

DLR-IB-FA-BS-2020-159

**Untersuchung von
Zugscherversuchen bezüglich der
Eignung für GFK-Verklebungen im
Schienenfahrzeugbau**

Masterarbeit

Autor: Marvin Ehrhardt
Betreuer: Marcel Andres



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2020-159

Untersuchung von Zugscherversuchen bezüglich der Eignung für GFK-Verklebungen im Schienenfahrzeugbau

Zugänglichkeit:

Stufe 1 Allgemein zugänglich

Braunschweig, *Oktober, 2020*

Abteilungsleiter:


Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

Der Bericht umfasst: 179 Seiten

Autor:


Marvin Ehrhardt

Digital signiert von Marvin Ehrhardt
DN: CN=Marvin Ehrhardt,
E=marvin.ehrhardt@gmx.de
Datum: 2020.11.13 14:03:47+01'00'

Autor 2 / Betreuer:


Marcel Andres

Digital signiert von
marcel.andres@dlr.de
DN: CN=marcel.andres@dlr.de
Datum: 2020.11.13 11:29:22+01'00'
Foxit Reader Version: 10.1.0



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



Untersuchung von Zugscherversuchen bezüglich der Eignung für GFK-Verklebungen im Schienenfahrzeugbau

Masterarbeit

an der Technischen Universität Braunschweig

Verfasser : Marvin Ehrhardt
im Studiengang : Master Maschinenbau
Matr.-Nr. : 4372644

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne (TU Braunschweig - iAF)

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius (TU Braunschweig - iAF)

Betreuer:

Marcel Andres (DLR Braunschweig, FA)

Betreuer:

Oliver Völkerink (DLR Braunschweig, FA)

Betreuer:

Oliver Bahrmann (J.M. Voith SE & Co. KG | VTA)

Betreuer:

Julian Steinmetz (TU Braunschweig, iAF)



Masterarbeit

für

Herrn Marvin Ehrhardt

Matr.-Nr. 4372644

Thema:

Untersuchung von Zugscherversuchen bezüglich der Eignung für GFK-Verklebungen im Schienenfahrzeugbau

Beschreibung:

Klebungen sind als Fügetechnik in der Industrie weit verbreitet und werden auch von der J.M. Voith SE & Co. KG | VTA (folgend Voith) bei der Herstellung von Frontsystemen für Schienenfahrzeuge eingesetzt. In der Auslegung der Bauteile bzw. der Klebungen werden empirisch bestimmte Festigkeiten verwendet. Dabei kommen verschiedene Versuche zum Einsatz, die in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung, die Festigkeiten der Klebverbindungen bestimmen. Der häufigste ausgeführte Versuch ist der sog. Zugscherversuch zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit.

Problemstellung:

Bei der Auslegung der Klebverbindungen wird unter anderem der Festigkeitswert verwendet, welcher im Zugscherversuch ermittelt wird. Beim Zugscherversuch gehen neben den Klebstoff- auch die Fügeteileigenschaften in den komplexen Festigkeitswert ein. Dies ist damit zu begründen, dass während der Prüfung neben den Scherspannungen auch Schälspannungen auftreten, welche das Ergebnis der Prüfung beeinflussen und die Festigkeit der Klebung verändern können [1]. In der Realität zeigt sich ein ähnliches Bild und es ergibt sich eine Überlagerung von unterschiedlichen Spannungszuständen im Klebespalt. Wird während des Versuchs ein anderes Verhältnis der Spannungszustände im Klebespalt erzeugt, als es in der Realität auftritt, ist der ermittelte Festigkeitswert nicht ideal für eine Auslegung.

[1] Rasche, Manfred: *Handbuch Klebtechnik*, 2012

Lösungsansätze:

Durch einen Vergleich der während der Prüfung auftretenden Spannungszustände mit real im Bauteil vorliegenden Spannungszuständen wird eine Prüfkörpergeometrie festgelegt, welche die Spannungen während der Prüfung möglichst realitätsnah abbildet. Für diese Prüfkörpergeometrie werden experimentell Versagenslasten ermittelt, welche als Grundlage für die Berechnung der Spannungen im Prüfkörper herangezogen werden. Die so ermittelten Spannungszustände werden abschließend mit den bei der Auswahl der Prüfkörpergeometrie zugrunde gelegten Spannungszuständen verglichen.

Arbeitsschritte:

- Exposé mit Projektplan und Meilensteinen.
- Literaturrecherche und Beschreibung des Standes der Technik über Versuche zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Klebstoffen
- Analyse der Spannungszustände in Verklebungen von Frontsystemen bei Voith
- Berechnung der Spannungszustände verschiedener Prüfkörpergeometrien von Zugscherversuchen
- Vergleich der Spannungszustände der Versuche mit ausgewählten Spannungszuständen in Frontsystemen und Ableiten einer geeigneten Prüfkörpergeometrie zur realitätsnahen Abbildung der Spannungen
- Fertigung, Test und Auswertung von Prüfkörpern mit der ausgewählten Prüfkörpergeometrie
- Modellierung der Prüfkörper analog zur Diskretisierungsmethode für Frontsysteme bei Voith
- Simulation der modellierten Prüfkörper mit den Testwerten, Vergleich der analytischen und modellierten Spannungszustände, Bestimmung der Vergleichsspannungen unter Verwendung derselben Spannungshypothese wie für Frontsysteme von Voith
- Begründete Empfehlung eines Prüfverfahrens zur Verwendung bei Voith
- Schritthaltende Dokumentation in Form einer wissenschaftlichen Arbeit.
- Präsentation der Ergebnisse.

Die Masterarbeit wird kooperativ bei der Firma Voith in Salzgitter, beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik am Standort Braunschweig im Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik (folgend DLR FA) und dem iAf der TU Braunschweig durchgeführt.

Seitens der Firma Voith wird die Arbeit von Herrn Oliver Bahrmann betreut. Seitens des DLR FA wird die Arbeit von Herrn Oliver Völkerink, M.Sc. und Herrn Marcel Andres, M.Sc. sowie von Herrn Julian Steinmetz, M.Sc. (iAF) betreut. Für Planung, Berechnung, Fertigung, Untersuchungen und Dokumentation können Labore, Werkzeuge, Einrichtungen, Programme und Rechenanlagen sowohl der Firma Voith als auch des DLR FA benutzt werden. Die Ergebnisse sind entsprechend dem Fortschritt der Arbeit, mindestens aber einmal wöchentlich mit den Betreuern abzusprechen.

Änderungen der Aufgabenstellung sind nur mit Zustimmung des Betreuers und Prüfungsausschusses möglich.

Die Bearbeitungszeit beträgt 6 Monate, wie unten angegeben. Die Arbeit muss im WISA-Portal hochgeladen und in zweifach gebundener und einer elektronischen Form im Geschäftszimmer des iAF abgegeben werden. Ausnahmen sind in der Prüfungsordnung dokumentiert.

Hiermit bestätige ich den Empfang der Aufgabenstellung:




Marvin Ehrhardt

Bearbeitungszeit: 6 Monate

Ausgegeben am: 04.03.2020

Abgegeben am:



Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

VOITH

Diese Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der J.M. Voith SE & Co. KG | VTA, Salzgitter angefertigt.
Allen Beteiligten vielen Dank für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt zu haben. Die verwendete Literatur und sonstige Hilfsmittel sind vollständig angegeben.

Braunschweig, 15. Oktober 2020

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Verbesserung der Qualifizierung von überlappten Klebverbindungen, welche einer Schubbelastung ausgesetzt sind. In den Prüfkörpern zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit herrscht kein homogener Spannungszustand. Außerdem ist nicht bekannt, wie der Spannungszustand in den Prüfkörpern mit den Spannungszuständen im Bauteil übereinstimmt. Deshalb wird eine Methodik erarbeitet, über welche auf Basis der deviatorischen und hydrostatischen Spannungsanteile die Klebschichten von Bauteil und Prüfkörper verglichen werden können. Mit Hilfe dieses Vergleichs wird eine Prüfkörpergeometrie abgeleitet, welche den Spannungszustand des Bauteils durch eine Prüfung abbilden kann.

Im ersten Schritt werden verschiedene Prüfkörpergeometrien zum Prüfen der Zugscherfestigkeit vorgestellt und auf ihre mögliche Eignung für eine Anwendung in dieser Arbeit untersucht.

Im nächsten Schritt werden die deviatorischen und hydrostatischen Spannungszustände in den Klebschichten der Bugnase des ICE 4 untersucht und ein Bereich wird ermittelt, welcher zum Vergleich mit den Prüfkörpern herangezogen wird.

Daraufhin werden die Spannungszustände von ausgewählten Prüfkörpern mittels FE-Modellen berechnet. Hierbei werden geometrische Parameter variiert, um den Einfluss auf die Spannungszustände zu untersuchen. Auf Basis dieser Vergleiche werden Parameter definiert, welche für eine Anpassung des Spannungszustandes variiert werden dürfen.

Im nächsten Schritt werden die Prüfkörper so wie der betrachtete Bereich der Klebschicht der Bugnase modelliert. Anhand der deviatorischen und hydrostatischen Spannungsverläufe wird eine Prüfkörpergeometrie abgeleitet, welche die Spannungszustände des Bauteils am besten abbildet.

Darauffolgend wird sowohl der definierte Prüfkörper als auch der derzeit bei Voith verwendete Prüfkörper gefertigt und geprüft, um für beide Prüfkörper eine Versagenslast zu ermitteln.

Abschließend werden die Prüfkörper mit den ermittelten Versagenslasten simuliert. Die resultierenden Spannungszustände zwischen den getesteten Prüfkörpern und dem Bauteil werden verglichen. Im letzten Schritt wird eine Empfehlung zur Bestimmung der Festigkeit auf Basis der Simulationen gegeben.

Abstract

The aim of this thesis is to improve the qualification of overlapped adhesive joints, which are exposed to shear stress. The stress state in the test specimens used to determine the lap shear strength is not homogeneous. Furthermore, it is not known how the stress state in the test specimens corresponds to the stress states in the component. Therefore, a methodology is developed to compare the adhesive layers of the component and the test specimen on the basis of the deviatoric and hydrostatic stress components. By using this comparison a test specimen geometry is derived, which can represent the stress state of the component.

In the first step, different test specimen geometries for testing the tensile shear strength are presented and examined for their possible suitability for an application in this thesis.

In the next step, the deviatoric and hydrostatic stress states in the adhesive layers of the front part of the ICE 4 are examined and an area of the bondline is determined which is used for comparison with the test specimens.

The stress states of selected test specimens are then calculated using FE models. Thereby geometrical parameters are varied to investigate the influence on the stress states. On the basis of these comparisons, parameters are defined which may be varied for an adaptation of the stress state.

After that the test specimens are modelled in the same way as the considered area of the adhesive layer of the front part. Based on the deviatoric and hydrostatic stress curves, a test specimen geometry is derived which best represents the stress states of the component.

Subsequently, both the defined test specimen and the test specimen currently used at Voith are manufactured and tested in order to determine a failure load for both test specimens.

Finally, the test specimens are simulated with the determined failure load. The resulting stress conditions between the tested specimens and the component are compared. In the last step a recommendation for the determination of the strength based on the simulations is given.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	IX
Kurzfassung	X
Abstract	XI
Nomenklatur	XXII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Aufbau und Vorgehensweise	3
2 Zugscherprüfung von Überlappungsklebung	6
2.1 Grundlagen des Klebens	6
2.2 Versuchsarten zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit	8
2.3 Auswertung der Versuche	14
2.4 Einfluss geometrischer Parameter auf die Zugscherfestigkeit	16
2.4.1 Einfluss der Klebschichtdicke	16
2.4.2 Einfluss der Überlappungslänge	18
2.4.3 Einfluss der Fügeteildicke	19
2.4.4 Einfluss der Klebschichtbreite	20
3 Analyse der Klebschichten eines Frontend-Systems von Voith	21
3.1 Ausführung von Klebverbindungen bei Voith	21
3.2 Werkstoffe	23
3.3 Vergleichsspannungen zur Bewertung der Klebschicht	23
3.4 Spannungsauswertung kritischer Bereiche	28
3.4.1 Auswahl eines hochbelasteten Bereichs	28
3.4.2 Spannungsverläufe des ausgewählten Bereichs	30
3.4.3 Modellierung des Bauteils	31
4 Spannungsanalyse in Prüfkörpern von Zugscherversuchen	34
4.1 Betrachtung von Spannungsverläufen aus der Literatur	34
4.1.1 Überlappte Prüfkörper	34
4.1.2 Arcan-Versuch	38
4.1.3 Zwischenfazit	39
4.2 Simulation von Prüfkörpern	40
4.2.1 Analytische Modelle	40
4.2.2 Numerische Simulation	42
4.3 Aufbau der Modelle	44

4.3.1	Geometrie und Randbedingungen	44
4.3.2	Lagenaufbau der Füge­teile	46
4.3.3	Idealisierte Annahmen	47
4.3.4	Numerisches Modell	48
4.4	Vergleich der Spannungsverläufe	51
4.5	Auswirkung einer Biegebehinderung auf die Spannungsverläufe	55
4.6	Validierung der Modelle	57
4.7	Einfluss geometrischer Parameter auf die Spannungsverläufe	63
4.7.1	Klebschichtdicke	63
4.7.2	Überlappungslänge	69
4.7.3	Füge­teildicke	72
4.7.4	Zusammenfassung	76
5	Ableiten einer Prüfkörpergeometrie	77
5.1	Vorgehen	77
5.2	Deviatorischer Spannungsverlauf	79
5.3	Hydrostatischer Spannungsverlauf	81
5.4	Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungen	85
5.5	Bewertung der Spannungsverläufe	87
5.6	Gesamtergebnis der Methodik	87
5.7	Zusammenfassung	89
6	Fertigung und Prüfung der Prüfkörper	91
6.1	Fertigung	91
6.1.1	Doppelt gelaschter Prüfkörper	92
6.1.2	Festgelegte Prüfkörpergeometrie	93
6.2	Prüfung	94
7	Auswertung der Prüfergebnisse	99
7.1	Untersuchung der deviatorischen und hydrostatischen Spannungen	100
7.1.1	Deviatorischer Spannungsverlauf	100
7.1.2	Hydrostatischer Spannungsverlauf	101
7.1.3	Verhältnis von deviatorischen zu hydrostatischen Spannungen	103
7.1.4	Beurteilung der Interface-Spannungen	103
7.1.5	Fazit	105
7.2	Bestimmung der Festigkeit unter Verwendung der Schubspannungshypothese nach Tresca	106
8	Zusammenfassung und Ausblick	109
	Literaturverzeichnis	113
A	Anhang	119
A.1	Ergänzende Spannungsverläufe der Bauteile	119
A.2	Netz­konvergenzstudie	123
A.3	Ergänzende Spannungsverläufe der Prüfkörpergeometrien	124
A.4	Ergebnisse der Methodik	133
A.5	Fertigungsdokumente	149
A.6	Prüfergebnisse	153

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prüfkörpergeometrien, definiert innerhalb der DIN 6701-3, dunkel: Fügeteil, hell: Klebschicht	2
1.2	Spannungsspitzen in der Klebschicht	2
1.3	Aufbau der Arbeit	5
2.1	Adhäsions- und Kohäsionsbereiche in einer Klebschicht	7
2.2	Beanspruchungsarten von Klebverbindungen	7
2.3	Stützvorrichtung zur Biegebehinderung	9
2.4	Arcan-Test (a) und modifizierter Arcan-Test (b)	10
2.5	Iosipescu Prüfkörper	11
2.6	Pin-and-Collar Versuch	11
2.7	Zylindrische Rohr-Verklebung	12
2.8	Block-Shear-Test	12
2.9	Bruchbilder nach DIN EN 10365	15
2.10	Versagensformen in Faserverbundfügeteilen	16
2.11	Verformungsverhalten einer Klebschicht	17
2.12	Einfluss der Klebschichtdicke auf die Festigkeit	17
2.13	Bruchkraft bei variierender Klebschichtdicke	17
2.14	Einfluss der Überlappungslänge auf die Klebfestigkeit	18
2.15	Einfluss der Überlappungslänge auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht	19
2.16	Einfluss der Fügeteildicke auf die Klebfestigkeit	20
3.1	Klebschichten (grün) im Bauteil	21
3.2	Klebung am Beispiel eines Bauteils	22
3.3	Drucker-Prager-Fließkriterium und von-Mises Versagensspannung in der p-q-Ebene	27
3.4	Deviatorischer (oben) und hydrostatischer (unten) Spannungszustand im Bereich Lampenkasten	29
3.5	Pfad zur Auswertung der Spannungen	30
3.6	Deviatorischer Spannungszustand innerhalb der Klebschichten	31
3.7	Shell 181 Element	31
3.8	Elemente zur Klebschichtdiskretisierung bei Voith: Solid 186 (a) und Solid 187 (b)	32
4.1	Spannungsanteile in der Klebschicht	35
4.2	Verformung der Klebschicht bei starren Fügeteilen	35
4.3	Verformung der Klebschicht bei flexiblen Fügeteilen	36
4.4	Spannungsverlauf der Schub- (shear) und Zugspannungen (peel) in der Klebschicht für eine einschnittig überlappte Zugscherprobe	37
4.5	Spannungsverlauf der Zug- (peel) und Schubspannungen (shear) in der Klebschicht für eine zweifach überlappte Zugscherprobe	37

4.6	Spannungsverlauf (links: Schubspannungen, rechts: Normalspannungen) über die Klebschichtdicke am dritten Knoten vom Rand der Klebschicht entfernt	38
4.7	Spannungsverlauf der Schub (SMXY) und Zugspannungen (SMXX, SMYY) in der Klebschicht einer Arcan-Probe	39
4.8	Spannungsverlauf am Interface verglichen mit den Spannungsverläufen nach Goland und Reissner [47]	41
4.9	Spannungen mit und ohne spannungsfreien Zustand am freien Ende	42
4.10	Singularitäten in der Klebschicht	43
4.11	Prüfkörpergeometrien	45
4.12	Randbedingungen Einfach überlappt	46
4.13	Randbedingungen Doppelt gelascht	46
4.14	Lagenaufbau der Füge­teile	47
4.15	Vernetzung der Prüfkörper	49
4.16	Elementart Solid 185	50
4.17	Untersuchte Pfade der Prüfkörpergeometrien	51
4.18	Schubspannung τ_{xz} Vergleich verschiedener Prüfkörpergeometrien, Mitte der Klebschicht (CD)	52
4.19	Schubspannungen τ_{xz} Vergleich verschiedener Prüfkörpergeometrien, Interface der Klebschicht (EF)	53
4.20	Normalspannung σ_z Vergleich verschiedener Prüfkörpergeometrien, Mitte der Klebschicht (CD)	53
4.21	Normalspannung σ_z Vergleich verschiedener Prüfkörpergeometrien, Interface der Klebschicht (EF)	54
4.22	Randbedingung für die Biegebehinderung	56
4.23	Schub- und Normalspannungen für einen biegebehinderten, eingeschlitzten Prüfkörper und einen freien, eingeschlitzten Prüfkörper in der Mitte der Klebschicht (CD)	56
4.24	Schub- und Normalspannungen für einen biegebehinderten, eingeschlitzten Prüfkörper und einen freien, eingeschlitzten Prüfkörper am Interface der Klebschicht (EF)	57
4.25	Vergleich von Schub- und Normalspannungen, $d_K=0,5$ mm	59
4.26	Normal- (peel) und Schubspannungen (shear) für eine zweifach überlappte Probe verglichen mit Verläufen aus der Literatur	61
4.27	Schubspannungen τ_{xz} für variierende Klebschichtdicken d_K , Mitte der Klebschicht (CD), Einfach überlappter Prüfkörper	64
4.28	Schubspannungen τ_{xz} für variierende Klebschichtdicken d_K , Grenzschicht der Klebschicht (EF), Einfach überlappter Prüfkörper	64
4.29	Normalspannungen σ_z für variierende Klebschichtdicken d_K , Mitte der Klebschicht (CD), Einfach überlappter Prüfkörper	65
4.30	Normalspannungen σ_z für variierende Klebschichtdicken d_K , Grenzschicht der Klebschicht (EF), Einfach überlappter Prüfkörper	66
4.31	Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Klebschichtdicken, einfach überlappte Probe	66
4.32	Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Klebschichtdicken, zweifach überlappte Probe	67
4.33	Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Klebschichtdicken, biegebehinderter Prüfkörper	68
4.34	Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Überlappungslängen l_{ij} , einfach überlappte Prüfkörper	69

4.35	Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Überlappungslängen $l_{\ddot{U}}$, zweifach überlappter Prüfkörper	70
4.36	Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Überlappungslängen $l_{\ddot{U}}$, biegebehinderter Prüfkörper	71
4.37	Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Fügeiteildicken d_F , einfach überlappter Prüfkörper	73
4.38	Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Fügeiteildicken d_F , zweifach überlappter Prüfkörper	74
4.39	Verformung einer zweifach überlappten Prüfkörpers	74
4.40	Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Fügeiteildicken d_F , biegebehinderter Prüfkörper	75
5.1	Vernetzung der Prüfkörper analog zur Methodik von Voith	78
5.2	Deviatorischer Spannungsverlauf innerhalb der Klebschichten	79
5.3	Normierter deviatorischer Spannungsverlauf	80
5.4	Hydrostatischer Spannungsverlauf innerhalb der Klebschichten	81
5.5	Beispielhafte Verläufe für negative hydrostatische Spannungsverläufe im Bauteil . .	82
5.6	Beispielhafte Verläufe für einen Wechsel von positiven zu negativen (oder umgekehrt) hydrostatischen Spannungen im Bauteil	83
5.7	Beispielhafte Verläufe für positive hydrostatische Spannungsverläufe im Bauteil . .	83
5.8	Normierter hydrostatischer Spannungsverlauf	84
5.9	Deviatorischer Spannungsverlauf innerhalb der Klebschichten	86
5.10	Abgeleitete Prüfkörpergeometrie	88
5.11	Vorgehen der Methodik	89
5.12	Vorgehen für die deviatorischen Spannungsverläufe	90
5.13	Vorgehen für das Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungsverläufen	90
5.14	Vorgehen für die hydrostatischen Spannungsverläufe	90
6.1	Doppelt gelaschter Prüfkörper nach ASTM D 3528 Typ B	92
6.2	Fertigung der Klebschicht der doppelt gelaschten Prüfkörper	92
6.3	Nahaufnahme der Klebschicht mit Klebschichtdicke und Inhomogenitäten	93
6.4	Schlitze der Prüfkörper	94
6.5	Kraft-Weg-Diagramm für ASTM 3528 Typ B Proben	95
6.6	Kraft-Weg-Diagramm festgelegte Prüfkörpergeometrie	95
6.7	Bruchflächen der Prüfkörper	97
6.8	Klebschicht unter dem Mikroskop	97
7.1	Deviatorische Spannungsverläufe	101
7.2	Hydrostatische Spannungsverläufe	102
7.3	Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungsverläufen	103
7.4	Spannungen der gesamten Klebschicht, doppelt gelaschter Prüfkörper	104
7.5	Spannungen der gesamten Klebschicht, eingeschlitzter Prüfkörper	104
7.6	Verlauf der maximalen Schubspannung τ_{max}	106
7.7	Maximale Schubspannungen nach Tresca (Schubspannungshypothese) in den Klebschichten	107
A.1	Deviatorischer (links) und hydrostatischer (rechts) Spannungszustand im Bereich Lampenkasten	119
A.2	Deviatorischer Spannungszustand innerhalb des Bereichs Lampenkasten	119

A.3	Hydrostatischer Spannungszustand innerhalb des Bereichs Lampenkasten	120
A.4	Deviatorischer (links) und hydrostatischer (rechts) Spannungszustand im Bereich Bugklappe Oben	121
A.5	Spannungsverläufe Bugklappe Oben	121
A.6	Deviatorischer (links) und hydrostatischer (rechts) Spannungszustand im Bereich Bugklappe Unten	122
A.7	Spannungsverläufe Bugklappe Unten	122
A.8	Netzkonvergenzstudie, einfach überlappte Probe, $d_K=0,5$ mm	123
A.9	Netzkonvergenzstudie, einfach überlappte Probe, $d_K=5$ mm	123
A.10	Netzkonvergenzstudie, zweifach überlappte Probe, $d_K=0,5$ mm	123
A.11	Netzkonvergenzstudie, zweifach überlappte Probe, $d_K=5$ mm	123
A.12	Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\bar{U}}$, Mitte der Klebschicht (CD), einfach überlappter Prüfkörper	125
A.13	Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\bar{U}}$, Grenzschicht der Klebschicht (EF), einfach überlappter Prüfkörper	125
A.14	Spannungen für variierende Fügeteildicken d_F , Mitte der Klebschicht (CD), einfach überlappter Prüfkörper	126
A.15	Spannungen für variierende Fügeteildicken d_F , Grenzschicht der Klebschicht (EF), einfach überlappter Prüfkörper	126
A.16	Spannungen für variierende Klebschichtdicken d_K , Mitte der Klebschicht (CD), zweifach überlappter Prüfkörper	127
A.17	Spannungen für variierende Klebschichtdicken d_K , Grenzschicht der Klebschicht (EF), zweifach überlappter Prüfkörper	127
A.18	Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\bar{U}}$, Mitte der Klebschicht (CD), zweifach überlappter Prüfkörper	128
A.19	Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\bar{U}}$, Grenzschicht der Klebschicht (EF), zweifach überlappter Prüfkörper	128
A.20	Spannungen für variierende Fügeteildicken d_F , Mitte der Klebschicht (CD), zweifach überlappter Prüfkörper	129
A.21	Spannungen für variierende Fügeteildicken d_F , Grenzschicht der Klebschicht (EF), zweifach überlappter Prüfkörper	129
A.22	Spannungen für variierende Klebschichtdicken d_K , Mitte der Klebschicht (CD), biegebehinderter Prüfkörper	130
A.23	Spannungen für variierende Klebschichtdicken d_K , Grenzschicht der Klebschicht (EF), biegebehinderte Prüfkörper	130
A.24	Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\bar{U}}$, Mitte der Klebschicht (CD), biegebehinderter Prüfkörper	131
A.25	Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\bar{U}}$, Grenzschicht der Klebschicht (EF), biegebehinderter Prüfkörper	131
A.26	Spannungen für variierende Fügeteildicken d_F , Mitte der Klebschicht (CD), biegebehinderter Prüfkörper	132
A.27	Spannungen für variierende Fügeteildicken d_F , Grenzschicht der Klebschicht (EF), biegebehinderter Prüfkörper	132
A.28	Spannungsverläufe einfach überlappter Prüfkörper, $d_F=8$ mm	135
A.29	Spannungsverläufe einfach überlappter Prüfkörper, $d_F=12$ mm	136
A.30	Spannungsverläufe zweifach überlappter Prüfkörper, $d_F=4$ mm	137
A.31	Spannungsverläufe zweifach überlappter Prüfkörper, $d_F=8$ mm	138
A.32	Spannungsverläufe zweifach überlappter Prüfkörper, $d_F=12$ mm	139

A.33 Spannungsverläufe doppelt gelaschter Prüfkörper, $d_F=4$ mm	140
A.34 Spannungsverläufe doppelt gelaschter Prüfkörper, $d_F=8$ mm	141
A.35 Spannungsverläufe doppelt gelaschter Prüfkörper, $d_F=12$ mm	142
A.36 Spannungsverläufe biegebehinderter Prüfkörper, $d_F=4$ mm	143
A.37 Spannungsverläufe biegebehinderter Prüfkörper, $d_F=8$ mm	144
A.38 Spannungsverläufe biegebehinderter Prüfkörper, $d_F=12$ mm	145
A.39 Spannungsverläufe eingeschlitzter Prüfkörper, $d_F=4$ mm	146
A.40 Spannungsverläufe eingeschlitzter Prüfkörper, $d_F=8$ mm	147
A.41 Spannungsverläufe eingeschlitzter Prüfkörper, $d_F=12$ mm	148
A.42 Klebprotokoll ASTM 3528 Verklebung 1	149
A.43 Klebprotokoll ASTM D 3528 Verklebung 2	149
A.44 Laminatplan Doppler ($d_F=4$ mm) ASTM D 3528 Typ B Prüfkörper	150
A.45 Laminatplan mittleres Füge teil ($d_F=8$ mm) ASTM D 3528 Typ B Prüfkörper	150
A.46 Klebprotokoll festgelegte Prüfkörpergeometrie	151
A.47 Laminatplan festgelegte Prüfkörpergeometrie ($d_F=4$ mm)	151
A.48 Messprotokoll ASTM 3528 Typ B Prüfkörper	152
A.49 Messprotokoll festgelegte Prüfkörpergeometrie	152

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht Normen für Zugscherversuche	9
2.2	Übersicht Prüfkörpergeometrien	13
3.1	Materialdaten UD Einzelschicht	23
3.2	Materialdaten Oldopal 0110	23
3.3	Fügeteilvernetzung Beispielbereich	32
3.4	Geometrische Abmessung und Vernetzung der Klebschicht	33
3.5	Einstellung der Kontaktmodellierung	33
4.1	Übersicht Prüfkörper für Simulation	40
4.2	Geometrische Abmessungen der verschiedenen Prüfkörpergeometrien	46
4.3	Elementgrößen	48
4.4	Kräfte für Simulation	52
4.5	Geometrische Abmessungen der Prüfkörper für die Simulation der Biegebehinderung	55
4.6	Materialdaten für das analytische Modell	58
4.7	Übersicht Prüfkörper für weitere Untersuchungen	62
4.8	Kräfte für unterschiedliche Klebschichtdicken d_K	63
4.9	Kräfte für unterschiedliche Überlappungslängen l_U	69
4.10	Übersicht über den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Spannungsspitzen der untersuchten Prüfkörpergeometrien	76
5.1	Prüfkörpergeometrien und geometrische Abmessungen	77
5.2	Diskretisierungsparameter für das Ableiten der Prüfkörpergeometrie	78
5.3	Mittlere Abweichung $\overline{d_{Dev}}$ des deviatorischen, normierten Spannungsverlaufs von Bauteil und Prüfkörper	81
5.4	Mittlere Abweichung $\overline{d_{Hydro}}$ der hydrostatischen, normierten Spannungsverläufe von Bauteil und Prüfkörper	85
5.5	Mittlere Abweichung $\overline{d_{pq}}$ des hydrostatischen Spannungsverlaufs von Bauteil und Prüfkörper	86
5.6	Ranking der betrachteten Prüfkörpergeometrien	87
5.7	Prüfkörper mit geringstem $\overline{d_{Ges}}$	88
6.1	Ergebnisse der Versuchsreihen	96
7.1	Kräfte für die Simulation der Prüfkörper	100
7.2	Übereinstimmung der Verläufe	105
A.1	Lampenkasten 1-3 Fügeteilvernetzung	120
A.2	Geometrische Abmessungen der Klebschichten im Bereich Lampenkasten	120
A.3	Vernetzung der Klebschichten im Bereich Lampenkasten	120
A.4	Bugklappe Oben Fügeteilvernetzung	121

A.5 Geometrische Abmessung und Vernetzung der Klebschicht Bugklappe Oben	121
A.6 Bugklappe Unten Fügeteilvernetzung	122
A.7 Geometrische Abmessung und Vernetzung der Klebschicht Bugklappe Unten	122
A.8 Ergebnisse für alle betrachteten Prüfkörperkonfigurationen	133
A.9 Fortsetzung Tabelle A.8	134
A.10 Fertigungsparameter ASTM 3528 Typ B Proben	150
A.11 Fertigungsparameter festgelegte Prüfkörpergeometrie	151
A.12 Prüfergebnis ASTM 3528 Typ B Proben	153
A.13 Prüfergebnis festgelegte Prüfkörpergeometrie	153

Nomenklatur

1. Symbole

<i>Zeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
A	Querschnittsfläche	mm ²
A	Parameter für Modell nach Hart-Smith	MPa
A_2	Parameter für Modell nach Hart-Smith	MPa
a	Parameter für Drucker-Prager Materialmodell	-
B	Parameter für Modell nach Hart-Smith	MPa
b	Parameter für Drucker-Prager Materialmodell	-
b	Breite	mm
C_2	Parameter für Modell nach Hart-Smith	MPa
c	$\frac{l}{2}$	mm
D	Parameter für Modell nach Hart-Smith	Nmm
d	Dicke	mm
d	Parameter für Drucker-Prager Materialmodell	MPa
d	Abstand	-
$\frac{d_{Dev}}{d_{Dev}}$	Gesamtabstand der deviatorischen Spannung	-
	Durchschnittlicher Abstand der deviatorischen Spannung	-
d_K	Klebschichtdicke	mm
d_{Ges}	Gesamtabstand	-
d_F	Fügeteildicke	mm
d_{F1}	Fügeteildicke	mm
d_{F2}	Fügeteildicke	mm
$\frac{d_{Hydro}}{d_{Hydro}}$	Gesamtabstand der hydrostatischen Spannung	-
	Durchschnittlicher Abstand der hydrostatischen Spannung	-
d_{pq}	Gesamtabstand Verhältnis hydrostatische zu deviatorisch deviatorisch	
$\overline{d_{pq}}$	Durchschnittlicher Abstand Verhältnis hydrostatisch zu deviatorisch	-
E	E-Modul	MPa
E_F	E-Modul Fügeteil	MPa
E_K	E-Modul Klebschicht	MPa
E_x	E-Modul in x-Richtung	MPa
E_y	E-Modul in y-Richtung	MPa
E_z	E-Modul in z-Richtung	MPa
F	Kraft	N
\overline{F}	mittlere Kraft	N

F_b	Bruchkraft	N
G	Schubmodul	MPa
G_{xy}	Schubmodul in der xy-Ebene	MPa
G_{xz}	Schubmodul in der xz-Ebene	MPa
G_{yz}	Schubmodul in der yz-Ebene	MPa
I	Invariante des Spannungstensors	MPa
I_1	erste Invariante des Spannungstensors	MPa
i	Index	
J	Invariante des Spannungsdeviators	MPa
J_2	zweite Invariante des Spannungsdeviators	MPa
l	Länge	mm
l_D	Dopplertlänge	mm
l_{El}	Elementkantenlänge	mm
l_E	Einspannlänge	mm
l_F	Fügeteillänge	mm
l_{ges}	Gesamtlänge	mm
l_S	Schlitzlänge	mm
$l_{\ddot{U}}$	Überlappungslänge	mm
M	Moment	Nm
M	Momentenfaktor für Modell nach Hart-Smith	N
M_b	Biegemoment	Nm
p	hydrostatischer Spannungsanteil	MPa
p_i	hydrostatischer Spannungsanteil an Punkt i	MPa
p_{min}	minimaler hydrostatischer Spannungsanteil	MPa
p_t	Parameter für Drucker-Prager Materialmodell	MPa
q	deviatorischer Spannungsanteil	MPa
q_i	deviatorischer Spannungsanteil an Punkt i	MPa
q_{max}	maximaler deviatorischer Spannungsanteil	MPa
n	Anzahl	-
n_{El}	Elementanzahl	-
$n_{ElRandFein}$	Elementanzahl feiner Randereich Fügeteil	-
$n_{ElRandGrob}$	Elementanzahl grober Randereich Fügeteil	-
$n_{ElRandKlebschicht}$	Elementanzahl Randbereich Klebschicht	-
R_m	Zugfestigkeit	MPa
r	Radius	mm
r_a	Außenradius	mm
r_i	Innenradius	mm
SM_{XX}	Normalspannung in x-Richtung	N
SM_{XY}	Schubspannung in der xy-Ebene	N
SM_{YY}	Normalspannung in y-Richtung	N
S	Spannungstensor	-
s	Fügeteildicke	mm
s	Standardabweichung	-
T	Torsionskraft	N
T	Kraft	N
u	Verschiebung in x-Richtung	-
v	Verschiebung in z-Richtung	-
v	Variationskoeffizient	-

W	Widerstandsmoment	Nm
x	x - Richtung	-
y	y - Richtung	-
z	z - Richtung	-
β	Parameter für Drucker-Prager Materialmodell	°
γ	Einspannwinkel	°
γ	Winkel der Klebschichtverzerrung	°
γ_1	Winkel der Klebschichtverzerrung in Adhäsionsbereichen	°
γ_2	Winkel der Klebschichtverzerrung in Kohäsionsbereichen	°
ε	Dehnung	%
λ'	Parameter für Modell nach Hart-Smith	1/mm
ν	Poisson-Zahl	
ν_k	Poisson-Zahl Klebschicht	
ν_{xy}	Poisson-Zahl in der xy-Ebene	-
ν_{xz}	Poisson-Zahl in der xz-Ebene	-
ν_{yz}	Poisson-Zahl in der yz-Ebene	-
ξ	Parameter für Modell nach Hart-Smith	1/mm
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Normalspannung	MPa
σ_1	maximale Hauptnormalspannung	MPa
σ_2	mittlere Hauptnormalspannung	MPa
σ_3	minimale Hauptnormalspannung	MPa
σ_{H1}	erste Hauptnormalspannung	MPa
σ_{H2}	zweite Hauptnormalspannung	MPa
σ_{H3}	dritte Hauptnormalspannung	MPa
$\sigma_{vTresca}$	Vergleichsspannung nach Tresca	MPa
σ_{vgeh}	Vergleichsspannung Gestaltänderungsenergiehypothese	MPa
σ_x	Normalspannung in x - Richtung	MPa
σ_y	Normalspannung in y - Richtung	MPa
σ_z	Normalspannung in z - Richtung	MPa
τ	Schubspannung	MPa
$\bar{\tau}$	mittlere Schubspannung	MPa
τ_{avg}	mittlere Schubspannung	MPa
τ_b	Bruchspannung	MPa
τ_{bm}	gemittelte Bruchspannung	MPa
τ_{bmax}	maximale Bruchspannung	MPa
τ_m	mittlere Schubspannung	MPa
τ_{max}	maximale Schubspannung	MPa
τ_{xy}	Schubspannung in der xy - Ebene	MPa
τ_{xz}	Schubspannung in der xz - Ebene	MPa
τ_{yz}	Schubspannung in der yz - Ebene	MPa
τ_ε	Schubspannung aus Fügeteildehnung	MPa
τ_v	Schubspannung aus Fügeteilverchiebung	MPa

χ	Parameter für Modell nach Hart-Smith	1/mm
--------	--------------------------------------	------

2. Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>CZM</i>	Cohesive Zone Modeling
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung
<i>EN</i>	Europäische Norm
<i>FEM</i>	Finite-Elemente-Methoden
<i>FEA</i>	Finite-Elemente-Analysen
<i>FKV</i>	Faser-Kunststoff-Verbund
<i>FVG</i>	Faservolumengehalt
<i>ICE</i>	Intercity-Express

1 Einleitung

Im Schienenfahrzeugbau nimmt die Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) kontinuierlich zu, denn diese bieten ein erhebliches Einsparpotenzial gegenüber der Herstellung mit Metallstrukturen [53]. Neben der Gewichtsreduktion ist auch die Komplexität der Bauteile ein entscheidender Grund für den Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen. Deshalb werden Bugnasen von Schienenfahrzeugen seit längerer Zeit auch als FKV-Bauteile ausgeführt. Seit 2002 [80] liefert Voith neben Kupplungen für Schienenfahrzeuge auch komplette Frontend-Systeme. Zunächst wurden die Komponenten als Zugkaufteile bezogen, seit mehreren Jahren werden nun Bugnasen, Bugklappen und weitere Bauteile aus glasfaserverstärkten Kunststoffen am Standort in Salzgitter konstruiert und in Eigenfertigung hergestellt. Zu den Kunden zählen inzwischen nahezu alle großen Hersteller von Schienenfahrzeugen mit namhaften Projekten, wie dem EC 250 (Stadler) oder dem ICE 4 (Siemens). Als Fügeverfahren für Faserverbundstrukturen eignet sich besonders das Kleben [74]. Der Grund hierfür liegt vor allem in der flächigen Kraftübertragung und der Möglichkeit, verschiedene Werkstoffkombinationen stoffschlüssig zu verbinden. Außerdem werden die Bauteile nicht lokal durch Löcher geschwächt, was bei FKV-Bauteilen zu Festigkeitseinbußen führen wird. Deshalb werden Klebungen in vielen Leichtbaudisziplinen eingesetzt und sind auch bei der Herstellung von Frontend-Komponenten bei Voith zu finden.

1.1 Problemstellung

Klebungen werden im Schienenfahrzeugbau nach der DIN 6701 [37] realisiert. In Teil 3 dieser Norm, "Leitfaden zur Konstruktion und Nachweisführung von Klebverbindungen im Schienenfahrzeugbau", wird der gesamte Auslegungsprozess einer Klebeverbindung beschrieben. Dabei soll nach der Ermittlung der Beanspruchung nachgewiesen werden, dass die **Beanspruchung** < **Beanspruchbarkeit** sein muss. Es ist also entscheidend, die Beanspruchbarkeit der Klebeverbindung möglichst genau zu bestimmen. Zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit werden in der DIN 6701 verschiedene Prüfkörpergeometrien vorgegeben (Abbildung 1.1). Für höherfeste Klebstoffe soll dabei für Metalle und homogene Polymerwerkstoffe mit einer einfach überlappten Zugscherprobe nach der DIN 1465 [38] (Abbildung 1.1a) getestet werden. Für niedrigfeste Klebstoffe können eingeschlitzte Prüfkörper (Abbildung 1.1b) verwendet werden. Für Fügebauteile aus Faserverbunden können Prüfkörper nach der ASTM D 3528 [14] entweder zweifach überlappt (Abbildung 1.1c) oder doppelt gelascht (Abbildung 1.1d) ausgeführt sein.

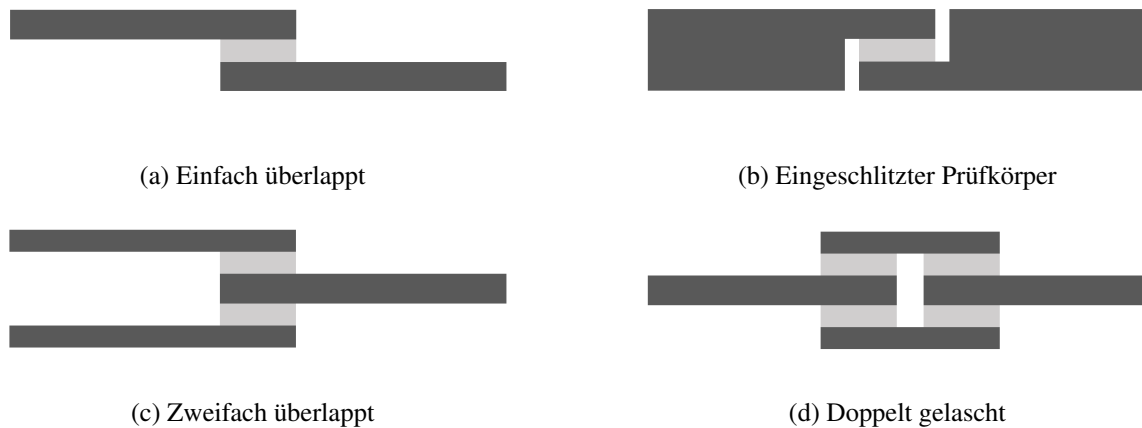


Abbildung 1.1: Prüfkörpergeometrien, definiert innerhalb der DIN 6701-3, dunkel: Füge­teil, hell: Klebschicht

Eine Klebung kann als Verbund der Füge­teile und des Klebstoffs angesehen werden [48]. Für diesen Verbund gibt es keine übertragbaren Festigkeiten, die aus den Herstellerangaben entnommen werden können. Jede Änderung eines Parameters (zum Beispiel geometrisch oder werkstoffabhängig) der Klebung führt zu einem veränderten Verbund mit veränderten Eigenschaften, für welchen die Festigkeiten erneut zu bestimmen sind. Aktuell werden bei Voith sowohl die beiden Prüfkörpergeometrien aus der ASTM D 3528 (zweifach überlappt, doppelt gelascht) als auch - in biegebehinderter Form - der eingeschlitzte Prüfkörper (Abbildung 1.1b) zur Ermittlung der Zugscherfestigkeit verwendet. Dabei zeigte sich, dass für unterschiedliche Prüfkörpergeometrien die mittlere Festigkeit der Klebungen stark variierten.

Außerdem treten in den Klebschichten neben den Schubspannungen auch Normalspannungen auf (Habenicht [48] und Rasche [72] liefern hierfür eine gute Übersicht). Diese Spannungsanteile besitzen ihr Maximum an den Klebschichtenden (Abbildung 1.2).

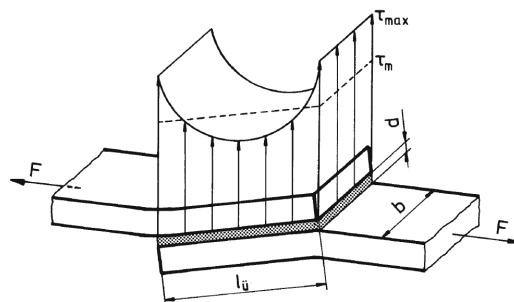


Abbildung 1.2: Spannungsspitzen in der Klebschicht [48, S. 419]

In Kombination führen diese beiden Anteile zu einer Schälbelastung, welche für Klebungen ungünstig ist [44]. Diese Problematik ist bereits normativ in der ASTM D 4896 [18] erfasst und thematisiert. Das Versagen der Klebschicht im Prüfkörper wird dabei nicht durch eine globale Überhöhung der

Spannungen in der gesamten Klebschicht induziert, sondern durch die Spannungsspitzen an singulären Punkten im Randbereich der Klebschicht.

Die geometrische Gestaltung (Überlappungslänge, Klebschichtdicke, Fügeteildicke) der Prüfkörper hat einen direkten Einfluss auf die Höhe der Spannungsspitzen, sowohl von Schubspannungen, als auch Normalspannungen und beeinflusst die Klebfestigkeit damit erheblich.

Desweiteren ist nicht bekannt, wie der Spannungszustand in der Klebschicht der Prüfkörpergeometrie mit dem Spannungszustand in Bauteilen übereinstimmt. Dies ist ein Problem bei der Bestimmung der Zugscherfestigkeit mit den aktuell verwendeten Prüfkörpern, weshalb diese als Festigkeit für die Auslegung von Bauteilen nur bedingt geeignet ist. Aktuell gibt es kein Verfahren, welches den Spannungszustand aus den Bauteilen mit den Spannungszuständen in den Prüfkörpern vergleicht.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur genaueren Bestimmung der Klebfestigkeit von hochfesten GFK-Kleblösungen unter Beachtung der komplexen Spannungsverläufe, sowohl im Bauteil als auch im Prüfkörper. Anhand einer vergleichenden Betrachtung dieser Bauteile soll ein Prüfkörper definiert werden, welcher geeignet ist, die Spannungen im Bauteil abzubilden. Die genauen Arbeitsschritte werden im folgenden Abschnitt 1.2 dargestellt.

1.2 Aufbau und Vorgehensweise

Folgende Fragestellungen werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht und geklärt:

Wie können Kleblösungen getestet werden?

Kapitel 2 gibt einen Überblick über das Kleben von Faserverbundstrukturen und die Besonderheiten dieses Fügeverfahrens. Anschließend werden verschiedene Arten von Prüfungen zur Bestimmung einer Zugscherfestigkeit aufgezeigt. Desweiteren erfolgt eine erste Auswahl der in dieser Arbeit weiter untersuchten Prüfkörpergeometrien.

Welche Spannungen treten in Kleblösungen in Frontend-Systemen von Voith auf?

Ziel von Kapitel 3 ist die Herausarbeitung der Spannungszustände in Kleblösungen von Frontend-Systemen von Voith. Als Ergebnis dieses Kapitels wird ein Spannungszustand definiert, für welchen die Methodik angewendet und eine Prüfkörpergeometrie abgeleitet wird.

Meilenstein:

- Definition des Spannungszustandes für die Auslegung

Wie sind die Spannungszustände in unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien?

In Kapitel 4 werden die verschiedenen Prüfkörper von Zugscherversuchen einer vergleichenden Betrachtung unterzogen. Ausgewählte Prüfkörper werden numerisch modelliert und es werden geometrische Parameter identifiziert, welche für das Ableiten der Prüfkörpergeometrie variiert werden können.

Meilensteine:

- Spannungsanalyse der Prüfkörper
- Identifizierung von veränderbaren Parametern

Wie können die Spannungen aus den Klebungen von Voith durch einen Prüfkörper abgebildet werden?

In Kapitel 5 werden die Spannungszustände aus Kapitel 3 mit den Spannungszuständen der Prüfkörper aus Kapitel 4 verglichen. Es wird eine Prüfkörpergeometrie festgelegt, welche den Spannungszustand des Bauteils bestmöglich abbildet.

Meilensteine:

- Erarbeitung einer Methodik
- Definition einer Prüfkörpergeometrie

Wie erfolgt die Prüfung und die Fertigung der Proben?

Kapitel 6 zeigt die Fertigung und das Testen der Prüfkörper nach bisheriger Prüfnorm von Voith und nach der in Kapitel 5 definierten Prüfkörpergeometrie.

Meilensteine:

- Fertigung und Test der aktuell bei Voith verwendeten Prüfkörper
- Fertigung und Test der definierten Prüfkörpergeometrie

Wie erfolgt die Auswertung der Prüfkörper?

Die Auswertung der Prüfkörper erfolgt in Kapitel 7 über die Berechnung mittels FEM. Diese Berechnung wird mit derselben Diskretisierung durchgeführt, wie die Klebungen im Bauteil gerechnet werden. Anschließend wird diese Auswertung einer Beurteilung unterzogen und die Ergebnisse werden interpretiert.

Meilensteine:

- Auswertung der Prüfkörper

Was wurde in dieser Arbeit erarbeitet und welche Schritte folgen?

In Kapitel 8 werden die einzelnen Schritte dieser Arbeit zusammengefasst und es wird ein Ausblick gegeben.

Abbildung 1.3 zeigt den Aufbau der Arbeit und sowie die Themen, die in den einzelnen Kapiteln bearbeitet werden.

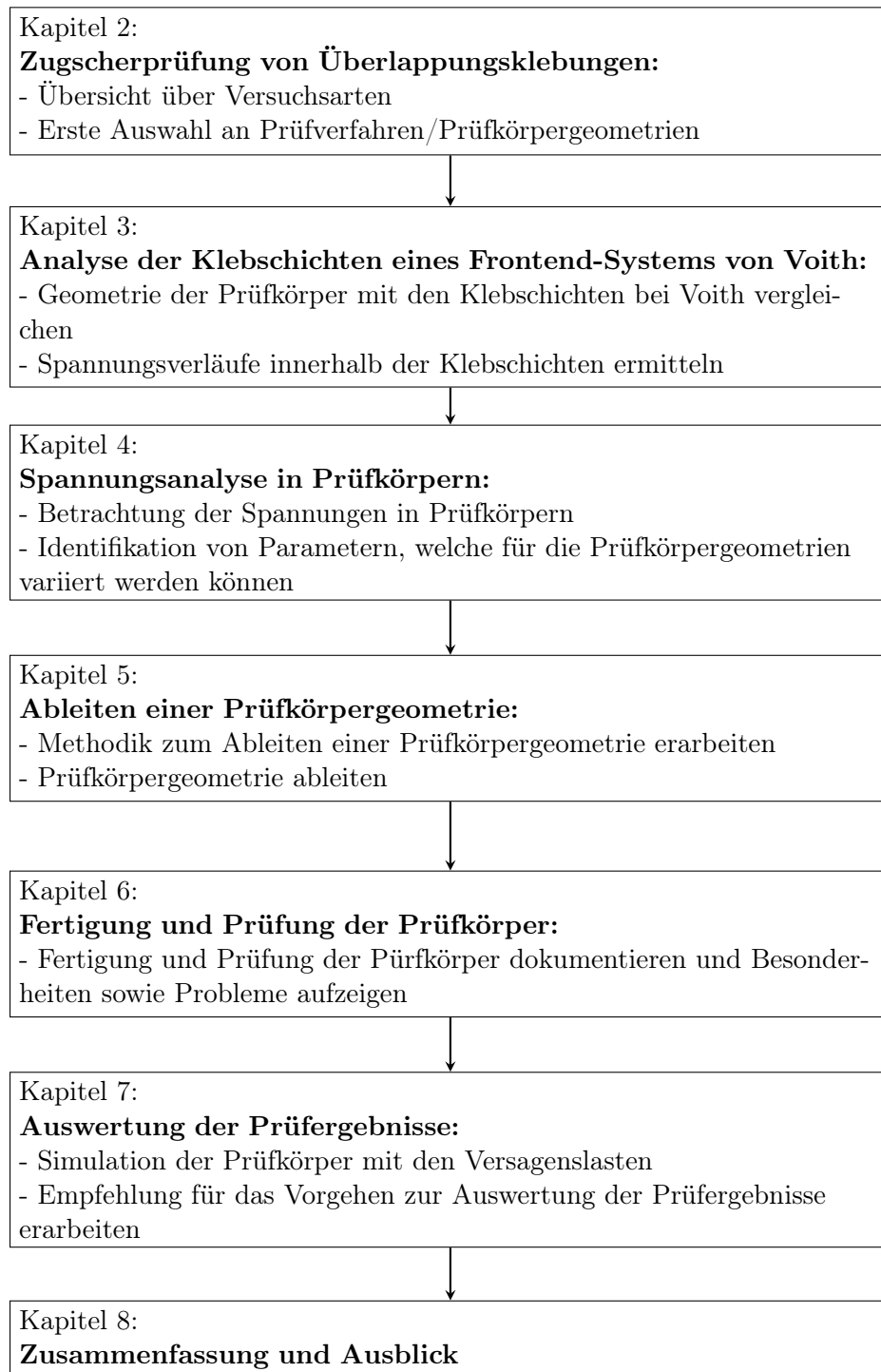


Abbildung 1.3: Aufbau der Arbeit

2 Zugscherprüfung von Überlappungsklebungen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Klebens kurz erläutert. Dies beinhaltet das Kleben als Fügeverfahren und die Belastungsarten von Klebungen. Daraufhin erfolgt eine Übersicht über die verschiedenen Prüfkörpergeometrien und Versuchsarten zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit. Ziel dieses Abschnitts ist es, eine Übersicht über die Möglichkeiten zur Prüfung von Klebungen unter einer Schubbelastung zu erstellen. Außerdem soll eine erste Bewertung der Prüfkörper stattfinden. Prüfkörpergeometrien werden ausgewählt, die für eine weitere Betrachtung verwendet werden. Zusätzlich wird die Bestimmung der Festigkeit sowie die unterschiedlichen Bruchbilder als Teil der Prüfung von Klebungen aufgezeigt. Abschließend werden anhand des Beispiels von einfach überlappten Prüfkörpern der Einfluss von geometrischen Parameter auf die Festigkeit der Klebung dargestellt.

2.1 Grundlagen des Klebens

Das Kleben ist als stoffschlüssiges Fügeverfahren definiert, bei welchem die Verbindung der Fügeteile mittels eines zugegebenen Werkstoffs, in diesem Fall der Klebstoff, erfolgt. Weitere stoffschlüssige Verfahren sind das Schweißen oder das Löten. Andere Fügeverfahren können als formschlüssig (Falzen, Verzahnen) oder kraftschlüssig (Pressen, Schrauben, Nieten) beschrieben werden [49]. Rasche [72] gibt einen guten Überblick über die Charakterisierung der Fügetechnik Kleben und führt außerdem eine vergleichende Bewertung der Fügetechniken durch.

Klebungen können allgemein als Verbundsystem zweier Fügeteile mit der Klebschicht zwischen den Fügeteilen angesehen werden. Die Gesamtfestigkeit setzt sich dabei aus mehreren Einzelfestigkeiten zusammen:

- Festigkeit der Fügeteile
- Festigkeit der Grenzschichten zwischen Fügeteil und Klebschicht
- Festigkeit der Klebschicht

Die Festigkeit der Fügeteile ist dabei durch die Materialauswahl vorgegeben. Faser-Kunststoff-Verbunde können durch ein interlaminares Versagen einen größeren Einfluss auf die Festigkeit der Klebung haben, als dies bei metallischen Fügeteilwerkstoffen der Fall ist. Die Festigkeit der Grenzschichten wird durch die Adhäsionskräfte (Haftungskräfte) bestimmt, wobei mit Adhäsion das Haften von Stoffen

beschrieben wird. Die Festigkeit der Klebschicht ist durch Kohäsionskräfte bestimmt; Kohäsion steht dabei für die innere Festigkeit eines Stoffes (Abbildung 2.1). [48]

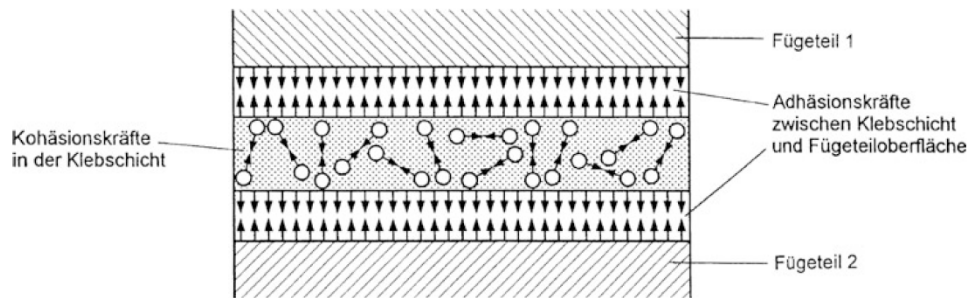


Abbildung 2.1: Adhäsions- und Kohäsionsbereiche in einer Klebschicht [49, S. 76]

Bei der Beurteilung der Festigkeit einer Klebung sind viele verschiedene Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Die Werkstoffauswahl hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Festigkeit der Klebung. Diese ist dabei von der Zugfestigkeit (R_m) und dem E-Modul (E_F) des Fügeteils abhängig. Die Einflussparameter der Klebschicht sind der E-Modul E_K , der Schubmodul G_K , die Querkontraktionszahl ν_K und das Spannungs-Gleitungsverhalten. Diese Eigenschaften werden vom chemischen Aufbau und den Aushärtebedingungen bestimmt, welche einen Einfluss auf die Adhäsion und Kohäsion des Klebstoffs haben. Neben diesen Einflussparametern hängt die Festigkeit der Klebung auch von der geometrischen Gestaltung und der Beanspruchungsart ab. Unter die geometrischen Parameter fallen die Überlappungslänge $l_{\bar{u}}$, die Überlappungsbreite b , die Fügeteildicke d_F und die Klebschichtdicke d_K . Auf den Einfluss dieser Parameter wird in Abschnitt 2.4 näher eingegangen. Die Art der Beanspruchung ist vor allem zeitabhängig (statisch, dynamisch) und kann entweder aus mechanischen, physikalischen oder chemischen Beanspruchungsarten, respektive einer Kombination dieser, bestehen. Bei der Konstruktion der Klebung muss also auf die geometrischen Einflüsse sowie auf die Beanspruchungsarten Rücksicht genommen werden, um diese klebgerecht zu gestalten.

Klebung können unter den in Abbildung 2.2 dargestellten Beanspruchungsarten belastet werden.

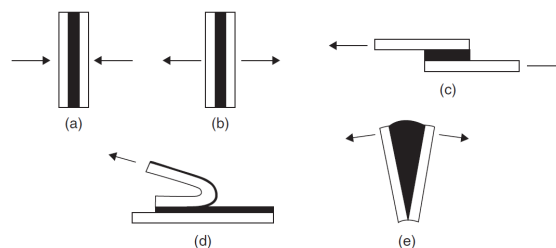


Abbildung 2.2: Beanspruchungsarten von Klebverbindungen: (a): Druck, (b): Zug, (c): Scherung/Schub, (d): Schälung, (e): Spaltung [44, S. 184]

Besonders Druck- (a) und Zugbelastungen (b) führen zu einem homogenen Spannungsverlauf in der

Klebschicht. Eine Vergrößerung der Klebfläche ist unter Beachtung dieser Belastungsarten für dünnwandige Leichtbauelemente allerdings nur schwer möglich. Deshalb wird versucht, überlappte Klebverbindungen zu erzeugen, welche die Last in der Klebschichtebene unter Schubbelastung übertragen (c). Weiterhin können Klebungen noch auf Schälung (d, kombinierte Zug- / Schubbelastung) und Spaltung (e) belastet werden. Allerdings erzeugen diese Belastungen hohe Spannungsspitzen, belasten nur einen geringen Bereich der Klebung und führen leicht zum Versagen. Deshalb sollten diese Belastungen möglichst vermieden werden. [44, 48]

2.2 Versuchsarten zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit

Die Komplexität des Klebens als Fügeverfahren zeigt sich bei der Prüfung von Klebungen. Während in der grundlegenden Ingenieursliteratur zum Beispiel für Schrauben, abhängig von der Anwendungsart, genaue Auslegungswerte zu finden sind, sind diese für das Kleben nicht einheitlich zu bestimmen. Eine Vielzahl von Parametern (Werkstoffe, geometrische Abmessungen) verändert die Eigenschaften der Klebung und führt dazu, dass veränderte Randbedingungen die Prüfergebnisse beeinflussen. Eine einheitliche Bestimmung der Festigkeit von Klebungen ist deshalb nicht möglich und muss die spezifischen Voraussetzungen der Klebung berücksichtigen.

Da die meisten Klebungen einer Schub- beziehungsweise Scherbelastung ausgesetzt werden, muss die Festigkeit der Klebung unter dieser Belastung bestimmt werden. Dies geschieht bei der Zugscherprüfung, indem die Füge Teile auf Zug belastet werden und durch die Überlappung in der Klebschicht eine Schubbelastung hervorgerufen wird. Für die Prüfung der Zugscherfestigkeit existieren, wie in Kapitel 1 bereits gezeigt, vier Prüfkörpergeometrien, welche ein breites Anwendungsgebiet besitzen. Diese Prüfkörpergeometrien sind aufgrund der einfachen Fertigung weit verbreitet und deshalb in vielen unterschiedlichen Normen definiert. Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Normen.





Die Normen mit Füge teilen aus Holz sind hier zusätzlich aufgeführt, da Holz ebenfalls wie FKV-Füge teile eine Faserstruktur besitzt.

Die einfach überlappten Prüfkörper sowie die eingeschlitzten Platten erzeugen im Prüfkörper ein Biegemoment, was zu Normalspannungen und damit ungünstigen Schälbelastungen führen kann. Dieses Biegemoment wird durch die Verwendung der zweifach überlappten und doppelt gelaschten Prüfkörper unterdrückt, weshalb diese Prüfkörper auch häufig Anwendung findet.

Besonders die Prüfung nach ASD-STAN pr EN 6060 ist für diese Arbeit relevant, da bei diesem Prüfkörper über eine Stützvorrichtung die Biegung der Prüfkörper behindert wird (Abbildung 2.3). Dieses Prüfverfahren wird bei Voith ebenfalls angewendet. Die Biegebehinderung führt im Vergleich zu einer freien, nicht biegebehinderten Probe zu einem veränderten Spannungszustand, weshalb diese Probe hier gesondert aufgeführt ist.

Ein weiterer Versuch, welcher hervorgehoben wird, ist der "Thick Adherend Shear Test" (folgend

Tabelle 2.1: Übersicht Normen für Zugscherversuche [1]

Probengeometrie		Normen
Einfach	überlappt	ASTM D1002-1 [8], ASTM D2295-96 (bei erhöhten Temperaturen) [9], ASTM D2557-98 (bei niedrigen Temperaturen) [11], ASTM D3163-01 [12], ASTM D3983-98 (Dicke Füge-teile) [15], ASTM D 5868 [20], DIN 1465, DIN EN 2243-1 [42]
		
Eingeschlitzt		ASD-STAN prEN 6060 [6], DIN 6701-3, ASTM D 3165 (dünne Füge-teile) [13], ASTM D 5656 [19], ASTM D 906 (Holzfüge-teile) [22], ASTM D 2339 (Holzfüge-teile) [10], DIN EN 14869-2 [39], DIN EN 302-1 (Holzfüge-teile) [41], DIN EN 2243-6 [43]
		
Zweifach	überlappt	ASTM D 3528
		
Doppelt	gelascht	ASTM D 3528
		

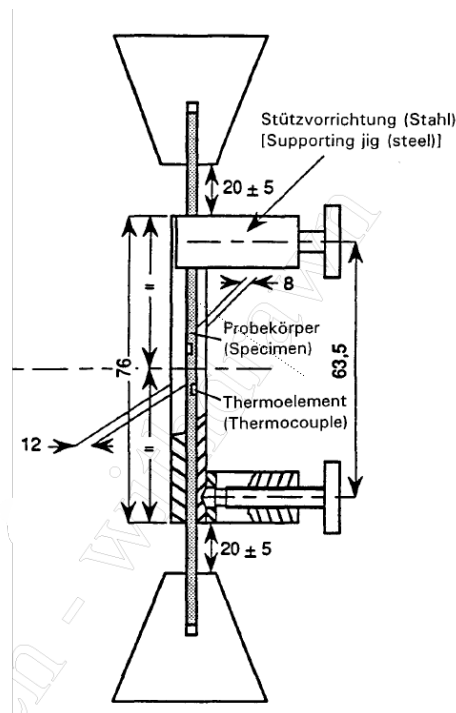


Abbildung 2.3: Stützvorrichtung zur Biegebehinderung [6]

TAST genannt) nach ASTM D 3983-98. Dieser Versuch wird aufgrund der einfachen Fertigung und der homogenen Spannungsverteilung im Bauteil häufig verwendet [31]. In dieser Arbeit wird dieser

Test im Rahmen einer einfach überlappten Probe durch eine Variation der Fügeiteildicke betrachtet. Die oben aufgeführten Prüfkörpergeometrien werden alle in einer Zugprüfmaschine getestet. Zusätzlich zu diesen Geometrien existieren weitere Prüfverfahren, welche entweder über eine veränderte Geometrie oder einen veränderten Versuchsaufbau die Schubfestigkeit von Klebstoffen bestimmen. Die unterschiedlichen Möglichkeiten und Variationen sind im Folgenden aufgeführt:

- Arcan-Versuch:

Dieser Versuch basiert auf der Arcan-Vorrichtung (Abbildung 2.4 (a)). Die Klebschicht befindet sich dabei in der Mitte der beiden Fügeiteile, welche in die Vorrichtung eingespannt werden. Der Vorteil dieser Vorrichtung ist die Möglichkeit, neben einer reinen Zug- oder Schubbelastung auch eine kombinierte Zug-Schubbelastung in der Klebschicht zu erzeugen. Modifizierte Arcan-Vorrichtungen, wie sie von Cognard et. al in [26, 31] beschrieben werden, ermöglichen zusätzlich eine kombinierte Druck-Schub-Belastung (Abbildung 2.4 (b)). Die Art der Belastung kann dabei durch den Einspann-Winkel der Vorrichtung eingestellt werden.

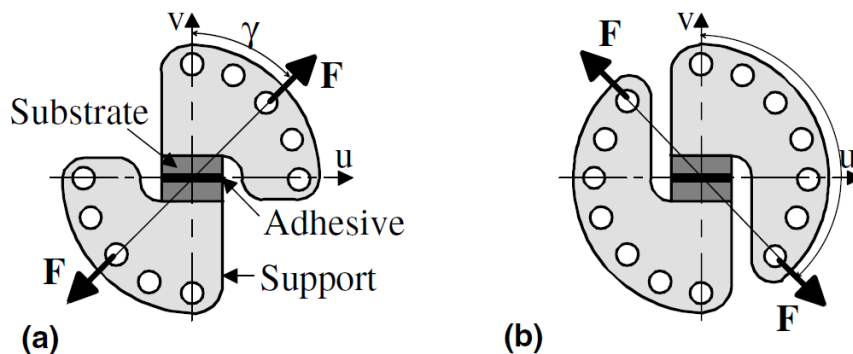


Abbildung 2.4: Arcan-Test (a) und modifizierter Arcan-Test (b) [26]

- Iosipescu-Versuch mit v-gekerbten Platten:

Diese Testmethode wurde von Iosipescu [59] zur Bestimmung der Schubfestigkeit von Metallen entwickelt. Durch die vermehrte Verwendung von FKV-Materialien und Klebstoffen wird dieser Test auch für diese Werkstoffe eingesetzt [31]. Durch den Testaufbau (Abbildung 2.5) wird im Klebstoff eine reine Schubbelastung erzeugt. Auffällig ist die Ähnlichkeit des Iosipescu-Versuchs mit dem Arcan-Versuch bei reiner Schubbelastung. Der Nachteil des Iosipescu-Versuchs ist allerdings, dass keine andere Belastung (zum Beispiel kombinierte Zug-Schub-Belastung) getestet werden kann, weshalb der Iosipescu-Versuch nicht weiter betrachtet wird.

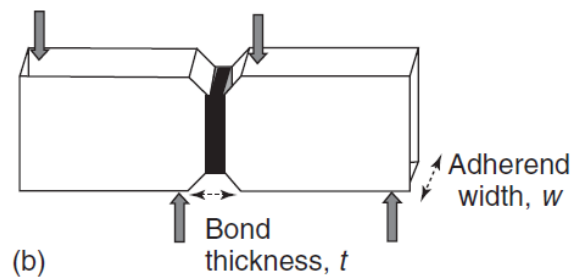


Abbildung 2.5: Iosipescu Prüfkörper [31]

- Pin-and-Collar-Versuch:

Bei diesem Versuchsaufbau wird die Schubfestigkeit über eine geklebte Welle-Nabe-Verbindung bestimmt, welche auf Druck belastet wird (Abbildung 2.6). Der Versuch ist dabei sowohl in der Norm ASTM D 4562 [17] sowie DIN EN 15337 [40] definiert. Das mittlere Fügeiteil (Pin) kann entweder als massives Bauteil oder als Rohr ausgelegt werden. Für die Anwendung von FKV-Fügeiteilen ist die Fertigung als massives Bauteil nicht praktikabel, weshalb hierbei nur die Betrachtung eines Rohrs verwendet wird. Die Herstellung der Prüfkörper aus GFK ist aufwendig und benötigt spezielle Vorrichtungen zum Fertigen, sowohl der Fügeiteile als auch der Klebung. Durch die Geometrie wird die Durchbiegung der Fügeiteile unterdrückt und es wird eine reine Schubbelastung in der Klebschicht erzeugt.

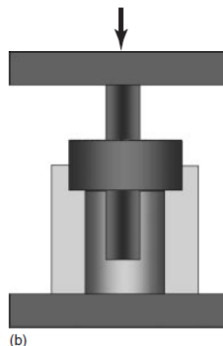


Abbildung 2.6: Pin-and-Collar Versuch [31, S. 159]

- Zylindrische Verklebungen:

Diese Verklebungen werden auch als Rohr-Verbindung oder Napkin-Rig Verbindung bezeichnet (Abbildung 2.7). Durch eine Torsionsbelastung wird eine Schubspannung in der Klebschicht erzeugt. Allerdings erfordern diese Testarten eine Torsionsprüfmaschine. Zugleich können diese Prüfkörper auch kombinierten Torsions-Zugbelastungen ausgesetzt werden, um eine Spannungsüberlagerung zu erzeugen. Ein solches Verfahren wird von Mahnen und Schlimmer [67] vorgestellt. Wie Adams in [31] ausführt, ist die Norm zum Testen der Rohrverbindung (ASTM E 229 [23]) aufgrund von nicht zufriedenstellender Ergebnisse bereits wieder verworfen.

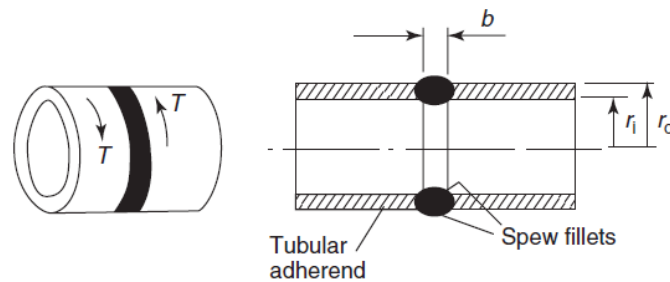


Abbildung 2.7: Zylindrische Rohr-Verklebung [31, S. 159]

- Block-Shear-Test:

Diese Versuchsart kann zum Bestimmen der Schubfestigkeit sowohl von Holzprüfkörpern als auch von Klebungen verwendet werden. Grundsätzlich werden zwei Blöcke, welche als Füge-teil dienen, verklebt. Anschließend wird eine Schubspannung in der Klebschicht durch eine Druckbelastung auf einen der beiden Blöcke erzeugt. Prüfkörper nach ASTM D 905 [21] werden dabei über die gesamte Breite der Füge-teile verklebt (Abbildung 2.8). Die zweite Variante besteht aus Prüfkörpern, bei welchem ein kleinerer Block auf einen größeren geklebt wird (Abbildung 2.8). Diese Prüfung ist in der ASTM D 4501 [16] definiert.

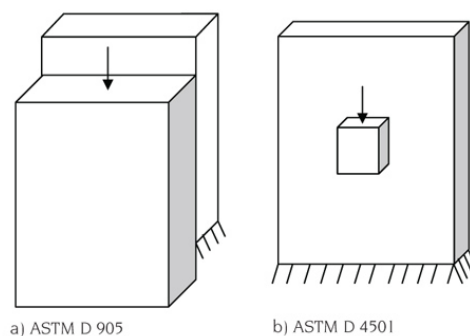


Abbildung 2.8: Block-Shear-Test [54]

Diese Prüfkörper können aufgrund der geometrischen Ähnlichkeit (dicke Füge-teile) mit dem TAST oder auch der biegebehinderten Proben nach pr EN 6060 verglichen werden. Desweiteren werden für die Prüfung spezielle Vorrichtungen benötigt. Da die Prüfkörper keinen Vorteil gegenüber den aufgeführten Geometrien besitzen, wird dieser Prüfkörper nicht weiter untersucht.

Überblick:

Die nachfolgend dargestellte Tabelle gibt einen Überblick über die verschiedenen Prüfkörpergeometrien und zeigt, welche Prüfkörper innerhalb dieser Arbeit einer weiteren Betrachtung unterzogen werden:

Tabelle 2.2: Übersicht Prüfkörpergeometrien

Prüfkörpergeometrie	weitere Betrachtung	Grund
Einfach überlappt	✓	Häufigste verwendete Prüfkörpergeometrie
Eingeschlitzte Platten	✓	Adaption des einfach überlappte Prüfkörpers
Zweifach überlappt	✓	Keine Erzeugung von Biegemomenten
Doppelt gelascht	✓	Keine Erzeugung von Biegemomenten
Biegebehinderte Probe nach pr EN 6060	✓	Unterdrückung der Biegung
TAST	o	keine gesonderte Betrachtung → Betrachtung innerhalb einfach überlappter Probe
Arcan-Versuch	✓	Verschiedene Einspannwinkel möglich
Iosipescu-Versuch	X	ähnlich wie Arcan-Versuch, aber weniger variabel
Pin-and-Collar-Versuch	✓	Keine Biegung
Zylindrische Verklebungen	✓	Homogener Spannungszustand durch Torsionsbelastung
Block-Shear-Test	X	geometrische Ähnlichkeit mit TAST

2.3 Auswertung der Versuche

Die Auswertung der Versuche ist entscheidend für eine Bewertung der Festigkeit einer Klebschicht. Hierbei ist besonders die Bestimmung der Versagensspannung und damit der im Versuch ermittelten Festigkeit sowie die Bewertung der Bruchflächen entscheidend. Auf beide Punkte wird im nun folgenden Abschnitt eingegangen.

Bestimmung der Festigkeit:

Die Klebfestigkeit τ wird bei den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Normen als Quotient der Bruchlast F_B und der Klebefläche A angegeben, welche sich aus der Überlappungslänge $l_{\ddot{u}}$ und der Klebschichtbreite b berechnet:

$$\tau = \frac{F_B}{A} = \frac{F_B}{l_{\ddot{u}} * b} \quad (2.1)$$

So ergibt sich eine gemittelte Klebfestigkeit über die gesamte Klebefläche. Wie bereits erwähnt, ergeben sich am Klebschichttrand jedoch Spannungsspitzen, welche versagensinduzierend und um ein Vielfaches höher als die mittlere Spannung der Klebung sind. Besonders bei der Verwendung unterschiedlicher Fügelewerkstoffe oder geometrischer Aspekte während der Prüfung im Vergleich zum Einsatz des Klebstoffes muss die ermittelte Klebstofffestigkeit mit besonderer Vorsicht als Versuchskennwert behandelt werden.

Die Verwendung der angegebenen Normen und Prüfungen zur Bestimmung von Festigkeiten ist Thema der Norm ASTM D 4896-01 [18]. Diese Norm wird hier zusätzlich aufgeführt, um aufzuzeigen, dass das Thema der Spannungszustände in Prüfkörpern zur Bestimmung einer Schubfestigkeit bekannt und normativ erfasst ist. Innerhalb dieser Norm wird darauf verwiesen, dass die Normen zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit nur zum Vergleich verschiedener Klebstoffe oder als Vorversuch für weitere Tests verwendet werden sollten und nicht, um über Versuchskennwerte nach einer Abminderung Design-Festigkeiten zu bestimmen. Allerdings ist das Ziel der ASTM D 4896 nicht, den Spannungszustand in den Bauteilen abzubilden, sondern eine reine Schubfestigkeit zu bestimmen, welche unter Minimierung der Normalspannungen ermittelt wird. Dies steht im Gegensatz zum Ziel dieser Arbeit, welches das Ableiten einer Prüfkörpergeometrie zur Abbildung von im Bauteil auftretenden Spannungszuständen ist. Die Normalspannungen sollend dabei nicht unterdrückt werden sondern erfasst und durch den Prüfkörper abgebildet werden. Die Auswertung der Prüfergebnisse abweichend von einer gemittelten Festigkeit nach Formel 2.1 ist jedoch ein Aspekt, der in dieser Arbeit weiter untersucht wird.

Versagensarten:

Die Bestimmung der Versagensarten von Klebstoffversuchen ist zur Beurteilung von Klebeverbindungen von entscheidender Bedeutung. Auf diese Weise kann die schwächste Stelle der Verbindung ermittelt werden. So kann eine genauere Bewertung der Versuchsergebnisse ermöglicht werden und es können gegebenenfalls geeignete Maßnahmen zur Optimierung der Klebeverbindung erfolgen [72].

Abbildung 2.9 zeigt eine Übersicht über die Bruchbilder, wie sie in der DIN EN ISO 10365 definiert sind.

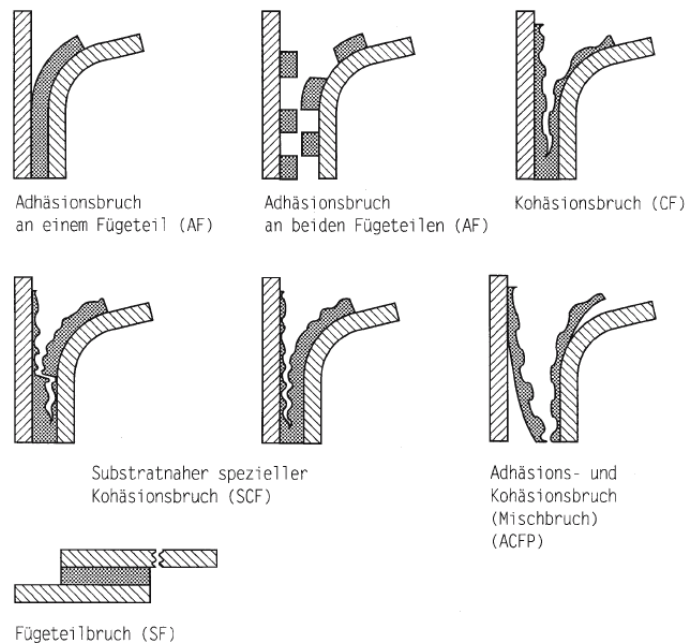


Abbildung 2.9: Bruchbilder nach DIN EN 10365 [48, S. 373]

Hierbei muss besonders darauf geachtet werden, in welchem Bereich der Klebung das Versagen auftritt. Ein Füge­teilbruch (SF) zeigt, dass der Klebstoff noch nicht an seinem Limit ist. Bei einem Adhäsionsbruch (AF) sind die Adhäsionskräfte zu gering und die Grenzschicht zwischen Füge­teil und Klebstoff das schwächste Glied des Verbundes. Analog dazu zeigt ein Kohäsionsbruch (CF), dass sowohl das Füge­teil als auch die Grenzschicht zwischen Füge­teil und Klebstoff den Kräften gewachsen ist, während die innere Festigkeit des Klebstoffs der schwächste Bereich der Klebung ist. Nicht aufgeführt sind in dieser Abbildung die zusätzlichen Bruchformen (Abbildung 2.10):

- Bruch durch Delaminieren (Delaminierbruch DF)
- Bruch eines Füge­teils (kohäsives Füge­teilversagen CSF)

Diese beiden Arten der Brüche kommen häufig bei FKV-Bauteilen [32] vor und sind für die in dieser Arbeit eingesetzten GFK-Substrate von besonderer Bedeutung.

Weiterhin kommt es vielfach vor, dass die beschriebenen Bruchformen nicht alleine, sondern in Kombination mit anderen Bruchformen als Mischbruch auftreten [72]. Hierbei muss der ungefähre Prozentanteil der verschiedenen Brüche am Bruchbild angegeben werden. Für diese Arbeit wird festgelegt, dass das Versagen sowohl in der Klebschicht als auch im Füge­teil auftreten kann. Das bedeutet, dass sowohl kohäsives Füge­teil- oder Klebschichtversagen als auch adhäsives Versagen in der Grenzschicht akzeptiert wird, da es sich bei den ermittelten Festigkeiten um Verbundfestigkeiten der Klebung handelt und nicht ausschließlich um Klebschichtfestigkeiten.

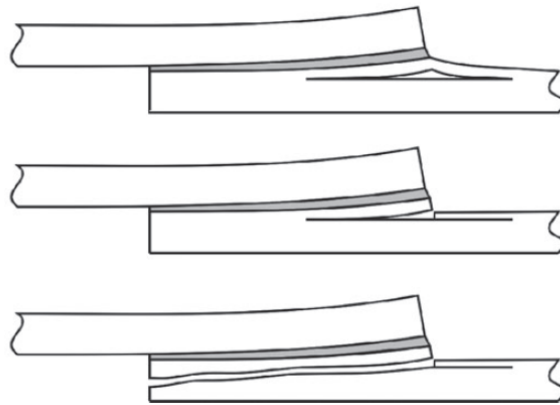


Abbildung 2.10: Versagensformen in Faserverbundfügeteilen [32, S. 9], Oben/Mitte: Delaminierungsbruch (DF), Unten: kohäsives Fügeversagen (CSF)

2.4 Einfluss geometrischer Parameter auf die Zugscherfestigkeit

Die nachfolgend dargestellten Einflüsse beziehen sich auf einfach überlappte Zugscherproben. Die Klebstofffestigkeiten sind nach Formel 2.1 berechnet worden. Der Spannungszustand wird hierbei nicht untersucht. Allerdings lässt sich aus den ermittelten Festigkeiten und dem damit einhergehenden Versagen der Proben ein Rückschluss über die Spannungsverläufe ziehen. Die Einflüsse auf die Spannungsspitzen können so zunächst veranschaulicht werden. Weiterhin wurden bei den Untersuchungen metallische Fügebauteile verwendet. Wie Habenicht [48, S. 697] ausführt, können diese Ergebnisse auch auf Fügebauteile aus faserverstärkten Kunststoffen übertragen werden, da diese ähnliche mechanische Eigenschaften (besonders Festigkeiten) wie Metalle aufweisen und diese teilweise sogar übertreffen.

2.4.1 Einfluss der Klebschichtdicke

Die Klebschichtdicke hat einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit der Klebung. Hierbei ist dies nicht nur auf geometrische Einflussfaktoren, sondern auch auf weitere, dickenabhängige Klebstoffeigenschaften zurückzuführen. Abbildung 2.11 zeigt den Unterschied im Verformungsverhalten von dünnen und dicken Klebschichten. Bei dünnen (d_1) Klebschichten wird dabei die Querkontraktion der Klebschicht durch die starren Fügebauteile behindert, was zu einer erhöhten Festigkeit beiträgt. Mit zunehmender Klebschichtdicke (d_2) nimmt diese Querkontraktionsbehinderung ab. Außerdem wird der Anteil der Klebschicht, in welchem die festigkeitsbestimmenden Adhäsionskräfte herrschen (Grenzschichtbereich), relativ gesehen immer kleiner und der Anteil der Kohäsionskräfte an der Klebschichtfestigkeit größer. Diese stellen damit das "schwächste Glied der Festigkeitskette" [48, S. 443] dar. Außerdem ist zu beachten, dass bei größeren Klebschichten Eigenspannungen durch Klebstoffschwund infolge des Aushärtvorgangs sowie Inhomogenitäten oder Risse in der Klebschicht entstehen können, welche den Klebstoff nachhaltig schwächen können. Ein weiterer Grund für eine

verminderte Klebfestigkeit von einfach überlappten Klebungen ist die Erhöhung des Biegemoments infolge des vergrößerten Hebelarms zur Mitte der Klebschicht. [48]

Abbildung 2.12 zeigt schematisch den Einfluss der Klebschichtdicke auf die Klebfestigkeit.

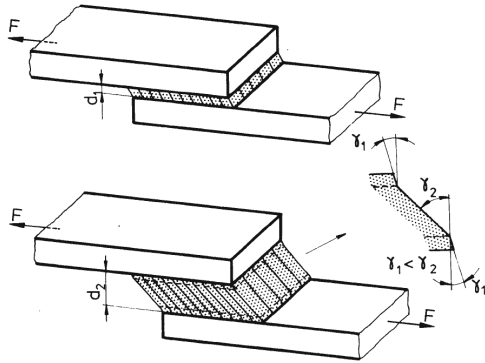


Abbildung 2.11: Verformungsverhalten einer Klebschicht [48, S. 443]

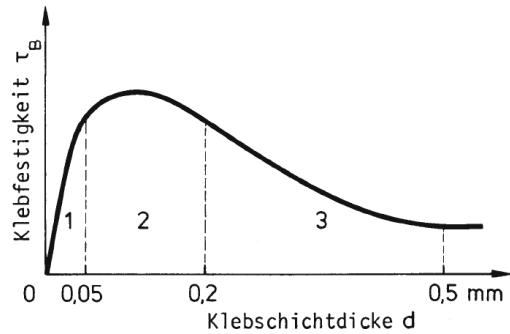


Abbildung 2.12: Einfluss der Klebschichtdicke auf die Festigkeit [48, S. 444]

Dabei steigt die Festigkeit bis circa 0,05 mm an. Unterhalb dieser Dicke können Benetzungsfehler oder eine zu raue Fügeiteiloberfläche die Festigkeit reduzieren. Zwischen 0,05 mm und 0,2 mm besitzt die Klebschicht die maximale Festigkeit. Ab 0,2 mm sinkt die Festigkeit der Klebung ab, da in diesem Bereich die Kohäsionskräfte zunehmen und somit die geringere Eigenfestigkeit des Klebstoff zum Tragen kommt. [48]

Es muss allerdings beachtet werden, dass der Verlauf der Klebfestigkeit nach einer Klebschichtdicke von 0,5 mm **nicht** konstant ist, wie Abbildung 2.12 zeigt. Nach Untersuchungen von Adams [2] (Abbildung 2.13), Silva et al. [30], Syn et al. [75] sowie Tomblin et al. [76] nimmt die Bruchkraft und damit die Klebfestigkeit mit steigender Klebschichtdicke ab.

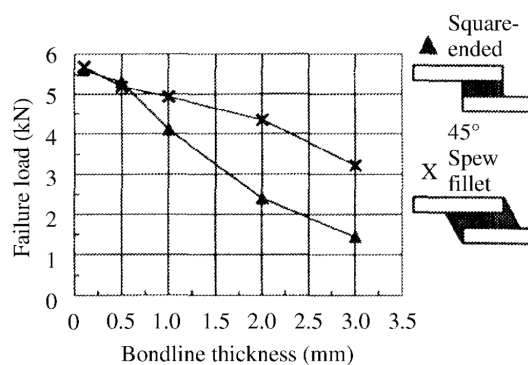


Abbildung 2.13: Bruchkraft bei variierender Klebschichtdicke [46] aus [2]

Die Gründe hierfür können vielfältig sein und sind aktuell Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion. Neben den bereits beschriebenen Inhomogenitäten, Rissen und dem erhöhten Biegemoment können zusätzlich die höheren Interface-Spannungen am Übergang zwischen Klebschicht und Füge-

teil zu den reduzierten Bruchlasten und damit den reduzierten Festigkeiten führen [30]. Die Untersuchungen von Gleich [45, 46] unterstützen diese Erkenntnisse. Auch für einfach gelaschte Klebungen, welche eine Vereinfachung der doppelt gelaschten Klebungen darstellen, nimmt die Klebfestigkeit mit steigender Klebschichtdicke ab, was Untersuchungen von Jarry et al. [60] zeigen. Die Forschung von Müller [70] zeigt außerdem, dass der E-Modul in dünnen Klebschichten höher ist, mit steigender Klebschichtdicke sinkt und erst ab circa 1,2 mm einen konstanten Wert annimmt. Dies ist ebenfalls auf das Verhältnis aus Adhäsions- und Kohäsionsbereichen in der Klebschicht zurückzuführen, welches bei dünneren Klebschichten günstiger ist. Da die Klebschichten bei Voith mit 3 mm eine größere Klebschichtdicke haben, ist allgemein von einem konstanten E-Modul auszugehen, der nicht durch die Verformungsbehinderung durch die Füge­teile erhöht wird.

2.4.2 Einfluss der Überlappungslänge

Die Überlappungslänge hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Klebefestigkeit. Weiterhin beeinflusst die Überlappungslänge die Menge des erforderlichen Materials und die Materialdopplung und hat damit auch Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit und das Leichtbaupotenzial einer Klebung. Wie in Abbildung 2.14 dargestellt, nimmt - unabhängig vom Klebstoff - die Klebfestigkeit mit steigender Überlappungslänge ab. Da aber nach Formel 2.1 die Klebfestigkeit als Quotient aus der Bruchkraft und der Klebefläche gebildet wird, sagt dies zunächst nur aus, dass die Bruchkraft nicht proportional zur Erhöhung der Klebefläche infolge der gesteigerten Überlappungslänge ansteigt.

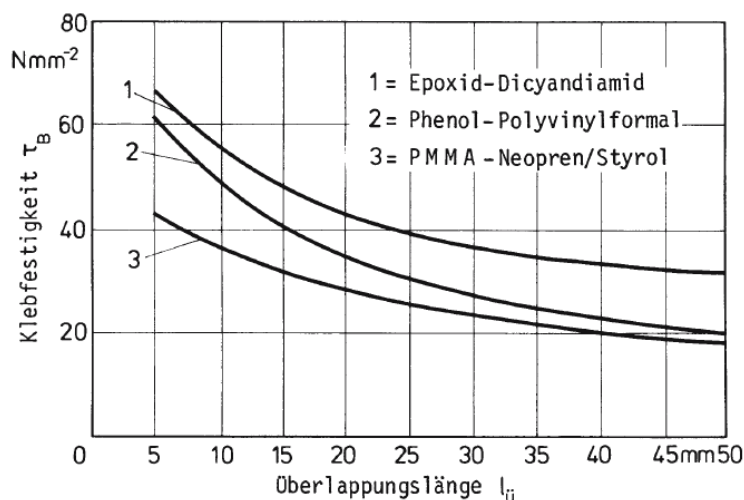


Abbildung 2.14: Einfluss der Überlappungslänge auf die Klebfestigkeit [48, S. 433]

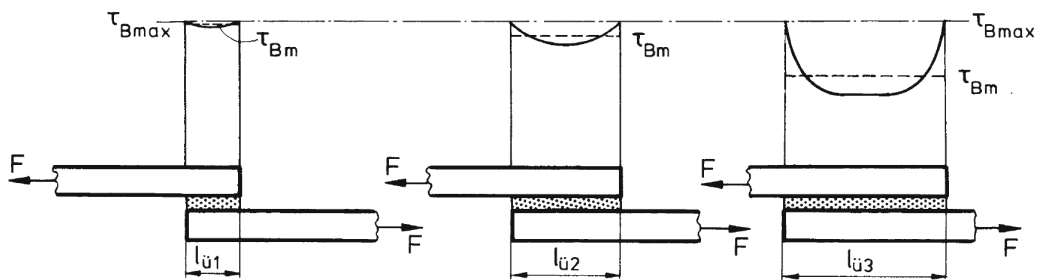


Abbildung 2.15: Einfluss der Überlappungslänge auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht [48, S. 432]

Abbildung 2.15 vergleicht drei Zugscherproben mit unterschiedlichen Überlappungslängen. Es ist zu sehen, dass die Spannungsspitzen beim Bruch der Klebung an den Überlappungsenden (τ_{Bmax}) für alle drei Überlappungslängen die gleiche Höhe besitzen. Mit steigender Überlappungslänge nimmt gleichzeitig aber der niedrigbelastete Bereich in der Mitte der Klebschicht zu. Dies reduziert folglich die mittlere Bruchspannung τ_{Bm} und suggeriert eine niedrigere Festigkeit, obwohl eine höhere Bruchlast übertragen wird. Diese höhere Bruchlast führt allerdings auch zu einer höheren Fügeteildrehung, was wiederum einen negativen Einfluss auf die Höhe der Spannungsspitzen am Rand der Überlappung hat. Dies erklärt den nicht proportionalen Anstieg der Bruchlast. Die Reduzierung der Normalspannungsspitzen infolge der längeren Überlappung bei gleichbleibender Belastung führt ebenfalls nicht zu niedrigeren Gesamtspannungsspitzen. Dies ist auf die Bruchlast zurückzuführen, welche das Biegemoment und damit die Normalspannungsspitzen erhöht und damit diesen Effekt abmindert oder sogar irrelevant macht.

Der Einfluss des niedrigbelasteten Bereichs in der Mitte der Klebschicht auf die Bruchlast wird in Untersuchungen von Schonhorn [83] betrachtet. Schonhorn hat dabei bei gleichbleibender Überlappungslänge „Fehler“ aus Polyethylen in der Klebfläche erzeugt. Bei reduzierter Klebfläche ergibt sich hierbei keine Reduzierung der Bruchlast. Dies unterstreicht erneut, dass die Spannungsspitzen am Rand für das Versagen entscheidend sind und selbst größere Fehler in der Mitte der Klebschicht nicht zu einer nennenswerten Reduzierung der übertragbaren Last führen.

2.4.3 Einfluss der Fügeteildicke

Eine erhöhte Fügeteildicke führt zu einem erhöhten Widerstandsmoment und reduziert die Spannungsspitzen am Ende der Klebschicht. Durch diesen Effekt erhöht sich die Festigkeit der Klebung. Dies zeigt sich in den Untersuchungen von Matting [69] (Abbildung 2.16) durch einen linearen Anstieg der Klebfestigkeit infolge steigender Fügeteildicke. Neben diesem Effekt führt eine erhöhte Fügeteildicke zusätzlich zu einer geringeren Dehnung der Fügeteile, da die Dehnsteifigkeit ansteigt. Dies reduziert die Spannungsspitzen ebenfalls. Diese Reduzierung führt dazu, dass ein größerer Bereich der Klebschicht zur Lastübertragung herangezogen wird. Das zeigt sich in den erhöhten Kleb-

festigkeiten [48].

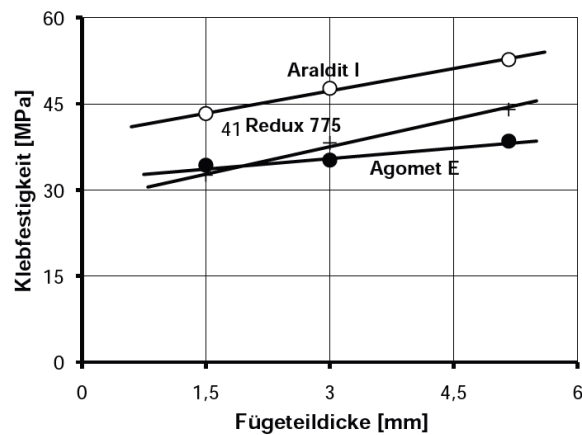


Abbildung 2.16: Einfluss der Fügeteildicke auf die Klebfestigkeit [72, S. 447] aus [69]

2.4.4 Einfluss der Klebschichtbreite

Die Klebschichtbreite hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Klebfestigkeit und es kann von einem proportionalen Zusammenhang zwischen Klebschichtbreite und Bruchlast ausgegangen werden. Zwar tragen die Randzonen weniger Last, allerdings wirkt sich dies nicht auf die Klebfestigkeit aus und es kann lediglich eine größere Streuung der Festigkeitswerte bei geringen Überlappungsbreiten erkannt werden. [48]. Diese Streuung ist besonders bei einer statistischen Abminderung der Prüfergebnisse zu berücksichtigen, da eine größere Streuung auch zu einer größeren Abminderung der Prüfergebnisse führt.

Eine größere Klebschicht führt allerdings zu Problemen bei der Fertigung der Klebung. So erschwert eine breitere Klebefuge ein gleichmäßiges Auftragen des Klebstoffs. Gleichzeitig kann es zu einer ungleichmäßigen Aushärtung des Klebstoffs infolge einer variierenden Temperaturverteilung oder eines nicht gleichmäßigen Anpressdrucks kommen. Die proportionale Erhöhung der übertragbaren Last mit der Klebschichtbreite ist ein entscheidender Vorteil geklebter Verbindungen gegenüber anderer Fügeverfahren. [48]

3 Analyse der Klebschichten eines Frontend-Systems von Voith

In diesem Kapitel werden die Klebungen eines Frontend-Systems bei Voith betrachtet. Zunächst wird die Herstellung der Klebschichten erläutert, um diese mit Prüfkörpergeometrien zu vergleichen. Hauptziel dieses Kapitels ist es, ein Vorgehen zur Ermittlung von Spannungszuständen innerhalb der Klebschicht zu erarbeiten. Dieses Vorgehen wird auf einen Beispielbereich angewendet, um einen Spannungsverlauf zu ermitteln, welcher später im Rahmen dieser Arbeit zum Ableiten einer Prüfkörpergeometrie verwendet wird. Neben dem Spannungsverlauf wird die von Voith gewählte Modellierung der Klebschichten und der dazugehörigen Fügebauteile beschrieben und dargestellt.

3.1 Ausführung von Klebverbindungen bei Voith

Im betrachteten Bauteil (Bugnase des ICE 4) gibt es für die gewählte Materialpaarung drei Kleberebereiche. Die Aufteilung auf die verschiedenen Bereiche wird in Abbildung 3.1 dargestellt. Bereich 1 wird als Lampenkasten (LK) bezeichnet, Bereich 2 als Bugklappe oben (BKO) und Bereich 3 als Bugklappe unten (BKU). Die Aufteilung erfolgt hierbei anhand der Bauteile, in welchen die Verklebungen verwendet werden. Es handelt sich um umlaufende Klebungen, welche dazu führen, dass die Kräfte zwischen den Bauteilen großflächig übertragen werden.

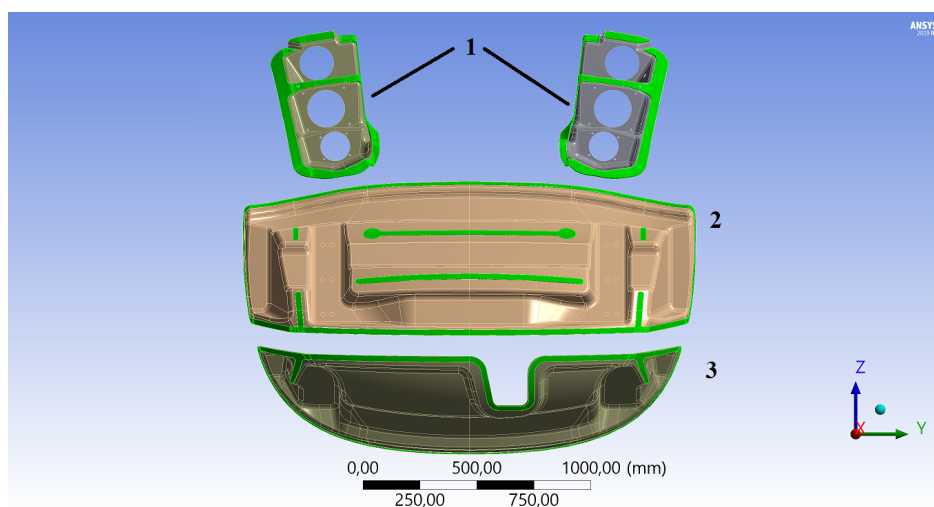


Abbildung 3.1: Klebschichten (grün) im Bauteil

Die Fertigung der unteren Bugklappe ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Im ersten Schritt wird auf die Klebefläche des ersten Fügeteils großflächig Klebstoff aufgetragen. Die Klebschichtdicke ist dabei größer als die angestrebte Schichtdicke (a). Anschließend wird das mit Klebstoff versehene Fügeteil auf das andere Fügeteil gedrückt und die Schichtdicke eingestellt (b). Abschließend wird der überschüssige Klebstoff abgestrichen; eine saubere Klebschichtkante entsteht (c).

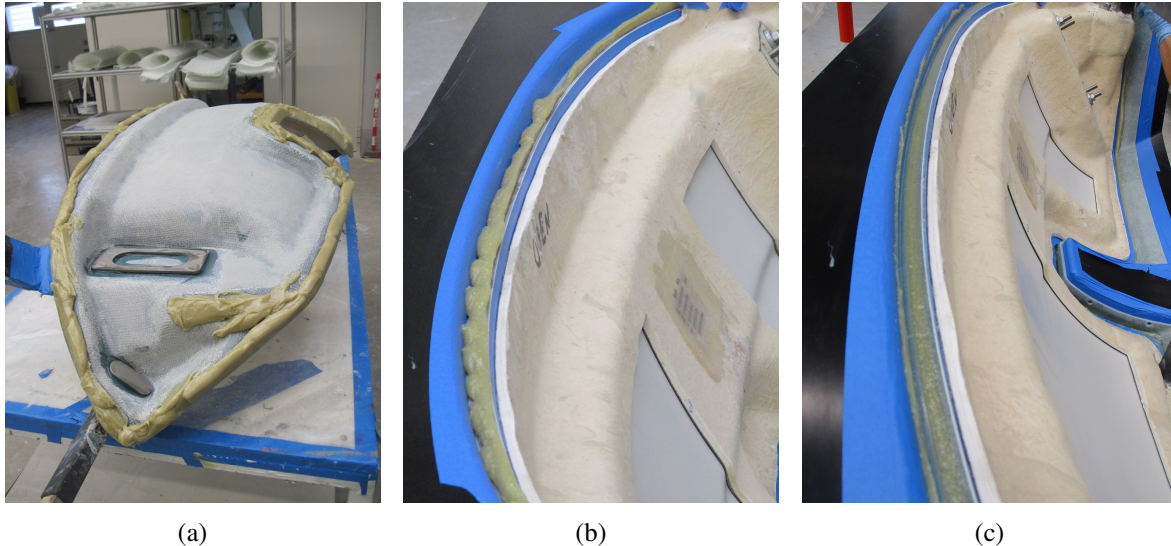


Abbildung 3.2: Klebung am Beispiel eines Bauteils, (a) Vorbereitung der Klebung; (b) Auspressen des Klebstoffs; (c) Klebschicht nach Abstreifen des Klebstoffs

Das Auspressen des Klebstoffs geschieht beidseitig. Aufgrund der Schalenbauweise ist es nicht möglich, den überschüssigen Klebstoff auf der Innenseite abzutragen. Die Überlappungslänge kann daher variieren und es kann zur Entstehung eines Klebwulstes kommen. Da dieser nur aufwändig über zum Beispiel Ultraschall- oder Computertomographie-Verfahren quantifiziert werden kann, wird dieser Bereich in der Klebschicht als ideal angenommen. Dennoch ist anzumerken, dass dieser Wulst wie ein ‘‘Spew-fillet‘‘ wirkt, welcher die Spannungsspitzen am Rand der Klebschicht abbauen und damit die Festigkeit erhöhen kann [72, 77]. Weiterhin ist erkennbar, dass die Verklebung flächig auf der Oberseite der dünnwandigen Fügeteile erzeugt wird.

Ein Vergleich der in Kapitel 2 vorgestellten zylindrischen Probe und der hier vorgestellten Realisierung der Verklebungen bei Voith zeigt, dass die Geometrie der zylindrischen Probe die Klebungen in Bauteilen von Voith nur unzureichend abbildet. Zum einen wird die Verklebung des Prüfkörpers umlaufend entlang eines kleinen Radius erzeugt, zum anderen ist die Überlappungsbreite gering und die Fügeteile stehen senkrecht auf der Klebschicht und verlaufen nicht parallel zur Oberfläche der Klebschicht.

Auch die Pin-and-Collar Probe wird über die Verklebung zweier Rohre hergestellt. Allerdings wird dieser Prüfkörper über die Verklebung entlang der Oberfläche der beiden Fügeteile realisiert. Durch die Klebschichtdicke entsteht aufgrund der Radienerhöhung zwischen dem mittleren und dem äußeren Fügeteil eine Erhöhung der Fügefläche. Dies ist bei den Klebschichten von Voith nicht der Fall,

weshalb dieser Prüfkörper die Klebschichten von Voith nur unzureichend abbildet. **Aus diesen Gründen wird der zylindrische Prüfkörper und der Pin-and-Collar Prüfkörper im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht betrachtet.**

3.2 Werkstoffe

Die hier dargestellten Werkstoffkennwerte gelten sowohl für dieses Kapitel als auch für das Kapitel 4. Die Füge­teile sind aus GFK und werden per Vakuum-Infusionsverfahren hergestellt. Die Materialeigenschaften einer Einzelschicht sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Materialdaten UD Einzelschicht

Eigenschaft	Formelzeichen	Wert
Dichte	ρ	1820 [kg/m ³]
E-Modul in x-Richtung	E_x	37000 [MPa]
E-Modul in y-Richtung	E_y	10000 [MPa]
E-Modul in z-Richtung	E_z	10000 [MPa]
Poissonzahl in der xy-Ebene	ν_{xy}	0,3
Poissonzahl in der yz-Ebene	ν_{yz}	0,09
Poissonzahl in der xz-Ebene	ν_{xz}	0,3
Schubmodul	$G_{xy/yz/xz}$	3500 [MPa]

Als Klebstoff wird Oldopal 0110 verwendet, welcher ein Klebharz auf Vinylester-Basis ist und für hochfeste Verklebungen für Lamine verwendet wird. Die Materialdaten sind in Tabelle 3.2 zu finden.

Tabelle 3.2: Materialdaten Oldopal 0110

Eigenschaft	Formelzeichen	Wert
Dichte	ρ	1200 [kg/m ³]
E-Modul	E	1754 [MPa]
Poissonzahl	ν	0,2
Schubmodul	G	731 [MPa]

3.3 Vergleichsspannungen zur Bewertung der Klebschicht

Grundsätzlich herrscht in der Klebschicht ein komplexer, 3-dimensionaler Spannungszustand. Dieser Spannungszustand kann an jedem Punkt der Klebschicht durch den Spannungstensor S beschrieben werden, welcher aus den Normalspannungskomponenten ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) sowie den Schubspannungskomponenten ($\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$) besteht:

$$S = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Eine Abbildung der einzelnen Spannungskomponenten über eine Prüfkörpergeometrie setzt das Abbilden der sechs einzelnen Spannungskomponenten voraus. Dazu muss die Lage der Koordinatensysteme jedes Elements bekannt sein und gegebenenfalls eine Koordinatentransformation durchgeführt werden. Es ist allerdings zu erwähnen, dass über Ansys das Koordinatensystem der Elemente so angepasst werden kann, dass eine gewählte Koordinatenrichtung stets senkrecht zur Oberfläche ist, was die Ermittlung der Normalspannungen vereinfacht. Ein solches Verfahren ist aufgrund der gekrümmten Klebschichten nur unter erheblichem Arbeitsaufwand zu realisieren und wird deshalb nicht weiterverfolgt. Weiterhin ist nicht bekannt, wie stark eine Komponente (zum Beispiel eine Normalspannung parallel zur Klebschichtoberfläche) die Festigkeit der Klebung tatsächlich beeinflusst. Klebungen werden in ihrer Auslegung bewusst auf reine Schub- oder Zugbelastungen ausgelegt, allerdings führt eine Schälbelastung (kombinierte Zug-Schub-Belastung) zu einem für eine Klebschicht ungünstigen Spannungszustand (Kapitel 2). Aus diesen Gründen werden für die Auswertung der Spannungen in der Klebschicht Vergleichsspannungen herangezogen, welche den Spannungszustand innerhalb der Klebschicht abbilden.

Die Verwendung von Vergleichsspannungen ist ein zentrales Konzept der Festigkeitsmechanik. Der komplexe 3-achsige Spannungszustand wird dabei auf eine Vergleichsspannung umgerechnet, welche mit, in einachsigen Zugversuchen ermittelten, Kennwerten verglichen werden kann [66]. Das Bilden der Vergleichsspannung erfolgt dabei nach verschiedenen Festigkeitshypothesen. Diese werden im Folgenden erläutert.

Zunächst müssen für die Ermittlung der Vergleichsspannungen die Hauptnormalspannungen (σ_{H1} , σ_{H2} , σ_{H3}) ermittelt werden. Auf die Herleitung dieser Spannungen aus dem Spannungszustand S wird verzichtet, stattdessen wird auf Läpple [66, S. 78] verwiesen.

Die Hauptnormalspannungen können aus jedem beliebigen Spannungszustand (Gl. 3.1) gebildet werden und stehen dabei senkrecht aufeinander. Das bedeutet, dass eine Zug- oder Druckspannung in diesen Richtungen keine Schubspannungen verursacht. Der Vorteil der Verwendung dieser Spannungen liegt darin, dass sie unabhängig vom Koordinatensystem und nur abhängig vom Spannungszustand sind.

Per Konvention werden die Hauptnormalspannungen nach der Größe geordnet [66]. Dabei gilt:

$$\sigma_1 = \max(\sigma_{H1}, \sigma_{H2}, \sigma_{H3}), \quad \sigma_3 = \min(\sigma_{H1}, \sigma_{H2}, \sigma_{H3}), \quad \sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1 \quad (3.2)$$

Zusätzlich zu den Hauptnormalspannungen wird der hydrostatische sowie der deviatorische Spannungszustand eingeführt. Diese Spannungszustände können aus den Hauptnormalspannungen gebildet werden. Der hydrostatische Spannungszustand bildet sich aus der ersten Invarianten (I_1) des Spannungstensors:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3.3)$$

Das bedeutet, dass die Summe der drei Normalspannungen ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) eines beliebig orientierten Koordinatensystems gleich der Summe der drei Hauptnormalspannungen ist.

Ein hydrostatischer Spannungszustand liegt vor, wenn alle drei Hauptnormalspannungen denselben Betrag haben. So entsteht in keiner Ebene eine Schubspannung. Der hydrostatische Spannungszustand ergibt sich also zu:

$$p = -\frac{1}{3} * I_1 \quad (3.4)$$

Hierbei wird auf das Minus in dieser Gleichung hingewiesen, was eine Vorzeichenumkehr darstellt. Wird im Folgenden der hydrostatische Anteil eines Spannungszustandes zur Beschreibung herangezogen, steht ein positiver Anteil für einen Druckspannungszustand und ein negativer Anteil für einen Zugspannungszustand.

Wird von den drei Normalspannungen des Spannungstensors der Betrag des hydrostatischen Spannungsanteils abgezogen, so ergibt sich der Spannungsdeviator:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} |p| & 0 & 0 \\ 0 & |p| & 0 \\ 0 & 0 & |p| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x - |p| & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - |p| & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - |p| \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Dessen zweite Invariante (J_2) kann wie folgt dargestellt werden:

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3.6)$$

Aus dieser Invariante ergibt sich der deviatorische Spannungsanteil zu:

$$q = \sqrt{3 * J_2} \quad (3.7)$$

Auf die genaue Herleitung wird erneut verzichtet und auf Laple [66] sowie Kienzler [62] verwiesen. Wie bereits erwähnt, können die Vergleichsspannungen nach verschiedenen Festigkeitshypothesen aus den Hauptnormalspannungen gebildet werden. Abhängig vom Werkstoffverhalten (zum Beispiel spröde oder duktil) existieren verschiedene Konzepte zur Bildung der Vergleichsspannungen. Im Folgenden werden drei Konzepte aufgezeigt, welche für diese Arbeit von Bedeutung sind:

1. Schubspannungshypothese (Vergleichsspannung nach Tresca):

Diese Festigkeitshypothese geht davon aus, dass beim berschreiten der maximalen Schubspannung τ_{max} im Kristallgitter Gleitvorgänge ausgelöst werden, wodurch sich eine plastische

Formänderung einstellt und der Werkstoff durch Fließen versagt. Die maximale Schubspannung wird dabei aus der Differenz der größten und kleinsten Hauptspannung ermittelt:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (3.8)$$

Dies ist die aktuell bei Voith verwendete Spannungshypothese zur Festigkeitsbetrachtung der Klebschichten. Die Vergleichsspannung berechnet sich für die Schubspannungshypothese nach:

$$\sigma_{vTresca} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3.9)$$

2. Gestaltänderungsenergiehypothese (Vergleichsspannung nach von Mises):

Nach der durch Huber, von Mises und Hencky aufgestellten Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) versagt ein Werkstoff, wenn die Gestaltänderungsenergie einen werkstoffspezifischen Grenzwert überschreitet. Bei einem hydrostatischen Spannungszustand verändert ein Volumenelement lediglich seine Form, nicht aber sein Volumen. Wird dieser hydrostatischen Spannungszustand von der gesamten am Volumenelement herrschenden Formänderungsarbeit abgezogen, ergibt sich die Gestaltänderungsenergie. Diese ist folglich die Energie, welche zur Volumenänderung eines Elements beiträgt und damit zum Versagen führt. Diese Spannungshypothese wird für duktile Werkstoffe eingesetzt.[66]

Die Vergleichsspannung wird dabei nach folgender Formel gebildet:

$$\sigma_{vgeh} = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.10)$$

Dies entspricht genau dem deviatorischen Spannungszustand (Gleichung 3.7). Auffällig ist dabei, dass bei einem hydrostatischen Spannungszustand, selbst bei extrem hohen Spannungswerten, die Vergleichsspannung $\sigma_{vgeh} = 0$ bleibt, da keine Schubspannungen auftreten und folglich kein Versagen des Werkstoffs nach dieser Festigkeitshypothese eintritt. Das Versagen wird ausschließlich durch die herrschenden Schubspannungen ausgelöst. Eine alleinige Verwendung dieser Hypothese für Klebungen ist deshalb nicht sinnvoll, da in Klebungen sowohl Schub- als auch Normalspannungen zum Versagen führen können. Diese Vergleichsspannung ist dennoch aufgeführt, um die Nachteile aufzuzeigen und darzustellen, dass sie genau dem deviatorischen Spannungszustand entspricht.

3. Fließbedingung nach Drucker-Prager:

Das Fließkriterium von Druck-Prager ist ein für Klebstoffe vielfach untersuchtes Kriterium. Der Vorteil ist die Unterscheidung zwischen Druck-Schub- sowie Zug-Schub-Spannungen bei der Bewertung einer Klebschicht. Klebschichten, die neben der Schubbelastung auch auf Zug belastet werden, versagen früher als Klebschichten, welche neben der Schubbelastung einer

Druckbelastung ausgesetzt sind. Diese Fließbedingung wurde vielfach untersucht und angewendet und führte zu einer guten Korrelation zwischen Versuchen und Ergebnissen. [63, 79] Das Drucker-Prager Kriterium kann dabei sowohl linear (Gleichung 3.11) als auch exponentiell (Gleichung 3.12) sein:

$$F_{linDP} = q - p * \tan(\beta) - d = 0 \quad (3.11)$$

$$F_{expDP} = a * q^b - p - p_t = 0 \quad (3.12)$$

Die Faktoren β , d , a , b und p_t der Gleichungen werden dabei durch die Verwendung verschiedener Prüfungen ermittelt, welche den Klebstoff unterschiedlich belasten (zum Beispiel Stoß-Verklebung und überlappte Klebung). Dabei steht q für den deviatorischen und p für den hydrostatischen Spannungsanteil. Abbildung 3.3 zeigt den Unterschied zwischen den Versagenskriterien nach von Mises sowie den Drucker-Prager-Bedingungen.

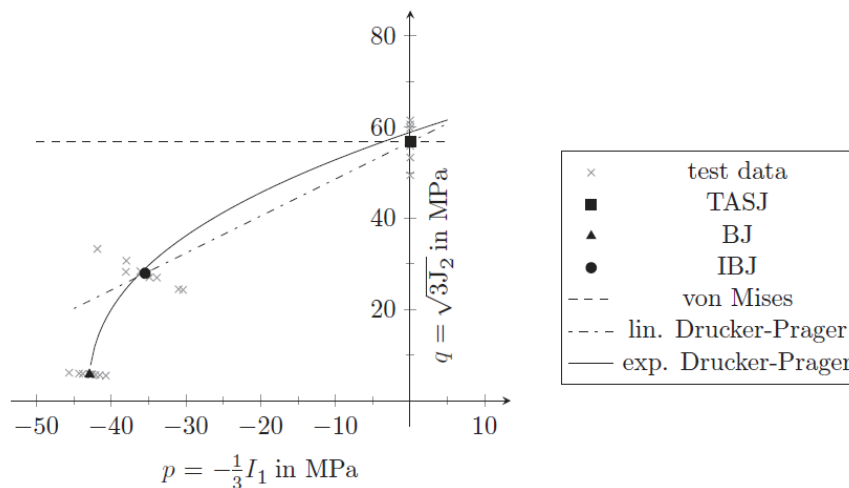


Abbildung 3.3: Drucker-Prager-Fließkriterium und von-Mises Versagensspannung [79]

Das Fließkriterium nach Drucker-Prager ist hierbei aufgeführt, da es für Klebschichten in Untersuchungen [35, 79] zu validen Ergebnissen geführt hat.

Die Unterscheidung in deviatorische (von-Mises-Vergleichsspannung) und hydrostatische Spannungsanteile erscheint für die Bewertung einer Klebschicht sinnvoll. Die Belastung in der Klebschicht wird hierbei in einen aus reinen Normalspannungen (hydrostatisch) bestehenden Spannungszustand und einen Spannungszustand, welcher nur die Schubspannungen (deviatorisch) berücksichtigt, aufgeteilt. Diese Spannungsanteile werden im folgenden Abschnitt ermittelt und bewertet.

3.4 Spannungsauswertung kritischer Bereiche

In diesem Abschnitt werden die Spannungszustände der Klebschichten ausgewertet. Ziel ist die Darstellung der Spannungsverläufe innerhalb der Klebschicht. Zusätzlich dazu wird die Modellierung des betrachteten Bereichs ermittelt. Die Erkenntnisse aus diesem Kapitel können als Grundlage zum Ableiten der Prüfkörpergeometrie verwendet werden. Zur Betrachtung der Klebschichten werden drei Schritte vorgenommen:

1. Bildung der deviatorischen und hydrostatischen Spannungszustände der Klebschicht und Auswahl kritischer, hochbelasteter Bereiche
2. Erstellung eines Pfades, über welchen die hydrostatischen und deviatorischen Spannungszustände in der Mitte der Klebschicht ausgewertet werden
3. Ermittlung der Modellierung der betrachteten Bereiche

Die einzelnen Schritte werden im Folgenden mit ihren dazugehörigen Ergebnissen am Beispiel eines Bereichs der Klebschicht aus dem Bauteil Lampenkasten veranschaulicht. Dieses Bauteil wurde aufgrund der feineren Vernetzung im Vergleich zu den Bugklappen sowie den höheren Spannungsspitzen in diesem Bereich der Klebschichten ausgewählt. Weitere Beispielbereiche, welche nach demselben Vorgehen analysiert wurden, sind in Anhang A.1 zu finden.

3.4.1 Auswahl eines hochbelasteten Bereichs

Es wird für die Auswahl der hochbelasteten Bereiche der Klebung nur ein Lastfall ausgewählt, welcher die höchsten Spannungen im Bauteil hervorruft und durch Voith als kritischster Lastfall für die Klebungen angesehen wird.

Für eine tiefgreifendere Betrachtung der Spannungszustände innerhalb der Klebschichten können alle Lastfälle betrachtet werden. Dies geschieht im Rahmen dieser Arbeit nicht, da der kritische Lastfall als ausreichend angesehen wird.

Die deviatorischen und hydrostatischen Spannungszustände der Klebschichten im Bereich Lampenkasten sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

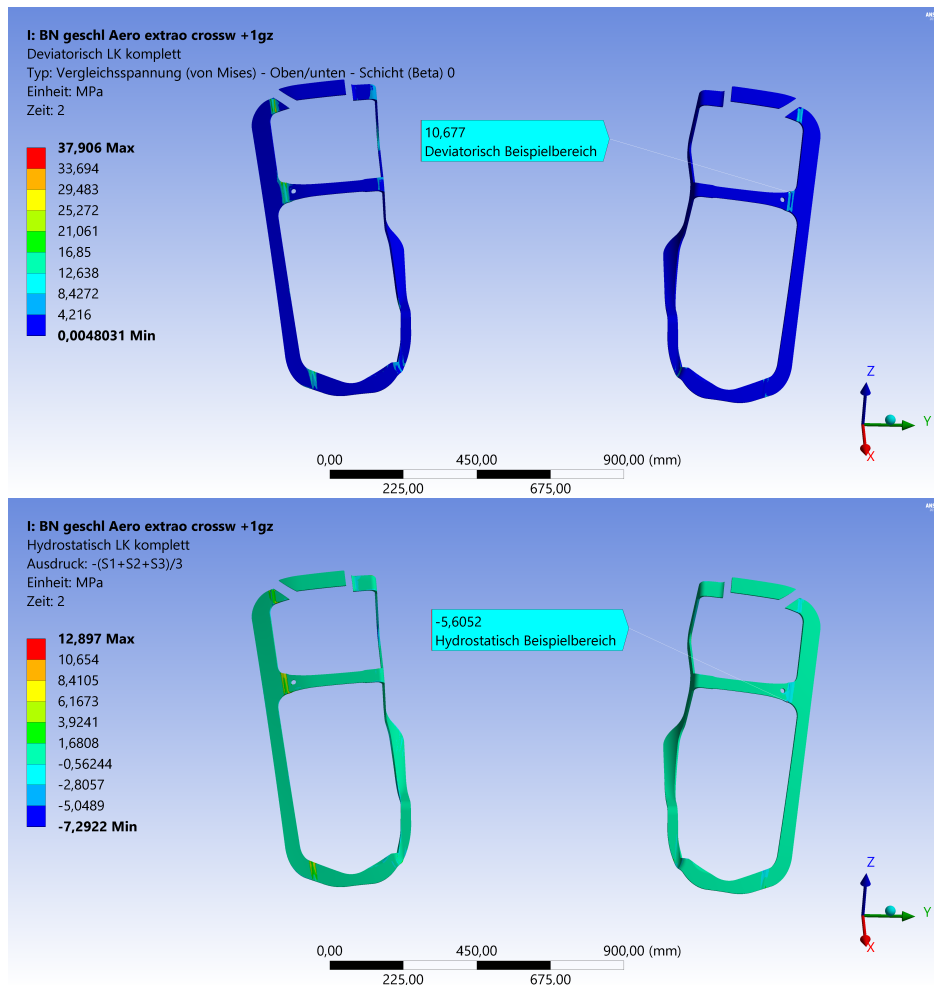


Abbildung 3.4: Deviatorischer (oben) und hydrostatischer (unten) Spannungszustand im Bereich Lampenkasten

Aus diesen Spannungszuständen wird der Beispielbereich ausgewählt. Dieser besitzt im Vergleich zum restlichen Bauteil eine Spannungsüberhöhung. Es muss beachtet werden, dass dies nicht grundsätzlich den maximalen und minimalen Spannungen innerhalb des Bauteils entspricht. Diese Spannungen können auch an singulären Punkten innerhalb des Bauteils auftreten, welche in Bereichen liegen, die über die Überlappungslänge betrachtet niedrig belastet sind und deshalb keiner genaueren Untersuchung unterzogen werden. Eine solche Spannungsüberhöhung kann zum Beispiel durch die grobe Vernetzung entstehen. Der hier dargestellte Bereiche zeigt über einen Großteil der Überlappungslänge eine Spannungsüberhöhung der deviatorischen sowie der hydrostatischen Spannungszustände und wurde deshalb ausgewählt. Die maximale deviatorische Spannung im betrachteten Bereich liegt hierbei am Interface bei 10,68 MPa und die minimale hydrostatische Spannung bei -5,61 MPa. Allerdings stimmen die Punkte der Maxima nicht überein (Abbildung 3.4). Der betrachtete Bereich ist neben den Schubspannungen auch Zugspannungen ausgesetzt (negatives Vorzeichen der hydrostatischen Spannung).

3.4.2 Spannungsverläufe des ausgewählten Bereichs

Nach der Auswahl des kritischen Bereichs wird über einen Pfad, welcher sich in der Mitte der Klebschicht befindet, der Verlauf der hydrostatischen sowie der deviatorischen Spannungsanteile ermittelt. Der Pfad ist hierbei in der Mitte der Klebschicht gewählt, da über die Spannung in der Mitte die Prüfkörpergeometrie abgebildet wird. Eine Abbildung der Spannungen am Interface wird nicht durchgeführt, da die Spannungen in diesen Bereichen von verschiedenen Faktoren abhängen (Elementgröße, Elementart, Kontaktdefinition), welche nicht quantifiziert sind. Abbildung 3.5 zeigt diesen Pfad für den betrachteten Bereich.

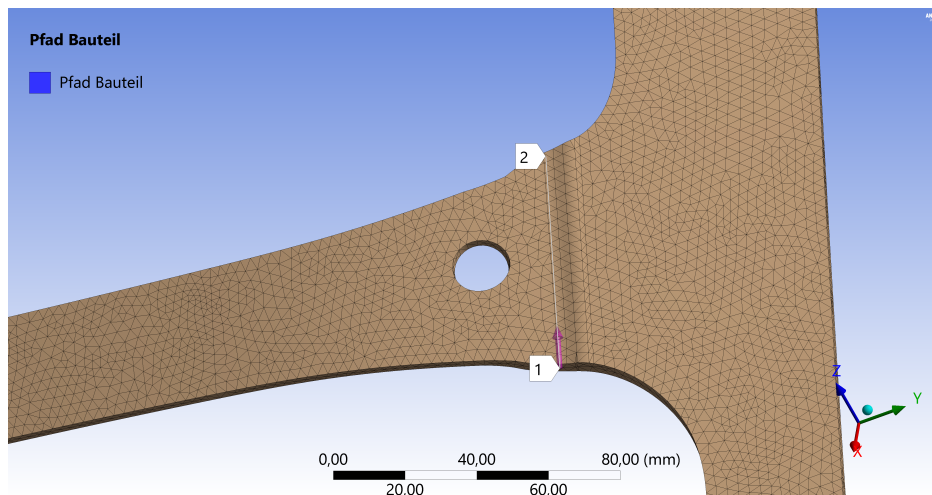


Abbildung 3.5: Pfad zur Auswertung der Spannungen

Der Pfad wird manuell erstellt. Die Auswertung erfolgt an 201 Punkten (programmbedingtes Maximum), welche auf dem Pfad liegen und für welche die Ergebnisse ausgegeben werden. Dabei handelt es sich folglich um gemittelte Ergebnisse, die weder an den Gauß-Punkten noch an den Knoten der Elemente ermittelt werden, sondern zufällig innerhalb der Elemente liegen und über die Ansatzfunktionen durch das Programm berechnet werden. Ein weiterer Grund für die Auswertung über eine Konstruktionsgeometrie ist die Vernetzung, welche zufällig und nicht strukturiert ist. Eine Auswertung der Ergebnisse an den Knoten oder Integrationspunkten der Elemente führt zu einem Pfad, welcher nicht konstant verläuft und deshalb die Interpretation erschwert.

Abbildung 3.6 zeigt den Verlauf der deviatorischen Spannungen über die Klebschicht:

Die deviatorischen Spannungen des betrachteten Bereichs pendeln hierbei zwischen 2,79 MPa ($x/l = 0,0348$) sowie 4,95 MPa ($x/l = 0,9353$). Für die hydrostatischen Spannungen ergibt sich am linken Rand bei $x/l = 0,0199$ ein Minimum von -1,68 MPa. Daraufhin steigen die Spannungen leicht an, bleiben jedoch konstant um -1 MPa. Am Ende der Überlappung ergibt sich bei $x/l = 1$ ein Minimum von -2,26 MPa.

Es zeigt sich, dass die Spannungen in der Mitte der Klebschicht geringere Werte aufweisen als am Interface, über welche im vorherigen Kapitel die Bereiche ausgewählt wurden. Dies war zu erwarten,

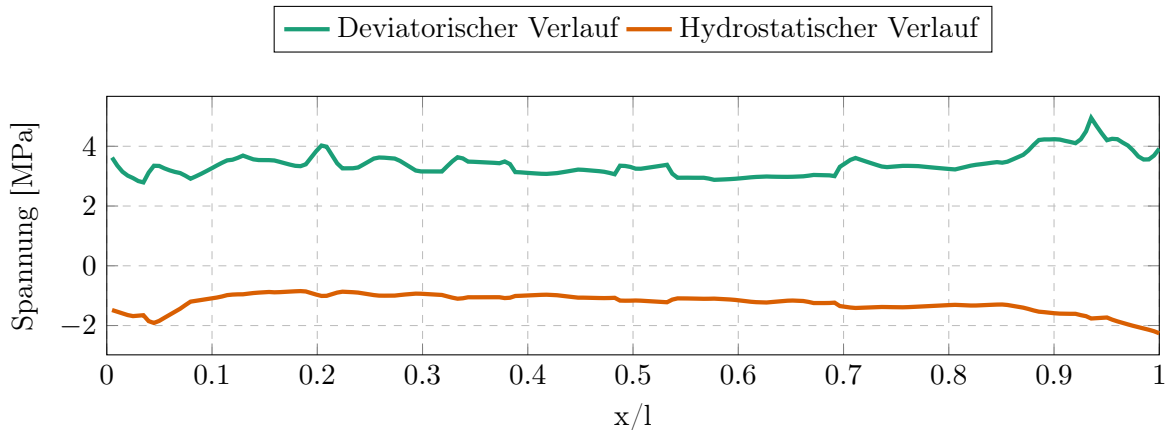


Abbildung 3.6: Deviatorischer Spannungszustand innerhalb der Klebschichten

ist allerdings bei der Auswertung der Prüfkörper zu berücksichtigen.

Weitere Spannungsverläufe für das Bauteil Lampenkasten sowie die obere und untere Bugklappe sind mit den zugehörigen Graphen und Abbildungen in Anhang A.1 zu finden.

3.4.3 Modellierung des Bauteils

Die dargestellte Modellierung ist die von Voith verwendete Diskretisierungsmethode zur Vernetzung der Bauteile. Alle Einstellungen und Werte wurden dem FE-Modell des betrachteten Bauteils entnommen. Eine Bewertung der Genauigkeit der Ergebnisse des Modells erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nicht.

Aufgrund der Größe eines Bauteils und aller dazugehörigen Komponenten ist im globalen FEM-Modell eine feine Vernetzung der Bauteile und insbesondere der - im Vergleich zu den anderen Bauteilen - kleinen Klebschicht nur mit einem erhöhten Berechnungsaufwand verbunden. Die Modellierung der Fügebauteile erfolgt daher über Schalenelemente (Shell 181) mit einer definierten Dicke (Abbildung 3.7).

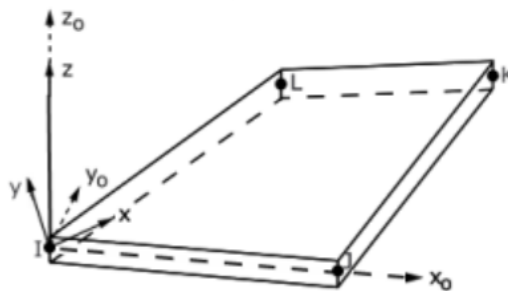


Abbildung 3.7: Shell 181 Element [55]

Diese Elementart verringert die Berechnungszeit im Vergleich zu Volumenelementen erheblich und wird besonders für die Berechnung von dünnwandigen Strukturen eingesetzt [82]. Die Schalen werden hierbei schubweich nach der Theorie von Reissner-Mindlin formuliert [55]. Der Hauptgrund für die Verwendung liegt darin, dass für diese Elemente nur c^0 -stetige Ansätze erforderlich sind. Diese sind einfacher zu realisieren als c^1 -stetige schubstarre Elemente. Für weitere Betrachtungen dieser Elemente wird auf Wagner [82] verwiesen.

Für den betrachteten Bereich sind die Elementgrößen in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Fügeteilvernetzung Beispielbereich

Lampenaufnahme (unteres Fügeteil)		Bugring (oberes Fügeteil)	
Elementkantenlänge	Elementhöhe	Elementkantenlänge	Elementhöhe
5 mm	2 mm	3 mm	3 mm

Die Klebschicht selbst wird mit Solid 186 oder Solid 187 Elementen modelliert (Abbildung 3.8). Hierbei handelt es sich um 20-Knoten Hexaeder (Solid 186) beziehungsweise 10-Knoten Tetraeder (Solid 187) Elemente, welche zwischen den Eckknoten sogenannte Zwischenknoten aufweisen. Diese Zwischenknoten führen für die Elemente zu zusätzlichen Freiheitsgraden und ermöglichen die Beschreibung der Elemente über quadratische Ansatzfunktionen. Aufgrund der Zwischenknoten steigt allerdings die Berechnungszeit im Vergleich zu linearen Elementen [82]. Für den hier aufgeführten Beispielbereich werden Tetraeder-Elemente (Solid 187) verwendet.

Die einzelnen Bereiche der Klebschichten sind unterschiedlich vernetzt. Voith verwendet eine flexible Vernetzungsstrategie, welche in Abhängigkeit von der Krümmung der Klebschicht Bereiche lokal feiner vernetzt.

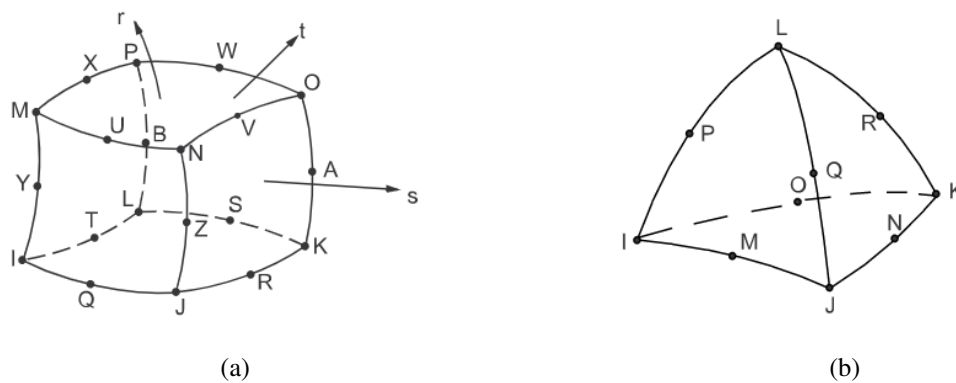


Abbildung 3.8: Elemente zur Klebschichtdiskretisierung bei Voith: Solid 186 (a) [56] und Solid 187 (b) [57]

Die geometrischen Abmessungen (Klebschichtdicke, Überlappungslänge) sowie die Vernetzung des betrachteten Bereichs ist in Tabelle 3.4 dargestellt.

Als Kontaktalgorithmus wird von Voith das Pure-Penalty-Verfahren verwendet. Die zugehörigen Einstellungen sind in Tabelle 3.5 dargestellt. Parameter, welche hier nicht aufgeführt sind, werden pro-

Tabelle 3.4: Geometrische Abmessung und Vernetzung der Klebschicht

Parameter	Wert
Klebschichtdicke d_K	6 mm
Überlappungslänge $l_{\bar{U}}$	62,84 mm
Elementart	Solid 187
Elementkantenlänge	3 mm
Elementhöhe	3 mm
Anzahl Elemente über $l_{\bar{U}}$	20
Anzahl Elemente über d_K	2

grammgesteuert definiert oder dienen aufgrund von geometrischen Abweichungen einer Definition der Kontaktfläche (zum Beispiel Pinball-Bereich). Auf die genauen Auswirkungen der Parameter wird nicht eingegangen und es wird die von Voith gewählte Kontaktformulierung verwendet. Es muss allerdings erwähnt werden, dass die Parameter einen Einfluss auf die Spannung der Klebschicht, besonders am Interface, haben. Dies kann durch eine gesonderte Untersuchung ermittelt werden, findet im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht statt.

Tabelle 3.5: Einstellung der Kontaktmodellierung

Parameter	Einstellung
Typ	Verbund
Verhalten	asymmetrisch
Algorithmus	Pure Penalty-Verfahren
Geringfügiges Gleiten	Aus
Kontaktsteifigkeit	Faktor
Kontaktsteifigkeitsfaktor	0,1
Kontaktsteifigkeit aktualisieren	Jede Iteration, Aggressiv

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Diskretisierung und Kontaktmodellierung wird dazu verwendet, um die Prüfkörper auf dieselbe Weise zu modellieren und so eine geeignete Prüfkörpergeometrie abzuleiten.

4 Spannungsanalyse in Prüfkörpern von Zugscherversuchen

Im folgenden Kapitel werden die Spannungsverläufe innerhalb der Prüfkörpergeometrien untersucht. Zuerst erfolgt ein Überblick über den Verlauf von Spannungen in verschiedenen Prüfkörpergeometrien wie er der Literatur entnommen werden kann. Anschließend werden unter Verwendung der bei Voith eingesetzten Werkstoffe verschiedene Prüfkörpergeometrien numerisch simuliert. Hierbei wird auch auf den Aufbau der numerischen Modelle eingegangen. Abschließend werden die numerischen Modelle mit analytischen Modellen verglichen, um die Validität der Ergebnisse sicherzustellen. Die Modelle dienen als Grundlage für die weitere Untersuchung der Prüfkörpergeometrien. Im letzten Schritt dieses Kapitels werden die maximalen Spannungen in der Mitte der Klebschicht mit den Spannungen am Interface verglichen um geometrische Parameter zu identifizieren, welche für die Prüfkörpergeometrien variiert werden können.

4.1 Betrachtung von Spannungsverläufen aus der Literatur

Der folgende Abschnitt zeigt einen Überblick über die verschiedenen Spannungszustände der in Kapitel 2 dargestellten Prüfkörper. Diese Spannungszustände werden aus der Literatur übernommen und dienen einem qualitativen Überblick. Auf Basis dieser Spannungszustände werden Prüfkörpergeometrien ausgewählt, welche darauf aufbauend modelliert werden, um sie einer genaueren Untersuchung zu unterziehen.

4.1.1 Überlappte Prüfkörper

Am Beispiel der einfach überlappten Zugschersprobe wird der Spannungszustand aufgezeigt, da diese die am häufigsten geprüfte [72] und auch in der Literatur am meisten untersuchte Prüfkörpergeometrie ist. Neben der Schubspannung wird auch die Zugspannung untersucht, welche durch die Kombination mit der Schubspannung eine ungünstige Schälbeanspruchung in der Klebschicht erzeugt und das Versagen der Klebung begünstigt. Aufgrund der gleichen Geometrie im Bereich der Überlappung von einfach überlappten sowie eingeschlitzten Prüfkörper werden letztere in diesem Abschnitt nicht betrachtet und es wird angenommen, dass derselbe Spannungszustand wie in einfach überlappten

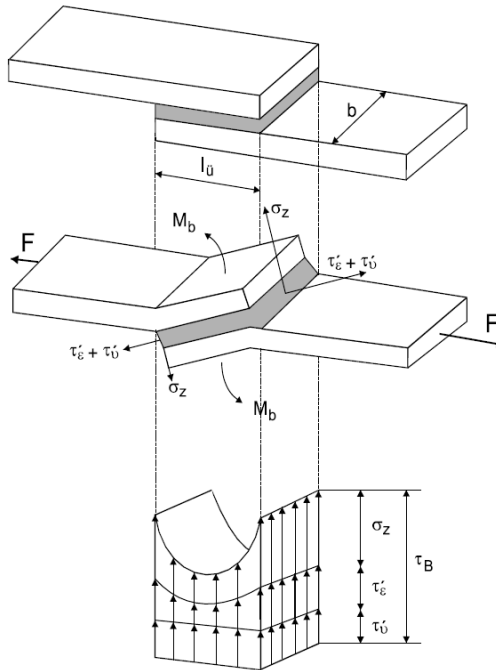


Abbildung 4.1: Spannungsanteile in der Klebschicht [36]

Prüfkörpern herrscht. Weiterhin wird festgelegt, dass der doppelt gelaschte Prüfkörper wie eine zweifach überlappte Probe angesehen wird. Dieses Vorgehen wird auch in der Literatur [78] durch eine Loslagerung in der Mitte der Laschungen realisiert.

Der Spannungszustand in einer Klebung wird am Beispiel eines einfach überlappten Prüfkörpers veranschaulicht (Abbildung 4.1). Die beiden Schubspannungsanteile τ_v und τ_e gelten dabei sowohl für einfach überlappte als auch zweifach überlappten Zugscherproben. Aufgrund des zentrischen Kraftangriffs bei zweifach überlappten Zugscherproben sind die Spannungsanteile aus σ_z nur für die einfach überlappte Zugscherprobe von Bedeutung. Der Spannungszustand in der Klebschicht setzt sich also aus diesen zwei, respektive drei, Spannungsanteilen zusammen [36, 48]:

- τ_v : Schubspannungen aus der Fügeteilverchiebung, verursacht durch die Kraft F (parallel zur Klebefläche). Abbildung 4.2 zeigt das Verhalten für unendlich starre Fügeteile, in welchen keine Fügeteildehnung auftritt und der Spannungszustand in der Klebung gleichmäßig ist.

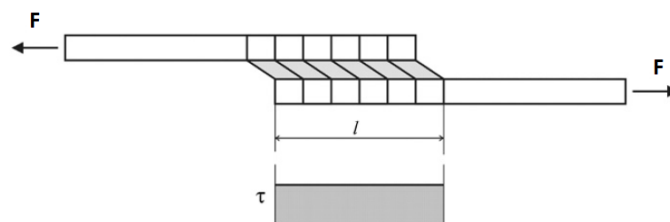


Abbildung 4.2: Verformung der Klebschicht bei starren Fügeteilen [28]

- τ_ε : Schubspannungen aus der Fügeiteildehnung (parallel zur Klebefläche). Diese Spannungen entstehen durch weiche Fügeiteile, wie sie besonders dünne Fügeiteile - unabhängig vom Werkstoff - darstellen. Aber auch dickere Fügeiteile aus niedermoduligen Werkstoffen (Aluminium, FKV-Fügeiteile) können mitunter als “weich“ angesehen werden. Besonders in den Randbereichen entsteht durch die Fügeiteildehnung eine Schubspannung (Abbildung 4.3). Da die Fügeiteile an den freien Enden keine Dehnung aufweisen (Bereich B, $\varepsilon = 0$), aber durch die Klebschicht mit den - im Bereich der Überlappungslänge - maximal gedehnten Bereichen (Bereich A, $\varepsilon = max$) des gegenüberliegenden Fügeiteils verbunden werden, entstehen komplexe Spannungszustände mit hohen Spannungsspitzen, wie sie in Abbildung 4.1 dargestellt sind.

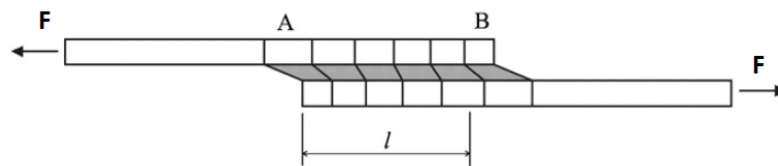


Abbildung 4.3: Verformung der Klebschicht bei flexiblen Fügeiteilen [28]

- σ_z : Zug-/Normal-/Schälspannungen aus dem Biegemoment M_b (senkrecht zur Klebefläche). Das Biegemoment entsteht dabei durch den exzentrischen Kraftangriff und ist nur für einfach überlappte Zugscherproben von Bedeutung. Berechnet wird das Moment aus der Kraft F und dem Hebelarm zur Klebschichtmitte:

$$M_b = F * \frac{d_F + d_K}{2} \quad (4.1)$$

Eine Erhöhung der Fügeiteil- oder der Klebschichtdicke führt also auf den ersten Blick zu einer Erhöhung des Biegemoments und damit zu einer Erhöhung der Spannungsspitzen der Normalspannung im Randbereich. Dies ist allerdings nur für die Erhöhung der Klebschichtdicke der Fall. Bei einer Erhöhung der Fügeiteildicke steigt zwar das Biegemoment linear mit der Fügeiteildicke an, allerdings ist das Widerstandsmoment quadratisch ($W = \frac{b \cdot d_F^2}{6}$) von der Fügeiteildicke abhängig. Dies führt bei zunehmender Fügeiteildicke zu einer Reduzierung der Spannungsspitzen an den Rändern, da die Fügeiteilbiegung stärker behindert wird und damit zu einer steigenden Festigkeit wie in Abschnitt 2.4 gezeigt wurde. Mit steigender Überlappungslänge nehmen gleichzeitig die Normalspannungen ab, was auf das reduzierte Verhältnis von Auslenkung zu Überlappungslänge zurückzuführen ist. Gleichzeitig führt ein steigender Elastizitätsmodul ebenfalls zu einer Verringerung der Spannungsspitzen, da die Biegung der Fügeiteile reduziert wird. [48]

Diese Spannungen überlagern sich zur Gesamtspannung der Klebung τ_B und erreichen am Rand der Klebschicht ihr Maximum. Überschreiten die Spannungsspitzen durch eine Erhöhung der Kraft einen kritischen Wert, so bricht die Klebung in den Randbereichen und der Bruch setzt sich zur

Mitte hin fort. Der Verlauf der einzelnen Spannungen (Schub- und Zugspannungen) ist allgemein wie in Abbildung 4.4 dargestellt und wird in zahlreichen analytischen Modellen sowie Untersuchungen mittels Finite-Elemente-Methoden ähnlich dargestellt [25, 28]. Auch die Verläufe der eingeschlitzten Prüfkörper verlaufen ähnlich wie in Abbildung 4.1. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind diese Verläufe hier nicht aufgeführt, stattdessen wird auf Yang et. al [87] verwiesen.

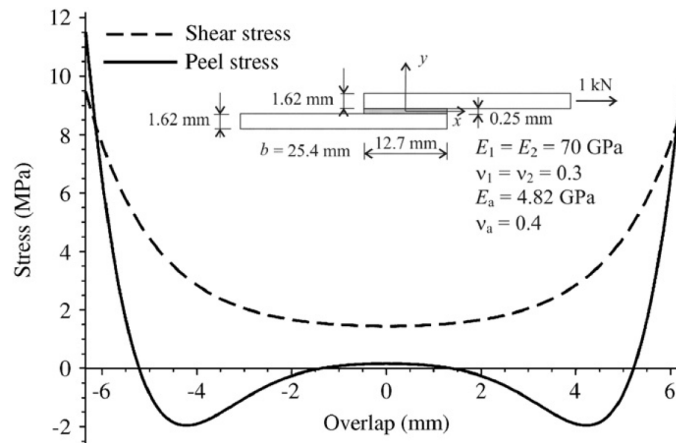


Abbildung 4.4: Spannungsverlauf der Schub- (shear) und Zugspannungen (peel) in der Klebschicht für eine einschnittig überlappte Zugscherprobe [28] aus [47]

Abbildung 4.5 zeigt den Spannungsverlauf der Normal- (peel) und Schubspannungen (shear) einer zweifach überlappten Probe, wie er in Wu und Crocombe [86] zu finden ist. Für die doppelt gelaschte Probe wird keine gesonderte Betrachtung durchgeführt, da die Spannungsverläufe ähnlich zu denen der zweifach überlappten Probe sind. Hierbei wird auf die Ergebnisse von Tsai [78] verwiesen. Der Verlauf der Normalspannungen ändert sich deutlich, wie in Abbildung 4.5 zu sehen ist.

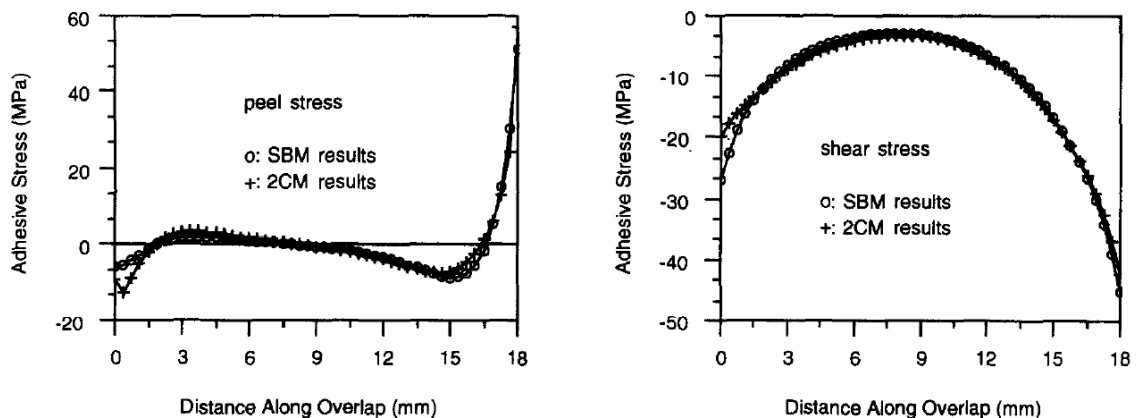


Abbildung 4.5: Spannungsverlauf der Zug- (peel) und Schubspannungen (shear) in der Klebschicht für eine zweifach überlappte Zugscherprobe [86]

Am rechten Rand der Klebschicht ergibt sich eine Spannungsspitze, welche die Klebschicht auf Zug belastet. Gleichzeitig entsteht am linken Klebschichttrand eine Belastung in umgekehrter Richtung

und die Klebschicht wird auf Druck belastet. Die Schubspannungen zeigen analog zur einfach überlappten Probe Spannungsspitzen am Rand der Überlappung. Diese sind allerdings nicht symmetrisch zum Mittelpunkt der Überlappung, es zeigen sich zudem Unterschiede in der Höhe [78, 86].

Die gezeigten Verläufe geben eine Übersicht über den grundsätzlichen Spannungsverlauf und die Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht. Bei der Untersuchung von Klebungen muss allerdings beachtet werden, dass der Spannungsverlauf auch über die Klebschichtdicke variiert [46]. Besonders für die bei Voith realisierten Schichtdicken von $> 1\text{ mm}$ steigen die Spannungsspitzen im Grenzschichtbereich zwischen Klebschicht und Füge teil stark an (Abbildung 4.6). Die dargestellten Verläufe zeigen nach einer Untersuchung von Gleich [45, 46] den Verlauf der Spannungen über die Klebschichtdicke am Rand der Klebung. Deutlich wird dabei die Spannungsüberhöhung in dicken Klebschichten. Deshalb ist es bei der Untersuchung der Prüfkörpergeometrien unbedingt notwendig, auch die Spannungsverläufe beziehungsweise die Spannungsspitzen an der Grenzschicht zwischen Klebschicht und Füge teil zu bewerten.

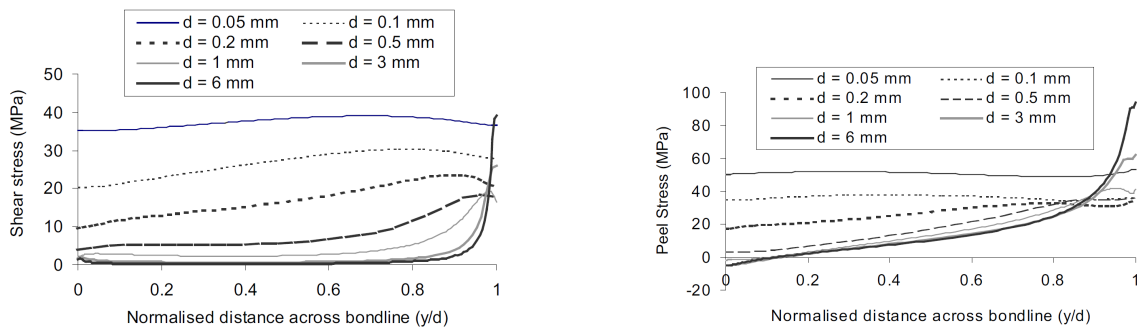


Abbildung 4.6: Spannungsverlauf über die Klebschichtdicke am dritten Knoten vom Rand der Klebschicht entfernt [45, S. 56]

4.1.2 Arcan-Versuch

Wie in Abschnitt 2.2 aufgezeigt, gibt es neben den klassischen Prüfkörpergeometrien noch weitere Prüfkörpergeometrien, von welchen allerdings nur der Arcan-Versuch weiter untersucht wird. Die Gründe für dieses Vorgehen sind in Kapitel 2 und 3 angegeben.

In Abbildung 4.7 sind die Spannungsverläufe innerhalb der Klebschicht für verschiedene Einspannwinkel dargestellt. Neben der reinen Zug- (Einspannwinkel 0° (a)) und Schub- (Einspannwinkel 90° (c)) Konfigurationen ist zusätzlich eine Zug-Schub- (Einspannwinkel 45° (b)) sowie eine kombinierte Druck-Schub- (Einspannwinkel 135° (d)) Konfiguration dargestellt. Über die Überlappungslänge sind die Schub- (SMXY) sowie die Zug-Spannungen (SMXX, SMYY) aufgetragen. Die Richtung x liegt hierbei in Richtung der Überlappungslänge und die y-Richtung liegt senkrecht auf der Klebschicht.

Im Vergleich zu den Überlappungsklebungen, wie sie im vorherigen Abschnitt aufgezeigt wurden, werden die fehlenden Spannungsspitzen sowie die homogenen Spannungsverläufe deutlich, welche

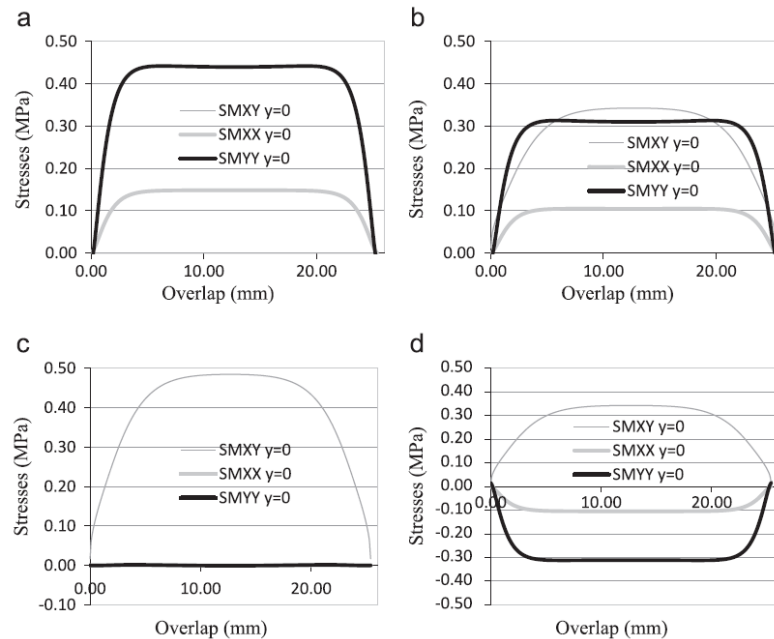


Abbildung 4.7: Spannungsverlauf der Schub (SMXY) und Zugspannungen (SMXX, SMYY) in der Klebschicht einer Arcan-Probe [27]

ein Vorteil der Arcan-Vorrichtung im Vergleich zu anderen Prüfkörperkonfigurationen darstellt. Besonders durch die Möglichkeit der kombinierten Belastungen lassen sich Klebschichten ohne den Einfluss von Spannungsspitzen charakterisieren, was für Materialmodelle wie z.B. das Druck-Prager Fließkriterium verwendet werden kann. Auffällig ist ebenfalls die Unterdrückung der nicht erwünschten Spannungen. Weiterhin ist dies die einzige Prüfkörpergeometrie, welche in einer uniaxialen Testmaschine eine kombinierte Druck-Schub-Belastung erzeugen kann. Aufgrund der dünnen Prüfkörper müssen auch Randeffekte quer zur Klebschicht betrachtet werden, da diese nur einen geringen Teil der Klebschichten von Voith abbilden. Weiterhin müssen die unterschiedlichen Einspannwinkel untersucht werden, was in Zusammenhang mit den Randeffekten den Umfang dieser Arbeit übersteigt. Deshalb wird diese Prüfkörpergeometrie nicht weiter betrachtet.

4.1.3 Zwischenfazit

Die Spannungsverläufe innerhalb der Klebschicht verschiedener Prüfkörpergeometrien sind in der Literatur vielfach behandelt und untersucht worden. Das Problem, welches sich für diese Arbeit ergibt ist, dass die Klebschichten meist mit einer geringen Klebschichtdicke simuliert wurden (zum Beispiel Her und Chan [52]). Die einzige Ausnahme stellen die von Gleich [45, 46] aufgestellten Untersuchungen dar. Es ist allerdings anzumerken, dass diese Untersuchungen für metallische Fügebauteile durchgeführt wurden. Um eine Quantifizierung der Spannungen für eine spezifische Anwendung bei Voith zu ermöglichen und um die Auswirkungen einer dicken Klebschicht auf den Spannungsverlauf zu untersuchen, ist es notwendig, die Prüfkörpergeometrien zu simulieren. Trotz der ähnlichen Span-

nungsverläufe der einfach überlappten und eingeschlitzten Prüfkörper sowie der zweifach überlappten und doppelt gelaschten Prüfkörper werden diese simuliert, um für alle Prüfkörper den Einfluss dicker Klebschichten und der bei Voith verwendeten Werkstoffe zu charakterisieren.

Die Prüfkörper welche simuliert werden, werden in der folgenden Tabelle 4.1 aufgezeigt:

Tabelle 4.1: Übersicht Prüfkörper für Simulation

Prüfkörpergeometrie	Simulation	Grund
Einfach überlappt	✓	Nur eine Untersuchung für dicke Klebschichten
Eingeschlitzte Platten	✓	Keine Untersuchung für dicke Klebschichten
Zweifach überlappt	✓	Keine Untersuchung für dicke Klebschichten
Doppelt gelascht	✓	Keine Untersuchung für dicke Klebschichten
Biegebehinderte Probe nach pr EN 6060	✓	Keine Untersuchung bekannt
Arcan-Versuch	X	Dünne Prüfkörper, keine Abbildung der Klebung von Voith
Pin-and-Collar-Versuch	x	Keine Abbildung der Klebschichten (Kapitel 3)
Zylindrische Verklebungen	x	Keine Abbildung der Klebschichten (Kapitel 3)

4.2 Simulation von Prüfkörpern

Zur Untersuchung der inhomogenen Spannungsverläufe innerhalb der Klebungen ist die Simulation dieser von besonderem Interesse. Einerseits können dabei analytische Modelle verwendet werden, von denen einige bereits seit 80 Jahren (Volkersen ([81], 1938)) existieren. Andererseits kann die Simulation mittels der Methode der finiten Elemente geschehen. Dieser Abschnitt soll einen kurzen Überblick über die Möglichkeiten der Simulation geben und die Gründe für die Auswahl der in dieser Arbeit verwendeten Simulationsmethoden erläutern.

4.2.1 Analytische Modelle

Volkersen sowie Goland und Reissner ([47], 1944) lieferten mit ihren Untersuchungen die ersten analytischen Modelle zur Berechnung der Spannungsspitzen in einschnittig überlappten Klebungen. Eine Vielzahl von Modellen wurde im weiteren Verlauf der Untersuchung von Klebverbindungen entwickelt und es werden auch heute noch neue Modelle entwickelt und implementiert. Ein Überblick über die verfügbaren Modelle geben Da Silva et al. [28, 29], welcher auch die Validität der Modelle bezüglich Versagensanalysen untersucht sowie Gleich [45] und Weißgräber [84]. Allerdings treffen diese Modelle nur auf einfach überlappte Zugscherproben zu. Hart-Smith [50] entwickelte hierzu ein erstes Modell für doppelt überlappte Zugscherproben. Für eingeschlitzte Prüfkörper (Yang et al. [87]) sowie doppelt gelaschte Proben (Tsai et al. [78]) sind analytische Modelle erst seit wenigen Jahren verfügbar. Der Vorteil von analytischen Modellen gegenüber einer Finiten-Elemente Analyse

liegt dabei vor allem in der schnellen Berechnung der Spannungszustände. Dies ist für eine erste Betrachtung der Prüfkörper sinnvoll.

Probleme bei der Verwendung analytischer Modelle

Bei der analytischen Berechnung der Spannungsverläufe mit den klassischen Modellen nach Volkersen sowie Goland und Reissner müssen einige Limitierungen und Schwierigkeiten beachtet werden, welche hier kurz erläutert werden sollen:

1. Die Modelle ermitteln die Spannungen in der Mitte der Klebschicht und halten diese Spannungen über die Klebung konstant. Spannungen am Interface, die bei einem kohäsiven Fügeiteilver-sagen oder bei Versagen am Interface zwischen Klebschicht und Fügeiteil versagensinduzierend sind, werden nicht erfasst [28]. Dies wurde von Gleich ([45, 46]) untersucht, was zu erheblichen Unterschieden besonders im Bereich von großen Klebschichtdicken führt (Abbildung 4.8).

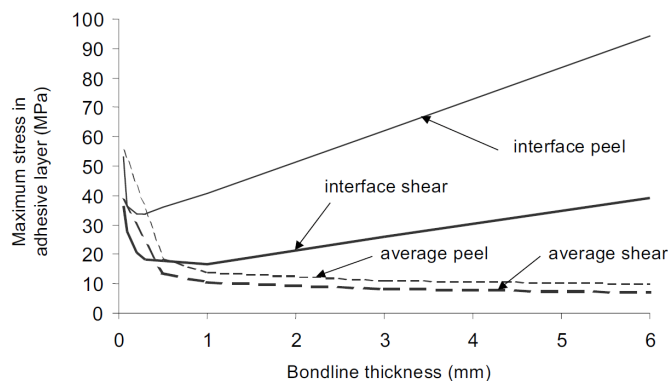


Abbildung 4.8: Spannungsverlauf am Interface verglichen mit den Spannungsverläufen nach Goland und Reissner (average) [45]

2. Die Schubspannungsspitzen entstehen bei den Modellen am Ende der Überlappung. Dies widerspricht der Randbedingung, dass die Spannung an freien Enden 0 sein muss (Abbildung 4.9). Modelle, die diesen spannungsfreien Zustand nicht abbilden, führen zu überhöhten Spannungen am Ende der Überlappung [28].
3. Durch die Darstellung der Fügeiteile als dünne Balken werden die Normal- und Schubspannungen in den Fügeiteilen nicht erfasst, was besonders für die Berechnung von FKV-Bauteilen kritisch ist [28]

Diese Limitierungen wurden durch eine Vielzahl von Autoren aufgegriffen und die bestehenden Modelle wurden verbessert oder es wurden neue Modelle entwickelt, welche zum Beispiel die Spannungsfreiheit am Klebschichttrand berücksichtigen. Allerdings sind viele dieser Modelle nur für isotrope Fügeiteile und nicht für FKV-Fügeiteile geeignet. Auch erweiterte Analysen, welche den Klebstoff mittels eines elastisch-plastischen Materialmodells darstellen, wurden entworfen. Zu erwähnen sind hierbei besonders die Modelle von Adams und Mallick [4], Hart-Smith [51] sowie Ojvalo und Einhoff [71]. Variationen der Spannungen über die Klebschichtdicke werden bei einigen Modellen

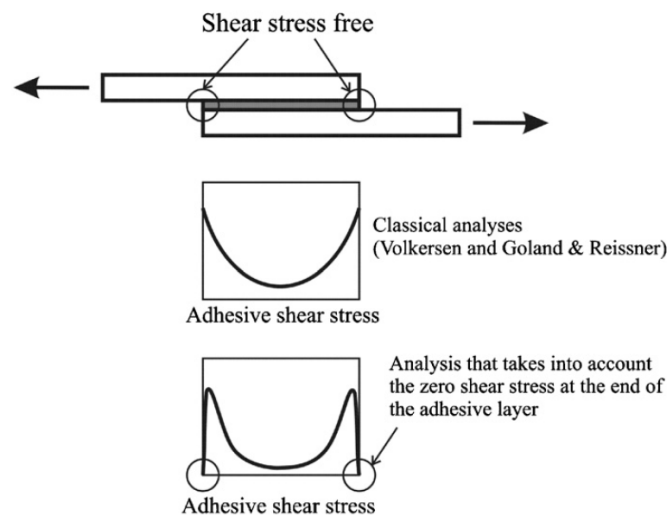


Abbildung 4.9: Spannungen mit und ohne spannungsfreien Zustand am freien Ende [29]

ebenfalls berücksichtigt und berechnet, was bei der Beurteilung der Spannungen am Interface von besonderer Bedeutung ist. Mit steigender Komplexität der Modelle gestaltet sich die explizite Lösung der Gleichungssysteme schwerer und ist teilweise unmöglich. Aus diesem Grund müssen numerische Lösungsverfahren, wie zum Beispiel die Finite-Differenzen-Methode, zum Lösen der Gleichungssysteme herangezogen werden [84]. Da Silva [29] stellt hierbei fest, dass sich keine nennenswerten Vorteile im Vergleich zu einer Berechnung mittels der Finite-Elemente Methoden ergeben. Eine weitere Einschränkung ist die Tatsache, dass diese Modelle sich nur auf eine Prüfkörpergeometrie beschränken. Für jede Prüfkörpergeometrie muss deshalb ein Modell implementiert und ausgewertet werden. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse aufgrund der Unterschiede und Einschränkungen der einzelnen Modelle ist nur bedingt gewährleistet. Zwar liefern sogenannte “general sandwich-type“-Modelle wie das von Bigwood und Crocombe [24] einen generellen Ansatz, welcher für verschiedene Prüfkörpergeometrien anwendbar ist, allerdings kann von diesen Modellen auch keine Aussage über die Spannungen am Interface getroffen werden.

Aus diesen Gründen geschieht der Vergleich der Spannungsverläufe nicht über die Verwendung analytischer Modelle, sondern über die Methode der finiten Elemente, welche im folgenden Abschnitt vorgestellt wird. In Abschnitt 4.6 werden vorhandene analytische Modelle zur Validierung der numerischen Modelle verwendet.

4.2.2 Numerische Simulation

Klebung können numerisch simuliert werden, indem die Methode der finiten Elemente (FEM) angewendet wird. Aufgrund des komplexen Verhaltens von Klebungen hat sich die Berechnung mittels FEM zu einer der verbreitetsten Methoden zum Analysieren von Klebverbindungen entwickelt [7]. Die ersten Analysen wurden von Wooley und Carver (1971, [85]) sowie Adams und Peppiatt (1974,

[5]) veröffentlicht, welche aufgrund der geringen Rechenleistungen nur eine grobe Vernetzung verwendeten, weshalb der Vorteil gegenüber analytischen Modellen nur in geringem Maße gegeben war [84]. Mit der steigenden Rechenleistung konnte die Netzfeinheit erhöht und komplexere Analysen durchgeführt werden, was zu erheblichen Vorteilen der FEM-Analyse von Klebungen im Vergleich zu analytischen Modellen führt. Verschiedenste Geometrien können analysiert und nichtlineares Verhalten (große Deformationen, Materialverhalten) kann durch eine FEM-Analyse abgebildet werden [84]. Trotz der Vorteile der FEM-Analyse müssen auch einige Besonderheiten beachtet werden. Insbesondere an den scharfen Ecken der Überlappung können Singularitäten auftreten (Abbildung 4.10) für welche die Kontinuumsmechanik keine Lösung bieten kann, was zu unendlich hohen Spannungen führt [65]. Deshalb wird der Ansatz verwendet, die Spannungen nicht am Ende der Überlappung, sondern an einem Punkt mit Abstand zu den Singularitäten auszuwerten, welcher nicht von der Singularität beeinflusst wird. Dieses als „stress-at-a-distance“ bezeichnete Verfahren kommt bei Gleich et al. [46] sowie Sancaktar und Narayan [73] zum Einsatz. Allerdings ist diese Methode abhängig von der Netzfeinheit, dem Lastfall und der Klebschichtdicke [65]. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Singularitäten ist das Runden der scharfen, „perfekten“ Ecken wie von Adams und Harris [3] vorgeschlagen.

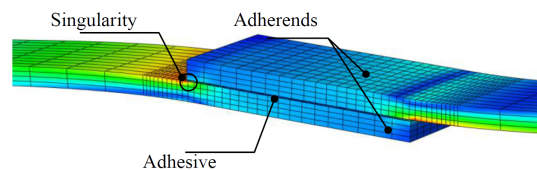


Abbildung 4.10: Singularitäten in der Klebschicht [65, S. 15]

Ein weiterer Punkt, der bei der Modellierung der Klebungen beachtet werden muss, ist die Dicke der Klebschicht, welche meist weitaus geringer ist als die Dicke der Fügeteile. Deshalb muss die Netzfeinheit in der Klebschicht höher sein als im Fügeteil, was zu einer hohen Anzahl an Freiheitsgraden führt und deshalb zu einem erhöhten Berechnungsaufwand führt [65]. Gleichzeitig ist ein feines Netz in Bereichen großer Spannungsgradienten nötig. Dies führt an den Klebschichträndern zu einer feineren Vernetzung als in der Klebschichtmitte [7]. Weiterhin muss durch die Rotation der Fügeteile geometrische Nichtlinearität berücksichtigt werden, um den korrekten Zustand der Spannungen zu berücksichtigen [7].

Die FEM-Analyse kann zum einen verwendet werden, um den Spannungszustand in einem bestimmten Lastfall zu berechnen und zum anderen, um die Festigkeit der Klebung zu untersuchen. Das Versagensverhalten kann bei der Festigkeitsuntersuchung durch drei verschiedenen Ansätze bestimmt werden [33, 84]:

1. Festigkeitsmechanische Ansätze, welche auf Basis der Spannungen und Dehnungen (zum Beispiel maximale Spannungen) Versagen vorhersagen.
2. Bruchmechanische Ansätze, welche über die Rissentstehung oder den Rissfortschritt über eine

kritischen Energiefreisetzungsrate das Versagen der Klebung bestimmen.

3. Schädigungsmechanische Ansätze, welche die Schädigung anhand eines Schädigungsgesetzes modellieren und so die Initiierung und Fortsetzung der Schädigung abbilden können. Der bekannteste Ansatz ist das Cohesive Zone Modelling (CZM).

Die Untersuchung dieser unterschiedlichen Versagensansätze bezüglich ihrer Genauigkeit für Klebverbindungen ist derzeit noch Stand der wissenschaftlichen Untersuchung. Eine Übersicht der einzelnen Ansätze zum Beschreiben des Versagensverhaltens findet sich in Ashcroft und Mubashar [7], da Silva und Banea [33] sowie Weissgräber [84]. Da die Festigkeitsanalyse und damit einhergehend die Untersuchung und Verwendung eines validen Versagenskriteriums zu umfangreich für diese Arbeit ist, wird auf eine solche Analyse verzichtet. Die FEM-Analyse wird dazu genutzt, die Spannungen in den Prüfkörpern für einen definierten Lastfall zu untersuchen, ohne Aussagen über die Festigkeit zu treffen. Über die Ermittlung von Versagenslasten in Kapitel 6 und die Simulation der Prüfkörper mit diesen Lasten in Kapitel 7 wird die Versagensspannung im Bauteil ermittelt.

4.3 Aufbau der Modelle

Der Aufbau der Modelle der Prüfkörper ist für die Analyse entscheidend. Durch Ausnutzung von Symmetrien oder durch eine variable Vernetzung kann die Berechnungsdauer gesenkt werden, allerdings muss hierbei der Einfluss auf die Ergebnisse beachtet werden. Der Aufbau der Modelle ist Inhalt des folgenden Kapitels.

4.3.1 Geometrie und Randbedingungen

Zunächst werden die Geometrien dargestellt und die dazugehörigen Maße aufgezeigt. Anschließend werden die Randbedingungen und die Lage der Koordinatensysteme innerhalb der Klebschicht erläutert. Die Geometrien der Prüfkörper sind in Abbildung 4.11 dargestellt.

Alle konstanten geometrischen Abmessungen sind mit den dazugehörigen Werten in Tabelle 4.2 angegeben. Die Klebschichtdicke d_k , die Überlappungslänge $l_{\bar{u}}$ sowie die Fügeteildicke d_F werden im Rahmen der Untersuchungen variiert. Die jeweiligen Werte werden in den zugehörigen Abschnitten angegeben.

In allen Modellen ist der Ursprung des Koordinatensystems in der Mitte der Klebschicht. Die Richtung der Kraft F ist in x -Richtung definiert. Die Lagerung der Bauteile ist in den Abbildungen 4.12 und 4.13 dargestellt. Diese entspricht der Lagerung in einer Zugprüfmaschine. Am linken Rand liegt eine feste Einspannung vor ($u_x = u_y = u_z = 0, u_{rx} = u_{ry} = u_{rz} = 0$). Am rechten Rand greift die Kraft F an. Gleichzeitig ist der Bereich, welcher in der Zugprüfmaschine eingespannt ist, so gelagert, dass eine Verschiebung in x -Richtung möglich ist ($u_x = \text{frei}, u_y = u_z = 0, u_{rx} = u_{ry} = u_{rz} = 0$). Die zweifach

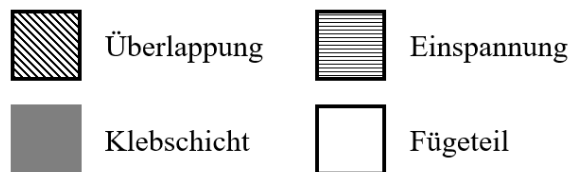
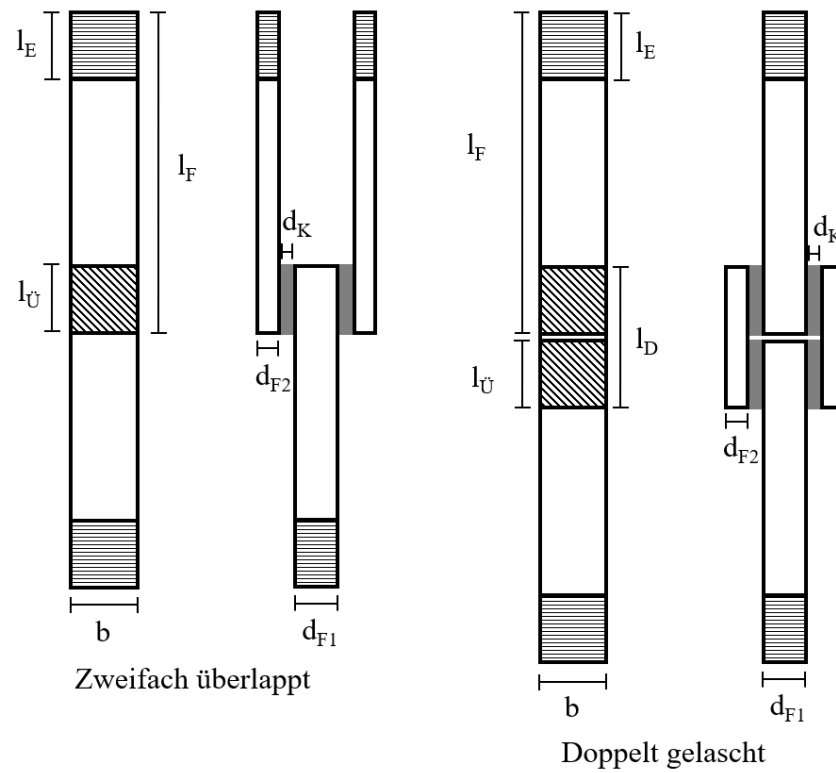
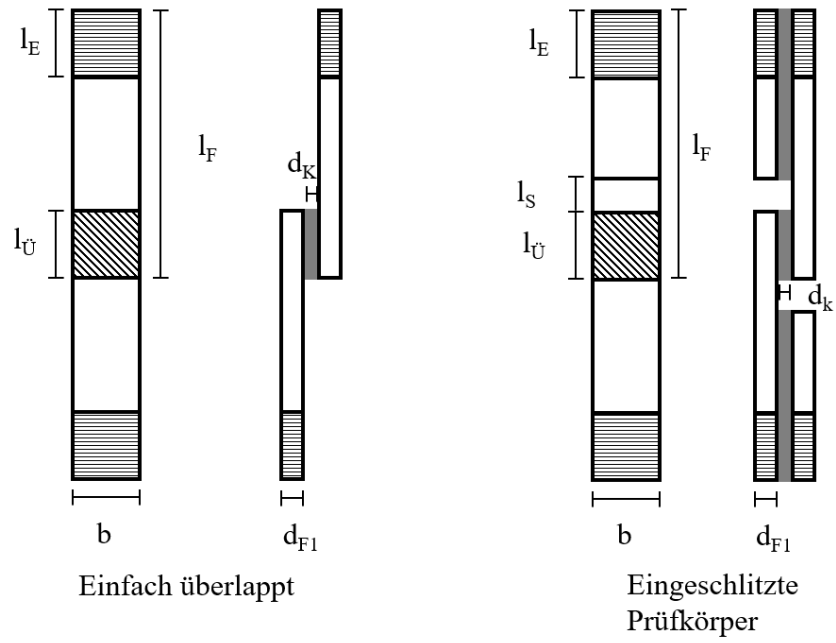


Abbildung 4.11: Prüfkörpergeometrien

Tabelle 4.2: Geometrische Abmessungen der verschiedenen Prüfkörpergeometrien

Prüfkörpergeometrie	l_F	l_E	l_S	l_D	b	d_{F1}	d_{F2}
Einfach überlappt	100 mm	25 mm	-	-	25 mm	4 mm	-
Eingeschlitzte Prüfkörper	100 mm	25 mm	3 mm	-	25 mm	4 mm	-
Zweifach überlappt	120 mm	25 mm	-	-	25 mm	8 mm	4 mm
Doppelt gelascht	120 mm	25 mm	-	52,5 mm	25 mm	8 mm	4 mm

überlappte sowie doppelt gelaschte Probe werden in der Mitte geschnitten und über eine Lagerung nur zur Hälfte simuliert (Abbildung 4.13). Dies ist aufgrund der Symmetrie der Prüfkörper möglich, führt zu einer erheblichen Verkürzung der Rechenzeit und wird in der Literatur auch auf diese Weise durchgeführt [34, 78].

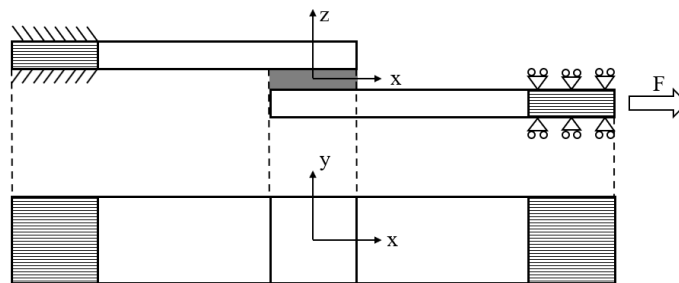


Abbildung 4.12: Randbedingungen Einfach überlappt

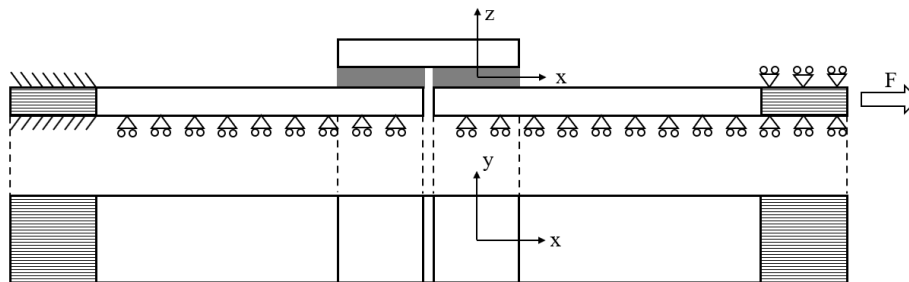


Abbildung 4.13: Randbedingungen Doppelt gelascht

4.3.2 Lagenaufbau der Fügeiteile

Die Fügeiteile werden als quasiisotropes Laminat angenommen. Als Grundlage des Materials wird ein Biax-Gelege verwendet, welches aus zwei, im 90°-Winkel zueinander gelegten, unidirektionalen Einzelschichten und einer Wirrfasermatte besteht. Die Wirrfasermatte wird für die Berechnungen jedoch vernachlässigt. Dies liegt zum einen daran, dass sie mit einem Flächengewicht von 100 g/m² im Vergleich zu den 600 g/m² der Einzelschichten ein geringes Gewicht aufweist, zum anderen wurde

die Matte in den Berechnungen von Voith zum Zeitpunkt der Erstellung der Modelle nicht berücksichtigt. Ein weiteres Problem ist die unbekannte Faserausrichtung infolge des Fertigungsprozesses, was in Untersuchungen von Voith zu richtungsabhängigen Eigenschaften der Matte geführt hat. Eine Einzellage hat eine Dicke von 0,5 mm und eine Biax-Gelege-Lage folglich 1 mm. Aus Tabelle 4.2 lassen sich die Dicken der Füge-teile entnehmen. Am Beispiel der Füge-teile mit 4mm Dicke wird der Lagenaufbau aufgezeigt. Dazu werden vier Biax-Gelege-Lagen mittensymmetrisch zueinander übereinander gestapelt ($[\pm 45/0/90]_s$), wodurch sich folgender Lagenaufbau ergibt:

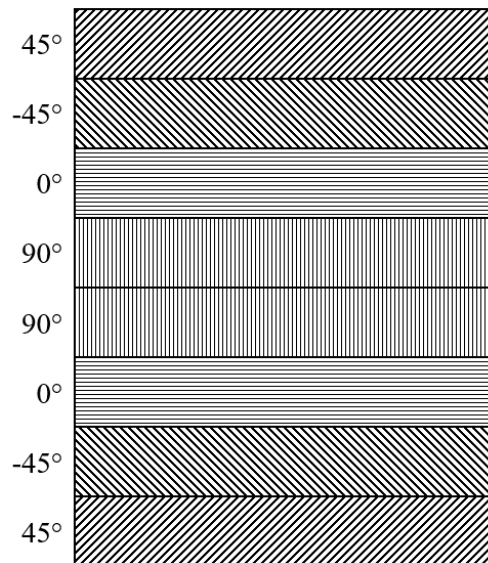


Abbildung 4.14: Lagenaufbau der Füge-teile

Für dickere Füge-teile wird der Lagenaufbau mehrfach durchgeführt, um weiterhin ein mittensymmetrisches Laminat mit quasiisotropen Eigenschaften zu besitzen.

4.3.3 Idealisierte Annahmen

Füge-teile:

Die Füge-teile werden als ideal angenommen. Inhomogenitäten während der Herstellung werden nicht berücksichtigt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass eine ideale Faser-Matrix-Bindung herrscht und dass die Dicken konstant sowohl über die Breite als auch die Länge sind. Die Oberfläche der Füge-teile wird ebenfalls als ideal für die Klebung angesehen.

Klebschicht:

Fertigungsbedingte Inhomogenitäten, zum Beispiel durch eine ungenügende Aushärtung des Klebstoffs oder durch Lufteinschlüsse, werden nicht berücksichtigt. Diese Inhomogenitäten können besonders beim Versagen der Klebung rissinzierend wirken und so die Festigkeit reduzieren. Auch

Eigenspannungen durch die Aushärtung des Klebstoffs werden nicht berücksichtigt. Außerdem kann ein Wulst am Ende der Klebung entstehen, welcher über den Klebspalt hinausgeht und einen zusätzlichen Lastpfad darstellt. Der Wulst oder auch "Spew-Fillet" genannt kann konstruktiv gewollt sein, um einen zusätzlichen Lastpfad in der Klebschicht zu erzeugen und keine perfekte Kante am Beginn der Klebschicht zu erhalten. Dies führt infolge der geringeren Spannungsspitzen zu einer Erhöhung der Klebfestigkeit. [72]

Die Klebschicht wird als ideal linear elastisches Material modelliert. Plastisches oder viskoelastisches Verhalten wird nicht berücksichtigt. Materialplastizität führt nach überschreiten eines Fließkriteriums zum Abbau der Spannungsspitzen innerhalb der Klebschicht, weshalb die Spannungsspitzen einer linear elastischen Modellierung höher sind als die Spannungsspitzen von plastischen Materialmodellen. Hierbei wird auf die weiterführende Literatur [48] verwiesen.

4.3.4 Numerisches Modell

Die Prüfkörper werden in der kommerziellen FE-Software ANSYS[©] (Versionen R 19.2 sowie 2019R3) modelliert und berechnet. Kern der Methode der finiten Elemente ist das Aufteilen einer beliebigen Geometrie in endlich viele, finite Elemente (Diskretisierung). Da das Verhalten dieser Elemente definiert ist, kann ein Differentialgleichungssystem erstellt werden, welches durch den Solver der Software mittels numerischer Verfahren gelöst wird. Die Randbedingungen (zum Beispiel Lagerungen, Kräfte) werden dabei vorgegeben und die Reaktion der Elemente auf diese Randbedingungen bilden das Verhalten des Körpers ab. Die Finite-Elemente Methoden sind dabei lediglich ein Näherungsverfahren. Aus diesem Grund ist die Modellbildung sowie die Interpretation der Ergebnisse von besonderer Bedeutung für die Anwendung. Aufgrund der komplexen Spannungszustände in Überlappungsklebung ist es zwingend erforderlich, die Vernetzung im Bereich der Klebschicht zu verfeinern. Besonders im Randbereich des Interface zwischen Klebschicht und Füge teil entstehen hohe Spannungsspitzen, die nur durch ein ausreichend feines Netz abgebildet werden können. Die Vernetzung ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Die Füge teile werden mittels des Lagenaufbaus aus Abschnitt 4.3.2 so modelliert, dass eine Lage einem Element über die Füge teildicke entspricht. Die Elementanzahl sowie die Elementkantenlängen für die verschiedenen Bereiche sind in Tabelle 4.3 aufgezeigt.

Tabelle 4.3: Elementgrößen

Bereich	Elementanzahl n_{EI}	Elementkantenlänge l_{EI} [mm]
Breite (1)	24	1,042
Mitte der Klebschicht (2)	variabel	variabel
Klebschichtdicke (3)	$\frac{d_K}{l_{EI}}$	0,05
Randbereich der Klebschicht (4)	84	0,0357
Randbereich der Füge teile fein (5)	42	0,0714
Randbereich der Füge teile grob (6)	28	0,1071

Die Anzahl der Elemente über die Prüfkörperbreite (1) ergibt sich durch die Vernetzung im feinen Randbereich (5). Die Erstellung eines strukturierten Netzes ist mit einer geringeren Elementanzahl

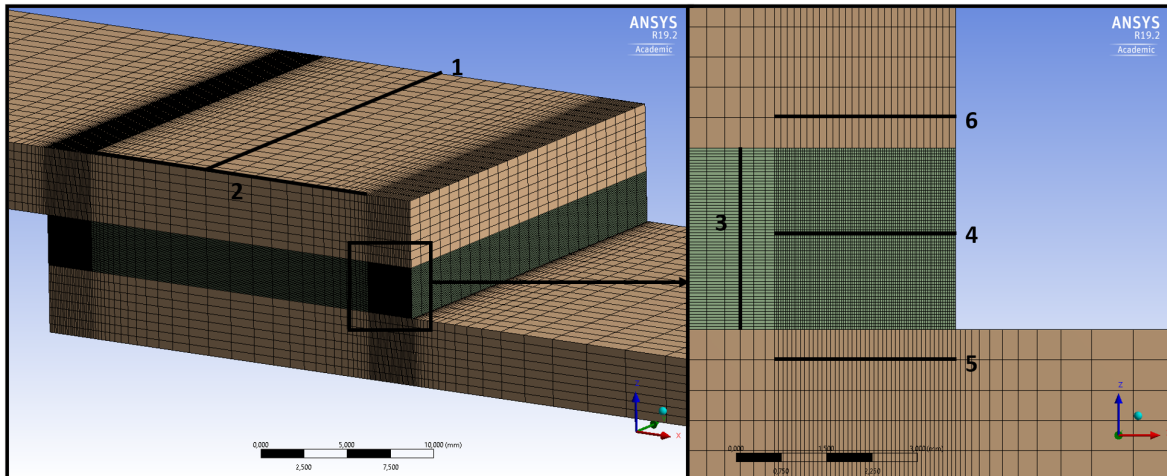


Abbildung 4.15: Vernetzung der Prüfkörper

nicht möglich, weshalb diese Anzahl an Elementen verwendet wird. In der Mitte der Klebschicht (2) ist die Elementkantenlänge variabel. Da in diesem Bereich keine großen Spannungsgradienten vorliegen, kann grundsätzlich eine gröbere Vernetzung verwendet werden. Dies führt am Übergang zu den fein vernetzten Randbereichen der Klebschicht allerdings zu einem Spannungssprung, weshalb die Elementkantenlänge variabel definiert wird und von den feinen Randbereichen zur Mitte der Klebschicht hin größer wird. Die Klebschicht und die Füge Teile sind so vernetzt, dass gemeinsame Knoten entstehen. Deshalb besitzen die Klebschicht sowie die Füge Teile in der Mitte der Überlappung sowie über die Breite die identische Anzahl an Elementen. Über die Klebschichtdicke (3) wird eine Elementkantenlänge von 0,05 mm definiert, um die Elementanzahl zu begrenzen. Für variierende Klebschichtdicken werden daher 10 - 100 Elemente verwendet. In den Randbereichen der Überlappung (4, 5, 6) unterscheiden sich die Vernetzungen von Klebschicht und Füge teil. Der Randbereich wird dabei als die letzten 3 mm der Überlappung definiert. Eine ausreichende Konvergenz der Normalspannungen konnte am Interface der Klebung zwischen $x = 12,4$ mm und $x = 12,45$ mm für 84 Elemente erreicht werden (s. Anhang A.2). Dies entspricht einer Elementkantenlänge von 0,0357 mm in den letzten 3 mm der Überlappungslänge. Der fein vernetzte Bereich des Füge teils, welcher im Bereich der Singularität liegt (5), wird mit der Hälfte der Elementanzahl der Klebschicht modelliert:

$$n_{ElRandFein} = \frac{1}{2} * n_{ElRandKlebschicht} \quad (4.2)$$

Die Ergebnisse zwischen dieser Vernetzung mit der Hälfte der Elementanzahl für das Füge teil (42 Elemente) und derselben Anzahl an Elementen zwischen Füge teil und Klebschicht (84 Elemente) zeigen am Interface einen Unterschied von 1,84 MPa bei $x = 12,45$ mm (84 Elemente Füge teil: $\sigma_z = 137,47$ MPa; 42 Elemente Füge teil: $\sigma_z = 139,31$ MPa) bei einer Klebschichtdicke von $d_K = 5$ mm. Dieser Unterschied liegt bei 1,3 % und wird als akzeptabel angesehen.

Für den gegenüberliegenden Bereich des Füge teils (6), welcher am freien Ende der Überlappung liegt, wird eine gröbere Vernetzung verwendet und der Füge teilbereich wird nur mit einem Drittel der

Elementanzahl der Klebschicht modelliert:

$$n_{ElRandGrob} = \frac{1}{3} * n_{ElRandKlebschicht} \quad (4.3)$$

In diesem Bereich ist das freie Ende der Klebschicht zu finden, welches geringere Spannungsgradienten aufweist. Diese gröbere Vernetzung wird verwendet, um Rechenzeit zu sparen und so die Berechnungen der verschiedenen Prüfkörper zu beschleunigen. Dieses Vorgehen wird angewendet, da dieser Bereich keiner genaueren Betrachtung im Rahmen der Analysen unterzogen wird.

Als Element wird das in Abbildung 4.16 dargestellte 8 Knoten Hexaeder-Volumenelement verwendet, welches über lineare Ansatzfunktionen verfügt. Dieses Element wird sowohl für die Klebschicht als auch für die Fügeiteile verwendet. Für jeden Knoten kann hierbei die Verschiebung und Belastung in alle drei Raumrichtungen bestimmt werden.

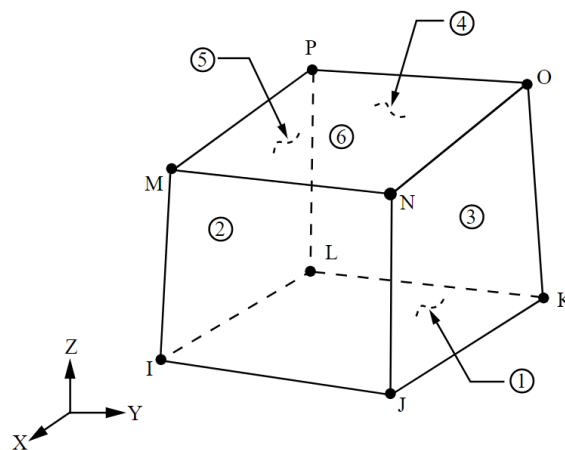


Abbildung 4.16: Elementart Solid 185 [58]

Wichtig für die Modellierung von Verklebungen ist die Definition der Kontaktbedingung von Fügeiteil und Klebschicht. Für die Prüfkörper wird das Multiple-Point-Constraints-Verfahren (MPC) verwendet. Bei diesem Verfahren wird die Verbindung der unterschiedlichen Knoten über zusätzliche Gleichungen realisiert. Durch die Bindung der Knoten können hohe Spannungsspitzen entstehen, was bei der Analyse der Spannungen im Randbereich berücksichtigt werden muss. Die hier dargestellte Vernetzung wird verwendet, um die Prüfkörper zu analysieren. Sie entspricht nicht der Vernetzung, welche Voith zur Berechnung der Bauteile verwendet. Für die Vernetzung von Voith konnte für die Prüfkörper keine Konvergenz festgestellt werden. Auch die Verwendung von Shell-Elementen anstatt Solid-Elementen für die Fügeiteile führt zu einer Vereinfachung der Modelle. Für eine detaillierte Betrachtung der Prüfkörper wird deshalb eine veränderte Vernetzung verwendet.

4.4 Vergleich der Spannungsverläufe

Im ersten Schritt werden die Prüfkörpergeometrien mit identischen Überlappungslängen ($l_{\ddot{U}} = 25$ mm), Breiten ($b = 25$ mm) und Klebschichtdicken ($d_K = 3$ mm) simuliert. Hierbei werden die einfach überlappten, die eingeschlitzten, die zweifach überlappten und die doppelt gelaschten Prüfkörper simuliert. Die Simulation der biegebehinderten Prüfkörper erfolgt im folgenden Abschnitt 4.5. Ziel dieser einheitlichen Betrachtung ist es, geometrische Einflüsse auf die Klebfestigkeit zu reduzieren, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die numerischen Ergebnisse werden dabei über die Klebschicht gemittelt, um an den Elementgrenzen einen homogenen Übergang zu erhalten. Gleichzeitig werden die Ergebnisse an den Knoten und nicht an den Integrationspunkten (Gauß-Punkten) ausgewertet. Deshalb ergibt sich für die Anzahl der Elemente über die Breite und für die Anzahl der Elemente über die Klebschichtdicke eine gerade Anzahl an Elementen. Es muss angemerkt werden, dass die Knotenwerte in Ansys aus den Ergebnissen an den Integrationspunkten für die einzelnen Elemente extrapoliert werden.

Für den Vergleich der Spannungsverläufe wird neben der Mitte der Klebschicht (Abbildung 4.17, Linie CD) auch der Spannungsverlauf in den Randbereichen (AB und EF) untersucht. Für die maximalen Werte am Interface wird der Knoten ausgewählt, welcher aufgrund der Konvergenz der Ergebnisse zwischen 12,4 mm und 12,45 mm liegt. Dies ist der dritte Knoten am Interface bei $x = 12,429$ mm. Alle Maxima am Interface werden nicht bei $x = 12,5$ mm, sondern an diesem Knoten ermittelt.

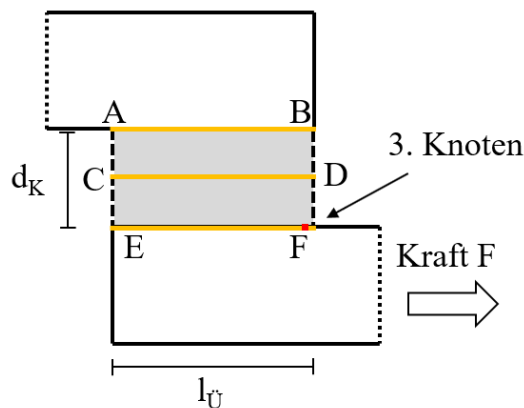


Abbildung 4.17: Untersuchte Pfade der Prüfkörpergeometrien

Nach den Maßen nach Abbildung 4.11 ergibt sich die Klebefläche jeder einzelnen Klebung zu:

$$A = l_{\ddot{U}} * b = 25\text{mm} * 25\text{mm} = 625\text{mm}^2 \quad (4.4)$$

Für alle Prüfkörpergeometrien in diesem Abschnitt und in Abschnitt 4.7 wird dieselbe „imaginäre“ mittlere Spannung von **8 MPa** festgelegt. Dadurch ergeben sich folgende Lasten für die Simulation:

Tabelle 4.4: Kräfte für Simulation

Prüfkörpergeometrie	Anzahl Klebeflächen	Klebefläche gesamt	Kraft
Einfach überlappt	1	625 mm ²	5000 N
Eingeschlitzt	1	625 mm ²	5000 N
Zweifach überlappt	1	625 mm ²	5000 N
Doppelt gelascht	1	625 mm ²	5000 N

Da der zweifach überlappte Prüfkörper analog zum doppelt gelaschten Prüfkörper aufgrund der Symmetrie in der Mitte aufgeschnitten wird (Abbildung 4.13), wird dieser Prüfkörper mit nur einer Klebefläche angenommen.

Der doppelt gelaschte Prüfkörper wird ebenfalls mit einer und nicht mit zwei Klebeflächen angegeben. Wird der Prüfkörper in der Mitte des Dopplers freigeschnitten, resultiert daraus eine Geometrie, welche identisch mit der zweifach überlappten Probe ist. Dies kann weiterhin mit dem Kraftfluss veranschaulicht werden, denn die gesamte Kraft von 5000 N beansprucht sowohl die linke als auch die rechte Klebefläche.

Abbildung 4.18 zeigt den Verlauf der Schubspannungen für die vier simulierten Prüfkörpergeometrien in der Mitte der Klebschicht (Pfad CD).

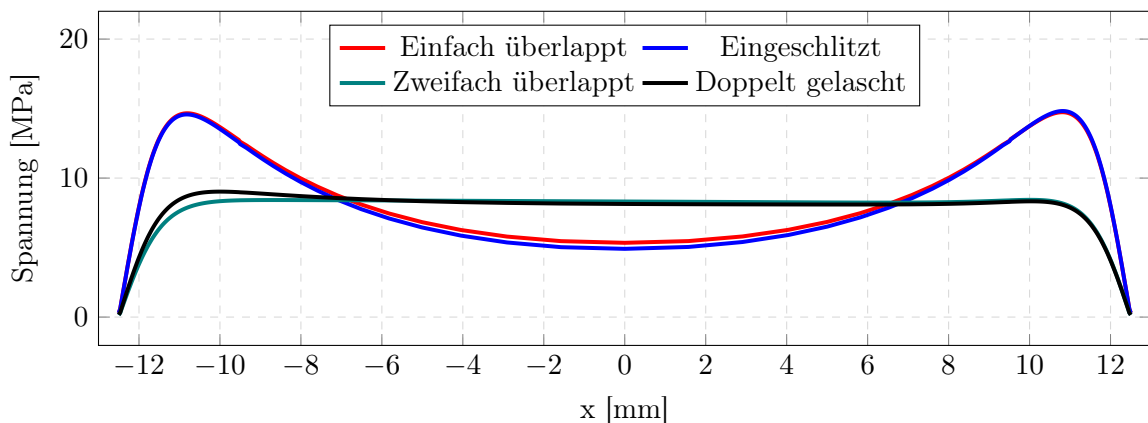


Abbildung 4.18: Schubspannung τ_{xz} Vergleich verschiedener Prüfkörpergeometrien, Mitte der Klebschicht (CD)

Für die einfach überlappten und eingeschlitzten Prüfkörper ergeben sich Verläufe, welche in der Mitte bei $x = 0$ mm ein lokales Minimum (einfach überlappt: 5,34 MPa, eingeschlitzt: 5,29 MPa) aufweisen. Am Rand der Klebschicht ergeben sich lokale Maxima, welche sowohl am linken als auch am rechten Rand entstehen. Für den rechten Rand der Klebschicht ergibt sich bei $x = 10,82$ mm ein Maximum von 14,74 MPa für den einfach überlappten Prüfkörper sowie ein Maximum von 14,83 MPa für den eingeschlitzten Prüfkörper. Die zweifach überlappten und doppelt gelaschten Prüfkörper zeigen über die gesamte Überlappungslänge einen homogenen Spannungsverlauf und liegen bei circa 8 MPa. Am linken Überlappungsende besitzt die doppelt gelaschte Probe eine Spannungsspitze von 9,03 MPa bei

$x = -10$ mm, während die zweifach überlappte Probe keine Spannungsspitze aufweist. Dies kann mit der unterschiedlichen Prüfkörpergeometrie der beiden Prüfkörper begründet werden. Abbildung 4.19 zeigt die Schubspannungen im Randbereich der Klebschicht entlang des Pfades E zu F aus Abbildung 4.17.

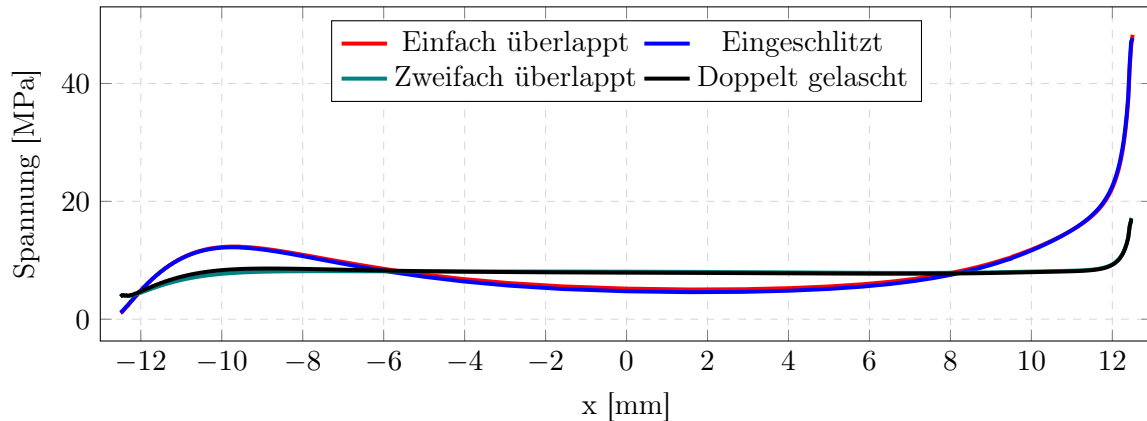


Abbildung 4.19: Schubspannungen τ_{xz} Vergleich verschiedener Prüfkörpergeometrien, Interface der Klebschicht (EF)

Hierbei zeigt sich für die einfach überlappte und eingeschlitzte Probe eine leichte Spannungsüberhöhung am linken Rand, welche zur Mitte hin abfällt. Am rechten Rand ergeben sich hohe Spannungsspitzen, welche ihr Maximum bei 42,59 MPa (einfach überlappt) bzw. 43,35 MPa (eingeschlitzt) erreichen. Die zweifach überlappten und doppelt gelaschten Prüfkörper besitzen am linken Rand kein Maximum. Die Schubspannungen steigen leicht an, bewegen sich jedoch analog zur Spannung in der Mitte um circa 8 MPa. Die Maxima werden am Rand erreicht und betragen bei $x = 12,429$ mm 15,87 MPa (zweifach überlappt) sowie 15,74 MPa (doppelt gelascht). Die Normalspannungen in der Mitte der Klebschicht (CD) sind in Abbildung 4.20 aufgetragen.

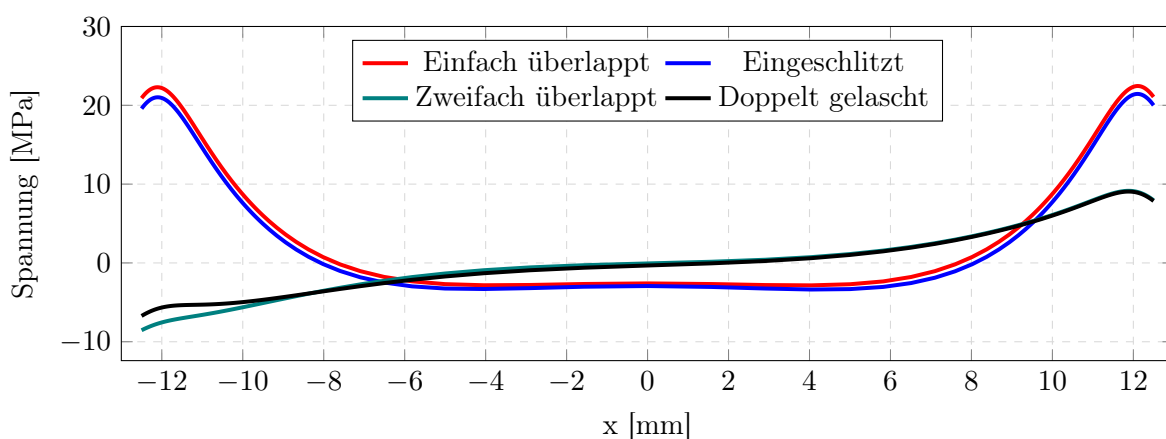


Abbildung 4.20: Normalspannung σ_z Vergleich verschiedener Prüfkörpergeometrien, Mitte der Klebschicht (CD)

Für die einfach überlappten und eingeschlitzten Prüfkörper wird deutlich, dass die Mitte der Kleb-

schicht mit Druckspannungen belastet wird und leichte lokale Minima aufweist. Am Rand der Überlappung, sowohl links als auch rechts, zeigen sich Spannungsspitzen von über 20 MPa. Das Maximum wird am rechten Rand bei $x = 12,11$ mm erreicht und beträgt 22,45 MPa (einfach überlappt) sowie 21,44 MPa (eingeschlitzt). Damit sind die Normalspannungen für diese Prüfkörper höher als die Schubspannungen.

Die zweifach überlappten und doppelt gelaschten Prüfkörper weisen am linken Rand eine Druckbelastung auf, während am rechten Rand eine Zugbelastung auftritt. Das Minimum am linken Rand liegt für die zweifach überlappte Probe bei -8,54 MPa ($x = -12,5$ mm). Für die doppelt gelaschte Probe beträgt diese Minimum -6,73 MPa ($x = -12,5$ mm). Der Unterschied kann mit der geringeren Durchbiegung der doppelt gelaschten Probe begründet werden. Am rechten Rand existieren für beide Prüfkörper bei $x = 11,893$ lokale Maxima (zweifach überlappt: 9,15 MPa, doppelt gelascht: 9,05 MPa). Bis auf den Unterschied am linken Rand sind die Verläufe dieser beiden Prüfkörper nahezu identisch und weisen über die Überlappungslänge nur geringe Abweichungen auf.

Für das Interface (EF) sind die Normalspannungen in Abbildung 4.21 dargestellt.

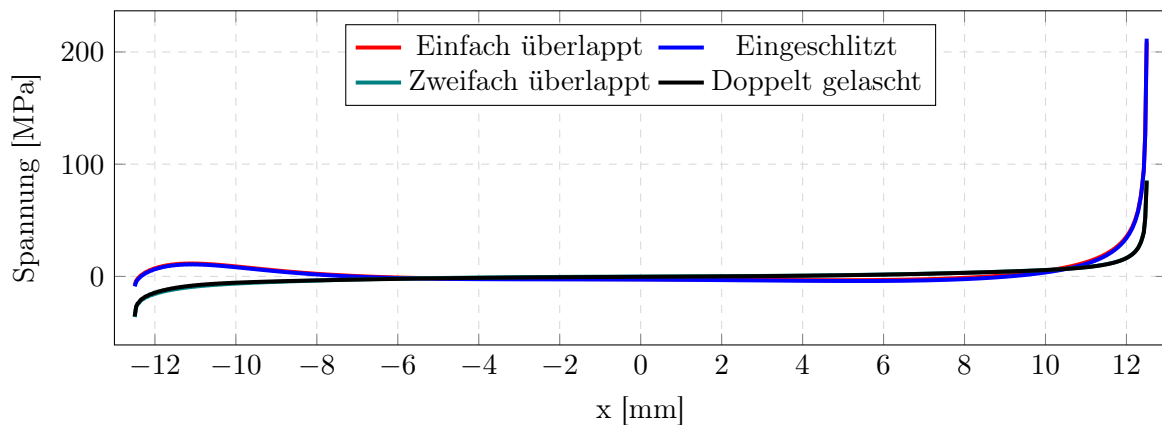


Abbildung 4.21: Normalspannung σ_z Vergleich verschiedener Prüfkörpergeometrien, Interface der Klebschicht (EF)

Die einfach überlappten und eingeschlitzten Prüfkörper haben am linken Rand eine geringe Spannungsspitze von circa 10 MPa. Über die gesamte Überlappungslänge zeigen sich geringe Normalspannungen, welche am rechten Ende der Überlappung stark ansteigen. Die Werte bei $x = 12,429$ mm liegen für den einfach überlappten Prüfkörper bei 95,47 MPa und für den eingeschlitzten Prüfkörper bei 95,03 MPa. Es zeigt sich ein nahezu identischer Verlauf der Spannungen am Interface für beide Prüfkörper.

Für die zweifach überlappten und doppelt gelaschten Prüfkörper zeigt sich ein Druckbereich am linken Rand. Die Normalspannungen in diesem Bereich zeigen Spannungsspitzen, welche bei $x = 12,429$ mm für die zweifach überlappte Probe -24,9 MPa und für die doppelt gelaschte Probe -24,2 MPa betragen. Am rechten Rand ergibt sich ein Bereich, welcher die Klebschicht auf Zug belastet. Die Spannungsspitzen steigen in diesem Bereich stark an, sind allerdings nicht so hoch wie die Spannungsspitzen der einfach überlappten und eingeschlitzten Prüfkörper. Für den zweifach überlappten Prüfkörper ergibt sich eine Spannung von 39,7 MPa bei $x = 12,429$ mm und für den doppelt gelaschten

ten Prüfkörper eine Spannung von 39,3 MPa. Die nahezu identischen Beträge der Spannungsspitzen zeigen die Ähnlichkeit der beiden Prüfkörper.

Durch die Übereinstimmungen der Spannungsverläufe von einfach überlapptem und eingeschlitztem Prüfkörper sowie zweifach überlapptem und doppelt gelaschtem Prüfkörper zeigt sich, dass eine Betrachtung dieser vier Prüfkörpergeometrien nicht notwendig ist. Für die weitere Betrachtung in diesem Kapitel werden nur noch der einfach überlappte sowie der zweifach überlappte Prüfkörper herangezogen. Es wird festgelegt, dass die Ergebnisse des einfach überlappten Prüfkörpers übertragbar auf den eingeschlitzten Prüfkörper sind. Auf dieselbe Weise, stehen die Ergebnisse des zweifach überlappten Prüfkörpers stellvertretend auch für den doppelt gelaschten Prüfkörper.

4.5 Auswirkung einer Biegebehinderung auf die Spannungsverläufe

Die in Kapitel 2 erwähnte Biegebehinderung nach ASD-STAN pr EN 6060 wird in diesem Abschnitt untersucht. Durch eine außen am Prüfkörper angebrachte Stützvorrichtung wird die Biegung der Füge-teile unterdrückt (Abschnitt 2.2). Eine solche Biegebehinderung kann für die Verklebungen interessant sein, da diese zu einer Reduzierung der Normalspannungsspitzen führen kann.

Die Biegebehinderung wird dabei an einem eingeschlitzten Prüfkörper durchgeführt, wie sie in Abschnitt 4.3 dargestellt sind. Folgende geometrische Abmessungen werden verwendet:

Tabelle 4.5: Geometrische Abmessungen der Prüfkörper für die Simulation der Biegebehinderung

Abmessung	Wert
Überlappungslänge $l_{\bar{U}}$	25 mm
Breite b	25 mm
Klebschichtdicke d_k	3 mm

Aufgrund der nicht veränderten Klebefläche wird diese Simulation mit einer Kraft von 5 kN durchgeführt, was zu einer mittleren Spannung von 8 MPa führt. Für die Modellierung wird die Verschiebung der Füge-teile in z -Richtung unterbunden ($u_z = 0$, Abbildung 4.22). Die Biegebehinderung wird als ideal angenommen. Eine Durchbiegung der Vorrichtung, ein Einfluss der Reibung der Füge-teile auf der Vorrichtung sowie durch die Schraubenklemmkraft auf die Füge-teile und die Klebschicht wirkende Normalkräfte werden nicht berücksichtigt.

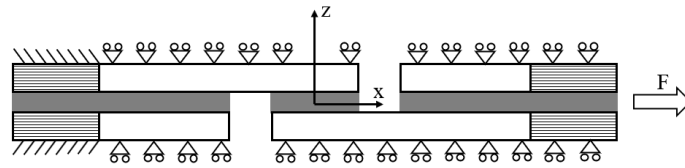


Abbildung 4.22: Randbedingung für die Biegebehinderung

Abbildung 4.23 zeigt die Spannungsverläufe in der Mitte der Klebschicht für einen biegebehinderte Prüfkörper sowie für einen Prüfkörper ohne Biegebehinderung (frei):

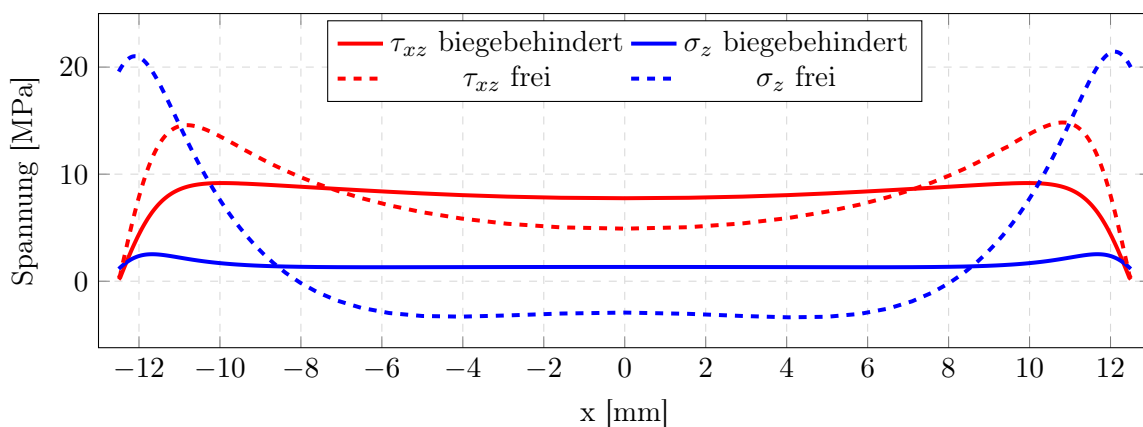


Abbildung 4.23: Schub- und Normalspannungen für einen biegebehinderten, eingeschlitzten Prüfkörper und einen freien, eingeschlitzten Prüfkörper in der Mitte der Klebschicht (CD)

Sowohl für die Normalspannung als auch die Schubspannung zeigt sich ein homogener Spannungsverlauf, welcher lediglich geringe Spannungsspitzen an den Rändern der Klebschicht aufweist. Im Vergleich zu den Spannungsspitzen der Schubspannung ergibt sich eine Reduktion von 14,83 MPa ($x = 10,82$ mm) auf eine maximale Schubspannung von 9,17 MPa ($x = 9,93$ mm). Diese Spannungsspitze liegt nur leicht über der gemittelten Schubspannung von 8 MPa.

Bei den Normalspannungen sind die Unterschiede zwischen dem biegebehinderten und dem nicht biegebehinderten Prüfkörper noch größer. So ergibt sich beim freien Prüfkörper für die Normalspannung eine Spannungsspitze von 21,44 MPa ($x = 12,11$ mm), welche durch die Biegebehinderung auf 2,52 MPa reduziert wird ($x = 11,68$ mm). Auch der Verlauf der Normalspannung ist für den biegebehinderten Prüfkörper über die gesamte Überlappungslänge homogen. Weiterhin ergibt sich durch die Biegebehinderung kein Druckbereich in der Mitte der Klebschicht, wie er beim nicht biegebehinderten Prüfkörper entsteht.

Die Spannungen am Interface (EF) der Klebschicht sind in Abbildung 4.24 dargestellt.

Auffällig ist beim biegebehinderten Prüfkörper der homogene Verlauf der Schub- sowie der Normalspannungen. Auch für den nicht biegebehinderten Prüfkörper ergeben sich homogene Verläufe,

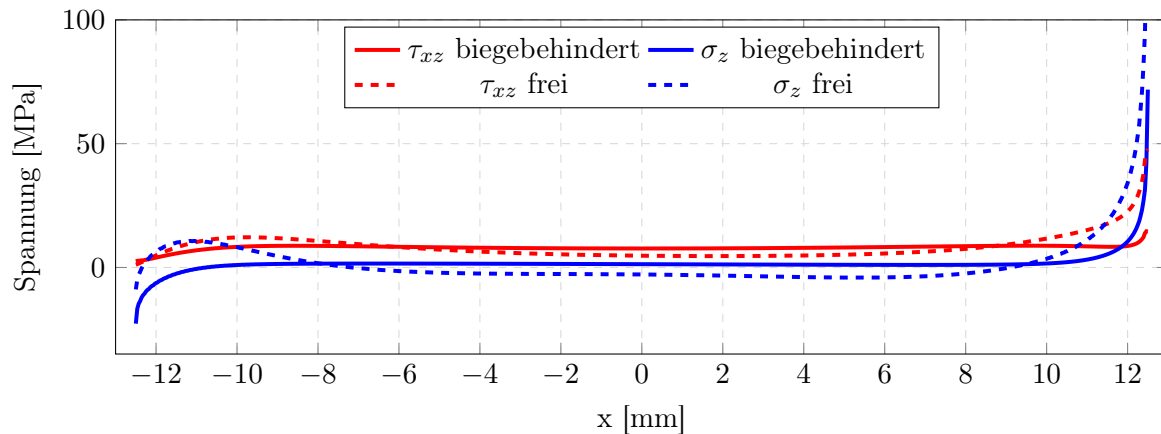


Abbildung 4.24: Schub- und Normalspannungen für einen biegebehinderten, eingeschlitzten Prüfkörper und einen freien, eingeschlitzten Prüfkörper am Interface der Klebschicht (EF)

allerdings entstehen dabei am linken Rand leichte Spannungsüberhöhungen der Schubspannungen (12,2 MPa bei $x = -9,68$ mm) und der Normalspannungen (10,7 MPa bei $x = -11,07$ mm). Für die Normalspannungen des biegebehinderten Prüfkörpers ergibt sich am linken Rand ein Druckbereich, welcher beim freien Prüfkörper weniger stark ausgeprägt ist. Werden die Spannungsspitzen analog zum Vorgehen im vorherigen Abschnitt am dritten Knoten ($x = 12,429$ mm) verglichen, so ergeben sich für die Schubspannungen eine Reduktion von 43,35 MPa für den Prüfkörper auf 13,9 MPa für die biegebehinderte Prüfkörper. Auch die Normalspannungen reduzieren sich erheblich von 95,03 MPa für den Prüfkörper ohne Biegebehinderung auf 31,52 MPa für den biegebehinderten Prüfkörper.

Es zeigt sich, dass der biegebehinderte Prüfkörper zu einer Reduzierung der Spannungsspitzen der Schub- und Normalspannungen führt. Dies ist sowohl in der Mitte der Klebschicht als auch am Interface zwischen Klebschicht und Füge teil zu beobachten. Zu beachten ist, dass trotz geringer Normalspannungsspitzen in der Mitte der Füge teile die Normalspannungen am Rand der Überlappung stark ansteigen und höher als die Schubspannungen sind. Der biegebehinderte Prüfkörper kann daher zwar in der Mitte der Überlappung mit geringen Normalspannungen angenommen werden, nicht aber am Interface der Überlappung.

4.6 Validierung der Modelle

Zur Validierung der Spannungsverläufe innerhalb der Klebschicht wird zunächst für einen einfach überlappten Prüfkörper das analytische Modell von Hart-Smith [51] herangezogen ¹. Hierbei handelt es sich um ein einfaches Modell, welches die Schub- und Normalspannungen über eine geschlossene analytische Lösung ermittelt. Untersuchungen von Silva et. al [28, 29] sowie Keuntje [61] zeigten eine Übereinstimmung mit anderen analytischen Modellen. Für die Anwendung des Modells werden die Ingenieurskonstanten des Mehrschichtverbundes verwendet. Diese Werte können mithilfe der

¹Modell wurde von Herrn Völkerink zur Verfügung gestellt

klassischen Laminattheorie aus der Laminat-Steifigkeitsmatrix bestimmt werden. Auf eine Herleitung dieser “verschmierten“ Materialeigenschaften wird verzichtet. Stattdessen wird auf die weiterführende Literatur verwiesen [74]. Tabelle 4.6 zeigt die verwendeten Materialkonstanten für die Füge­teile. Die Werte des Klebstoffs bleiben unverändert zu den Werten aus Abschnitt 3.2.

Tabelle 4.6: Materialdaten für das analytische Modell

Eigenschaft	Formelzeichen	Wert
E-Modul	E_F	18481 [MPa]
Poissonzahl	ν_F	0,32
Schubmodul	G_F	7002 [MPa]

Die Schubspannung wird über Formel 4.5 berechnet:

$$\tau = A_2 \cosh(2\lambda'x) + C_2 \quad (4.5)$$

Die zugehörigen Konstanten werden über die Formeln 4.7 bis 4.12 ermittelt. Anzumerken ist hierbei, dass der Ursprung von x , analog zum numerischen Modell, in der Mitte der Klebschicht ist. Der Parameter c beschreibt die halbe Überlappungslänge. P ist die Kraft bezogen auf die Überlappungsbreite (25 mm). Für die untersuchte Überlappungslänge von 25 mm ergibt sich bei einer Kraft von 5000 N ein Wert von:

$$P = \frac{5000N}{25mm} = 200 \frac{N}{mm} \quad (4.6)$$

$$\lambda' = \sqrt{\left[\frac{1 + 3(1 - \nu_F^2)}{4} \right] \frac{2G_K}{d_K E_F d_F}} \quad (4.7)$$

$$A_2 = \frac{G_K}{d_K E_F d_F} \left[P + \frac{6(1 - \nu_F^2) M}{d_F} \right] \frac{1}{2\lambda' \sinh(2\lambda'c)} \quad (4.8)$$

$$C_2 = \frac{1}{2c} \left[P - 2 \frac{A_2}{2\lambda'} \sinh(2\lambda'c) \right] \quad (4.9)$$

$$M = P \left(\frac{d_F + d_K}{2} \right) \frac{1}{1 + \xi c + (\xi^2 c^2 / 6)} \quad (4.10)$$

$$\xi^2 = \frac{P}{D} \quad (4.11)$$

$$D = \frac{E_F d_F^3}{12(1 - \nu_F^2)} \quad (4.12)$$

Weiterhin berechnet Hart-Smith mit Formel 4.13 die Normalspannungen entlang der Überlappungslänge der Klebschicht:

$$\sigma = A \cosh(\chi x) \cos(\chi x) + B \sinh(\chi x) \sin(\chi x) \quad (4.13)$$

Die Berechnung der Parameter χ , A und B ist in den Formeln 4.14 bis 4.16 aufgezeigt:

$$\chi^4 = \frac{E_K}{2Dd_K} \quad (4.14)$$

$$A = -\frac{E_K M [\sin(\chi c) - \cos(\chi c)]}{d_K D \chi^2 e^{(\chi c)}} \quad (4.15)$$

$$B = \frac{E_K M [\sin(\chi c) + \cos(\chi c)]}{d_K D \chi^2 e^{(\chi c)}} \quad (4.16)$$

Mit den dargestellten Formeln werden die Spannungsverläufe der Schub- und der Normalspannungen für unterschiedliche Klebschichtdicken berechnet. Abbildung 4.25 zeigt den Verlauf der Schub- und Normalspannungen für eine Klebschichtdicke von 0,5 mm. Hierbei ist links der Verlauf über die gesamte Überlappungslänge dargestellt. Der rechte Teil der Grafik zeigt den Bereich der letzten 3 mm der Überlappungslänge zwischen 9,5 mm und 12,5 mm.

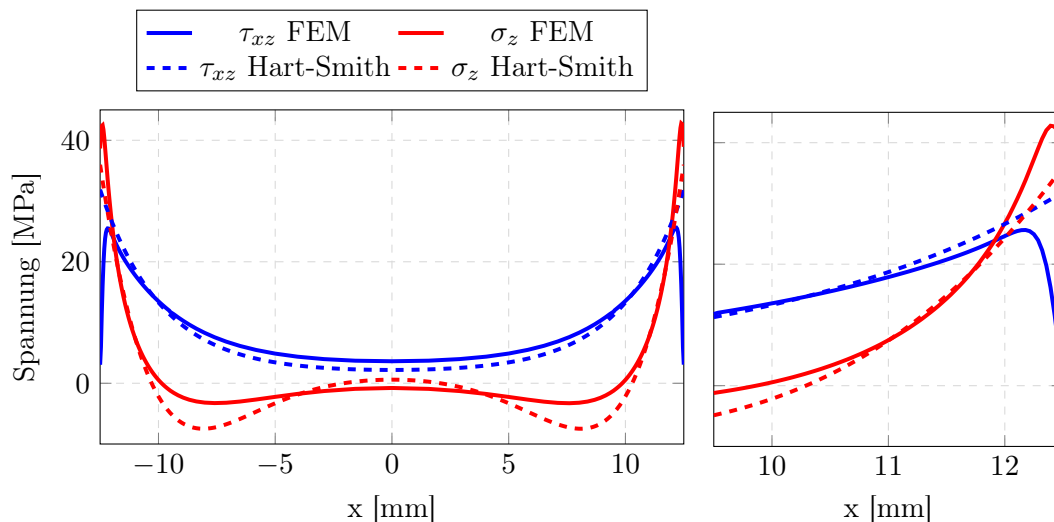


Abbildung 4.25: Vergleich von Schub- und Normalspannungen, $d_k=0,5$ mm

Im linken Graph wird deutlich, dass die analytischen und numerischen Verläufe der Schubspannung eine gute Übereinstimmung über nahezu die gesamte Überlappungslänge aufweisen. Der größte Unterschied in der Mitte der Überlappung bei $x=0$ mm liegt bei 1,43 MPa (FEM: 3,62 MPa, Hart-Smith: 2,19 MPa). Am Rand (rechte Seite) zeigt sich, dass die Schubspannungen unterschiedliche Maxima aufweisen. Der maximale Wert der analytischen Lösung befindet sich bei $x = 12,5$ mm und beträgt 31,87 MPa, während das Maximum der numerischen Lösung bei $x=12,18$ mm liegt und 25,63 MPa beträgt. Diese Abweichung von 6,24 MPa entspricht einem Unterschied von 24,3% für die Spannungsspitzen. Wird jedoch die Schubspannung des analytischen Modells bei 12,18 mm betrachtet (bei 12,18 mm liegt das Maximum der numerischen Lösung), so liegt diese bei 28,4 MPa, was einen Unterschied der Maxima von 2,77 MPa bedeutet (10,8% Differenz). Dies wurde bereits in Abschnitt 4.2.1 thematisiert und ist auf das Ende des Spannungsverlaufs des analytischen Modells zurückzuführen, welches die Spannungsfreiheit am Rand der Überlappung nicht berücksichtigt.

Die Normalspannungen der analytischen und numerischen Lösungen liefern für eine Klebschichtdicke von 0,5 mm in den Bereichen der größten Gradienten (zwischen 10,5 mm und 12 mm) eine gute Übereinstimmung. In der Mitte der Überlappung zeigt sich, dass die lokalen Minima durch die analytische Lösung einen höheren Betrag haben (-7,49 MPa bei $x = 8,13$ mm) als die numerischen Lösungen (-3,26 MPa bei $x = 7,6$ mm) aufweisen. In der Mitte der Klebschicht im Bereich um $x = 0$ mm liegt die analytische Lösung im Bereich positiver Normalspannungen, während die numerische Lösung negative Normalspannungen ergibt. Allerdings haben die Spannungen in diesem Bereich verglichen mit den Spannungsspitzen geringe Beträge, weshalb hier von niedrig belasteten Bereichen ausgegangen werden kann, in denen es nicht relevant ist, ob die Spannungen positiv oder negativ sind. Am Rand der Überlappung zeigt sich, dass die numerische Lösung eine Spannungsspitze bei $x = 12,39$ mm (42,77 MPa). Die analytische Lösung besitzt die Spannungsspitze erneut am Rand der Überlappung (35,97 MPa bei $x = 12,5$ mm). Dies entspricht einer Differenz von 6,8 MPa (18,9 %).

Es zeigt sich für dünne Klebschichten eine gute Übereinstimmung der Spannungsverläufe. Am Rand der Überlappung treten Abweichungen auf, welche sich aus der nicht berücksichtigten Spannungsfreiheit des analytischen Modells nach Hart-Smith am Ende der Überlappung ergeben. Dadurch werden die Spannungen höher angegeben als dies der Fall ist. Dies wurde bereits in Abschnitt 4.2.1 beschrieben. Es ist anzumerken, dass die meisten analytischen Modelle für noch dünnere Klebschichten ($d_K = 0,2$ mm) entworfen und validiert wurden. Hierin kann ebenfalls ein Grund für den Unterschied der Verläufe für die betrachtete Klebschichtdicke liegen. Weiterhin ist zu beachten, dass mit der FE-Modellierung der exakte Lagenaufbau modelliert und simuliert werden kann. Für das analytische Modell können lediglich die "verschmierten" Materialdaten verwendet werden, was ebenfalls zu Abweichungen führt. Trotz der Abweichungen der Spannungsspitzen, welche aus unterschiedlichen Gründen entstehen (Spannungsfreiheit, Entwurf analytischer Modelle für dünne Klebschichten, exakte/"verschmierte" Materialeigenschaften), werden die Modelle für eine weitere Betrachtung der Prüfkörpergeometrie verwendet. Die genannten Abweichungen sind der Literatur bekannt und wurden zum Beispiel von da Silva et. al thematisiert [28, 29].

Ein Modell für zweifach überlappte Prüfkörper wird nicht implementiert und überprüft. Stattdessen wird der grundlegende Verlauf modellierter und aus der Literatur entnommener Spannungsverläufe verglichen. Weiterhin ist anzumerken, dass die zweifach überlappte Probe wie die einfach überlappte Probe modelliert wird. Analog zur doppelt gelaschten Probe (Abbildung 4.13), wird das mittlere Füge teil in der Mitte über eine Lagerung an einer Durchbiegung gehindert. Dieses Verfahren wird auch in Untersuchungen anderer Autoren angewendet [34, 78]. Es kann aus der Validierung der einfach überlappten Probe angenommen werden, dass durch die Übereinstimmung der einfach überlappten Probe auch die zweifach überlappte Probe zu validen Ergebnissen führt, da nur die Randbedingung des Füge teils hinzugefügt wurde.

Dennoch wird ein qualitativer Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur vorgenommen. Abbildung 4.26 zeigt den Spannungsverlauf der zweifach überlappten Probe für eine Klebschichtdicke von 0,5 mm verglichen mit den Spannungsverläufen aus Wu und Crocombe [86].

Hierbei zeigt sich im Vergleich der Spannungsverläufe, dass sich ein qualitativ ähnlicher Verlauf ergibt. Die Schubspannungen besitzen in der Mitte der Klebschicht ein lokales Minimum ($x = 0$ mm,

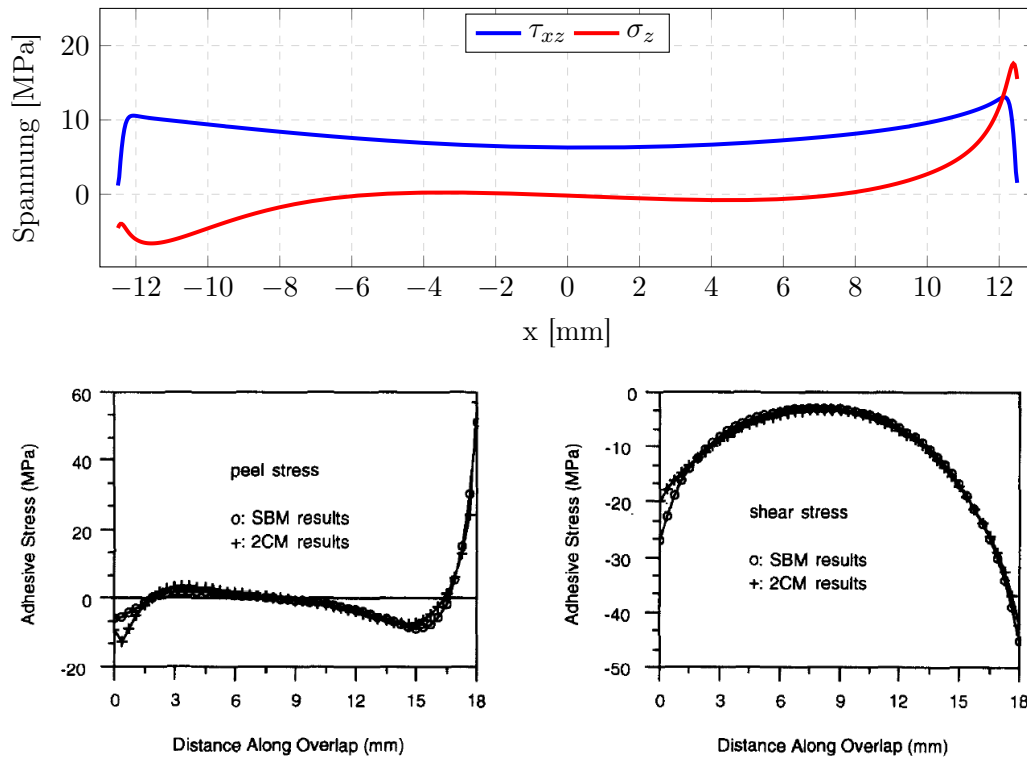


Abbildung 4.26: Normal- (peel) und Schubspannungen (shear) für eine zweifach überlappte Probe ($d_K=0,5$ mm) verglichen mit Verläufen aus der Literatur (unten) [86]

6,29 MPa). Gleichzeitig entstehen am Rand der Überlappung Spannungsspitzen, welche keinen symmetrischen Verlauf besitzen. Die Spannungsspitze am rechten Rand ($x = 12,14$ mm, 13,06 MPa) ist höher als die Spannungsspitze am linken Rand ($x = -12,07$ mm, 10,58 MPa). Dieser Verlauf der nicht symmetrischen Spannungsspitzen kann auch in den Spannungen von Wu und Crocombe beobachtet werden. Dies ist auf die unterschiedlichen Randbedingungen der Probe zurückzuführen. In der Höhe zeigen sich erhebliche Abweichungen, dies liegt an der abweichenden Klebschichtdicke von Wu und Crocombe ($d_K = 0,1$ mm) was den Effekt der asymmetrischen Spannungsspitzen verstärkt. Für die Normalspannungen zeigt sich, dass innerhalb der Klebschicht sowohl Druck- als auch Normalspannungen auftreten. Am linken Ende der Überlappung ($x = -11,57$ mm, -6,6 MPa) ergibt sich eine Spannungsspitze, welche die Klebschicht auf Druck belastet. In der Mitte der Klebschicht zeigen sich geringe Normalspannungen, welche zwischen Druck- und Zugspannungszustand wechseln und erst ab $x = 7,6$ mm dauerhaft eine Zugbelastung darstellen. Hierbei ergibt sich am rechten Rand bei $x = 12,393$ mm eine Zugspannungsspitze von 17,59 MPa. Dies stimmt ebenfalls mit dem von Wu und Crocombe ermittelten Verlauf der Normalspannungen überein. Aufgrund der ähnlichen Spannungsverläufe, besonders der unsymmetrischen Schubspannungsspitzen sowie der Druck- und Zugspannungsbereiche innerhalb der Klebschicht, kann angenommen werden, dass auch das Modell der zweifach überlappten Probe valide Ergebnisse liefert.

Zwischenfazit

Die einfach überlappten und eingeschlitzten Prüfkörper weisen sowohl in der Mitte der Klebschicht als auch am Interface nahezu identische Verläufe der Schub- und Normalspannungen auf. Deshalb wird von diesen Prüfkörpergeometrien nur noch die einfach überlappte untersucht. Es wird festgelegt, dass die Ergebnisse des einfach überlappten Prüfkörpers auf den eingeschlitzten Prüfkörper übertragen werden können.

Dasselbe gilt für die zweifach überlappten und doppelt gelaschten Prüfkörper. Auch für diese Prüfkörpergeometrien zeigt sich ein nahezu identischer Verlauf der Spannungen sowohl am Interface als auch in der Mitte der Klebschicht. Lediglich ein auf Druck belasteter Bereich in der Mitte der Klebschicht weist unterschiedliche Spannungen auf, was für die Prüfkörper bei der folgenden Untersuchung nicht relevant ist und deshalb vernachlässigt werden kann. Aus diesem Grund wird nur noch die zweifach überlappte Probe betrachtet. Auch hier wird festgelegt, dass die Ergebnisse des zweifach überlappten Prüfkörpers auf den doppelt gelaschten Prüfkörper übertragen werden können. Die biegebehinderte Probe zeigte einen deutlichen Unterschied der Spannungsverläufe im Vergleich mit einer freien, nicht biegebehinderten Probe. Aus diesem Grund werden beide Prüfkörpergeometrien auch weiterhin untersucht. Tabelle 4.7 zeigt, welche Prüfkörper im Rahmen dieser Arbeit weiter untersucht werden.

Tabelle 4.7: Übersicht Prüfkörper für weitere Untersuchungen

Prüfkörpergeometrie	weitere Untersuchung	Anmerkung
Einfach überlappt	✓	-
Eingeschlitzte Platten	o	Spannungsverläufe identisch zu einfach überlapptem Prüfkörper
Zweifach überlappt	✓	-
Doppelt gelascht	o	Spannungsverläufe identisch zu zweifach überlapptem Prüfkörper
Biegebehinderter Prüfkörper nach pr EN 6060	✓	-

4.7 Einfluss geometrischer Parameter auf die Spannungsverläufe

In Abschnitt 2.4 wurde aufgezeigt, dass die geometrischen Parameter der Prüfkörper die Festigkeit der Klebung entscheidend beeinflussen. Die Parameter Überlappungslänge $l_{\text{Ü}}$, Klebschichtdicke d_{K} sowie Fügeteildicke d_{F} sind hierbei von besonderer Bedeutung und werden deshalb im weiteren für die verschiedenen Prüfkörpergeometrien untersucht. Neben den Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht wird auch die maximale Spannung am Interface betrachtet. Für diesen Wert wird die Spannung am Interface am dritten Knoten vom Rand der Klebschicht entfernt ($x = 12,429$ mm) ausgewertet. Dieser Wert wird aufgrund der in Abschnitt 4.3 durchgeführten Untersuchungen ausgewählt, da sowohl vor ($x = 12,45$ mm) als auch hinter ($x = 12,40$ mm) diesem Punkt eine Konvergenz der Spannungen festgestellt wurde (Anhang A.2). Dies ist der erste Knoten, welcher durch die Singularität nicht beeinflusst wird. Ein analoges Verfahren wurde von Gleich [46] angewendet und wird als "stress-at-distance"-Verfahren bezeichnet.

Da die Spannungsverläufe in der Mitte der Klebschicht sowohl im Bauteil als auch in den Prüfkörpern ermittelt werden, findet der Vergleich und damit das Ableiten der Prüfkörpergeometrie auch in der Mitte der Klebschicht statt. Ziel des Vergleiches in diesem Kapitel ist die Identifikation von Parametern, welche verändert werden können, ohne den Spannungszustand am Interface und in der Mitte der Klebschicht unterschiedlich zu beeinflussen. Für die Untersuchung werden der einfach überlappte, der zweifach überlappte sowie der biegehinderte Prüfkörper einer Variation der Geometrie unterzogen.

4.7.1 Klebschichtdicke

Zunächst wird die Klebschichtdicke variiert. Die Überlappungslänge $l_{\text{Ü}}$ wird dabei konstant bei 25 mm belassen, die Fügeteildicke d_{F} bei 4 mm. Die Lasten bleiben dieselben wie in Kapitel 4, da sich die Klebefläche nicht verändert. Die Kräfte und Klebschichtdicken sind in Tabelle 4.8 dargestellt:

Tabelle 4.8: Kräfte für unterschiedliche Klebschichtdicken d_{K}

Klebschichtdicke d_{K}	Klebefläche	Kraft
0,5 mm	625 mm ²	5000 N
1 mm	625 mm ²	5000 N
3 mm	625 mm ²	5000 N
5 mm	625 mm ²	5000 N

In Abbildung 4.27 sind die Spannungsverläufe der Schubspannungen in der Mitte der Klebschicht für einen einfach überlappten Prüfkörper dargestellt.

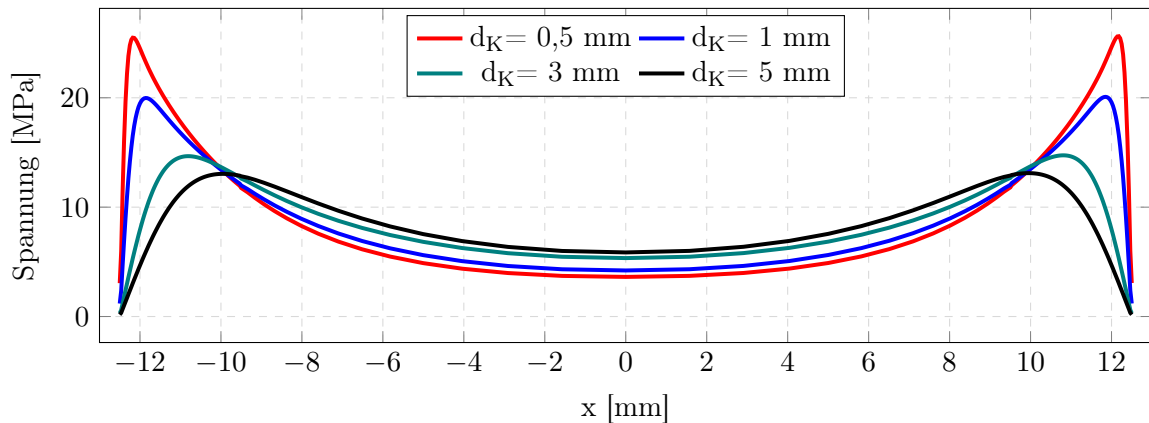


Abbildung 4.27: Schubspannungen τ_{xz} für variierende Klebschichtdicken d_K , Mitte der Klebschicht (CD), Einfach überlappter Prüfkörper

Deutlich werden die sinkenden Spannungsspitzen bei steigender Klebschichtdicke. Die Spannungsspitze des Schubspannungsverlaufs liegt bei $d_K=0,5$ mm bei $\tau_{xz}=25,63$ MPa, sinkt für $d_K=1$ mm auf $\tau_{xz}=20,08$ MPa ab und fällt über $\tau_{xz}=14,74$ MPa ($d_K=3$ mm) bis auf $\tau_{xz}=13,11$ MPa bei $d_K=5$ mm. Obwohl die Kraft in allen Simulationen dieselbe ist, nimmt die maximale Schubspannung ab. Dies suggeriert eine geringere Belastung der dickeren Klebschichten im Vergleich zu den dünneren und damit die Möglichkeit, die Last bis zum Versagen für dickere Klebschichten zu erhöhen. Dies steht im Kontrast zu den in Abschnitt 2.4 dargestellten experimentellen Ergebnissen, bei denen die Bruchlast mit steigender Klebschichtdicke sinkt. Gleichzeitig verlaufen die Schubspannungen bei größeren Klebschichtdicken homogener innerhalb der Klebschicht. Die Schubspannungsverläufe am Interface der Klebschicht sind für einen einfach überlappten Prüfkörper in Abbildung 4.28 dargestellt.

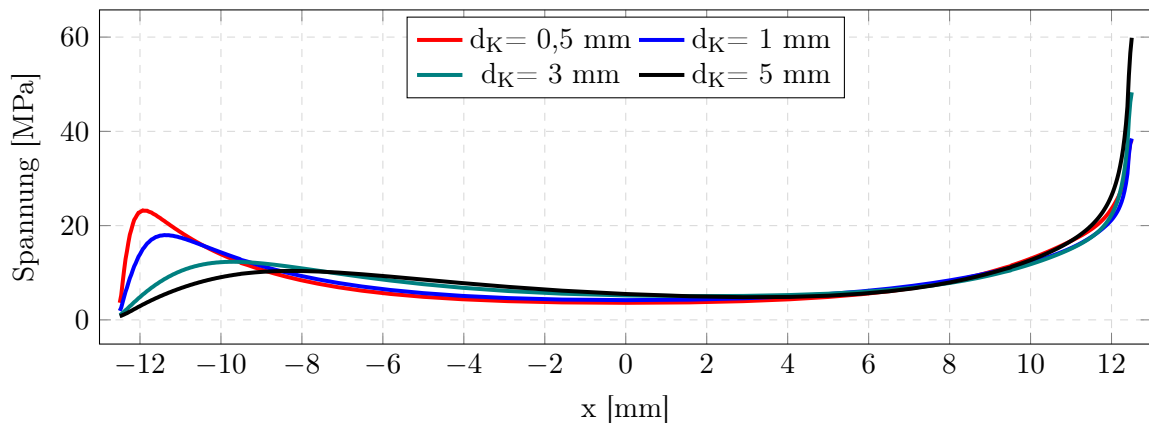


Abbildung 4.28: Schubspannungen τ_{xz} für variierende Klebschichtdicken d_K , Grenzschicht der Klebschicht (EF), Einfach überlappter Prüfkörper

Am linken Rand zeigt sich eine leichte Spannungsüberhöhung, welche für die Klebschichtdicke $d_K=0,5$ mm den höchsten Wert besitzt. Zur Mitte hin reduzieren sich die Schubspannungen. Am rechten Rand zeigt sich eine Spannungserhöhung. Um die Singularität zu umgehen, werden, wie bereits beschrieben, die Spannungen am dritten Knoten ausgewertet. Diese liegen für $d_K = 0,5$ mm bei $\tau_{xz} =$

35,79 MPa sinken für $d_K = 1$ mm leicht ab auf $\tau_{xz} = 35,04$ MPa und steigen daraufhin für $d_K = 3$ mm auf $\tau_{xz} = 42,59$ MPa und für $d_K = 5$ mm bis $\tau_{xz} = 51,87$ MPa an. Dieser Anstieg der Spannungsspitzen am Rand der Klebschicht für größere Klebschichtdicken deckt sich mit den Erkenntnissen einer sinkenden Festigkeit für größere Klebschichtdicken.

Dasselbe Vorgehen wie für die Schubspannungen wird auch für die Normalspannungen durchgeführt. Abbildung 4.29 zeigt den Normalspannungsverlauf eines einfach überlappten Prüfkörpers in der Mitte der Klebschicht für unterschiedliche Klebschichtdicken.

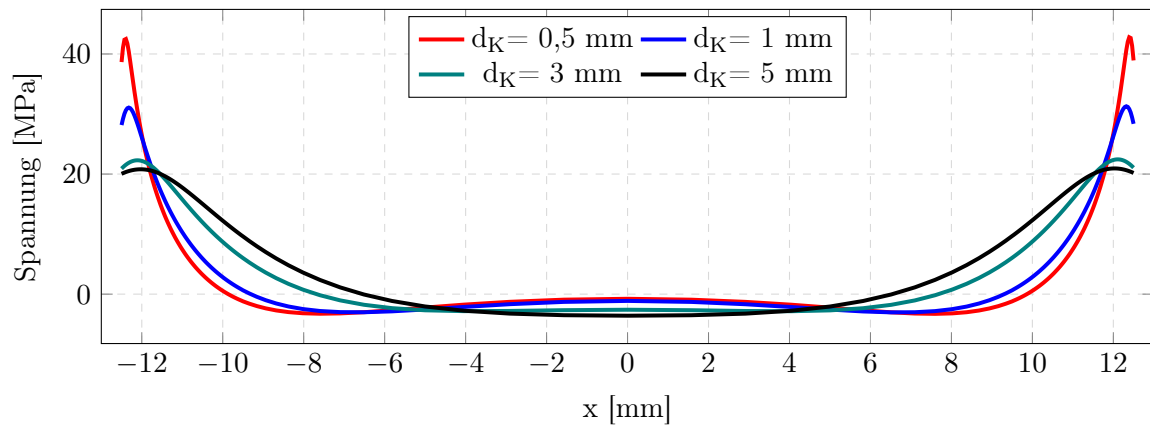


Abbildung 4.29: Normalspannungen σ_z für variierende Klebschichtdicken d_K , Mitte der Klebschicht (CD), Einfach überlappter Prüfkörper

Analog zu den Schubspannungen bilden sich für die Normalspannungen Spannungsspitzen im Randbereich der Klebschicht. Diese sinken anschließend ab und es entstehen für die untersuchten Klebschichtdicken Druckbereiche in der Mitte der Klebschicht. Für die unterschiedlichen Klebschichtdicken zeigt sich dieselbe Tendenz wie bei den Schubspannungen. Für $d_K = 0,5$ mm ergibt sich eine Spannungsspitze von $\sigma_z = 42,79$ MPa, welche anschließend für $d_K = 1$ mm auf $\sigma_z = 31,29$ MPa sinkt. Dieser Trend setzt sich für die dickeren Klebschichten fort, auch für $d_K = 3$ mm ($\sigma_z = 22,45$ MPa) sinkt die Spannungsspitze ab und erreicht bei $d_K = 5$ mm einen Minimalwert von $\sigma_z = 20,94$ MPa. Diese geringere Spannungsspitze in der Mitte der Klebschicht ist ebenso wie der Verlauf der Schubspannungen der einfach überlappten Prüfkörper gegensätzlich zu den Ergebnissen, welche diverse weitere Autoren erarbeitet haben [2, 29, 75, 76].

Auch für die Normalspannungen werden die Spannungen am Interface betrachtet. Die Verläufe für die unterschiedlichen Klebschichtdicken sind in Abbildung 4.30 dargestellt.

Hierbei wird der Verlauf im Bereich E-F der Klebschicht untersucht. Aufgrund der Punktsymmetrie der Probe ist es nicht relevant, ob die Spannungsverläufe am Querschnitt AB oder EF untersucht werden.

Es zeigt sich im Bereich des freien Endes ($x = -12,5$ mm, Punkt E) eine Spannungserhöhung. Diese ist allerdings gering und liegt unter den Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht. Über die Mitte der Überlappung zeigen sich gering belastete Bereiche, welche nur durch geringen Normalspannungen belastet werden. Am Rand der Klebschicht, welche nicht am freien Ende ist ($x = 12,5$

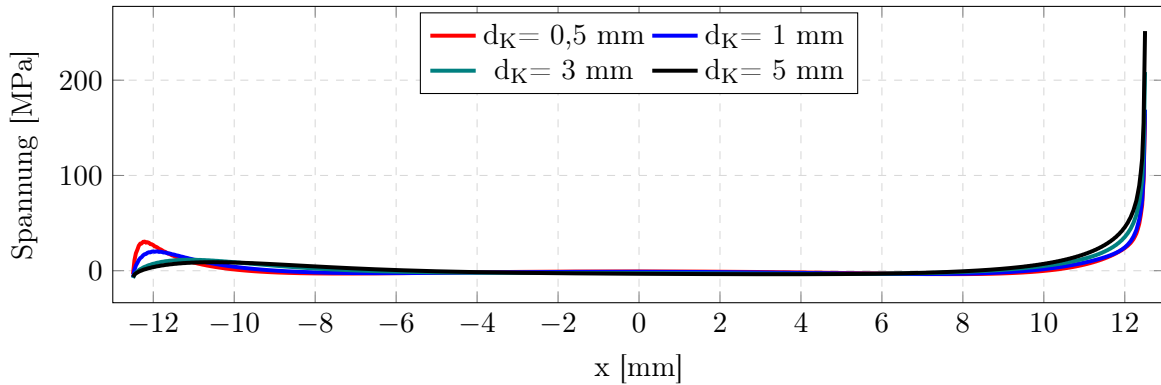


Abbildung 4.30: Normalspannungen σ_z für variierende Klebschichtdicken d_K , Grenzschicht der Klebschicht (EF), Einfach überlappter Prüfkörper

mm, Punkt F) zeigen sich Spannungsspitzen. Die Spannungsspitzen sind zum einen auf die angesprochenen Singularitäten (Abschnitt 4.2.2) zurückzuführen. Zum anderen ist die Spannung in diesem Bereich tatsächlich am höchsten, da in diesen Bereichen erfahrungsgemäß das Versagen der Klebung eintritt und sich zur Mitte der Klebschicht hin fortsetzt, bis die gesamte Klebung versagt [79].

Für die unterschiedlichen Klebschichtdicken zeigt sich erneut, dass die Spannungen am dritten Knoten bei einer Klebschichtdicke von $d_K = 0,5$ mm mit $\sigma_z = 69,01$ MPa höher sind als in der Mitte der Klebschicht ($\sigma_z = 42,79$ MPa). Die Spannungen steigen analog zu den Beobachtungen der Schubspannungen an und erreichen bei $d_K = 1$ mm einen Wert von $\sigma_z = 73,81$ MPa, bei $d_K = 3$ mm einen Wert von $\sigma_z = 95,47$ MPa und bei $d_K = 5$ mm einen maximalen Spannungswert von $\sigma_z = 117,68$ MPa. Diese Spannungserhöhung mit steigender Klebschichtdicke stimmt mit den Erkenntnissen einer geringeren Klebfestigkeit bei steigender Klebschichtdicke überein. Die höheren Normalspannungen sind hierbei auf das erhöhte Biegemoment infolge der dickeren Klebschicht zurückzuführen.

Um eine einfachere Betrachtung der Spannungsverläufe zu ermöglichen, werden die maximalen Schub- (τ_{xz}) und Normalspannungen (σ_z) in der Mitte der Klebschicht und am Interface in einem gemeinsamen Diagramm aufgetragen (Abbildung 4.31).

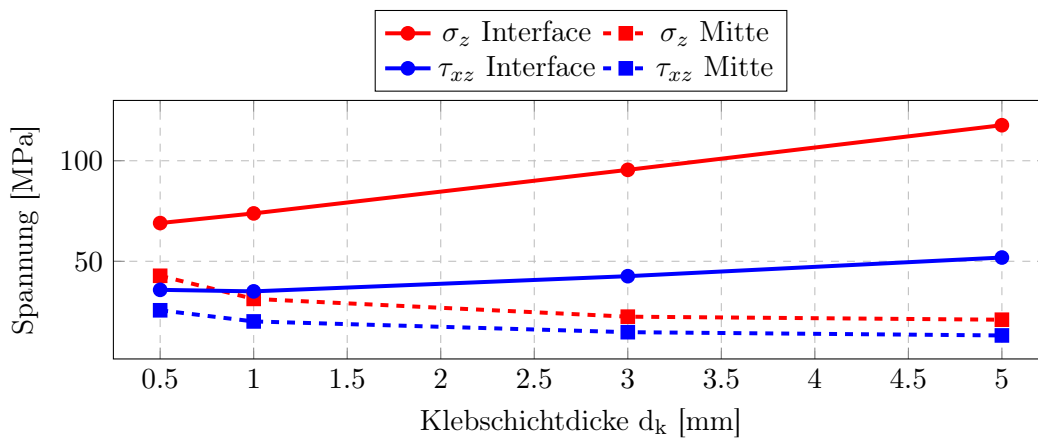


Abbildung 4.31: Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Klebschichtdicken, einfach überlappte Probe

Es wird deutlich, dass für eine steigende Klebschichtdicke die Schub- und Normalspannungen am Interface nahezu linear ansteigen, während die Spannungen in der Mitte der Klebschicht sinken. Die genauen Werte wurden anhand der detaillierten Spannungsverläufe gezeigt und werden hier nicht erneut aufgeführt.

Das Vorgehen für variable Klebschichtdicken für einfach überlappte Prüfkörper wird auch für zweifach überlappte und biegebehinderte Prüfkörper wiederholt. Die Vergleiche der Spannungsverläufe werden hier nicht aufgeführt, sondern sind sowohl für die Mitte der Klebschicht, als auch für das Interface zwischen Klebschicht und Füge teil in Anhang A.3 zu finden.

Abbildung 4.32 zeigt den Verlauf der Schub- sowie der Normalspannungen in der Mitte der Klebschicht sowie am Interface für den zweifach überlappten Prüfkörper.

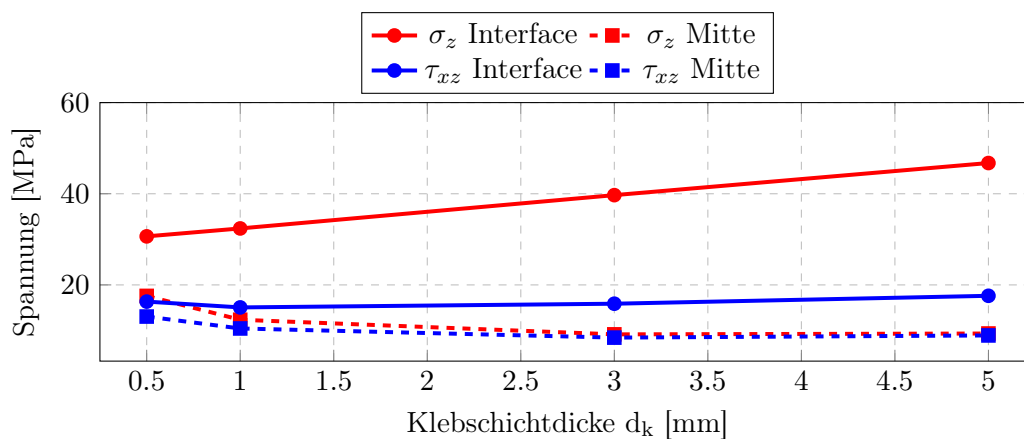


Abbildung 4.32: Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Klebschichtdicken, zweifach überlappte Probe

Die Schubspannungen in der Mitte der Klebschicht sinken hierbei von $\tau_{xz} = 13,06$ MPa bei $d_K = 0,5$ mm auf $\tau_{xz} = 10,44$ MPa bei $d_K = 1$ mm ab und besitzen die geringste Spannungsspitze bei $d_K = 3$ mm ($\tau_{xz} = 8,43$ MPa). Anschließend steigen die Schubspannungen leicht auf $\tau_{xz} = 8,9$ MPa an ($d_K = 5$ mm). Für die Normalspannungen ergibt sich ein ähnlicher Verlauf, von $d_K = 0,5$ mm ($\sigma_z = 17,59$ MPa) sinken die Normalspannungen zunächst auf $\sigma_z = 12,35$ MPa ($d_K = 1$ mm) und anschließend auf $\sigma_z = 9,15$ MPa ($d_K = 3$ mm) ab, um dann leicht auf $\sigma_z = 9,34$ MPa ($d_K = 5$ mm) zu steigen. Werden die Spannungen am Interface betrachtet, so zeigt sich für die Schubspannungen im Gegensatz zum einfach überlappten Prüfkörper nur eine geringe Änderung der Schubspannungen ($d_K = 0,5$ mm, $\tau_{xz} = 16,34$ MPa / $d_K = 1$ mm, $\tau_{xz} = 15,06$ MPa / $d_K = 3$ mm, $\tau_{xz} = 15,87$ MPa / $d_K = 5$ mm, $\tau_{xz} = 17,61$ MPa). Dies zeigt, dass die Klebschichtdicke nur einen geringen Einfluss auf die maximalen Schubspannungen am Interface besitzt. Die Normalspannungen weisen im Gegensatz dazu denselben Trend wie für den einfach überlappten Prüfkörper auf und steigen von $\sigma_z = 30,65$ MPa ($d_K = 0,5$ mm) zunächst auf $\sigma_z = 32,39$ MPa ($d_K = 1$ mm). Dieser Verlauf setzt sich für $d_K = 3$ mm ($\sigma_z = 39,7$ MPa) fort und zeigt bis $d_K = 5$ mm ($\sigma_z = 46,74$ MPa) ebenfalls einen nahezu linearen Anstieg.

Abschließend werden die Verläufe der Spannungen für den biegebehinderten Prüfkörper untersucht (Abbildung 4.33):

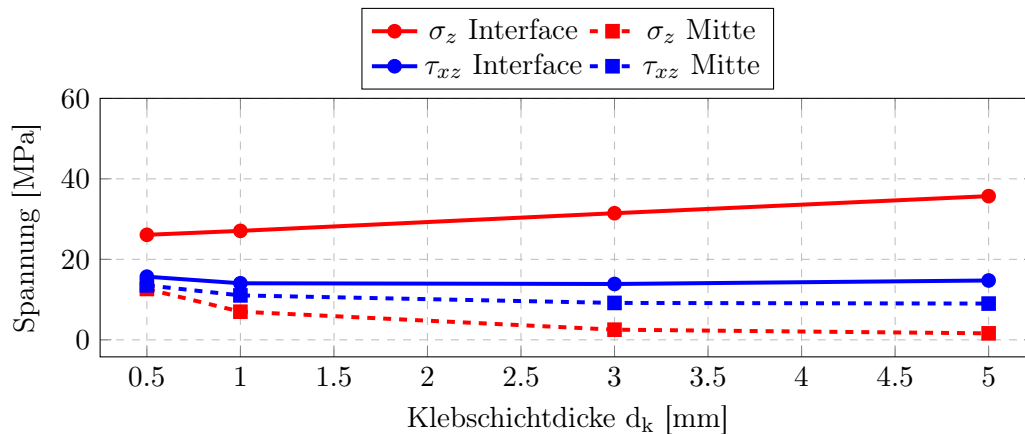


Abbildung 4.33: Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Klebschichtdicken, biegebehinderter Prüfkörper

Die Schubspannungen in der Mitte sinken hierbei analog zum zweifach überlappten Prüfkörper leicht ab ($d_K = 0,5$ mm, $\tau_{xz} = 13,54$ MPa / $d_K = 1$ mm, $\tau_{xz} = 11,04$ MPa / $d_K = 3$ mm, $\tau_{xz} = 9,17$ MPa / $d_K = 5$ mm, $\tau_{xz} = 9,01$ MPa). Die Normalspannungen sinken verhältnismäßig stärker ab. Bei $d_K = 0,5$ mm beträgt die Spannung $\sigma_z = 12,63$ MPa und sinkt anschließend über $\sigma_z = 6,99$ MPa ($d_K = 1$ mm) und $\sigma_z = 2,52$ MPa ($d_K = 3$ mm) auf bis zu $\sigma_z = 1,61$ MPa ($d_K = 5$ mm) ab. Dies zeigt die geringe Normalspannung aufgrund der Biegebehinderung.

Am Interface zeigt sich für die Schubspannungen ein ähnlicher Verlauf wie für den zweifach überlappten Prüfkörper. Die Spannungen liegen hierbei zwischen $\tau_{xz} = 15,69$ MPa ($d_K = 0,5$ mm) und $\tau_{xz} = 13,87$ MPa ($d_K = 3$ mm). Für die Klebschichtdicken $d_K = 1$ mm ($\tau_{xz} = 14,05$ MPa) sowie $d_K = 5$ mm ($\tau_{xz} = 14,74$ MPa) liegen die Spannungen zwischen diesen Werten. Bei der biegebehinderten Probe zeigt sich auch nur ein geringer Einfluss der Klebschichtdicke auf die Schubspannungen am Interface. Für die Normalspannungen am Interface zeigt sich erneut eine Steigerung mit steigender Klebschichtdicke. So ergibt sich für $d_K = 0,5$ mm eine Spannung von $\sigma_z = 26,09$ MPa, welche anschließend nahezu linear auf $\sigma_z = 27,07$ MPa ($d_K = 1$ mm), $\sigma_z = 31,46$ MPa ($d_K = 3$ mm) sowie anschließend auf $\sigma_z = 35,71$ MPa ($d_K = 5$ mm) ansteigt.

Fazit:

Für die drei untersuchten Prüfkörpergeometrien konnte gezeigt werden, dass die Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht sinken, während sie am Interface ansteigen respektive nahezu konstant bleiben. Das Sinken der Spannungen in der Mitte der Klebschicht kann hierbei mit dem größeren Abstand zwischen Interface und Klebschichtmitte für größere Klebschichtdicken begründet werden. Besonders beim einfach überlappten Prüfkörper sind die Spannungen am Interface um ein vielfaches höher als in der Mitte der Klebschicht. Allerdings weisen auch der zweifach überlappte sowie der biegebehinderte Prüfkörper am Interface höhere Spannungen als in der Mitte der Klebschicht auf. Dies zeigt, dass bei der Auslegung einer Prüfkörpergeometrie über den Spannungszustand in der Mitte der Klebschicht die Klebschichtdicke nicht variiert werden darf, um einen gewünschten Spannungszustand zu erhalten. Eine Variation der Klebschichtdicke passt zwar den Spannungszustand in

der Mitte der Klebschicht an den im Bauteil herrschenden Spannungszustand an, allerdings werden die Spannungen am Interface derart verändert, dass bei geringeren Klebschichtdicken die Festigkeit erhöht und bei größeren Klebschichtdicken die Festigkeit verringert wird.

4.7.2 Überlappungslänge

Neben der Klebschichtdicke wird auch eine variable Überlappungslänge $l_{\bar{U}}$ für eine konstante Klebschichtdicke von 3 mm untersucht. Aufgrund der dadurch veränderlichen Klebefläche wird die Kraft angepasst, um weiterhin eine mittlere Spannung von 8 MPa zu erhalten. Die Überlappungslängen, die resultierenden Klebeflächen sowie die sich daraus ergebenden Kräfte sind in Tabelle 4.9 dargestellt.

Tabelle 4.9: Kräfte für unterschiedliche Überlappungslängen $l_{\bar{U}}$

Überlappungslänge $l_{\bar{U}}$	Klebefläche	Kraft
6,25 mm	156,25 mm ²	1250 N
12,5 mm	312,5 mm ²	2500 N
25 mm	625 mm ²	5000 N
40 mm	1000 mm ²	8000 N

Es muss angemerkt werden, dass durch die veränderte Überlappungslänge die Länge der Fügeteile nicht angepasst wird. Diese bleibt konstant bei den Werten aus Kapitel 4.

Auf eine Darstellung der detaillierten Spannungsverläufe wird hier verzichtet. Diese sind in Anhang A.3 zu finden. Zunächst werden die Spannungsspitzen in der Mitte des einfach überlappten Prüfkörpers mit den Spannungsspitzen am Interface verglichen (Abbildung 4.34).

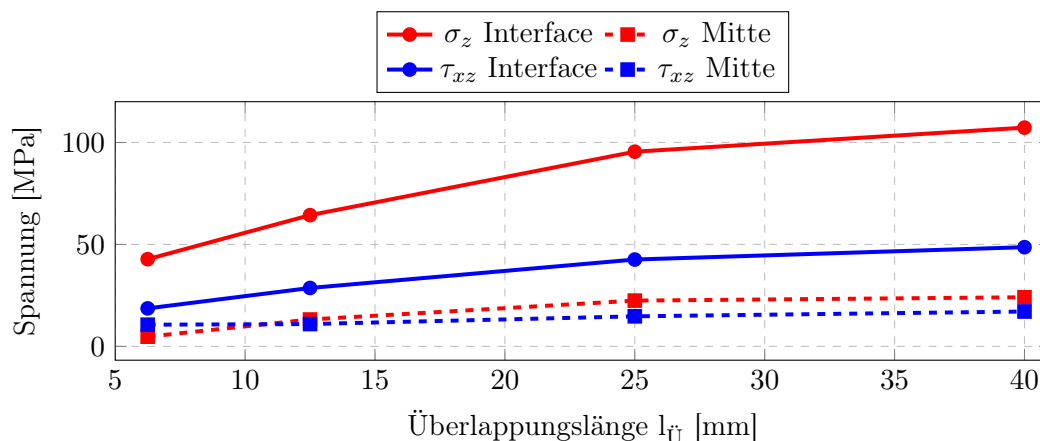


Abbildung 4.34: Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Überlappungslängen $l_{\bar{U}}$, einfach überlappte Prüfkörper

Für die untersuchten Überlappungslängen zeigt sich ein Anstieg der Spannungen sowohl in der Mitte der Klebschicht als auch am Interface. Die Schubspannungen weisen hierbei erneut niedrigere Werte

als die Normalspannungen auf (Ausnahme: $l_{\text{Ü}} = 6,25$ mm, Spannungen in der Mitte der Klebschicht). In der Mitte der Klebschicht steigen die Schubspannungen leicht von $\tau_{xz} = 10,63$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 6,25$ mm) auf $\tau_{xz} = 10,96$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 12,5$ mm) an und zeigen für größere Überlappungslängen ebenfalls einen Anstieg auf $\tau_{xz} = 14,74$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 25$ mm) und für $l_{\text{Ü}} = 40$ mm auf $\tau_{xz} = 17,09$ MPa. Die Normalspannungen weisen einen ähnlichen Verlauf auf und steigen von $\sigma_z = 4,75$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 6,25$ mm) auf $\sigma_z = 13,19$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 12,5$ mm) und anschließend auf $\sigma_z = 22,45$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 25$ mm) beziehungsweise $\sigma_z = 24,09$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 40$ mm).

Auch am Interface steigen die Schubspannungen sowie die Normalspannungen an. Die Schubspannungen steigen hierbei von $\tau_{xz} = 18,64$ ($l_{\text{Ü}} = 6,25$ mm) auf $\tau_{xz} = 48,65$ MPa bei $l_{\text{Ü}} = 40$ mm. Analog zum Verlauf in der Mitte der Klebschicht steigen die Spannungen mit steigender Klebschichtdicke jedoch nicht linear an. Für die Normalspannungen zeigt sich ein ähnliches Bild, allerdings sind die Spannungen hier erneut höher als die Schubspannungen. Am Interface steigen die Normalspannungen von $\sigma_z = 42,73$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 6,25$ mm) auf $\sigma_z = 107,28$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 40$ mm). Auch in diesem Verlauf zeigt sich eine abnehmende Steigung des Verlaufs.

Der Grund für die mit steigender Überlappungslänge zunehmenden Spannungen ist die infolge der höheren Klebfläche erhöhte Kraft. Wie in Abschnitt 2.4 gezeigt, nimmt der niedrig belastete Bereich in der Mitte der Klebschicht zu. Dies zeigt sich auch in den Abbildungen in Anhang A.3. Im Gegensatz zu den Spannungen bei variabler Klebschichtdicke zeigt sich in diesen Verläufen sowohl in der Mitte der Klebschicht als auch am Interface ein Anstieg der Spannungen.

Dieselbe Untersuchung wie für einfach überlappte Prüfkörper wird für zweifach überlappte Prüfkörper durchgeführt. Die Diagramme sind erneut in Anhang A.3 zu finden. Abbildung 4.35 zeigt die Verläufe der Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht beziehungsweise Maximalspannungen am Interface in Abhängigkeit einer variablen Überlappungslänge.

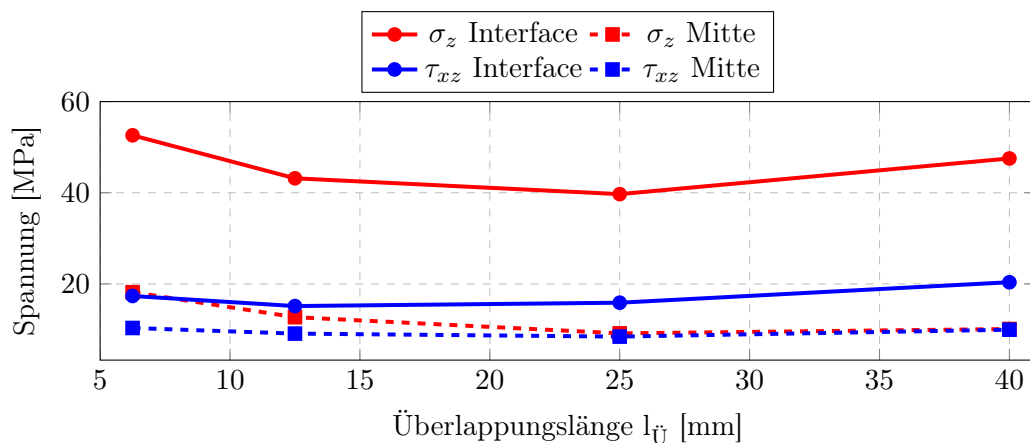


Abbildung 4.35: Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Überlappungslängen $l_{\text{Ü}}$, zweifach überlappter Prüfkörper

Die Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht sinken sowohl für die Schubspannungen ($l_{\text{Ü}} = 6,25$ mm, $\tau_{xz} = 10,33$ MPa / $l_{\text{Ü}} = 12,5$ mm, $\tau_{xz} = 9,09$ MPa / $l_{\text{Ü}} = 25$ mm, $\tau_{xz} = 8,43$ MPa), als auch für die Normalspannungen ($l_{\text{Ü}} = 6,25$ mm, $\sigma_z = 18,18$ MPa / $l_{\text{Ü}} = 12,5$ mm, $\sigma_z = 12,7$ MPa / $l_{\text{Ü}} = 25$ mm).

mm, $\sigma_z = 9,15$ MPa) bis $l_{\ddot{U}} = 25$ mm. Daraufhin steigen die Spannungen für $l_{\ddot{U}} = 40$ mm leicht auf $\tau_{xz} = 9,95$ MPa für die Schubspannungen und $\sigma_z = 10,10$ MPa für die Normalspannungen an.

Am Interface zeigt sich ein ähnlicher Verlauf der maximalen Spannungen am dritten Knoten. So nehmen die Schubspannungen von $l_{\ddot{U}} = 6,25$ mm ($\tau_{xz} = 17,34$ MPa) bis $l_{\ddot{U}} = 12,5$ mm ($\tau_{xz} = 15,14$ MPa) ab und steigen anschließend auf $\tau_{xz} = 15,87$ MPa ($l_{\ddot{U}} = 25$ mm) und weiter auf $\tau_{xz} = 20,36$ MPa ($l_{\ddot{U}} = 40$ mm). Die Normalspannungen verhalten sich am Interface wie die Normalspannungen in der Mitte und sinken von $\sigma_z = 52,6$ MPa bei $l_{\ddot{U}} = 6,25$ mm auf zunächst $\sigma_z = 43,17$ MPa bei $l_{\ddot{U}} = 12,5$ mm und weiter auf $\sigma_z = 39,7$ MPa ($l_{\ddot{U}} = 25$ mm) ab. Anschließend ist ein Anstieg auf $\sigma_z = 47,52$ MPa ($l_{\ddot{U}} = 40$ mm) zu beobachten.

Erneut zeigt sich für die Spannungen am Interface ein ähnlicher Verlauf wie in der Mitte der Klebschicht. Eine Anpassung der Überlappungslänge hat damit keinen gegensätzlichen Einfluss auf die Spannungen am Interface, wie dies bei einer variablen Klebschichtdicke der Fall ist. Interessant ist zunächst der Abfall der Spannungen für größere Überlappungslängen, welche ab $l_{\ddot{U}}=25$ mm wieder ansteigen. Dies deutet darauf hin, dass das Optimum dieses Prüfkörpers bei einer Überlappungslänge von 25 mm liegt und sowohl davor als auch dahinter ein ungünstigerer Spannungszustand im Prüfkörper hervorgerufen wird.

Abschließend wird für die variablen Überlappungslängen der biegebehinderte Prüfkörper untersucht. Die Verläufe der Spannungen sind hierbei in Abbildung 4.36 aufgetragen:

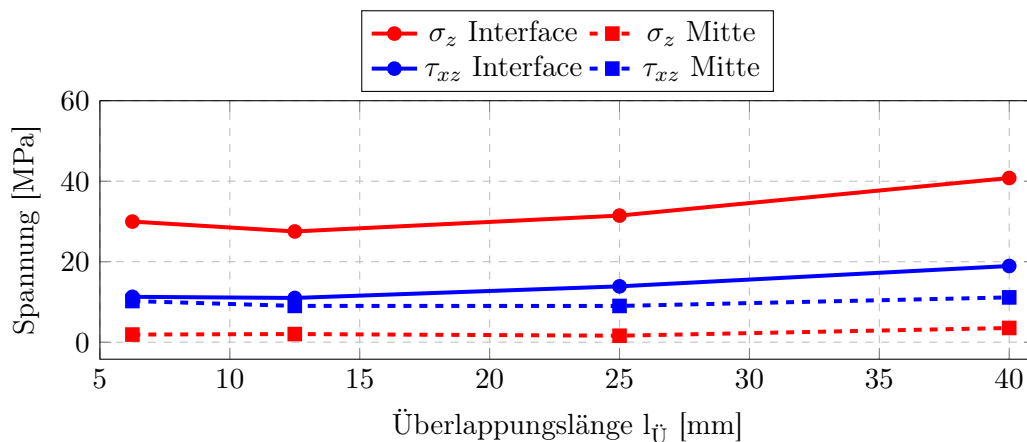


Abbildung 4.36: Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Überlappungslängen $l_{\ddot{U}}$, biegebehinderter Prüfkörper

In der Mitte der Klebschicht zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen den Spannungsspitzen. Die Schubspannungen sinken zunächst von $\tau_{xz} = 10,22$ MPa ($l_{\ddot{U}} = 6,25$ mm) auf $\tau_{xz} = 9,02$ MPa ($l_{\ddot{U}} = 12,5$ mm) und bleiben anschließend nahezu konstant bei $\tau_{xz} = 9$ MPa ($l_{\ddot{U}} = 25$ mm). Bis zu einer Überlappungslänge von 40 mm steigen die Schubspannungen wieder auf $\tau_{xz} = 11,13$ MPa an. Bei den Normalspannungen zeigt sich, dass die Spannungsspitzen in der Mitte geringer als die Spannungen am Interface sind. Diese liegen für $l_{\ddot{U}} = 6,25$ mm bei $\sigma_z = 1,9$ MPa, steigen anschließend für $l_{\ddot{U}} = 12,5$ mm leicht auf $\sigma_z = 2,02$ MPa an, bevor sie erneut sinken und bei $\sigma_z = 1,61$ MPa bei $l_{\ddot{U}} = 25$ mm liegen. Anschließend steigt die Spannungsspitze auf $\sigma_z = 3,53$ MPa für eine Überlappungslänge von

$l_{\text{Ü}} = 40$ mm an.

Am Interface zeigt sich, dass sowohl die Schubspannungen als auch die Normalspannungen zunächst leicht abfallen und für größere Überlappungslängen wieder ansteigen. Die Schubspannungen am Interface sind hierbei für $l_{\text{Ü}} = 6,25$ mm ($\tau_{xz} = 11,27$ MPa) sowie $l_{\text{Ü}} = 12,5$ mm ($\tau_{xz} = 10,99$ MPa) nur leicht höher als die Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht. Für die Überlappungslängen $l_{\text{Ü}} = 25$ mm ($\tau_{xz} = 13,88$ MPa) und $l_{\text{Ü}} = 40$ mm ($\tau_{xz} = 18,93$ MPa) steigen die Spannungen stärker an. Die Normalspannungen liegen zunächst bei $\sigma_z = 29,97$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 6,25$ mm), sinken daraufhin auf $\sigma_z = 27,52$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 12,5$ mm) und steigen anschließend auf $\sigma_z = 31,46$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 25$ mm) beziehungsweise $\sigma_z = 40,80$ MPa ($l_{\text{Ü}} = 40$ mm).

Auffällig ist, dass die Normalspannungen am Interface um ein Vielfaches höher sind als die Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht. Dies konnte bereits in Abschnitt 4.5 gezeigt werden und ist bei der Verwendung eines biegebehinderte Prüfkörpers zu beachten, denn obwohl die Spannungen in der Mitte eine geringe Maximalspannung suggerieren, ist diese im Randbereich der Klebschicht weitaus höher als die Schubspannungen. Es zeigt sich, dass die Spannungen sowohl in der Mitte der Klebschicht, als auch im Randbereich ähnlich verhalten und für variable Überlappungslängen keinen gegensätzlichen Verlauf aufweisen.

Fazit

Am Interface zeigt sich erneut für alle Überlappungslängen, dass die Spannungen weitaus höher als in der Mitte der Klebschicht sind. Bei einer Überlappungslänge von 40 mm betragen die Spannungsspitzen des einfach überlappten Prüfkörper das 13- (Normalspannungen) respektive das 6-fache (Schubspannungen) der gemittelten Spannung (8 MPa). Für alle betrachteten Überlappungslängen verhalten sich die maximalen Spannungen in der Mitte der Klebschicht ähnlich wie am Interface. Ein gewisser Einfluss auf die Spannungsspitzen kann bei einer veränderten Geometrie nicht ausgeschlossen werden, allerdings zeigt sich kein gegensätzlicher Verlauf, wie dies bei einer variablen Klebschichtdicke der Fall ist. Deshalb kann die Überlappungslänge für diese Prüfkörpergeometrien variiert werden, um in der Mitte der Klebschicht einen Spannungsverlauf zu erzeugen, welcher den im Bauteil ermittelten Spannungsverlauf abbildet. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass mit steigender Überlappungslänge der unbelastete Bereich in der Mitte der Klebschicht größer wird, was die Auswertung über eine mittlere Festigkeit nur für geringe Überlappungslängen ($< 6,25$ mm) zulässig macht. Die Auswertung der Prüfkörper sollte deshalb unter Einbeziehung der Spannungsspitzen erfolgen. Auch die am Interface erhöhten Spannungen müssen bei der Auswertung beachtet werden.

4.7.3 Fügeteildicke

Abschließend wird die Fügeteildicke für eine Überlappungslänge von 25 mm und eine Klebschichtdicke von 3 mm variiert. Der in Kapitel 4 gezeigte, quasiisotrope Lagenaufbau ($d_F = 4$ mm) wird hierfür verdoppelt und verdreifacht, wodurch sich zusätzliche Fügeteildicken von $d_F = 8$ mm und $d_F = 12$ mm ergeben. Da sich die Klebefläche hierbei nicht ändert, wird für alle Simulationen eine Kraft

von $F=5000\text{ N}$ verwendet. Wie in den vorherigen Abschnitten bereits beschrieben, sind die detaillierten Spannungsverläufe in Anhang A.3 zu finden.

Abbildung 4.37 zeigt den Verlauf der Spannungen für variable Fügeteildicken für den einfach überlappten Prüfkörper.

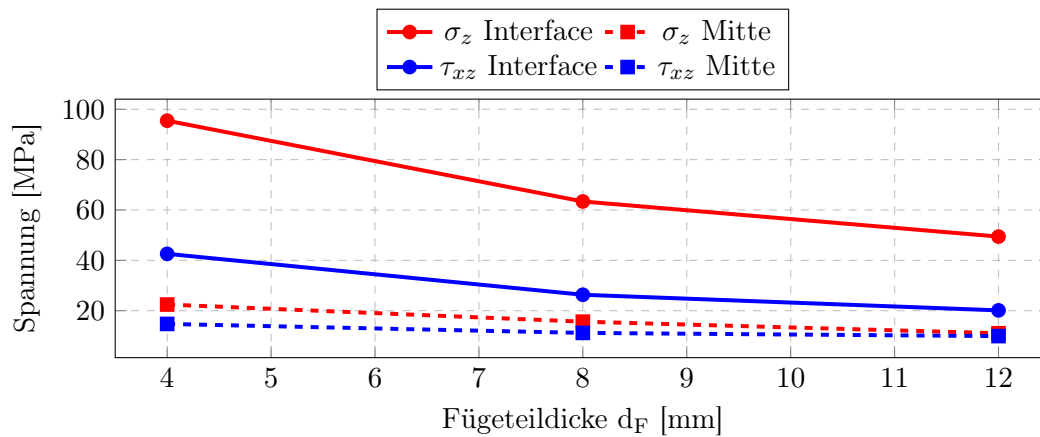


Abbildung 4.37: Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Fügeteildicken d_F , einfach überlappter Prüfkörper

Es zeigt sich, dass die Schubspannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht abnehmen ($d_F = 4\text{ mm}$, $\tau_{xz} = 14,74\text{ MPa}$ / $d_F = 8\text{ mm}$, $\tau_{xz} = 11,18\text{ MPa}$ / $d_F = 12\text{ mm}$, $\tau_{xz} = 9,91\text{ MPa}$). Auch die Normalspannungen weisen eine sinkende Tendenz auf und fallen von $\sigma_z = 22,45\text{ MPa}$ ($d_F = 4\text{ mm}$) auf $\sigma_z = 15,65\text{ MPa}$ für $d_F = 8\text{ mm}$ und abschließend für $d_F = 12\text{ mm}$ auf $\sigma_z = 11,05\text{ MPa}$.

Die Spannungen am dritten Knoten am Interface zeigen einen ähnlichen Verlauf. Die Schubspannungen fallen hierbei von $\tau_{xz} = 42,59\text{ MPa}$ für $d_F = 4\text{ mm}$ zunächst auf $\tau_{xz} = 26,33\text{ MPa}$ ($d_F = 8\text{ mm}$) und abschließend auf $\tau_{xz} = 20,13\text{ MPa}$ ($d_F = 12\text{ mm}$) ab. Bei den Normalspannungen zeigt sich ebenfalls ein Abfall der Spannungen, welche von $\sigma_z = 95,47\text{ MPa}$ über $\sigma_z = 63,39\text{ MPa}$ bis auf $\sigma_z = 49,44\text{ MPa}$ abfallen.

Dies unterstreicht die Erkenntnisse aus Abschnitt 2.4. Eine erhöhte Fügeteildicke führt auf den ersten Blick zu einem erhöhten Biegemoment. Allerdings steigt durch die höhere Dicke auch die Dehn- sowie die Biegesteifigkeit an, was zu einer Reduzierung der Spannungen, sowohl in der Mitte der Klebschicht, als auch am Interface führt. Dies unterstreicht wiederum die höhere Festigkeit bei einer höheren Fügeteildicke.

Für den zweifach überlappten Prüfkörper sind die Spannungen in Abbildung 4.38 aufgetragen.

Die Schubspannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht verändern sich kaum und liegen zwischen $\tau_{xz} = 8,43\text{ MPa}$ ($d_F = 4\text{ mm}$) sowie $\tau_{xz} = 8,7\text{ MPa}$ ($d_F = 12\text{ mm}$). Die Spannungsspitzen der Normalspannungsverläufe steigen hingegen an von $\sigma_z = 9,15\text{ MPa}$ für $d_F = 4\text{ mm}$ auf $\sigma_z = 12,37\text{ MPa}$ ($d_F = 8\text{ mm}$) und anschließend auf $\sigma_z = 14,07\text{ MPa}$ ($d_F = 12\text{ mm}$). Dasselbe zeigt sich bei den Spannungen am Interface. Hierbei liegen die Schubspannungen zwischen $\tau_{xz} = 15,76\text{ MPa}$ ($d_F = 8\text{ mm}$) und $\tau_{xz} = 16,44\text{ MPa}$ ($d_F = 12\text{ mm}$) und weisen nur geringfügige Änderungen auf. Die Normalspannungen am Interface zeigen hingegen einen Anstieg, wie er in der Mitte der Klebschicht zu beobachten ist. So

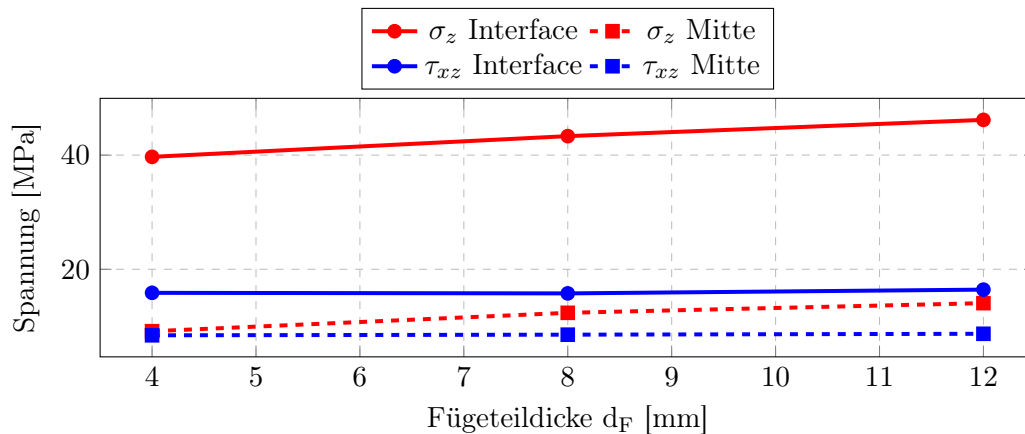


Abbildung 4.38: Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Fügeteildicken d_F , zweifach überlappter Prüfkörper

liegen die Normalspannungen zunächst bei $\sigma_z = 39,7$ MPa ($d_F = 4$ mm) und steigen anschließend auf $\sigma_z = 43,32$ MPa ($d_F = 8$ mm) sowie auf $\sigma_z = 46,17$ MPa an ($d_F = 12$ mm).

Der Anstieg der Normalspannungen ist überraschend, da eine Erhöhung der Fügeteildicke zu einer erhöhten Dehnsteifigkeit führt, was die Spannungsspitzen abbaut. Dies zeigt sich im homogenen Verlauf der Schubspannungen. Abbildung 4.39 zeigt die Verformung eines zweifach überlappten Prüfkörpers. Hierbei wird deutlich, dass durch die Erhöhung der Fügeteildicke der Hebelarm des oberen Fügeteils zum hochbelasteten Randbereich der Klebschicht (rechtes unteres Ende der Klebschicht) erhöht wird, wodurch die Spannungen ansteigen.

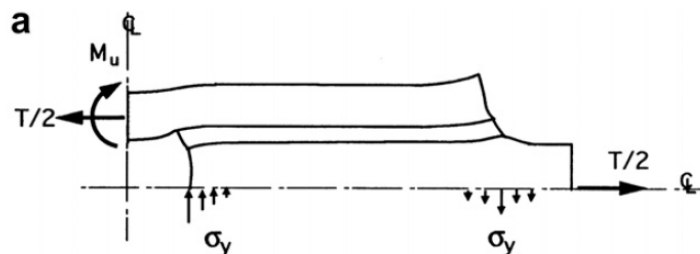


Abbildung 4.39: Verformung einer zweifach überlappten Prüfkörpers [78]

Als letzte Analyse werden die Spannungen des biegebehinderten Prüfkörpers betrachtet (Abbildung 4.40).

Hierbei zeigt sich, dass die Spitzen der Schubspannungsverläufe in der Mitte der Klebschicht für unterschiedliche Fügeteildicken nahezu keine Änderung aufweisen. Die Spitzen liegen hierbei zwischen $\tau_{xz} = 9,01$ MPa ($d_F = 4$ mm) und $\tau_{xz} = 8,4$ MPa ($d_F = 12$ mm). Die Normalspannungen zeigen einen Anstieg von $\sigma_z = 1,61$ MPa ($d_F = 4$ mm) über $\sigma_z = 3,64$ MPa ($d_F = 8$ mm) bis auf $\sigma_z = 4,71$ MPa ($d_F = 12$ mm). Am Interface zeigen die maximalen Spannungen der Schub- sowie Normalspannungsverläufe nur geringfügige Änderungen. Die Schubspannungen sinken von $\tau_{xz} = 13,88$ MPa ($d_F = 4$ mm) auf $\tau_{xz} = 12,09$ MPa ($d_F = 8$ mm, $d_F = 12$ mm). Die Normalspannungen sinken zunächst von σ_z

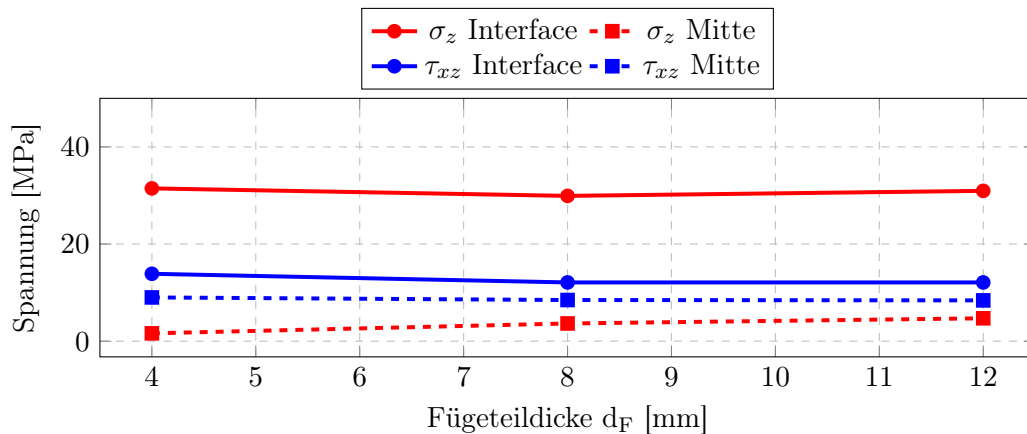


Abbildung 4.40: Vergleich der Spannungsspitzen in der Mitte (CD) und am Interface (EF) für variierende Fügeteildicken d_F , biegebehinderter Prüfkörper

= 31,46 MPa ($d_F = 4$ mm) auf $\sigma_z = 29,92$ MPa ($d_F = 8$ mm) ab und steigen anschließend wieder auf $\sigma_z = 30,95$ MPa ($d_F = 12$ mm).

Durch die Biegebehinderung zeigt sich, dass eine veränderte Fügeteildicke nahezu keinen Einfluss auf die Spannungen innerhalb der Klebschicht hat. Die Normalspannungen steigen in der Mitte prozentual stark an, allerdings in absoluten Zahlen ausgedrückt nur geringfügig, was an den niedrigen Normalspannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht liegt. Die Schubspannungen bleiben nahezu konstant.

Fazit

Sowohl der einfach überlappte als auch der zweifach überlappte Prüfkörper weisen ähnliche Tendenzen der Spannungen am Interface sowie in der Klebschichtmitte auf. Der biegebehinderte Prüfkörper zeigt nahezu keine Veränderung der Spannungen am Interface, lediglich die Normalspannungen in der Mitte der Klebschicht ändern sich leicht. Erneut bleiben die Spannungen am Interface dauerhaft höher als in der Mitte der Klebschicht. Aufgrund der ähnlichen Verläufe der maximalen Spannungen am Interface sowie der Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht (abhängig von der Fügeteildicke) kann davon ausgegangen werden, dass eine Änderung der Fügeteildicke sowohl am Interface als auch in der Mitte der Klebschicht zu denselben Effekten führt. Eine Änderung der Fügeteildicke kann aufgrund dieser Beobachtungen für die betrachteten Prüfkörpergeometrien durchgeführt werden, um den Spannungszustand in der Mitte der Klebschicht der Prüfkörper an den im Bauteil herrschenden Spannungszustand anzupassen.

4.7.4 Zusammenfassung

Verschiedene Einflussfaktoren auf die Spannungsspitzen wurden untersucht. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht darüber, wie sich die Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht sowie am Interface für steigende Parameter verändern.

Tabelle 4.10: Übersicht über den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Spannungsspitzen der untersuchten Prüfkörpergeometrien

	Klebschichtdicke d_K				Überlappungslänge l_U				Fügeteildicke d_F			
	Mitte		Interface		Mitte		Interface		Mitte		Interface	
	τ_{xz}	σ_z	τ_{xz}	σ_z	τ_{xz}	σ_z	τ_{xz}	σ_z	τ_{xz}	σ_z	τ_{xz}	σ_z
Einfach überlappt	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓
Zweifach überlappt	↓	↓	↓↑	↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	→	↑	→	↑
Biegebehindert	↓	↓	↓↑	↑	↓↑	↑↓↑	↓↑	↓↑	→	↑	↓	→

5 Ableiten einer Prüfkörpergeometrie

In diesem Kapitel werden die Spannungszustände aus den Prüfkörpergeometrien mit dem ermittelten Spannungszustand aus Kapitel 3 verglichen und eine Prüfkörpergeometrie definiert. Der Vergleich geschieht anhand verschiedener Spannungszustände eines kritischen Bauteilpfades, für welche die Abweichung zwischen den Verläufen im Bauteil im Prüfkörper ermittelt wird. Die Prüfkörper werden zu diesem Zweck wie der Bereich des Bauteils modelliert, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Abschließend werden diese Abweichungen für alle Prüfkörper miteinander verglichen und es wird ein Prüfkörper definiert, welcher die Spannungen am besten abbildet.

5.1 Vorgehen

Im vorherigen Abschnitt konnten die Überlappungslänge $l_{\bar{U}}$ sowie die Fügeteildicke d_F als Parameter identifiziert werden, welche für eine Abbildung des Spannungsverlaufs variiert werden können. Hierbei wird eine Brute-Force-Methode angewendet und es werden alle in dieser Arbeit vorgestellten Permutationen von Prüfkörper, Überlappungslänge und Fügeteildicke mit dem in Kapitel 3 ermittelten Spannungsverlauf verglichen. Die unterschiedlichen Prüfkörpervariationen sowie die zu untersuchenden geometrischen Parameter sind in Tabelle 5.1 aufgetragen:

Tabelle 5.1: Prüfkörpergeometrien und geometrische Abmessungen

Prüfkörpergeometrie	Überlappungslänge $l_{\bar{U}}$	Fügeteildicke d_F
Einfach überlappt	6,25 mm	4 mm
Zweifach überlappt	12,5 mm	8 mm
Doppelt gelascht	25 mm	12 mm
Biegebehindert	40 mm	
Eingeschlitzt		

Diese Abmessungen sind die in Kapitel 4 untersuchten Parameter. Die Überlappungslängen sind frei wählbar und wurden auf diese Werte festgelegt. Die Fügeteildicke ergibt sich aufgrund des quasi-isotropen Lagenaufbaus. Insgesamt ergeben sich durch die fünf Prüfkörpergeometrien, vier Überlappungslängen und die drei verschiedenen Fügeteildicken 60 mögliche Prüfkörpervariationen, welche untersucht werden, um den Spannungszustand abzubilden.

Bei der Identifikation von veränderbaren geometrischen Parametern wurde auf die Simulation des eingeschlitzten sowie des doppelt gelaschten Prüfkörpers verzichtet. Diese werden für das Ableiten

der Prüfkörpergeometrie wieder aufgenommen und simuliert. Durch die Verwendung einer unterschiedlichen Diskretisierung (die von Voith verwendete) ergeben sich auch unterschiedliche Spannungsverläufe innerhalb der Prüfkörper. Dadurch ist es notwendig die fünf Prüfkörpergeometrien zu simulieren.

Aufgrund einer Klebschichtdicke von 6 mm im Bauteil, wird diese Dicke für alle Prüfkörper verwendet. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden die Prüfkörper mit derselben Diskretisierungsmethode wie der betrachtete Bereich simuliert. Dies beinhaltet die Verwendung derselben Elementkantenlänge, Elementart, die Verwendung desselben Vorgehens zur Kontaktdefinition, sowie die Durchführung einer geometrisch linearen Analyse. Die Parameter der Diskretisierung werden aus Abschnitt 3.4.3 übernommen, sind in Tabelle 5.2 angegeben. Die Diskretisierung ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.2: Diskretisierungsparameter für das Ableiten der Prüfkörpergeometrie

Teil des Prüfkörpers	Elementart	Elementkantenlänge
Fügeteil oben	Shell 181	5 mm
Fügeteil unten	Shell 181	3 mm
Klebschicht	Solid 187	3 mm

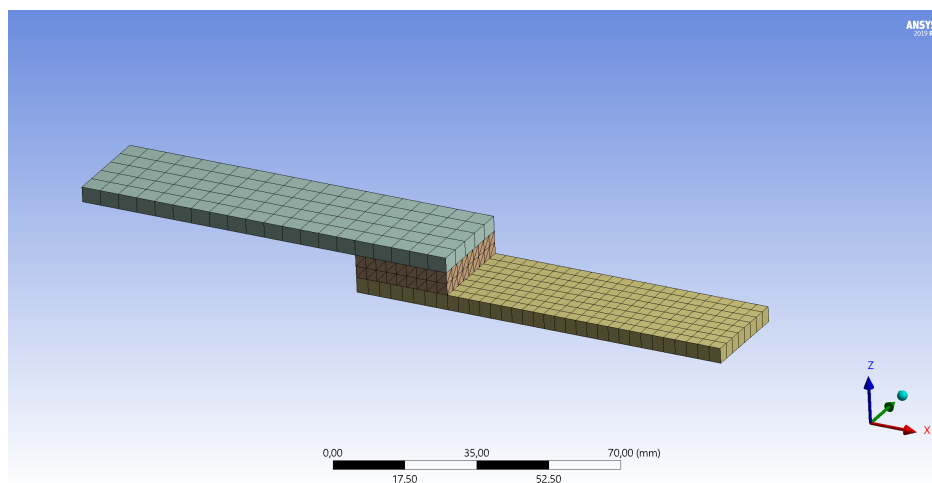


Abbildung 5.1: Vernetzung der Prüfkörper analog zur Methodik von Voith

Auch bei einer Variation der Fügeteildicke wird nicht die Anzahl der Elemente erhöht, sondern es wird für jede Fügeteildicke nur ein Shell-Element über die Dicke verwendet. Dieses Shell-Element enthält die "verschmierten" Materialeigenschaften der Fügeteile. Dies ergibt sich daraus, dass der Lagenaufbau vorgegeben wird und daraus keine Solid-Elemente sondern Shell-Elemente mit den resultierenden Materialeigenschaften erzeugt werden. Gleichzeitig wird bei einer Variation der Überlappungslänge die Anzahl der Elemente der Klebschicht erhöht und die Elementkantenlänge von 3 mm bleibt konstant.

Anschließend wird der Prüfkörper ausgewählt, welcher den Spannungsverlauf im Bauteil nach der

erarbeiteten Methodik am besten abbildet. Drei verschiedene Vergleiche werden durchgeführt und für den Vergleich der Spannungsverläufe herangezogen:

1. Deviatorischer Spannungsverlauf
2. Hydrostatischer Spannungsverlauf
3. Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungen

Diese drei Vergleiche werden im Folgenden am Beispiel des **einfach überlappten Prüfkörpers** mit einer **Fügeteildicke von 4 mm** und **variablen Überlappungslängen** vorgestellt.

Für die Implementierung der Methodik ist ein Versagenskriterium nicht notwendig. Die Untersuchung von Versagenskriterien ist aktuell Stand der wissenschaftlichen Untersuchung und für verschiedene Klebstoffe und Fügepartiebestandteile ergeben sich auch unterschiedliche Versagenskriterien [79]. Die Verwendung eines validen und zuverlässigen Versagenskriteriums für die gewählte Materialpaarung ist nicht erforscht und zieht umfassende Untersuchungen mit sich. Stattdessen wird weiterhin eine mittlere Spannung von 8 MPa verwendet. Dies führt dazu, dass die Kräfte für variable Überlappungslängen wie in Abschnitt 4.7 an die jeweilige Überlappungslänge angepasst werden.

5.2 Deviatorischer Spannungsverlauf

Als erster Schritt wird der deviatorische Spannungsanteil für die unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien gebildet. Mithilfe eines Pfades (201 Datenpunkte) wird analog zur Ermittlung der Spannung im Bauteil der Spannungsverlauf für die Prüfkörper gebildet. Anschließend wird wie beim Vorgehen zur Ermittlung des Spannungsverlaufs im Bauteil die Überlappungslänge genormt. Abbildung 5.2 zeigt die über die Überlappungslänge genormten Verläufe der deviatorischen Spannungen der verschiedenen Prüfkörpergeometrien verglichen mit dem Spannungsverlauf des Bauteils.

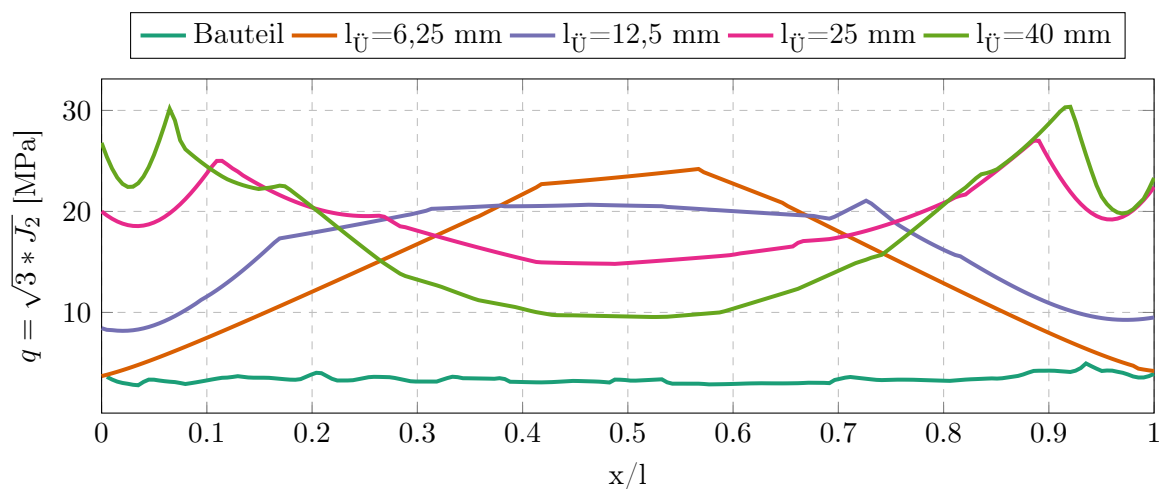


Abbildung 5.2: Deviatorischer Spannungsverlauf innerhalb der Klebschichten

Für eine mittlere Spannung von 8 MPa zeigt sich, dass alle deviatorischen Spannungen weitaus höher sind als im Bauteil. Dies ist im Sinne einer konservativen Auslegung der Klebschichten positiv zu bewerten. Um den Spannungsverlauf dennoch abbilden zu können, werden die Spannungen normiert. Dazu werden alle deviatorischen Spannungen q auf die maximale Spannung q_{max} des jeweiligen Spannungsverlaufs bezogen, sodass das Maximum für jeden Spannungsverlauf bei 1 liegt. Die zugehörigen Spannungsverläufe sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

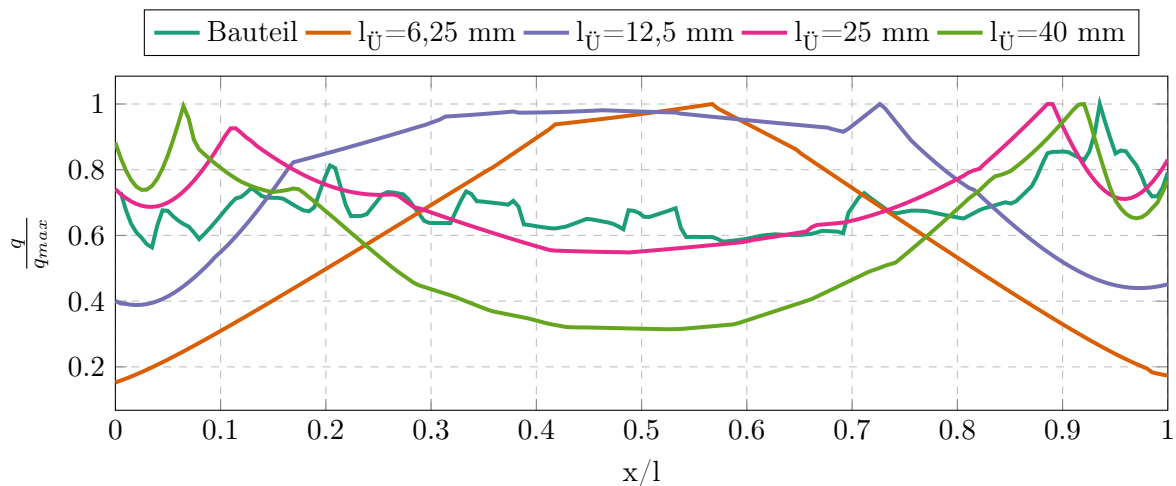


Abbildung 5.3: Normierter deviatorischer Spannungsverlauf

Es zeigt sich, dass für eine geringe Überlappungslängen ($l_{\bar{U}}=6,25$ mm und $l_{\bar{U}}=12,5$ mm) das Maximum der deviatorischen Spannungen in der Mitte der Überlappungslänge liegt. Für größere Überlappungslängen ($l_{\bar{U}}=25$ mm und $l_{\bar{U}}=40$ mm) ergeben sich die Spannungsspitzen im Randbereich. Es zeigt sich außerdem, dass der Verlauf des Prüfkörpers mit einer Überlappungslänge von 25 mm den normierten Verlauf des Bauteils qualitativ am besten abbildet. Allerdings wird deutlich, dass die Verwendung der groben Vernetzung der Klebschicht in Verbindung mit Shell-Elementen als Fügeglied dazu führt, dass keine Symmetrie der Spannungsverläufe mehr besteht und die Spannungsverläufe eine Ungenauigkeit besitzen. Allerdings wird diese Vernetzung aus dem Bauteil übernommen und die Ungenauigkeit der Ergebnisse wird in Kauf genommen, damit eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen Prüfkörper und Bauteil gewährleistet wird.

Für eine genaue Bewertung werden anschließend die Abweichungen zwischen den genormten Verläufen im Bauteil und im Prüfkörper bestimmt. Der Vorteil ist hierbei, dass sowohl im Bauteil als auch in den Prüfkörpern die Spannungen über einen Pfad mithilfe derselben Anzahl an Datenpunkten ermittelt werden. Dadurch können die Abweichungen für jeden Punkt ohne eine Interpolation berechnet werden:

$$d_{Dev} = \sum_{i=0}^{201} \left| \frac{q_i}{q_{max}}(Bauteil) - \frac{q_i}{q_{max}}(Prüfkörper) \right| \quad (5.1)$$

$$\overline{d_{Dev}} = \frac{d_{Dev}}{201} \quad (5.2)$$

Dies wird für die vier betrachteten Überlappungslängen durchgeführt, die Ergebnisse sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Bei einer idealen Übereinstimmung ist dieser Wert 0. Das bedeutet, dass der Prüfkörper den normierten Spannungsverlauf des Bauteils ideal und ohne Abweichung abbildet.

Tabelle 5.3: Mittlere Abweichung $\overline{d_{Dev}}$ des deviatorischen, normierten Spannungsverlaufs von Bauteil und Prüfkörper

Überlappungslänge $l_{\ddot{U}}$	$\overline{d_{Dev}}$
6,25 mm	0,2797
12,5 mm	0,2508
25 mm	0,0794
40 mm	0,1843

Hierbei zeigt sich, dass die geringste durchschnittliche Abweichung der normierten deviatorischen Spannungsverläufe von Bauteil und Prüfkörper für die Geometrie mit einer Überlappungslänge von 25 mm gegeben ist (0,0794). Dies stimmt auch mit den Beobachtungen von Abbildung 5.3 überein.

5.3 Hydrostatischer Spannungsverlauf

Für den Vergleich der hydrostatischen Spannungsverläufe zwischen Prüfkörpergeometrien und Bauteil wird ein ähnliches Vorgehen wie für den Vergleich der deviatorischen Spannungen gewählt. Abbildung 5.4 zeigt hierbei den Verlauf der hydrostatischen Spannungen sowohl im Bauteil als auch in den Prüfkörpergeometrien.

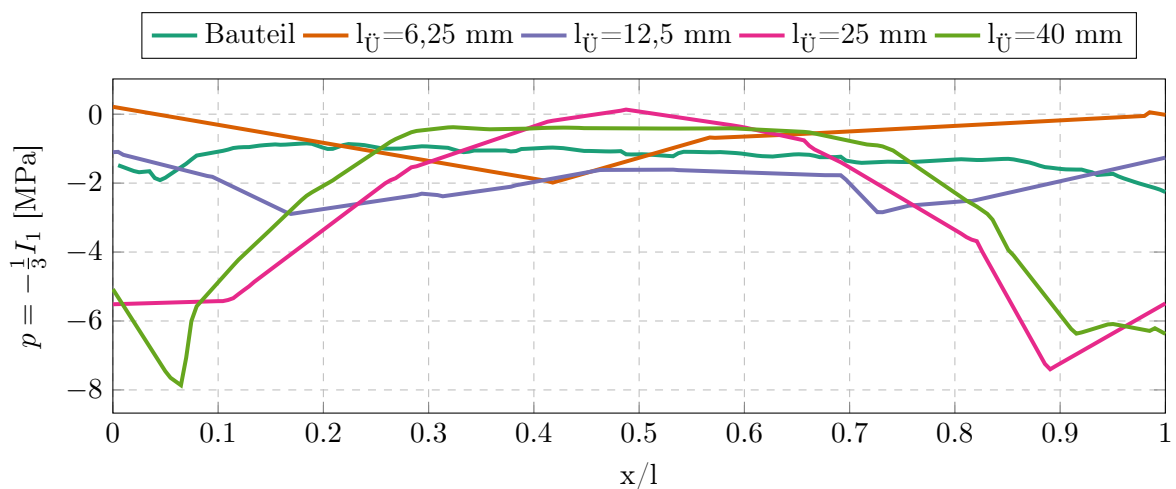


Abbildung 5.4: Hydrostatischer Spannungsverlauf innerhalb der Klebschichten

Hierbei wird erneut deutlich, dass bei einer mittleren Festigkeit von 8 MPa die Spannungen besonders im Randbereich weitaus höher sind als in der Mitte der Klebschicht. Aus diesem Grund muss hierbei auch eine Normierung vorgenommen werden. Diese Normierung erfolgt nun aber in Abhängigkeit des Bauteilverlaufs, da dieser auch positive hydrostatische Spannungen und damit einen Druckbereich aufweisen kann. Von den betrachteten Prüfkörpergeometrien kann keiner der simulierten Prüfkörper einen Druckbereich abbilden. Folgende drei Fälle werden unterschieden:

1. Negativer hydrostatischer Spannungsverlauf: Hierbei wird der Spannungsverlauf anhand des minimalen Wertes normiert und mit den Verläufen der Prüfkörpergeometrien verglichen. Beispielhafte Verläufe sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

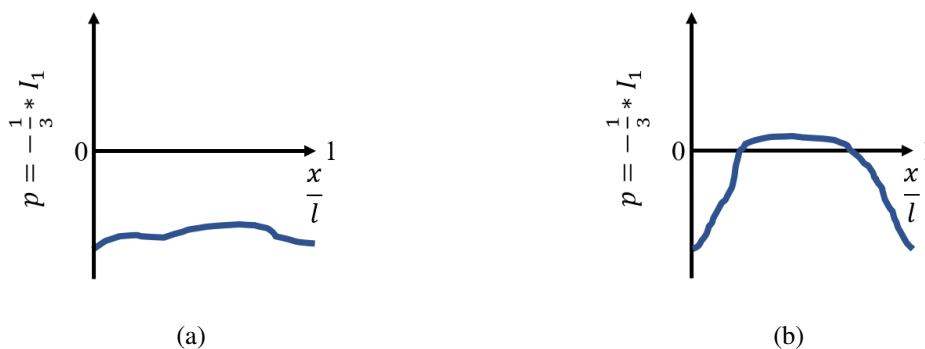


Abbildung 5.5: Beispielhafte Verläufe für negative hydrostatische Spannungsverläufe im Bauteil

Auch ein positiver hydrostatischer Spannungsbereich wie er in Abbildung 5.5 (b) zu sehen ist wird anhand des minimalen Wertes normiert. Hierbei sind die Beträge der Spannungsspitzen ausschlaggebend und da diese im negativen, hydrostatischen Bereich höher als die Beträge im positiven Bereich sind, wird der minimale Wert zur Normierung verwendet.

2. Einmaliger Wechsel von negativem auf positiven hydrostatischen Spannungsverlauf (oder umgekehrt): Hierbei wird der Spannungsverlauf anhand des Minimums normiert und mit den Verläufen der Prüfkörpergeometrien verglichen. Beispielhafte Verläufe sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

Wichtig ist dabei, sowohl im Bauteil als auch im Prüfkörper der Betrag des Minimums verwendet wird. Weiterhin muss verglichen werden, ob die Bereiche positiver und negativer hydrostatischer Spannungszustände lokal übereinstimmen (positive Spannungsspitze bei $x/l=0$, Abbildung 5.6 (a)). Besitzt der Prüfkörper in diesem Bereich ebenfalls eine positive Spannungsspitze, so kann die Normierung vorgenommen werden. Ist dies nicht der Fall, und der Prüfkörper besitzt in diesem Bereich stattdessen eine negative hydrostatische Spannungsspitze, so muss die definierte Richtung des Pfades innerhalb des Bauteils umgekehrt werden (negative Spannungsspitze bei $x/l=0$, Abbildung 5.6 (b)), damit die Spannungen miteinander verglichen werden können.

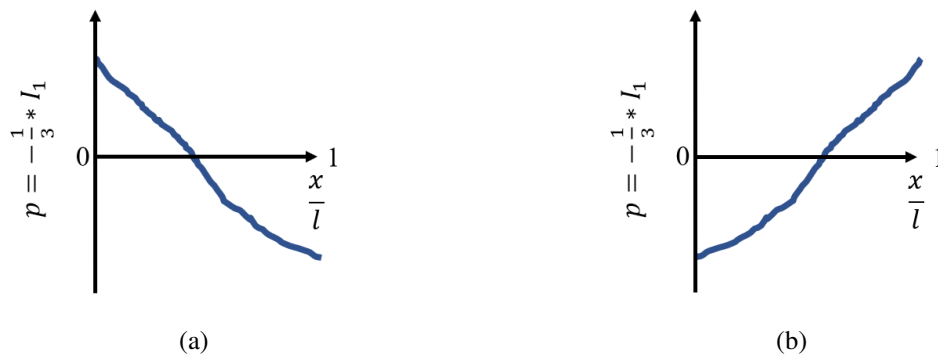


Abbildung 5.6: Beispielhafte Verläufe für einen Wechsel von positiven zu negativen (oder umgekehrt) hydrostatischen Spannungen im Bauteil

3. Positiver hydrostatischer Spannungsverlauf: Ein positiver Verlauf der Normalspannungen ist nach Kapitel 4 für die simulierten Prüfkörpergeometrien nicht zu finden.

Im Zuge einer konservativen Auslegung kann versucht werden, die negativen hydrostatischen Spannungsverläufe so niedrig wie möglich zu halten, was zum Beispiel bei einer Biegebehinderung der Fall ist. In diesem Fall muss mit absoluten und nicht mit normierten Werten gearbeitet werden. Abbildung 5.7 zeigt beispielhafte Verläufe der hydrostatischen Spannungen im positiven Bereich.

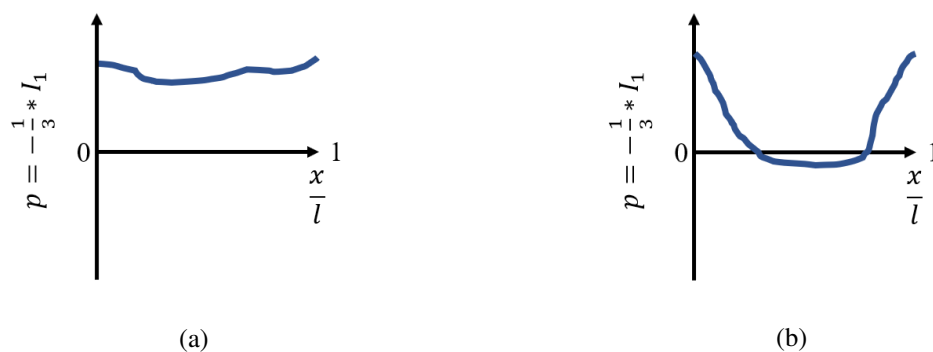


Abbildung 5.7: Beispielhafte Verläufe für positive hydrostatische Spannungsverläufe im Bauteil

Ein negativer hydrostatischer Spannungsbereich wie er in Abbildung 5.7 (b) zu sehen ist führt zu einer Verwendung der absoluten Spannungen. Dies ist auf die niedrigen Beträge der negativen hydrostatischen Spannungen verglichen mit den positiven hydrostatischen Spannungen zurückzuführen.

Da für dieses Beispiel der Bauteilbereich dauerhaft negative hydrostatische Spannungen aufweist, trifft der erste Fall zu und die Spannungsverläufe werden über den Betrag des jeweiligen, minimalen Wertes normiert. Abbildung 5.8 zeigt den Verlauf der normierten hydrostatischen Spannungen für die betrachtete Prüfkörpergeometrien und das Bauteil.

Es zeigt sich erneut für geringe Überlappungslängen und der damit verringerten Anzahl von Elementen

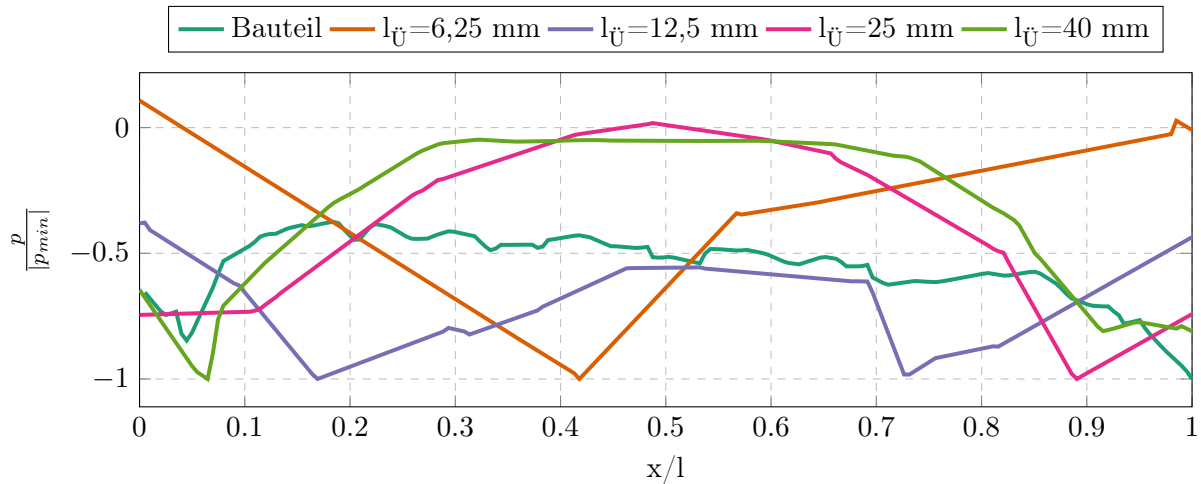


Abbildung 5.8: Normierter hydrostatischer Spannungsverlauf

ten, dass die Spannungsverläufe in diesem Bereich stark von numerischen Effekten abhängig sind. Erst ab einer Überlappungslänge von 25 mm weisen die Verläufe durch die erhöhte Anzahl an Elementen einen Verlauf auf, welcher eine Ähnlichkeit zu den in Abschnitt 4.7 aufgestellten Verläufen besitzt.

Für eine quantitative Bewertung werden erneut die Gesamtabweichung d_{Hydro} sowie die mittlere Abweichung $\overline{d_{Hydro}}$ der normierten Spannungsverläufe von Bauteil und Prüfkörper bestimmt:

$$d_{Hydro} = \sum_{i=0}^{201} \left| \frac{p_i}{|p_{min}|} (Bauteil) - \frac{p_i}{|p_{min}|} (Prüfkörper) \right| \quad (5.3)$$

$$\overline{d_{Hydro}} = \frac{d_{Hydro}}{201} \quad (5.4)$$

Analog zu den Abweichungen der deviatorischen Spannungen bedeutet ein Wert von 0 eine ideale Übereinstimmung der genormten Verläufe. Trifft der dritte Fall zu und die Spannungsverläufe des Bauteils sind positiv, so wird die Abweichung d_{Hydro} über

$$d_{Hydro} = \sum_{i=0}^{201} |p_i(Bauteil) - p_i(Prüfkörper)| \quad (5.5)$$

bestimmt und anschließend über Formel 5.4 gemittelt werden. Somit ist eine ideale Übereinstimmung und damit $\overline{d_{Hydro}} = 0$ nicht möglich und es muss versucht werden, $\overline{d_{Hydro}}$ zu minimieren.

Da dieser Fall jedoch nicht zutrifft, wird d_{Hydro} über Formel 5.3 ermittelt. Dies wird für die vier Prüfkörpergeometrien durchgeführt und führt zu den in Tabelle 5.4 aufgeführten Ergebnissen.

Es zeigt sich, dass keiner der betrachteten Verläufe den hydrostatischen Spannungszustand zufriedenstellend abbildet. Den besten Wert erreicht der Prüfkörper mit einer Überlappungslänge von 12,5 mm.

Tabelle 5.4: Mittlere Abweichung $\overline{d_{Hydro}}$ der hydrostatischen, normierten Spannungsverläufe von Bauteil und Prüfkörper

Überlappungslänge $l_{\ddot{U}}$	$\overline{d_{Hydro}}$
6,25 mm	0,3629
12,5 mm	0,2432
25 mm	0,2705
40 mm	0,2945

Da der Spannungsverlauf im Bauteil zwischen $l_{\ddot{U}}=12,5$ mm und $l_{\ddot{U}}=25$ liegt und sich dies auch durch die Ergebnisse zeigt, kann vermutet werden, dass in diesem Bereich der beste Spannungszustand liegt. Ein zusätzlicher Iterationsschritt kann die Prüfkörpergeometrie so anpassen, dass der hydrostatische Spannungsverlauf besser abgebildet wird. Dies muss daraufhin allerdings für alle Prüfkörpergeometrien durchgeführt werden und auch die deviatorischen Spannungen sowie das Verhältnis der Spannungen zueinander müssen erneut bewertet werden, was mit einem großen zeitlichen Aufwand einhergeht. Aus diesen Gründen wird auf diese weitere Verbesserung der Prüfkörpergeometrie nur hingewiesen, sie aber nicht weiter verfolgt.

5.4 Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungen

Abschließend wird das Verhältnis der hydrostatischen zu deviatorischen Spannungen gebildet. Der Grund hierfür liegt darin, dass die deviatorischen und hydrostatischen Verläufe nur für sich alleine betrachtet werden. Hierbei kann theoretisch eine gute Übereinstimmung, sowohl der normierten deviatorischen, als auch der normierten hydrostatischen Spannungen erreicht werden, ohne dass das Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungen im Bauteil übereinstimmt. Dies muss bei der Auslegung einer Prüfkörpergeometrie berücksichtigt werden, da die Kombination dieser Spannungszustände zu einem für die Klebschicht ungünstigen Zustand führt. Als Grundlage dienen hierbei die absoluten und nicht die normierten Werte der hydrostatischen und deviatorischen Spannungen. Abbildung 5.9 zeigt das Verhältnis der hydrostatischen zu deviatorischen Spannungen, genormt über die Überlappungslänge.

Deutlich wird dabei, dass in der Klebschicht im Bauteil das Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungen besonders im Randbereich mit -0,6 doppelt so hoch ist wie bei den Prüfkörpergeometrien mit einer Überlappungslänge von 25 mm beziehungsweise 40 mm ($p/q=-0,3$). Außerdem zeigt sich, dass über die gesamte Überlappungslänge das Verhältnis im Bauteil höher ist, als die Prüfkörpergeometrien abbilden können. Für die betrachteten Prüfkörpergeometrien zeigt sich qualitativ keine Übereinstimmung des Verhältnis von hydrostatischen und deviatorischen Spannungen zueinander. Dennoch wird wie bei den deviatorischen und hydrostatischen Verläufen eine Quantifizierung der Abweichung mithilfe folgender Formeln durchgeführt:

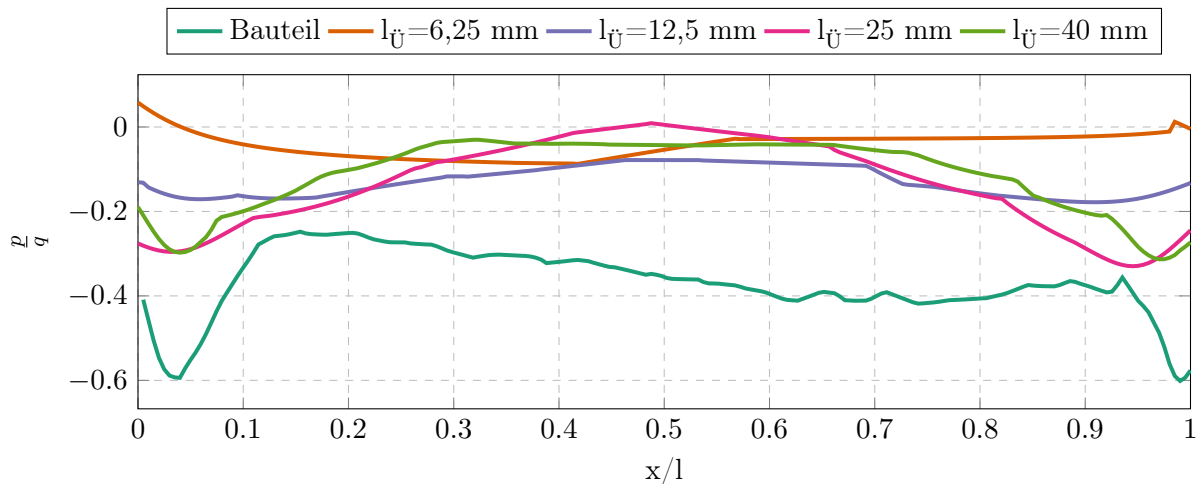


Abbildung 5.9: Deviatorischer Spannungsverlauf innerhalb der Klebschichten

$$d_{pq} = \sum_{i=0}^{201} \left| \frac{p_i}{q_i}(\text{Bauteil}) - \frac{p_i}{q_i}(\text{Prüfkörper}) \right| \quad (5.6)$$

$$\overline{d_{pq}} = \frac{d_{pq}}{201} \quad (5.7)$$

Dies wird durchgeführt, um das Vorgehen zum Ableiten der Prüfkörpergeometrie komplett darzustellen und aufzuzeigen. Analog zu den deviatorischen und hydrostatischen Spannungsverläufen bedeutet $\overline{d_{pq}} = 0$ eine ideale Übereinstimmung der Verläufe.

Die Ergebnisse dieser Quantifizierung sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5: Mittlere Abweichung $\overline{d_{pq}}$ des hydrostatischen Spannungsverlaufs von Bauteil und Prüfkörper

Überlappungslänge $l_{\ddot{U}}$	$\overline{d_{pq}}$
6,25 mm	0,3255
12,5 mm	0,2385
25 mm	0,2325
40 mm	0,2552

Die Beobachtungen der Spannungsverläufe werden durch die Auswertung bestätigt. Keine der Prüfkörpergeometrien weist eine gute Übereinstimmung mit den Verläufen des Bauteils überein. Die beste Übereinstimmung mit einer durchschnittlichen Abweichung $\overline{d_{pq}}$ von 0,2325 weist die Prüfkörpergeometrie mit einer Überlappungslänge von 25 mm auf.

5.5 Bewertung der Spannungsverläufe

Als abschließender Punkt zum Ableiten der Prüfkörpergeometrie müssen die Ergebnisse der einzelnen Vergleiche ausgewertet werden. Dies geschieht, indem die mittleren Abweichungen der Verläufe zusammengerechnet werden.

$$\overline{d_{Ges}} = \overline{d_{Dev}} + \overline{d_{Hydro}} + \overline{d_{pq}} \quad (5.8)$$

Bei einem positiven hydrostatischen Spannungsverlauf im Bauteil ist dies nicht möglich, da die absoluten Werte für die Berechnung verwendet werden. In diesem Fall ist $\overline{d_{Ges}}$ ohne $\overline{d_{Hydro}}$ zu berechnen und $\overline{d_{Hydro}}$ muss gesondert betrachtet werden. Bei einer idealen Übereinstimmung über die gesamte Überlappungslänge wäre $\overline{d_{Ges}} = 0$. Ein Prüfkörper zu finden, für welchen dies der Fall ist, ist unwahrscheinlich. **Deshalb ist das Ziel dieser Methodik alle drei Anteile $\overline{d_{Dev}}$, $\overline{d_{Hydro}}$ sowie $\overline{d_{pq}}$ und damit auch $\overline{d_{Ges}}$ zu minimieren.**

Auf Basis der mittleren Gesamtabweichung wird ein Ranking erstellt, welche Prüfkörpergeometrie anhand der gewählten Kriterien den Spannungsverlauf am besten abbildet. Für die betrachteten vier Prüfkörpergeometrien des einfach überlappten Prüfkörpers ergibt sich folgendes Ranking:

Tabelle 5.6: Ranking der betrachteten Prüfkörpergeometrien

Rang	Überlappungslänge $l_{\bar{U}}$	$\overline{d_{Ges}}$
1	25 mm	0,5824
2	40 mm	0,7253
3	12,5 mm	0,7326
4	6,25 mm	0,9682

Die Prüfkörpergeometrie mit einer Überlappungslänge von 25 mm ist für die ausgewählten und hier aufgezeigten Prüfkörpergeometrien die Konfiguration, welche den Spannungszustand am besten abbilden kann.

5.6 Gesamtergebnis der Methodik

Die in den vorherigen Abschnitten 5.2 bis 5.5 aufgezeigte Methodik wird nun auf alle möglichen Prüfkörpergeometrien angewendet. Die einzelnen Verläufe sowie eine vollständige Auswertung ist in Anhang A.4 zu finden. Die fünf Prüfkörpergeometrien mit der geringsten mittleren Gesamtabweichung $\overline{d_{Ges}}$ sind mit den zugehörigen Abweichungen für die deviatorischen und die hydrostatischen Spannungsverläufe sowie für das Verhältnis der beiden Spannungskomponenten zueinander in Tabelle 5.7 aufgetragen.

Tabelle 5.7: Prüfkörper mit geringstem $\overline{d_{Ges}}$

Rang	Prüfkörpergeometrie	$l_{\bar{U}}$	d_F	$\overline{d_{Dev}}$	$\overline{d_{Hydro}}$	$\overline{d_{pq}}$	$\overline{d_{Ges}}$
1	Eingeschlitzt	25 mm	4 mm	0,084	0,2599	0,2361	0,5800
2	Einfach überlappt	25 mm	4 mm	0,0794	0,2705	0,2325	0,5824
3	Eingeschlitzt	40 mm	12 mm	0,1294	0,2465	0,2521	0,6280
4	Einfach überlappt	25 mm	8 mm	0,2068	0,1831	0,2474	0,6373
5	Eingeschlitzt	40 mm	8 mm	0,0849	0,3018	0,2567	0,6434

Die Ergebnisse zeigen, dass ein eingeschlitzter Prüfkörper mit einer Überlappungslänge von 25 mm und einer Fügeteildicke von 4 mm die von allen betrachteten Variationen von Prüfkörpergeometrien am besten geeignete Konfiguration ist, um den Spannungszustand im Bauteil abzubilden. Die genaue Geometrie mit den dazugehörigen Werten ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

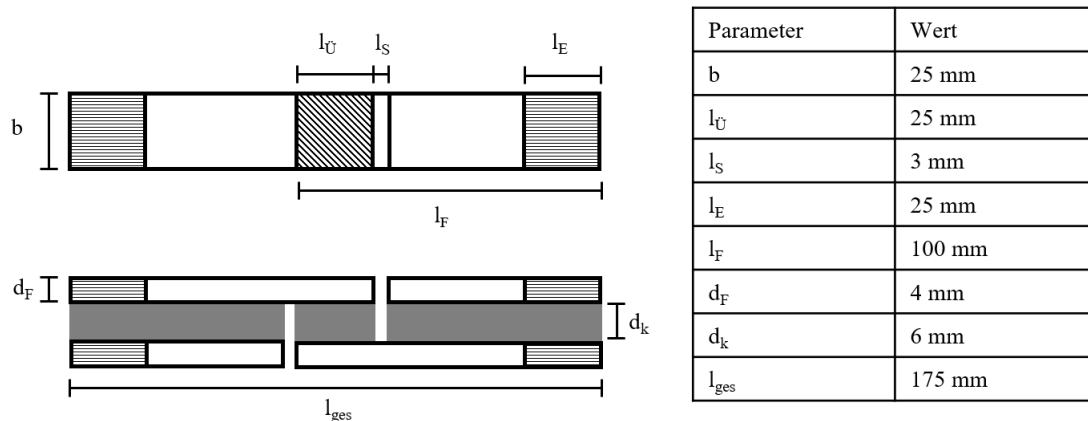


Abbildung 5.10: Abgeleitete Prüfkörpergeometrie

Der dargestellte Prüfkörper stellt einen Kompromiss der drei Vergleiche dar und weist die durchschnittliche beste Übereinstimmung auf. Es wird deutlich, dass besonders durch den niedrigen Werte der deviatorischen Abweichung diese Prüfkörpergeometrie einen Vorteil gegenüber anderen Geometrien, wie zum Beispiel dem einfach überlappten Prüfkörper mit einer Überlappungslänge von 25 mm und einer Fügeteildicke von 8 mm (Rang 4) aufweist, da dieser den hydrostatischen Spannungszustand des Bauteils besser abbildet als der abgeleitete Prüfkörper. Wie beim Vergleich der hydrostatischen Spannungszustände bereits erwähnt, kann über einen weiteren Iterationsschritt die Prüfkörpergeometrie besser an diesen Zustand angepasst werden. Desweiteren zeigte sich, dass das Verhältnis von deviatorischen zu hydrostatischen Spannungen nur unzureichend abgebildet wird, weshalb die Betrachtung weiterer Prüfkörpergeometrien in Erwägung gezogen werden sollte, dies geschieht aber nicht im Rahmen dieser Arbeit.

5.7 Zusammenfassung

Die Anwendung der Methodik ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Hierin wird dargestellt, welche Schritte zum Ableiten einer Prüfkörpergeometrie durchgeführt werden müssen.

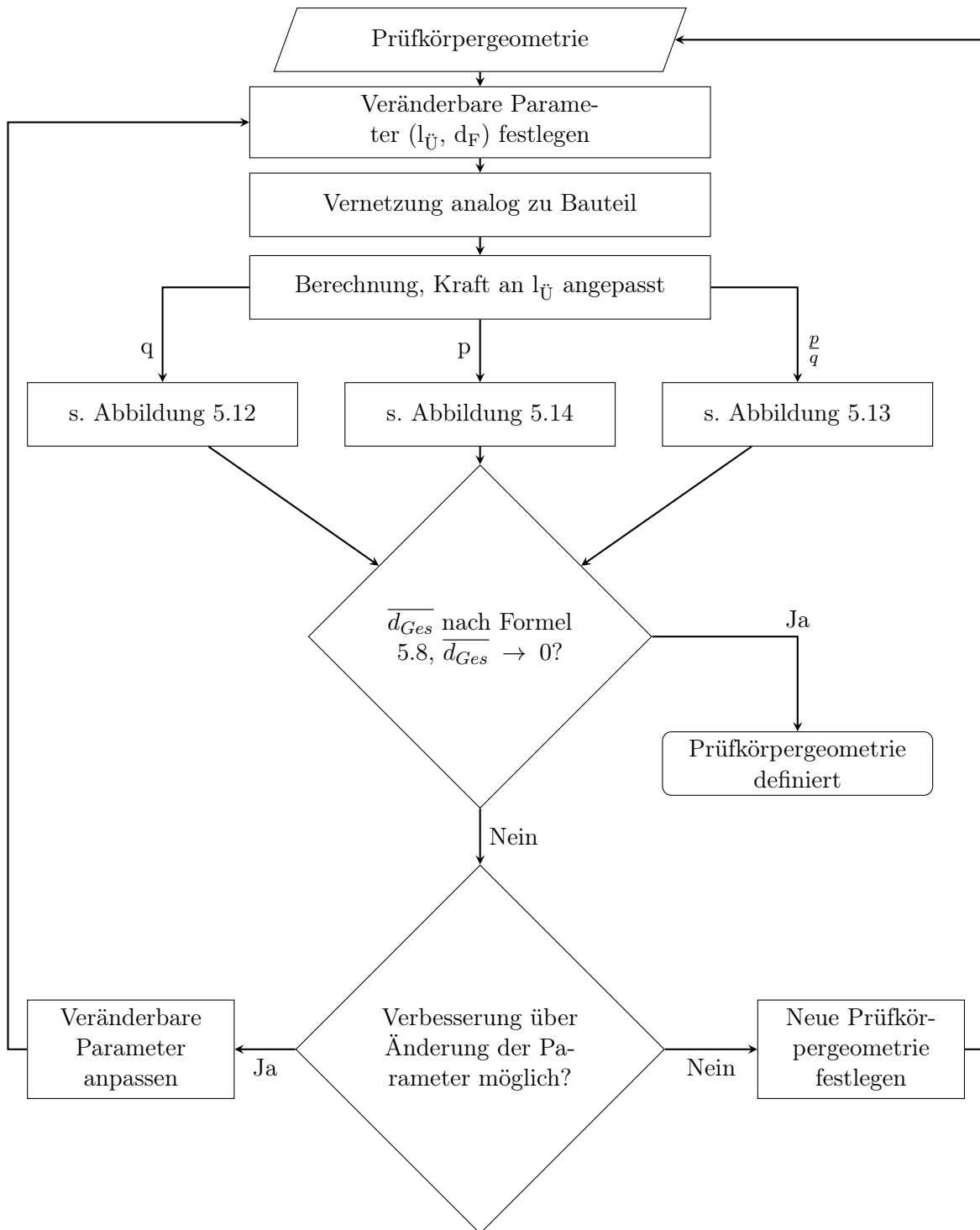


Abbildung 5.11: Vorgehen der Methodik

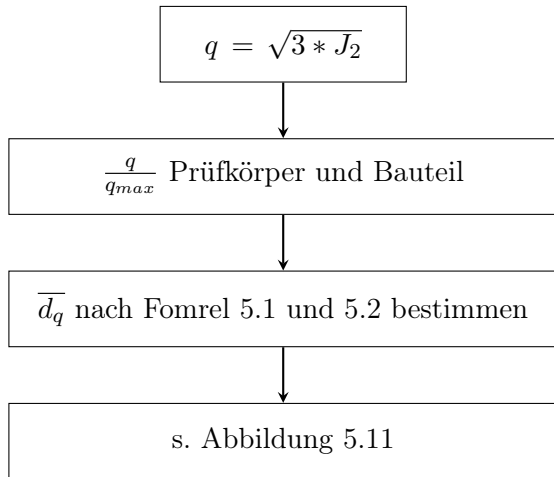


Abbildung 5.12: Vorgehen für die deviatorischen Spannungsverläufe

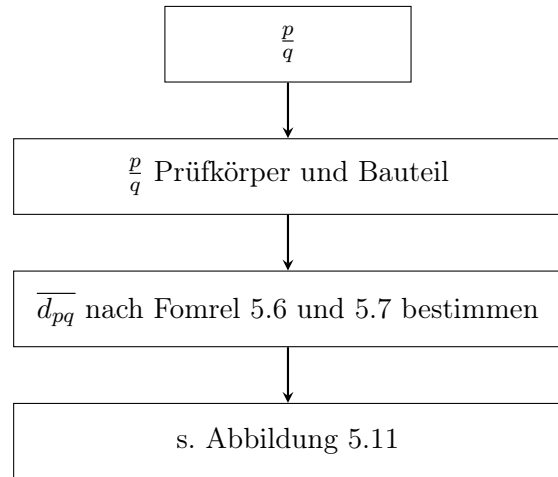


Abbildung 5.13: Vorgehen für das Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungsverläufen

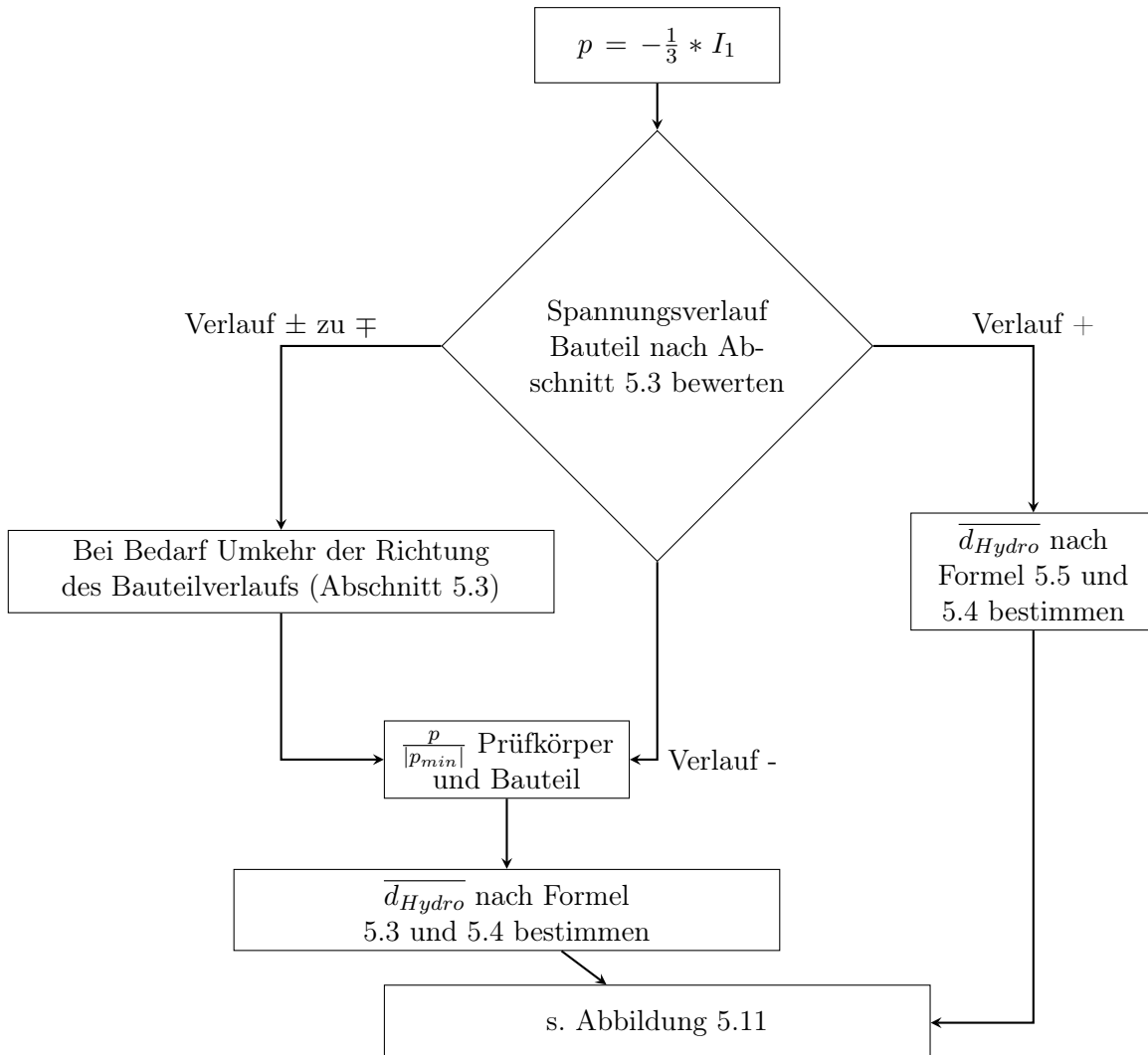


Abbildung 5.14: Vorgehen für die hydrostatischen Spannungsverläufe

6 Fertigung und Prüfung der Prüfkörper

In diesem Kapitel wird die Fertigung und Prüfung der Prüfkörper beschrieben. Dabei wird auf die Besonderheiten bei diesen Arbeitsschritten eingegangen. Es werden zwei verschiedene Prüfreihe gefertigt und getestet: Zum einen doppelt gelaschte Prüfkörper in Anlehnung an ASTM D 3528 Typ B, welche der aktuelle Standard bei Voith sind, zum anderen Prüfkörper, welche der in Kapitel 5 erarbeiteten Geometrie entsprechen.

6.1 Fertigung

Im ersten Schritt werden Lamine mittels des Vakuuminfusionsverfahrens hergestellt. Die zugehörigen Fertigungsdokumente für beide Platten sind in Anhang A.5 zu finden.

Aus den Platten werden nach dem Aushärte- und Temperprozess (8 Stunden bei 80°C) die Fügeiteile geschnitten, um die Prüfkörper zu fertigen und zu verkleben. Dabei können zwei unterschiedliche Verfahren angewendet werden:

1. Die Fügeiteile werden direkt auf die Probenmaße geschnitten und daraufhin verklebt. Auf diese Weise müssen viele einzelne Klebungen erzeugt werden. Dies kann zu Unterschieden in den einzelnen Klebungen führen, da jede Klebung unabhängig von der anderen ist. Die Gefahr von Inhomogenitäten der Klebschicht oder Eigenspannungen aufgrund des Klebstoffschrumps ist reduziert.
2. Die Fügeiteile werden in der Länge mit einem Übermaß gefertigt und anschließend als Platten verklebt. Sind die Klebungen ausgehärtet, werden die einzelnen Prüfkörper aus den Platten auf Maß geschnitten. Dieses Verfahren begünstigt Inhomogenitäten und Eigenspannungen der Klebschicht durch die größere Klebefläche. Allerdings bildet dieses Verfahren das Verkleben der späteren Bauteile genauer ab.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das zweite Verfahren angewendet. Der Grund hierfür liegt darin, dass mit diesem Verfahren das großflächige Verkleben, wie es auch im realen Bauteil geschieht, abgebildet wird. Außerdem sind keine speziellen Vorrichtung nötig, was die Fertigung erleichtert. Weiterhin wird gewährleistet, dass die Proben unter denselben Bedingungen hergestellt werden. Dies kann bei Fertigungsfehlern allerdings dazu führen, dass die Ergebnisse einer Prüfreihe unzulässig und für eine wissenschaftliche Untersuchung ungeeignet sind. Eine gewissenhafte Fertigung ist deshalb von besonderer Bedeutung.

6.1.1 Doppelt gelaschter Prüfkörper

Die Prüfkörper nach ASTM D 3528 Typ B (Abbildung 6.1) sind die aktuell bei Voith vorgeschriebenen Prüfkörper und werden gefertigt und getestet, um die derzeit bei Voith durchgeführte Prüfung darzustellen.



Abbildung 6.1: Doppelt gelaschter Prüfkörper nach ASTM D 3528 Typ B

Für die Prüfkörper werden zwei Platten mit jeweils 4 mm (für die äußeren Fügeiteile) und 8 mm (für die mittleren Fügeiteile) Dicke gefertigt. Die Doppler werden als Platten von beiden Seiten nacheinander aufgeklebt. Zunächst muss die Klebung des ersten Dopplers ausgehärtet sein, um anschließend den zweiten Doppler zu verkleben. Die Fügeiteile werden im Klebebereich angeschliffen und daraufhin mit Isopropanol gereinigt. Beim Schleifen wird dabei die Struktur des Abreißgewebes sowie die äußerste Lage (Wirrfasermatte) entfernt, damit direkt auf den 45° ausgerichteten Fasern geklebt wird. Nach dem Vorbereiten der Fügeiteile wird der Klebstoff mit dem Härter im Verhältnis 100:3 gemischt und auf die Klebebereiche appliziert. Die Klebschichtdicke von 3 mm wird dabei über Distanzstücke sichergestellt (Abbildung 6.2, 1). Der Klebstoff wird in einer Dreiecksform aufgetragen (Abbildung 6.2, 2), damit der Klebstoff von der Mitte nach außen fließen kann. Es wird weitaus mehr Klebstoff aufgetragen als nötig ist, damit der Klebstoff in großen Mengen aus dem Klebebereich fließt und so eventuelle Lufteinschlüsse aus der Klebschicht gedrückt werden. Anschließend wird die Platte, welche als Doppler dient, nach unten gedrückt, wodurch der Klebstoff aus dem Klebespalt gepresst wird.

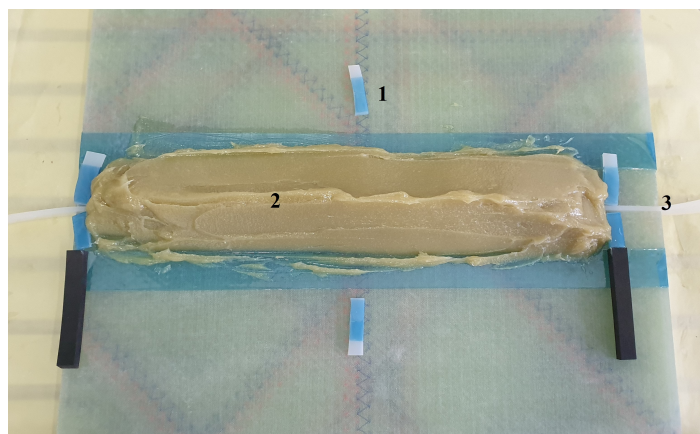


Abbildung 6.2: Fertigung der Klebschicht der doppelt gelaschten Prüfkörper

Der überschüssige Klebstoff wird anschließend abgetragen, um eine möglichst homogene Kleb-

schichtkante zu erhalten. Daraufhin wird der Doppler über Gewichte beschwert und der Klebstoff kann aushärten. Die besondere Schwierigkeit der Fertigung dieser Prüfkörper ist der Spalt zwischen den Fügeteilen in der Mitte der Prüfkörper. In diesen Spalt darf kein Klebstoff gelangen, da sonst eine Kraftübertragung sowohl über Schub als auch über die Stoßverbindung in der Mitte möglich ist. Dies führt zu einem Spannungszustand, welcher durch die Prüfkörpergeometrie nicht vorgesehen ist. Aus diesem Grund wird in die Mitte ein Streifen Silikon gedrückt (Abbildung 6.2, 3), welcher nach der Aushärtung des Klebstoffes aus dem Klebespalt gezogen werden kann. Auf diese Weise entsteht der gewollte Spalt zwischen den Fügeteilen. Die Platten werden mit Übermaß gefertigt und nach dem Aushärten des Klebstoffes auf die Prüfkörperlänge und -breite zugesägt. Anschließend werden sie vermessen. Die Vermessungsprotokolle sind in Anhang A.5 zu finden.

Abbildung 6.3 zeigt für einen Beispielprobekörper, dass die Klebschichtdicke durch die Distanzstücke eingehalten wurde. Sie liegt innerhalb eines Toleranzbereichs von $3 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$. Deutlich zu sehen sind hierbei die Imperfektionen, welche durch den Klebeprozess entstehen. Lufteinschlüsse oder Blasenbildung infolge des Aushärtprozesses werden deutlich; dies kann einen Einfluss auf die Festigkeit haben und die Klebung schwächen. Allerdings stellt dieser Zustand auch die im Bauteil herrschenden Bedingungen dar und ist deshalb vertretbar.

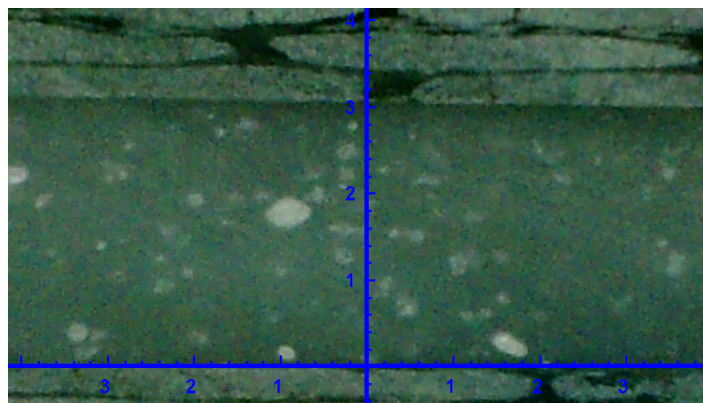


Abbildung 6.3: Nahaufnahme der Klebschicht mit Klebschichtdicke und Inhomogenitäten

6.1.2 Festgelegte Prüfkörpergeometrie

Der zweite gefertigte Prüfkörper, die festgelegte Prüfkörpergeometrie, wird gefertigt, indem zwei 175 mm lange Platten großflächig miteinander verklebt werden. Die Fertigungsdokumente sind auch für diese Prüfkörper in Anhang A.5 zu finden. Die Klebschicht wird analog zu den Prüfkörpern nach ASTM D 3528 in einer Dreiecksform aufgetragen. Die Klebschichtdicke wird über Distanzstücke (wie in Abbildung 6.2 dargestellt) eingestellt und die Prüfkörper mit Gewichten beschwert. Der überschüssige Klebstoff, welcher aus dem Klebespalt austritt, wird abgestrichen und der Klebstoff kann aushärten. Nach dem Aushärten des Klebstoffes werden die Schlitze gefertigt. Hierbei werden die Fügeteile so eingeschlizt, dass eine Fügeteilseite sowie die Klebschicht durchtrennt werden und eine Überlappungslänge von $l_{\text{Ü}}=25 \text{ mm}$ entsteht. Dies geschieht nach dem Verfahren, welches in der ASD

pr EN 6060 [6] aufgezeigt ist. Die Schlitzbreite ist hierbei, abweichend zur Norm, auf 3 mm festgelegt. Abbildung 6.4 zeigt den Bereich der Überlappung. Auf der rechten Seite ist hierbei zu erkennen, dass die erste Lage des Prüfkörpers angeschlitzt wurde. Da dies zu einem veränderten Spannungszustand führt, ist dies bei der Auswertung und Betrachtung der Prüfergebnisse zu beachten.

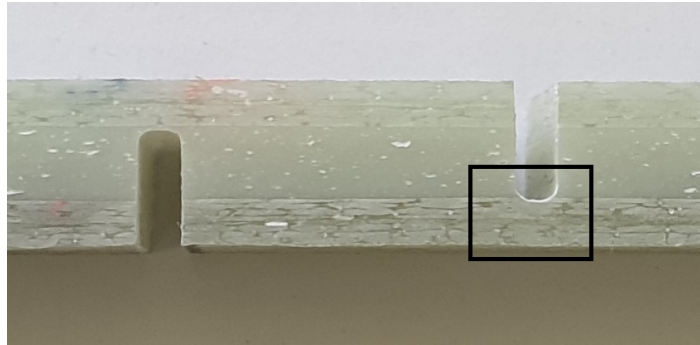


Abbildung 6.4: Schlitz der Prüfkörper

Nach dem Einschlitzten der Platten werden aus diesen die Prüfkörper mit den jeweiligen Endmaßen geschnitten. Die Messprotokolle der Prüfkörper sind in Anhang A.5 zu finden. Der Toleranzbereich der Prüfkörper wird auf $6 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$ festgelegt. Dies wird als akzeptabler angesehen, da diese Schwankungen auch im Bauteil auftreten können. Für die Prüfkörper 9-12 konnten die Klebschichtdicken nicht eingehalten werden, weshalb diese Prüfkörper nicht verwendet werden. Für alle anderen Prüfkörper liegt die Klebschichtdicke innerhalb des Bereichs. Prüfkörper 1 wurde beim Anschlitzten der Prüfkörper fehlerhaft angesägt, weshalb dieser Prüfkörper nicht verwendet werden kann.

6.2 Prüfung

Die Prüfkörper werden in eine Zugprüfmaschine eingespannt und anschließend mit einer Prüfungsgeschwindigkeit von $1,27 \text{ mm/min}$ getestet, bis das Versagen der Klebschicht eintritt. Abbildung 6.5 zeigt den Spannungsverlauf der doppelt gelaschten Prüfkörper.

Es ist zu erkennen, dass die Kraft zuerst steil ansteigt. Die Kurven werden flacher, bis ab einem Verfahrweg von ungefähr $0,5 \text{ mm}$ die Verläufe linear ansteigen bis sie zwischen $1,25 \text{ mm}$ und $1,5 \text{ mm}$ bei einer mittleren Kraft von $7,4 \text{ kN}$ versagen. Die homogenen und gleichmäßigen Verläufe der Prüfkörper zeigen dabei immer ein ähnliches Verformungsverhalten aller Prüfkörper. Der Verfahrweg wird über die Zugprüfmaschine an der Traverse bestimmt. Ein Wegaufnehmer kommt nicht zum Einsatz, weshalb Abweichungen durch Spaltmaße der Prüfkörperaufnahme und die Dehnung der Prüfmaschine diese Ergebnisse verfälschen können. Da für die Auswertung die Kraft entscheidend ist, ist diese Unsicherheit akzeptabel. Abbildung 6.6 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf der eingeschlitzten Prüfkörper.

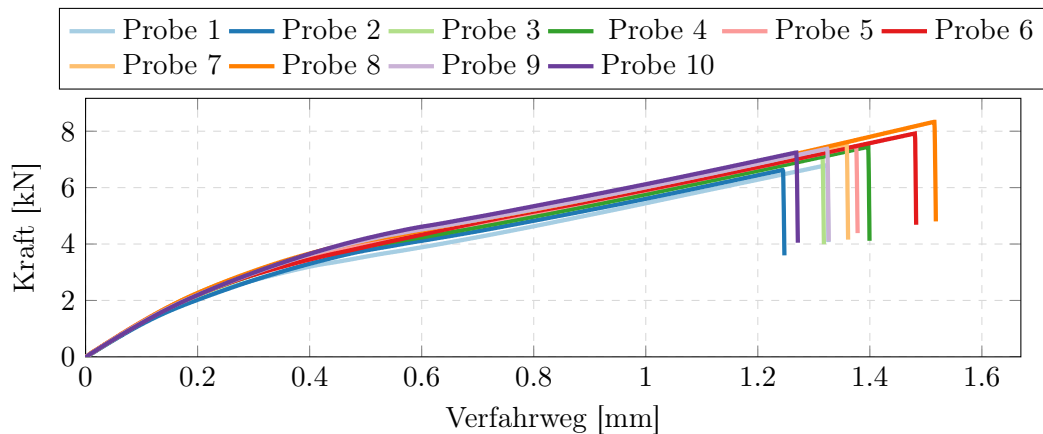


Abbildung 6.5: Kraft-Weg-Diagramm für ASTM 3528 Typ B Proben

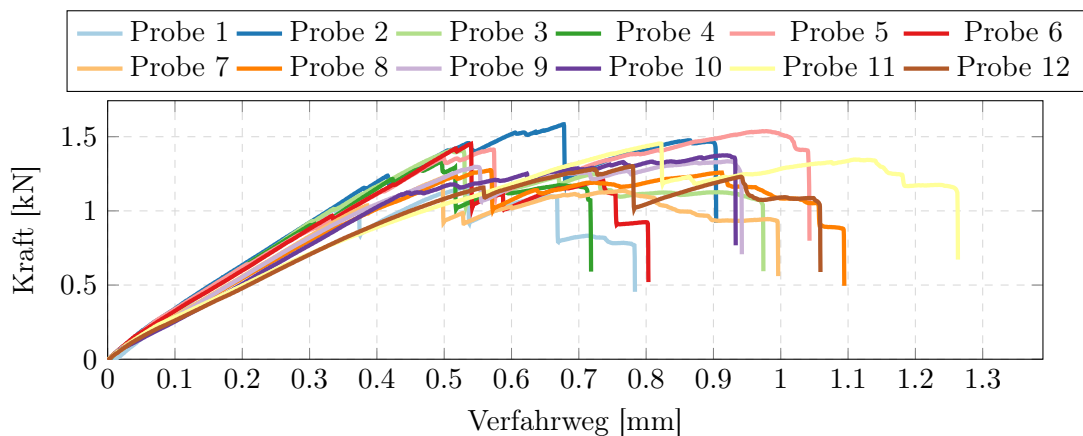


Abbildung 6.6: Kraft-Weg-Diagramm festgelegte Prüfkörpergeometrie

Die Verläufe steigen hier zunächst annähernd linear an. Ab 0,3 mm sind kleine Knicke der Verläufe wahrzunehmen, der Grund für diese Knicke kann der Restklebstoff im Schlitz sein in welchem die Fasern nicht angeschnitten wurden. Die Verläufe steigen weiter an, bis zwischen 0,5 mm und 0,7 mm ein größerer Abfall zu vernehmen ist. An diesem Punkt wird die Kraft für die eingeschlitzten Prüfkörper ausgewertet. Es zeigte sich in Videoaufnahmen, dass bei diesem ersten Abfall ein Knacken des Prüfkörpers zu vernehmen war und auch Risse der Klebschicht zu erkennen waren. Dies führte allerdings noch nicht zum kompletten Versagen des Prüfkörpers und der Verfahrweg konnte weiter erhöht werden. Bei einigen Prüfkörpern konnte eine höhere Last erreicht werden, diese wird aber für die Auswertung nicht verwendet. Die Gründe für diesen Verlauf können zum einen in der Prüfkörpergeometrie liegen, da durch ein teilweises einreißen der Klebschicht die Spannungen abgebaut werden und die Klebung noch nicht komplett versagt. Ein weitere Grund kann das Anschlitzen der ersten Fügeiteillage sein, was zu diesem Verhalten der Prüfkörper führt. Deshalb muss eine zweite Prüfreihe gefertigt und durchgeführt werden um die Prüfergebnisse zu bestätigen. Dies ist aufgrund der zeitlichen Planung nicht möglich, weshalb für eine weitere Betrachtung der Ergebnisse diese Prüfkörper unter Beachtung der Fertigungsabweichung verwendet werden.

Die Prüfergebnisse, mit welchen die Auswertung vorgenommen wird, sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Ermittelt werden die mittlere Kraft \bar{F} sowie die mittlere Festigkeit $\bar{\tau}$. Zu diesen Werten werden die jeweiligen Standardabweichungen s und Variationskoeffizienten v ermittelt. Aufgrund der Fertigungsfehler der eingeschlitzten Prüfkörper (Nr. 1 und Nr. 9-12) werden für die Auswertung die Werte der Prüfkörper Nr. 2-8 dargestellt.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Versuchsreihen

Prüfkörper	Kraft			Festigkeit		
	\bar{F}	s	v	$\bar{\tau}$	s	v
Doppelt gelaschter Prüfkörper	7400 N	490 N	0,066	6,00 MPa	0,41 MPa	0,068
Eingeschlitzter Prüfkörper	1384 N	119 N	0,085	2,18 MPa	0,19 MPa	0,087

Eine Abminderung der Prüfergebnisse zur Bestimmung der Festigkeit wie sie in der Auslegung von Bauteilen durchgeführt wird und auch in der DIN 6701 definiert ist, wird hier nicht durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse des eingeschlitzten Prüfkörpers eine größere Streuung aufweisen als die Ergebnisse des doppelt gelaschten Prüfkörpers. Das kann am Fehler in der Fertigung liegen oder an der geringeren Anzahl an verwendeten Prüfkörpergeometrien (eingeschlitzt: 7, doppelt gelascht: 10). Bei einer Abminderung ist diese Abweichung zu beachten. Die geringeren Kräfte und Festigkeiten der festgelegten Prüfkörpergeometrie im Vergleich zur doppelt gelaschten Probe waren nach den Erkenntnissen von Abschnitt 4.7 zu erwarten. Dies hängt zum einen mit der Prüfkörpergeometrie zusammen, da der eingeschlitzte Prüfkörper höhere Interface-Spannungen verursacht als der doppelt gelaschte Prüfkörper. Zum anderen wurde die Klebschichtdicke der festgelegten Prüfkörpergeometrie auf 6 mm festgelegt, was die Spannungen im Interface im Vergleich mit einer 3 mm dicken Klebschicht ebenfalls ansteigen lässt. Aufgrund dieser Einflüsse versagt die festgelegte Prüfkörpergeometrie bei einer geringeren Last als der aktuell bei Voith getestete Prüfkörper. Ein weiterer Grund kann das Anschneiden der Fasern sein, welches nach der ASD-STAN pr EN 6060 dazu führt, dass die Biegesteifigkeit der Fügeteile geringer wird und die Fasern am Interface der Klebschicht ein freies Ende besitzen. Dies führt zu einem Spannungszustand welcher durch die Prüfkörpergeometrie nicht vorhergesehen ist und die Aussagekraft dieser Ergebnisse abmindert.

Versagensbild

Die Bruchbilder der Prüfkörper sind für zwei Beispielproben in Abbildung 6.7 dargestellt. Bei einigen Prüfkörpern versagte ein Teil der Klebschicht kohäsiv. Dies war allerdings nur ein kleiner Bereich der Klebschicht und der größte Bereich der Klebschichten versagte wie in der Abbildung dargestellt. Die Angaben der Versagensart für alle Prüfkörper sind in Anhang A.6 zu finden.

Hierbei zeigt sich auf den ersten Blick ein adhäsives Versagen, was für eine nicht ausreichende Bindung des Klebstoff am Fügeteilwerkstoff spricht. Gleichzeitig zeigt sich durch das Ablösen des Kleb-



(a) ASTM D 3528 Typ B Prüfkörper

(b) Festgelegte Prüfkörpergeometrie

Abbildung 6.7: Bruchflächen der Prüfkörper

stoffs im Interfacebereich, dass die Spannungen in diesem Bereich der Klebung ihr Maximum erreichen. Diese Hypothese der vorangegangenen Kapitel konnte durch die Prüfung der Prüfkörper bestätigt werden. Das Versagensbild konnte sowohl bei der Prüfung des doppelt gelaschten als auch des eingeschlitzen Prüfkörpers nachgewiesen werden. Um die Klebeflächen eingehender zu untersuchen, wurden ausgewählte doppelt gelaschte Prüfkörper unter dem Mikroskop betrachtet. Abbildung 6.8 zeigt die Klebschicht eines Prüfkörpers.

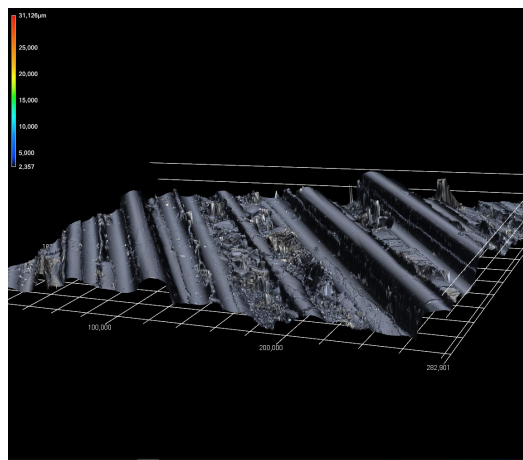


Abbildung 6.8: Klebschicht unter dem Mikroskop

Dabei ist zu erkennen, dass sowohl \cap - als auch \cup -förmige Flächen in der Klebschicht zu erkennen sind. Die \cap -förmigen Oberflächen zeigen dabei, dass Fasern aus dem Füge teil am Klebstoff haften. Die \cup -förmigen Oberflächen zeigen lediglich die Abdrücke der Fasern auf der Klebschicht. Dadurch wird deutlich, dass die Klebschichten sowohl adhäsiv als auch kohäsiv im Füge teil versagt haben. Ein adhäsives Versagen der Klebschicht spricht für eine schlechte Bindung des Klebstoffs auf dem Füge teil. Dies stellt in den Prüfungen somit die schwächste Stelle dar. Allerdings zeigte sich auch in Kapitel 4 dass in diesen Bereichen die höchsten Schub- und Normalspannungen auftreten welche zu einem abschälen des Klebstoffs führen. Gleichzeitig spricht das Bruchbild mit wenigen ausgerissenen Fasern

dafür, dass die im Infusionsprozess hergestellten Lamine eine hohe Faser-Matrix-Bindung aufweisen. Dies ist durch gesonderte Laminatversuche zu untersuchen. Weiterhin wurden die Klebschichten unter Aufsicht der verantwortlichen Klebeaufsichtsperson von Voith gefertigt, welche bei der Fertigung keine Abweichungen vom Fertigungsprozess der Frontends feststellen konnte. Auch die Tatsache dass bei zwei voneinander unabhängigen Prüfungen dasselbe Versagensbild auftritt spricht für eine korrekte Fertigung. Dies ist allerdings durch weitere Versuche - besonders aufgrund der fehlerhaften eingeschlitzten Prüfkörper - zu verifizieren. Das Versagensbild wird von Voith akzeptiert und die Prüfergebnisse können für eine Auswertung verwendet werden.

7 Auswertung der Prüfergebnisse

Neben der Erstellung einer Prüfkörpergeometrie zur Abbildung der im Bauteil auftretenden Spannungszustände ist die Auswertung und der Umgang mit diesen Spannungen von entscheidender Bedeutung für die Festigkeitsbewertung einer Klebung. Durch verschiedene Auswertungen und Vergleiche wird die Festigkeit der Klebschicht konservativ bewertet. Grundsätzlich können bei der Anwendung bei Voith drei Einflüsse identifiziert werden, welche dazu führen:

1. Das Vorhandensein von Spannungsspitzen in den Randbereichen der Klebschicht wird durch die Verwendung einer gemittelten Festigkeit vernachlässigt. Dies ist für manche Probegeometrien zulässig (zweifach überlappt, doppelt gelascht, biegebehindert), jedoch nicht für alle (Kapitel 4).
2. Die Spannungen werden in der Mitte der Klebschicht ausgewertet. Die Klebung versagt allerdings am Interface zwischen Klebschicht und Füge teil. In diesem Bereich sind besonders bei dicken Klebschichten die Spannungen weitaus höher als in der Mitte der Klebschicht (Kapitel 4). Durch die Verwendung einer in der Mitte gewählten Spannung wird die Versagensspannung in einem Bereich gewählt, in welchem die Klebung nicht versagt. Spannungserhöhungen in den Randbereichen werden dadurch nicht erfasst.
3. Die in der Mitte der Klebschicht der Prüfkörper ermittelten Spannungen werden mit am Interface entstehenden Spannungsspitzen der Struktur verglichen (Kapitel 3). Dies führt dazu, dass reduzierte, gemittelte Spannungen mit Spannungsüberhöhungen in singulären Bereichen der Klebschicht für eine Bewertung der Festigkeit verglichen werden.

Bei der Auswertung der Klebungen führt eine gemittelte Spannung zu Festigkeitswerten, welche nicht im Bereich des Versagens der Klebung ermittelt werden. Eine Auswertung der Prüfkörper mittels einer FEM-Simulation kann zu einer sinnvolleren Bewertung der Festigkeiten der Klebschichten führen und wird deshalb in diesem Kapitel untersucht.

7.1 Untersuchung der deviatorischen und hydrostatischen Spannungen

In diesem Abschnitt wird die in Kapitel 5 erarbeitete Methodik auf die Prüfkörper mit den ermittelten Ergebnissen angewendet. Ziel ist die Ermittlung der Spannungsverläufe und ein Vergleich mit den Bauteilverläufen. Dazu werden die Prüfkörper mit derselben Diskretisierung wie in Kapitel 5 simuliert. Die Kräfte für die Simulation sind:

Tabelle 7.1: Kräfte für die Simulation der Prüfkörper

Prüfkörper	Kraft
Doppelt gelaschter Prüfkörper (Akutell von Voith definierter Prüfkörper)	3700 N
Eingeschlitzter Prüfkörper (In Kapitel 5 festgelegte Prüfkörpergeometrie)	1384 N

Hierbei wird für den doppelt gelaschten Prüfkörper nur die Hälfte der Kraft verwendet, da analog zu Kapitel 4 nur der halbe Prüfkörper simuliert wird. Ein Vergleich wird trotz der unterschiedlichen Klebschichtdicken von 3 mm (doppelt gelaschter Prüfkörper) respektive 6 mm (eingeschlitzter Prüfkörper) durchgeführt. Allerdings darf der Einfluss der Klebschichtdicke nicht vernachlässigt werden und muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

7.1.1 Deviatorischer Spannungsverlauf

Als erster Schritt werden die deviatorischen Spannungsverläufe der Prüfkörper mit den Spannungsverläufen im Bauteil verglichen (Abbildung 7.1).

Hierfür zeigt sich bei den absoluten Verläufen, dass sowohl der Verlauf der von Voith verwendeten Prüfkörpergeometrie als auch der festgelegten Prüfkörpergeometrie den Bauteilverlauf übertrifft. Der Verlauf des festgelegten Prüfkörpers zeigt eine bessere Übereinstimmung mit dem Verlauf des Bauteils als der Verlauf des ASTM D 3528-Prüfkörpers. Allerdings weist der Verlauf des doppelt gelaschten Prüfkörpers höhere Spannungsspitzen auf ($q = 14,12$ MPa bei $x/l = 0,114$) als der Verlauf der eingeschlitzten Prüfkörpergeometrie ($q = 6,23$ MPa bei $x/l = 0,159$). Beide Spannungsspitzen liegen jedoch über dem Maximum des Verlaufs des Bauteils ($q = 4,95$ MPa bei $x/l = 0,935$). Der Unterschied in der Höhe der Spannungsspitzen der beiden Prüfkörper hat zwei Gründe:

1. Die Klebschichtdicke von 3 mm des doppelt gelaschten Prüfkörpers ist geringer als die des eingeschlitzten Prüfkörpers (6 mm). Bei größeren Klebschichtdicken verringert sich die Spannung in der Mitte der Prüfkörper durch den größeren Abstand zum Interface. Gleichzeitig erhöht sich die Spannung am Interface, was zu einem früheren Versagen der Klebschicht führt (Kapitel 4).

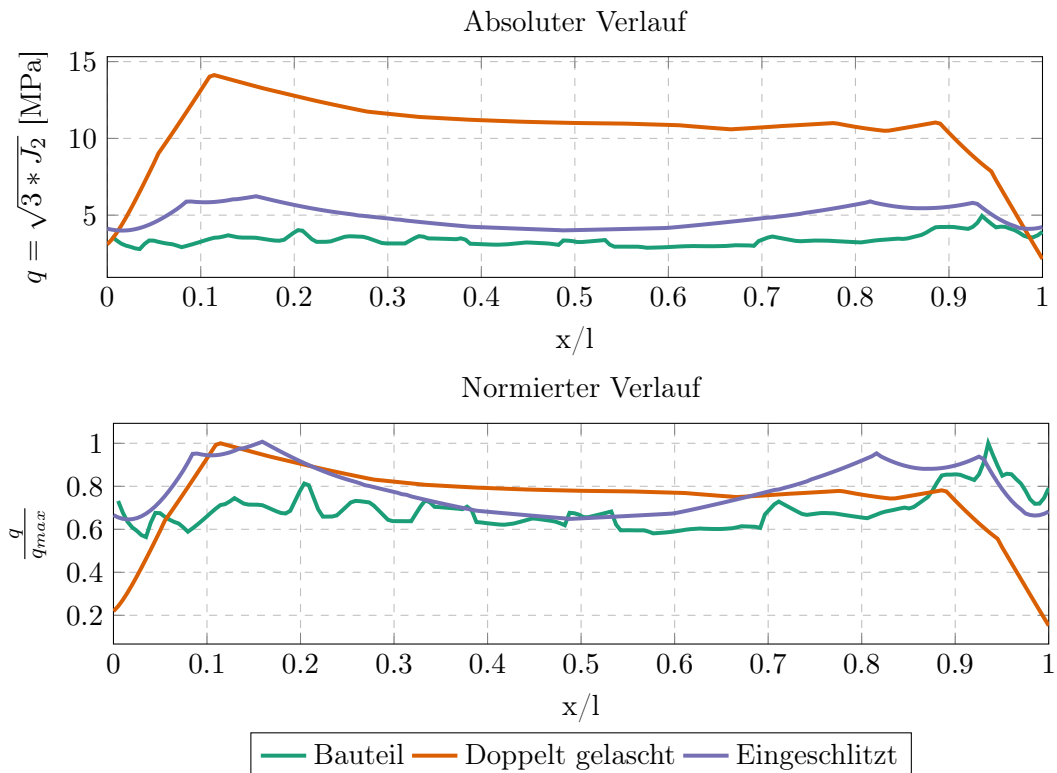


Abbildung 7.1: Deviatorische Spannungsverläufe

- Die doppelt gelaschte Prüfkörpergeometrie führt zu geringeren Spannungen am Interface als der eingeschlitzte Prüfkörper. Deshalb versagt der doppelt gelaschte Prüfkörper bei einer größeren Last als der eingeschlitzte Prüfkörper. Dies ist ein weiterer Grund für die höheren Spannungen am Interface.

Werden die Formeln 5.1 und 5.2 auf die Verläufe angewendet, so ergibt sich für den doppelt gelaschten Prüfkörper eine durchschnittliche Abweichung von $\overline{d_{Dev}} = 0,1682$ und für den eingeschlitzten Prüfkörper eine Abweichung von $\overline{d_{Dev}} = 0,1149$. Dies entspricht einer Verbesserung von 0,0533 und zeigt, dass die eingeschlitzte, festgelegte Prüfkörpergeometrie den Verlauf besser abbildet.

7.1.2 Hydrostatischer Spannungsverlauf

Auch die hydrostatischen Spannungsverläufe werden mit dem Bauteilverlauf verglichen. Die Verläufe sind in Abbildung 7.2 dargestellt.

Für den doppelt gelaschten Prüfkörper ergibt sich ein Spannungsverlauf, welcher einen Druck- sowie einen Zugspannungsbereich aufweist. Die Spitze des Zugspannungsbereichs liegt bei $p = -2,7$ MPa bei $x/l = 0,89$. Für den eingeschlitzten Prüfkörper ergibt sich sowohl im linken Bereich ($x/l = 0,085$, $p = -1,59$ MPa) als auch im rechten Bereich des Graphen ($x/l = 0,925$, $p = -1,4697$) eine Spannungsspitze. Diese beiden Spannungsspitzen liegen, wie bereits beim deviatorischen Verlauf gesehen, unter

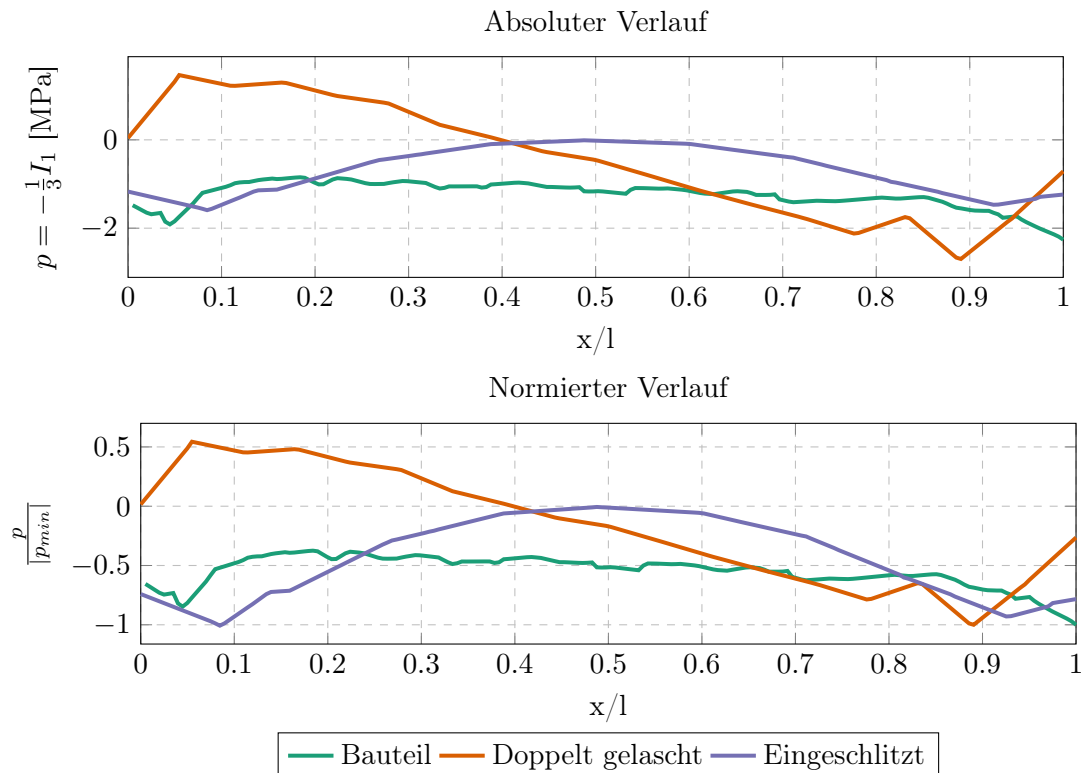


Abbildung 7.2: Hydrostatische Spannungsverläufe

der Spannungsspitze des doppelt gelaschten Prüfkörpers. Allerdings ist auch hier die unterschiedliche Klebschichtdicke sowie Prüfkörpergeometrie zu beachten, was dieselben Einflüsse auf die hydrostatischen Spannungen wie auf die deviatorischen Spannungen (Abschnitt 7.1.1) bewirkt: die höheren Spannungsspitzen des doppelt gelaschten Prüfkörpers resultieren aus der höheren Bruchlast und des geringeren Abstands der Klebschichtmitte zum Interface, was in Kapitel 4 gezeigt wurde.

Die Spannungsspitzen des Bauteilverlaufs liegen mit $p = -1,92$ MPa ($x/l = 0,045$) respektive $p = -2,26$ MPa ($x/l = 1$) überhalb der Spannungsspitzen des eingeschlitzten Prüfkörpers und unterhalb der Spannungsspitzen des doppelt gelaschten Prüfkörpers. Die eingeschlitzte Prüfkörpergeometrie erreicht also die Spannungsspitzen des Bauteils nicht und versagt bereits bei geringeren Spannungsspitzen.

Eine Anwendung der in Kapitel 5 aufgestellten Methodik (Formeln 5.3 und 5.4) auf die genormten Verläufe ergibt für den doppelt gelaschten Prüfkörper einen Wert von $\overline{d_{Hydro}} = 0,4437$ und für den eingeschlitzten Prüfkörper einen Wert von $\overline{d_{Hydro}} = 0,2691$. Dies zeigt eine Verbesserung von 0,1746. Damit zeigt sich, dass der eingeschlitzte Prüfkörper den Spannungsverlauf besser abbildet als der doppelt gelaschte Prüfkörper.

7.1.3 Verhältnis von deviatorischen zu hydrostatischen Spannungen

Als letzter der in Kapitel 5 vorgestellten Verläufe wird das Verhältnis der deviatorischen zu hydrostatischen Spannungen untersucht. Abbildung 7.3 zeigt die Verläufe der Prüfkörper sowie des Bauteils:

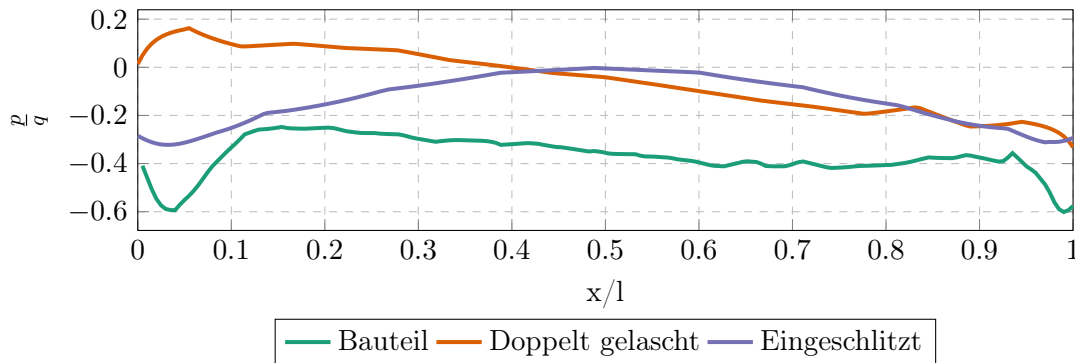


Abbildung 7.3: Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungsverläufen

Die Verläufe zeigen, dass die Prüfkörper das Verhältnis p/q nur unzureichend abbilden. Während der Bauteilverlauf Minima von $\frac{p}{q} = -0,594$ ($x/l = 0,035$) beziehungsweise $\frac{p}{q} = -0,601$ ($x/l = 0,99$) aufweist, erreichen die Prüfkörper diese Werte nicht. Der doppelt gelaschte Prüfkörper erreicht hierbei den minimalsten Wert mit $\frac{p}{q} = -0,332$ bei $x/l = 1$. Dies ist allerdings auf die geringen deviatorischen Spannungen zurückzuführen, die gegen 0 gehen und trotz einer niedrigen hydrostatischen Spannung zu diesem hohen Wert führen. Für den eingeschlitzten Prüfkörper ergeben sich Minima von $\frac{p}{q} = -0,322$ ($x/l = 0,029$) sowie $\frac{p}{q} = -0,312$ ($x/l = 0,97$). Die Spitzen des Verhältnisses $\frac{p}{q}$ sind im Bauteil also doppelt so hoch wie in den Prüfkörpern. Dies ist ein Schwachpunkt der Prüfkörpergeometrien, welcher bereits in Kapitel 5 thematisiert wurde.

Auch für diese Verläufe wird die Methodik angewendet und es ergibt sich nach den Formeln 5.6 und 5.7 für den doppelt gelaschten Prüfkörper ein Wert von $\overline{d_{pq}} = 0,3137$. Für den eingeschlitzten Prüfkörper ergibt sich ein Wert von $\overline{d_{pq}} = 0,2376$, was eine Verbesserung von 0,0761 darstellt.

7.1.4 Beurteilung der Interface-Spannungen

Zusätzlich zu den Spannungsverläufen werden die maximalen Spannungen am Interface betrachtet. Die Klebschichten sind analog zur Vernetzungsmethode von Voith vernetzt. Dies dient der Beurteilung der Klebschicht und der Bewertung der Vergleichbarkeit der beiden Prüfkörper. Abbildung 7.4 zeigt die deviatorischen und hydrostatischen Spannungen der Klebschicht des doppelt gelaschten Prüfkörpers:

Für den doppelt gelaschten Prüfkörper ergibt sich am Interface eine maximale deviatorische Spannung von $q = 16,74$ MPa. Dieser Wert ist nur um einen Bruchteil höher als der maximale deviatorische Spannungswert in der Mitte der Klebschicht von 14,12 MPa. Allerdings entsteht diese Spannung am Interface nicht in dem Bereich, welcher versagt, sondern auf der Oberseite der Klebung in einem

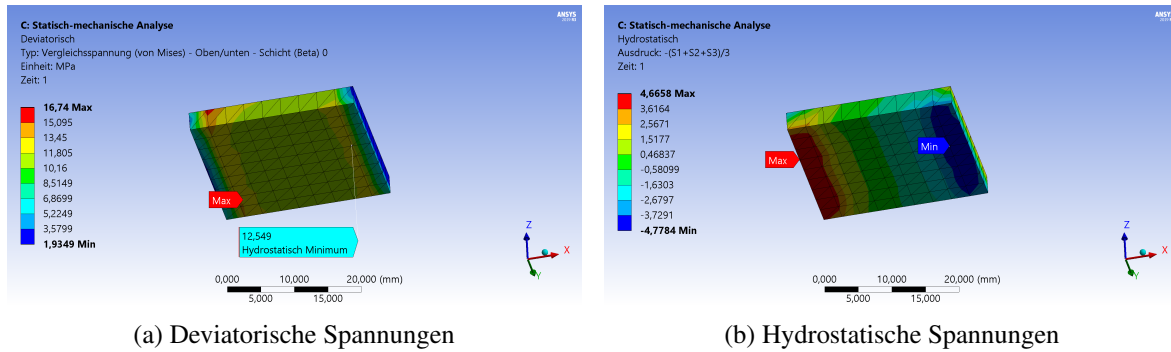


Abbildung 7.4: Spannungen der gesamten Klebschicht, doppelt gelaschter Prüfkörper

Bereich, der auf Druck belastet ist. Deshalb wird auch die deviatorische Spannung am Punkt der minimalen hydrostatischen Spannung ermittelt ($q = 12,549$). Diese liegt unterhalb der maximalen deviatorischen Spannung der Mitte der Klebschicht.

Die hydrostatischen Spannungen ergeben im rechten Bereich der Klebschicht ein Minimum von $p = -4,78$ MPa. Im linken Bereich der Klebschicht ergibt sich ein Maximum von $p = 4,67$ MPa. Diese Spannungsspitzen sind im Druckbereich höher als das Maximum der Klebschicht. Das Minimum am Interface ist um den Faktor 1,77 niedriger als das Minimum in der Mitte der Klebschicht.

Die Spannungen der Klebschicht sind für den eingeschlitzten Prüfkörper in Abbildung 7.5 dargestellt.

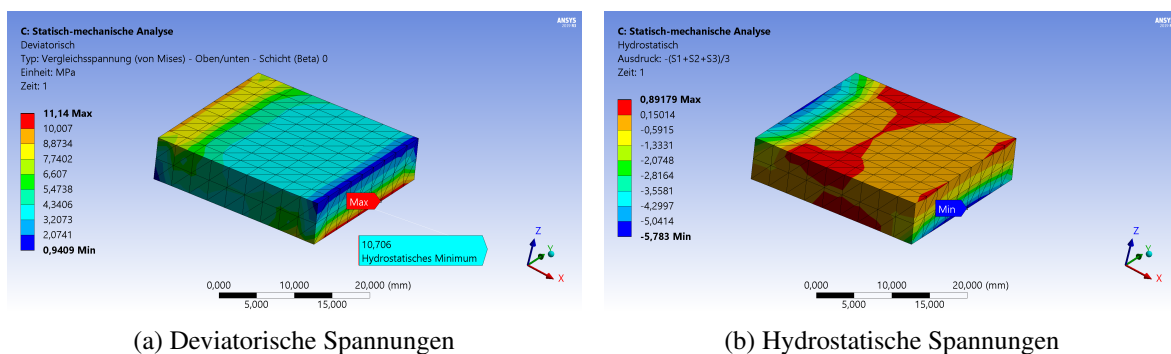


Abbildung 7.5: Spannungen der gesamten Klebschicht, eingeschlitzter Prüfkörper

Für diesen Prüfkörper zeigt sich ein Maximum der deviatorischen Spannungen von $q = 11,14$ MPa im Interfacebereich der Klebschicht. Dies ist auch der Bereich, in welchem die Klebschicht versagt. Analog zum doppelt gelaschten Prüfkörper wurde am Punkt der minimalen hydrostatischen Spannung der deviatorische Spannungswert ermittelt, welcher bei $q = 10,71$ MPa liegt. Diese Spannungsspitzen sind deutlich höher als die in der Mitte der Klebschicht ermittelte Spannungsspitze von $q = 6,23$ MPa. Bei den hydrostatischen Spannungen ergibt sich ein Minimum von $p = -5,73$ MPa am Rand der Klebschicht. Dieser Wert ist 3,6-Mal höher als die minimale hydrostatische Spannungsspitze in der Mitte der Klebschicht. Dies stimmt mit den Erkenntnissen aus Kapitel 4 überein, wonach die Spannungsspitzen des einfach überlappten/ingeschlitzten Prüfkörpers am Interface um ein Vielfaches größer sind als in der Mitte der Klebschicht. Auch die Prüfung bestätigte, dass in diesem Bereich die Span-

nung am höchsten ist, da die Prüfkörper direkt am Interface versagt haben.

Auffällig ist, dass trotz der unterschiedlichen Klebschichtdicken, Prüfkörpergeometrien und Prüfergebnisse die Spannungen im Bereich der minimalen hydrostatischen Spannung ähnliche Werte annehmen. Der doppelt gelaschte Prüfkörper ($q = 12,55$ MPa, $p = -4,78$ MPa) erreicht eine höhere deviatorische Spannung als der eingeschlitzte Prüfkörper ($q = 11,14$ MPa, $p = -5,73$ MPa), aber gleichzeitig eine niedrigere hydrostatische Spannung. Diese Annäherung der Spannungen spricht dafür, dass die Prüfkörper am Interface beim Erreichen einer kritischen Kombination von deviatorischen und hydrostatischen Spannungen versagen.

7.1.5 Fazit

In allen drei Vergleichen konnte eine Verbesserung der Verläufe verzeichnet werden. Die Werte sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst:

Tabelle 7.2: Übereinstimmung der Verläufe

Prüfkörper	$\overline{d_{Dev}}$	$\overline{d_{Hydro}}$	$\overline{d_{pq}}$	$\overline{d_{Ges}}$
Doppelt gelaschter Prüfkörper	0,1682	0,4437	0,3137	0,9256
Eingeschlitzter Prüfkörper	0,1149	0,2691	0,2376	0,6216
Veränderung	0,0533	0,1746	0,0761	0,304

Für die Gesamtabweichung ergibt sich eine Veränderung von $\overline{d_{Ges}} = 0,9256$ (doppelt gelaschter Prüfkörper) auf $\overline{d_{Ges}} = 0,6216$ (eingeschlitzter Prüfkörper) und damit eine Verbesserung um 0,304. Ein Vergleich der beiden Prüfkörper gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen Klebschichtdicken schwierig, da der doppelt gelaschte Prüfkörper nur eine Klebschichtdicke von 3 mm besitzt und der eingeschlitzte Prüfkörper eine Klebschichtdicke von 6 mm. Nach Kapitel 4 führt dies zu niedrigeren Spannungen in der Mitte der dickeren Klebschicht, was auch die Versuchsergebnisse zeigen. Dennoch konnte durch die festgelegte Prüfkörpergeometrie der Spannungsverlauf des Bauteils in der Mitte der Prüfkörper besser abgebildet werden. Es muss dabei allerdings beachtet werden, dass die Ergebnisse der eingeschlitzten Prüfkörper aufgrund der fehlerhaften Fertigung (Abschnitt 6.1.2) beeinflusst werden. Die Ergebnisse sollten deshalb durch eine weitere Prüfreihe überprüft werden.

Wird die Abweichung der deviatorischen Spannungen betrachtet, so zeigt sich, dass eine Abweichung um $d = 0,1$ möglich ist. Dies wurde vom eingeschlitzten Prüfkörper weder für die Abweichungen der hydrostatischen Verläufe, noch für die Abweichung des Verhältnisses von hydrostatischen zu deviatorischen Verläufen erreicht. Die hydrostatischen Verläufe können durch eine Variation der Überlappungslänge verbessert werden, was allerdings zu einer Verschlechterung der deviatorischen Verläufe führen kann. Gleichzeitig bestätigt sich die Beobachtung aus Kapitel 5, wonach das Verhältnis der Spannungen durch die betrachteten Geometrien nur unzureichend abgebildet wird. Deshalb ist eine Betrachtung weiterer Prüfkörpergeometrien mit der erarbeiteten Methodik unerlässlich.

Auch die höheren Interface-Spannungen belegen die Ergebnisse nach Kapitel 4. Allerdings sind die

Unterschiede zwischen der Mitte der Klebschicht und dem Interface geringer. Dies ist auf die grobe Vernetzung und die Verwendung von Shell-Elementen als Fügebauteile zurückzuführen. Auch die höchsten deviatorischen Interface-Spannungen des doppelt gelaschten Prüfkörpers an einem Punkt, welcher auf Druck belastet ist, zeigt, dass die Vernetzung verfeinert werden muss. Die Ergebnisse der Methodik sind aufgrund der Diskretisierung zunächst kritisch zu betrachten.

Weiterhin müssen für eine detailliertere Betrachtung der Prüfkörper die Interface-Spannungen bewertet werden. Die Vernetzung hat auf die Interface-Spannungen einen noch größeren Einfluss als auf die Spannungen in der Mitte der Klebschicht. Deshalb muss die Vernetzung für diese Betrachtung kritisch hinterfragt und beleuchtet werden.

Trotz der beim Ableiten zugrunde gelegten mittleren Spannungen von 8 MPa und der Abweichung des Prüfergebnisses ($\tau_m = 2,18$ MPa) von dieser mittleren Spannung weist das Ergebnis ähnliche Abweichungen auf. Das zeigt, dass die Anwendung der Methodik mit einer festgelegten mittleren Spannung verwendet werden kann. Die Höhe dieser Spannung kann frei gewählt werden und sollte nach Erfahrungswerten ähnlicher Versuche erfolgen.

7.2 Bestimmung der Festigkeit unter Verwendung der Schubspannungshypothese nach Tresca

Zusätzlich zur Auswertung der Spannungsverläufe wird eine Auswertung unter der bei Voith verwendeten Spannungshypothese für Klebschichten durchgeführt. Hierfür wird die in Kapitel 3 vorgestellte Hypothese der maximalen Schubspannungen nach Henri Tresca verwendet. Für diese Spannungshypothese berechnet sich die Festigkeit aus der größten Differenz der maximalen Hauptnormalspannungen:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (7.1)$$

Der Spannungsverlauf der maximalen Schubspannung (τ_{max}) ist in Abbildung 7.6 aufgetragen:

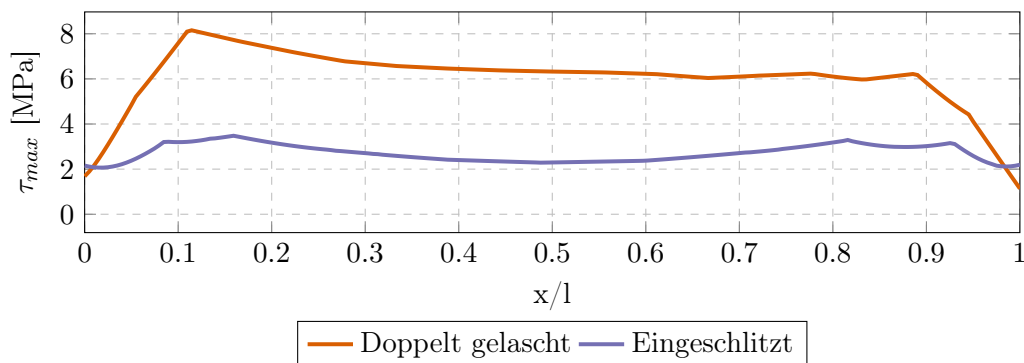


Abbildung 7.6: Verlauf der maximalen Schubspannung τ_{max}

Hierbei zeigt sich für den doppelt gelaschten Prüfkörper, dass im Vergleich zu den 6 MPa mittlerer Festigkeit aus der Prüfung die Spannungen in der Spitze bis zu $\tau_{max} = 8,15$ ($x/l = 0,11$) MPa erreichen, was einer Erhöhung von 35,9% entspricht. Für den eingeschlitzten Prüfkörper ergibt sich durch die Prüfung eine mittlere Festigkeit von 2,18 MPa. Das Maximum des Verlaufs der Prüfkörper in der Mitte der Klebschicht liegt bei $\tau_{max} = 3,48$ MPa ($x/l = 0,16$), was einer Erhöhung von 59,6 % bedeutet. Es wird deutlich dass in der Mitte der Klebschicht die Spannungen erhöht sind. Um die Festigkeiten direkt aus der mittleren Festigkeit der Prüfung zu erfassen, besteht die Möglichkeit darin, über Korrekturfaktoren diese mittlere Festigkeit anzuheben. Die zu Beginn des Kapitels aufgezeigte Problematik der nicht berücksichtigten Spannungsspitzen kann auf diese Weise berücksichtigt werden. Der Vergleich von in der Mitte der Prüfkörper ermittelten Spannungen mit am Interface der Klebung entstehenden Spannungen wird dabei noch nicht berücksichtigt. Dies geschieht im folgenden Abschnitt.

Auswertung am Interface

Auch für die maximale Schubspannung nach Tresca werden die Spannungen der gesamten Klebschicht betrachtet:

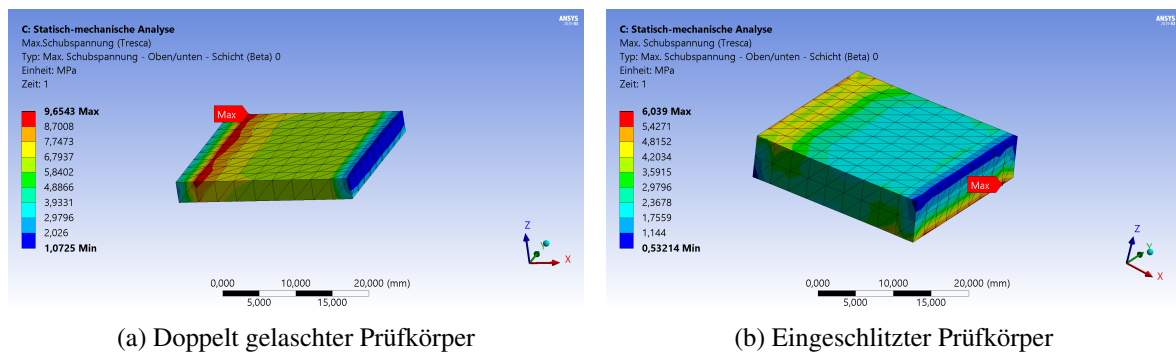


Abbildung 7.7: Maximale Schubspannungen nach Tresca (Schubspannungshypothese) in den Klebschichten

Für den doppelt gelaschten Prüfkörper zeigt sich eine maximale Spannung von $\tau_{max} = 9,654$ MPa. Diese tritt allerdings erneut auf der Oberseite der Klebschicht in einem Bereich auf, welcher nicht für das Versagen der Klebschicht verantwortlich ist. Gleichzeitig ist der Bereich unten rechts (Abbildung 7.7a, hellblau) niedrig belastet, obwohl dort die maximalen Spannungen erreicht werden, was in Kapitel 4 gezeigt wurde. Dass ein Bereich, welcher sich nicht am Rand der Klebschicht befindet, die maximalen Spannungen aufweist, ist auf die grobe Vernetzung zurückzuführen. Dies muss bei der Bewertung beachtet werden, weshalb die Verwendung dieses Wertes als Festigkeit der Klebung nicht geeignet ist.

Für den eingeschlitzten Prüfkörper ergibt sich eine Spannung von $\tau_{max} = 6,039$ MPa. Im Gegensatz zur Spannung des doppelt gelaschten Prüfkörpers ist diese Spannung in dem Bereich zu finden, welcher aufgrund der hohen Spannungen zuerst versagt. Diese Spannung ist um das 2,77-fache höher als

die mittlere Festigkeit und 1,74-fach so hoch wie die Spannungsspitze in der Mitte der Klebschicht. Eine Simulation der Prüfkörper mit einer Bewertung der Klebschichten führt demnach zu höheren Festigkeiten als die mittleren Festigkeiten, wie sie im Zugscherversuch ermittelt werden. Nach Betrachtung der Ergebnisse kann für diesen Klebstoff eine Festigkeit von $\tau_{max} = 6,039$ MPa angenommen werden. Dies ist der Wert, an dem die Klebschicht versagt. Da dieser Wert ohne Abminderungen oder Sicherheiten ermittelt wird, sollte er vor der Verwendung als Design-Festigkeit reduziert werden. Im Zuge einer konservativen Auslegung kann der Maximalwert der Spannungsverläufe in der Mitte der Klebschicht ($\tau_{max} = 3,479$ MPa) als Festigkeit verwendet werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasste sich mit der Untersuchung von Prüfkörpern für Zugscherversuche von Klebschichten. Das Ziel bestand darin, eine Methodik zum Ableiten einer Prüfkörpergeometrie zu erarbeiten. Durch die Anwendung dieser Methodik wurde ein Prüfkörper definiert, welcher von den betrachteten Geometrien am besten in der Lage ist, die Spannungszustände in den Klebschichten von realen Bauteilen abzubilden. Ein solches Vorgehen war bisher nicht bekannt und konnte erfolgreich implementiert werden.

In einer Literaturrecherche wurden die verschiedenen Möglichkeiten zur Prüfung der Zugscherfestigkeit aufgezeigt. Prüfkörpergeometrien, wie zum Beispiel der einfach überlappte Prüfkörper, sind in einer Vielzahl von Normen definiert. Aber auch weitere Prüfkörper wie der zweifach überlappte Prüfkörper oder der Arcan-Versuch wurden vorgestellt. Prüfkörpergeometrien wie der Thick Adherend Shear Test (TAST) oder der Iosipescu-Prüfkörper wurden aufgrund von Ähnlichkeiten zu anderen Prüfkörpern nicht weiter untersucht.

Nach der Literaturrecherche wurde die Klebschicht eines Frontends von Voith untersucht. Eine Schwierigkeit der Spannungsanalyse des Bauteils bestand darin, die Orientierung der Elemente der Klebschicht zu bestimmen. Deshalb wurde ein Ansatz auf Basis von deviatorischen und hydrostatischen Spannungen verwendet, welcher unabhängig von der Lage des Koordinatensystems die Spannungszustände beschreibt. Auf Basis dieser Spannungen wurden die Klebschichten analysiert und ein Bereich ausgewählt, welcher im Vergleich zur Klebschicht eine Spannungsüberhöhung aufweist. Für diesen Bereich wurden die deviatorischen und hydrostatischen Spannungsverläufe in der Mitte der Klebschicht ermittelt, welche als Grundlage für das Ableiten der Prüfkörpergeometrie dienen. Neben den Spannungsverläufen wurde auch die Modellierung des betrachteten Bereichs betrachtet und dargestellt, welche für das Ableiten der Prüfkörpergeometrie benötigt wird.

Anschließend folgte die Spannungsanalyse der Prüfkörper. Hierzu wurden FE-Modelle des einfach überlappten, zweifach überlappten und biegebehinderten Prüfkörpers erstellt und analysiert. Diese Modelle mussten eine feine Vernetzung aufweisen, da neben den Spannungen in der Mitte der Prüfkörper auch die Spannungen am Interface untersucht wurden. Dabei zeigte sich, dass die Auswertung der Prüfkörper über eine gemittelte Festigkeit, wie es in den meisten Normen definiert ist, den komplexen Spannungszustand nur unzureichend berücksichtigt. Ziel dieser Spannungsanalyse war

es, Parameter zu identifizieren, die bei einer Veränderung den Spannungszustand in der Mitte der Klebschicht tendenziell gleich beeinflussen wie den Spannungszustand am Interface der Klebschicht. Dies beruht auf der Hypothese, dass besonders bei dicken Klebschichten, wie sie bei Voith zum Einsatz kommen, die Klebschichten am Interface versagen. Dazu wurden die geometrischen Parameter Klebschichtdicke, Überlappungslänge und Fügeteildicke variiert und die Spannungen am Interface mit den Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht verglichen. Hierbei wurden die Überlappungslänge und die Fügeteildicke als die Parameter definiert, die variiert werden können, um einen Spannungszustand abzubilden.

Daraufhin wurde eine Methodik erarbeitet und auf fünf verschiedene Prüfkörpergeometrien angewendet (einfach überlappt, eingeschlitzt, zweifach überlappt, doppelt gelascht und biegebehindert). Hierbei wurden definierte Permutationen von Überlappungslänge und Fügeteildicke für die verschiedenen Prüfkörpergeometrien berechnet und mit den Bauteilverläufen verglichen. Die Prüfkörper wurden dabei wie das Bauteil diskretisiert und modelliert. Dies beinhaltete dieselben Elementarten, Elementkantenlängen und Parameter des Kontaktalgorithmus. Auf Basis dieser Simulationen wurden die deviatorischen und hydrostatischen Spannungsverläufe sowie das Verhältnis der beiden Spannungsanteile zueinander mit den Verläufen des Bauteils verglichen. Es wurde kein Versagenskriterium verwendet und die deviatorischen und hydrostatischen Verläufe wurden auf ihr jeweiliges Maximum normiert, um so eine Aussage über die Verläufe treffen zu können. Durch die Anwendung der Methodik wurde ein eingeschlitzter Prüfkörper mit einer Klebschichtdicke von 6 mm (Dicke der Klebschicht im Bauteil), einer Überlappungslänge von 25 mm und einer Fügeteildicke von 4 mm ausgewählt, da dieser von den betrachteten Prüfkörpergeometrien die Spannungen am besten abbildete. Der hydrostatische Verlauf hätte durch eine Anpassung der Prüfkörpergeometrie vermutlich besser abgebildet werden können; dieser Iterationsschritt wurde jedoch nicht durchgeführt. Auch beim Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungen zeigte sich, dass kein Prüfkörper den Bauteilverlauf adäquat abbilden kann. Somit ergab sich hier ein deutlicher Schwachpunkt der betrachteten Geometrien.

Nach dem Ableiten der Prüfkörpergeometrie wurden zwei Prüfkörper gefertigt: der aktuell bei Voith verwendete, doppelt gelaschte Prüfkörper (Klebschichtdicke: 3 mm, Überlappungslänge: 25 mm, Fügeteildicke: 4 mm) sowie die definierte Prüfkörpergeometrie. Diese Prüfkörper wurden anschließend getestet und die Versagenslasten als Grundlage für das abschließende Kapitel zur Auswertung der Prüfkörper verwendet. Alle Prüfkörper versagten dabei im Bereich des Interface, was die Hypothese der Spannungsspitzen im Randbereich bestätigt. Beim Fertigen der eingeschlitzten Prüfkörper wurde jedoch die erste Faserlage des Fügeteils angeschlitzt. Die Ergebnisse müssen deshalb durch eine weitere Prüfreihe bestätigt werden, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden konnte.

Die Auswertung der Prüfkörper mit den Versagenslasten zeigte, dass der eingeschlitzte Prüfkörper den Spannungsverlauf des Bauteils besser abbilden konnte als der doppelt gelaschte Prüfkörper. Außerdem zeigte sich, dass im Randbereich die Spannungen für beide Prüfkörper höher waren als in der Mitte der Klebschicht. Auffällig war, dass im Punkt der maximalen hydrostatischen Spannungen

beide Prüfkörper ähnlich hohe deviatorische Spannungen aufwiesen. Diese Beobachtung kann für eine zukünftige Betrachtung der Klebschichten verwendet werden. Abschließend wurde die Festigkeit unter der bei Voith verwendeten Schubspannungshypothese bestimmt. Hierfür zeigte sich, dass der doppelt gelaschte Prüfkörper eine Spannungsspitze in einem Bereich aufwies, der nach den Erkenntnissen der Spannungsanalyse der Prüfkörper nicht hochbelastet ist und in welchem die Klebschichten auch nicht versagt haben. Es zeigt sich also, dass die Vernetzung der Klebschicht einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Ergebnisse hat, was durch eine gesonderte Betrachtung erfolgen muss. Für den eingeschlitzten Prüfkörper ergaben sich im Vergleich zur gemittelten Festigkeit höhere Werte sowohl in der Mitte der Klebschicht als auch am Interface, wo die Spannung bis zu 177% der gemittelten Festigkeit besitzt. Eine Verwendung von Korrekturfaktoren für die mittlere Festigkeit erscheint hierbei sinnvoll und vertretbar.

Ausblick

Die Anwendung der erarbeiteten Methodik ergab eine Prüfkörpergeometrie, welche von den betrachteten Prüfkörpergeometrien den Spannungszustand am besten abbildete. Allerdings zeigte sich, dass die Verläufe der hydrostatischen Spannungen deutliche Unterschiede aufwiesen und somit an dieser Stelle Verbesserungspotenzial besteht. Diese Verbesserung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, sollte aber in einer weiterführenden Arbeit betrachtet werden. Gleichzeitig wurde deutlich, dass alle Prüfkörper das Verhältnis von deviatorischen zu hydrostatischen Spannungen nur unzureichend abbildeten. Die erarbeitete Methodik sollte auf weitere Prüfkörper (zum Beispiel Arcan-Versuch) angewendet werden. Dabei sollte das Verhältnis der Spannungsanteile im Vordergrund stehen.

Die Methodik wurde für die Mitte der Klebschicht verwendet, welches allerdings nicht der Bereich ist, in welchem die Klebschicht versagt. Deshalb sollte diese Methodik auch auf Interface-Spannungen angewendet werden. Das Problem hierbei ist, dass in diesem Bereich der Klebschicht die Spannungen weitaus stärker von der Modellierung beeinflusst werden als in der Mitte der Klebschicht. Sollten die Interface-Spannungen als Auslegungsverläufe verwendet werden, so muss die Modellierung einer genaueren Betrachtung unterzogen werden. Hierzu zählen die Elementarten, die Netzfeinheit und besonders die Formulierung des Kontaktalgorithmus.

Eine weitere Optimierung der Methodik kann erreicht werden, indem die Methodik nur auf einen bestimmten, hochbelasteten Bereich der Überlappungslänge angewendet wird. Dies verbessert beispielsweise das Ergebnis der zweifach überlappten/doppelt gelaschten Prüfkörper, da die Druckbereiche zu einer größeren Abweichung sowohl bei den hydrostatischen Verläufen als auch beim Verhältnis von hydrostatischen zu deviatorischen Spannungen führte. Auch für weitere betrachtete Klebschichtbereiche des Bauteils zeigte sich, dass nur eine Seite der Überlappung hochbelastet war, weshalb dieser Ansatz verfolgt werden sollte.

Die Übereinstimmung der deviatorischen und hydrostatischen Spannungen zeigt einen Vorteil im Vergleich zur Verwendung des Spannungskriteriums nach Tresca. Bei einer Anwendung dieser Schubspannungshypothese wird zwischen Druck- und Zug-Schubspannungsbereichen nicht unterschieden, was jedoch zu einer höheren Belastbarkeit der Druckschubspannungsbereiche der Klebschichten führt. Die Verwendung eines Versagenskriteriums, wie zum Beispiel des Drucker-Prager-Kriteriums, erscheint hierbei sinnvoll.

Die Untersuchung der Spannungsverläufe zeigte, dass für kleine Klebschichtdicken die Spannungsspitzen in der Mitte der Klebschicht näher an den Interface-Spannungen sind als bei dickeren Klebschichten. In Kombination mit kurzen Überlappungslängen und dicken Füge­teilen kann eine hohe mittlere Festigkeit erreicht werden, welche näher an den Spannungen am Interface ist. Allerdings werden durch eine Anpassung der Klebschichtdicke der Spannungszustand, die Fertigung sowie das Verformungsverhalten der Klebschicht erheblich verändert, weshalb dies nicht empfohlen wird.

Literaturverzeichnis

- [1] *Eigene Recherche und Erkenntnisse einer wissenschaftlichen Hilfskraft (Betreuer: Völkerink, O.)*
- [2] ADAMS, R. D. UND GRANT, L. D. R.: Adhesive Layer Thickness as a Variable in the Strength of Bonded Joints. In: *Proceedings 16th Annual Meeting of the Adhesion Society*, 1993, S. 91–93
- [3] ADAMS, R. D. UND HARRIS, J. A.: The influence of local geometry on the strength of adhesive joints. In: *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1987, S. 69–80
- [4] ADAMS, R. D. UND MALLICK, V.: A Method for the Stress Analysis of Lap Joints. In: *The Journal of Adhesion*, 1992, S. 199–217
- [5] ADAMS, R. D. UND PEPPIATT, N. A.: Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. In: *Journal of Strain Analysis*, 1974, S. 185–196
- [6] ASD-STAN PREN 6060:1995-12-15): *Faserverstärkte Kunststoffe - Prüfverfahren - Bestimmung der Bindefestigkeit von einschnittig überlappten Klebungen im Zugversuch*
- [7] ASHCROFT, I. A. UND MUBASHAR, A.: Numerical Approach: Finite Element Analysis. In: *Handbook of Adhesion Technology*. Springer Verlag, 2017
- [8] ASTM D1002 - 10(2019): *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*
- [9] ASTM D2295 - 96(2016): *Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading at Elevated Temperatures (Metal-to-Metal)*
- [10] ASTM D2339 - 20: *Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Two-Ply Wood Construction in Shear by Tension Loading*
- [11] ASTM D2557 - 98(2017): *Standard Test Method for Tensile-Shear Strength of Adhesives in the Subzero Temperature Range from -267.8 to -55°C (-450 to -67°F)*
- [12] ASTM D3163 - 01(2014): *Standard Test Method for Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joints in Shear by Tension Loading*
- [13] ASTM D3165 - 07(2014): *Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies*
- [14] ASTM D3528 - 96(2016): *Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading*
- [15] ASTM D3983 - 98(2019): *Standard Test Method for Measuring Strength and Shear Modulus of Nonrigid Adhesives by the Thick-Adherend Tensile-Lap Specimen*

- [16] ASTM D4501 - 01(2014): *Standard Test Method for Shear Strength of Adhesive Bonds Between Rigid Substrates by the Block-Shear Method*
- [17] ASTM D4562 - 01(2019): *Standard Test Method for Shear Strength of Adhesives Using Pin-and-Collar Specimen*
- [18] ASTM D4896 - 01(2016): *Standard Guide for Use of Adhesive-Bonded Single Lap-Joint Specimen Test Results*
- [19] ASTM D5656 - 10(2017): *Standard Test Method for Thick-Adherend Metal Lap-Shear Joints for Determination of the Stress-Strain Behavior of Adhesives in Shear by Tension Loading*
- [20] ASTM D5868 - 01(2014): *Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding*
- [21] ASTM D905 - 08(2013): *Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading*
- [22] ASTM D906 - 20: *Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Plywood Type Construction in Shear by Tension Loading*
- [23] ASTM E229-97: *Standard Test Method for Shear Strength and Shear Modulus of Structural Adhesives*
- [24] BIGWOOD, D. A. UND CROCOMBE, A. D.: A Method for the Stress Analysis of Lap Joints. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1989, S. 229–242
- [25] BROUGHTON, W. R. UND HINOPOULOS, G.: Evaluation of the Single-Lap Joint Using Finite Element Analysis / Centre for Materials Measurement and Technology National Physical Laboratory Teddington. 1999 (NPL Report CMMT(A) 206). – Technical report
- [26] COGNARD, J. Y.; DAVIES, P.; GINESTE, B. UND SOHIER, L.: Development of an improved adhesive test method for composite assembly design. In: *Composites Science and Technology*, 2005, S. 359–368
- [27] CRÉAC’HCADEC, R.; SOHIER, L.; CELLARD, C. UND GINESTE, B.: A stress concentration-free bonded arcan tensile compression shear test specimen for the evaluation of adhesive mechanical response. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015, S. 81–92
- [28] DA SILVA, L. F. M.; DAS NEVES, P. J. C.; ADAMS, R.D. UND SPELT, J.K.: Analytical models of adhesively bonded joints - Part I: Literature survey. In: *International Journal of Adhesion Adhesives*, 2009, S. 319–330
- [29] DA SILVA, L. F. M.; DAS NEVES, P. J. C.; ADAMS, R.D. UND SPELT, J.K.: Analytical models of adhesively bonded joints - Part II: Comparative study. In: *International Journal of Adhesion Adhesives*, 2009, S. 331–341
- [30] DA SILVA, L. F. M.; DE FIGUEIREDO, M. A. V.; DE MOURA, M. UND CHOUSAL, J. A. G.: Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength. In: *The Journal of Adhesion*, 2006, S. 1091–1115
- [31] DA SILVA, L. F. M.; DILLARD, D. A.; BAMBER, B. UND ADAMS, R. D.: *Testing Adhesive Joints, Best Practices*. Wiley-VCH Verlag, 2012

- [32] DA SILVA, L. F. M.; MARQUES, E. A. S. UND CAMPILHO, R. D. S. G.: Design Rules and Methods to Improve Joint Strength. In: *Handbook of Adhesion Technology*. Springer Verlag, 2017
- [33] DA SILVA, L. F. M. UND BANEJA, M. D.: Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2009, S. 1–18
- [34] DA SILVA, L. F. M. UND CAMPILHO, R. D. S. G.: *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*. Springer Verlag, 2011. – ISBN 978–3–642–23607–5
- [35] DEAN, G. D.; READ, B.E. UND DUNCAN, B.C.: An Evaluation of Yield Criteria for Adhesives for Finite Element Analysis / National Physical Laboratory. 1999 (NPL Report CMMT(A)117). – Technical report
- [36] DILGER, PROF. DR.-ING. K.: *Skript Fügetechnik, Kapitel 7 Kleben*. 2019
- [37] DIN 6701:2015-12: *Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen*
- [38] DIN EN 1465:2009: *Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungskle-
bungen*
- [39] DIN EN 14869-2:2011-07: *Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller
Klebung - Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügeile*
- [40] DIN EN 15337:2007-11: *Klebstoffe - Bestimmung der Scherfestigkeit von anaeroben Kleb-
stoffen unter Verwendung von Bolzen-Hülse-Probekörpern*
- [41] DIN EN 2243-1:2005: *Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 1: Bestim-
mung der Längszugscherfestigkeit*
- [42] DIN EN 2243-1:2007-04: *Luft- und Raumfahrt ? Nichtmetallische Werkstoffe ? Strukturel-
le Klebstoffsysteme ? Prüfverfahren ? Teil 1: Bestimmung der Bindefestigkeit von einschnittig
überlappten Klebungen im Zugversuch*
- [43] DIN EN 2243-6:2006-07: *Luft- und Raumfahrt - Nichtmetallische Werkstoffe - Strukturelle
Klebstoffsysteme - Prüfverfahren - Teil 6: Bestimmung der Schubspannung und Gleitung*
- [44] EBNESAJJAD, PHD S. UND LANDROCK, A. H.: *Adhesives Technology Handbook*. William
Andrew, 2015. – ISBN 978–0–323–35595–7
- [45] GLEICH, D. M.: *Stress Analysis of Structural Bonded Joints*, TU Delft, Dissertation, 2002
- [46] GLEICH, D. M.; VAN TOOREN, M. J. L. UND BEUKERS, A.: Analysis and evaluation of bond-
line thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. In: *Journal of Adhesion
Science and Technology*, 2001, S. 1091–1101
- [47] GOLAND, M. UND REISSNER, E.: The stresses in cemented joints. In: *J. Appl. Mech.*, 1944,
S. A17–A27
- [48] HABENICHT, G. : *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Springer Verlag, 2006. –
ISBN 978–3–540–26273–2
- [49] HABENICHT, G. : *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei*. Springer Verlag, 2016. – ISBN 978–3–
658–14695–5

- [50] HART-SMITH, L. J.: Adhesive-bonded double lap joints / NASA. 1973 (CR-112235). – Technical report
- [51] HART-SMITH, L. J.: Adhesive-bonded single lap joints / NASA. 1973 (CR-112236). – Technical report
- [52] HER, S.-C. UND CHAN, C.-F.: Interfacial Stress Analysis of Adhesively Bonded Lap Joint. In: *Journal of Materials*, 2019
- [53] HÜHNE, C.; NICKEL, J.; FISCHER, F.; FRIEDRICH, M.; KÖKE, H.; KÖNIG, J.; KOPP, G. UND WOLFF, J.: *Projektstudie: Einsatz von CFK-Leichtbau-Faserverbund-Technologien im Schienenfahrzeugbau*. Druck- und Verlagshaus Meinders und Elstermann GmbH, 2016
- [54] INTERNETQUELLE: *abgerufen am 05.08.2020*. https://www.compositesworld.com/cdn/cms/0510_HPC_TT1.jpg
- [55] INTERNETQUELLE: *abgerufen am 17.06.2020*. https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html
- [56] INTERNETQUELLE: *abgerufen am 17.06.2020*. https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html
- [57] INTERNETQUELLE: *abgerufen am 17.06.2020*. https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID187.html
- [58] INTERNETQUELLE: *abgerufen am 17.06.2020*. https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID185.html
- [59] IOSIPESCU, N.: New accurate procedure for single shear testing of metals. In: *Journal of Materials*, 1967, S. 537–566
- [60] JARRY, E. UND SHENOI, R. A.: Performance of butt strap joints for marine applications. In: *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2006, S. 162–176
- [61] KEUNTJE, J.: *Auslegung geschweißter Längsnähte in Flugzeugrümpfen aus kohlenstofffaserverstärkten Thermoplasten mithilfe analytischer und numerischer Methoden*, TU Braunschweig, Masterarbeit, 2020
- [62] KIENZLER, R. UND SCHRÖDER, S.: *Einführung in die höhere Festigkeitslehre*. Springer-Verlag, 2019
- [63] KREUZER, R. UND ROMANOS, G.: Formed-In-Place Gaskets in Powertrain Applications - Experimental and Numerical Evaluation Under Service Conditions / SAE, Henkel KGaA. 2006 (2006-01-3353). – Technical report
- [64] LIDON, J.; PEREZ, B.; MARTINEZ, M. A. UND MADRID, M.: Calculation of the strength of cylindrical assemblies with an anaerobic adhesive. In: *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2005, S. 41–56
- [65] LOEBEL, T.: *The Hybrid Bondline: A Novel Disbond-Stopping Design for Adhesively Bonded Composite Joints*, TU Braunschweig, Dissertation, 2016
- [66] LÄPPLE, V.: *Einführung in die Festigkeitslehre*. Springer-Verlag, 2016

- [67] MAHNKEN, R. UND SCHLIMMER, M.: Simulation of strength difference in elasto-plasticity for adhesive materials. In: *International journal for numerical methods in engineering*, 2005, S. 1461–1477
- [68] MARTINEZ, M.A.; VELASCO, F.; ABENOJAR, J.; PANTOJA, M. UND DEL REAL, J.C.: Analytical solution to calculate the stress distribution in pin-and-collar samples bonded with anaerobic adhesives. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008, S. 405–410
- [69] MATTING, DR.-ING. HABIL. A.: *Metallkleben*. Springer Verlag, 1969. – ISBN 978–3–642–92983–0
- [70] MÜLLER, G.: *Der Verformungs- und Bruchvorgang an Metallklebverbindungen verschiedener Werkstoffe bei ein- und mehrachsiger Belastung*, TH Berlin, Dissertation, 1959
- [71] OJALVO, I. U. UND EIDINOFF, H. L.: Bond Thickness Effects upon Stresses in Single-Lap Adhesive Joints. In: *AIAA Journal*, 1978, S. 204–211
- [72] RASCHE, M. : *Handbuch Klebtechnik*. Hanser Verlag, 2012. – ISBN 978–3–446–42402–9, 978–3–446–43198–0
- [73] SANCAKTAR, E. UND NARAYAN, K.: Substrate volume and stress gradient concepts in mechanical adhesion: analysis of single straight sections. In: *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1999, S. 237–271
- [74] SCHÜRMAN, H. : *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer Verlag, 2007. – ISBN 978–3–540–72189–5
- [75] SYN, C. ; GIL, S. ; YOON, J. UND KIM, M.: Lap shear strength of adhesively bonded composites. In: *18th International conference on composite materials*, 2011
- [76] TOMBLIN, J.; SENEVIRATNE, W.; HARTE, P. UND YANG, C.: Characterization of Bondline Thickness Effects in Adhesive Joints. In: *Journal of Composites Technology and Research*, 2002, S. 332–344
- [77] TSAI, M. Y. UND MORTON, J.: The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints. In: *Composite Structures*, 1995, S. 123–131
- [78] TSAI, M. Y. UND MORTON, J.: An investigation into the stresses in double-lap adhesive joints with laminated composite adherends. In: *International Journal of Solids and Structures*, 2010, S. 3317–3325
- [79] VÖLKERINK, O.; KOSMANN, J.; SCHOLLERER, M.J.; HOLZHÜTER, D. UND HÜHNE, C.: Strength prediction of adhesively bonded single lap joints with the eXtended Finite Element Method. In: *The Journal of Adhesion*, 2019, S. 474–494
- [80] VOITH GROUP: *Verbinden und Schützen Kupplungs- und Frontendsysteme, abgerufen: 14.04.2020*. <https://d2euiryrvxi8z1.cloudfront.net/asset/445934742530/fe0db983ce2e5ecd02cfe9070bc7b99e>
- [81] VOLKERSEN, O.: Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. In: *Luftfahrtforschung*, 1938, S. 41–47
- [82] WAGNER, M.: *Lineare und nichtlineare FEM*. Springer Verlag, 2019. – ISBN 978–3–658–25052–2

- [83] WANG, T. T.; RYAN, F. W. UND SCHONHORN, H.: Effect of Bonding Defects on Shear Strength in Tension of Lap Joints Having Brittle Adhesives. In: *Journal of applied polymer science*, 1972, S. 1901–1909
- [84] WEISSGRAEBER, P.: *Neue Ansätze zur Analyse der Lastübertragung und Initiierung finiter Risse in Klebverbindungen*, TU Darmstadt, Dissertation, 2014
- [85] WOOLEY, G. R. UND CARVER, D. R.: Stress Concentration Factors for Bonded Lap Joints. In: *J. Aircraft*, 1971, S. 817–820
- [86] WU, G. UND CROCOMBE, A. D.: Simplified finite element modelling of strutcutral adhesive joints. In: *International Journal of Computers and Structure*
- [87] YANG, C. ; TOMBLIN, J. S. UND GAUN, Z.: Analytical Modeling of ASTM Lap Shear Adhesive Specimens / Departement of Mechanical Engineering, Wichita State University. 2003 (DOT/FAA/AR-02/130). – Technical report

A Anhang

A.1 Ergänzende Spannungsverläufe der Bauteile

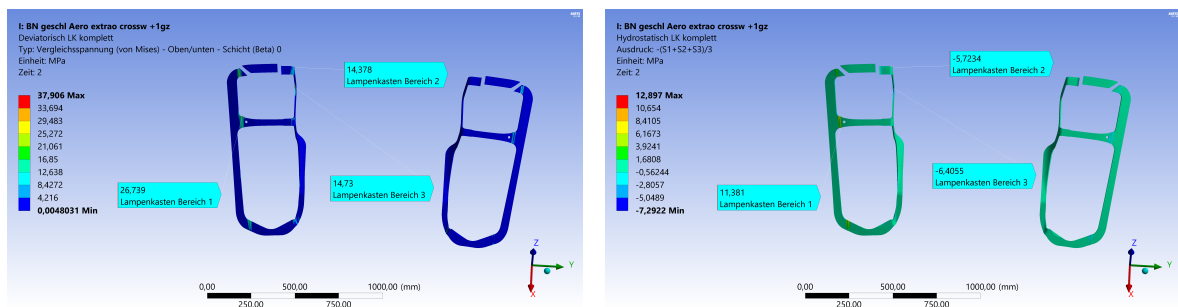


Abbildung A.1: Deviatorischer (links) und hydrostatischer (rechts) Spannungszustand im Bereich Lampenkasten

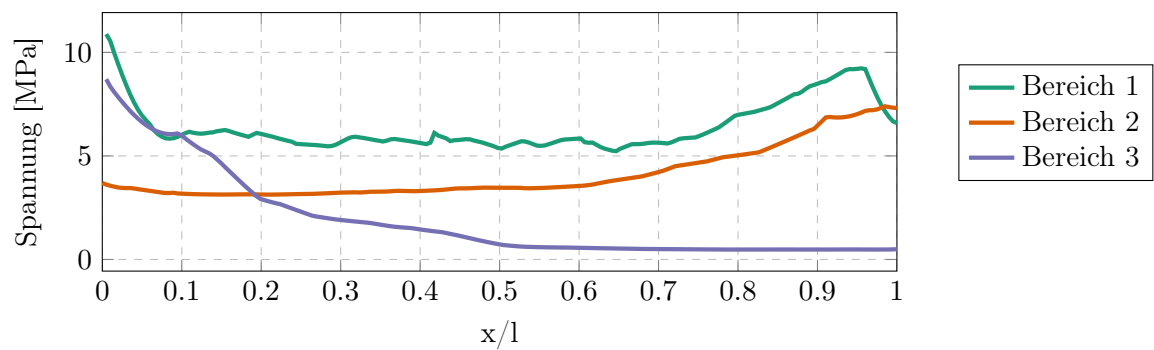


Abbildung A.2: Deviatorischer Spannungszustand innerhalb des Bereichs Lampenkasten

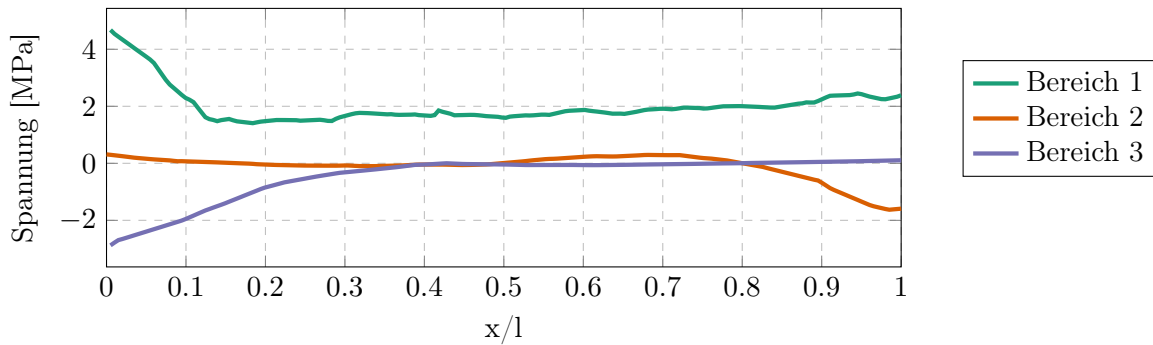


Abbildung A.3: Hydrostatischer Spannungszustand innerhalb des Bereichs Lampenkasten

Tabelle A.1: Lampenkasten 1-3 Fügegliedvernetzung

	Lampenaufnahme (unteres Fügeglied)		Bugring (oberes Fügeglied)	
	Elementkantenlänge	Elementhöhe	Elementkantenlänge	Elementhöhe
Bereich 1	5 mm	2 mm	3 mm	3 mm
Bereich 2	7,5 mm	3 mm	7,5 mm	3 mm
Bereich 3	7,5 mm	3 mm	7,5 mm	3 mm

Tabelle A.2: Geometrische Abmessungen der Klebschichten im Bereich Lampenkasten

	Klebschichtdicke d_K	Überlappungslänge $l_{\bar{U}}$
Bereich 1	6 mm	62,32 mm
Bereich 2	7,6 mm	42,14 mm
Bereich 3	6 mm	32,9 mm

Tabelle A.3: Vernetzung der Klebschichten im Bereich Lampenkasten

	Elementart	Elementkantenlänge	Elementhöhe	Anzahl Elemente über $l_{\bar{U}}$	Anzahl Elemente über d_K
Bereich 1	Solid 187	3 mm	3 mm	20	2
Bereich 2	Solid 187	3 mm	2,53 mm	14	3
Bereich 3	Solid 187	3 mm	3 mm	11	2

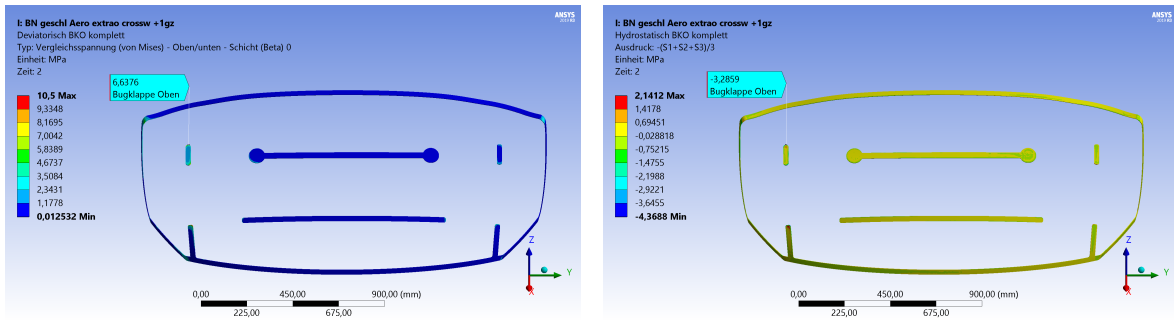


Abbildung A.4: Deviatorischer (links) und hydrostatischer (rechts) Spannungszustand im Bereich Bugklappe Oben

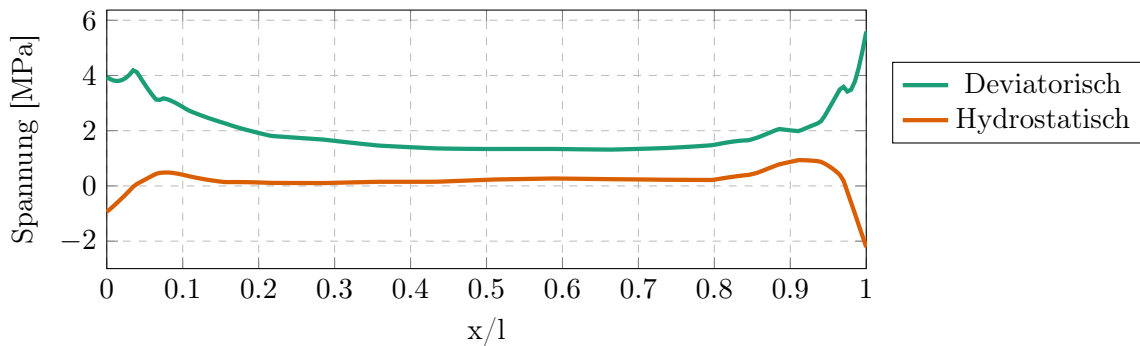


Abbildung A.5: Spannungsverläufe Bugklappe Oben

Tabelle A.4: Bugklappe Oben Fügeteilvernetzung

Innenschale		Außenschale	
Elementkantenlänge	Elementhöhe	Elementkantenlänge	Elementhöhe
8 mm	3 mm	8 mm	4 mm

Tabelle A.5: Geometrische Abmessung und Vernetzung der Klebschicht Bugklappe Oben

Parameter	Wert
Klebschichtdicke d_K	3 mm
Überlappungslänge $l_{\ddot{U}}$	114,69 mm
Elementart	Solid 186
Elementkantenlänge	7,5 mm
Elementhöhe	3 mm
Anzahl Elemente über $l_{\ddot{U}}$	15
Anzahl Elemente über d_K	1

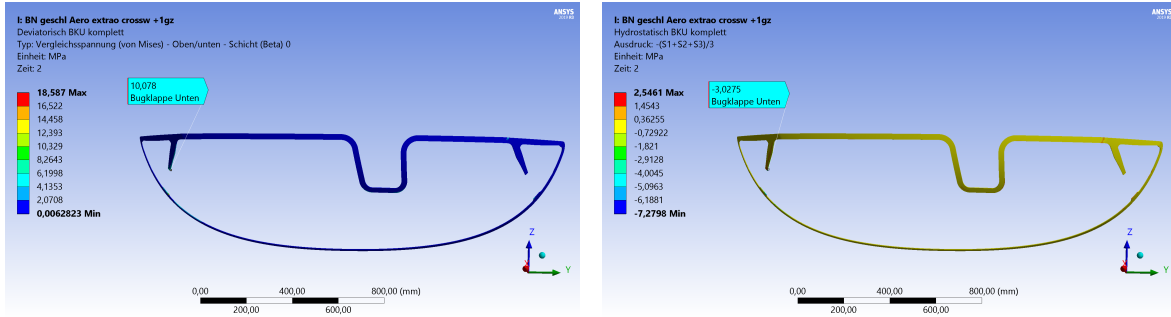


Abbildung A.6: Deviatorischer (links) und hydrostatischer (rechts) Spannungszustand im Bereich Bugklappe Unten

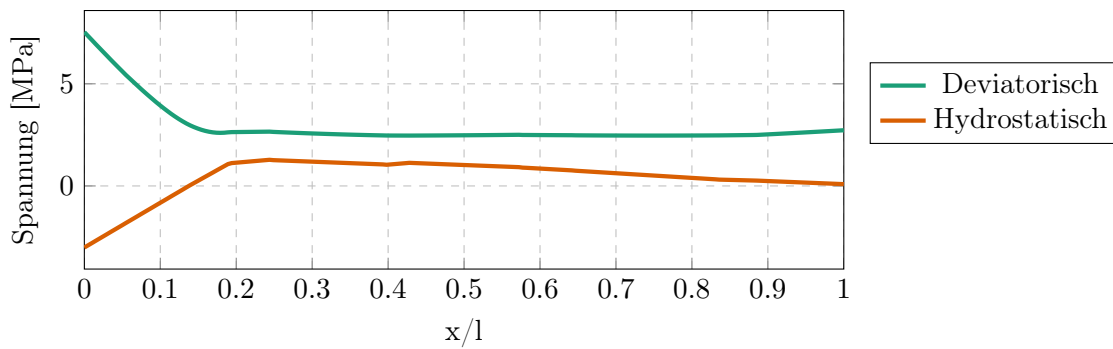


Abbildung A.7: Spannungsverläufe Bugklappe Unten

Tabelle A.6: Bugklappe Unten Fügegliedvernetzung

Innenschale		Außenschale	
Elementkantenlänge	Elementhöhe	Elementkantenlänge	Elementhöhe
8 mm	2 mm	8 mm	4 mm

Tabelle A.7: Geometrische Abmessung und Vernetzung der Klebschicht Bugklappe Unten

Parameter	Wert
Klebschichtdicke d_K	3 mm
Überlappungslänge $l_{\ddot{U}}$	17,13 mm
Elementart	Solid 187
Elementkantenlänge	7,5 mm
Elementhöhe	3 mm
Anzahl Elemente über $l_{\ddot{U}}$	3
Anzahl Elemente über d_K	1

A.2 Netzkonvergenzstudie

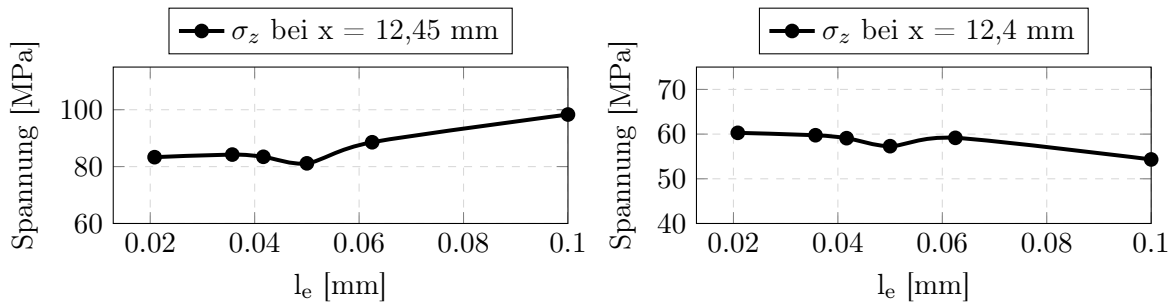


Abbildung A.8: Netzkonvergenzstudie, einfach überlappte Probe, $d_K=0,5$ mm

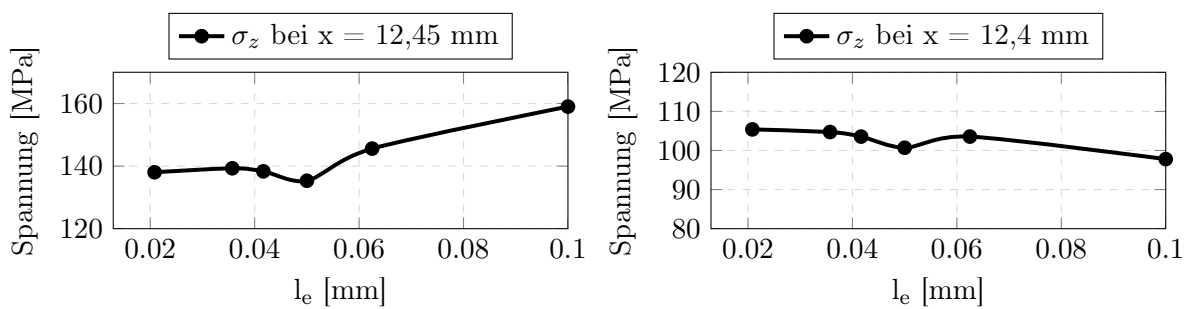


Abbildung A.9: Netzkonvergenzstudie, einfach überlappte Probe, $d_K=5$ mm

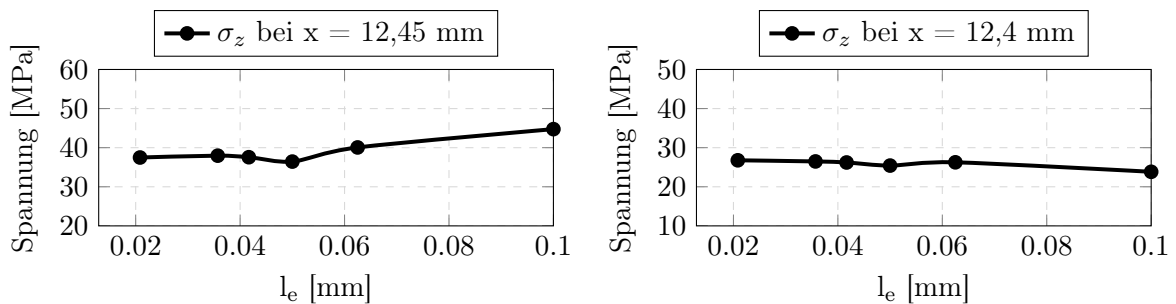


Abbildung A.10: Netzkonvergenzstudie, zweifach überlappte Probe, $d_K=0,5$ mm

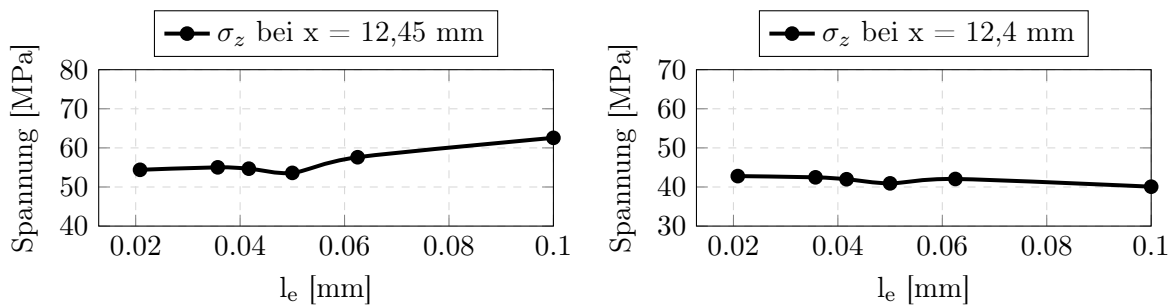


Abbildung A.11: Netzkonvergenzstudie, zweifach überlappte Probe, $d_K=5$ mm

A.3 Ergänzende Spannungsverläufe der Prüfkörpergeometrien

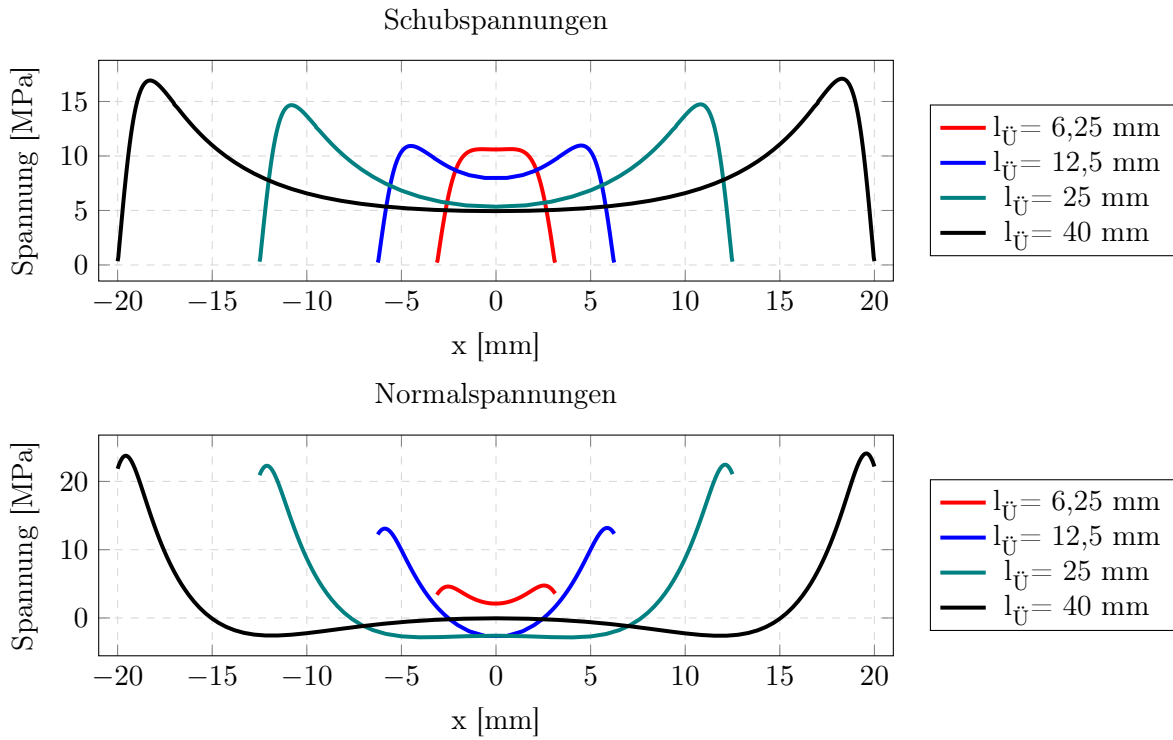


Abbildung A.12: Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\ddot{U}}$, Mitte der Klebschicht (CD), einfach überlappter Prüfkörper

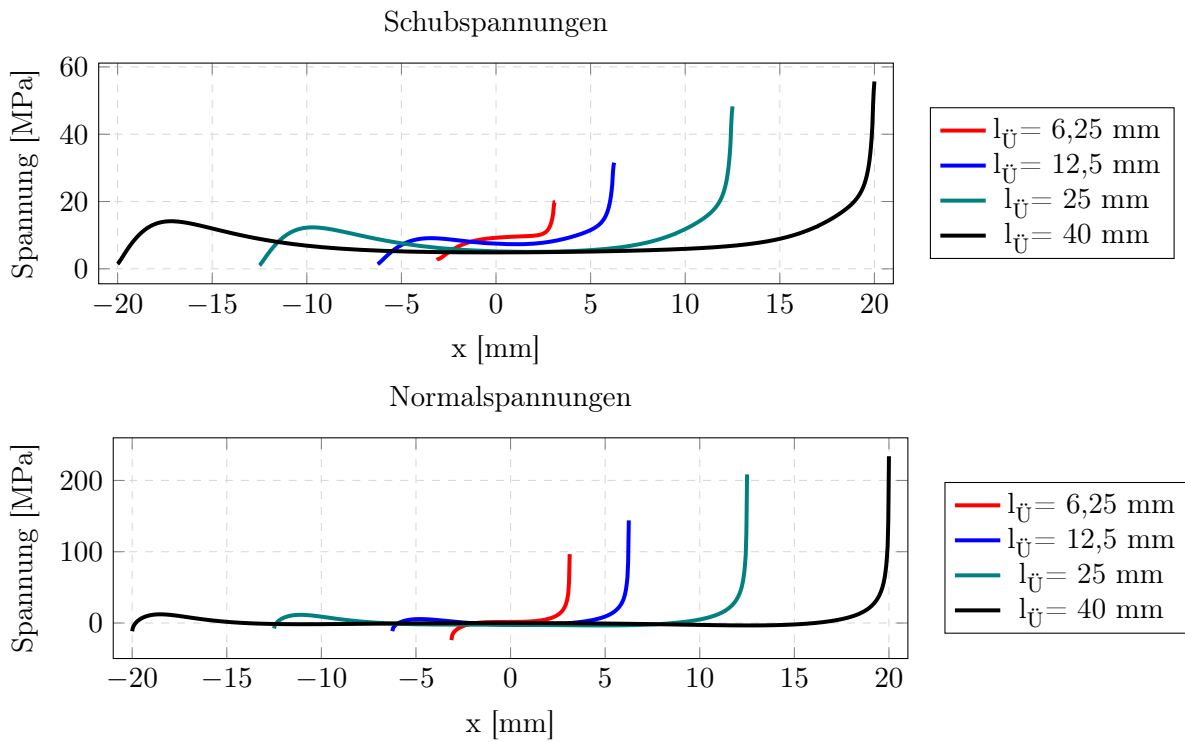


Abbildung A.13: Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\ddot{U}}$, Grenzschicht der Klebschicht (EF), einfach überlappter Prüfkörper

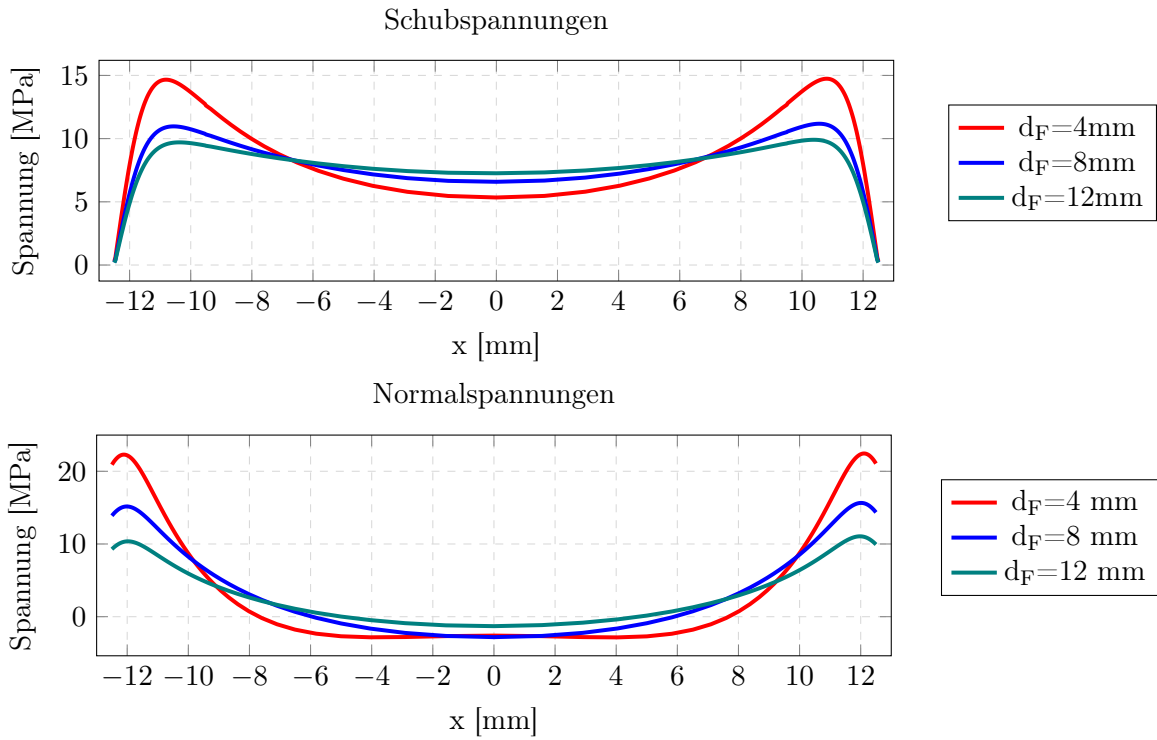


Abbildung A.14: Spannungen für variierende Fügeteildicken d_F , Mitte der Klebschicht (CD), einfach überlappter Prüfkörper

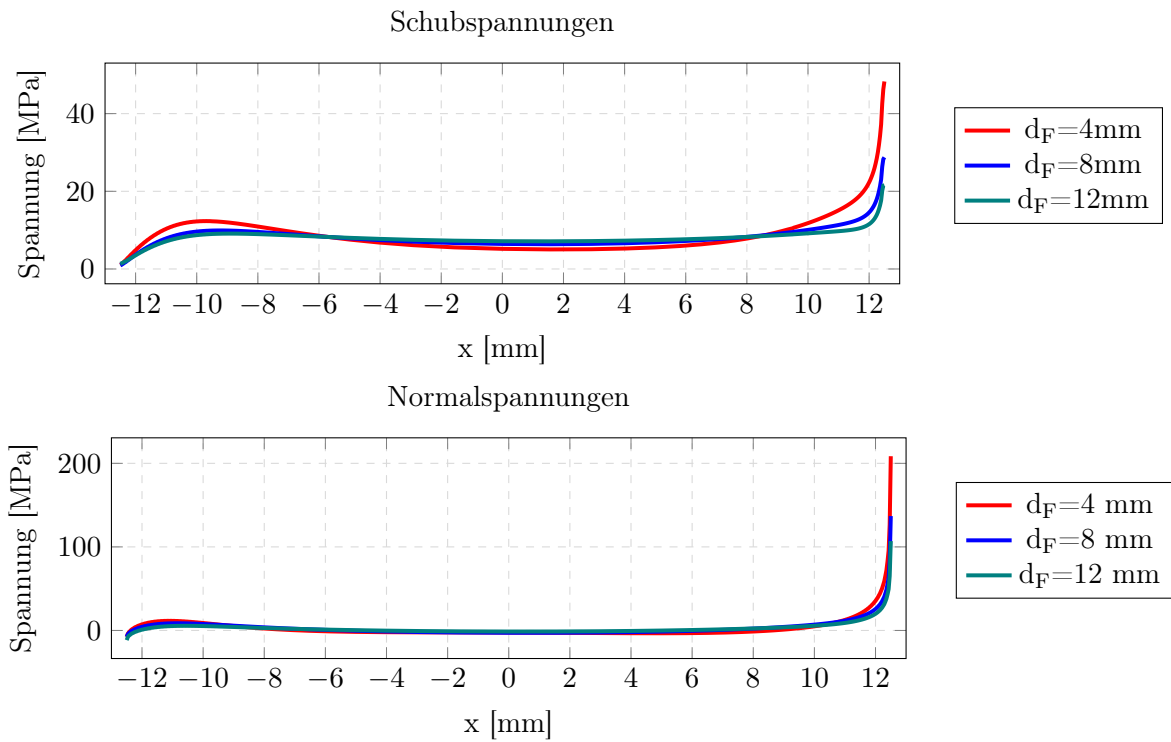


Abbildung A.15: Spannungen für variierende Fügeteildicken d_F , Grenzschicht der Klebschicht (EF), einfach überlappter Prüfkörper

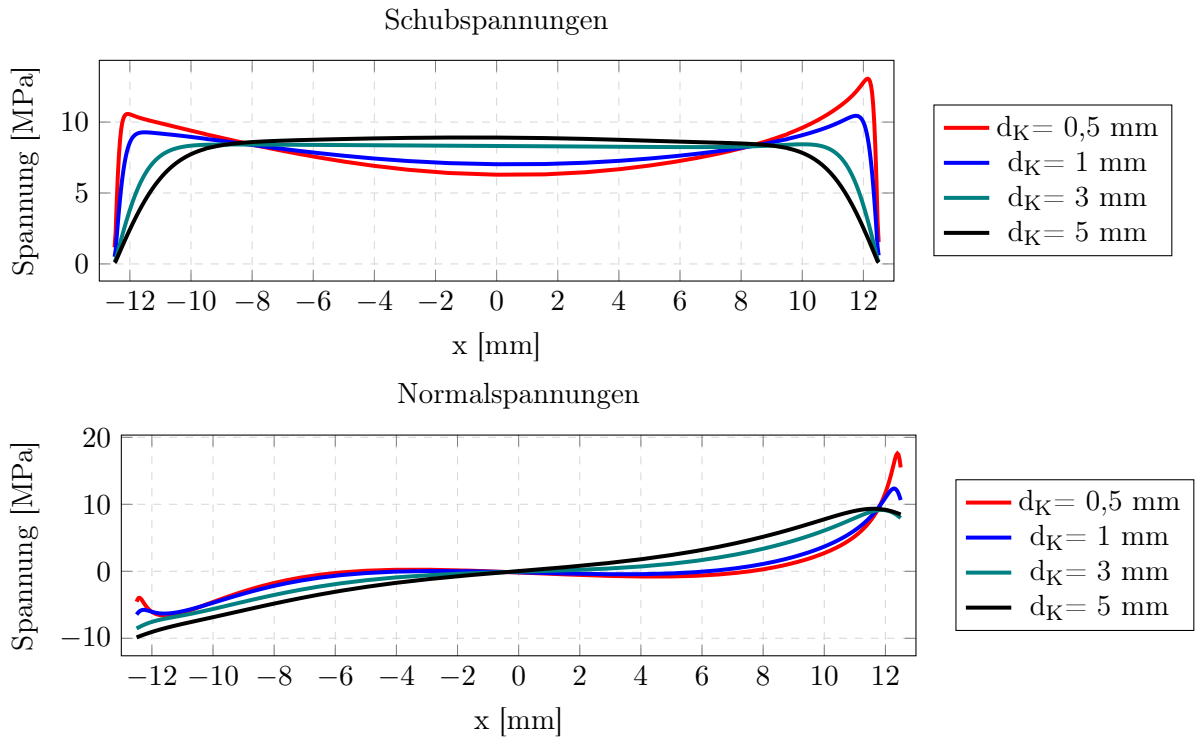


Abbildung A.16: Spannungen für variierende Klebschichtdicken d_K , Mitte der Klebschicht (CD), zweifach überlappter Prüfkörper

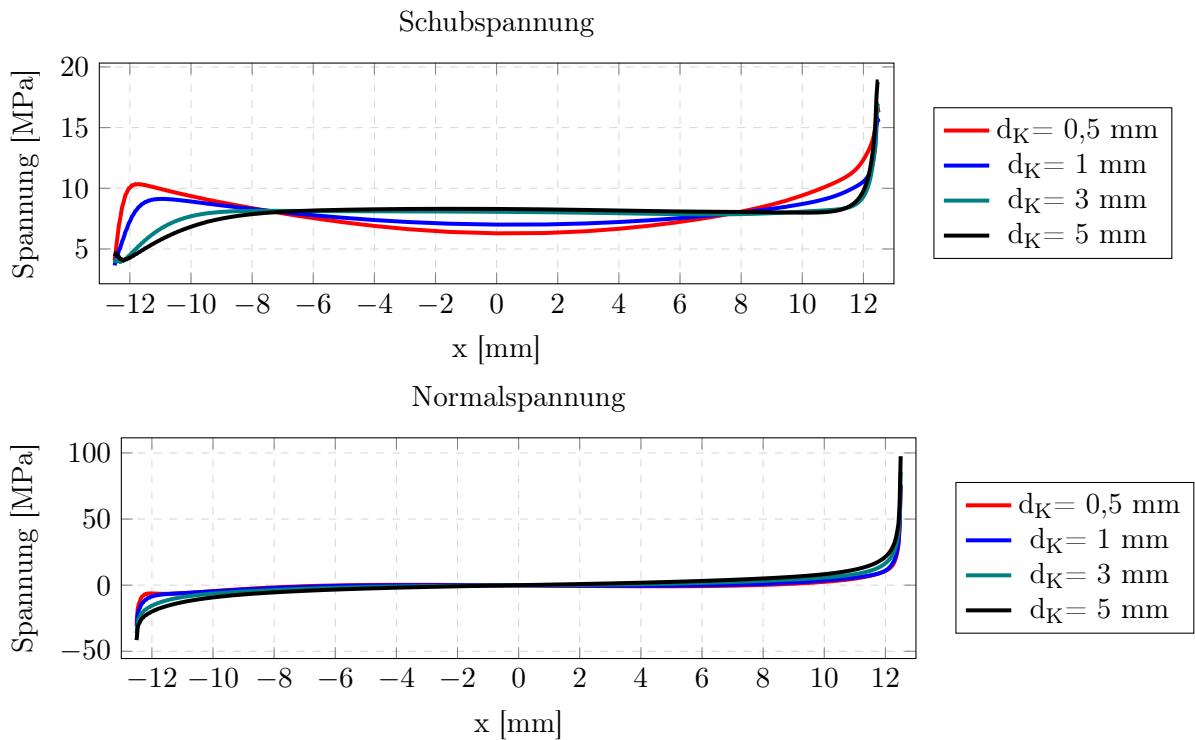


Abbildung A.17: Spannungen für variierende Klebschichtdicken d_K , Grenzschicht der Klebschicht (EF), zweifach überlappter Prüfkörper

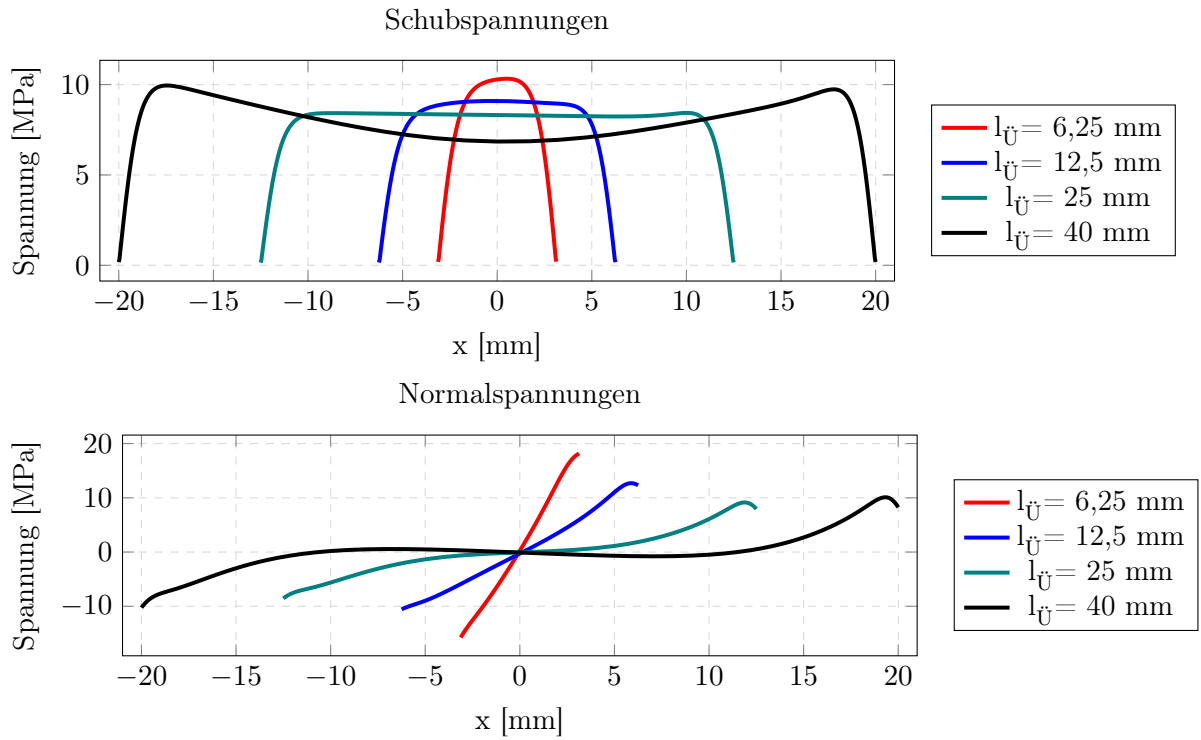


Abbildung A.18: Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\ddot{U}}$, Mitte der Klebschicht (CD), zweifach überlappter Prüfkörper

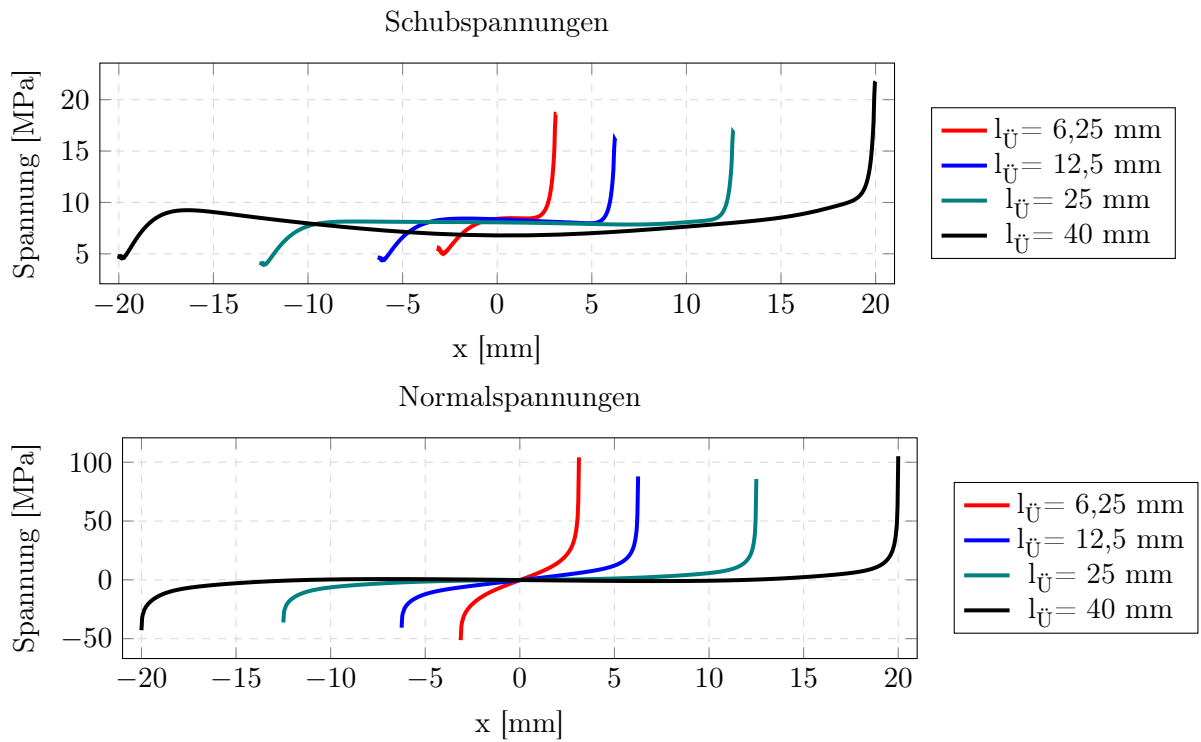


Abbildung A.19: Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\ddot{U}}$, Grenzschicht der Klebschicht (EF), zweifach überlappter Prüfkörper

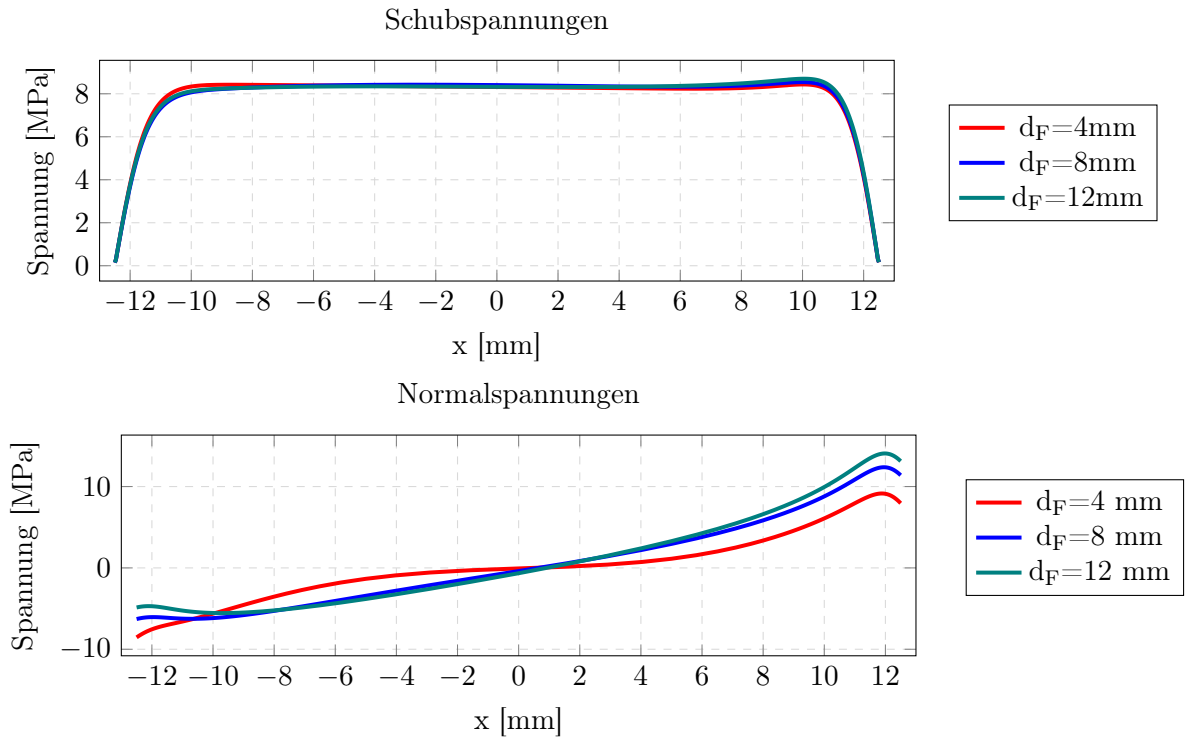


Abbildung A.20: Spannungen für variierende Fügeitdicken d_F , Mitte der Klebschicht (CD), zweifach überlappter Prüfkörper

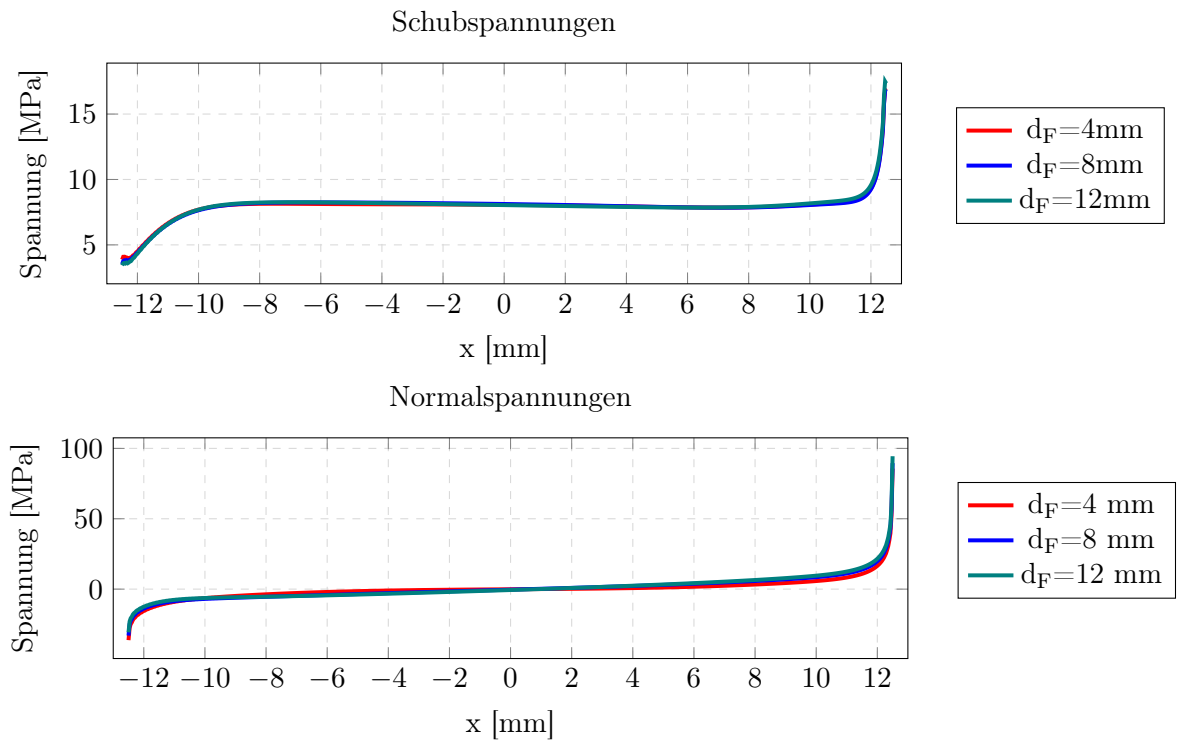


Abbildung A.21: Spannungen für variierende Fügeitdicken d_F , Grenzschicht der Klebschicht (EF), zweifach überlappter Prüfkörper

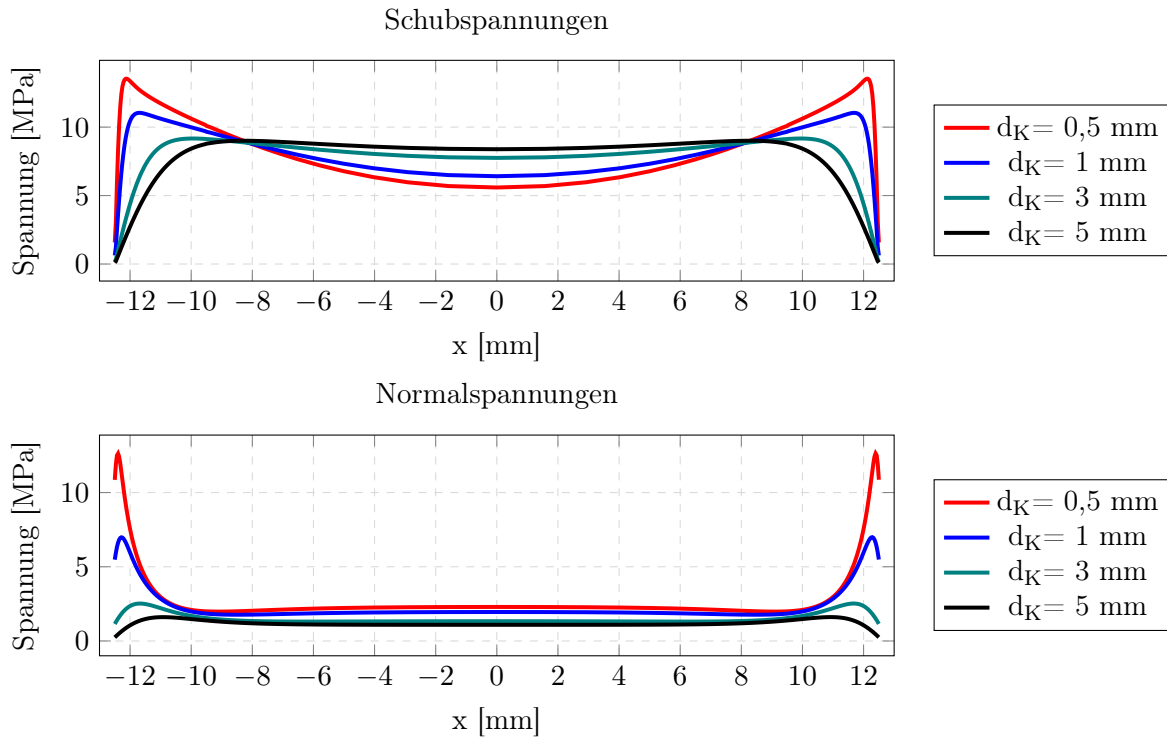


Abbildung A.22: Spannungen für variierende Klebschichtdicken d_K , Mitte der Klebschicht (CD), biegebehinderter Prüfkörper

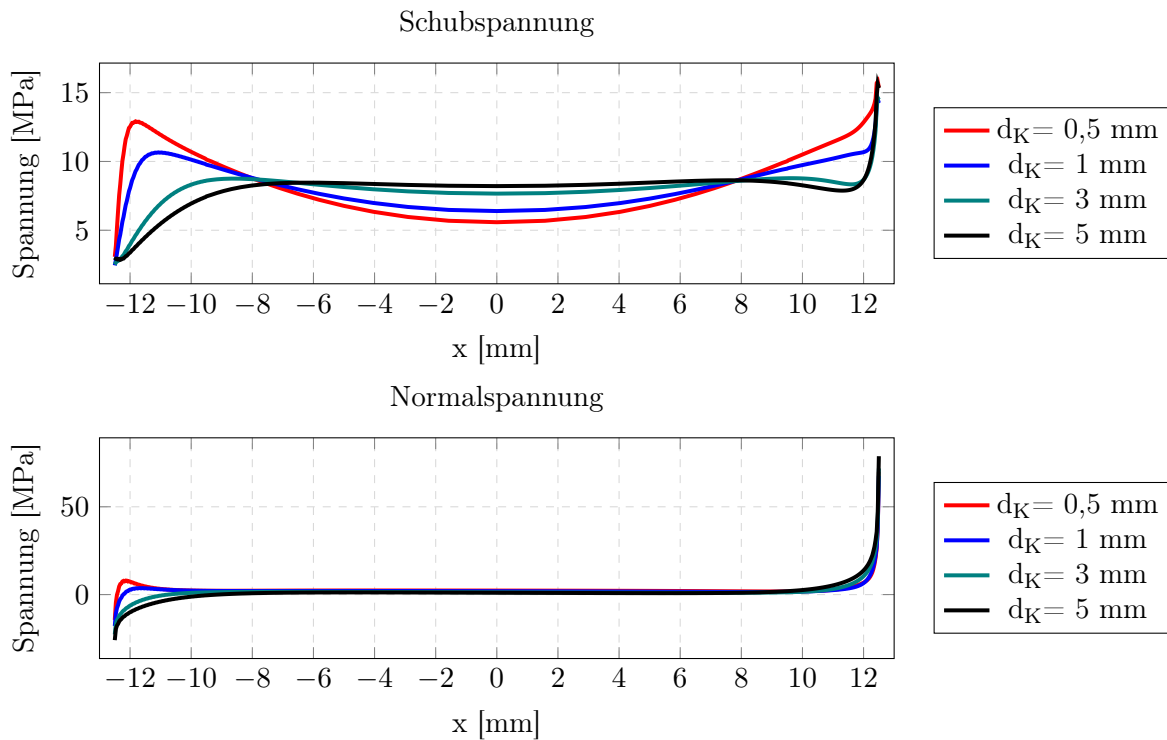


Abbildung A.23: Spannungen für variierende Klebschichtdicken d_K , Grenzschnitt der Klebschicht (EF), biegebehinderte Prüfkörper

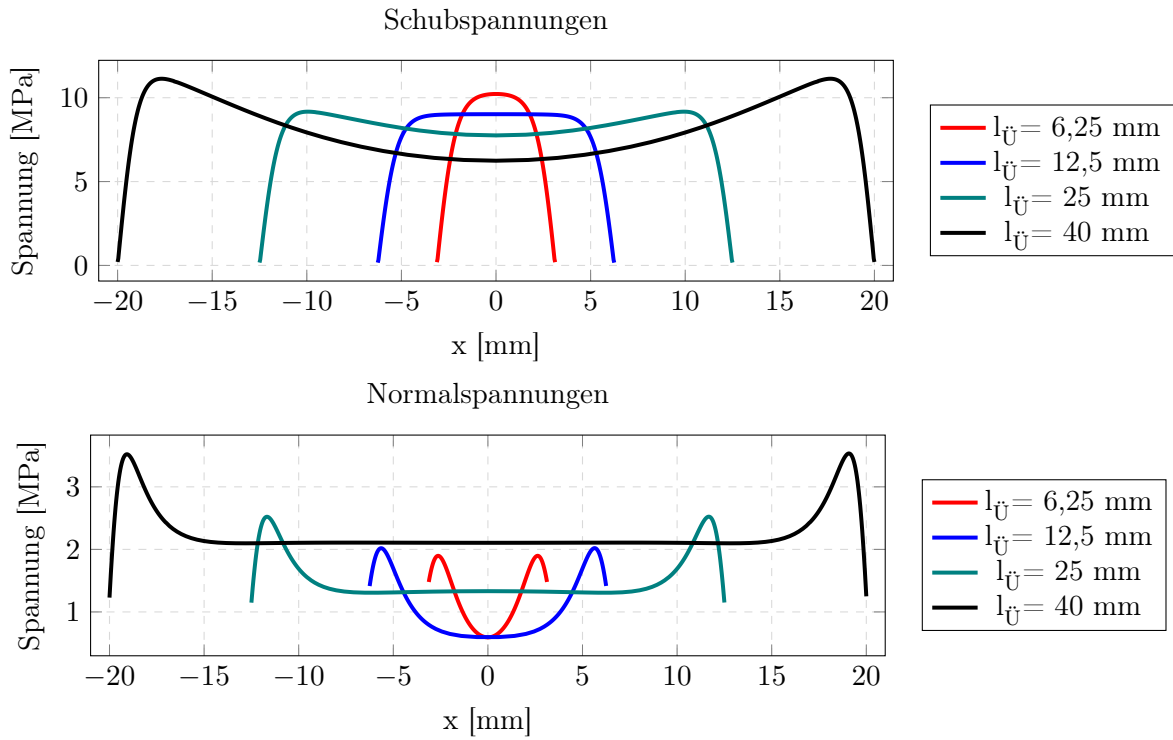


Abbildung A.24: Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\ddot{U}}$, Mitte der Klebschicht (CD), biegebehinderter Prüfkörper

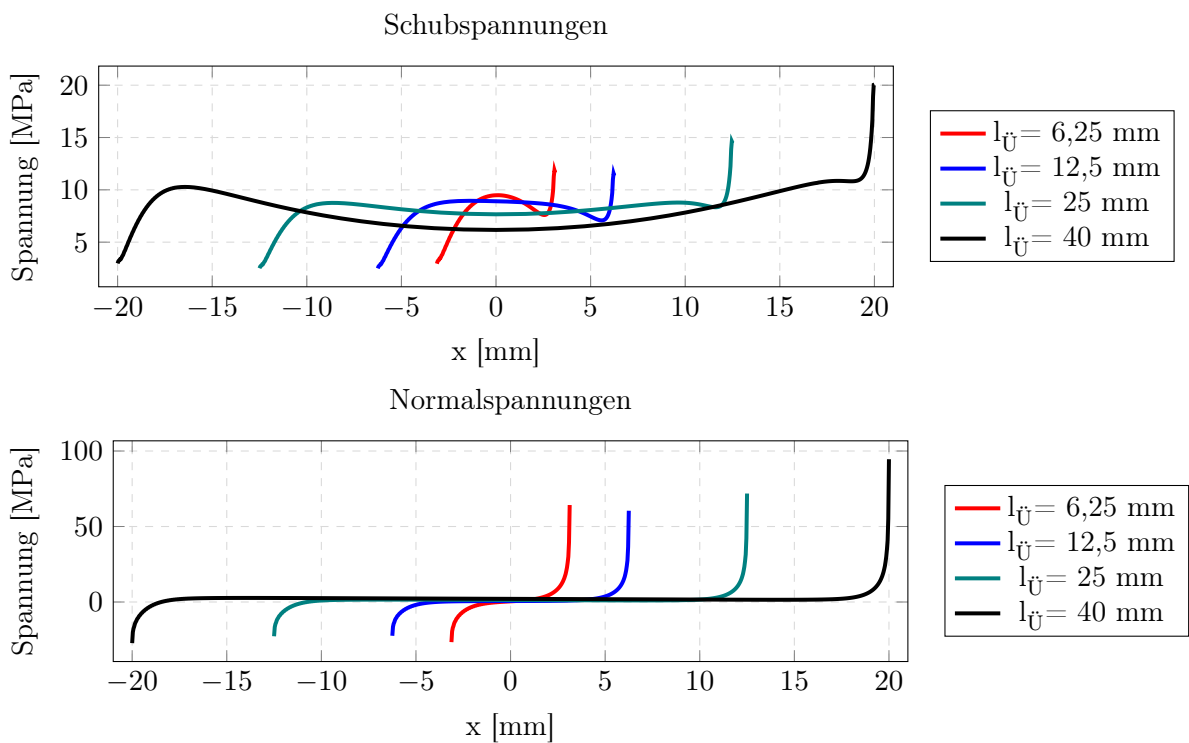


Abbildung A.25: Spannungen für variierende Überlappungslängen $l_{\ddot{U}}$, Grenzschicht der Klebschicht (EF), biegebehinderter Prüfkörper

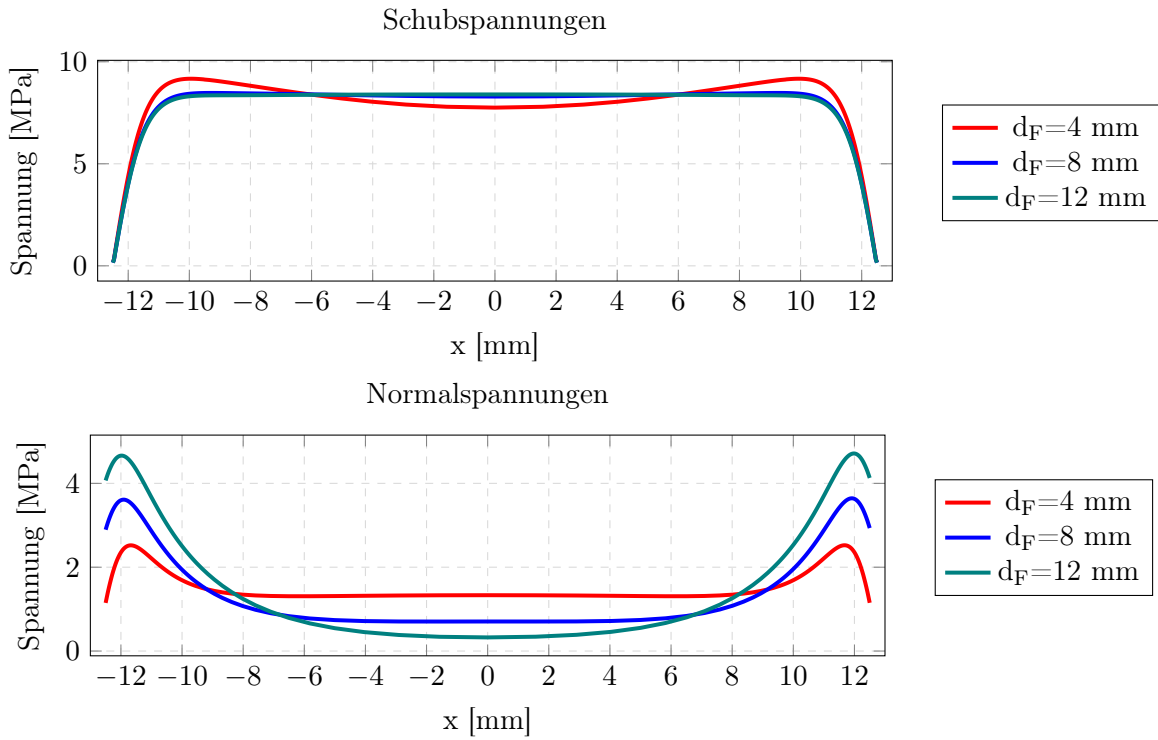


Abbildung A.26: Spannungen für variierende Fügeteildicken d_F , Mitte der Klebschicht (CD), biegebehinderter Prüfkörper

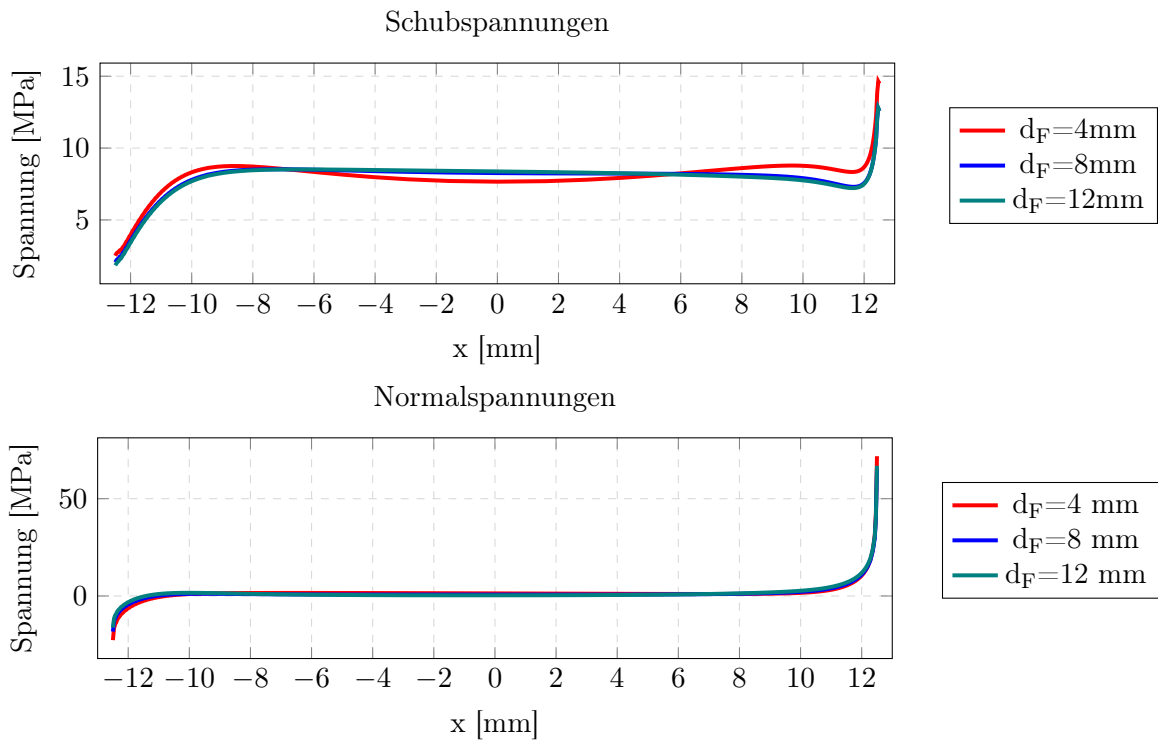


Abbildung A.27: Spannungen für variierende Fügeteildicken d_F , Grenzschicht der Klebschicht (EF), biegebehinderter Prüfkörper

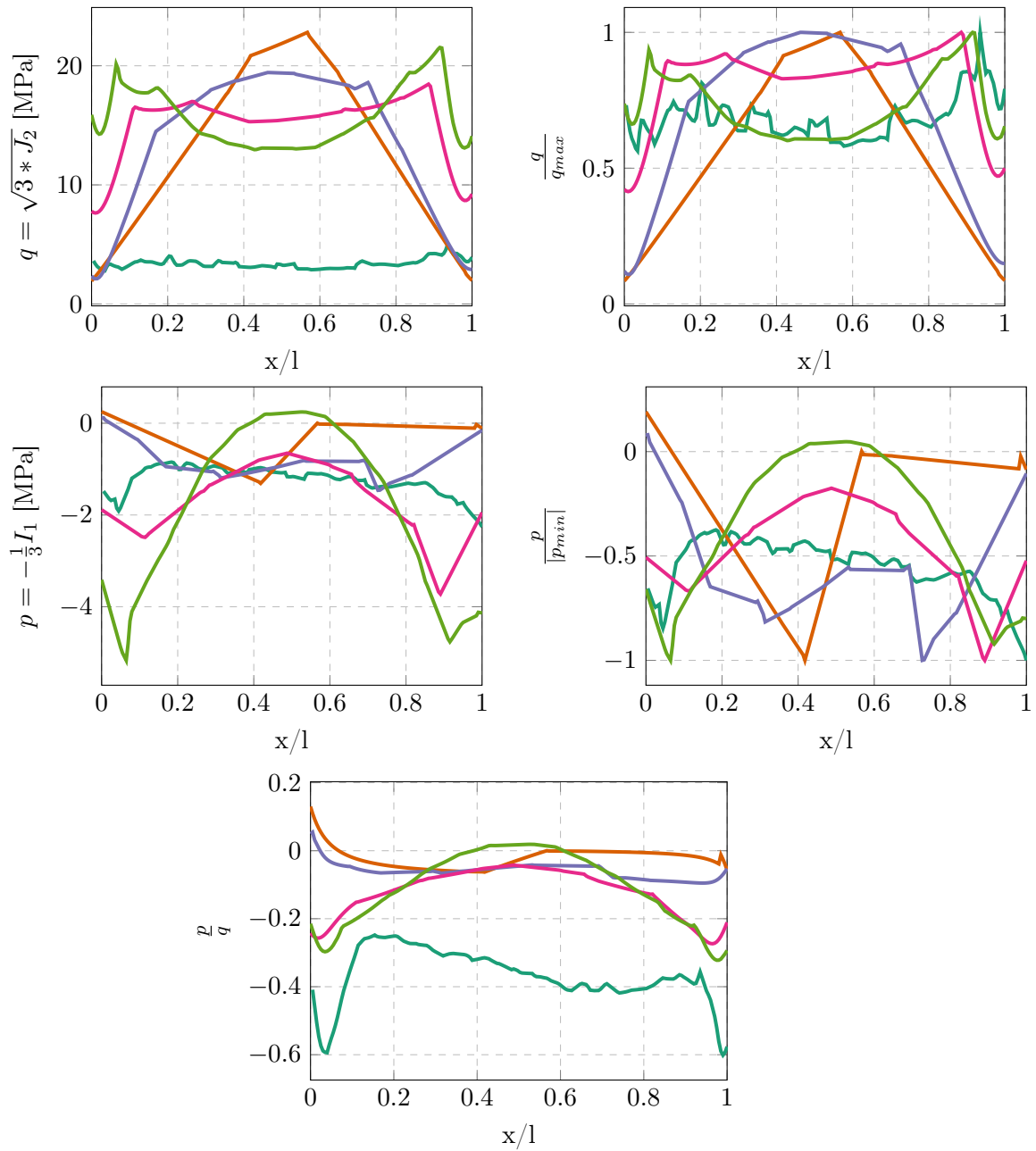
A.4 Ergebnisse der Methodik

Tabelle A.8: Ergebnisse für alle betrachteten Prüfkörperkonfigurationen

Rang	Prüfkörpergeometrie	$l_{\ddot{U}}$	d_F	$\overline{d_{Dev}}$	$\overline{d_{Hydro}}$	$\overline{d_{pq}}$	$\overline{d_{Ges}}$
1	Eingeschlitzt	25 mm	4 mm	0,0840	0,2599	0,2361	0,5800
2	Einfach überlappt	25 mm	4 mm	0,0794	0,2705	0,2325	0,5824
3	Eingeschlitzt	40 mm	12 mm	0,1294	0,2465	0,2521	0,6280
4	Einfach überlappt	25 mm	8 mm	0,2068	0,1831	0,2474	0,6373
5	Eingeschlitzt	40 mm	8 mm	0,0849	0,3018	0,2567	0,6434
6	Einfach überlappt	40 mm	8 mm	0,0874	0,2945	0,2623	0,6442
7	Eingeschlitzt	40 mm	4 mm	0,1237	0,2755	0,2458	0,6450
8	Eingeschlitzt	25 mm	8 mm	0,2374	0,1640	0,2493	0,6507
9	Eingeschlitzt	25 mm	12 mm	0,2692	0,1222	0,2665	0,6578
10	Einfach überlappt	40 mm	12 mm	0,1620	0,2543	0,2557	0,6719
11	Einfach überlappt	25 mm	12 mm	0,2561	0,1871	0,2680	0,7112
12	Einfach überlappt	40 mm	4 mm	0,1843	0,2857	0,2552	0,7253
13	Einfach überlappt	12,5 mm	4 mm	0,2508	0,2432	0,2386	0,7326
14	Eingeschlitzt	12,5 mm	4 mm	0,2536	0,2877	0,2605	0,8018
15	Einfach überlappt	12,5 mm	8 mm	0,2964	0,2562	0,3081	0,8607
16	Einfach überlappt	12,5 mm	12 mm	0,2692	0,2802	0,3132	0,8626
17	Doppelt gelascht	25 mm	12 mm	0,2351	0,2991	0,3298	0,8641
18	Eingeschlitzt	12,5 mm	12 mm	0,3033	0,2558	0,3252	0,8843
19	Eingeschlitzt	12,5 mm	8 mm	0,2967	0,2702	0,3195	0,8864
20	Zweifach überlappt	40 mm	4 mm	0,2213	0,3706	0,3096	0,9016
21	Doppelt gelascht	25 mm	8 mm	0,2316	0,3915	0,3060	0,9291
22	Doppelt gelascht	40 mm	12 mm	0,1696	0,4256	0,3383	0,9334
23	Zweifach überlappt	40 mm	12 mm	0,1883	0,4452	0,3183	0,9518
24	Einfach überlappt	6,25 mm	12 mm	0,2820	0,3608	0,3187	0,9615
25	Einfach überlappt	6,25 mm	4 mm	0,2797	0,3629	0,3255	0,9682
26	Zweifach überlappt	40 mm	8 mm	0,2143	0,4425	0,3233	0,9801
27	Biegebehindert	40 mm	4 mm	0,2285	0,4639	0,3059	0,9983
28	Doppelt gelascht	40 mm	4 mm	0,2562	0,4416	0,3143	1,0121
29	Biegebehindert	40 mm	12 mm	0,2678	0,4077	0,3485	1,0240
30	Eingeschlitzt	6,25 mm	12 mm	0,2926	0,4005	0,3367	1,0299

Tabelle A.9: Fortsetzung Tabelle A.8

Rang	Prüfkörpergeometrie	$l_{\bar{U}}$	d_F	$\overline{d_{Dev}}$	$\overline{d_{Hydro}}$	$\overline{d_{pq}}$	$\overline{d_{Ges}}$
31	Doppelt gelascht	40 mm	8 mm	0,2090	0,5090	0,3183	1,0362
32	Zweifach überlappt	25 mm	12 mm	0,2270	0,5019	0,3256	1,0545
33	Zweifach überlappt	12,5 mm	12 mm	0,2816	0,4409	0,3389	1,0613
34	Biegebehindert	40 mm	8 mm	0,2593	0,4667	0,3401	1,0661
35	Eingeschlitzt	6,25 mm	4 mm	0,2710	0,4406	0,3553	1,0669
36	Eingeschlitzt	6,25 mm	8 mm	0,2917	0,4384	0,3467	1,0768
37	Einfach überlappt	6,25 mm	8 mm	0,2948	0,4384	0,3462	1,0794
38	Biegebehindert	25 mm	8 mm	0,2879	0,4467	0,3593	1,0939
39	Biegebehindert	25 mm	12 mm	0,2890	0,4447	0,3617	1,0955
40	Zweifach überlappt	6,25 mm	4 mm	0,1607	0,5745	0,3644	1,0996
41	Zweifach überlappt	6,25 mm	12 mm	0,2920	0,4861	0,3311	1,1092
42	Zweifach überlappt	25 mm	8 mm	0,2273	0,5523	0,3337	1,1133
43	Doppelt gelascht	25 mm	4 mm	0,2397	0,5408	0,3361	1,1165
44	Zweifach überlappt	12,5 mm	8 mm	0,2465	0,5210	0,3493	1,1168
45	Zweifach überlappt	6,25 mm	8 mm	0,2770	0,5017	0,3411	1,1198
46	Zweifach überlappt	12,5 mm	4 mm	0,2036	0,5750	0,3569	1,1355
47	Doppelt gelascht	12,5 mm	4 mm	0,2540	0,5452	0,3499	1,1490
48	Doppelt gelascht	6,25 mm	12 mm	0,1945	0,5873	0,3690	1,1507
49	Zweifach überlappt	25 mm	4 mm	0,2468	0,5652	0,3393	1,1512
50	Doppelt gelascht	6,25 mm	8 mm	0,1961	0,5962	0,3712	1,1635
51	Doppelt gelascht	12,5 mm	12 mm	0,2556	0,5464	0,3618	1,1638
52	Doppelt gelascht	12,5 mm	8 mm	0,2562	0,5366	0,3731	1,1659
53	Biegebehindert	12,5 mm	8 mm	0,2991	0,4841	0,3867	1,1699
54	Biegebehindert	25 mm	4 mm	0,3234	0,4880	0,3635	1,1749
55	Biegebehindert	12,5 mm	12 mm	0,2989	0,5027	0,3844	1,1859
56	Biegebehindert	12,5 mm	4 mm	0,2886	0,5429	0,3845	1,2161
57	Doppelt gelascht	6,25 mm	4 mm	0,2478	0,6031	0,3786	1,2295
58	Biegebehindert	6,25 mm	4 mm	0,3021	0,6533	0,3776	1,3330
59	Biegebehindert	6,25 mm	8 mm	0,3019	0,6568	0,3747	1,3334
60	Biegebehindert	6,25 mm	12 mm	0,3018	0,6587	0,3733	1,3339



— Bauteil — $l_U=6,25$ mm — $l_U=12,5$ mm — $l_U=25$ mm — $l_U=40$ mm

Abbildung A.28: Spannungsverläufe einfach überlappter Prüfkörper, $d_F=8$ mm

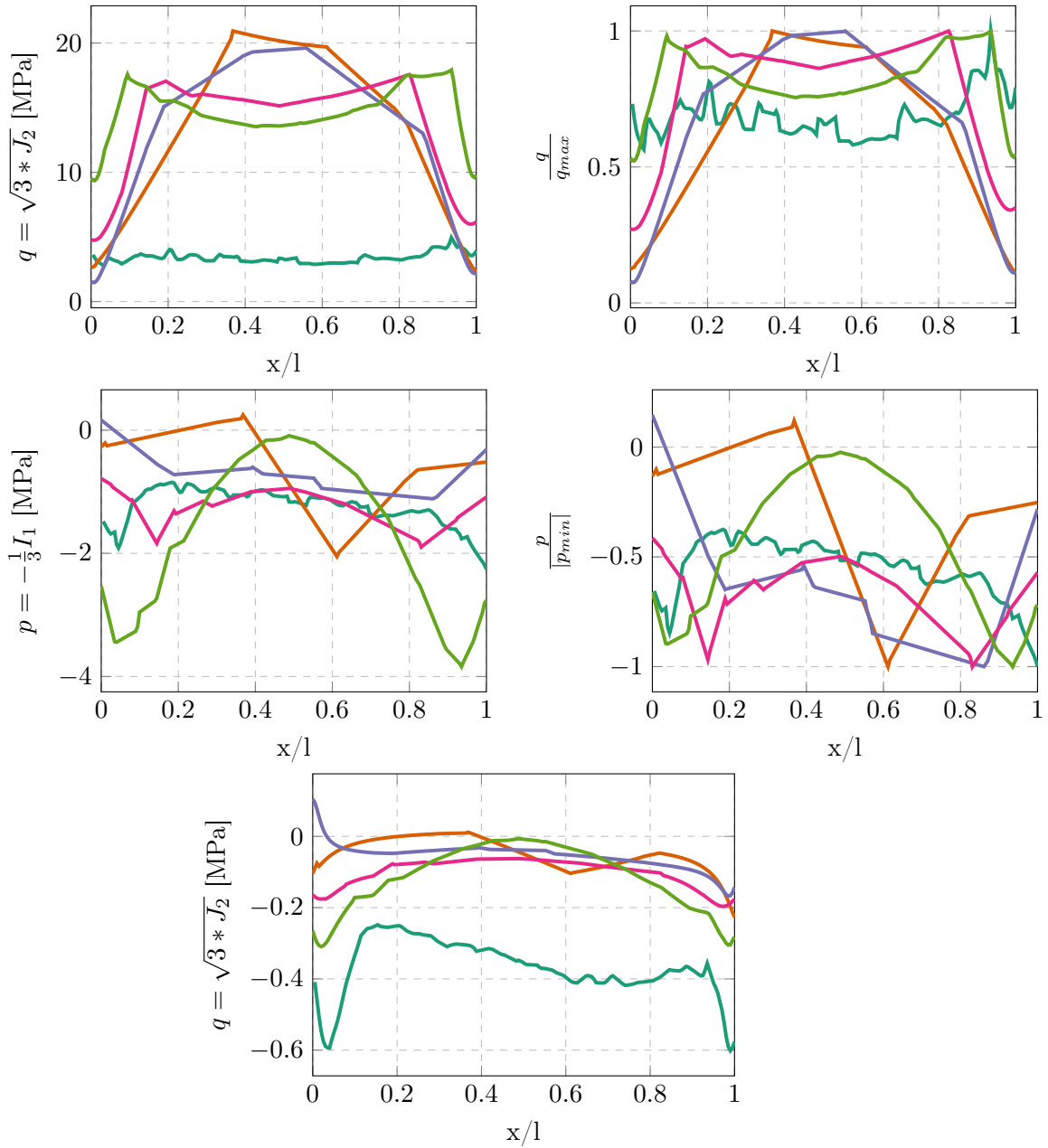
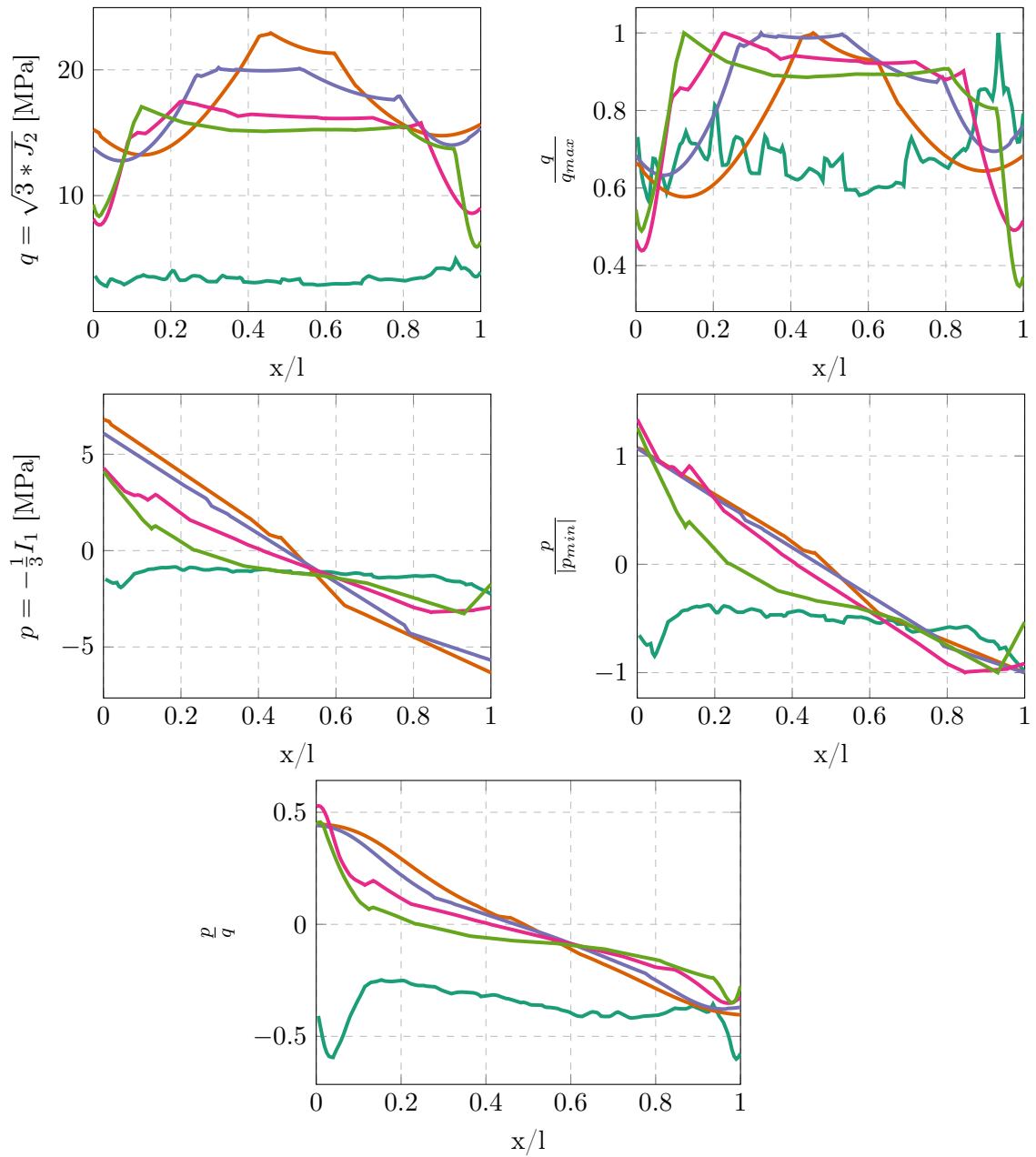


Abbildung A.29: Spannungsverläufe einfach überlappter Prüfkörper, $d_F=12$ mm



— Bauteil — $l_{\ddot{U}}=6,25$ mm — $l_{\ddot{U}}=12,5$ mm — $l_{\ddot{U}}=25$ mm — $l_{\ddot{U}}=40$ mm

Abbildung A.30: Spannungsverläufe zweifach überlappter Prüfkörper, $d_F=4$ mm

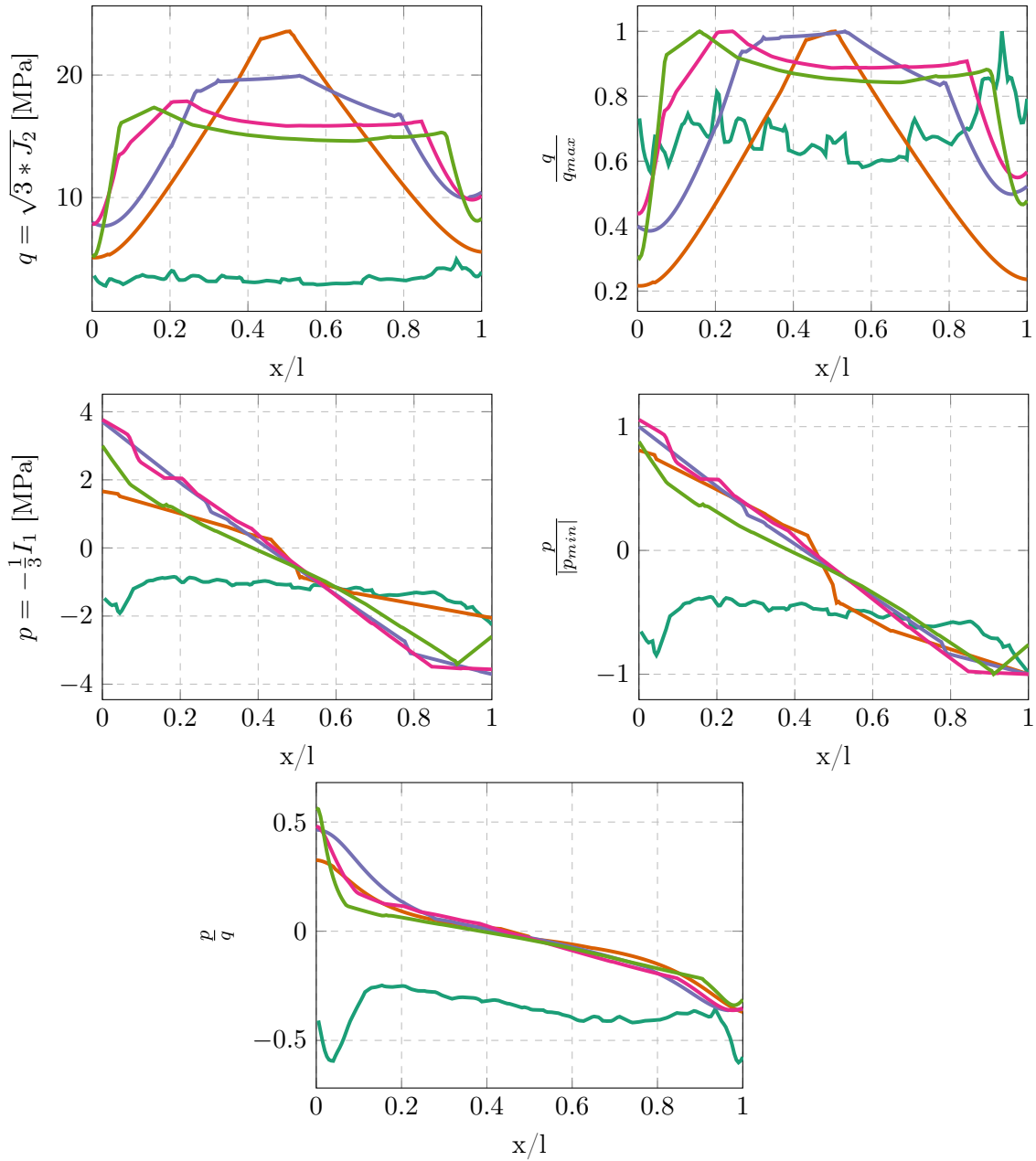


Abbildung A.31: Spannungsverläufe zweifach überlappter Prüfkörper, $d_F=8$ mm

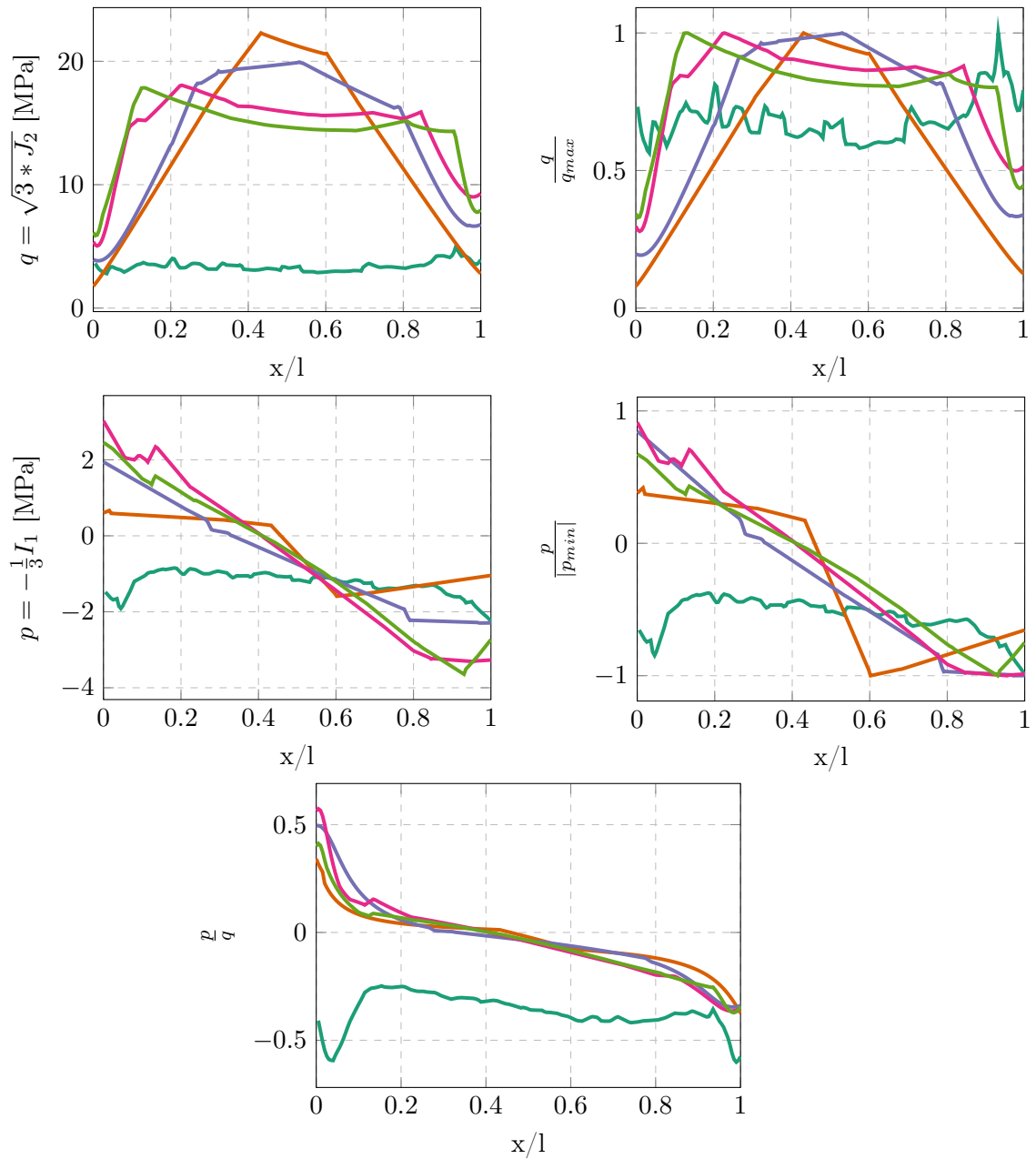


Abbildung A.32: Spannungsverläufe zweifach überlappter Prüfkörper, $d_F=12$ mm

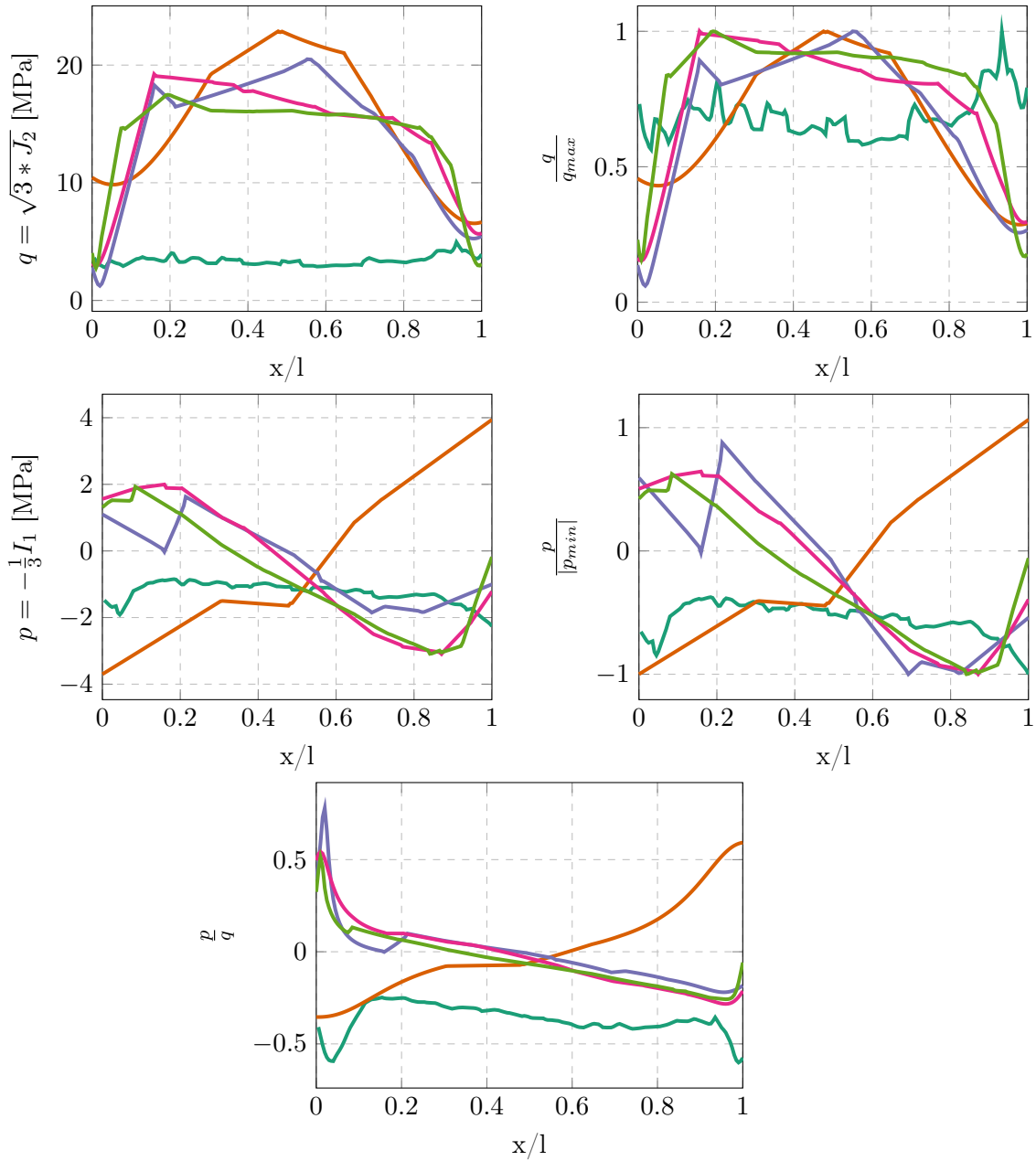
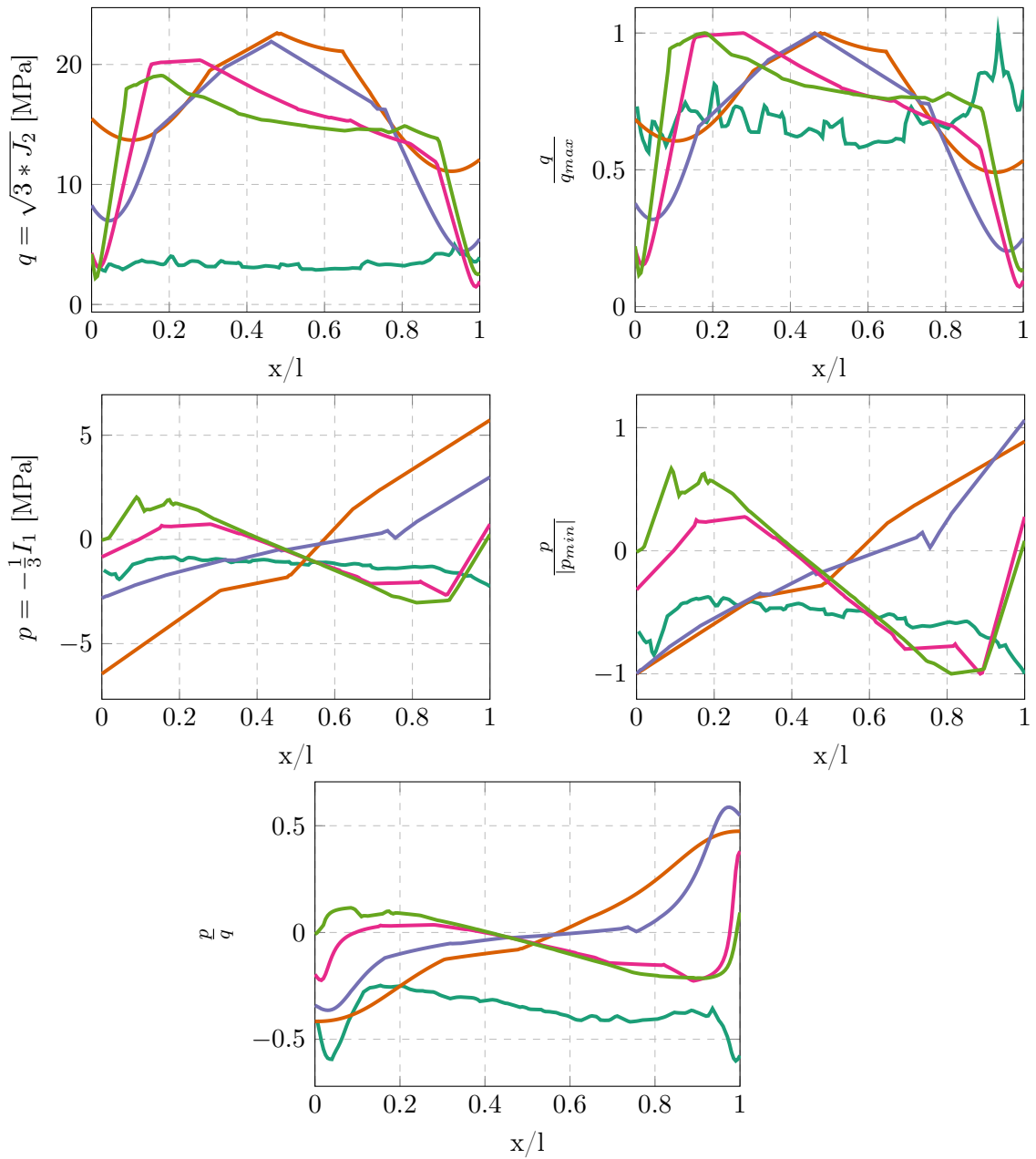
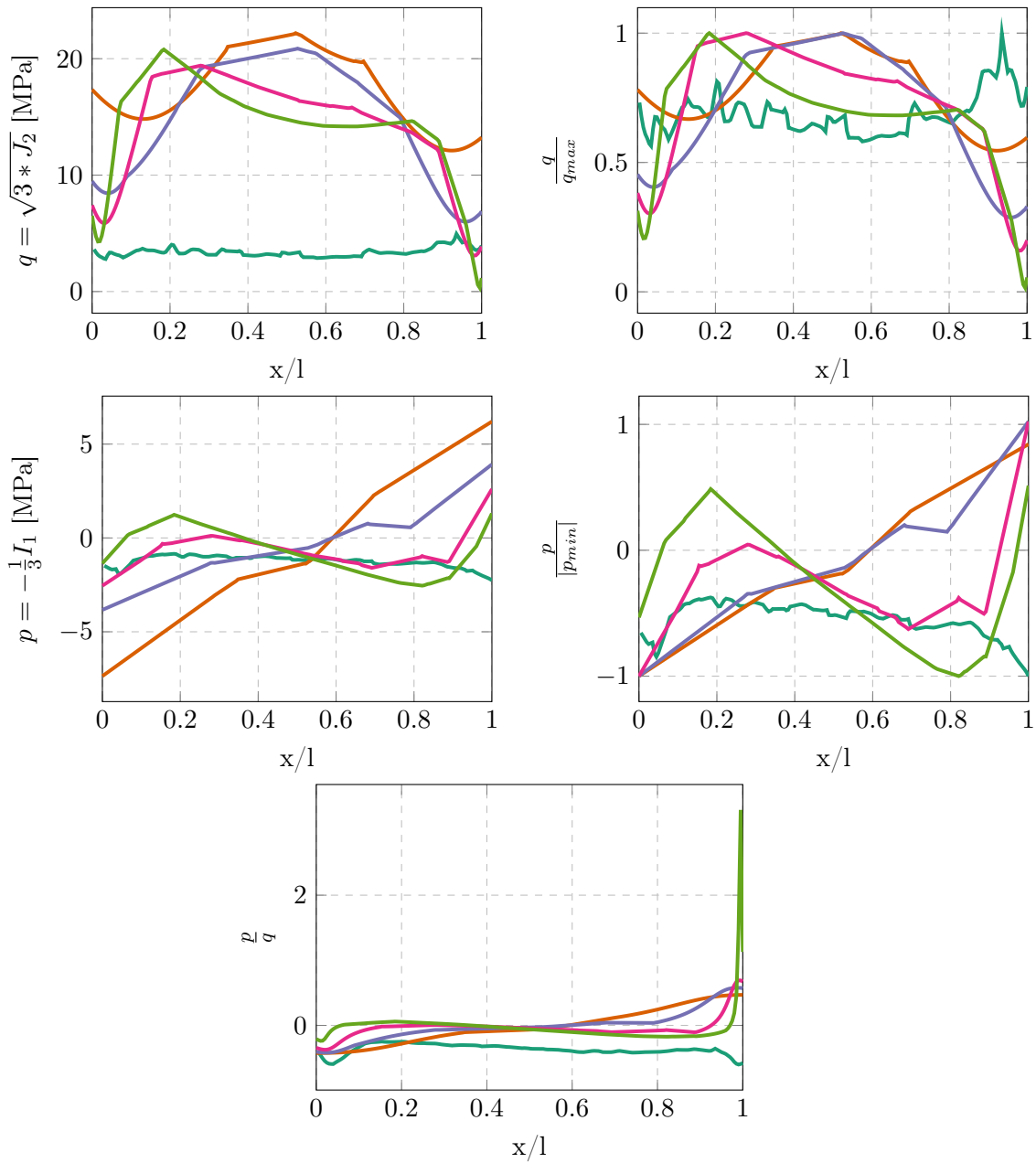


Abbildung A.33: Spannungsverläufe doppelt gelaschter Prüfkörper, $d_F = 4$ mm



— Bauteil — $l_U=6,25$ mm — $l_U=12,5$ mm — $l_U=25$ mm — $l_U=40$ mm

Abbildung A.34: Spannungsverläufe doppelt gelaschter Prüfkörper, $d_F=8$ mm



— Bauteil — $l_U=6,25$ mm — $l_U=12,5$ mm — $l_U=25$ mm — $l_U=40$ mm

Abbildung A.35: Spannungsverläufe doppelt gelaschter Prüfkörper, $d_F=12$ mm

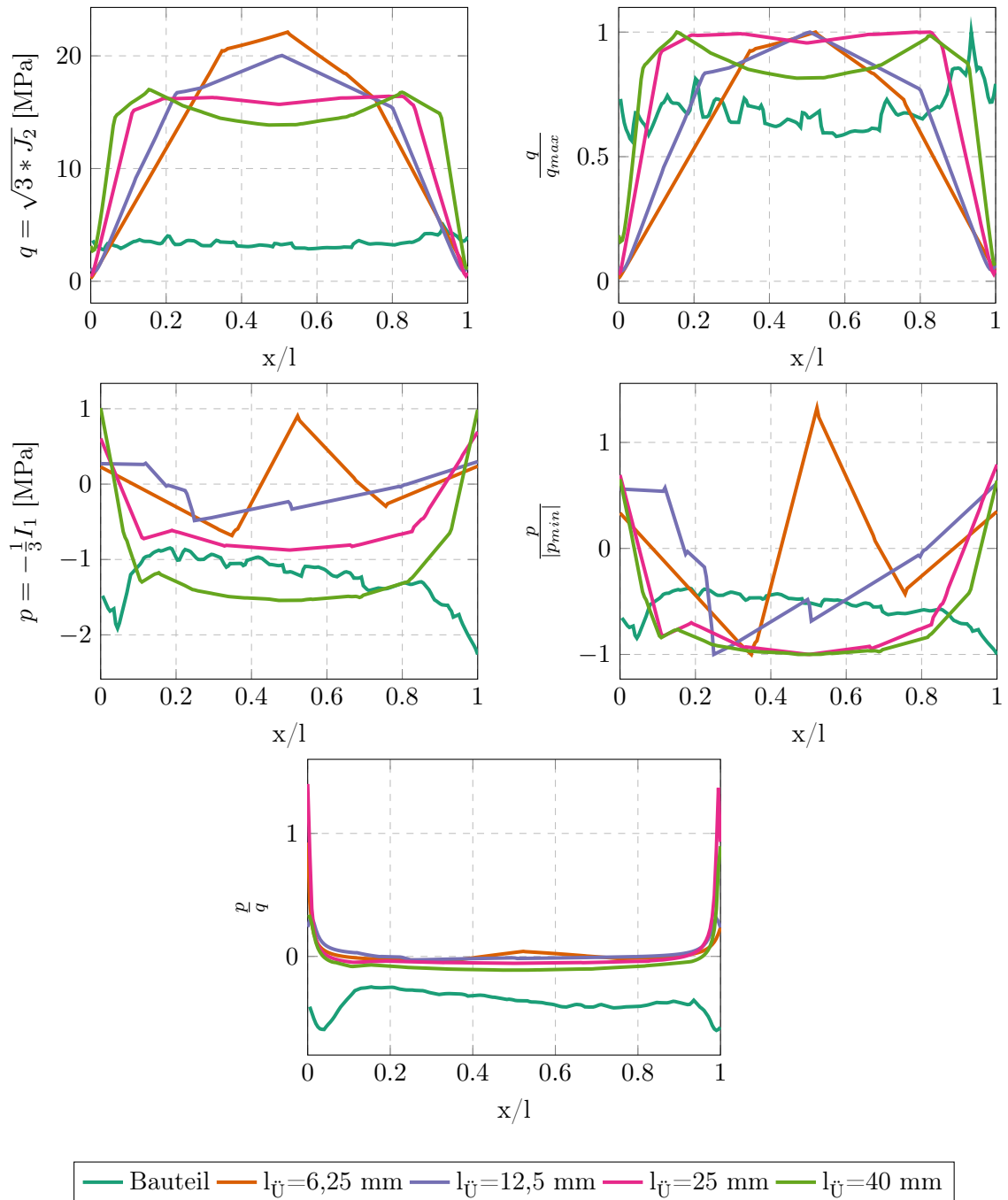


Abbildung A.36: Spannungsverläufe biegebehinderter Prüfkörper, $d_F=4$ mm

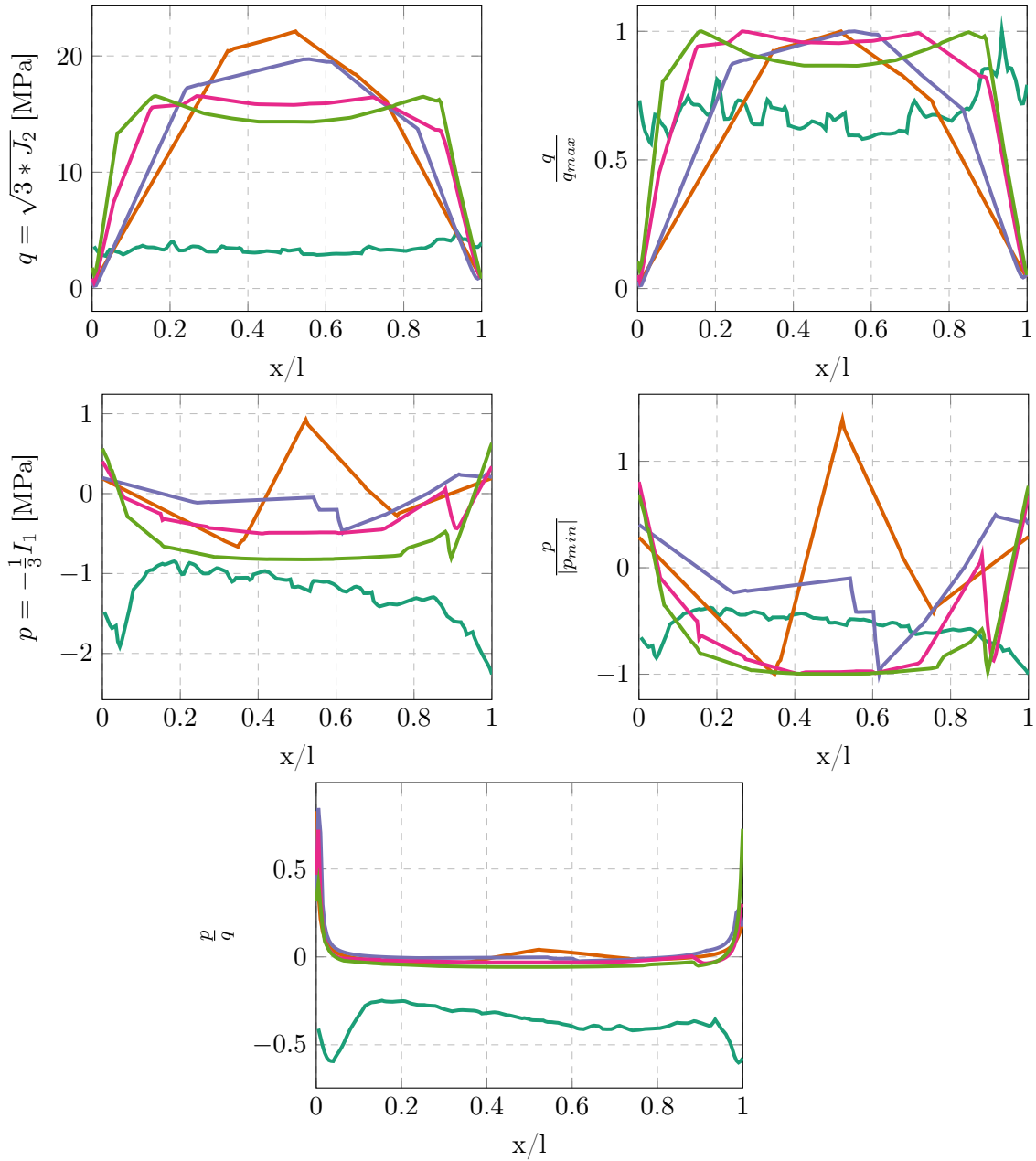
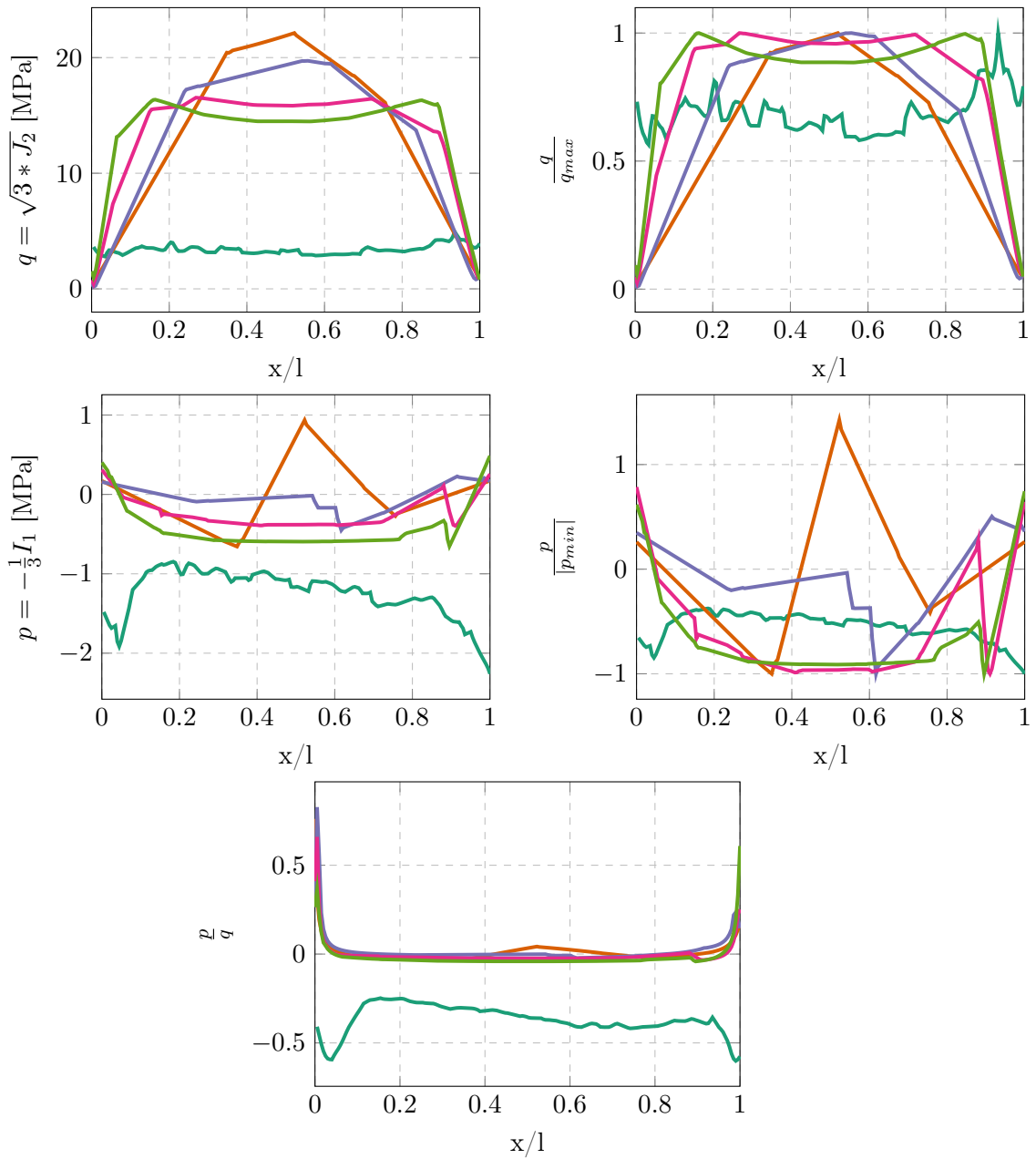
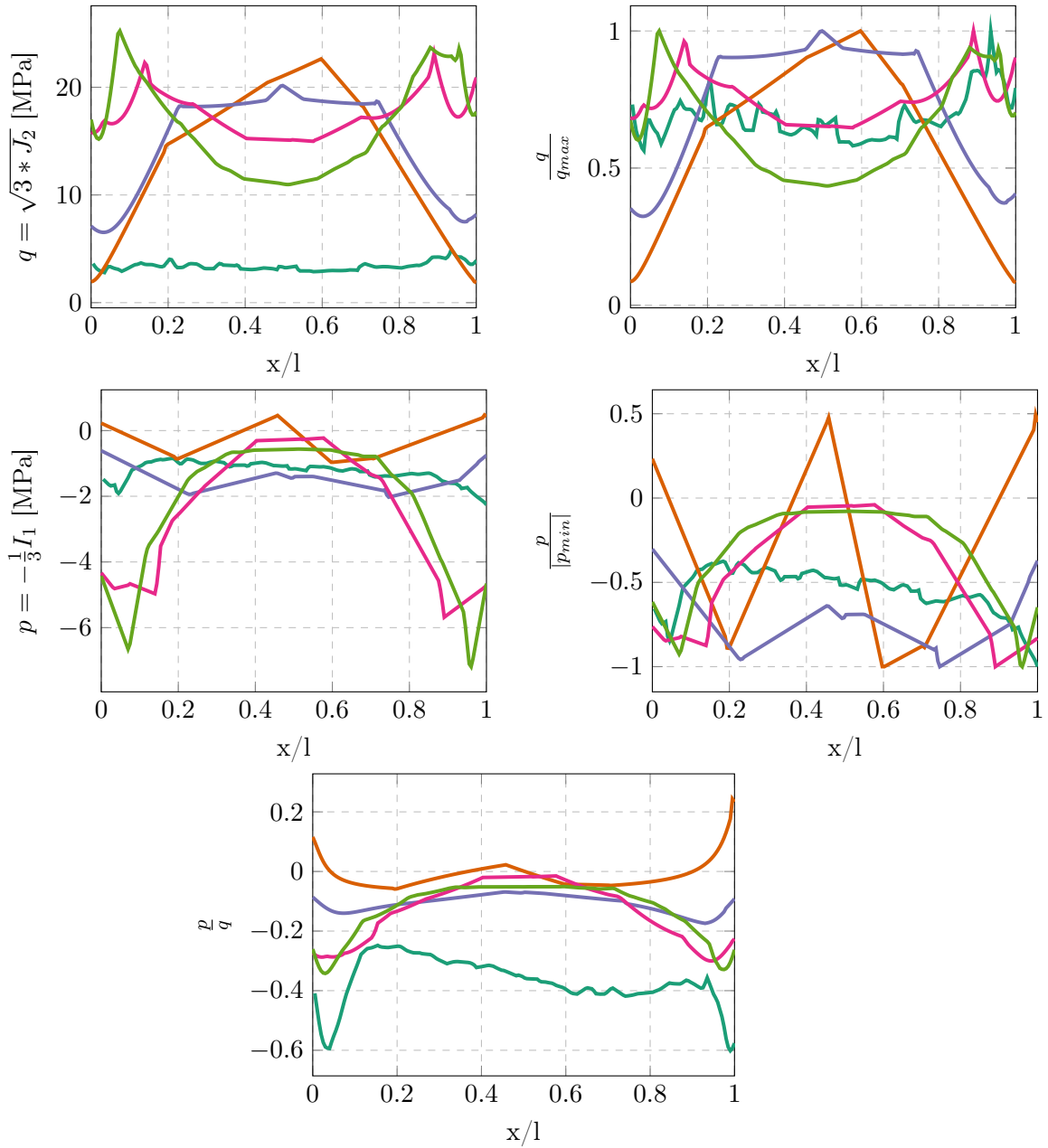


Abbildung A.37: Spannungsverläufe biegebehinderter Prüfkörper, $d_F = 8$ mm



— Bauteil — $l_{\ddot{U}}=6,25$ mm — $l_{\ddot{U}}=12,5$ mm — $l_{\ddot{U}}=25$ mm — $l_{\ddot{U}}=40$ mm

Abbildung A.38: Spannungsverläufe biegebehinderter Prüfkörper, $d_F=12$ mm

Abbildung A.39: Spannungsverläufe eingeschlitzter Prüfkörper, $d_F = 4$ mm

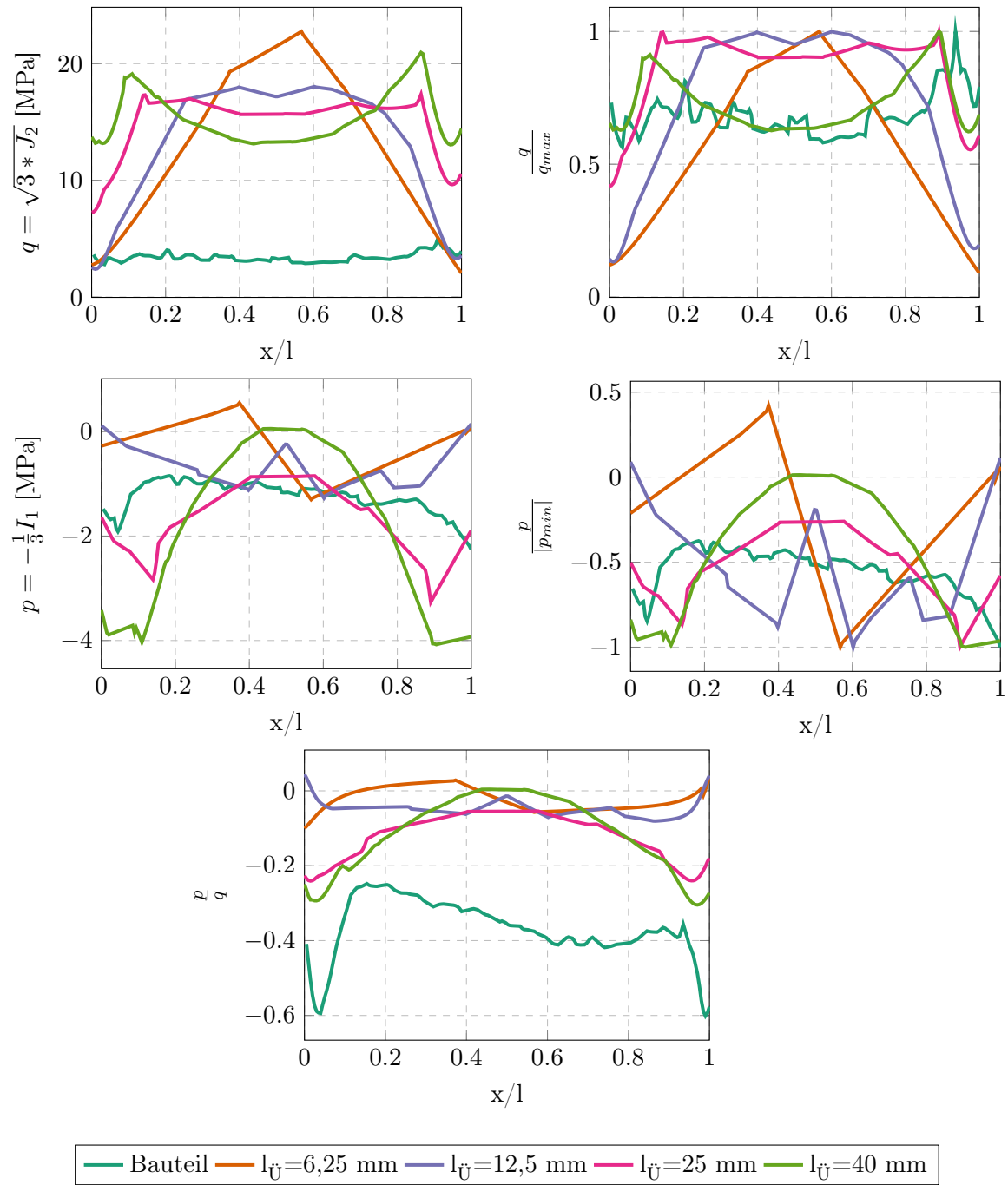
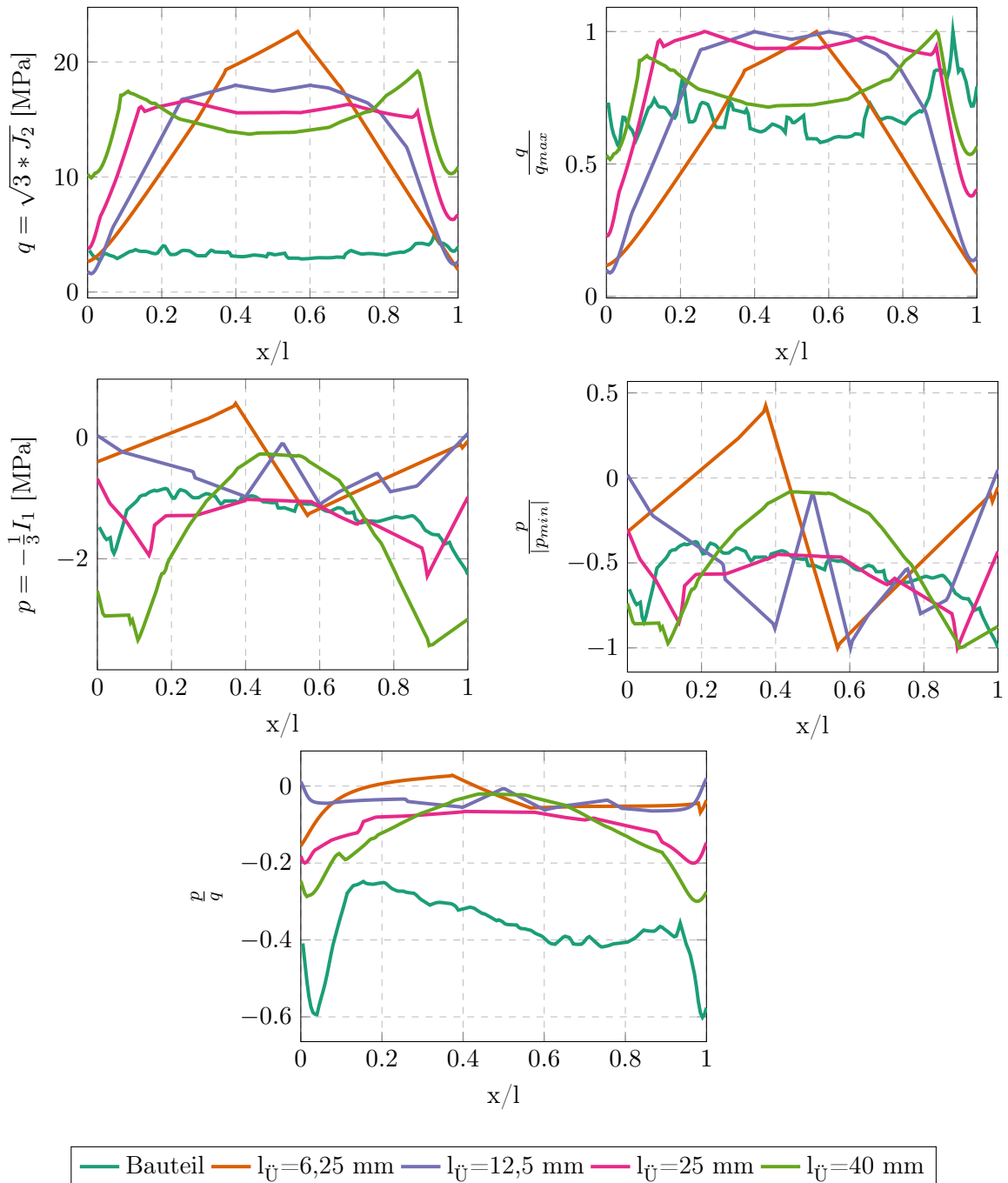


Abbildung A.40: Spannungsverläufe eingeschlitzter Prüfkörper, $d_F=8$ mm

Abbildung A.41: Spannungsverläufe eingeschlitzter Prüfkörper, $d_F=12$ mm

A.5 Fertigungsdokumente

Voith Turbo
Voith Turbo Schellenberg
GmbH & Co. KG
D-35239 Saugler

Klasse: A1

Klebeprotokoll Bonding report

Bauteilverklebungen mit Buifa 740-0110
This adhesive bonding report refers to AA_ops_100.01

Zu verklebende Komponenten / Erzeugte Baugruppe: Parts to be bonded / Created module:

Bauteilbezeichnung Part name	Anzahl quantity	Material-Nr. Material no.	Fertigungsdatum/Seriennummer Production date / serial no.	Erzeugnisdatum ¹⁾ Creation date
ASTM 3528 Typ B 1. Klebung				07.02.2020

1) Das Erzeugnis mit dem Seriennummer ist identisch mit dem Erzeugnis mit dem Seriennummer - mit dem Datum der Verklebung. Die Erzeugnisse sind für diesen Zweck freigegeben. Die Fertigungsbefehle sind in der Fertigung auszuhändigen.

Gemessene Lufttemp. Measured air temperature	Menge Soll Volume	Menge Ist Volume	Auftragszeit Time of application	Chargen-Nr. Charge no.	Verfallsdatum Expiry date
23,8 °C	500	500	16:00	2038047	01.09.2017
	75	75	16:00		

2) Gemessene Lufttemp.: 23,8 °C. This table is not applicable. The parts to be bonded are acclimatized. Measured humidity: 85,8 %

3) Klebstoff-Material: Buifa 740-0110, H05.975648009, Härter Hardener: Curox M312, Curox M312, H05.976143009

4) Verarbeitung: Der Kleberebereich entspricht der Zeichnung. Keine Schleif-, Trenn- und Schweißarbeiten im Umkreis von 10 m? Die Durchmischung des Klebstoffs ist in Ordnung (gleichmäßige Farbe, keine Schlieren). Die adhésive Menge ist ausreichend. Klebstoffmengen wurden eingehalten. Die vorgeschriebenen mindest. Klebstoffdicken wurden eingehalten. Wurde die Verklebung gemäß den Anforderungen AA_ops_100.01 durchgeführt? Ja, die Fertigungsbefehle entsprechend der Job instruction AA_ops_100.01?

5) Arbeitsproben auf Probestück angefertigt: Beschichtung Substrat 1 N1, Beschichtung Substrat 2 N1, Beschichtung Substrat 2 N2

Prüfbericht zur Arbeitsprobe: test report for work samples:

Erstellt und freigegeben: Böhmann, WAP, 11.09.2017
Geprüft, beibeh. stell., WAP, 08.09.2017
IBS: 97103479

Seite 2 von 3
Formular / Version 4.0
September 16.01.2014
Böhmann

Abbildung A.42: Klebeprotokoll ASTM 3528 Verklebung 1

Voith Turbo
Voith Turbo Schellenberg
GmbH & Co. KG
D-35239 Saugler

Klasse: A1

Klebeprotokoll Bonding report

Bauteilverklebungen mit Buifa 740-0110
This adhesive bonding report refers to AA_ops_100.01

Zu verklebende Komponenten / Erzeugte Baugruppe: Parts to be bonded / Created module:

Bauteilbezeichnung Part name	Anzahl quantity	Material-Nr. Material no.	Fertigungsdatum/Seriennummer Production date / serial no.	Erzeugnisdatum ¹⁾ Creation date
ASTM 3528 Typ B 2. Klebung				07.02.2020

1) Das Erzeugnis mit dem Seriennummer ist identisch mit dem Erzeugnis mit dem Seriennummer - mit dem Datum der Verklebung. Die Erzeugnisse sind für diesen Zweck freigegeben. Die Fertigungsbefehle sind in der Fertigung auszuhändigen.

Gemessene Lufttemp. Measured air temperature	Menge Soll Volume	Menge Ist Volume	Auftragszeit Time of application	Chargen-Nr. Charge no.	Verfallsdatum Expiry date
27,8 °C	500	500	17:35	2038047	01.09.2017
	75	75			

2) Gemessene Lufttemp.: 27,8 °C. This table is not applicable. The parts to be bonded are acclimatized. Measured humidity: 63,7 %

3) Klebstoff-Material: Buifa 740-0110, H05.975648009, Härter Hardener: Curox M312, Curox M312, H05.976143009

4) Verarbeitung: Der Kleberebereich entspricht der Zeichnung. Keine Schleif-, Trenn- und Schweißarbeiten im Umkreis von 10 m? Die Durchmischung des Klebstoffs ist in Ordnung (gleichmäßige Farbe, keine Schlieren). Die adhésive Menge ist ausreichend. Klebstoffmengen wurden eingehalten. Die vorgeschriebenen mindest. Klebstoffdicken wurden eingehalten. Wurde die Verklebung gemäß den Anforderungen AA_ops_100.01 durchgeführt? Ja, die Fertigungsbefehle entsprechend der Job instruction AA_ops_100.01?

5) Arbeitsproben auf Probestück angefertigt: Beschichtung Substrat 1 N1, Beschichtung Substrat 2 N1, Beschichtung Substrat 2 N2

Prüfbericht zur Arbeitsprobe: test report for work samples:

Erstellt und freigegeben: Böhmann, WAP, 11.09.2017
Geprüft, beibeh. stell., WAP, 08.09.2017
IBS: 97103479

Seite 2 von 3
Formular / Version 4.0
September 16.01.2014
Böhmann

Abbildung A.43: Klebeprotokoll ASTM D 3528 Verklebung 2

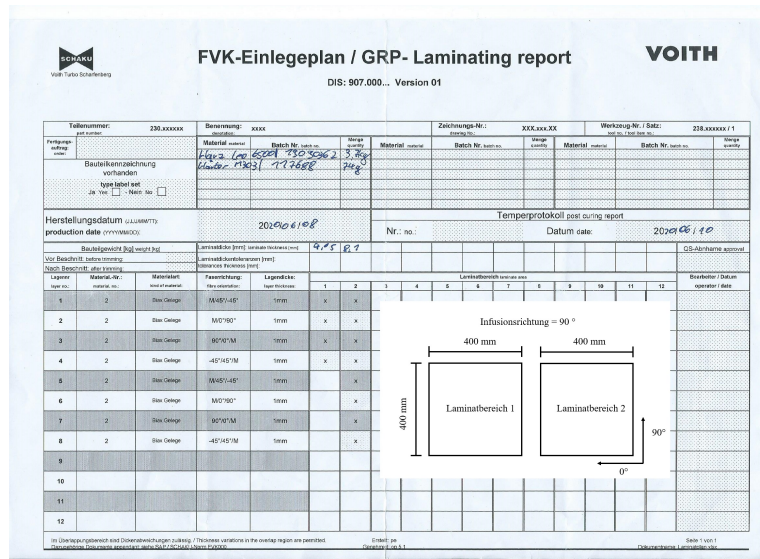


Abbildung A.44: Laminatplan Doppler (d_F=4 mm) ASTM D 3528 Typ B Prüfkörper, Anmerkung: Es wurde nur der Aufbau mit 4 Lagen für die Prüfkörper verwendet

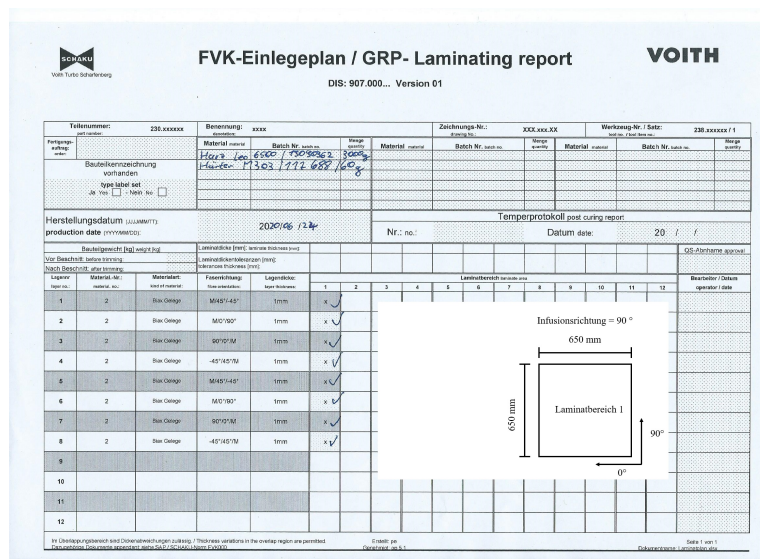


Abbildung A.45: Laminatplan mittleres Fügeiteil (d_F=8 mm) ASTM D 3528 Typ B Prüfkörper

Tabelle A.10: Fertigungsparameter ASTM 3528 Typ B Proben

Fügeiteil	T	rel. Hum	p _{min}	Druckabfall	p _{Inf}	FVG
Doppler (4 mm)	19,4 °C	56,1 %	5,5 mbar	0,9 mbar (30 min)	250 mbar	49,28% 50,91%
Mittleres Fügeiteil (8 mm)	21,3 °C	48,6 %	9,7 mbar	1,2 mbar (30 min)	250 mbar	49,28% 51,69%

VOITH Voith Turbo
Voith Turbo Schenkerberg GmbH & Co. KG
D-30423 Salzgitter

Klasse: A1

Klebeprotokoll Bonding report
Bauteilverklebungen mit Bufa 740-0110
Dieses Klebeprotokoll bezieht sich auf AA_ops_100.01.
Zu verklebende Komponenten / Erzeugte Baugruppe:
Part name: *Verklebung*
Part no.: *4 Lagen QI*
Produktion date / serial no.: *22.09.2020*

Erzeugte Baugruppe (Name) Material-Nr.
Prüfkörper BK

Erzeugnisdatum¹⁾ Creation date
22.09.2020

Gemessene Lufttemp.: Messer an temperature: 20 °C
Alle Teile sind akklimatisiert. The parts to be bonded are acclimatized.

Gemessene rel.Feuchte: Measured humidity: 47,5 %

Klebstoff-Material Bonding Material	Menge Soll Volume	Menge Ist Volume	Auftragszeit Time of application	Chargen-Nr. Charge no.	Vorfalldatum Expiry date
<i>H06.975648009</i>	<i>1500 g</i>	<i>1500 g</i>	<i>11:15</i>	<i>20064736</i>	<i>21.09.2020</i>
<i>Harter Hardener</i>	<i>45 g</i>	<i>45 g</i>	<i>11:15</i>	<i>20064736</i>	<i>21.09.2020</i>
<i>Curox M312</i>					
<i>H06.976143009</i>					

Verarbeitung:
Der Klebbereich entspricht der Zeichnung.
The bonding area is according to the drawings in the context of 10 m².
No grinding, cutting and welding work within 10 m².
Die Durchmischung des Klebstoffs ist in Ordnung (gleichmäßige Farbe, keine Schlieren)
The adhesive has a uniform colour and no smear.
Die vorgeschriebenen mindest. Klebstoffmengen wurden eingehalten.
The prescribed minimum adhesive quantities were observed.
Die vorgeschriebenen mindest. Klebstoffdicken wurden eingehalten.
The adhesive thickness complies with the requirements.
Wurde die Verklebung gemäß Arbeitsanweisung AA_ops_100.01 durchgeführt?
Yes, the gluing took place according to the job instruction AA_ops_100.01?

Arbeitsproben auf Probestück angefertigt:
Work samples created:
Beschichtung Substrat 1 Nr.:
Beschichtung Substrat 1 Nr.:
Beschichtung Substrat 2 Nr.:
Beschichtung Substrat 2 Nr.:

Prüfbericht zur Arbeitsprobe:
Test report for work samples:

nächste Bewegung / Bearbeitung der verklebten Baugruppe am:
Next moving / processing of the bonded module date:
Uhrzeit / time:

Abbildung A.46: Klebeprotokoll festgelegte Prüfkörpergeometrie

VOITH Voith Turbo Schenkerberg

FVK-Einlegeplan / GRP- Laminating report

DIS: 907.000... Version 01

Teller-Nr.: 230 xxxxxx
Benennung: xxxx
Zeichnungs-Nr.: XXX.xxx.XX
Werkzeug Nr. / Set: 230 xxxxxx ()

Teil-Nr.:
Material: *H06.975648009*
Batch Nr.: *20064736*
Menge: *1500 g*

Material: *H06.976143009*
Batch Nr.: *20064736*
Menge: *45 g*

Herstellungsdatum: 20.09.2020
Temperaturprotokoll: 20 / 1

Lagen	Material-Nr.	Material	Faserorientierung	Lagenstärke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	Stk Gelege	MD/90°	1mm	x											
2	2	Stk Gelege	MD/90°	1mm	x											
3	2	Stk Gelege	90°/0°	1mm	x											
4	2	Stk Gelege	45°/45°	1mm	x											
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																

Infusionsrichtung = 90°
1000 mm
800 mm
Laminatbereich I
90°
0°

Abbildung A.47: Laminatplan festgelegte Prüfkörpergeometrie (d_F=4 mm)

Tabelle A.11: Fertigungsparameter festgelegte Prüfkörpergeometrie

T	rel. Hum	p _{min}	Druckabfall	p _{Inf}	FVG
20,0 °C	-	5,5 mbar	kein Abfall (10 min)	250 mbar	50,27%-52,23%

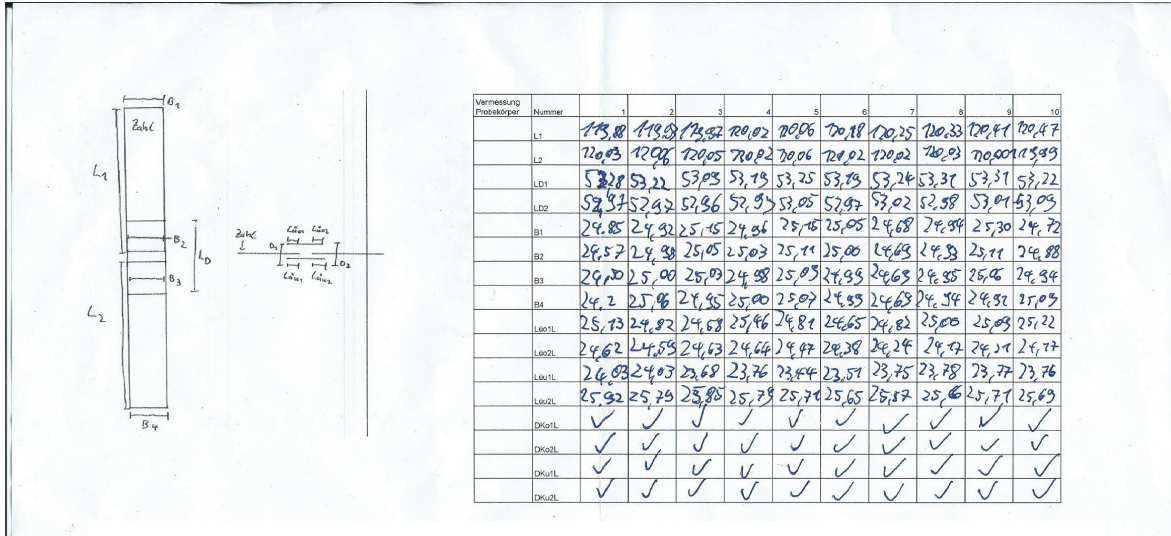


Abbildung A.48: Messprotokoll ASTM 3528 Typ B Prüfkörper

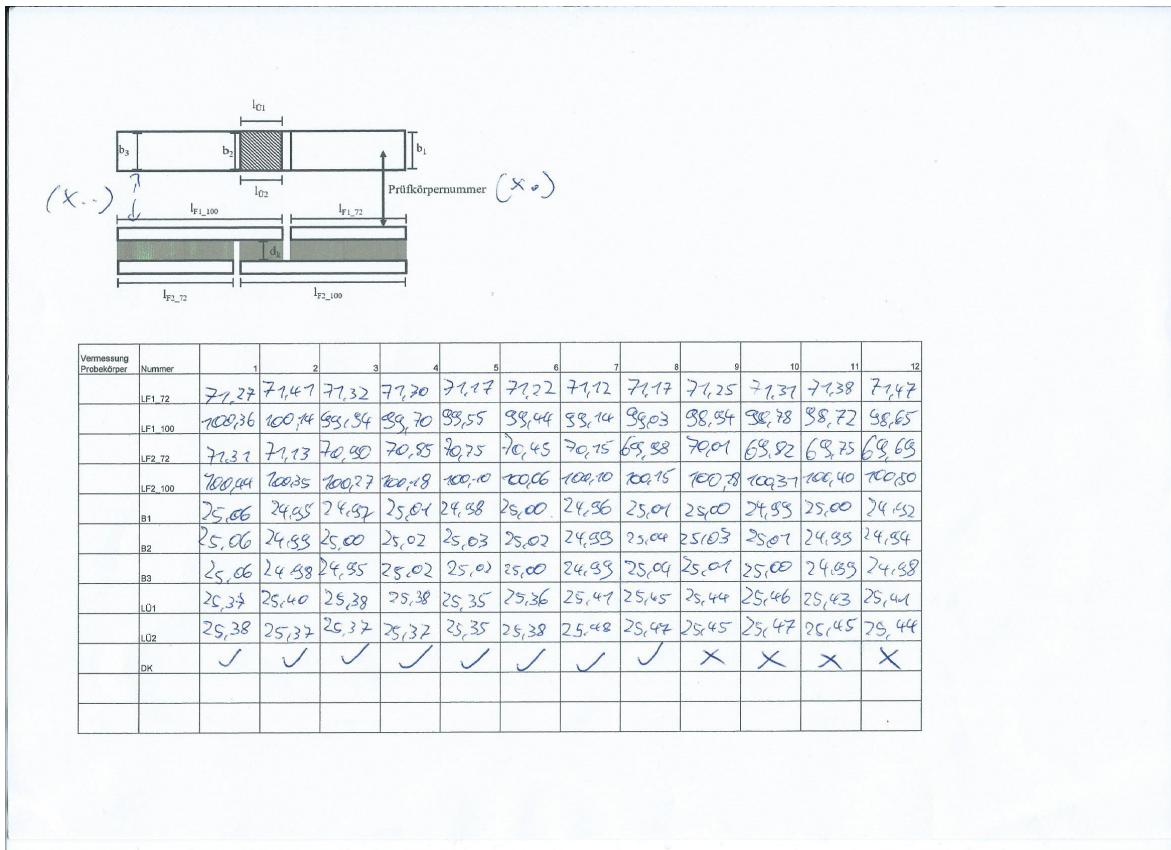


Abbildung A.49: Messprotokoll festgelegte Prüfkörpergeometrie

A.6 Prüfergebnisse

Tabelle A.12: Prüfergebnis ASTM 3528 Typ B Proben

Nr.	b [mm]	$l_{\ddot{U}}$ [mm]	F [kN]	τ_m [MPa]	Bruchbild
1	24,54	24,93	6,8	5,56	AF+CSF
2	24,99	24,8	6,62	5,34	AF+CSF
3	25,04	24,68	7,26	5,87	AF+CSF
4	25,01	24,91	7,44	5,97	AF+CSF
5	25,1	24,6	7,46	6,04	AF+CSF
6	25	24,55	7,92	6,45	AF+CSF
7	24,69	24,6	7,53	6,20	AF+CSF
8	24,94	24,65	8,33	6,77	AF+CSF
9	25,08	24,7	7,38	5,96	AF+CSF
10	24,91	24,71	7,24	5,88	AF+CSF
Minimal	24,54	24,55	6,62	5,34	
Mittelwert	24,93	24,71	7,40	6,00	
Maximal	25,1	24,93	8,33	6,77	
Standardabweichung	0,18	0,13	0,49	0,41	

Tabelle A.13: Prüfergebnis festgelegte Prüfkörpergeometrie

Nr.	b [mm]	$l_{\ddot{U}}$ [mm]	F [N]	τ_m [MPa]	Bruchbild	Ausschlussgrund
1	25,06	25,37	1075,87	1,69	AF+CSF	fehlerhaft ange-sägt
2	24,99	25,38	1584,2	2,5	AF+CSF	
3	25	25,37	1407,97	2,22	AF+CSF	
4	25,02	25,37	1333,32	2,1	AF+CSF	
5	25,03	25,35	1413,48	2,23	AF+CSF	
6	25,02	25,37	1450,76	2,29	AF+CSF	
7	24,99	25,44	1224,08	1,93	AF+CSF+CF	
8	25,04	25,46	1275	2	AF+CSF+CF	
9	25,03	25,44	1297,12	2,04	AF+CSF+CF	zu geringe Kleb-schichtdicke
10	25,01	25,46	1374,42	2,16	AF+CSF	zu geringe Kleb-schichtdicke
11	24,99	25,44	1454,11	2,29	AF+CSF+CF	zu geringe Kleb-schichtdicke
12	24,94	25,42	1301,64	2,05	AF+CSF	zu geringe Kleb-schichtdicke
Minimale	24,99	25,35	1224,08	1,93	Werte der Prüfkörper 2-8	
Mittelwert	25,01	25,39	1384,12	2,18		
Maximale	25,04	25,46	1584,2	2,5		
Standardabweichung	0,020	0,041	119,72	0,191		