vor Ermittlung der Gesamtwanddicke müssen alle Folien und Beschichtungen, die nicht integrale Bestandteile des Liners sind, entfernt werden.

4.3 Äußere Reinharzschichten an Glasfaserlinern

Äußere Reinharzschichten sind häufig auftretende Imperfektionen von Schlauchlinern, die prozess- oder konstruktionsbedingt entstehen können und die eindeutige Verbundwanddickenbestimmung und zugleich die Kennwertermittlung erschweren. Die möglichen Ursachen für auftretende äußere Reinharzschichten gliedern sich wie folgt:

- Fehlvermessung des Altrohrs, beispielsweise durch Geometriefehler
- Unterkonfektionierung des Glasfaserschlauches
- Zu harzreiche Tränkung des Glasfaserschlauches
- Prozessfehler, beispielsweise durch falsche Einstellung der Kalibrierwalzen in der Tränkungsstraße
- Konstruktionsbedingt, durch innere und äußere Vliesschichten, die bei der Verbundwanddickenbestimmung rechnerisch von der Gesamtwanddicke abgezogen werden

Bei der Entstehung von äußeren Reinharzschichten wird das eigentlich für die Tränkung der einzelnen Glasfaserlagen zur Verfügung stehende Harz an die Außenwand des Schlauchlinerrohrs gedrückt. An der Außenwand entsteht ein Harzüberschuss und in den einzelnen Glasfaserlagen ein Harzdefizit, wodurch sich die mechanischen Eigenschaften des Glasfaserlaminats ändern. Die Abbildungen 17–21 zeigen die verschiedenen Arten von Reinharzschichten. So unterscheidet man in geschlossene Reinharzschichten, Reinharzschichten, die feine Haarrisse aufweisen, Reinharzschichten, die Spalten aufweisen, unterbrochene Reinharzschichten und Reinharzschichten mit Lufteinschlüssen:

1. Geschlossene Reinharzschichten: Bei geschlossenen Reinharzschichten ist davon auszugehen, dass die vollständigen Eigenschaften des Harzes angesetzt werden können.

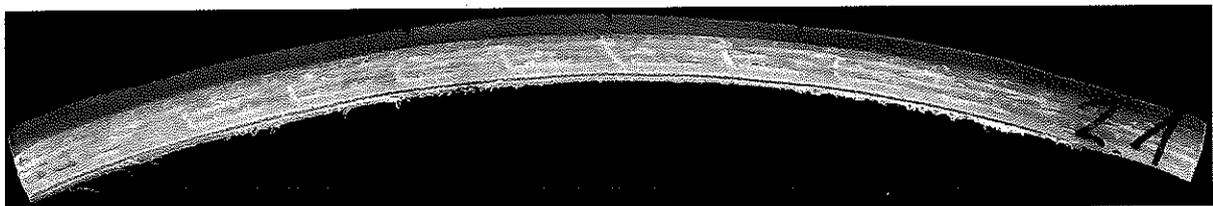


Abbildung 17: Linerprobe mit vollständig geschlossener Reinharzschicht

2. Rissige Reinharzschichten: Eine Rissausbildung bei äußeren Reinharzschichten ist abhängig von dem Schrumpfverhalten des verwendeten Harzes, der Schnelligkeit des Härteprozesses und der Reinharzschichtdicke. Durch das Schrumpfverhalten können

sich spaltenartige Risse wie auch Haarrisse in der Reinharzschicht ausbilden. Haarrisse (siehe Abbildung 18) nehmen bei äußeren Reinharzschichten geringe Einflüsse, da wenn sie in der Druckzone liegen bei Belastung eine nahezu geschlossene Reinharzschicht bilden. Risse in spaltenartiger Ausprägung (siehe Abbildung 19) haben hingegen beträchtliche Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften.

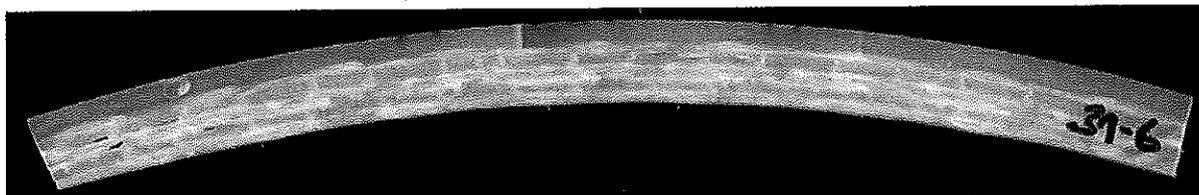


Abbildung 18: Linerprobe mit äußerer Reinharzschicht mit feinem Haarriss

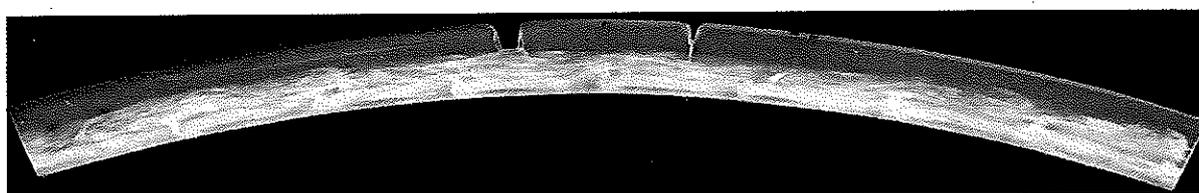


Abbildung 19: Linerprobe mit Spalten in der äußeren Reinharzschicht

3. Unterbrochene Reinharzschichten: Bei der Einschätzung von unterbrochenen Reinharzschichten sind die tragenden Eigenschaften des Harzes, in Abhängigkeit der Struktur der Reinharzschicht, anteilig oder nicht anzusetzen.

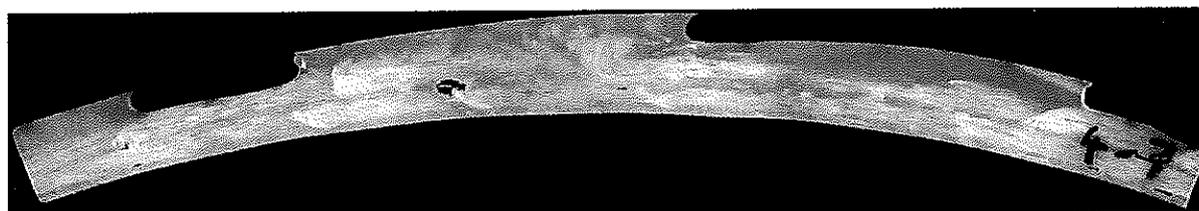


Abbildung 20: Linerprobe mit unterbrochener Reinharzschicht

4. Reinharzschichten mit Lufteinschlüssen: Bei der Einschätzung von Reinharzschichten mit Lufteinschlüssen sind die tragenden Eigenschaften des Harzes, in Abhängigkeit der vorhandenen Anzahl und Größe der Lufteinschlüsse, anteilig oder nicht anzusetzen.

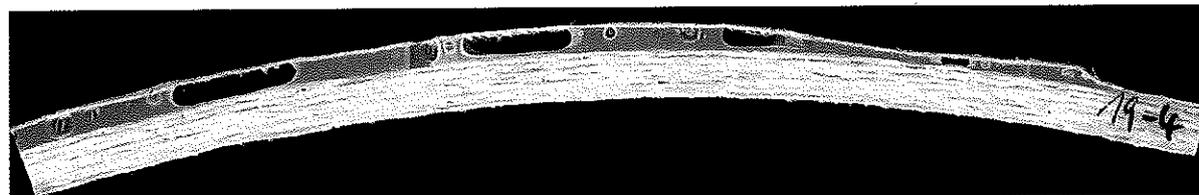


Abbildung 21: Linerprobe mit Lufteinschlüssen in der Reinharzschicht

5. Mechanische Eigenschaften von Schlauchlinern

5.1 Relevante Materialkennwerte in der Qualitätssicherung

Der Schlauchliner ist ein Faserverbundkunststoff-Produkt mit einem komplexen Wandaufbau. Über die Konstruktion des Wandaufbaus, also die konstruktive Zusammensetzung der einzelnen Glasfaserlagen werden die gewünschten mechanischen Eigenschaften wie der E-Modul und die maximale Biegespannung des Endprodukts eingestellt. So entsteht ein Gesamt-Elastizitätsmodul, der zusammen mit der maximalen Biegespannung mittels Materialprüfung im Rahmen der Qualitätssicherung bestimmt werden muss. Da im Schlauchlining das eigentliche Produkt auf der Baustelle entsteht, können erforderliche Qualitätssicherungsmaßnahmen erst nach der Entstehung des Schlauchliners durchgeführt werden. So muss geprüft werden, ob das Produkt seiner Zulassung und den Herstellerdefinitionen entspricht. Standardkenngrößen zur Qualitätssicherung von Schlauchlinern sind die maximale Biegespannung, E-Modul, statisch tragende Verbundwanddicke und die Wasserdichtheit.

5.1.1 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) ist eine der wichtigsten Materialkenngrößen und beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung eines festen Körpers bei seiner Verformung im linear-elastischen Bereich. Der Betrag dieses Kennwerts ist umso größer, je mehr Widerstand ein Körper der versuchten Verformung entgegensetzt. Somit beschreibt der E-Modul die Steifigkeit eines Materials. Das Hookesche Gesetz (1) beschreibt die Verformung von Festkörpern im linear-elastischen Bereich, bei welchen der E-Modul eine wichtige Proportionalitätskonstante ist. Der E-Modul wird in der Spannungs-Dehnungs-Kurve aus der Steigung im linear-elastischen Bereich und somit dem Verhältnis aus der Spannung zur Dehnung, mit der Einheit Pascal ($\text{Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$), beschrieben. Da die Steigung einer Kurve anhand von zwei Punkten präziser bestimmt werden kann, werden zwei Spannungs- und Dehnungsmesspunkte verwendet, um den E-Modul zu bestimmen (Gleichung 2). Anhand der Formeln (1)–(4) und Abbildung 22 wird der Zusammenhang verdeutlicht:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (1)$$

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (2)$$

$$\text{mit } \sigma_{fi} = \frac{3 * F_i * L}{2 * b * h^2} \quad (3)$$

$$\text{und } \varepsilon_{fi} = \frac{6 * s_i * h}{L^2} \quad (4)$$

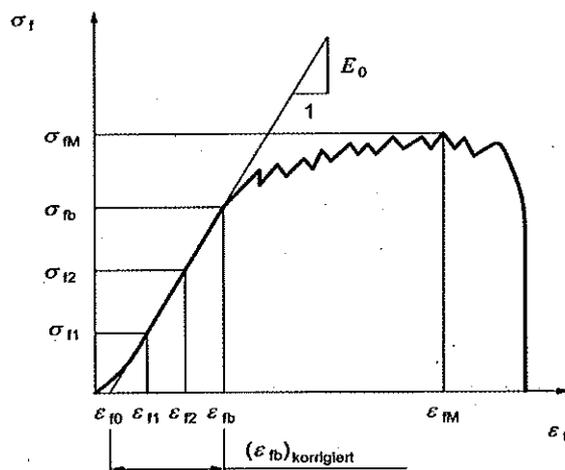


Abbildung 22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit angelegter Tangente

5.1.2 Biegespannung

Die Biegespannung (σ_f) entsteht bei einer Momentenbeanspruchung und hat die physikalische Dimension Kraft pro Fläche ($\frac{N}{m^2}$). Aus der Biegespannung resultiert eine Verformung, die als Durchbiegung in der Balkentheorie bezeichnet wird. Das Hookesche Gesetz (Gleichung 1) stellt im linear-elastischen Bereich die Beziehung zur Deformation her. Errechnet wird die Biegespannung aus dem Quotienten des angreifenden Moments und des Widerstandsmoments, welches eine querschnittsabgeleitete Größe ist.

$$\sigma = \frac{M}{W} \text{ [Pa]} \quad (5)$$

Das wirkende Moment ergibt sich aus der vereinfachten Betrachtung eines doppelt gelagerten Balkens mit mittiger Belastung.

$$M = \frac{F \cdot L}{4} \text{ [Nm]} \quad (6)$$

Das Widerstandsmoment ist ein querschnittsabhängiges Maß für den Widerstand eines belasteten Balkens gegen entstehende Spannungen. Bei Schlauchlinerproben wird von rechteckigen Querschnitten ausgegangen.

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \text{ [m}^3\text{]} \quad (7)$$

Die Spannung errechnet sich mit den Formeln (6) und (7) für rechteckige Querschnitte zu:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \text{ [Pa]} \quad (8)$$

6. Vergleich von Normen und Regelwerken zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte an Schlauchlinern

Bei Schlauchlinern handelt es sich um unregelmäßige Bauprodukte, die über ihre bauaufsichtlichen Zulassungen charakterisiert werden. Normen wie die Schlauchliner-Norm DIN EN ISO 11296 treffen bereits umfangreiche Beschreibungen der Schlauchliner und Vorgaben zur Qualitätssicherung. Dennoch werden sie im nationalen Bereich für nicht hinreichend angesehen. Die DIN EN ISO 11296 verweist auf die jeweiligen Prüfnormen, hier beispielsweise die DIN EN ISO 178. Zusätzlich zu der DIN EN ISO 178 beschreibt die DIN EN ISO 14126 die Prüfung der Biegeeigenschaften an genormten, homogenen und planaren Proben aus Faserverbundkunststoffen. Die Prüfungsdurchführungen entsprechen sich. Neben der DIN-Norm für Schlauchliner gibt es Regelwerke wie die DWA, welche die Messung der Wanddicke beschreiben jedoch insbesondere nicht hinreichend auf die Besonderheiten bei typischen Produktabweichungen eingehen. Um zu bestimmen, wie Proben mit ausgeprägten äußeren Reinharzschichten auf ihre Biegeeigenschaften zu prüfen sind, werden in diesem Kapitel die geltenden Normen und Regelwerke für die Prüfung an Schlauchlinerproben: DIN EN ISO 178:2011, DIN EN ISO 11296-4:2011 und das DWA-Arbeitsblatt 143-3:2014 in Bezug auf ihre Aussagen zur Vorgehensweise der Wanddickenbestimmung bei der Materialprüfung durch den 3-Punkt-Biegeversuch hinsichtlich des Einflusses äußerer Reinharzschichten, verglichen und interpretiert. Zusätzlich wurde an bestehenden DIBt-Zulassungen geprüft, ob diese über die bestehenden Regelwerke hinaus, weiterführende Anforderungen an die Wanddickenbestimmung geben.

6.1 3-Punkt-Biegeversuch

Der 3-Punkt-Biegeversuch gehört zu den zerstörenden Prüfungen, bei welchem eine Probe mit genormten Abmessungen auf zwei Auflagern positioniert und mit einer Druckfinne mit bestimmter Prüfgeschwindigkeit bis zum Versagen der Probe belastet wird. Dieser Versuch wird durchgeführt, um die materialtechnischen Eigenschaften des verwendeten Werkstoffs zu ermitteln und sie mit den Vorgaben der Zulassung der Produkte abzugleichen.

Mithilfe der Spannungs-Dehnungs-Kurve, die während des Biegeversuchs aufgezeichnet wird, lässt sich der E-Modul der Probe bestimmen (E-Modulbestimmung durch Regression). Allgemein wird ein Probekörper auf zwei abgerundeten und zueinander parallelen Auflagern positioniert, sodass über die Prüfmaschine nur Linienlasten eingeleitet werden und mit einer bestimmten Prüfgeschwindigkeit statisch bis zum Bruch belastet. Für die Bestimmung der Biegeeigenschaften an Schlauchlinerproben werden die DIN EN ISO 178, DIN EN ISO 11296-4 und das DWA-A 143-3 herangezogen. Abbildung 23 zeigt eine Prinzipskizze, die den 3-Punkt-Biegeversuch darstellt.

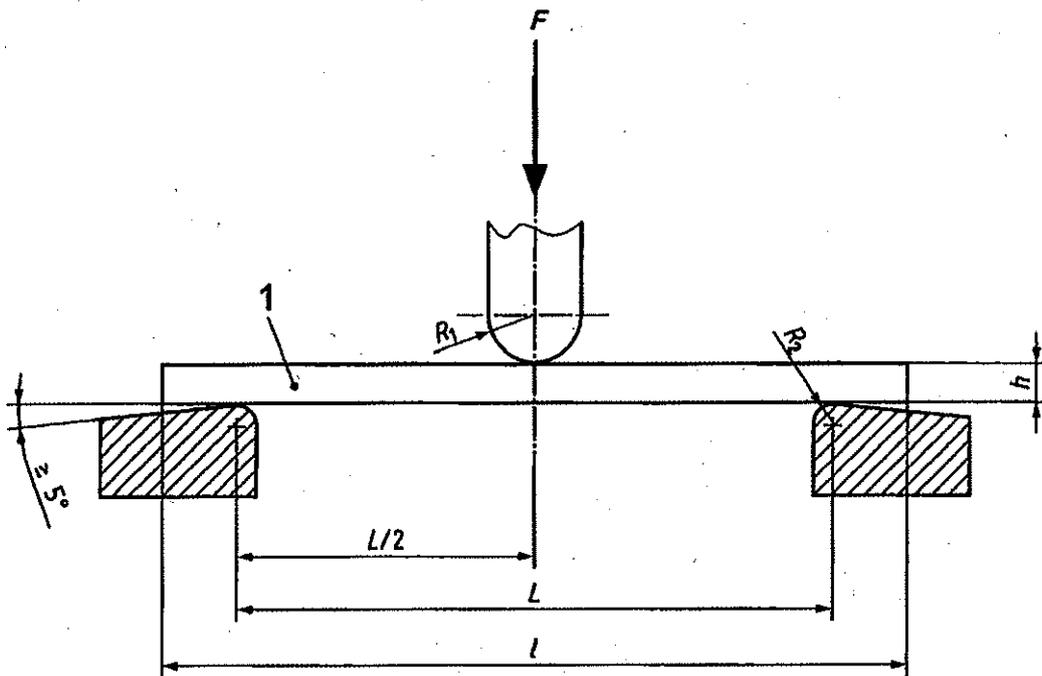


Abbildung 23: 3-Punkt-Biegeversuch Prinzipskizze [1.4]

6.1.1 DIN EN ISO 178 : 2011

Die DIN EN ISO 178 : 2011 – „Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften“ ist eine internationale Prüfnorm, die von einem genormten, steifen oder halbsteifen Probekörper aus Kunststoff ausgeht [1.3]. Nach dieser Norm dürfen nur geprüft werden:

- thermoplastische Formmassen, Extrudiermassen und Gussmassen, einschließlich gefüllter und verstärkter Compounds in Ergänzung zu den ungefüllten Sorten; steife thermoplastische Platten [1.3];
- duroplastische Formmassen, einschließlich gefüllter und verstärkter Compounds; duroplastische Platten [1.3]

Diese Norm gilt für Compounds mit einer Faserlänge von $\leq 7,5$ mm. Bei faserverstärkten Compounds mit einer Faserlänge $\geq 7,5$ mm ist nach DIN EN ISO 14125 zu prüfen [1.3]. Allgemeine Begriffe und physikalische Größen, die bei der Prüfung durch den Biegeversuch zur Anwendung kommen, wie beispielsweise die Biegespannung, Biegefestigkeit, Biegedehnung, Biege-Elastizitätsmodul, Prüfgeschwindigkeit und Durchbiegung, werden hier erklärt und/oder mit Formeln belegt.

Bei der Durchführung der Prüfung ist darauf zu achten, dass das Raumklima ISO 291 entspricht, sodass die Raumtemperatur 23°C und die Luftfeuchtigkeit 50 % beträgt [1.6]. Es werden mindestens fünf Probekörper (aus Gründen höherer Genauigkeit) geprüft [1.7]. Dabei wird ein auf zwei Auflagern ruhender Probekörper mit rechteckigem Querschnitt in der

Mitte zwischen den Auflagern mit einer Druckfinne durch eine konstante Prüfgeschwindigkeit geprüft, bis entweder ein Bruch auf der Außenfläche oder bis die maximale Dehnung von 5 % erreicht wird [1.11]. Es werden zwei Verfahren (A und B) der Prüfung unterschieden. In Verfahren A wird die Biegespannungs-Biegedehnungs-Kurve mit nur einer Prüfgeschwindigkeit bestimmt [1.9], in Verfahren B mit zwei Prüfgeschwindigkeiten [1.10]. Vor der Prüfung ist die mittlere Wanddicke nach ISO 16012 innerhalb von ± 2 mm von der Mittellinie des Probekörpers zu bestimmen [1.12], mit der die Auflagerdistanz L berechnet wird. Die Auflagerdistanz L wird aus dem 16 fachen der gemittelten Wanddicke bestimmt und eingestellt [1.4].

Im Anschluss an die Prüfung wird ein Prüfbericht erstellt, der alle relevanten Angaben enthält, wie die verwendete Norm, Prüfergebnisse, Mittelwerte, Abweichungen, Form und Maße der Probekörper, Probenidentifikation, Verfahren der Herstellung der Probekörper, Prüfbedingungen und Konditionierverfahren, Anzahl der Probekörper, Datum, Nenn-Auflagerdistanz, Angaben zum Verfahren (A oder B), Fehlergrenzen der Prüfmaschine und die Oberfläche, auf die die Kraft aufgebracht wurde [1.8].

6.1.3 DIN EN ISO 11296-4 : 2011

Die DIN EN ISO 11296-4 : 2011 - „Kunststoff-Rohleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining“ beschreibt Anwendungsbereiche und Anforderungen von Schlauchliner-Rohren und Formstücken. Im Anhang werden drei unterschiedliche Prüfungen beschrieben:

- Anhang B: Modifikationen der ISO 178 zu Biegeversuchen
- Anhang C: Prüfverfahren für die Bestimmung des Langzeitbiegemoduls unter feuchten Bedingungen
- Anhang D: Bestimmung des Kriechfaktors (trocken) anhand eines 3-Punkt-Biegeversuchs

Der normative Anhang B „Vor Ort gehärtete Liner – Modifikationen der ISO 178 zu Biegeversuchen“ beschreibt die erforderlichen Modifikationen der DIN EN ISO 178, die zugrunde gelegt werden müssen, um gekrümmte Schlauchliner-Proben mittels 3-Punkt-Biegeversuchs zu prüfen. Abbildung 24 zeigt die Prüfanordnung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4.

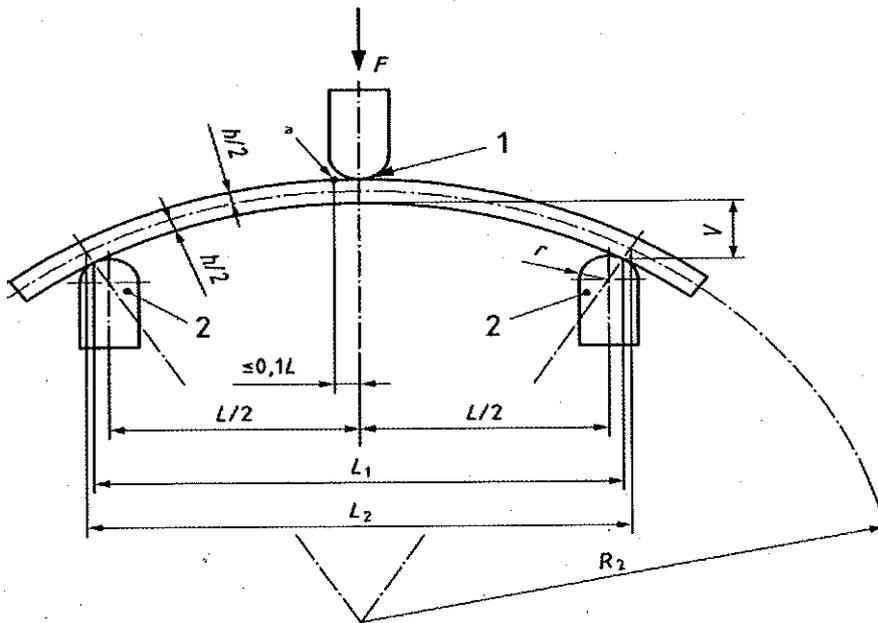


Abbildung 24: Prüfanordnung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 [2.2]

Legende:

1 Druckfinne

2 Auflager

F aufgebrachte Kraft

h Gesamtdicke des Probekörpers

L Abstand zwischen den Auflagern

L_1 Abstand zwischen den Auflagerpunkten des unbelasteten Probekörpers

L_2 wahre Stützweite eines gebogenen Probekörpers

r Radius der Auflager

R_2 Krümmungsradius des Probekörpers im Mittelpunkt seiner Dicke

V Höhendifferenz zwischen dem Mittelpunkt des unbelasteten Probekörpers und dessen Auflagerpunkten beim Biegeversuch

a Scheitelpunkt des Probekörpers

Aufgrund der unterschiedlichen Probengeometrien und der Herstellung des Produkts auf der Baustelle werden im Anhang B Modifikationen der DIN EN ISO 178 beschrieben, welche die Vorgehensweise bei der Prüfung von gekrümmten Schlauchliner-Proben darstellen. Beide Auflager als auch die Druckfinne müssen eine zylindrische oder halb-zylindrische Form mit einem Radius von $5 \pm 0,1$ mm aufweisen. Die Druckfinne ist auf einer Ebene senkrecht zur Probenachse rotierend zu lagern, um Torsionskräfte bei nicht vollständig flachen Proben zu reduzieren und dadurch ein vollständiges Aufliegen der Druckfinne auf dem Probekörper zu garantieren [2.3]. Probekörper müssen im Wesentlichen gleiche Radien und Bögen aufweisen und die Kanten sind in Längsrichtung parallel zueinander abzutrennen [2.4]. Die Verbundwanddicke darf an keiner Stelle, innerhalb des mittleren Drittels der Probe, um mehr als 10 % von dem Mittelwert abweichen [2.5]. Des Weiteren ist eine Breite der Probe von 50 ± 1 mm vorgeschrieben. Alternative Breiten sind, wenn beispielsweise die Hauptverstärkungsrichtung nicht in Umfangsrichtung der Probe liegt oder die Probe nach Vorgabe in Längsrichtung geprüft werden soll, Tabelle 2 zu entnehmen [2.6].

Maße in Millimeter	
Mittlere Verbunddicke e_m	Breite b
$e_m \leq 15$	$15,0 \pm 1$
$15 < e_m \leq 25$	$25,0 \pm 1$
$25 < e_m \leq 35$	$35,0 \pm 1$
$e_m > 35$	$50,0 \pm 1$

Tabelle 2: Alternative Breiten der Probekörper beim 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 11296-4

Die Probekörperlänge (l) wird mit der Formel (9) berechnet, wobei die Nennstützweite sich aus Formel (10) berechnet. Dabei ist e_m die mittlere Verbundwanddicke [2.7].

$$l = L + 4 * e_m \quad (9)$$

$$L = 16 * e_m \quad (10)$$

Zunächst wird die Gesamtwanddicke h , durch sechs Messungen innerhalb des mittleren inneren Drittels des Probekörpers, auf $\pm 0,01$ mm genau bestimmt. Anschließend wird durch rechnerischen Abzug der Innen- und/oder Außenfolie und/oder überschüssigen Reinharzschicht die Verbunddicke (e_m) bestimmt. Das Harz auf der Außenseite der Probe, kann bei Nichtverletzen des Träger- oder Verstärkungsmaterials teilweise oder vollständig abgeschliffen werden [2.8]. Die Höhendifferenz V darf, zwischen dem Mittelpunkt des unbelasteten Probekörpers und der Höhe seiner Auflagerpunkte, 0,07 des Abstands zwischen den Auflagerpunkten des unbelasteten Probekörpers (L_1) nicht überschreiten. Falls notwendig darf hierfür das Verhältnis aus Nennstützweite und Verbunddicke L/e_m auf weniger als 16:1, nicht aber auf weniger als 10:1 reduziert werden [2.9]. Des Weiteren wird die Berechnung mit der wahren Stützweite L_2 zwischen den Auflagerpunkten des unbelasteten Probekörpers eingeführt. Dem Prüfbericht sind zusätzlich zu den in DIN EN ISO 178 festgelegten Angaben die Prüfrichtung jedes Probekörpers (Umfangs- oder Längsrichtung), die mittlere Verbunddicke und die maximale prozentuale Abweichung vom Mittelwert des mittleren Drittels, die mittlere Gesamtwanddicke h_m , die wahre Stützweite L_2 , Wert und Verfahren bei der Bestimmung des Radius R_2 sowie bei direkter Messung die Maße L_1 und V hinzuzufügen [2.10].

6.1.4 DWA-A 143-3 : 2014

Das DWA-Arbeitsblatt 143-3 : 2014 – „Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 3: Vor Ort härtende Schlauchliner“ bezieht sich in der 3-Punkt-Biegung an Schlauchlinerproben auf die DIN EN ISO 11296-4 und die DIN EN ISO 178 und zitiert diese, sodass sich die Vorgehensweise der Prüfung nicht verändert. Zusätzlich schreibt das DWA-A 143-3 eine Mindestverbundwanddicke nach der Aushärtung von 3 mm bei Schlauchlinerrohren ab einem Durchmesser von 200 mm vor [3.2]. Bei der Wanddickenbestimmung sind die Messstellen farblich zu markieren [3.1]. Die Dicke der äußeren Harzschichten darf 20 % der Verbundwanddicke nicht überschreiten. Bei stärkeren äußeren Reinharzschichten sind die Proben zu verwerfen [3.1].

6.2 Ergebnis des Vergleichs der Normen und Regelwerke

Die DIN EN ISO 178 ist eine Prüfnorm, die den allgemeinen 3-Punkt-Biegeversuch von planen und homogenen Probekörpern aus thermoplastischen und duroplastischen Kunststoffen beschreibt. Die DIN EN ISO 11296-4 modifiziert den 3-Punkt-Biegeversuch, um die Krümmung und mögliche Inhomogenitäten von Schlauchlinerproben zu berücksichtigen. Das DWA-A 143-3 bezieht sich bei der Prüfung von Schlauchlinerproben auf die DIN EN ISO 178 und die DIN EN ISO 11296-4 und ergänzt diese Normen bezüglich der Probenhandhabung bei auftretenden Inhomogenitäten in Form von äußeren Reinharzschichten. Die DIN EN ISO 11296-4 und die DIN EN ISO 178 weisen eine Übereinstimmung in der Prüfungsdurchführung von Schlauchlinerproben auf. Bei der Prüfung von Proben mit ausgeprägten äußeren Reinharzschichten, sind aber Abweichungen in der Probenpräparation zu erkennen. Während die DIN EN ISO 11296-4 das Abschleifen von Reinharzschichten für die Prüfung von Schlauchlinerproben zulässt, muss laut DWA-Arbeitsblatt 143-3 bei einer Probe, die eine äußere Reinharzschichtdicke von $< 20\%$ der Verbunddicke (e_m) vorweist, diese von der Gesamtwanddicke der Probe subtrahiert werden. Laut DWA-A 143-3 müssen Proben mit äußeren Reinharzschichtdicken von $> 20\%$ verworfen werden, eine Zweitbeprobung ist dann erforderlich. Geltende DIBt-Zulassungen beziehen sich auf die DIN EN ISO 11296-4 und das DWA-A 143-3 und schreiben zusätzlich eine Überprüfung des Wandaufbaus und der Reinharzschicht beispielsweise mittels Lichtmikroskop vor. Tabelle 3 zeigt eine tabellarische Zusammenfassung dieses Vergleichs.

Zusammenfassende Gegenüberstellung der Regelwerke und der DIBt Zulassungsanforderungen

	Wanddickenbestimmung	Reinharzschichten	3 Punkt-Biegung	Modulermittlung
DIN EN ISO 178:2011-04	An mindestens 5 Probekörpern ist die mittlere Wanddicke im mittleren Drittel mittels Mikrometer innerhalb von ± 2 mm von der Mittellinie zu bestimmen. Die Probekörper deren Dicke die Grenzabweichung von ± 2 % des Mittelwerts überschreiten, sind zu verwerfen und durch andere, nach dem Zufallsprinzip ausgewählte, Probekörper zu ersetzen.	Keine Angaben	Ein auf zwei Auflagern ruhender Probekörper mit rechteckigem Querschnitt wird in der Mitte zwischen den Auflagern mittels Druckfinne mit einer konstanten Prüfungsgeschwindigkeit, bis entweder ein Bruch an der Außenfläche oder bis die maximale Dehnung von 5 % erreicht ist, nach Verfahren A oder B geprüft.	Verhältnis von Spannungsdifferenz zu Dehnungsdifferenz $(\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) (= 0,0025) - \epsilon_1 (= 0,0005)$. Lineare Regression bei rechnergestützten Prüferichtungen.
DIN EN ISO 11296-4:2011	Messung an 6 Punkten innerhalb des mittleren Drittels, mittels Messgerät mit der Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm. Anschließend rechnerischer Abzug von überschüssigen Harzschichten und Folien. Weicht eine einzelne Messung der Verbunddicke (einer Probe) um mehr als 10 % von der mittleren Verbunddicke (der selben Probe) oder der Mittelwert der Verbunddicke (einer Probe) um mehr als 10 % von dem Mittelwert der Verbundwanddicke einer Reihe von Proben ab, so ist der Probekörper zu verwerfen und durch einen neuen, nach dem Zufallsprinzip gewählten, zu ersetzen.	Reinharzschichten sind rechnerisch von Gesamtwanddicke abzuziehen. Insbesondere die Dicke unregelmäßige Schichten, sind teilweise oder vollständig abzuschleifen, sofern dabei keine Fasern des Trägermaterials und/oder der Verstärkung entfernt werden.	Vorgehen nach DIN EN ISO 178, aber bei Verwendung gebogener Probekörper muss die wahre Stützweite L_2 zwischen den Auflagerpunkten des unbelasteten Probekörpers berechnet und die Nenn-Stützweite zwischen den Auflagern auf $L = (16 \pm 1) \cdot e_m$ eingestellt werden. Abhängig von der Dicke der Probe und ihrer Höhendifferenz werden hier probenspezifische Ausnahmen getroffen.	Nach DIN EN ISO 178, aber mit korrigierten Dehnungswerten $\epsilon_2 = \epsilon_{r1} + 0,002$, wobei ϵ_{r1} der Wert zwischen 0,0005 und 0,004 zugewiesen wird, der den Wert des berechneten E-Moduls maximiert.
DWA-A 3-2014	Nach DIN EN ISO 178 und DIN EN ISO 11296-4 soll $e_m \geq 3$ mm und $DN \geq 200$ mm sein. Zusätzlich farblicher Markierung der Messstellen.	Reinharzschichten sind rechnerisch abzuziehen und dürfen 20 % der Verbunddicke nicht überschreiten. Bei stärkeren äußeren Reinharzschichten ist die Probe zu verwerfen	Bezug auf DIN EN ISO 178 und DIN EN ISO 11296-4	Regression im linear-elastischen Bereich
DIBt Zulassungs-Anforderungen	Mindestvorgabe der Verbundwanddicke von 3 mm	Wandaufbau und Reinharzschichten sind beispielsweise mittels Lichtmikroskopen zu überprüfen.	Nach DIN EN ISO 178 und DIN EN ISO 11296-4	Nach DIN EN ISO 178 und DIN EN ISO 11296-4

Tabelle 3: Zusammenfassender Vergleich der Regelwerke und der DIBt Zulassungsanforderung

6.3 Bewertung der Ergebnisse des Vergleichs der Normen und Regelwerke

Es wurde festgestellt, dass nach den geltenden Normen und Regelwerken, physikalisch tragende äußere Reinharzschichten, bei der Verbundwanddickenbestimmung, rechnerisch von der Gesamtwanddicke abzuziehen sind und keine Berücksichtigung in der Berechnung des E-Moduls finden. Aus der Praxis ist bekannt, dass Reinharzschichtdicken von über 20 % in sanierten Haltungen vorkommen. So werden nach Aufforderung des Auftraggebers immer wieder Prüfungen an Schlauchlinern vorgenommen, die einen Reinharzschicht-Anteil von > 20 % aufweisen. Da laut DWA-A 143-3 die Probenentnahme vorzugsweise aus der Haltung durchgeführt werden soll, sind diese Proben repräsentatives Element des Systems und müssen berücksichtigt werden, eine Rückweisung nach DWA-A 143-3 ist hier nicht zielführend. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird messtechnisch und theoretisch untersucht in wie weit die Unterschiede in den Regelwerken Einfluss auf die E-Modulbestimmung nehmen und ob äußere Reinharzschichten wirklich vernachlässigt werden dürfen.

7. Ermittlung des Einflusses von äußeren Harzschichten an Linerproben

Um den Einfluss von äußeren Harzschichten an Linerproben auf den E-Modul der Strukturschicht zu untersuchen und gleichzeitig typische Fremdeinflüsse durch beispielsweise Härtingsdefizite, Imperfektionen der Linerproben und/oder ihrer äußeren Harzschicht zu vermeiden, wurden unter Laborbedingungen an Linerproben mit definierter Tragstruktur geschlossene und durchgehärtete Harzschichten in unterschiedlicher Schichtdicke hergestellt. Der Einfluss der äußeren Reinharzschicht wurde prüftechnisch an den Laborproben und an Baustellenproben aus der Praxis durch den 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 11296-4 und theoretisch durch die klassische Laminattheorie und Finite-Elemente-Methode beschrieben.

7.1 Ermittlung des Einflusses von äußeren Harzschichten an Laborproben

7.1.1 Materialproben

Zur Untersuchung des Einflusses von äußeren Reinharzschichten auf den E-Modul der Strukturschicht von Linerproben, wurden Baustellenproben aus der Haltung auf ihre Tragstruktur abgeschliffen, um so definierte Substrate zu erhalten, die von äußeren Fehlereinflüssen unbeeinflusst sind. Bei der Auswahl der Probekörper wurde darauf geachtet, Produkte unterschiedlicher Art, Aufbaus und Herstellers zu verwenden um deutlich machen zu können, wie groß der Einfluss der eigentlichen Tragstruktur auf die Ergebnisse der E-Modulermittlung der Strukturschicht ist. Zusätzlich wurde eine Glasfaserplatte ausgewählt um den Einfluss von äußeren Reinharzschichten an planaren Probekörpern zu definieren. In Tabelle 4 sind die an den Strukturschichten ermittelten Kennwerte der verwendeten Laborproben dargestellt.

	Schlauchliner Typ	E-Modul der Strukturschicht [MPa]	Strukturschichtdicke e_m [mm]	Auflagerabstand L [mm]	DN [mm]
Liner Nr. 1	Saertex S Plus	24052	3,83	56	300
Liner Nr. 2	Saertex S Premium	17949	3,77	56	300
Liner Nr. 3	iMPREG GL13	20365	8,63	134	600
Liner Nr. 4	Reline Alpha 1800	19882	4,01	60	400
Liner Nr. 5	iMPREG GL01	16699	3,47	52	400
Glasfaserplatte	/	6895	3,72	58	/

Tabelle 4: Kennwerte der Strukturschichten des verwendeten Labor-Probenmaterials

Von jedem Liner wurden normgemäß jeweils fünf Proben entnommen und geprüft. Um den Lagenaufbau der verwendeten Liner darzustellen, wurde an den Proben ein Kalzinierungsversuch durchgeführt. Hierfür wurden die Proben in einem Schnellverascher und Muffelofen Temperaturen von 630°C ausgesetzt, wodurch das Harz veraschte und die Glasfaserlagen verblieben. Da vorhandene Synthefasern oder Folien veraschen und somit nicht auf den nachfolgenden Bildern zu sehen sind, werden die Synthefaserschichten gesondert beschrieben. Der Liner 1 (Saertex S Plus) enthält ein mit Harz getränktes Synthefaserfließ auf seiner Innenseite (integraler Bestandteil des Liners), das 0,2 mm dick ist und als Schutz vor aggressiven Medien dient. Auf seiner Außenseite befindet sich eine 0,15 mm dicke kaschierte Außenfolie, die als Schutz vor äußeren Angriffen dient und auch ein integraler Bestandteil des Liners ist. Der Liner 2 (Saertex S Premium) besitzt diese äußere kaschierte Außenfolie ebenso wie das innere Synthefaserfließ. Der Unterschied zu Liner 1 besteht darin, dass auf dem inneren Synthefaserfließ eine 0,35 mm dicke thermoplastische Folie (Coating) liegt, die zusätzliche Abriebfestigkeit und Schutz vor angreifenden Medien gewährt und kein integraler Bestandteil des Schlauchliners ist. Die Liner 3 und 5 (IMPREG GL13 und GL01) besitzen keine Synthefaserschichten, die nach der Kalzinierung nicht ersichtlich wären. Der Liner 4 (Reline Alpha 1800) besitzt auf der Innenseite ein 0,5 mm dickes Synthefaserfließ, das das tragende Glasfaserlaminat vor aggressiven Medien schützen soll und integraler Bestandteil des Schlauchliners ist. Synthefaserschichten, die integrale Bestandteile des Schlauchliners sind, müssen bei der Verbundwanddickenbestimmung von der Gesamtwanddicke subtrahiert werden. Abbildungen 25–31 zeigen den Glasfaserlagen-Aufbau des verwendeten Probenmaterials.

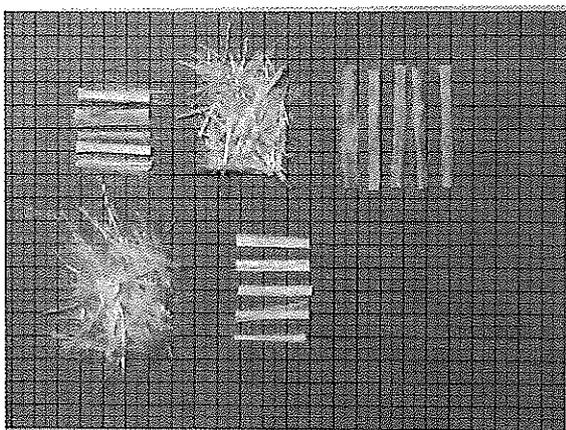


Abbildung 25: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 1

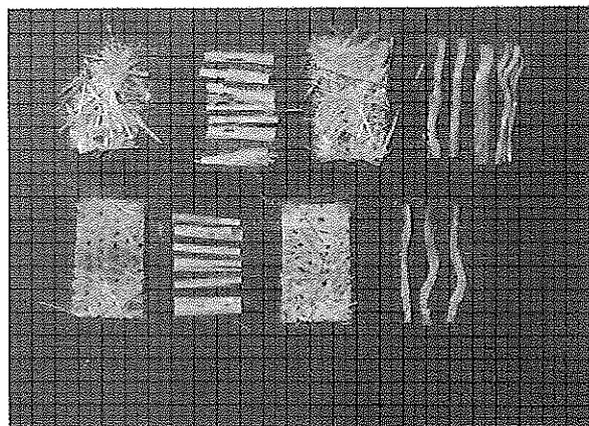


Abbildung 26: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 2

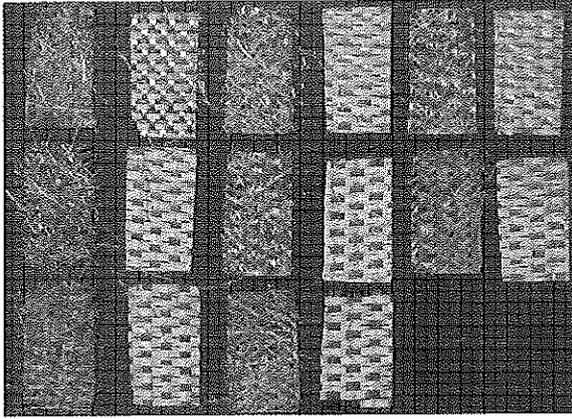


Abbildung 27: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 3

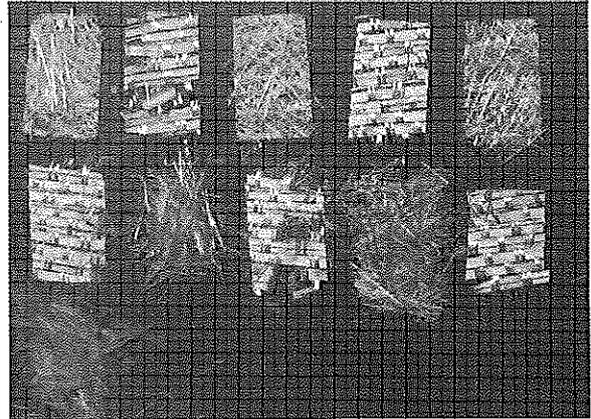


Abbildung 28: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 4

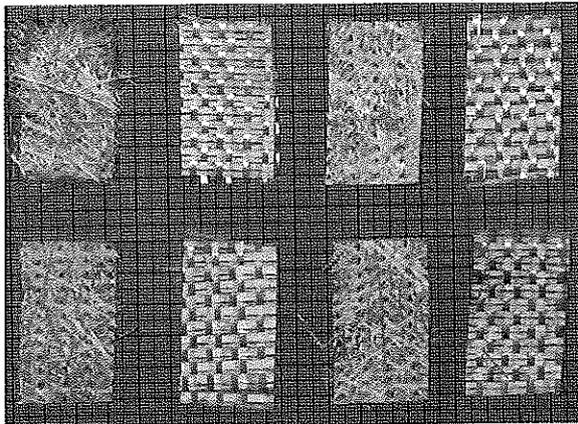


Abbildung 29: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 5

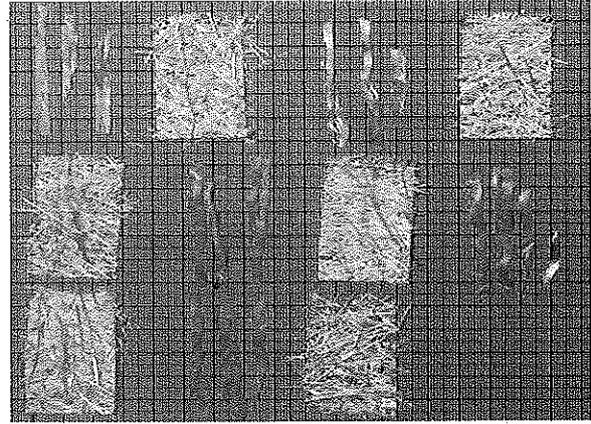


Abbildung 30: Glasfaser-Lagenaufbau Liner 6

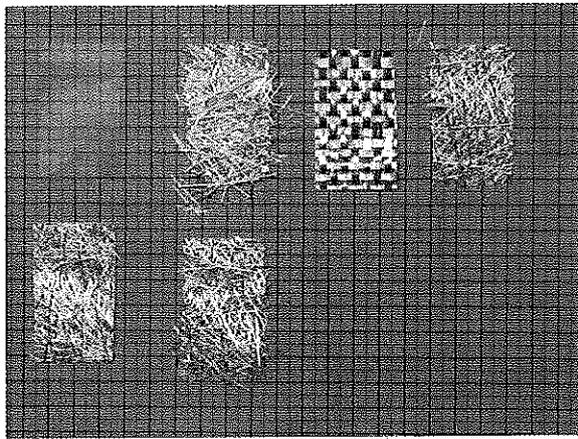


Abbildung 31: Glasfaser-Lagenaufbau Glasfaserplatte

7.1.2 Herstellung von Laborproben

Der Probekörper wird in Form einer Probekörperplatte in den Maßen 200 x 350 mm oder 200 x 400 mm geliefert und muss für die Prüfung vorbereitet werden. Die Probekörper werden mit einer Tischkreissäge aus der Probenplatte ausgesägt. Nach dem Aussägen werden sie gesäubert. Dazu wird der Sägestaub von ihrer Oberfläche entfernt. Mit einem Messer werden die überstehenden Sägereste an den Rändern der Probe abgeschnitten. Um Proben mit definierten äußeren Harzschichten herzustellen, wurden schichtweise äußere Harzschichten auf das zurechtgesägte Probenmaterial aufgebracht. Die Arbeitsschritte gliederten sich wie folgt:

1. Entfernen von äußeren Folien oder physikalisch nicht tragenden Schichten an den Proben.
2. Oberfläche der Proben bis zum tragenden Laminat runterfeilen. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die oberste Glasfaserlage nicht beschädigt wurde.
3. Oberfläche der Proben mit grobkörnigem Schleifpapier anrauen.
4. Oberfläche der Proben mit Aceton säubern und von Fett befreien.
5. Harz mittels Malerwalze auf die saubere und fettfreie Oberfläche der Proben aufbringen.
6. Proben härten lassen.
7. Proben 4,5 h bei 70 °C im Ofen tempern.
8. Die Proben langsam im Ofen abkühlen lassen, um innere Spannungen und Risse zu vermeiden.

Punkt 3 bis 8 wiederholten sich nach jedem Schichtauftrag. Das verwendete Harz VUP 4714 BET (Gruppe 3, Typ 1140) entspricht dem typischen Matrixmaterial für Schlauchliner. Es wurden folgende Kennwerte des Harzes ermittelt: E-Modul: 3548 MPa und Biegespannung: $106,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Um sicherzustellen, dass bei jeder Prüfung die vollständige Durchhärtung und Vernetzung der äußeren Harzschicht erreicht wurde, wurde vor jeder Prüfung die Barcolhärte der Oberfläche jeder Linerprobe geprüft. Die Barcolhärte jeder Probe betrug ≥ 35 Barcol, was auf eine vollständige Vernetzung des aufgetragenen Harzes schließen lässt. Abbildung 32 zeigt beispielhaft zwei Schlauchliner-Serien im Grundzustand (Abgeschliffen – untere Serie) und im Endzustand (mit äußerer Harzschicht – obere Serie).

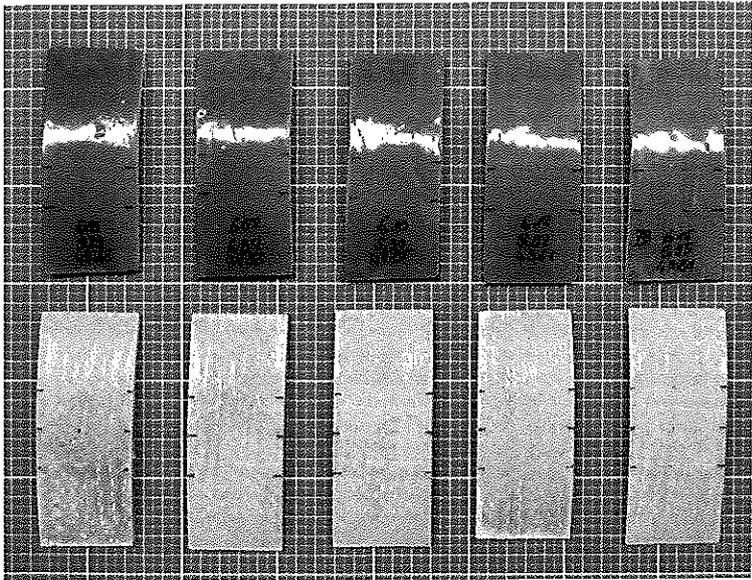


Abbildung 32: Labor-Linerproben vor und nach Harzauftrag

7.1.3 Versuchsdurchführung

Als Prüfmaschine wird die Universalprüfmaschine ZWICK Z010/TN2S verwendet. Sie verfügt über einen 10 KN Kraftaufnehmer und führt die Prüfung softwaregesteuert mit Prüfgeschwindigkeiten von 0,0005 bis 2000 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$ durch. Die vom Hersteller der Maschine entwickelte Prüfsoftware testXpert wird bei der Prüfung verwendet. Während der 3-Punkt-Biegeprüfung wird der auf zwei Auflagern positionierte Probekörper, durch eine Druckfinne belastet, indem die Traverse mit einer konstanten Geschwindigkeit in Richtung Probekörper fährt. Beim Belasten des Probekörpers wird kontinuierlich die Verformung und Spannung gemessen und graphisch in einem Diagramm aufgezeichnet. Bei normgerechter Prüfung werden je Serie fünf Probekörper geprüft. Im Abreißversuch werden zwei Stempel auf jeweils 6 Probekörper geklebt, mit welchen die Probekörper während der Prüfung in Dickenrichtung auseinandergezogen werden bis sie brechen. Die Prüfstempel müssen so in die Zugmaschine eingespannt werden, dass die Zugkraft gleichmäßig über die Prüffläche ohne Biegemoment aufgebracht wird. Während der Prüfung wird die Spannung und Dehnung gemessen und in ein Diagramm eingetragen. Dabei werden die relevanten Daten automatisch in einer Tabelle zusammengefasst. Abbildung 33 zeigt eine Prinzipskizze der verwendeten Prüfmaschine.

Übersicht

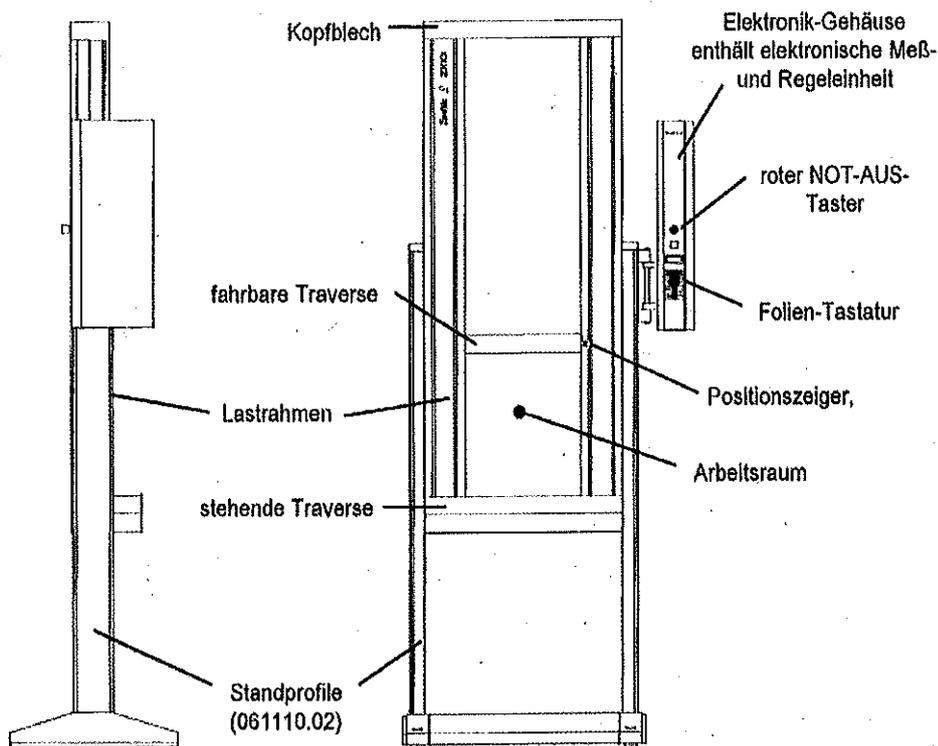


Abbildung 33: Prinzipskizze der verwendeten Prüfmaschine ZWICK Z010/TN2S

7.1.3.1 Messen

Die Probekörper müssen vor der eigentlichen Prüfung des E-Moduls vermessen werden. Hierfür wird die Gesamtwanddicke innerhalb des mittleren Drittels der Länge der Probe an zuvor sechs farblich markierten, sauberen Stellen mithilfe eines Messschiebers, der den Anforderungen nach DIN 862 (Genauigkeit $\pm 20 \mu\text{m}$) entsprechen muss [13], gemessen. So entstehen 6 unterschiedliche Wanddickenmessungen, die zu einem Mittelwert zusammengerechnet werden, der repräsentativ für die Probe steht. Abbildung 34 zeigt exemplarisch die Messstellen zur Ermittlung der Wanddicke und der Probenbreite.

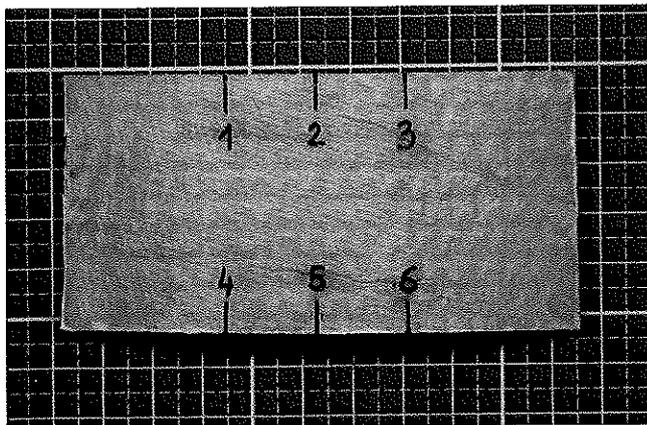


Abbildung 34: Messstellen zur Wanddicken- und Breitenbestimmung an Schlauchlinerproben

Es wird ein digitaler Messschieber verwendet, der durch ein Datenkabel mit der Prüfsoftware verbunden ist. Diese Verbindung führt zu einer schnelleren und sicheren Datenaufnahme bei geringerem Fehlerrisiko der Eingabe. Bei der Messung der Wanddicke ist immer darauf zu achten, dass der Messschieber senkrecht zu den Schnittkanten angesetzt wird und plan aufliegt. Dabei sind die Messschenkel parallel zur Probenoberfläche zu halten. Beim Messen darf keine zusätzliche Kraft angewendet werden, da diese das Ergebnis verfälschen könnte. Daher sollte das Ergebnis abgelesen werden, sobald ein leichter Widerstand an den Messschenkeln zu spüren ist. Abbildung 35 zeigt den verwendeten Messschieber.

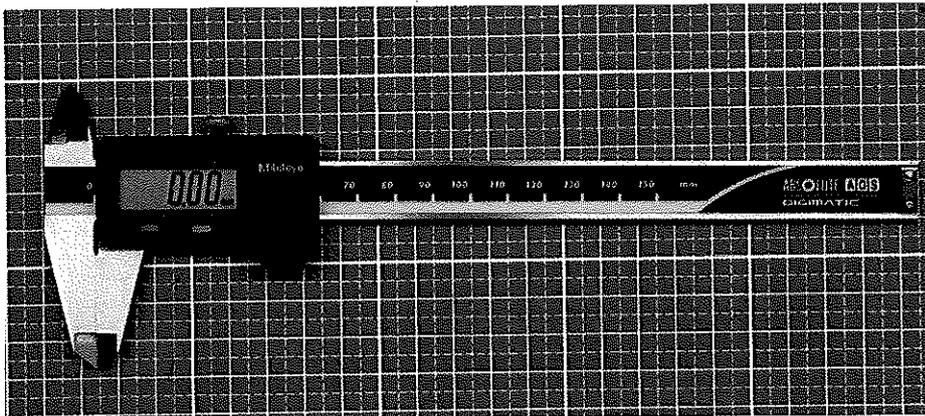


Abbildung 35: Verwendeter digitaler Messschieber

7.1.3.2 Protokollieren

Die Ergebnisse der Prüfung mittels 3-Punkt-Biegeversuchs werden durch ein Prüfprotokoll zusammengefasst. Die Anforderungen sind je nach Prüfung in DIN EN ISO 11296-4, DIN EN ISO 178 oder DIN EN ISO 14126 genormt. Die erstellten Prüfprotokolle dokumentieren folgende Einzelpunkte und befinden sich im Anhang:

- Probenbeschreibung
- Prüfparameter
- Ergebnisse
- Seriengrafik
- Statistik

7.1.3.3 Versuchsdurchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Labor-Linerproben

Mit dieser Norm werden die gekrümmten Schlauchlinerproben auf ihre Biegeeigenschaften durch den 3-Punkt-Biegeversuch geprüft. Vor der Herstellung der Proben mit äußerer Harzschicht wurden dieselben Proben ohne äußere Harzschicht geprüft, um den E-Modul der reinen Strukturschicht zu bestimmen. Hierfür wurden die Proben nicht zerstört, sondern nur „angefahren“. Beim „Anfahren“ des E-Moduls wird die Prüfung bei Erreichen einer konstanten Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve im hookeischen Bereich vom Prüfer abgebrochen. Dabei wird sichergestellt, dass die Probe nicht plastisch verformt wird. Der E-Modul wird im linear elastischen Bereich bestimmt, sodass man die Proben mehrmals durch das Anfahren des E-Moduls prüfen kann, um die Auswirkungen von weiteren Harzschichten an der selben Probe zu untersuchen. Nachdem der E-Modul des Laminats (Strukturschicht) bestimmt wurde, sind die Proben mit mehreren Lagen von äußeren Harzschichten versehen und geprüft worden. Diese Prüfung der Proben mit äußerer Reinharzschicht unterteilt sich in zwei einzelne Prüfungen, die zwei unterschiedliche E-Moduln ergeben. Zum Einen wird die Probe so geprüft, dass davon ausgegangen wird, dass die äußere Harzschicht zur Verbundwanddicke gehört. Zum Anderen wird, wie in DIN EN ISO 11296-4 und DWA 143-3 beschrieben, die äußere Harzschicht rechnerisch von der Gesamtwanddicke der Probe abgezogen, sodass davon ausgegangen wird, dass die Reinharzschicht nicht Teil der tragenden Struktur der Probe ist. Somit ergeben sich je Probe die drei folgenden E-Moduln. Dabei wird der E-Modul der Strukturschicht je Probe einmal ermittelt. Die E-Moduln aus Punkt 2 und Punkt 3 werden je Harzauftrag neu ermittelt.

1. E-Modul des Laminats (Strukturschicht)
2. E-Modul ohne rechnerischen Abzug der äußeren Harzschicht (Harzschicht während der Prüfung physikalisch vorhanden)
3. E-Modul mit rechnerischem Abzug der äußeren Harzschicht (Harzschicht während der Prüfung physikalisch vorhanden)

Auf Basis der ermittelten Ergebnisse wird ein Faktor bestimmt, der den Einfluss von äußeren Reinharzschichten auf den E-Modul der Strukturschicht beschreibt.

Dieser Faktor errechnet sich wie folgt:

$$\text{Faktor} = \frac{\text{E – Modul der Strukturschicht [MPa]}}{\text{E – Modul ohne rechnerischen Abzug der äußeren Harzschicht [MPa]}}$$

7.1.3.4 Versuchsdurchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 14126 an planaren Probekörpern

Die DIN EN ISO 14126 : 2011 – „Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften“ ist eine Prüfnorm, die Vorgehensweisen zur Bestimmung der Biegeeigenschaften von Faserverbundkunststoffen, mittels 3-Punkt- und 4-Punkt-Verfahren, an genormten Probekörpern beschreibt. Diese Norm basiert auf der DIN EN ISO 178 und erweitert diese auf die Prüfung von Faserverbundkunststoffen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zusätzlich untersucht, wie sich äußere Harzschichten an planaren und genormten Probekörpern auf den E-Modul auswirken und wie groß ihr Einfluss zwischen gekrümmten und planaren Probekörpern ist. Die Prüfung wird in Anlehnung an die DIN EN ISO 14126 durchgeführt, weil die Breite der Probe annähernd an die DIN EN ISO 11296-4 auf 50 mm vergrößert wurde und dadurch nicht mehr normgerecht ist. Dies ist der Fall, weil der entstehende Fehler bei auftretenden Imperfektionen der Proben bei größerer Probenbreite, einen kleineren Einfluss auf das Prüfergebnis hat als bei Proben mit normgerechter und gleichzeitig kleinerer Breite. Somit führt die hier vorgenommene Vergrößerung der Probenbreite zu einem sichereren Ergebnis.

Vorab wurde eine Vergleichsprobenserie ohne äußere Harzschicht geprüft. Damit werden die mechanischen Grundwerte der Platte bestimmt. Im Anschluss wird die Prüfung wie unter Kapitel 7.1.3.3 (Versuchsdurchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Labor-Linerproben) fortgeführt.

7.1.3.5 Versuchsdurchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 178 an Harzproben

Um im Vorfeld die Kennwerte des verwendeten Harzsystems zu ermitteln, wurde das auf die Proben aufgebrachte Harz VUP 4714 BET mittels DIN EN ISO 178 auf seine Biegeeigenschaften geprüft. Hierfür wurde eine Harzplatte gegossen, aus der die normgerechten, planen Probestücke herausgesägt worden sind. Das Mischungsverhältnis lag bei 100 % Harz und 2 % Härter. Der Härter ist passend zu dem Harz ein Methyl Ethyl Keton Peroxid (MEKP) Härter. Nachdem die fünf Proben zurechtgesägt worden sind, wurde ihr mittleres Drittel der Länge markiert. Innerhalb dieses mittleren Drittels wurde die Wanddicke durch sechs Messungen und die Breite der Proben durch drei Messungen bestimmt. Aus diesen Messungen wurden Mittelwerte der Wanddicke und der Breite bestimmt, die repräsentativ für die Harzplatte sind. Der erforderliche Auflagerabstand wurde mit den gemittelten Werten bestimmt. Nachdem die Proben auf die Auflager gelegt wurden, prüfte man sie mit der zuvor richtig ausgewählten Prüfvorschrift. Abbildung 36 zeigt die hergestellten Probekörper aus dem VUP 4714 BET Harz.

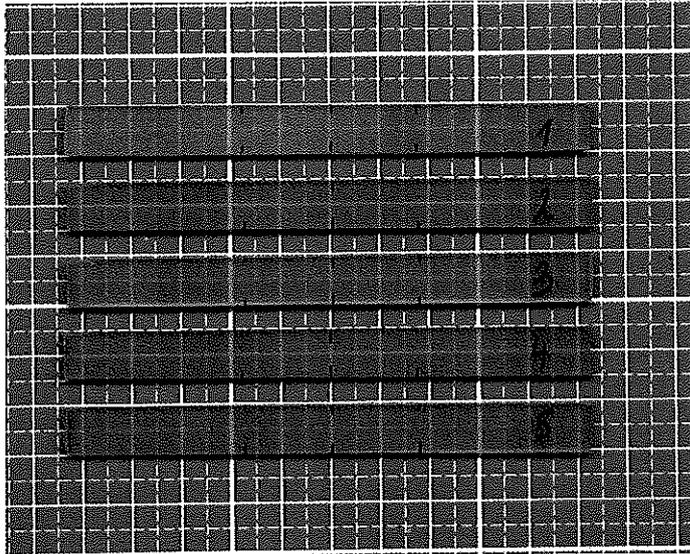


Abbildung 36: Harz-Probekörper für den 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178

7.1.3.6 Versuchsdurchführung des Abreißversuchs nach nach DIN EN ISO 4624 an Labor-Linerproben

Um sicherzustellen, dass die Haftfestigkeit zwischen der aufgetragenen äußeren Harzschicht und dem eigentlichen Laminat (Strukturschicht) ausreichend groß ist, wurde ein Abreißversuch durchgeführt. Hierfür wurde Liner Nr. 5 in sechs gleichgroße Probestücke zersägt. Danach wurden die Probestücke von dem Sägestaub befreit, mit grobem Schleifpapier angeraut und mit Aceton gesäubert. Die Stempel aus Stahl wurden mit einer hochfesten Epoxidspachtelmasse auf die Ober- und Unterseite der Probe geklebt und anschließend ausgehärtet. Die auf den Probekörper aufgeklebten Prüfstempel werden in die Spannbacken der Universalprüfmaschine eingespannt. Die Zugkraft wird gleichmäßig und ohne Einfluss von Momenten in Dickenrichtung über die Prüffläche aufgebracht. Die elektronisch aufgezeichneten Kennwerte werden in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm eingetragen und visualisiert. In den Abbildungen 37 und 38 wird der Probekörper mit aufgeklebten Prüfstempeln gezeigt und der Versuchsaufbau verdeutlicht.

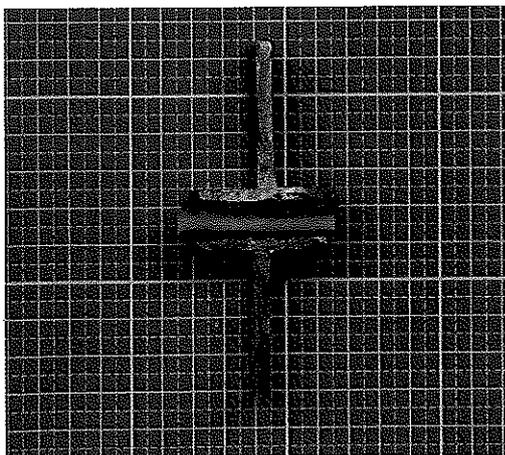


Abbildung 37: Probekörper mit aufgeklebten Stempeln für den Abreißversuch

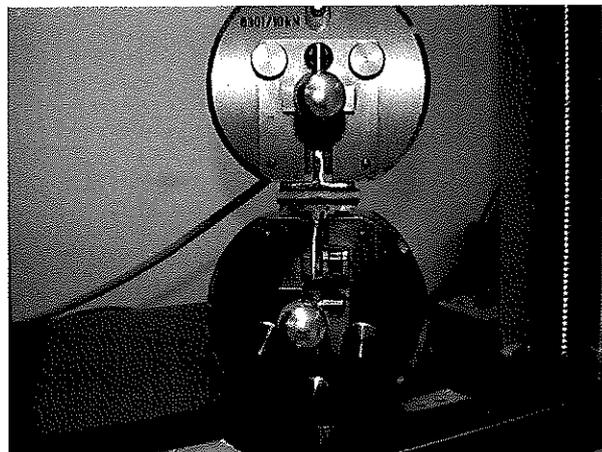


Abbildung 38: Versuchsaufbau des Abreißversuchs

7.1.4 Ergebnisse der Prüfungsdurchführungen an Laborproben

7.1.4.1 Ergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Labor-Linerproben

Die in den 3-Punkt-Biegeversuchen an den selbst hergestellten Labor-Linerproben ermittelten E-Moduln werden in den Tabellen 5–10 dargestellt. Dabei werden die Absolutwerte und die prozentualen Werte in Bezug auf die wahren Werte der Strukturschicht (ohne physikalisch vorhandene Reinharzschicht) angegeben. Jeder Probekörper wurde zwei mal je Versuch geprüft: 1. Mit äußerer Harzschicht, 2. Mit rechnerischem Abzug der äußeren Harzschicht (Vorgehen normativ). Ein Faktor wurde errechnet, der es erlaubt das Laminat zu bewerten, ohne die äußere Harzschicht abzuschleifen. Die dargestellten Ergebnisse sind Mittelwerte aus den Versuchsprotokollen. Ein Mittelwert errechnet sich aus fünf Messungen an fünf Probekörpern. Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse der unterschiedlichen E-Moduln in Abhängigkeit der Dicke der äußeren Harzschicht.

Ergebnisse der E-Modulbestimmung an Liner 1

	E-Modul bei Prüfung mit äußerer Harzschicht [MPa] / [%]	E-Modul bei rechnerischem Abzug der äußeren Harzschicht ohne zu schleifen [MPa] / [%]	Harzschicht-Dicke [%] / [mm]	Faktor
Strukturschicht mit 1. Harzschicht	14977 / 62	27367 / 114	22,8 / 0,87	1,61
Strukturschicht mit 2. Harzschicht *	19339 / 80	25320 / 105	9,7 / 0,37	1,23
Strukturschicht mit 3. Harzschicht **	13952 / 54	27295 / 113	29,3 / 1,12	1,72
Strukturschicht mit 4. Harzschicht	11570 / 48	29091 / 121	43,0 / 1,65	2,08
Strukturschicht mit 5. Harzschicht	9857 / 41	31606 / 131	56,4 / 2,16	2,45

Tabelle 5: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an Liner 1

E-Modul der Strukturschicht ohne vorhandene äußere Harzschicht von Liner 1 $E_{Str} = 24052 \text{ MPa}$

Ergebnisse der E-Modulbestimmung an Liner 2

	E-Modul bei Prüfung mit äußerer Harzschicht [MPa] / [%]	E-Modul bei rechnerischem Abzug der äußeren Harzschicht ohne zu schleifen [MPa] / [%]	Harzschicht-Dicke [%] / [mm]	Faktor
Strukturschicht mit 1. Harzschicht	12269 / 68	21654 / 121	22,5 / 0,84	1,46
Strukturschicht mit 2. Harzschicht *	16686 / 93	18917 / 105	4,3 / 0,16	1,08
Strukturschicht mit 3. Harzschicht **	12493 / 70	20365 / 113	22,3 / 0,84	1,44
Strukturschicht mit 4. Harzschicht	10304 / 57	22388 / 125	36,4 / 1,37	1,74
Strukturschicht mit 5. Harzschicht	8554 / 48	24993 / 139	51,7 / 1,95	2,10

Tabelle 6: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an Liner 2

E-Modul der Strukturschicht ohne vorhandene äußere Harzschicht von Liner 2 $E_{Str} = 17949 \text{ MPa}$

Ergebnisse der E-Modulbestimmung an Liner 3

	E-Modul bei Prüfung mit äußerer Harzschicht [MPa] / [%]	E-Modul bei rechnerischem Abzug der äußeren Harzschicht ohne zu schleifen [MPa] / [%]	Harzschicht-Dicke [%] / [mm]	Faktor
Strukturschicht mit 1. Harzschicht	17150 / 84	20869 / 102	7,7 / 0,67	1,19
Strukturschicht mit 2. Harzschicht	14946 / 73	21034 / 103	14,4 / 1,25	1,36
Strukturschicht mit 3. Harzschicht	14034 / 69	21990 / 108	18,4 / 1,58	1,45
Strukturschicht mit 4. Harzschicht	12995 / 64	22862 / 112	23,2 / 2,00	1,57

Tabelle 7: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an Liner 3

E-Modul der Strukturschicht ohne vorhandene äußere Harzschicht von Liner 3 $E_{Str} = 20365 \text{ MPa}$

Ergebnisse der E-Modulbestimmung an Liner 4

	E-Modul bei Prüfung mit äußerer Harzschicht [MPa] / [%]	E-Modul bei rechnerischem Abzug der äußeren Harzschicht ohne zu schleifen [MPa] / [%]	Harzschicht-Dicke [%] / [mm]	Faktor
Strukturschicht mit 1. Harzschicht	13582 / 68	23250 / 117	23,0 / 0,92	1,47
Strukturschicht mit 2. Harzschicht *	16994 / 85	21298 / 107	9,0 / 0,36	1,17
Strukturschicht mit 3. Harzschicht **	14096 / 71	21358 / 107	20,7 / 0,83	1,42
Strukturschicht mit 4. Harzschicht	10843 / 55	24001 / 121	36,9 / 1,48	1,83

Tabelle 8: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an Liner 4

E-Modul der Strukturschicht ohne vorhandene äußere Harzschicht von Liner 4 $E_{Str} = 19882 \text{ MPa}$

* Schicht 2 ist durch Abfeilen von Schicht 1 entstanden.

** Schicht 3 ist durch Aufbringen einer weiteren Harzschicht auf Schicht 2 entstanden

Ergebnisse der E-Modulbestimmung an Liner 5

	E-Modul bei Prüfung mit äußerer Harzschicht [MPa] / [%]	E-Modul bei rechnerischem Abzug der äußeren Harzschicht ohne zu schleifen [MPa] / [%]	Harzschicht-Dicke [%] / [mm]	Faktor
Strukturschicht mit 1. Harzschicht	11299 / 68	20848 / 125	26,4 / 0,89	1,49
Strukturschicht mit 2. Harzschicht *	11594 / 69	19468 / 117	19,3 / 0,65	1,44
Strukturschicht mit 3. Harzschicht **	9576 / 57	22498 / 135	40,7 / 1,39	1,75
Strukturschicht mit 4. Harzschicht	8466 / 51	26503 / 159	49,3 / 1,69	1,97
Strukturschicht mit 5. Harzschicht	8149 / 49	28492 / 171	56,5 / 1,94	2,05

Tabelle 9: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an Liner 5

E-Modul der Strukturschicht ohne vorhandene äußere Harzschicht von Liner 5 $E_{Str} = 16699 \text{ MPa}$

* Schicht 2 ist durch Abfeilen von Schicht 1 entstanden.

** Schicht 3 ist durch Aufbringen einer weiteren Harzschicht auf Schicht 2 entstanden

7.1.4.2 Ergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 14126 an planaren Proben

Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse der E-Modulbestimmung an der Glasfaserplatte. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte, die sich aus je fünf Einzelmessungen ergeben. Es wurden vier Serien je fünf Probekörpern geprüft, auf die unterschiedlich dicke Harzschichten aufgebracht wurden.

Ergebnisse der E-Modulbestimmung an der Glasfaserplatte

	E-Modul bei Prüfung mit äußerer Harzschicht [MPa] / [%]	E-Modul bei rechnerischem Abzug der äußeren Harzschicht ohne zu schleifen [MPa] / [%]	E-Modul der Strukturschicht [MPa]	Harzschicht-Dicke [%] / [mm]	Faktor
Strukturschicht mit 1. Harzschicht (Serie 1)	5916 / 85	8116 / 117	6939	11,0 / 0,41	1,17
Strukturschicht mit 2. Harzschicht (Serie 2)	5300 / 78	11641 / 171	6813	31,0 / 1,15	1,29
Strukturschicht mit 3. Harzschicht (Serie 3)	4931 / 73	12299 / 181	6782	39,0 / 1,45	1,38
Strukturschicht mit 4. Harzschicht (Serie 4)	4930 / 70	14257 / 202	7045	43,1 / 1,61	1,43

Tabelle 10: Ergebnisse (Mittelwerte) der E-Modulbestimmung an der Glasfaserplatte

7.1.4.3 Ergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 178 an Harzproben

Die mechanischen Eigenschaften von dem auf die Laborproben aufgetragenen Harz (VUP 4714 BET) wurden mittels 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 178 geprüft. Die Tabelle 11 zeigt die ermittelten Ergebnisse dieses Versuchs.

Messungsnr.	E-Modul [MPa]	σ_b [N/mm ²]	ϵ_b [%]
1	3628	90,5	2,45
2	3593	121,9	3,70
3	3557	110,1	3,21
4	3469	126,8	4,15
5	3491	81,4	2,25
x	3548	106,1	3,15

Tabelle 11: Ergebnisse der E-Modulbestimmung am aufgetragenen Harz

7.1.4.4 Ergebnisse des Abreißversuchs nach DIN EN ISO 4624 an Labor-Linerproben

Tabelle 12 zeigt die ermittelten Ergebnisse des Abreißversuchs, der exemplarisch an Liner 5 durchgeführt worden ist, um die Qualität der Verbindung zwischen aufgetragener Harzschicht und Strukturschicht zu bewerten.

Messungsnr.	σ_{max} [N/mm ²]	F_{max} [N]
1	4,66	5798,79
2	3,44	3644,55
3	4,11	4909,61
4	4,06	4581,32
5	3,83	4086,19
6	4,7	5448,81
x	4,13	4744,88

Tabelle 12: Ergebnisse des Abreißversuchs nach DIN EN ISO 4624

7.1.5 Bewertung der Ergebnisse der Laborproben

7.1.5.1 Bewertung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Labor-Linerproben

Diagramm 1 zeigt den Einfluss von verschiedenen Reinharzschichtdicken auf die verwendeten Liner. Hierfür wurden die rechnerisch ermittelten Faktoren (Einzelwerte – nicht Mittelwerte) in Abhängigkeit von der äußeren Harzschichtdicke dargestellt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde festgestellt, dass der Einfluss von Reinharzschichten erhebliche Auswirkungen auf den ermittelten E-Modul der Strukturschicht hat.

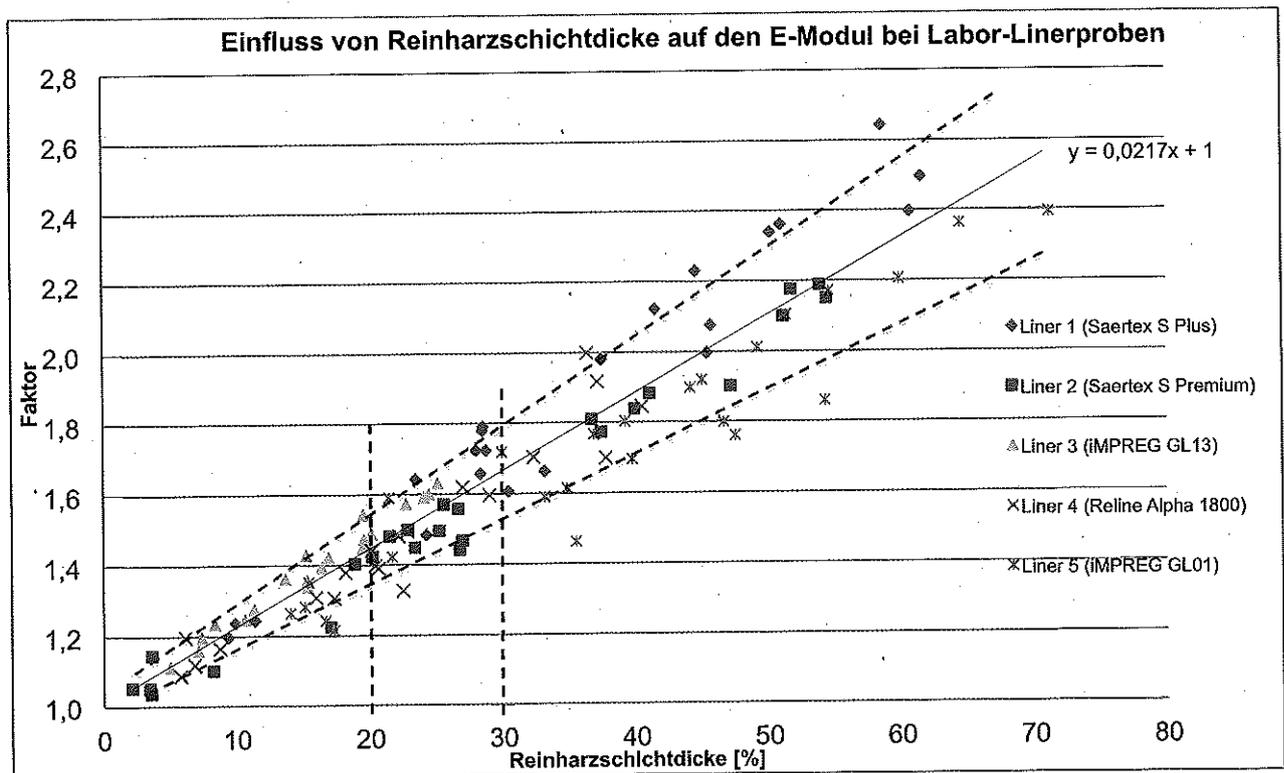


Diagramm 1: Einfluss der Reinharzschichtdicke auf den E-Modul DIN EN ISO 11296-4

Es ist ein deutlicher linearer Zusammenhang zwischen der äußeren Reinharzschichtdicke und dem errechneten Faktor zu erkennen. Bei Reinharzschichtdicken von 20 % kann der Faktor 1,43 (Toleranz von $\pm 5\%$ des Faktors) und bei Reinharzschichtdicke von 30 % der Faktor 1,65 (Toleranz von $\pm 10\%$ des Faktors) angewendet werden. Die Genauigkeit der Endergebnisse nimmt bei zunehmender Reinharzschichtdicke durch die zunehmende Streuung der Faktoren ab. Bei Reinharzschichtdicken, die größer sind als 30 % liegt die Streuung der Faktoren bei über $\pm 10\%$, wodurch die Aussagesicherheit durch Abtrag der Reinharzschicht genauer wird. Die Funktion (11) beschreibt die Faktorbestimmung.

$$y(x) = 0,0217x + 1 \quad (11)$$

Bei normativem Vorgehen, also rechnerischem Abzug der physikalisch vorhandenen äußeren Harzschicht, entsteht eine Fehlbewertung der Strukturschicht, die zu einer Überbewertung des E-Moduls führt. Dabei zeichnet sich ab, dass diese Fehlbewertung bei rechnerischem Abzug der Reinharzschichtdicke abhängig von der Dicke, dem Aufbau der Strukturschicht und dem Durchmesser des Liners ist. Beispielsweise hat Liner 5 die kleinste Verbundwanddicke ($e_m = 3,47 \text{ mm}$), einen kleinen Durchmesser ($DN = 400 \text{ mm}$) und ist achtlagig aufgebaut, wodurch er bei 20 prozentiger Reinharzschichtdicke die größte Überbewertung des E-Moduls der Strukturschicht von 22 % aufweist. Liner 3 hingegen hat die größte Verbundwanddicke ($e_m = 8,63 \text{ mm}$), den größten Durchmesser ($DN = 600 \text{ mm}$) und einen 16-lagigen Wandaufbau und weist bei 20 prozentiger Reinharzschichtdicke die geringste Überbewertung des E-Moduls der Strukturschicht von 9 % auf. Diagramm 2 zeigt die entstehende Überbewertung des E-Moduls, der verwendeten Schlauchlinerproben.

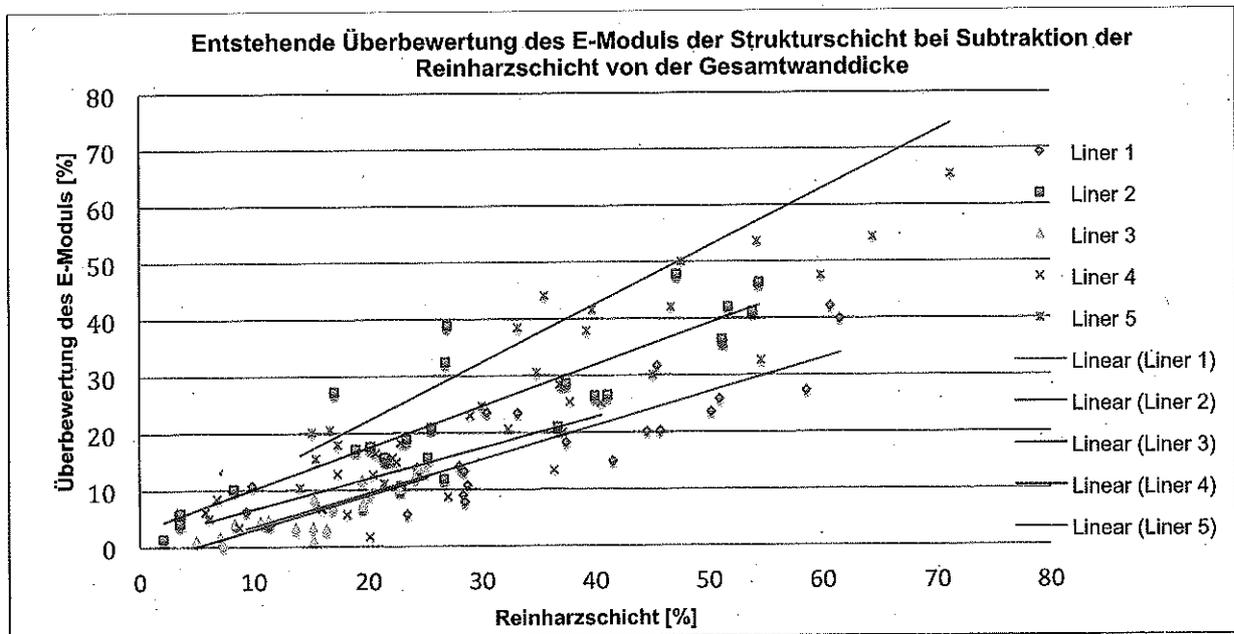


Diagramm 2: Entstehende Überbewertung der Strukturschicht bei Subtraktion der Reinharzschichtdicke von der Gesamtwanddicke

7.1.5.2 Bewertung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 14126 an planaren Glasfaserproben

Der Vergleich zwischen den durchgeführten Versuchen an gekrümmten und planaren Proben zeigt, dass die Krümmung der Proben deutlichen Einfluss auf die E-Modulbestimmung hat. In Diagramm 3 wird die Faktorermittlung an Glasfaserplatten beschrieben. An der in Diagramm 3 angegebenen Formel zur Faktorermittlung an Glasfaserplatten ist deutlich zu erkennen, dass die berechneten Faktoren im Vergleich zu den berechneten Faktoren der gekrümmten Proben kleiner sind. So unterscheiden sich die Faktoren bei einer Reinharzschichtdicke von beispielsweise 20 % um 14 %. Bei zunehmender Reinharzschichtdicke wird der Unterschied zwischen den Faktoren größer, so liegt er bei einer Reinharzschichtdicke von 50 % schon bei 30 %. Zugleich ist die entstehende Überbewertung der Strukturschicht bei rechnerischem Abzug der äußeren Reinharzschicht durch die geringe Wanddicke und den nur fünfplagigen Wandaufbau der Glasfaserplatte größer als bei gekrümmten Proben gleicher Wanddicke. Deswegen können diese Ergebnisse nicht auf gekrümmte Schlauchlinerproben bezogen werden. Die Funktion $y(x) = 0,0079x + 1,0744$ beschreibt die Faktorermittlung.

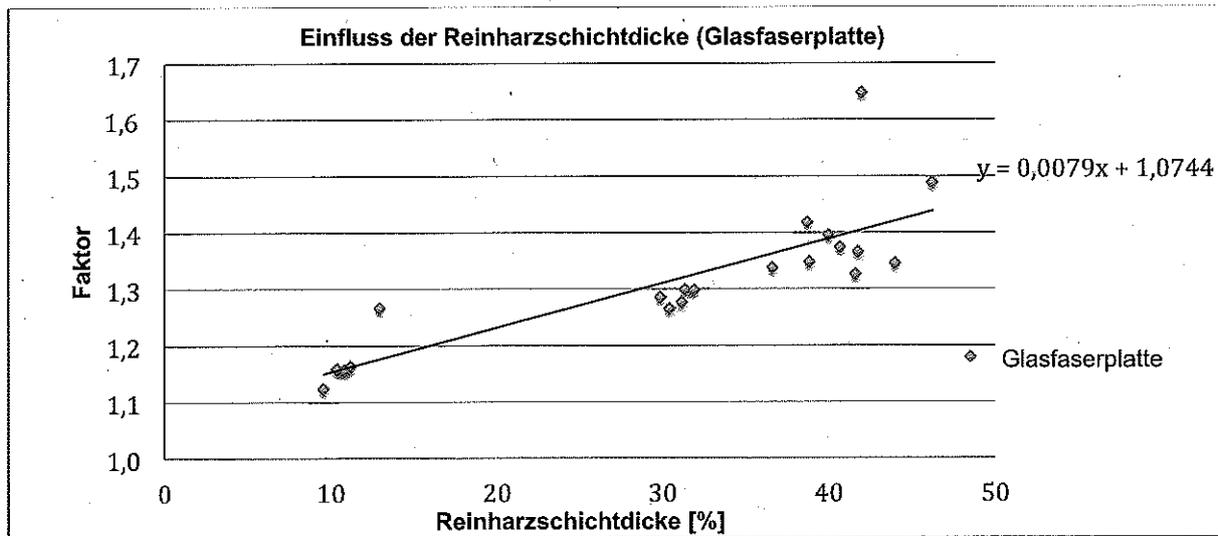


Diagramm 3: Einfluss der Reinharzschichtdicke auf den E-Modul bei planaren Proben DIN EN ISO 14126

7.1.5.3 Bewertung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 178 an Harzproben

Das Prüfen der Harzproben nach DIN EN ISO 178 hat ergeben, dass das verwendete Harz den Anforderungen für ein typisches Matrixmaterial für Schlauchliner entspricht:

	E-Modul [MPa]	Biegespannung [$\frac{N}{mm^2}$]
Prüfung DIN EN ISO 178	3548	106,1
Datenblatt	3400	115

Tabelle 13: Vergleich der Kennwerte des verwendeten Harzes VUP 4714 BET

7.1.5.4 Bewertung des Abreißversuchs nach DIN EN ISO 4624 an Labor-Linerproben

Die Haftfestigkeit des Liners 5 liegt im Mittel bei $4,13 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Gemäß DIN 18820 Teil 2 wird ein Richtwert für die interlaminaire Zugfestigkeit (Stirnzugfestigkeit) von $4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ angesetzt, der hier erreicht wurde. Da die Vorgehensweise der Harzaufbringung bei allen Proben identisch ist, kann das Ergebnis von Liner 5 (aus sechs Prüfungen) auf alle anderen geprüften Proben übertragen werden. Zusätzlich zeigt Abbildung 39 den Probekörper nach der Prüfung. Es ist ein deutliches interlaminares Versagen in der Strukturschicht zu erkennen. Dies lässt darauf schließen, dass die Haftfestigkeit zwischen Laminat und aufgebracht Harzschicht höher ist als $4,13 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Diese Untersuchung zeigt, dass äußere Harzschichten mit der Strukturschicht einen normativen Verbund eingehen und die normativen Mindestanforderungen für die interlaminaire Festigkeit zwischen den beiden Schichten erfüllt werden.

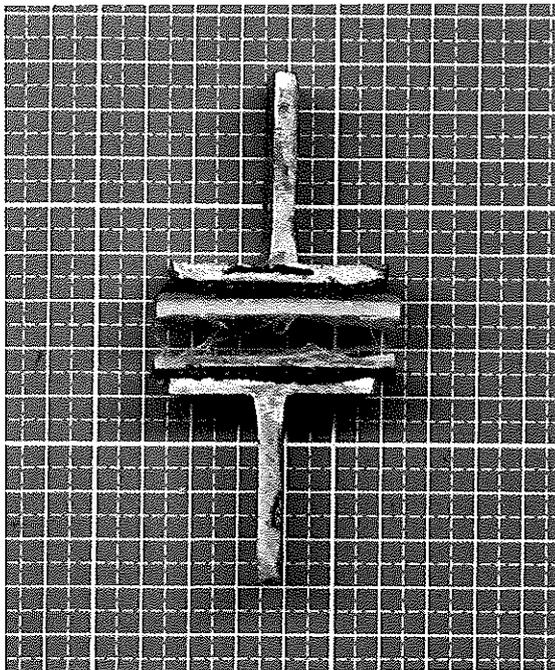


Abbildung 39: Interlaminares Versagen in der Strukturschicht der Abreißprobe

7.2 Ermittlung des Einflusses von äußeren Harzschichten an Baustellenproben

Um den Einfluss von äußeren Reinharzschichten an Proben aus der Praxis zu untersuchen, wurden Baustellenproben mittels 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 geprüft. Anschließend wurde ermittelt, ob die Ergebnisse aus den Untersuchungen an den Laborproben auf die Baustellenproben übertragbar sind.

7.2.1 Materialproben

Die Untersuchung wurde an sechs Schlauchlinerausschnitten durchgeführt, die äußere Reinharzschichten aufwiesen. Da es sich hierbei um Baustellenproben von verschiedenen Herstellern und Bauprojekten handelt, ist der Bezug zum praktischen Prüfalltag hergestellt. Die Tabelle 14 listet die verwendeten Schlauchlinerproben auf und zeigt ihre Kennwerte gemäß Zulassung.

	Schlauchliner Typ	Kurzzeit Biege (Zulassungswert) [MPa]	E-Modul	Kurzzeit Biegespannung (Zulassungswert) [MPa]
Liner Nr. 1	Berolina	8700		150
Liner Nr. 2	Berolina	8700		150
Liner Nr. 3	Berolina	8700		150
Liner Nr. 4	iMPREG GL13	14000		240
Liner Nr. 5	iMPREG GL13	14000		240
Liner Nr. 6	iMPREG GL13	14000		240

Tabelle 14: Verwendete Baustellenproben für den 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 11296-4

7.2.2 Versuchsdurchführung an Baustellenproben

7.2.2.1 Versuchsdurchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Baustellenproben

Um eine Bewertung des Einflusses von äußeren Reinharzschichten an Baustellenproben aus der Praxis durchführen zu können, wurden die Proben wie unter Kapitel 7.1.3.3 (Versuchsdurchführung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Labor-Linerproben) durchgeführt. Da die Proben äußere Reinharzschichten aufwiesen, wurde im ersten Schritt der E-Modul der Strukturschicht mit äußerer Reinharzschicht und mit Subtraktion der äußeren Reinharzschicht von der Gesamtwanddicke bei der Verbundwanddickenbestimmung, durch das Anfahren des E-Moduls bestimmt. Im zweiten Schritt wurde die physikalisch vorhandene äußere Reinharzschicht, vorsichtig mit einer Feile und Schleifpapier von der Strukturschicht entfernt um den Kennwert der eigentlichen Tragstruktur zu bestimmen. Wie unter Kapitel 7.1.3.3 wurde ein Faktor ermittelt, der den Einfluss der äußeren Harzschicht auf die Kennwertermittlung der Strukturschicht beschreibt.

$$\text{Faktor} = \frac{\text{E – Modul der Strukturschicht [MPa]}}{\text{E – Modul ohne rechnerischen Abzug der äußeren Harzschicht [MPa]}}$$

7.2.3 Ergebnisse der Kennwertermittlung an Baustellenproben

7.2.3.1 Ergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Baustellenproben

Die Ergebnisse der E-Modulermittlung an den Baustellenproben werden in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Liner Nr.	E-Modul Prüfung äußerer Harzsicht [MPa] / bei mit [%]	E-Modul bei Subtraktion der äußeren Harzsicht ohne zu schleifen [MPa] / [%]	E-Modul der Strukturschicht [MPa]	Harzsicht-Dicke [mm] / [%]	DN [mm]	Faktor
1	8082 / 54	23350 / 155	15086	41,0 / 1,65	200	1,87
2	12962 / 60	25866 / 119	21664	32,0 / 1,31	400	1,67
3	6670 / 61	13850 / 127	10942	24,0 / 1,09	300	1,64
4	11879 / 63	21115 / 111	19004	22,9 / 1,44	1000	1,60
5	11139 / 64	22348 / 128	17486	20,6 / 1,37	1000	1,57
6	16517 / 80	21867 / 106	20605	12,4 / 0,94	1000	1,25

Tabelle 15: Ergebnisse der verwendeten Baustellenproben

7.2.4 Bewertung der Ergebnisse der Prüfung von Baustellenproben

7.2.4.1 Bewertung des 3-Punkt-Biegeversuchs nach DIN EN ISO 11296-4 an Baustellenproben

Diagramm 16 zeigt den Vergleich der Faktoren, ermittelt anhand der Baustellenproben-Untersuchung und der rechnerischen Untersuchung mittels Formel (11). Es ist deutlich zu erkennen, dass die errechneten Faktoren mit einer Genauigkeit von 96 % zutreffen.

Liner Nr.	Harzsicht-Dicke [%]	Faktor der Baustellenproben mittels Prüfung bestimmt	Faktor ermittelt anhand der Harzsichtdicke in % mithilfe von Formel (11)
1	41,0	1,87	1,89
2	32,0	1,67	1,69
3	24,0	1,64	1,52
4	22,9	1,60	1,50
5	20,6	1,57	1,45
6	12,4	1,25	1,27

Tabelle 16: Gegenüberstellung der unterschiedlich ermittelten Faktoren

Die Baustellenproben werden mit äußerer Harzschicht so geprüft, dass die Harzschicht zum tragenden Laminat gezählt wird. Im Anschluss wird der ermittelte E-Modul mit dem rechnerisch ermittelten Faktor aus Tabelle 16 multipliziert. Tabelle 17 zeigt eine Gegenüberstellung der ermittelten E-Moduln durch Abschleifen der Reinharzschicht und durch Bewertung mittels Faktor:

Liner Nr.	E-Modul der Strukturschicht durch Abtrag der Reinharzschicht bestimmt [MPa]	E-Modul der Strukturschicht mithilfe des aus Formel (11) errechneten Faktors bestimmt [MPa]
1	15086	15275
2	21664	21906
3	10942	10138
4	19004	17819
5	17486	16152
6	20605	20977

Tabelle 17: Anwendung des Faktors auf Baustellenproben

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der E-Modulbestimmung an den Laborproben auf die Baustellenproben übertragbar sind und die, mit dem Faktor aus Formel (11), rechnerisch ermittelten E-Moduln eine Abweichung von 4 % aufweisen. Diese Abweichung kann als gering eingeschätzt werden. Mithilfe dieses Vorgehens muss der Probekörper bei äußeren Reinharzschichten < 30 % nicht mehr aufwendig präpariert oder verworfen werden. Somit ist eine Bewertung von Baustellenproben mit äußeren Harzschichten unter Anwendung dieses schichtdickenabhängigen Faktors möglich.

7.3 Analytische Kennwertermittlung

7.3.1 Kennwertermittlung mittels klassischer Laminattheorie

Um die messtechnischen Ergebnisse aus den 3-Punkt-Biegeversuchen zu verifizieren wurde eine Berechnung nach klassischer Laminattheorie durchgeführt. Hierfür wurden die auftretenden gemittelten, im Verbund wirkenden Spannungen mithilfe der Dehnungen und Steifigkeitskoeffizienten bestimmt. Diese Spannungen wurden zu einer Vergleichsspannung zusammengefasst, mit der der E-Modul des Verbundes mit äußerer Harzschicht bestimmt werden kann. Die Formeln (12) zeigen das Elastizitätsgesetz des Mehrschichtverbundes, mit welchem die gemittelten, im Verbund wirkenden Spannungen berechnet werden können. Abbildung 40 zeigt das zugrunde gelegte Koordinatensystem mit den entsprechenden Bezeichnungen.

$$\begin{aligned}
 \bar{\sigma}_1 &= \bar{\varepsilon}_1 * \sum_{K=1}^N Q_{11k} * \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 * \sum_{K=1}^N Q_{12k} * \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} * \sum_{K=1}^N Q_{16k} * \frac{t_k}{t} \\
 \bar{\sigma}_2 &= \bar{\varepsilon}_1 * \sum_{K=1}^N Q_{16k} * \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 * \sum_{K=1}^N Q_{26k} * \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} * \sum_{K=1}^N Q_{66k} * \frac{t_k}{t} \\
 \bar{\tau}_{12} &= \bar{\varepsilon}_1 * \sum_{K=1}^N Q_{16k} * \frac{t_k}{t} + \bar{\varepsilon}_2 * \sum_{K=1}^N Q_{26k} * \frac{t_k}{t} + \bar{\gamma}_{12} * \sum_{K=1}^N Q_{66k} * \frac{t_k}{t}
 \end{aligned} \tag{12}$$

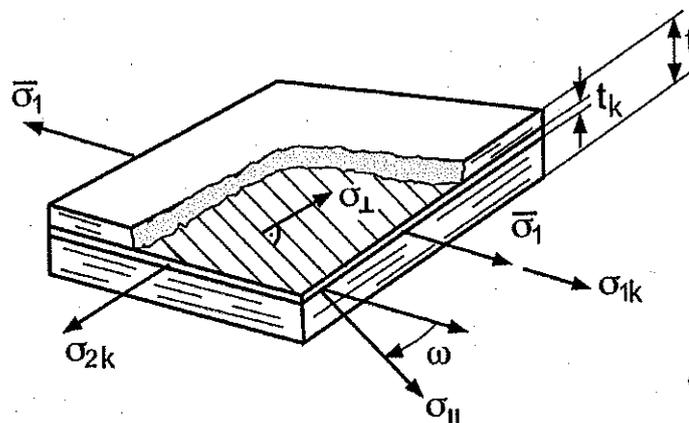


Abbildung 40: Koordinatensystem und Bezeichnungen für die Berechnung mit klassischer Laminattheorie [4.1]

Die Koeffizienten der Verzerrungen charakterisieren die Steifigkeiten des Gesamtlaminates, wodurch das Übertragungsgesetz abgeleitet werden kann:

„Jedes Element der Steifigkeitsmatrix des Mehrschichtverbundes ist gleich der Summe der zugehörigen Steifigkeiten der Einzelschichten“ [4.1].

Mithilfe der Gestaltänderungshypothese nach von Mises (13) wird aus den gemittelten Spannungen (12) die Vergleichsspannung gebildet.

$$\sigma_V = \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 - \bar{\sigma}_1 * \bar{\sigma}_2 + 3 * \bar{\tau}_{12}^2} \quad (13)$$

Der E-Modul des gesamten Verbundes wird anschließend mit Formel (14) berechnet.

$$E = \frac{\sigma_V}{\varepsilon_{ges}} \quad (14)$$

Die Gesamtverformung ε_{ges} kann aus den praktischen 3-Punkt-Biegeversuchen gewonnen werden. Die Steifigkeitskoeffizienten Q_{iik} sind abhängig von dem Wandaufbau des Verbundes. Dabei steht das „k“ im Index für die k-te Schicht und die „ii“ für das Element der jeweiligen Steifigkeitsmatrix der expliziten Schicht. So wird in unidirektional verstärkte Schichten, Wirrfaserschichten und Geweben im Schlauchlining-Bereich unterteilt. Die äußere Harzschicht wird als isotroper Werkstoff betrachtet, der gleiche Eigenschaften in alle Richtungen aufweist. Die folgenden Matrizen stellen die Steifigkeitskoeffizienten der jeweiligen Schichten dar:

Äußere Harzschicht:

$$Q_H = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & -\frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (15)$$

Unidirektional verstärkte Schicht (UD):

$$Q_{UD} = \begin{bmatrix} \frac{E_{||}}{1-\nu_{||\perp} * \nu_{\perp||}} & \frac{\nu_{||\perp} * E_{||}}{1-\nu_{||\perp} * \nu_{\perp||}} & 0 \\ \frac{\nu_{||\perp} * E_{||}}{1-\nu_{||\perp} * \nu_{\perp||}} & \frac{E_{\perp}}{1-\nu_{||\perp} * \nu_{\perp||}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{||\perp} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Dabei bedeuten die Indizes || parallel zur Faser, \perp senkrecht zur Faser und $||\perp$ gleichzeitig parallel und senkrecht zur Faser (beispielsweise Schub). Der erste Index gibt die Richtung der Eigenschaft an und der zweite die Richtung der Ursache.

Wirrfaserschicht:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} = \bar{Q}_{22} &= \frac{2}{3} * (Q_{110} + Q_{220}) + \frac{1}{4} * (Q_{120} + 2 * Q_{660}) \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{110} + Q_{220} - 4 * Q_{660}) * \frac{1}{8} + \frac{3}{4} * Q_{120} \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{110} + Q_{220} - 2 * Q_{120}) * \frac{1}{8} + \frac{1}{2} * Q_{660} \\ \bar{Q}_{16} = \bar{Q}_{26} &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Der Index 0 steht für die Komponenten der Steifigkeitsmatrix der unidirektional verstärkten Schicht. Somit werden nach Gottfried W. Ehrenstein die Steifigkeitskoeffizienten der unidirektional verstärkten Schicht verwendet um die Steifigkeitskoeffizienten der Wirrfaserschicht zu bestimmen.

Gewebe:

Die Gewebeschicht wird nach Gottfried W. Ehrenstein als Kreuzverbund aus zwei senkrecht zueinander orientierten UD-Schichten modelliert. Dabei verlaufen im Gewebe die Fasern wellenartig, welches die Steifigkeit und Festigkeit bei Glasfasern um etwa 2–5% gegenüber geraden Fasern reduziert [4.6].

$$\begin{aligned}
 \bar{Q}_{11} &= \frac{t_1}{t} * \frac{E_{||}^{(1)}}{D_1} + \frac{t_2}{t} * \frac{E_{\perp}^{(2)}}{D_2} \\
 \bar{Q}_{22} &= \frac{t_1}{t} * \frac{E_{\perp}^{(1)}}{D_1} + \frac{t_2}{t} * \frac{E_{||}^{(2)}}{D_2} \\
 \bar{Q}_{12} &= \frac{t_1}{t} * \frac{v_{||\perp}^{(1)} E_{\perp}^{(1)}}{D_1} + \frac{t_2}{t} * \frac{v_{\perp||}^{(2)} E_{||}^{(2)}}{D_2} \\
 \bar{Q}_{66} &= \frac{t_1}{t} * G_{||\perp}^{(1)} + \frac{t_2}{t} * G_{||\perp}^{(2)} \\
 \bar{Q}_{16} &= \bar{Q}_{26} = 0
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\text{mit } D_1 = 1 - v_{||\perp}^{(1)} * v_{\perp||}^{(1)} \text{ und } D_2 = 1 - v_{||\perp}^{(2)} * v_{\perp||}^{(2)}$$

Die Exponenten ⁽¹⁾ und ⁽²⁾ stehen für die beiden unidirektional verstärkten Schichten. Sind beide UD-Schichten identisch, lassen sich die Formeln aus (16) weiter vereinfachen:

$$\begin{aligned}
 \bar{Q}_{11} &= \frac{1}{2 * D} * (E_{||} + E_{\perp}) = \bar{Q}_{22} \\
 \bar{Q}_{12} &= \frac{v_{||\perp} * E_{\perp}}{D} \\
 \bar{Q}_{66} &= G_{||\perp} \\
 \bar{Q}_{16} &= \bar{Q}_{26} = 0 \\
 \text{mit } D &= 1 - v_{||\perp} * v_{\perp||}
 \end{aligned} \tag{19}$$

Anhand des Schlauchliners 5 wird beispielhaft in Abbildung 41 gezeigt, wie dick die einzelnen Glasfaserlagen in diesem Produkt sein können. Die Dicke der einzelnen Lagen ist auch von den Einbaubedingungen auf der Baustelle abhängig und kann beispielsweise durch Imperfektionen des Altrohrs beeinflusst werden.

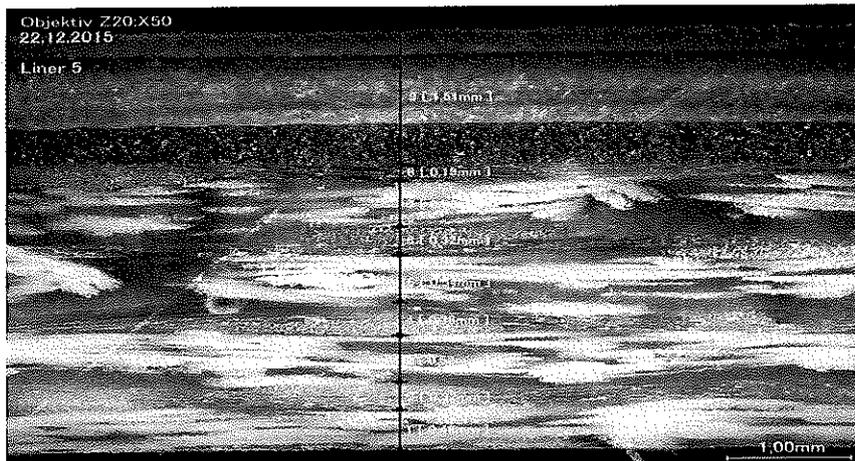


Abbildung 41: Dickenbestimmung der einzelnen Lagen an Liner 5

7.3.1.1 Beispielrechnung der klassischen Laminattheorie an Liner 5

Es wird eine exemplarische Beispielrechnung an Liner 5 durchgeführt, die die Vorgehensweise der Berechnung mittels klassischer Laminattheorie verdeutlichen und das Ergebnis aus dem 3-Punkt-Biegeversuch verifizieren soll. Liner 5 hat eine Strukturschichtdicke von $t_{\text{Str}} = 3,47 \text{ mm}$ und eine äußere Harzschichtdicke, nach der dritten aufgetragenen Harzlage, von $t_{\text{H}} = 1,38 \text{ mm}$. Es ergibt sich eine Gesamtwanddicke von $t = 4,85 \text{ mm}$. Dieser Liner weist einen symmetrischen Wandaufbau auf und besteht mit der äußeren Harzschicht aus neun Lagen. Da die orthotropen Kennwerte der einzelnen Glasfaserlagen unbekannt sind, wird von einer Modellvorstellung eines Zweischichtverbundes aus Strukturschicht und Harzschicht ausgegangen, um den entstehenden Fehler der Abschätzung der orthotropen Kennwerte klein zu halten. Für die Berechnung der Strukturschicht werden die Formeln der Wirrfaserschicht verwendet, da diese die nötigen Randbedingungen und die Berücksichtigung der orthotropen Materialeigenschaften der ganzen Strukturschicht beschreiben. Im ersten Schritt der Berechnung werden alle erforderlichen Kennwerte definiert:

Experimentell ermittelte Werte an der Strukturschicht:

$$E_{\parallel} = 16699 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{1S} = 0,864 \%$$

Abgeschätzte Werte an der Strukturschicht:

$$E_{\perp} = \frac{1}{3} * E_{\parallel} = 5566,3 \text{ MPa}$$

$$\nu_{\parallel\perp} = 0,2$$

$$\varepsilon_{2S} = 0 \%$$

Wegen der nur sehr geringen Schubbeeinflüsse in der 3-Punkt-Biegung ist $\gamma_{12s} = 0,2$

Rechnerisch ermittelte Werte an der Strukturschicht:

Nach der Maxwell-Betti-Beziehung $E_{\perp}v_{\perp||} = E_{||}v_{||\perp}$ ergibt sich $v_{\perp||} = \frac{v_{||\perp} \cdot E_{\perp}}{E_{||}} = 0,0667$

$$G_{||\perp} = \frac{E_{||}}{2 * (1 + v_{||\perp})} = 6957,9 \text{ MPa}$$

Experimentell ermittelte Werte an der Harzschicht:

$$E = 3548 \text{ MPa}$$

Abgeschätzte Werte an der Harzschicht:

$$\nu = 0,3$$

Rechnerisch ermittelte Werte an der Harzschicht:

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)} = 1364,6 \text{ MPa}$$

Da davon ausgegangen wird, dass sich alle Schichten in alle Richtungen der Koordinatenachsen gleich verformen, gilt für die gemittelten Verformungen:

$$\bar{\epsilon}_1 = \epsilon_{1s}$$

$$\bar{\epsilon}_2 = \epsilon_{2s}$$

$$\bar{\gamma}_{12} = \gamma_{12s}$$

Die Strukturschicht wird in der Modellvorstellung als eine Komponente betrachtet. Die Komponenten der Steifigkeitsmatrix der Strukturschicht ergeben sich aus (17) zu:

$$\bar{Q}_{11} = \bar{Q}_{22} = 12787,5 \text{ MPa}$$

$$\bar{Q}_{12} = 1880,5 \text{ MPa}$$

$$\bar{Q}_{66} = 5453,5 \text{ MPa}$$

$$\bar{Q}_{16} = \bar{Q}_{26} = 0 \text{ MPa}$$

Aus (15) ergeben sich die Komponenten der Steifigkeitsmatrix der äußeren Reinharzschicht:

$$Q_H = \begin{bmatrix} 3898,9 & -1169,7 & 0 \\ 0 & 3898,9 & 0 \\ 0 & 0 & 1364,6 \end{bmatrix} [\text{MPa}]$$

Aus (12) ergeben sich die gemittelten im Verbund wirkenden Spannungen:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_1 &= 0,846 * \left(12787,5 \text{ MPa} * \frac{3,47 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} + 3898,9 \text{ MPa} * \frac{1,38 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} \right) + 0 \\ &\quad * \left(1880,5 \text{ MPa} * \frac{3,47 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} - 1169,7 \text{ MPa} * \frac{1,38 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} \right) + 0,2 \\ &\quad * \left(0 \text{ MPa} * \frac{3,47 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} + 0 * \frac{1,38 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} \right) = 8863,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_2 &= 0,846 * \left(0 \text{ MPa} * \frac{3,47 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} + 0 \text{ MPa} * \frac{1,38 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} \right) + 0 \\ &\quad * \left(0 \text{ MPa} * \frac{3,47 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} + 0 \text{ MPa} * \frac{1,38 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} \right) + 0,2 \\ &\quad * \left(5453,5 \text{ MPa} * \frac{3,47 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} + 1364,6 * \frac{1,38 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} \right) = 780,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\tau}_{12} &= 0,846 * \left(0 \text{ MPa} * \frac{3,47 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} + 0 \text{ MPa} * \frac{1,38 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} \right) + 0 \\ &\quad * \left(0 \text{ MPa} * \frac{3,47 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} + 0 \text{ MPa} * \frac{1,38 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} \right) + 0,2 \\ &\quad * \left(5453,5 \text{ MPa} * \frac{3,47 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} + 1364,6 \text{ MPa} * \frac{1,38 \text{ mm}}{4,85 \text{ mm}} \right) = 780,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\end{aligned}$$

Mit den mittleren im Verbund wirkenden Spannungen wird die Vergleichsspannung nach von Mises (13) berechnet:

$$\begin{aligned}\sigma_V &= \sqrt{\left(8863,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)^2 + \left(780,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)^2 - 8863,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} - 780,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} + 3 * \left(780,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)^2} \\ &= 8606,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\end{aligned}$$

Mit Formel (14) wird der Gesamt-E-Modul berechnet:

$$E = \frac{\sigma_V}{\varepsilon_{\text{ges}}} = \frac{8606,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{0,846} = 9961 \text{ MPa}$$

7.3.2 Kennwertermittlung mittels finiter Elemente Methode

Um Spannungen und Verformungen bei Belastung der Schlauchlinerprobe zu visualisieren wurde die finite Elemente Methode angewendet. Die verwendeten Programme sind „ANSYS Workbench R16.1 Academic“ und „CATIA V5 R19“. Zu Beginn wurde die Schlauchlinerprobe mit CATIA V5 R19 modelliert. Das Laminat und die äußere Harzschicht wurden in Einzelteilen erstellt (Part Design) und anschließend in eine Baugruppe überführt (Assembly Design). Dafür wurden die gemittelten Abmessungen des Liners Nr. 2 (Saertex S Premium) verwendet. Abbildung 42 zeigt die Modellierung der Probe in CATIA.

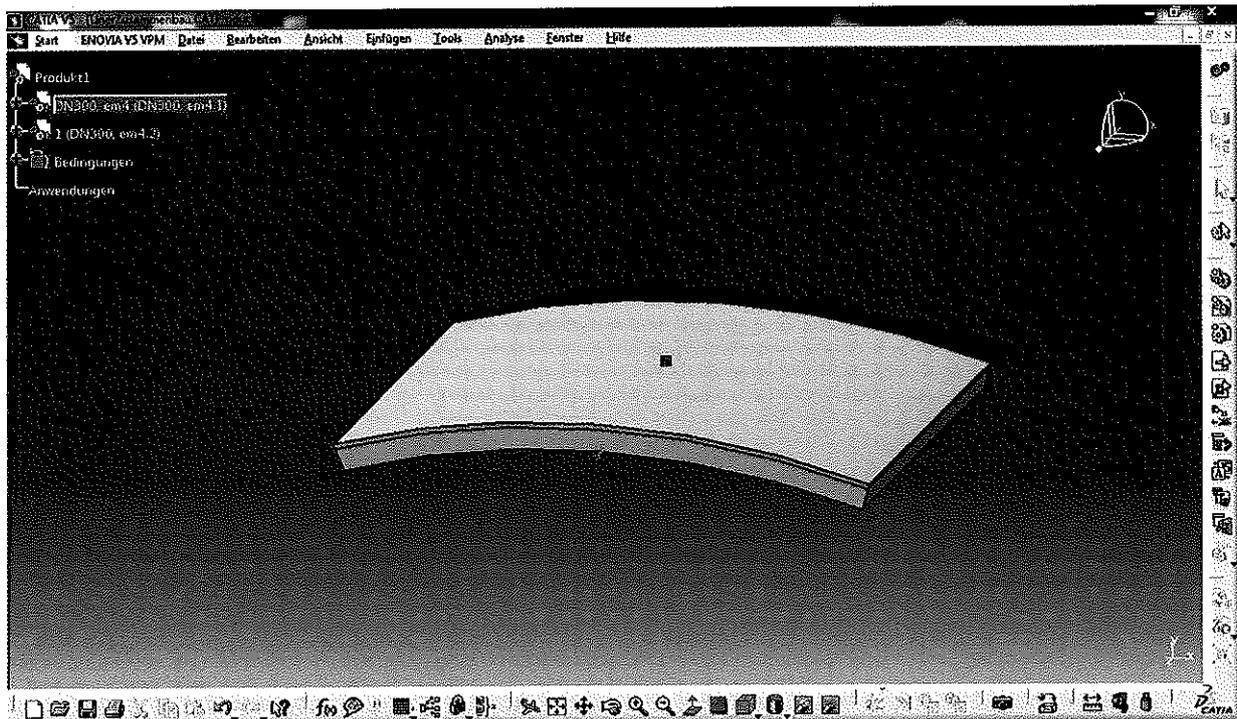


Abbildung 42: Zusammenbau in CATIA V5 R19

Nachdem die Schlauchlinerprobe in CATIA fertig modelliert wurde, wurde in ANSYS eine statisch strukturelle Analyse geöffnet. Zuerst werden unter „Technische Daten“ die Werkstoffe in ANSYS erstellt und in der Bibliothek abgespeichert. Dafür wurden die Materialdaten aus den zuvor durchgeführten Versuchen verwendet. Es wurde darauf geachtet, dass die Orthotropie der Strukturschicht nicht vernachlässigt wird. Hingegen wurde die äußere Harzschicht als isotropes Material angelegt. Die Geometrie des Bauteils wurde aus der CATIA Baugruppen-Datei verwendet und importiert. Nachdem die Geometrie importiert wurde, kann das Modell in ANSYS erstellt werden. Da es sich um keine komplexe Bauteilgeometrie handelt, werden Hexaederelemente für die Vernetzung gewählt. Die Kraft wird als Linienlast aufgebracht, die an ausgewählten Elementen angreift. Wie in der realen 3-Punkt-Biegung greift die Kraft linienförmig in der Mitte des Bauteils an und ist senkrecht zur Bauteiloberfläche

gerichtet. Die beiden Auflager werden auch linienförmig modelliert. Dabei werden wie bei der Lastaufbringung Elemente ausgewählt, an denen die Lagerung stattfinden soll. Somit wird auch sichergestellt, dass der Auflagerabstand normativ ist und in diesem Fall 74 mm beträgt. Die Abbildungen 43 und 44 verdeutlichen den Zusammenhang:

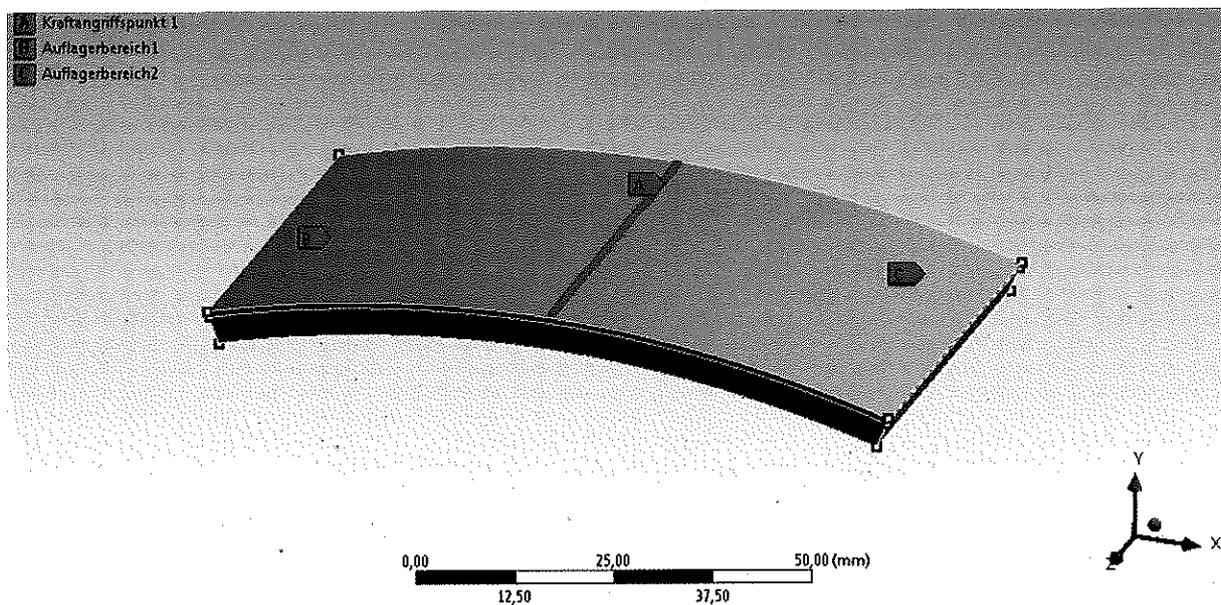


Abbildung 43: Kräfteinleitungsstelle ANSYS Workbench R16.1 Academic (Ansicht ISO)

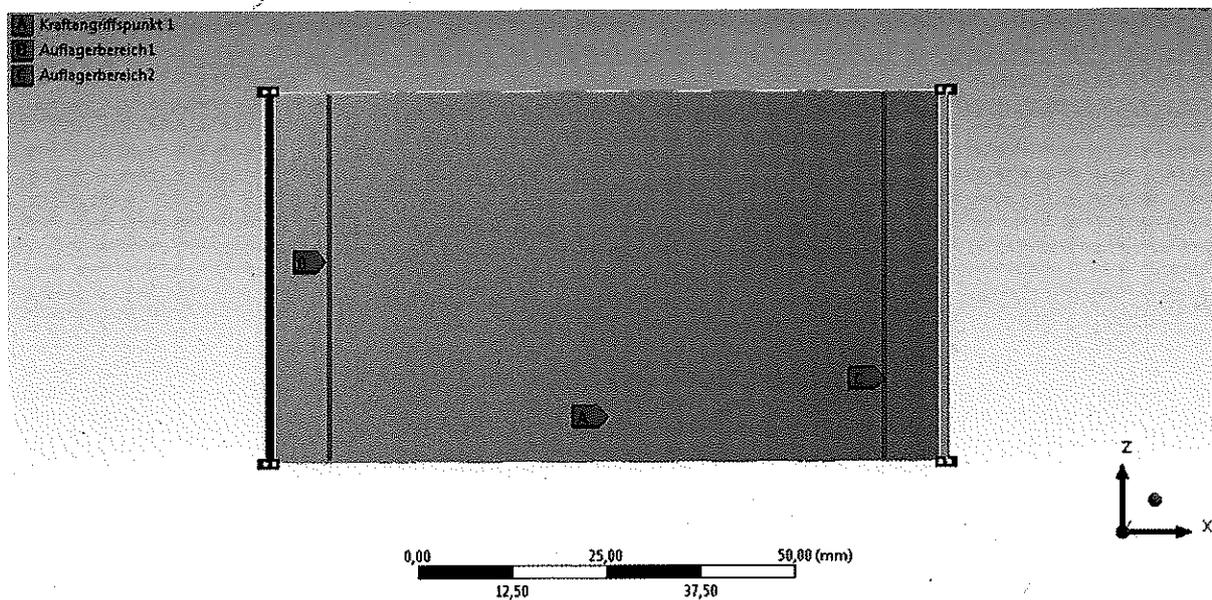


Abbildung 44: Auflagerstellen ANSYS Workbench R16.1 Academic (Ansicht von unten)

7.3.3 Ergebnisse der analytischen Kennwertermittlung

7.3.3.1 Ergebnisse der Kennwertermittlung mittels klassischer Laminattheorie und finiter Elemente Methode

Tabelle 18 zeigt die ermittelten Gesamt-E-Moduln aus der Berechnung mittels klassischer Laminat Theorie und der experimentellen E-Modulermittlung durch den 3-Punkt-Biegeversuch. Zwischen den beiden E-Moduln ist ein Unterschied von 385 MPa zu erkennen. Dieser Unterschied ist auf Fehlereinflüsse durch die abgeschätzten orthotropen Kennwerte und die Modellvorstellung des Zweischichtverbundes aus Strukturschicht und Harzschicht zurückzuführen.

Gesamt-E-Modul Biegeversuch [MPa]	mittels 3-Punkt-	Gesamt-E-Modul Theorie [MPa]	mittels klassischer Laminat Theorie [MPa]
9576		9961	

Tabelle 18: An Liner 5 mit klassischer Laminat Theorie und 3-Punkt-Biegeversuch ermittelte Gesamt-E-Moduln

Das Ergebnis der E-Modulermittlung mittels klassischer Laminattheorie ist in guter Übereinstimmung mit dem Ergebnis des praktischen 3-Punkt-Biegeversuchs. Tatsächlich liegt bei der Berechnung mittels klassischer Laminattheorie ein Mischmodul vor. Dabei findet die Position der äußeren Reinharzschicht keine Berücksichtigung. Hingegen geht die Berechnung mittels finiter Elemente Methode auf die einzelnen Schichten und die Position der äußeren Reinharzschicht ein. Aufgrund der fehlenden orthotropen Kennwerte der einzelnen Glasfaserlagen bei vorhandenen Imperfektionen (äußere Harzschicht) der Linerproben, würde eine Faktorermittlung mittels klassischer Laminattheorie und Finite-Elemente-Methode fehlerhaft werden. Deswegen wurde hier auf eine Faktorbestimmung verzichtet. Beispielhaft wurde Schlauchliner Nr. 2 mittels FEM berechnet, um die Spannungsverläufe und die Gesamtverformung zu visualisieren. In Abbildung 45 wird der Spannungsverlauf visualisiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die größten Spannungen (rot) in der Kraftereinleitungszone auftreten. Durch Randeffekte in der Kraftereinleitungszone, entstehen an den beiden Rändern erhöhte Spannungen.

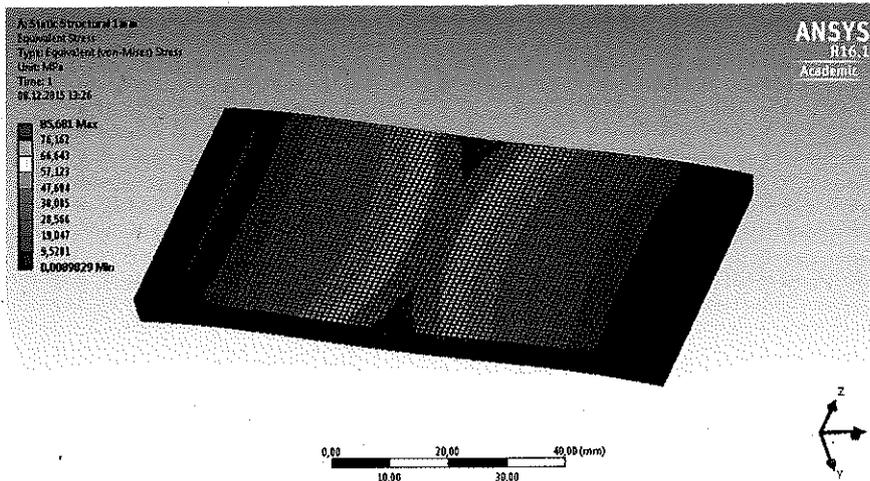


Abbildung 45: Visualisierung des Spannungsverlaufs von Liner 5 mittels finiter Elemente Methode

In Abbildung 46 ist die Gesamtverformung visualisiert. Die Schlauchlinerprobe verformt sich während des 3-Punkt-Biegeversuchs in der Kraftereinleitungszone am meisten. Die Verformung nimmt deutlich in Richtung der Auflagerpunkte ab.

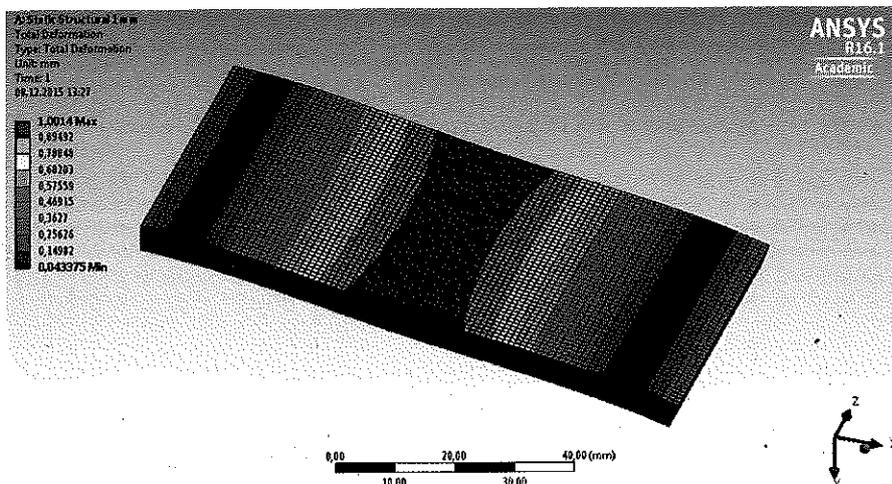


Abbildung 46: Visualisierung der Gesamtverformung an Liner 5 mittels finiter Elemente Methode

Abbildung 47 zeigt die Hauptspannungen der Probe im Querschnitt. Die obere Lage stellt die äußere Reinharzschicht dar. Unter ihr befindet sich die Strukturschicht. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die neutrale Faser (dunkelblau) in der Mitte der Gesamtwanddicke (h_m) befindet und nicht in der Mitte der Strukturschicht (e_m). Die Spannungsverläufe innerhalb der Harzschicht, gehen in die Strukturschicht über. Diese Spannungsverläufe stellen einen Kraftfluss über die äußere Harzschicht in die Strukturschicht dar. Es ist auffallend, dass die Grenzschicht zwischen Strukturschicht und äußerer Reinharzschicht keine Spannungsspitzen aufweist, wodurch die äußere Harzschicht zur E-Modul-Bestimmung mit

beiträgt und es zu keiner Ablösung durch Abplatzen der Reinharzschicht von der Strukturschicht kommen kann.

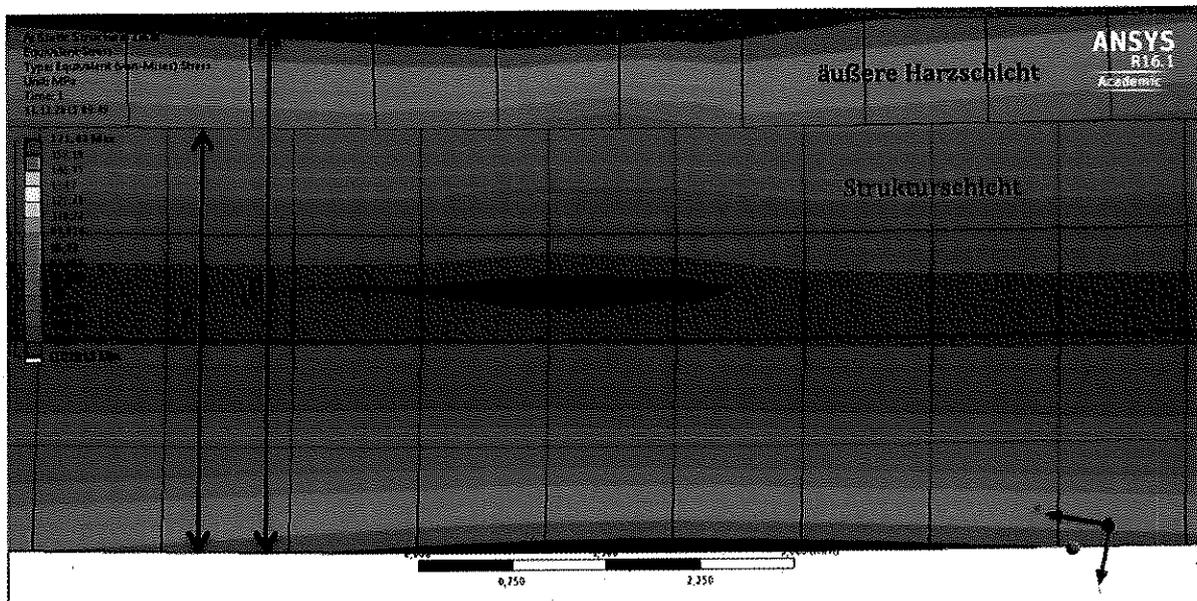


Abbildung 47: Visualisierung der Spannungen im Querschnitt von Liner 5 mittels finiter Elemente Methode

7.7.4 Bewertung der Ergebnisse der analytischen Kennwertermittlung

Glasfaser-Schlauchliner werden auf der Baustelle hergestellt, wodurch keine optimalen Herstellbedingungen, im Vergleich zu Laborbedingungen, vorhanden sind. Somit kommt es in vielen Fällen zu ungewollten Imperfektionen des Schlauchliners, wie beispielsweise äußeren Harzschichten. Diese entstehenden Imperfektionen können beispielsweise durch Unter- oder Überkonfektionierung des Schlauchlinerrohres oder durch vorhandene Beschädigungen des Altrohrs entstehen. Bei der Entstehung von äußeren Harzschichten, wird das vorhandene Harz, mit dem die Glasfaserlagen getränkt sind, durch den inneren Aufstelldruck nach Außen verdrängt. Somit entsteht in den einzelnen Glasfaserlagen ein erhöhter Glasfasergehalt, der in Bezug auf seine mechanischen Kennwerte und Materialzusammensetzung nicht mehr der Zulassung entspricht. Die orthotropen Kennwerte der einzelnen Glasfaserlagen, die für die FEM-Berechnung und für den klassischen Laminattheorie-Ansatz benötigt werden, sind damit unbekannt. Diese beiden analytischen Vorgehensweisen sind sehr zu empfehlen um Spannungen und Verformungen von Einzelbauteilen zu analysieren, da sie bei der richtigen Wahl der Randbedingungen sehr genaue Ergebnisse erzielen. Aufgrund der häufig auftretenden Imperfektionen an den verschiedensten Schlauchliner-Systemen und der dadurch entstehenden Unsicherheit über die orthotropen Kennwerte, ist eine genaue Angabe von Randbedingungen nicht möglich, womit die Aussagesicherheit eines mit den analytischen Methoden errechneten Faktors für die Beurteilung des Einflusses der äußeren Harzschicht nicht gegeben ist.

7.4 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Die Untersuchungen an Baustellenproben aus der Haltung haben gezeigt, dass Reinharzschichten > 20 % in der Praxis vorkommen und einen hohen Einfluss auf die ermittelten Kennwerte haben. Deshalb können Reinharzschichten während der Prüfung von Schlauchlinern nicht vernachlässigt werden. Anhand von Laboruntersuchungen wurde belegt, dass ein Faktor zur Bewertung von unterschiedlichen Laminatstrukturen bei Reinharzschichten ≤ 30 % angesetzt werden kann und das normative Vorgehen mit rechnerischem Abzug der äußeren Reinharzschichtdicke zu einer Überbewertung des E-Moduls der Strukturschicht führt. Nach den experimentell ermittelten Ergebnissen kann der Faktor 1,43, mit einer Toleranz des Faktors von ± 5 %, bei Reinharzschichtdicken von 20 % angewendet werden. Dabei beschreibt die Funktion $y(x) = 0,0217x + 1$ die Faktorbestimmung. Durch Abgleichsproben, die auf der Baustelle hergestellt wurden und äußere Reinharzschichten aufwiesen, wurde die Anwendbarkeit der Faktoren auf die Praxis geprüft. Es zeigte sich, dass die aus Formel (11) errechneten Faktoren mit einer Genauigkeit von 96 % auf Baustellenproben bezogen werden können. Bei Systemen, die äußere Reinharzschichten von > 30 % aufweisen, wird im Zweifel empfohlen, in Absprache mit dem Auftraggeber Reinharzschichten durch vorsichtigen Abtrag von der Probe zu entfernen, da die Aussagesicherheit der Endergebnisse durch eine größere Streuung der Faktoren deutlich abnimmt. Die analytischen Herangehensweisen haben gezeigt, dass Reinharzschichten erheblichen Einfluss auf die ermittelten Kennwerte nehmen, aber es mit diesem Vorgehen nicht empfehlenswert ist, einen Faktor zur Ermittlung des Einflusses von Reinharzschichten zu bestimmen. Mithilfe der finiten Elemente Methode konnte rechnerisch gezeigt werden, dass auch unter einer Verformung der Schlauchlinerprobe keine Spannungsspitzen zwischen äußerer Reinharzschicht und der Strukturschicht auftreten. Somit wurde belegt, dass das frühzeitige Ablösen der durchgehärteten, äußeren Reinharzschicht unter Belastung der Schlauchlinerprobe nicht möglich ist. So müssen Reinharzschicht bei der E-Modulbestimmung Berücksichtigung in Form des Faktors aus Formel (11) finden, da ihre Vernachlässigung zu einer Fehlbewertung des E-Moduls der Strukturschicht führt.

8. Prüfeempfehlung zur Ermittlung der Wanddicke

An sechs farblich markierten Stellen im mittleren Drittel der Probenlänge ist die Verbundwanddicke (e_m) mittels Digital-Messschieber zu bestimmen. Aus den sechs Messungen ist der Mittelwert der Verbundwanddicke zu ermitteln, der repräsentativ für die Schlauchlinerprobe steht. Sind äußere Reinharzschichten vorhanden, müssen folgende Punkte überprüft werden:

1. Sind die äußere Reinharzschicht und die Strukturschicht frei von geometrischen Imperfektionen, wie beispielsweise Lufteinschlüssen, groben Unebenheiten, Rissen oder Falten?
2. Ist die äußere Reinharzschicht ≤ 30 % dick?
3. Ist die äußere Reinharzschicht durchgehärtet (≥ 35 Barcol)?

Werden die Punkte 1–3 erfüllt und ist die Reinharzschicht eindeutig zu erfassen, kann die Bewertung der Strukturschicht mithilfe des Faktors aus Kapitel 7.1.5.1 erfolgen. Dabei gehört die äußere Harzschicht bei der Wanddickenbestimmung und der Prüfung der Probe durch den 3-Punkt-Biegeversuch zur Verbundwanddicke (e_m). Der ermittelte E-Modul wird mit dem aus Formel 11 ($y(x) = 0,0217x + 1$) bestimmten Faktor multipliziert. Mit dem so errechneten E-Modul erfolgt eine zu 96 % genaue Bewertung der Strukturschicht. Ist die äußere Reinharzschicht nicht eindeutig zu erfassen, wird empfohlen, zur Unterstützung an einer Ecke der Probe die äußere Harzschicht zu entfernen. Durch den entstehenden Übergang zwischen Reinharzschicht und sich abzeichnender, seidig-glänzender Glasfaserschicht kann die Dicke der Reinharzschicht eindeutig erfasst werden. Abbildung 48 zeigt eine Mikroskopieuntersuchung einer Probe mit einer Reinharzschichtdicke von 14 %. Die Kennwerte dieser Probe können mithilfe des Faktors bestimmt werden, da die vorausgesetzten Punkte 1–3 zutreffen.

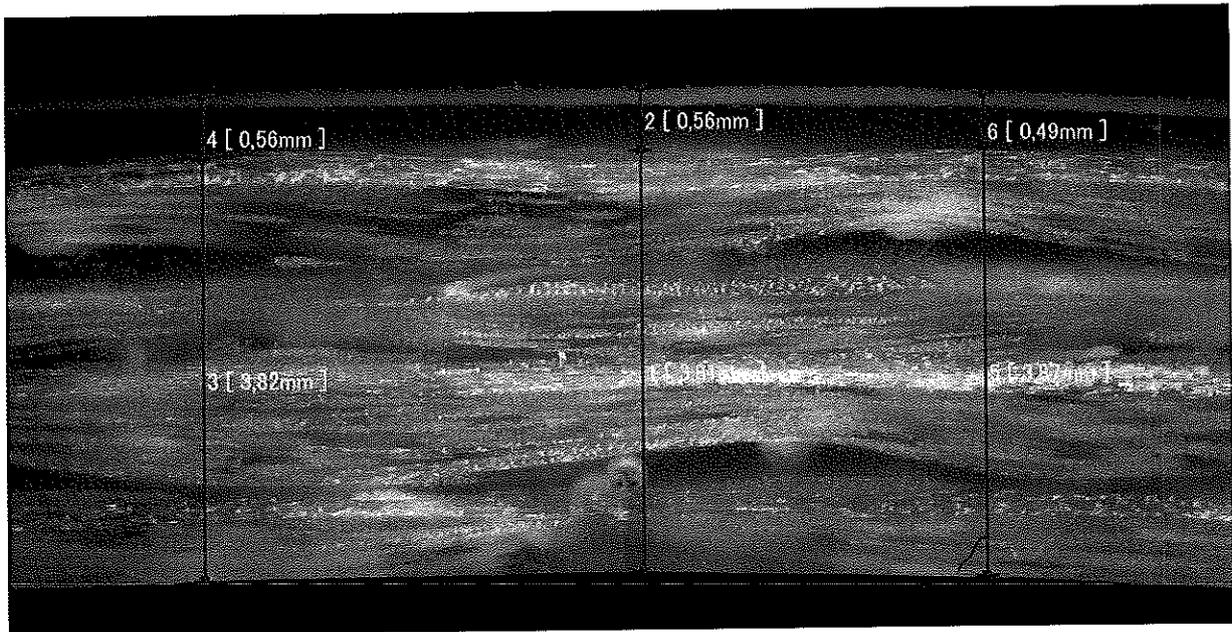


Abbildung 48: Mikroskopieuntersuchung einer Probe mit einer Reinharzschichtdicke von 14 %

Bei Proben mit Reinharzschichten, die eine eindeutige Vermessung durch Inhomogenitäten nicht zulassen, wird empfohlen, die Reinharzschicht nach Rücksprache mit dem Auftraggeber abzutragen und die Verbundwanddicke an der Strukturschicht zu bestimmen. Diese Proben werden ohne physikalisch vorhandene Reinharzschicht geprüft.

Abbildung 49 zeigt eine Baustellenprobe, die eine äußere Harzschicht mit großen Lufteinschlüssen auf der ganzen Oberfläche aufweist. Die vorhandenen Lufteinschlüsse führen dazu, dass die Reinharzschicht sehr inhomogen ist, wodurch ihre Eigenschaften nicht angesetzt werden können. Dies trifft auch auf Proben mit stark rissiger Reinharzschicht zu. Aus diesem Grund können solche Schichten bei der Wanddickenbestimmung vernachlässigt werden.

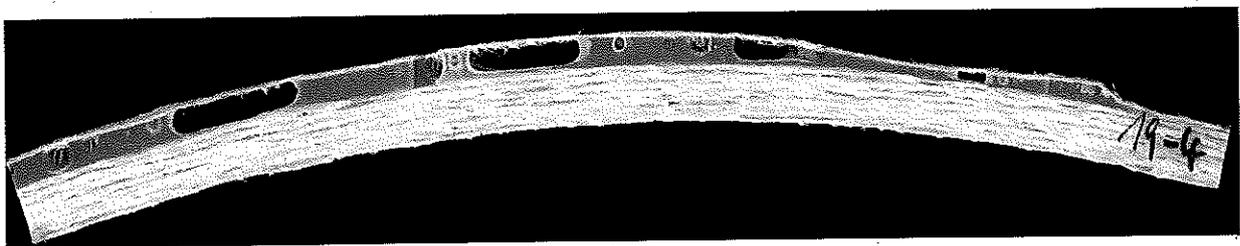


Abbildung 49: Feinschnitt einer Schlauchlinerprobe mit auffälligen Lufteinschlüssen der äußeren Reinharzschicht

9. Fehlerbetrachtung

Um die Genauigkeit der E-Modulbestimmung an 3-Punkt-Biegeproben nach DIN EN ISO 11296-4 bewerten zu können wurde eine Fehlerbetrachtung durchgeführt. Dazu werden die Ursache, die Größe und die Auswirkung der Messfehler auf die Genauigkeit des Ergebnisses beschrieben. Mögliche Ursachen für entstehende Fehler sind:

1. Toleranzbereich der Messmittel
2. Einflüsse durch das Raumklima (Umgebung)
3. Einflüsse bei der Prüfungsdurchführung
4. Qualität der Probenpräparation

Zu 1: Alle im Rahmen der Untersuchung verwendeten Messmittel sind kalibriert. Die verwendeten Messschieber können laut Kalibrierprotokoll eine maximale Messunsicherheit von $\pm 20 \mu\text{m}$ aufweisen. Der Kraftaufnehmer der Universalprüfmaschine hat die Genauigkeitsklasse 0,5 und der Wegaufnehmer die Genauigkeitsklasse 1.

Zu 2: Das Raumklima war bei jeder Prüfung normativ und betrug nach DIN EN ISO 291 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ und $50\% \pm 10\%$ relative Luftfeuchtigkeit.

Zu 3 und 4: Schlauchlinerproben können herstellungsbedingt Unregelmäßigkeiten aufweisen. Die Wanddickenermittlung kann dadurch an unterschiedlichen Messpunkten zu erheblichen Abweichungen führen. Je nach Prüfer können so unterschiedliche Einschätzungen zur Wanddickenbestimmung getroffen werden. Die Einschätzung der Wanddicke der Strukturschicht wird visuell vorgenommen. Dabei werden die Qualität der Schnittkante, die Abzeichnung der äußersten Glasfasern und die Homogenität der Verteilung der unterschiedlichen Glasfasern im Laminat zur Bewertung der Dicke der Strukturschicht herangezogen.

9.1 Bestimmung der Messunsicherheit

Bei Wiederholung einer Messung fällt das Messresultat in der Regel für jede einzelne Messung unterschiedlich aus. Es wird angenommen, dass alle aufgenommenen Messwerte um einen bestimmten Wert, den Erwartungswert der Grundgesamtheit aller möglichen Ergebnisse streuen. Der arithmetische Mittelwert der einzelnen Messwerte ist der beste Schätzwert für den Erwartungswert dieser Verteilung [16]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (20)$$

Die Streuung der einzelnen Messwerte, also die empirische Standardabweichung s , ist die Messunsicherheit der aufgenommenen Messwerte. Formel (20) zeigt die Bestimmung der Standardabweichung s .

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (21)$$

Ist die Standardabweichung sehr gering, wird der Fehler als untergeordnet eingestuft, da das Ergebnis eine hohe Genauigkeit vorweist.

9.1.1 Verbundwanddicke

Die Verbundwanddicke wird normativ durch rechnerischen Abzug von nicht tragenden Schichten und Reinharzschichten von der Gesamtwanddicke ermittelt. Kann die Verbundwanddicke nicht eindeutig erfasst werden, wie beispielsweise durch Unregelmäßigkeiten der Strukturschicht oder der Reinharzschicht, ist ein systematischer Messfehler vom Prüfer zu erwarten, der Auswirkungen auf die Prüfergebnisse hat. Um definierte Messabweichungen zu bestimmen, wurden die Gesamtwanddicke und Verbundwanddicke von sechs ausgewählten Schlauchlinerproben mit unterschiedlich ausgeprägter äußerer Reinharzschichtdicke aus der Praxis und einer Vergleichsprobe aus PVC bestimmt. Die Untersuchung wurde anhand eines Ringversuchs mit insgesamt zehn Prüfern und Ingenieuren der Firma Siebert + Knipschild GmbH durchgeführt. Alle Teilnehmer haben unter den gleichen Bedingungen die gleichen Proben geprüft. Jeder Probekörper wurde von jedem Teilnehmer innerhalb des mittleren Drittels seiner Länge an sechs gleichen Stellen vermessen. Die einzelnen Messwerte wurden zu einem Mittelwert zusammengefasst, der repräsentativ für die Probe ist. Aus den Ergebnissen wurden Standardabweichungen bestimmt, die für die Messunsicherheiten stehen. Tabellen 19 und 20 zeigen die Ergebnisse aus dieser Untersuchung.

Messung der Gesamtwanddicke [mm]

	Prüfer 1	Prüfer 2	Prüfer 3	Prüfer 4	Prüfer 5	Prüfer 6	Prüfer 7	Prüfer 8	Prüfer 9	Prüfer 10.	\bar{x} [mm]	s [%]
PVC Rohr (Vergleichsprobe)	6,81	6,83	6,84	6,69	6,79	6,78	6,79	6,79	6,75	6,81	6,79	0,63
Probekörper 1	5,18	5,25	5,24	5,22	5,18	5,16	5,17	5,21	5,13	5,17	5,19	0,72
Probekörper 2	5,51	5,55	5,54	5,45	5,44	5,49	5,48	5,50	5,41	5,47	5,48	0,79
Probekörper 3	3,91	3,92	3,94	3,75	3,83	3,80	3,83	3,85	3,80	3,89	3,85	1,60
Probekörper 4	5,31	5,31	5,35	5,17	5,20	5,17	5,25	5,22	5,18	5,26	5,24	1,22
Probekörper 5	4,52	4,53	4,55	4,45	4,52	4,48	4,49	4,51	4,44	4,51	4,50	0,75
Probekörper 6	5,39	5,42	5,39	5,31	5,37	5,38	5,36	5,38	5,29	5,37	5,37	0,74

Tabelle 19: Ergebnisse der Gesamtwanddickenbestimmung des Ringversuchs

Messung der Verbundwanddicke [mm]

	Prüfer 1	Prüfer 2	Prüfer 3	Prüfer 4	Prüfer 5	Prüfer 6	Prüfer 7	Prüfer 8	Prüfer 9	Prüfer 10	\bar{x} [mm]	s [%]
Probekörper 1	4,86	4,90	4,93	4,70	4,68	4,77	4,51	4,55	4,67	4,54	4,71	3,23
Probekörper 2	4,64	4,61	4,59	4,45	4,44	4,53	4,24	4,35	4,46	4,41	4,47	2,80
Probekörper 3	3,78	3,71	3,82	3,27	3,75	3,80	3,27	3,52	3,46	3,46	3,59	6,22
Probekörper 4	4,42	4,34	4,34	3,99	4,20	3,95	3,93	3,83	4,06	3,83	4,09	5,36
Probekörper 5	4,52	4,09	4,55	4,09	4,52	4,48	3,88	4,03	4,13	4,04	4,23	6,00
Probekörper 6	5,00	4,98	5,14	4,72	4,87	4,89	4,54	4,46	4,65	4,74	4,80	4,49

Tabelle 20: Ergebnisse der Verbundwanddickenbestimmung des Ringversuchs

Die Gesamtwanddicke wurde statistisch ermittelt. Dabei lag die mittlere Messabweichung bei 0,97 %. Diese Messabweichung kann als gering eingeschätzt werden, da sie sich um nur 0,34 % von der Messabweichung der Vermessung der Vergleichsprobe unterscheidet. Die Messung der Verbundwanddicke hingegen verlangt eine visuelle Einschätzung von jedem Prüfer. Dadurch kommt es hier zu einer mittleren Messabweichung von 4,68 %. Die mittlere Messabweichung der Bestimmung der Verbundwanddicke von Probekörper 3 liegt bei 6,22 %, welche die größte aufgenommene Messabweichung ist. Probekörper 2 hingegen weist eine Messabweichung der Bestimmung der Verbundwanddicke von 2,8 % auf, welche gleichzeitig die geringste ist. Im Folgenden werden diese beiden Probekörper genauer betrachtet. Die Diagramme 3 und 4 zeigen die Messpunkte der einzelnen Verbundwanddickenmessungen an den Probekörpern 2 und 3. Es ist zu erkennen, dass die Messabweichung bei der Verbundwanddickenbestimmung bei Probekörper 3 doppelt so groß ist wie bei Probekörper 2.

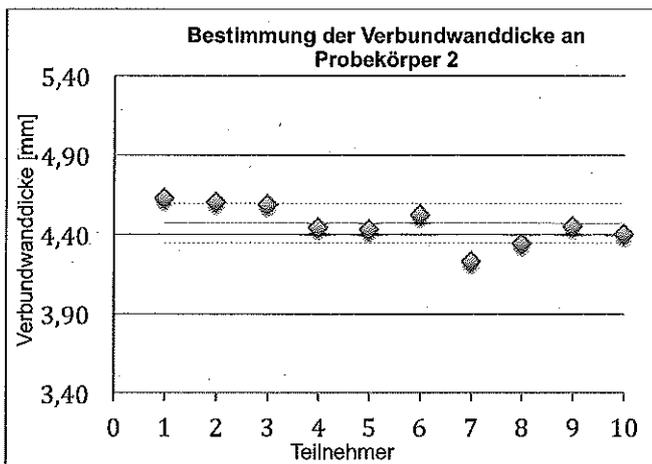


Diagramm 3: Bestimmung der Verbundwanddicke im Ringversuch an Probekörper 2

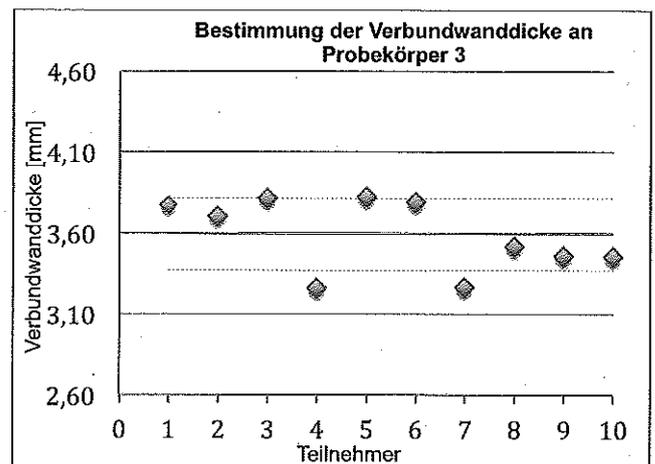


Diagramm 4: Bestimmung der Verbundwanddicke im Ringversuch an Probekörper 3

Zu einer besseren Einschätzung der Verbund- und Gesamtwanddickenmessung wurden die Probekörper 2 und 3 unter dem Digitalmikroskop vermessen. Die ersten drei von sechs Messungen je Probekörper werden in den Abbildungen 50–55 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Reinharzschicht bei Probekörper 2 deutlich abzeichnet, was die Vermessung der Verbundwanddicke erleichtert. Bei Probekörper 3 ist die Reinharzschichtdicke geringer als bei Probekörper 2, dabei zeichnet sich der Grenzbereich zwischen der Reinharzschicht und der Strukturschicht nicht deutlich ab. Dies führt dazu, dass die visuelle Beurteilung der Verbundwanddicke mittels Messschieber abhängig von der visuellen Wahrnehmung des Laminatquerschnitts des Prüfers ist.

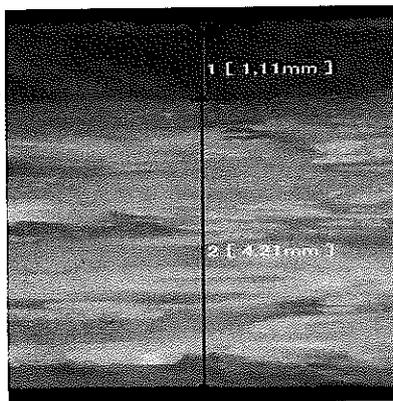


Abbildung 50: Probekörper 2
Wanddickenbestimmung Stelle 1



Abbildung 51: Probekörper 2
Wanddickenbestimmung Stelle 2

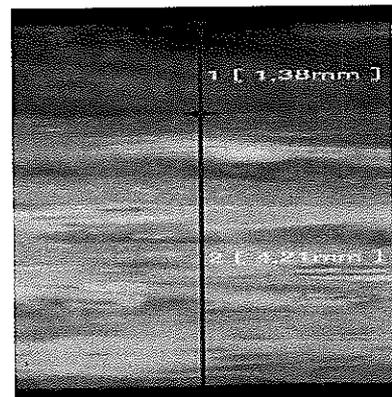


Abbildung 52: Probekörper 2
Wanddickenbestimmung Stelle 3

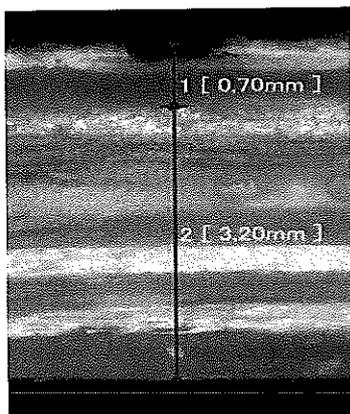


Abbildung 53: Probekörper 3
Wanddickenbestimmung Stelle 1

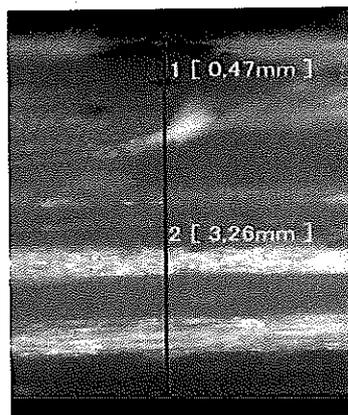


Abbildung 54: Probekörper 3
Wanddickenbestimmung Stelle 2

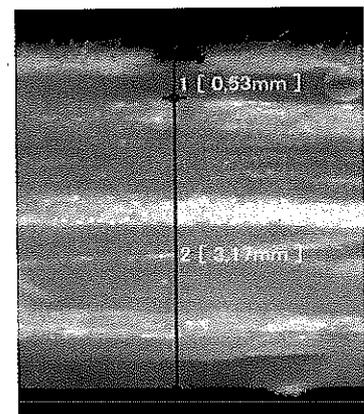


Abbildung 55: Probekörper 3
Wanddickenbestimmung Stelle 3

Tabelle 21 zeigt die Gegenüberstellung der Messergebnisse der Wanddickenbestimmung von Probekörper 2 und Probekörper 3. Dabei zeichnet sich ab, dass bei Proben, die keine eindeutige Abzeichnung von Reinharzschichten aufweisen, die Messunsicherheit bei der Verbundwanddickenbestimmung deutlich zunimmt. Somit kann prüferabhängig ein systematischer Fehler bei der Verbundwanddickenbestimmung entstehen, der abhängig von der Strukturschichtdicke einen erheblichen Einfluss auf die E-Modulbestimmung hat.

Gegenüberstellung der Messergebnisse

	Ringversuch	Mikroskopie	Abweichung [mm]	Abweichung [%]
Gesamtwanddicke Probekörper 2 [mm]	5,48	5,37	0,11	2,0
Gesamtwanddicke Probekörper 3 [mm]	3,85	3,74	0,11	2,9
Verbundwanddicke Probekörper 2 [mm]	4,47	4,30	0,17	3,8
Verbundwanddicke Probekörper 3 [mm]	3,59	3,14	0,45	12,5

Tabelle 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Wanddickenbestimmungen an den Probekörpern 2 und 3

Die unterschiedliche Einschätzung der Verbundwanddicke von Probekörper 3 ist an dem Unterschied der Verbundwanddickenmessung von 12,5 % zwischen Ringversuch und Mikroskopie zu erkennen. Abbildung 56 zeigt eine Mikroskopieuntersuchung an Probekörper 3 in Breitenrichtung der Probe. Die Verbundwanddicke wird durch Hoch- und Tiefpunkte der obersten Glasfaserlage gekennzeichnet. Je nachdem, an welchem Punkt gemessen wird, ist eine andere Verbundwanddicke zu erwarten. Der größte Unterschied in der Verbundwanddickenmessung zwischen Hochpunkt und Tiefpunkt der obersten Glasfaserlage liegt bei 20 %. Dadurch kann es zu unterschiedlichen Bewertungen der Verbundwanddicke an Probekörper 3 kommen, die sich auf das Prüfergebnis des E-Moduls auswirken.

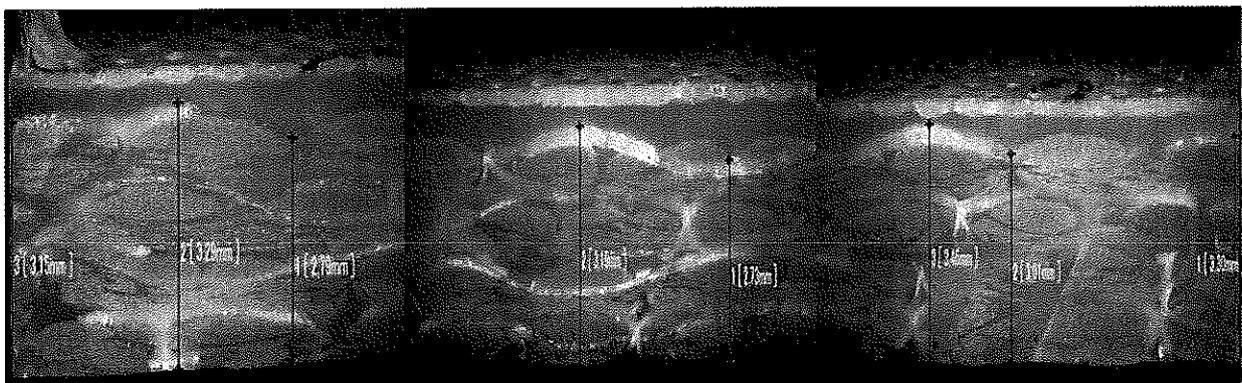


Abbildung 56: Mikroskopieuntersuchung von Probekörper 3 in Breitenrichtung

9.2 Auswirkungen der möglichen Fehler

Die möglichen Fehler durch die verwendeten Messgeräte sind durch ihre Kalibrierung und ihren geringen Toleranzbereich als untergeordnet einzuschätzen. Da es sich hierbei um glasfaserverstärkte duroplastische Kunststoffe handelt, die bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften eine geringe Temperaturempfindlichkeit zeigen ($\alpha_{||} = 7 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$ und $\alpha_{\perp} = 27 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$ [18]), ist der mögliche Fehler auf das Ergebnis des E-Moduls und auf die Wanddickenbestimmung durch die Grenzabweichung der Temperatur von $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ untergeordnet. Das Messergebnis des E-Moduls steht in direktem Bezug zum Messergebnis der Verbundwanddicke. Laut Formel 22 gehen Messfehler bei der Verbundwanddickenbestimmung in der 3. Potenz in die E-Modulberechnung mit ein.

$$E = \frac{\Delta F * L^3}{4 * \Delta s * b * e_m^3} \quad (22)$$

Die Messungen der Gesamtwanddicken unterliegen laut Ringversuch einer geringen Schwankung. Die Einschätzung der Strukturschicht hingegen ist um Faktor 5 ungenauer als die der Gesamtwanddicke, wodurch ein deutlicher Fehler in der E-Modul-Bestimmung resultieren kann. Tabelle 22 zeigt exemplarisch die Auswirkung von dem möglichen Messfehler in der Verbundwanddickenbestimmung von Probekörper 3 an der Baustellenprobe Liner Nr. 6. Der mögliche Messfehler von $\pm 6,25 \%$ kann laut Tabelle 22 zu einer Überbewertung von $12,5 \%$ oder einer Unterbewertung von $9,1 \%$ des E-Moduls der Strukturschicht führen. Somit ist die Auswirkung von möglichen Messfehlern bei der Wanddickenbestimmung an Schlauchlinerproben gerade bei geringen Strukturschichtdicken als erheblicher Fehler bei der E-Modulbestimmung zu betrachten.

	E-Modul der Strukturschicht [MPa]	E-Modul der Strukturschicht mittels Faktor [MPa]	E-Modul der Strukturschicht mittels Faktor bei Messfehler von $\pm 6,2 \%$ der Strukturschichtdicke [MPa]	E-Modul der Strukturschicht mittels Faktor bei Messfehler von $\pm 6,2 \%$ der Strukturschichtdicke [MPa]
Liner 6	20605	20977	18732	23191

Tabelle 22: Entstehende Fehlbewertung des E-Moduls bei einem möglichen Messfehler von $\pm 6,2 \%$

10. Zusammenfassung

Das Schlauchliner-Verfahren ist ein junges Verfahren zur grabenlosen Kanalsanierung. Dieses Verfahren erlaubt es, durch einen mit Harz getränkten Glas- oder Synthesefaserschlauch schadhafte Kanalrohre grabenlos zu sanieren. Hierfür wird der Schlauchliner in das Altrohr eingezogen, mithilfe eines Überdrucks aufgestellt und beispielsweise durch UV-Strahlen ausgehärtet. Im Rahmen der Qualitätssicherung von Schlauchlinern wird in ausgewählten Prüflaboratorien überprüft, ob die Schlauchliner den Systemangaben der Anbieter entsprechen. Einer der wichtigsten Kennwerte ist der E-Modul, der für die Steifigkeit des Schlauchliner-Materials steht und mittels 3-Punkt-Biegeversuchs geprüft wird. Durch Fehlkonfektionierung, konstruktions- oder prozessbedingt, treten Reinharzschichten auf den Oberflächen der zu prüfenden Proben auf. Deswegen muss sichergestellt werden, dass sich alle geltenden Regelwerke und Normen zur Prüfung von Schlauchlinerproben mittels 3-Punkt-Biegeversuchs nicht widersprechen und genaue Angaben zur Vorgehensweise der Wanddickenbestimmung hinsichtlich äußerer Reinharzschichten, geben. Während die DIN EN ISO 11296-4 das Abschleifen von Reinharzschichten für die Prüfung von Schlauchlinerproben zulässt, muss laut DWA-Arbeitsblatt 143-3 bei einer Probe, die eine äußere Reinharzschichtdicke von $< 20\%$ der Verbunddicke (e_m) vorweist, diese rechnerisch von der Wanddicke der Probe subtrahiert werden. Da der physikalisch tragende Effekt der Schicht aber bestehen bleibt, führt dies zu einem insgesamt höheren, aber falschen Prüfergebnis bei der E-Modulermittlung. Laut DWA-A 143-3 müssen Proben mit äußeren Reinharzschichtdicken $> 20\%$ verworfen werden, welche trotz ausgeprägtem Reinharzschichtanteil repräsentative Elemente des Schlauchliners sein können. Da die Verbundwanddicke (e_m) in der E-Modul-Berechnung in der dritten Potenz mit eingeht, ist die richtige Ermittlung der Verbundwanddicke ausschlaggebend für die Ermittlung des E-Moduls. Um den Einfluss von äußeren Harzschichten auf Schlauchlinerproben zu untersuchen und gleichzeitig Fremdeinflüsse durch beispielsweise Härtingsdefizite, Imperfektionen der Linerproben und/oder ihrer äußeren Harzschicht zu vermeiden, wurden unter Laborbedingungen Harzschichten an Linerproben hergestellt. Diese Proben wurden systematisch mittels 3-Punkt-Biegeversuchs geprüft. Dabei wurden die Kennwerte je Harzauftrag neu ermittelt um den Einfluss unterschiedlich dicker Reinharzschichten zu analysieren. Es wurde ein Faktor ermittelt, der es erlaubt die Strukturschicht zu bewerten ohne die äußere Harzschicht abzutragen. Um sicherzustellen, dass ein normativer Verbund zwischen dem eigentlichen Laminat und der aufgetragenen Harzschicht hergestellt wurde, wurden Abreißversuche durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass es nie zu einer Grenzschichtablösung kommen kann und bei Reinharzschichtdicken von 20% der Faktor 1,43 (Toleranz von $\pm 5\%$ des Faktors) und bei Reinharzschichtdicken von 30% der Faktor 1,65 (Toleranz von $\pm 10\%$ des Faktors) anzusetzen ist. Bei Reinharzschichten, die größer sind als

30 % ist die Aussagesicherheit des Faktors, durch zu hohe Streuung der Faktoren, zu gering. Die aus den Messergebnissen abgeleitete Funktion $y(x) = 0,0217x + 1$ beschreibt den Zusammenhang der Faktorbestimmung und der Reinharzschichtdicken. Dabei ist x die Reinharzschichtdicke in %. Durch das Prüfen von Baustellenproben wurde festgestellt, dass die aus den Laborproben ermittelten Faktoren mit einer Genauigkeit von 96 % auf die Praxis bezogen werden können. Die im Anschluss durchgeführte analytische Berechnung der Schlauchlinerproben mittels klassischer Laminattheorie und finiter Elemente Methode hat gezeigt, dass die Faktorbestimmung mit diesen Methoden nicht empfehlenswert ist, da bei vorhandenen äußeren Reinharzschichten die orthotropen Kennwerte der einzelnen Glasfaserlagen unbekannt sind und nicht mehr den Zulassungswerten entsprechen. Mit der finiten-Elemente-Methode konnte rechnerisch gezeigt werden, dass auch unter einer Verformung des Schlauchliners keine Spannungsspitzen zwischen äußerer Reinharzschicht und der Strukturschicht auftreten. Somit wurde gezeigt, dass das frühzeitige Ablösen der durchgehärteten, äußeren Reinharzschicht unter Belastung der Schlauchlinerprobe nicht möglich ist. Damit bestätigt sich das Ergebnis der experimentell durchgeführten 3-Punkt-Biegeversuche. Die äußere Reinharzschicht muss demnach bei der E-Modulbestimmung und somit bei der Wanddickenbestimmung durch die Verwendung des zu bestimmenden Faktors (aus Formel 11) Berücksichtigung finden. Eine Vernachlässigung der Reinharzschicht bei der Wanddickenbestimmung führt zu einer fehlerhaften E-Modulbestimmung. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde eine Prüfempfehlung zur Wanddickenbestimmung gegeben, die Schlauchlinerproben mit ausgeprägten äußeren Reinharzschichten berücksichtigt. Im Rahmen eines Ringversuchs in der Fehlerbetrachtung wurde festgestellt, dass ein maximaler Messfehler in der Verbundwanddickenbestimmung von Proben mit äußeren Reinharzschichten von $\pm 6,2$ % möglich ist. Die Auswirkungen dieses Messfehlers auf die E-Modulbestimmung wurden exemplarisch an der Baustellenprobe Liner Nr. 6 gezeigt und führten zu einer Überbewertung von 12,5 % oder einer Unterbewertung von 9,1 % des E-Moduls der Strukturschicht, welche abhängig von der Strukturschichtdicke der Probe ist.

11. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich tatkräftig bei der Erstellung meiner Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Besonders gilt dieser Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Schäfer und Herrn Dipl. Ing Haacker, die mich bei der Erstellung der Arbeit betreut haben. Durch Ihre herausragende Expertise, kritischen Hinterfragungen und konstruktive Kritik haben Sie zu einem großen Teil zur Vollendung dieser Bachelorarbeit beigetragen. Vielen Dank für die Mühe und Zeit, die Sie in meine Arbeit investiert haben.

Auch der Firma Siebert + Knipschild GmbH möchte ich danken, die maßgeblich daran mitgewirkt hat, dass meine Bachelorarbeit in dieser Form vorliegt. Besonders den Ingenieuren und den Mitarbeitern aus dem Labor möchte ich danken, welche durch Ihre tatkräftige Unterstützung und Ihr fachliches Wissen bei der Durchführung von Versuchen geholfen haben. Darüber hinaus möchte ich mich besonders bei Herrn B.Eng. Dettmann und Herrn Meyer bedanken, die meine Arbeit durch ihre fachliche Unterstützung begleitet haben.

Ein großer Dank gilt auch Freunden, Kommilitonen und Bekannten, die mich durch moralischen Beistand und kontinuierliche Motivation unterstützt haben

Zuletzt möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie und meiner Freundin bedanken, die mich während des gesamten Studiums stets unterstützt haben.

Literaturverzeichnis

- [1.1] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften - Kapitel 5.5.1.1 Probekörperdicke
- [1.2] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften - Kapitel 8.1 Durchführung
- [1.3] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 1.3 Anwendungsbereich
- [1.4] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften - Kapitel 8.2 Durchführung
- [1.5] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 5.3 Auflager und Druckfinne
- [1.6] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 7 Konditionier- und Prüfklima
- [1.7] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 6.5 Anzahl der Probekörper
- [1.8] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 11 Prüfbericht
- [1.9] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 8.7 Durchführung (Verfahren A)
- [1.10] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 8.8 Durchführung (Verfahren B)
- [1.11] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 4 Kurzbeschreibung
- [1.12] DIN EN ISO 178:2011 Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 5.5.1.1 Probekörperdicke
- [2.1] DIN EN ISO 11296-4:2011 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining - Kapitel B 4.1 Messung von Verbunddicke und Breite
- [2.2] DIN EN ISO 11296-4:2011 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining - Kapitel B.6 Prüfbericht
- [2.3] DIN EN ISO 11296-4:2011 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining - Kapitel B.2 Prüfgeräte

- [2.4] DIN EN ISO 11296-4:2011 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining - Kapitel B.3.1 Form
- [2.5] DIN EN ISO 11296-4:2011 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining - Kapitel B.3.2 Dicke
- [2.6] DIN EN ISO 11296-4:2011 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining - Kapitel B.3.3 Breite
- [2.7] DIN EN ISO 11296-4:2011 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining - Kapitel B.3.4 Länge
- [2.8] DIN EN ISO 11296-4:2011 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining - Kapitel B.4.1 Messung der Verbunddicke und Breite
- [2.9] DIN EN ISO 11296-4:2011 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining - Kapitel B.4.2 Einstellung der Stützweite
- [2.10] DIN EN ISO 11296-4:2011 Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) – Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining - Kapitel B.6 Prüfbericht
- [3.1] DWA-A 143-3:2014 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 3: Vor Ort härtende Schlauchliner - Kapitel 7.2.2.3 Prüflinge – Form und Maße
- [3.2] DWA-A 143-3:2014 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 3: Vor Ort härtende Schlauchliner – Kapitel 4.2.5.1 Verbunddicke
- [3.3] DWA-A 143-3:2014 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 3: Vor Ort härtende Schlauchliner – Kapitel 7.1.2 Probenentnahme und –größe.
- [3.4] DWA-A 143-3:2014 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 3: Vor Ort härtende Schlauchliner – Kapitel 4.2.3.3 Trägermaterial
- [3.5] DWA-A 143-3:2014 Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 3: Vor Ort härtende Schlauchliner – Kapitel 4.1.2 Einsatzbereich des Schlauchlinings
- [4.1] Gottfried W. Ehrenstein – Faserverbund-Kunststoffe, 2. Ausgabe, Hanser Verlag, ISBN 9783446227163 – Kapitel 7.2 Klassische Laminattheorie
- [4.2] Gottfried W. Ehrenstein – Faserverbund-Kunststoffe, 2. Ausgabe, Hanser Verlag, ISBN 9783446227163 – Kapitel 2.1 Glasfasern
- [4.3] Gottfried W. Ehrenstein – Faserverbund-Kunststoffe, 2. Ausgabe, Hanser Verlag, ISBN 9783446227163 – Kapitel 2.3 Kohlenstoff-Fasern

- [4.4] Gottfried W. Ehrenstein – Faserverbund-Kunststoffe, 2. Ausgabe, Hanser Verlag, ISBN 9783446227163 – Kapitel 2.2 Aramidfasern
- [4.5] Gottfried W. Ehrenstein – Faserverbund-Kunststoffe, 2. Ausgabe, Hanser Verlag, ISBN 9783446227163 – Kapitel 7.1.2 Unidirektional verstärkte Schicht (DU-Schicht)
- [4.6] Gottfried W. Ehrenstein – Faserverbund-Kunststoffe, 2. Ausgabe, Hanser Verlag, ISBN 9783446227163 – Kapitel 7.4 Gewebeschicht
- [5.1] AVK Handbuch Faserverbundkunststoffe, 3. Auflage, VIEWEG+TEUBNER Verlag, ISBN 978-38348-0881-3 – Kapitel 4.1.1.1 Ungesättigte Polyesterharze
- [5.2] AVK Handbuch Faserverbundkunststoffe, 3. Auflage, VIEWEG+TEUBNER Verlag, ISBN 978-38348-0881-3 – Kapitel 4.1.1.2 Vinylesterharze
- [5.3] AVK Handbuch Faserverbundkunststoffe, 3. Auflage, VIEWEG+TEUBNER Verlag, ISBN 978-38348-0881-3 – Kapitel 4.1.1.5 Epoxidharze
- [5.4] AVK Handbuch Faserverbundkunststoffe, 3. Auflage, VIEWEG+TEUBNER Verlag, ISBN 978-38348-0881-3 – Kapitel 4.1.1.7 Phenol-Formaldehydharze
- [5.5] AVK Handbuch Faserverbundkunststoffe, 3. Auflage, VIEWEG+TEUBNER Verlag, ISBN 978-38348-0881-3 – Kapitel 7.5.1 Wirrfaserschicht/StEIFigkeit
- [5.6] AVK Handbuch Faserverbundkunststoffe, 3. Auflage, VIEWEG+TEUBNER Verlag, ISBN 978-38348-0881-3 – Kapitel 4.2.1.1 Herstellung von Faserhalbzeugen
- [6.1] DIN 18820 Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA) – Teil 1 – Kapitel 2.5
- [6.2] DIN 18820 Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA) – Teil 1 – Kapitel 2.6
- [6.3] DIN 18820 Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA) – Teil 1 – Kapitel 2.7
- [7.1] Peter Jung – Kanalsanierung, 1. Auflage, Vogel Verlag, ISBN 3-8023-1594-4 - Kapitel 1.1.7 Sanierungen
- [8] <https://de.wikipedia.org/wiki/Schlauchliner> (20.11.2015)
- [9] <http://www.die-gewand-sammlung.de/verarbeitung/grundlagen/materialkunde/bindungen> (20.11.2015)
- [10.1] DIN EN ISO 14125 : 2011-05 Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 6.1.3 Bevorzugter Probekörpertyp
- [10.2] DIN EN ISO 14125 : 2011-05 Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kapitel 6.1.4 Andere Probekörper
- [11.1] DIN EN ISO 1172 : 1998 - Textilglasverstärkte Kunststoffe – Prepregs, Formmassen und Laminate – Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts – Kalzinierungsverfahren – Kapitel 4 Prinzip

- [12.1] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner – Vorwort
- [12.2] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner – Kapitel 1.4.1 Akkreditierung
- [12.3] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner – Kapitel 1.4.2 Bauaufsichtlich anerkannte Überwachungsstelle
- [12.4] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner – Kapitel 3.1.1 Gültige und hier zu Grunde gelegte Normen
- [12.5] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner – Kapitel 3.1.2 Prüfgeräte
- [12.6] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner – Kapitel 3.1.3 Probekörperform und -maße
- [12.7] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner – Kapitel 3.1.4 Durchführung der Materialprüfung
- [12.8] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner – Kapitel 3.1.5 Sonstiges
- [13] DIN 862 Messschieber, Anforderungen, Prüfung, 1988-12
- [14] www.hochleistungsgewebe.de/mediapool/46/467888/data/Polyesterharz/VUP_4714_BET_Sternisa.pdf (Datenblatt VUP 4714 BET) 01.12.2015
- [15.1] DIN EN ISO 4624 : 2003 Beschichtungsstoffe – Abreißversuch zur Beurteilung der Haftfestigkeit – Kapitel 3 Kurzbeschreibung des Verfahrens
- [16] Bestimmung der Messunsicherheit – Eine Einführung, Kurs vom 17. April 2002 EMPA
- [17] DIN EN ISO 752-5 : Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Teil 5 : Sanierung, Beuth Verlag, Berlin 1997
- [18] https://de.wikipedia.org/wiki/Glasfaserverstärkter_Kunststoff 02.03.2016
- [19] Allgemein bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-42.3-475 vom 23. August 2013 Aarsleff
- [20] <http://www.chemie.de/lexikon/Polyurethan.html> (25.02.2016)



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: zum Felde

Vorname: Simon

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Wanddickenbestimmung an komplexen Faserverbundstrukturen

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

25.02.2016

Datum

S. zum Felde

Unterschrift im Original