

# Experimentelle und theoretische Untersuchungen an in Holz eingeklebten Blechen

M-4-1/2017



**Eva VIRGOLINI**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz



Eva VIRGOLINI, BSc

# **Experimentelle und theoretische Untersuchungen an in Holz eingeklebten Blechen**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur  
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer  
DI Manfred Augustin  
DI Markus Grabner  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, Jänner 2017



# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst zu haben, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt zu haben, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich fachlich als auch mental beim Schreiben dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Ein großer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer, der mich durch die Lehrveranstaltung Holzbau dazu motiviert hat, meine Masterarbeit in diesem Fachbereich zu verfassen. Des Weiteren möchte ich mich auch für die Möglichkeit bedanken, meine Arbeit am Holzbauinstitut schreiben zu dürfen.

Bei Herrn Dipl.-Ing Manfred Augustin möchte ich mich für die Aufnahme im Forschungsprojekt „eingeklebte Stahlbleche“ der Holzbau Forschungs GmbH, welches als Thema der Arbeit herangezogen wurde, sowie Betreuung und Korrektur der Arbeit herzlichst bedanken.

Herrn Dipl.-Ing Markus Grabner gilt ein ganz besonderer Dank, da er meine Masterarbeit ebenfalls betreute und korrigierte. Er unterstützte mich bei den Laborversuchen und stand mir jeder Zeit für Fragen zur Verfügung.

Für die Unterstützung bei den praktischen Arbeiten im Labor und die praxisbezogene fachliche Beratung durch seine langjährige Erfahrung, möchte ich Herrn Ing. Bernd Heissenberger einen großen Dank aussprechen.

Mit meinen Studienkollegen Thomas Laggner, Hannes Glatz, Rita Wolf, Matthias Pöll, Daniel Köberl und Tanja Scherr durfte ich eine lustige und lehrreiche Studienzeit genießen. Sie motivierten und unterstützten mich, um mein Studium zügig zu absolvieren.

Zum Abschluss gilt ein besonderer Dank meinen Eltern und meinen Geschwistern, die mich immer auf meinem Lebensweg unterstützten, mir das Studium ermöglichten und mir auch in schwierigen Situationen mit Rat und Tat zur Seite standen.



# Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit umfasst eine Studie zu Einflussparametern auf das Tragverhalten von in Holz eingeklebten Blechen. Es wurden experimentelle Untersuchungen an zugbeanspruchten Hirnholzverbindungen unter Variation von (i) Holzart, (ii) Oberflächenbeschaffenheit, (iii) Geometrie und Dicke von perforierten und nicht perforierten Stahl und Aluminium Blechen unterschiedlicher Materialgüte durchgeführt.

Außerdem wurden zur Ermittlung der Schertragfähigkeit eines schmalseitig in Brettsperrholz applizierten Bleches Scherprüfungen durchgeführt. Um Aussagen über den Einfluss der Anordnung des Bleches in den Brettsperrholzelementen auf das Tragverhalten einer vorwiegend auf Scheren beanspruchten Verbindung treffen zu können, wurden zwei Positionen ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) in Bezug auf die Faserorientierung der Brettlage, in die das Blech eingeklebt wurde, und der Hauptbeanspruchungsrichtung definiert.

Zur Analyse und Bewertung der Resultate der experimentellen Untersuchungen und zur Identifikation wesentlicher Einflussparameter auf vorhandene Spannungsspitzen in der Klebefuge, die eine Vorhersage des Versagens und damit der Tragfähigkeit ermöglichen sollen, wurden unterschiedliche Berechnungsansätze herangezogen und verglichen.

# Abstract

This master thesis presents a study on adhesively bonded joints made of glued in plates with special focus on relevant parameters affecting the load-bearing behaviour of the glued connection.

Experimental tests on end-grain joints axially loaded in tension were carried out by varying the (i) wood species, (ii) surface treatment, (iii) geometry and thickness of unperforated and perforated steel and aluminium plates of different grades. Furthermore, a  $14^\circ$  shear test configuration was used to verify the bearing capacity of a glued in steel plate connection applied in the narrow face of two cross laminated timber (CLT) elements. In order to investigate different load situations, two shear test series ( $0^\circ$  and  $90^\circ$ ) related to the orientation of the load and the grain direction of the wooden adherend were carried out.

In order to evaluate test results and to identify main parameters affecting the stresses distributions in the adhesion zones of bonded joints, analytical and numerical studies were conducted based on different modelling approaches.



# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1-1 MOTIVATION, ZIEL DER ARBEIT.....	1
<b>KAPITEL 2: BRETTSPERRHOLZ .....</b>	<b>2</b>
2-1 VERBINDUNGSTECHNIK FÜR BSP .....	3
2-1.1 Konzeptstudie von Verbindungen mit eingeklebtem Bleche zur Fügung von BSP-Elementen .....	6
2-1.1.1 Wand-Deckenanschluss.....	6
2-1.1.2 faltwerke .....	7
2-1.1.3 Problematik von eingeklebten Blechen .....	10
2-2 VOR- UND NACHTEILE VON BSP.....	11
<b>KAPITEL 3: STAND DER TECHNIK.....</b>	<b>12</b>
3-1 ALLGEMEIN.....	12
3-2 ENTWICKLUNG DER KLEBEVERBINDUNG .....	12
3-3 WEITERE EINGEKLEBTE VERBINDUNGSMITTEL .....	14
3-4 EINGEKLEBTE STAHLBLECHE .....	15
<b>KAPITEL 4: MECHANISCHES VERHALTEN .....</b>	<b>34</b>
4-1 ALLGEMEIN.....	34
4-2 VERBUNDWIRKUNG VON KLEBEVERBINDUNGEN .....	35
4-2.1 Adhäsion.....	35
4-2.2 Kohäsion.....	35
4-2.3 Oberflächenspannung .....	36
4-2.4 Benetzung .....	36
4-3 KLEBTECHNISCHE EIGENSCHAFTEN METALLISCHER WERKSTOFFE ....	37
4-4 BRUCHVERHALTEN VON KLEBEVERBINDUNGEN .....	38
4-4.1 Bruchmechanismen in Klebeverbindungen.....	38
4-4.1.1 Adhäsionsbruch .....	38
4-4.1.2 Kohäsionsbruch .....	38
4-4.2 Versagensmechanismen von Verbindungen mit in Holz eingeklebten Blechen .....	39
4-4.3 Schälspannungen .....	39
4-4.4 Einfluss der Klebefugengeometrie .....	40
4-4.5 Einfluss der Oberflächengeometrie .....	41
4-5 KETTENMODELL .....	41

<b>KAPITEL 5: RECHENMODELLE FÜR KLEBEVERBINDUNGEN.....</b>	<b>43</b>
5-1	ALLGEMEINES..... 43
5-2	INGENIEURMÄSSIGE ABSCHÄTZUNG..... 44
5-3	RECHENMODELLE ZUR ERMITTLUNG DER SCHUBSPANNUNGEN IN KLEBEVERBINDUNGEN ..... 47
5-3.1	Einführung und Überblick ..... 47
5-3.2	Herleitung des Schubspannungsverlaufes nach Volkersen..... 52
5-3.2.1	Lösungen für spezielle Randbedingungen ..... 56
5-3.2.2	PUSH-PULL Konfiguration ..... 57
5-3.2.3	PULL-PULL Konfiguration..... 59
5-3.2.4	Einfluss relevanter Parameter auf die Verteilung der Schubspannungen ..... 61
5-3.3	„TOM“-Theorie ..... 62
5-3.3.1	Zug-Zug-Versuch..... 63
5-3.4	Rechenmodell nach Goland und Reissner ..... 67
5-3.5	Rechenmodelle nach Hart-Smith ..... 69
5-3.6	Bilinearer Verbundansatz mit Entfestigung..... 73
5-3.7	Probabilistisches Rechenmodell..... 75
5-4	RECHENMODELLE ZUR ERMITTLUNG DER NORMALSPANNUNGEN IN KLEBEVERBINDUNGEN ..... 76
5-4.1	elastisch gebetteter Balken..... 76
5-4.1.1	Allgemeines ..... 76
5-4.1.2	Differentialgleichung des elastisch gebetteten Balkens ..... 77
5-4.2	Analogie zur Ermittlung der Normalspannungen (Verbundbalken)..... 80
5-4.2.1	spezielle Lösungen für eine symmetrische Zugscherprüfung..... 83
5-5	NUMERISCHE RECHENMODELLE..... 86
<b>KAPITEL 6: PRÜFUNGEN.....</b>	<b>87</b>
6-1	ALLGEMEIN ..... 87
6-2	VERSUCHSMATERIALIEN ..... 90
6-2.1	Holzwerkstoffe..... 90
6-2.2	Klebstoff ..... 94
6-2.3	Blech ..... 94
6-3	VERSUCHSKONFIGURATIONEN ..... 95
6-4	PRÜFDATEN ..... 100
6-4.1	Holzfeuchte ..... 100

6-4.2	Rohdichte.....	100
6-4.3	Einzelauswertung der ZugPrüfungen .....	101
6-4.4	Einzelauswertung der Scherprüfungen.....	102
6-4.5	Statistische Auswertung .....	104
6-5	PRÜFSERIE 01 .....	106
6-5.1	Material .....	106
6-5.1.1	Aluminiumblech.....	106
6-5.1.2	Holzwerkstoff.....	107
6-5.2	Versuchsanordnung .....	107
6-5.3	Prüfkörpervorbereitung .....	108
6-5.4	Berechnung der Schraubeneindrehtiefe von Vollgewindeschrauben .....	109
6-5.5	Versuchsdurchführung .....	110
6-5.6	Auswertung.....	110
6-5.6.1	Tragfähigkeit .....	111
6-5.6.2	Vergleich der Aluminiumoberflächen .....	111
6-5.6.3	Spannungen .....	115
6-5.7	Schlussfolgerung Prüfserie 01 .....	117
6-6	PRÜSERIE 02 .....	119
6-6.1	Material .....	119
6-6.1.1	Blech.....	119
6-6.1.2	Holzwerkstoff.....	119
6-6.2	Probenvorbereitung .....	119
6-6.3	Versuchsdurchführung .....	119
6-6.4	Auswertung.....	120
6-6.4.1	Spannungen .....	121
6-6.5	Schlussfolgerung Prüfserie 02.....	121
6-7	PRÜSERIE 03 (PULL-PULL) .....	122
6-7.1	Material .....	122
6-7.1.1	Blech.....	122
6-7.1.2	Holzwerkstoff.....	122
6-7.2	Versuchsanordnung .....	122
6-7.3	Probenvorbereitung .....	124
6-7.4	Versuchsdurchführung .....	124

6-7.5	Auswertung.....	124
6-7.5.1	Tragfähigkeit.....	125
6-7.5.2	Vergleich der Tragfähigkeiten.....	126
6-7.5.3	Spannungen.....	128
6-7.6	Schlussfolgerung Prüfserie 03.....	131
6-8	PRÜFSERIE 04 (PUSH-PULL).....	132
6-8.1	Anordnung.....	132
6-8.2	Prüfdurchführung.....	133
6-8.3	Auswertung.....	134
6-8.3.1	Tragfähigkeit.....	134
6-8.3.2	Spannungen.....	136
6-8.4	Schlussfolgerung PrüfSerie 04.....	139
6-9	PRÜFSERIE 05 (SCHERPRÜFUNG).....	140
6-9.1	Material.....	140
6-9.1.1	Blech.....	140
6-9.1.2	Holzwerkstoff.....	141
6-9.2	Position der Bleche im BSP.....	142
6-9.3	Probenvorbereitung.....	143
6-9.4	Versuchsdurchführung.....	145
6-9.5	Auswertung.....	146
6-9.5.1	Holzfeuchte.....	147
6-9.5.2	Rohdichte.....	148
6-9.5.3	Tragfähigkeit.....	149
6-9.5.4	Scherspannungen in der Klebefläche.....	151
6-9.5.5	Steifigkeit der Verbindung.....	152
6-9.6	Schlussfolgerung Prüfserie 05.....	154
6-10	PRÜFSERIE 06 (PULL-PULL).....	155
6-10.1	Material.....	155
6-10.1.1	Blech.....	155
6-10.1.2	Holzwerkstoff.....	155
6-10.2	Versuchsanordnung.....	155
6-10.3	Probenvorbereitung.....	157
6-10.4	Versuchsdurchführung.....	159

6-10.5	Auswertung.....	161
6-10.5.1	Holzfeuchte.....	162
6-10.5.2	Rohdichte.....	164
6-10.5.3	Tragfähigkeit .....	166
6-10.5.4	Zugspannungen im Bruttoquerschnitt des Holzes .....	170
6-10.5.5	Zugspannungen im Blech .....	171
6-10.5.6	Scherfestigkeit in der Klebefläche.....	172
6-10.5.7	Steifigkeit der Verbindung .....	175
6-10.6	Schlussfolgerung PrüSerie 06.....	178
6-11	PRÜFSERIE 07 (PUSH-PULL).....	179
6-11.1	Versuchsanordnung .....	179
6-11.2	Versuchsdurchführung .....	179
6-11.3	Auswertung.....	181
6-11.3.1	Tragfähigkeit .....	181
6-11.3.2	Zugspannungen im Bruttoquerschnitt des Holzes .....	183
6-11.3.3	Zugspannungen im Stahl .....	184
6-11.3.4	Scherspannungen in der Klebefläche .....	185
6-11.3.5	Steifigkeit der Verbindung .....	187
6-11.4	Schlussfolgerung Prüfserie 07 .....	190
6-12	ERGEBNISVERGLEICH MIT LITERATUR.....	191
6-12.1	Vergleich mit [3] und [24].....	191
6-12.2	Vergleich mit [28] .....	192
<b>KAPITEL 7: SPANNUNGSVERGLEICHE .....</b>		<b>193</b>
7-1	ALLGEMEINES .....	193
7-2	VERLAUF DER SCHUBSPANNUNGEN .....	196
7-2.1	Variation der Einklebelänge .....	196
7-2.2	Variation des Blechmaterials.....	197
7-2.3	Variation der seitenholzdicke .....	197
7-2.4	Variation des Holzwerkstoffes .....	198
7-2.5	BSP-PrüfKörper .....	199
7-3	VERLAUF DER LÄNGSSPANNUNGEN .....	200
7-3.1	Variation der Einklebelänge .....	200
7-3.2	Variation des Blechmaterials.....	201

7-3.3	Variation der seitenholzdicke .....	201
7-3.4	Variation des Holzwerkstoffes.....	202
7-3.5	BSP-PrüfKörper .....	203
7-4	VERLAUF DER QUERZUGSPANNUNGEN .....	204
7-4.1	Variation der Einklebelänge .....	204
7-4.2	Variation des Blechmaterials .....	205
7-4.3	Variation der seitenholzdicke .....	205
7-4.4	Variation des Holzwerkstoffes.....	206
7-4.5	BSP-PrüfKörper .....	207
<b>KAPITEL 8: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>		<b>208</b>
8-1	ZUSAMMENFASSUNG .....	208
8-2	AUSBLICK .....	209
<b>ANHANG A VERZEICHNISSE.....</b>		<b>I</b>
A-1	Literaturverzeichnis .....	I
A-2	Abbildungsverzeichnis.....	V
A-3	Tabellenverzeichnis .....	XI
<b>ANHANG B BRUCHBILDER.....</b>		<b>XIII</b>

# KAPITEL 1: EINLEITUNG

## 1-1 MOTIVATION, ZIEL DER ARBEIT

---

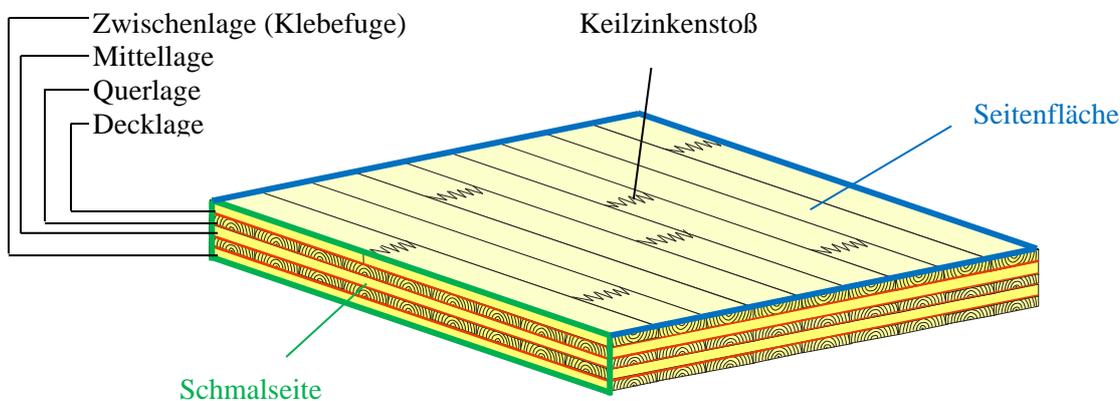
Entwicklungen in der Klebstofftechnologie führten in den letzten Jahrzehnten zu leistungsfähigen Anschlusslösungen im konstruktiven Holzbau. Derzeit kommen Klebstoffe im Bereich der Verbindungstechnik vorwiegend in Form von eingeklebten profilierten Stahlstäben in aufgelösten Tragstrukturen als Teil einer Bauteilverbindung von stabförmigen Tragelementen (Trägerstöße, Fachwerkstabanschlüsse) oder als Verstärkungen in hoch beanspruchten Bereichen (z.B.: Durchbrüche, Ausklinkung) in Holzbauteilen zum Einsatz. Ferner werden eingeklebte Flachkörper (z.B. Streckmetall, Lochblech) insbesondere zur Herstellung von Verbundbauteilen herangezogen. In Anbetracht der Vorzüge einer derartigen Verbindungstechnologie (hohe Steifigkeiten und Festigkeiten), welche sich im Flugzeug- und Automobilbau bereits seit Jahrzehnten etablieren konnte, wird die Klebetechnik auch im Baubereich und in diesem Zusammenhang auch im Holzbau immer mehr an Bedeutung gewinnen. In der Holzmassivbauweise, die sich durch ihren hohen Vorfertigungsgrad und geringe Montage- und Stellzeiten auszeichnet, spielt die Verbindungstechnik eine zentrale Rolle. Dabei gilt es, für die Bauprodukte Brettsperholz und Furnierschichtholz geeignete und effiziente Verbindungslösungen zu entwickeln. Insofern bietet die Klebetechnik eine Alternative zu traditionellen Verbindungstechniken und könnte speziell bei Systemverbindern zu einfachen und wirtschaftlichen Lösungen führen. Daraus lässt sich die Motivation der vorliegenden Arbeit ableiten, die einen Beitrag zur Entwicklung derartiger Anschlüsse darstellen soll.

Ziel der Arbeit ist es, basierend auf den Erfahrungen und Ergebnissen vorangegangener Forschungsarbeiten das Kurzzeittragverhalten von eingeklebten Blechen unter Zug- und Scherbeanspruchung mittels experimenteller Methoden zu untersuchen. Aufgrund der Beobachtungen in [28] sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit weiterführende Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Oberflächenprofilierungen, -perforierungen, sowie Blecheigenschaften, Blechdicke auf das Tragvermögen durchgeführt werden. Des Weiteren sollen unterschiedliche theoretische Ansätze zur Berechnung derartiger Klebeverbindungen zusammenfassend dargestellt und diskutiert werden. Die Abklärung der beeinflussenden Parameter auf die Interaktion zwischen den drei Verbundpartnern Holz, Klebstoff und Blech steht dabei im Vordergrund der theoretischen Untersuchungen.

## KAPITEL 2: BRETTSPERRHOLZ

[9], [10], [42]

Brettsperrholz (BSP) ist ein flächenhafter Holzwerkstoff, der aus mindestens drei kreuzweise verklebten Brettlagen hergestellt wird. Im Rahmen dieser Arbeit bezeichnen die Decklagen die oberste und die unterste Schicht im Querschnittsaufbau eines Brettsperrholzelementes. Als Querlagen werden jene Schichten definiert, deren Faserrichtung orthogonal zur Decklage orientiert ist. (siehe Abbildung 1)



*Abbildung 1: Bezeichnungen für ein fünfgeschichtig aufgebautes Brettsperrholzelement, [9]*

Durch die schichtweise und symmetrische Anordnung keilgezinkter Brettlamellen, deren Faserrichtung benachbarter Schichten rechtwinklig orientiert ist, ergeben sich die für das Bauprodukt charakteristischen Eigenschaften, die eine große Breite an Anwendungsmöglichkeiten für den Einsatz in Tragkonstruktionen bieten. In Bezug auf die Tragwirkung werden BSP-Elemente vorwiegend als großformatige Platte in Deckenelementen und als Scheibe in Wandelementen eingesetzt. Sonderformen für Dachkonstruktionen, wie einfache und komplexe Faltradwerke, können aus BSP ebenso hergestellt werden, wie Schalentragwerke (Tonnendach). Die folgende Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten von BSP.

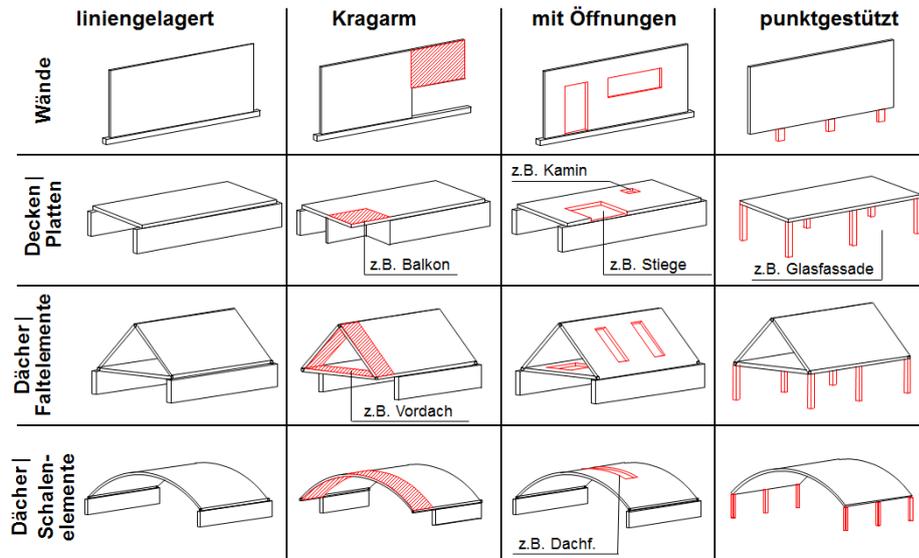


Abbildung 2: Einsatzmöglichkeiten von BSP, [10]

Aufgrund der Sperrwirkung der sich aus dem orthogonal geschichteten Querschnittsaufbau ergibt, spielen klimatisch bedingte Quell- und Schwinderscheinungen meist eine untergeordnete Rolle, was gerade im Hinblick auf die Verwendung von schmalseitig und innenliegend eingeklebten Anschlusselementen vorteilhaft ist.

## 2-1 VERBINDUNGSTECHNIK FÜR BSP

[22], [39], [40], [42], [58]

Die Verwendung großformatiger BSP-Elemente in Bauwerken, wie sie im ein- und mehrgeschossigen Wohnbau konzipiert werden, führt zu einer vergleichsweise geringen Anzahl an Kontaktfugen. Dabei kann eine Unterscheidung der Kontaktfugen nach [40] erfolgen (siehe Abbildung 3):

### Kontaktfugen:

- (i) Wand - Wand oder Decke – Decke
- (ii) Wand – Decke
- (iii) Wand – Fundament

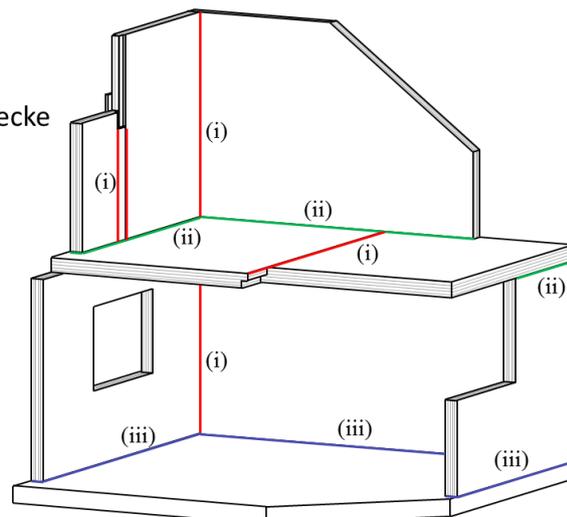


Abbildung 3: Kontaktfugen einer Brettsperrholzstruktur, [40]

Entsprechend den statischen und bauphysikalischen Erfordernissen werden die Stoßstellen kraftschlüssig und dicht miteinander verbunden.

Im Allgemeinen lassen sich die vorwiegend zur Anwendung kommenden mechanischen Verbindungsmittel zur Fügung der einzelnen Elemente in folgende Kategorien einteilen:

- stiftförmig mechanische wirkende VM:
  - vorwiegend auf Abscheren beansprucht: Bolzen, Stabdübel, Nägel
  - vorwiegend auf Herausziehen beansprucht: Holzschrauben
- flächenförmige, mechanisch wirkende VM: Einlass-/ Einpressdübel
- Sonstige Verbindungen: Nagelplatten, Stahlformteile, Systemverbinder, Sondersysteme

Rund 60% der Verbindungen von BSP-Elementen werden durch den Einsatz von Holzschrauben hergestellt [40].

Anzahl und Anordnung (Abstände, Winkel zur Faserrichtung, Schmalseite, Seitenfläche, ...) werden abhängig von der Beanspruchungssituation und den statischen Erfordernissen gewählt. Die Applikation der Holzschrauben, wie in Abbildung 4 dargestellt, erfolgt von Hand, direkt auf der Baustelle und kann je nach Anzahl der einzubringenden Schrauben einen beträchtlichen Kostenfaktor in der Errichtung des Objektes ergeben.



*Abbildung 4: baustellenseitige Verschraubung von BSP-Elementen, [58]*

Folglich stellt sich die Frage, inwieweit sich diese Kosten durch die Entwicklung alternativer Verbindungstechniken reduzieren lassen.

Der Ansatz eine Kostenreduktion durch werkseitig vormontierte Verbindungsmittel zu erreichen, wird bei der Entwicklung von Systemverbindern verfolgt. Als Beispiel einer Systemverbindung sei an dieser Stelle der sogenannte X-Rad Verbinder der Firma Rotho Blaas GmbH angeführt (siehe Abbildung 5).

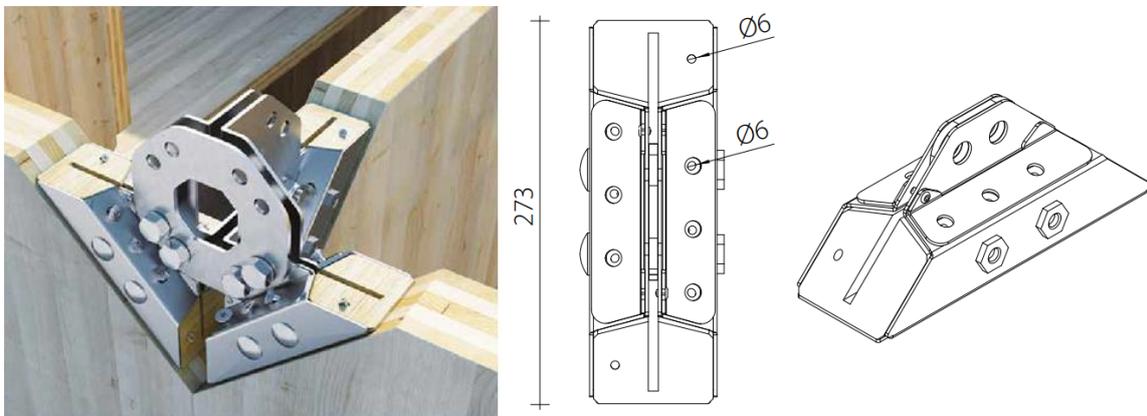
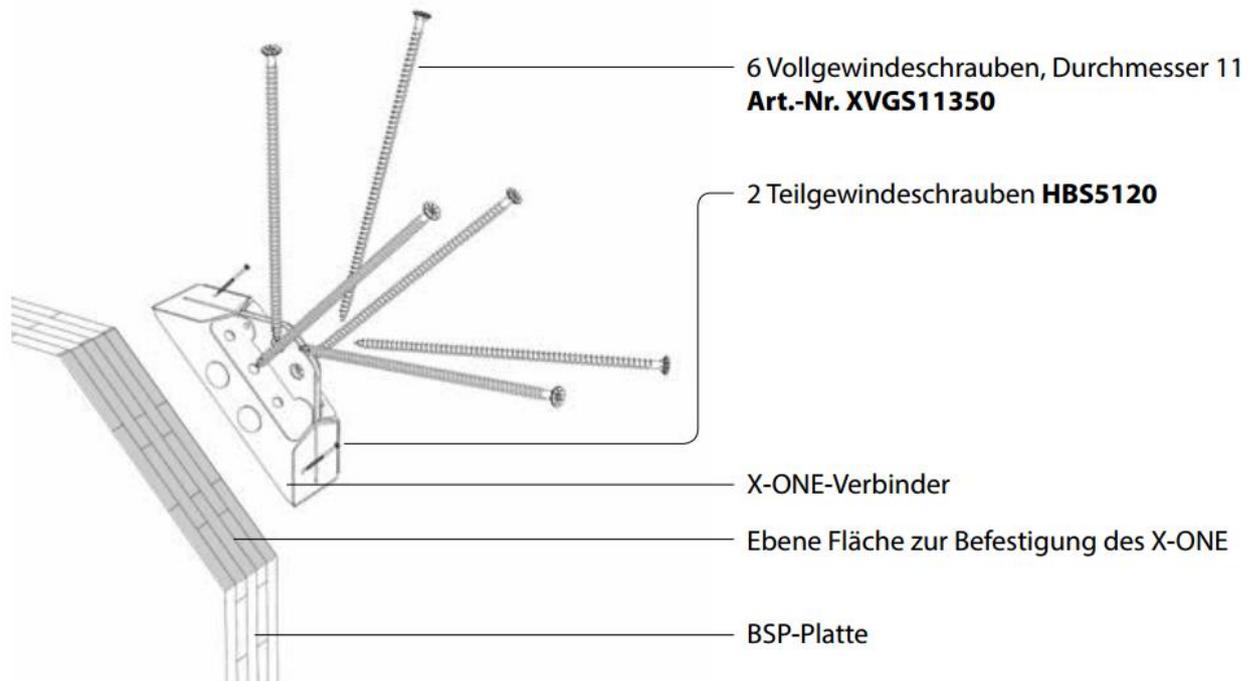


Abbildung 5: Systemverbinder für BSP, X-RAD, Rotho Blaas GmbH, [22]

## 2-1.1 KONZEPTSTUDIE VON VERBINDUNGEN MIT EINGEKLEBTEM BLECHE ZUR FÜGUNG VON BSP-ELEMENTEN

Im Folgenden werden beispielhaft zwei Anschlusslösungen (Wand-Deckenanschluss und Faltwerksverbindung) zur Fügung von BSP-Elementen vorgestellt, die sich durch Verwendung eingeklebter Bleche als Teil einer Systemverbindung entwickeln lassen. Im Gegensatz zu den vorwiegend verwendeten mechanischen stiftförmigen Verbindungsmitteln wie z.B. Holzschrauben, die lokal (punktuell) Zug-, Druck- und Scherkräfte zwischen den Kontaktfugen übertragen, ermöglicht der Einsatz von bereichsweise oder entlang der gesamten Elementkante schmalseitig eingeklebter Bleche (flächiger Elemente) eine flächige Einleitung und damit einen kontinuierlichen Kräfteintrag entlang einer Elementkante. Die Kräfteinleitung bei schmalseitiger Anordnung des Bleches erfolgt somit nicht punktuell sondern linienförmig entlang der Elementkante, wodurch sich hohe Anschlusskräfte bei vergleichsweise kurzen Einbindelängen erreichen lassen.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass insbesondere die Herstellung derartiger Verbindungen mit großer Sorgfalt erfolgen muss und es zur Gewährleistung der Funktion derartiger Anschlüsse innerhalb einer tragenden Konstruktion noch intensiver Forschungstätigkeit in Bezug auf das Langzeittragverhalten einschließlich möglicher tragfähigkeitsmindernder Einflüsse (Temperatur, wechselnde Klimabedingungen) bedarf.

Folglich sind die in Abbildung 2.6 und Abbildung 2.9 dargestellten Verbindungslösungen als Konzeptstudien zu betrachten und sind nach derzeitigem Stand nicht in der Form in der Praxis ausführbar. Sie sollen lediglich zur Veranschaulichung einer möglichen Anwendung dienen, die die Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit getätigten experimentellen und theoretischen Untersuchungen bildet.

### 2-1.1.1 Wand-Deckenanschluss

Eine Möglichkeit zwei BSP-Elemente längs der Elementkanten kraftschlüssig miteinander zu verbinden, besteht in der Verwendung von eingeklebten Systemverbindungselementen, die im Werk vorgefertigt, eine einfache und rasche bauseitige Montage bewerkstelligen sollen.

Zur Vorfertigung der in Abbildung 2.6 dargestellten Verbindung erfolgt zunächst der schmalseitige Abbund des BSP-Elementes. Dabei werden erforderliche Aussparungen zur Anordnung und Montage des fertigen Stoßes gefräst. Im nächsten Schritt werden schmalseitig Schlitze und falls erforderlich Öffnungen zur Klebstoffapplikation mittels Kreissäge und/oder Fräs-/Bohrwerkzeug bereichsweise oder entlang der gesamten Elementkante hergestellt. Danach erfolgt der Klebstoffeintrag und das Einsetzen der Bleche bzw. des in Abbildung 2.6 dargestellten Winkelprofils. Bei Bedarf können zur mittigen Anordnung des Bleches im Schlitz Schweißpunkte am Blech gesetzt werden. Falls erforderlich werden nach Aushärten des Klebstoffes zur Querschnittsverstärkung stiftförmige Verbindungsmittel in der Seitenfläche angeordnet. Nach Beendigung der Aushärtereaktion und des Erreichens der Endfestigkeit des verwendeten Klebstoffsystems können die Elemente nun auf der Baustelle eingebaut werden. Der Anschluss dient neben der Fügung der Elemente gleichzeitig als Hebevorrichtung. Durch entsprechende Ausbildung des Stahl-Stahl Anschlusses kann die Nachgiebigkeit der Verbindung an das Tragsystem angepasst werden. Zudem könnte dadurch im Versagensfall ein duktileres Tragverhalten der Verbindung gewährleistet werden.

Die bauseitige Montage des vorgefertigten BSP-Wandelements kann durch die Systemverbindung rasch erfolgen. Das Wandelement wird durch den Kran auf die bereits im Fundament oder der Deckenplatte eingebauten Gewindeanker aufgesetzt. Mögliche Abweichungen in der Maßgenauigkeit können durch den Stahlanschluss ausgeglichen werden.

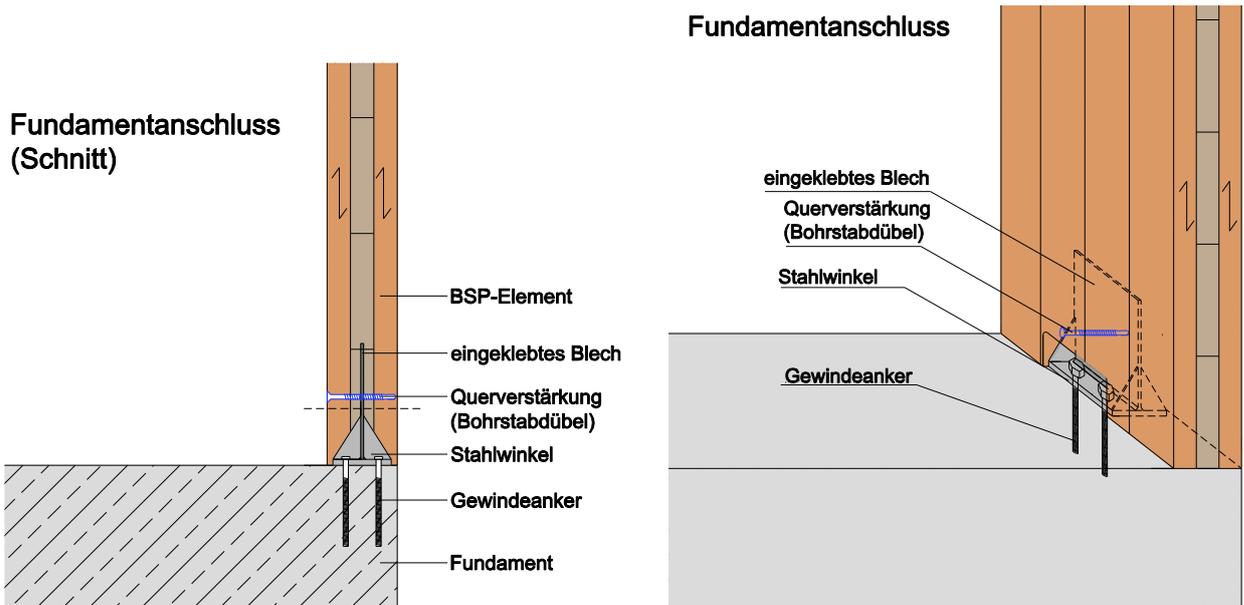


Abbildung 2.6: eingeklebttes Verbindungselement

### 2-1.1.2 Falwerke

[41]

Neben der Verwendung von BSP in Form von Wand- und Deckenelementen erscheint ein Einsatz von BSP in faltwerkartigen Tragstrukturen zur Ausbildung von weitgespannten Dachkonstruktionen als durchaus interessanter Ansatz. Falwerktragwerke sind räumliche Flächentragwerke, die aus schubfest miteinander verbundenen dünnen Platten bzw. Scheibenelementen bestehen. Durch Kombination dieser flächigen Elemente lassen sich aus gestalterischer aber auch aus technischer Sicht ästhetisch anspruchsvolle sowie effiziente Tragwerkslösungen entwickeln. Bei Faltragwerken werden die Lasten vorwiegend über Scheibenbeanspruchung abgetragen. Die Plattentragwirkung dient hauptsächlich zur lokalen Querverteilung der Belastung. Um die Vorzüge einer Falwerkstruktur nutzen zu können, bedarf es einer Verbindungstechnik, die eine möglichst schubfeste Kopplung der Einzelelemente entlang der Verbindungskante bewerkstelligt. Hierfür erscheint insbesondere die Verwendung von eingeklebten Blechen, durch deren hohe Tragfähigkeit gegenüber Scherbeanspruchung, als Teil einer Anschlusslösung als sinnvoll.

[7]

Bei der Verbindung von Falwerkselementen aus BSP soll grundsätzlich eine möglichst gelenkige Kantenausbildung angestrebt werden. Biegesteife Kanten sollen nach Möglichkeit vermieden werden, da die kleinen Kontaktflächen der Verbindungsstellen nur schwer und unter hohem Aufwand durch flächige Verklebungen realisierbar wären. Gelenkige Kantenanschlüsse müssen wie in der folgenden Abbildung 2.7 sowohl Schubkräfte, als auch vertikale und horizontale Gelenkskräfte übertragen. Dabei entstehen die Schubkräfte durch die globale Falterkswirkung. Die Vertikal- und Horizontalkräfte werden durch die lokale Querbiege Wirkung und durch die Lastverteilung in den Kanten verursacht.

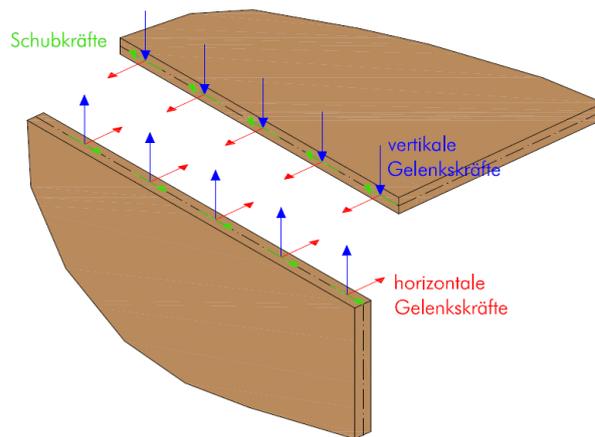


Abbildung 2.7: auftretende Schnittkräfte in der Faltwerkskante, [7]

Abbildung 2.9 zeigt ein mögliches Verbindungskonzept für einen gelenkigen Anschluss zwischen zwei Faltwerksscheiben aus BSP.

In die BSP-Elemente werden werkseitig bereichsweise Bleche eingeklebt, im Bereich des Kantenstoßen mit Dichtbändern versehen und mit einer Quersicherung (Bohrstabdübel) am Ende der Einklebelänge verstärkt. In weiterer Folge werden die BSP-Elemente auf die Baustelle geliefert. Vor der Montage der Gelenkverbindungen (Scharnierplatte) werden die BSP-Elemente bauseitig zunächst nebeneinander auf einer ebenen Fläche aufgelegt. Im nächsten Schritt können die Scharnierplatten in die Aussparungen eingesetzt und mit den eingeklebten Blechen mittels Schrauben verbunden werden. Abschließend erfolgt die Faltung durch Anheben am Elementstoß. Als Hebevorrichtung dienen Schraubstangen an der Scharnierplatte. Zur abschließenden Fixierung werden nun Keile gesetzt. Im letzten Schritt werden die Montageöffnungen durch Futterhölzer geschlossen.

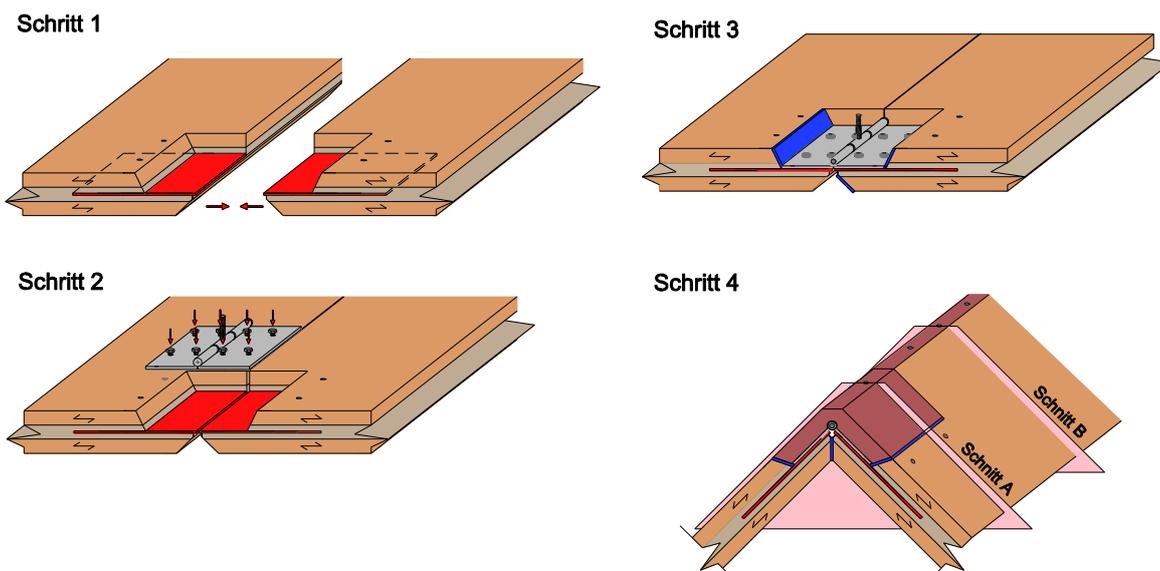
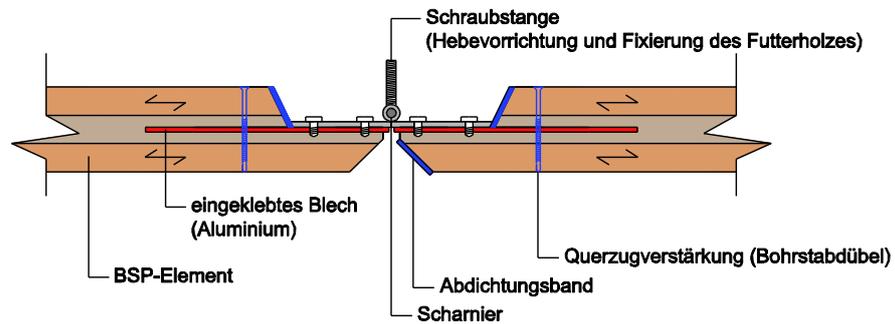
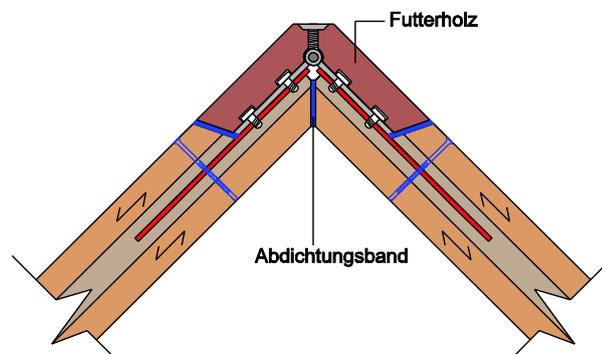


Abbildung 2.8: Herstellung eines gelenkigen Faltwerksanschlusses

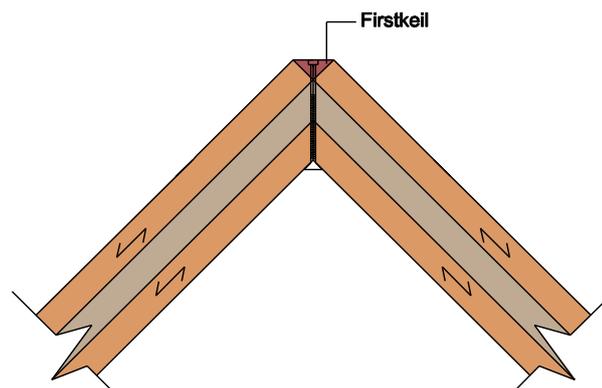
### Baustellenmontage der Elemente (eben)



### Endmontage der Elemente (Schnitt A)



### Endmontage der Elemente (Schnitt B)



**Abbildung 2.9: gelenkiger Faltwerksanschluss**

Die Abbildung 2.10 nach [42] zeigt eine mögliche Ausführung eines Faltwerkes als stützenfreien Dachstuhl. Dabei kann die Konstruktion über die zuvor genannten Systemverbinder an der Firstkante verbunden werden, und kann anschließend auf den Giebelwänden gelagert werden. Somit entsteht unter dem Faltwerk ein stützenfreier Raum. Die horizontalen Kräfte wie z. B. Windeinwirkungen werden von den seitlichen Schubscheiben abgetragen. Die Vorteile der Faltwerks-Konstruktionen liegen neben der Materialersparnis im hohen Vorfertigungsgrad, welche eine kurze Bauzeit mit sich zieht. Bezüglich der

Erdbebensicherheit steht ein Dachbodenausbau in Holz-Massivbauweise klar im Vorteil gegenüber einer Beton-Massivbauweise. Die Horizontalkräfte, welche durch die Erdbebenkräften entstehen, nehmen bei der Holz-Massivbauweise auf Grund der leichteren Konstruktion nach oben hin stark ab, wodurch sich eine geringere Zusatzbeanspruchung auf das Gebäude ergibt.

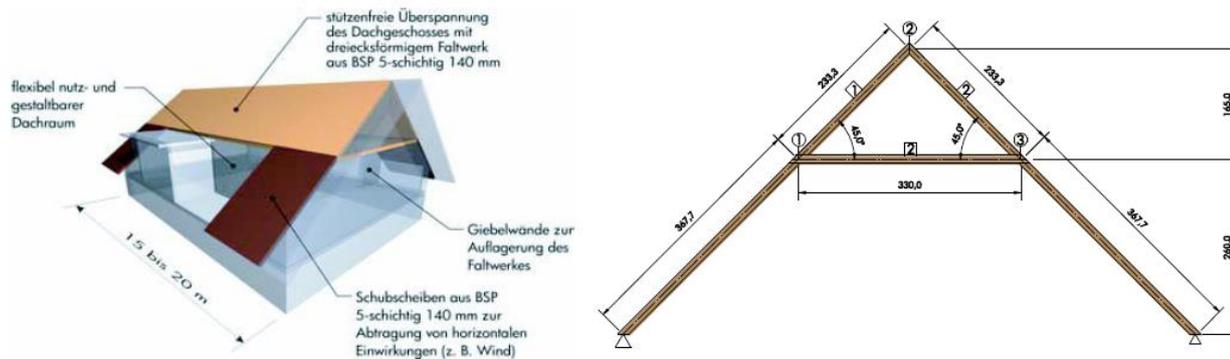


Abbildung 2.10: Dachgeschoss in Faltwerksbauweise, [42]

### 2-1.1.3 Problematik von eingeklebten Blechen

Im Vergleich zu Schrauben- oder Bolzenverbindungen, welche zum einen höheren Verformungen standhalten können und zum anderen geringeren brandschutztechnischen Anforderungen unterworfen sind, muss diesen beiden Aspekten bei geklebten Verbindungen von Faltwerkskanten besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Um ein frühzeitiges Versagen auszuschließen sind derartige Verbindungen fachgerecht und mit größter Sorgfalt herzustellen. Zudem müssen bereits in der Entwurfsphase mögliche Beanspruchungssituationen wie beispielsweise feuchteinduzierte Spannungen aufgrund von wechselnden Klimaverhältnissen oder hohe Temperaturen aufgrund von Brand oder sommerlicher Erwärmung in der Entwicklung eines geklebten Verbindungselements berücksichtigt werden. Auf Grund der Glasübergangstemperatur von Klebstoffen, welche bei ca. 80°C erreicht ist, verliert der Klebstoff sein Haftvermögen, wodurch die Tragfähigkeit des Bauteils nicht mehr gewährleistet werden kann. Aus brandschutztechnischen Aspekten werden die Grenzen der Einsetzbarkeit von geklebten Verbindungen bei einer Temperaturbeanspruchung von maximal 60°C festgelegt. Je nach Ausführung können Klebeverbindungen auf Holzfeuchteänderungen aufgrund wechselnder Klimaverhältnisse und auf damit einhergehende Quell- und Schwindverformungen des Holzes innerhalb des Bauteils und insbesondere im Nahbereich der Klebefuge sensibel reagieren. Hierzu ein Beispiel: im normalen Raumklima von rund 45% relativer Luftfeuchte erreicht die Holzfeuchte einen Wert von ca. 14%. In Nassräumen, in denen eine relative Luftfeuchtigkeit von rund 80% vorherrschen kann, steigt die Holzfeuchte auf ca. 18% an. Folglich entsteht eine Holzfeuchtedifferenz von 4%. Das Quellmaß von Holz beträgt rund 0,24 mm /  $\Delta 1\%$ -Holzfeuchtedifferenz, wodurch sich das Holz bei einem 1 m hohen Holzbauteil um rund 1 mm vergrößert. Versuche aus Kapitel 6 zeigen jedoch, dass die Klebeverbindungen bei Zugbeanspruchung nur Verformungen im Zehntelmillimeterbereich standhalten können. Daraus folgt dass unter den angeführten Randbedingungen im Bereich des Anschlusses von einem frühzeitigen Versagen der Klebeverbindung ausgegangen werden muss. Somit darf eine derartige Beanspruchungssituation bei einer geklebten Verbindung keinesfalls eintreten.

---

## 2-2 VOR- UND NACHTEILE VON BSP

---

### Vorteile:

- Durch eine witterungsunabhängige Produktion können großflächige, fertig abgebundene Brettsperrholz-Elemente angefertigt werden. Somit sind Rohbauten in kürzester Zeit auf der Baustelle realisierbar.
- Durch die kreuzweise Anordnung der Brettlagen weisen die Elemente nur ein geringes feuchteabhängiges Verformungsverhalten auf, wodurch sie sehr dimensionsstabil und passgenau eingebaut werden können.
- Die Elemente können mit individuellen Abmessungen gefertigt werden.
- Durch sein geringes Gewicht zeichnet sich BSP im Vergleich zu anderen Massivbauweisen besonders gut für Sanierungen im städtebaulichen Bereich aus. (Aufstockungen von Wohn- oder Industriebauten)

### Nachteile:

- Im Vergleich zum klassischen Massivbau fallen höhere Kosten an.
- Brandschutztechnisch stehen BSP-Elemente gegenüber Beton-oder Ziegelbauweisen im Nachteil.
- Durch den Klebstoff muss das BSP-Holz bei Abbrucharbeiten recycelt werden.

## KAPITEL 3: STAND DER TECHNIK

### 3-1 ALLGEMEIN

---

Anschlüsse bestehend aus eingeklebten Verbindungsmitteln bieten im Vergleich zu herkömmlichen Verbindungsarten, wie beispielsweise Schraubenverbindungen viele Vorteile, die im Folgenden aufgelistet werden [4]:

- eine hohe Steifigkeit
- durch innenliegende Stahlbleche ist ein Korrosionsschutz gegeben
- nicht sichtbare Verbindung erhöht das ästhetische Erscheinungsbild
- das Bauteil kann filigraner konstruiert werden
- der Holzquerschnitt wird hinsichtlich seines Tragvermögens effizienter genützt
- der Holzquerschnitt wird nur minimal geschwächt
- Im Versagensfall kann die Verbindung für ein duktileres Verhalten ausgelegt werden

### 3-2 ENTWICKLUNG DER KLEBEVERBINDUNG

---

[6], [12], [16],[31], [32], [36], [53]

Durch die stetigen Fortschritte in der Klebstofftechnologie entwickelt man Anfang der 1950er Jahre geklebte Anschlüsse für Stahlfachwerkbrücken. Besonders in der Flugzeugindustrie erkannte man sehr früh die vielen Vorteile dieser Verbindungsart. Erst Anfang der 1980er Jahren werden von Möhler und Lautenschläger an der Universität Karlsruhe vermehrt Forschungen mit eingeklebten Stahlstäben angestellt. Die Untersuchungen zielen speziell auf die erreichbaren Verbundfestigkeiten bei Verwendung zweier Klebstoffsysteme und die mögliche Beeinflussung der Festigkeitswerte gegenüber Klimabeanspruchung. Dabei wurden anfangs kleinere Bohrlöcher, als der Außendurchmesser des Stahlstabes in den Holzkörper vorgebohrt, um einen mechanischen Verbund zwischen Stahlstab und Holz zu erwirken. In späterer Folge ging man jedoch dazu über, das Bohrloch 1-2 mm größer als den Außendurchmesser des Stahlstabes herzustellen, um es anschließend mit Klebstoff zu verfüllen und so einen reinen Klebstoffverbund zu erzielen. Möhler et al. [31] stellt in seinen Versuchen, die mit in Resorcinharz eingeklebten Gewindestangen in Brettschichtholz durchgeführt wurden fest, dass bei Gewindestangen, die parallel zur Faserrichtung eingeklebt werden, ein sprödes Versagen des Verbundes zu beobachten ist. Die Festigkeitswerte ergeben eine weitgehende Unabhängigkeit gegenüber Klimabeanspruchung. Moers [32] stellt 1981 in seinen experimentellen Untersuchungen an der RWTH Aachen von in Voll- und Brettschichtholz faserparallelen eingeklebten Gewindestangen durch Polyesterharz fest, dass sich die Verbindung bis zum Bruch elastisch verhält und anschließend ein schlagartiges Versagen eintritt. Durch Querkzugspannungen, die aus der Lastausbreitung im Holz entstehen, reißen die Holzkörper hauptsächlich parallel zum Stab auf. Im Rahmen der Untersuchungen variiert Moers die Einbindelängen der Gewindestangen zwischen 50 mm und 100 mm. Durch die unzureichende Möglichkeit, die Qualität der Klebefuge nach dem Klebevorgang zu kontrollieren, wurde der Fertigung eingeklebter Verbindungen seit Beginn der Forschungstätigkeiten besondere Beachtung geschenkt.

Die Klebstoffapplizierung kann durch ein seitliches Bohrloch erfolgen, wodurch das Risiko von Lufteinschlüssen in der Klebefuge vermindert wird. Durch eine Längsnut an der Gewindestange kann ebenfalls eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffes erzielt werden. Zu den grundlegenden Überlegungen zählen neben der Einklebmethodik, auch der verwendete Klebstoff und die Versagensart. Feligioni et al. [16] stellt eine Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit eingeklebter Stäbe vom Klebstoffvolumen fest. Dabei führte er, wie in Abbildung 3.1 zu sehen, Versuche mit spröden und duktilen Klebstoffen aus Epoxidharz durch. Es ist zu erkennen, dass die Änderung des Klebstoffvolumens duktiler Klebstoffe einen großen Einfluss auf die Ausziehfestigkeit darstellt.

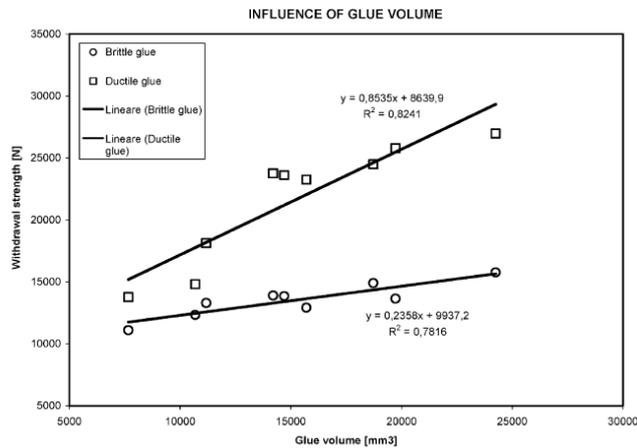


Abbildung 3.1: Einfluss des Klebstoffvolumens auf die Ausziehfestigkeit, [16]

Des Weiteren stellt Broughton und Hutchinson [12] in Versuchen mit eingeklebten Gewindestangen fest, dass die Optimierung der Klebstofffugendicke ebenso einen wesentlicher Parameter zur Steigerung der Tragfähigkeit und Scherfestigkeit darstellt. In der Abbildung 3.2 ist zu erkennen, dass die Vergrößerung der Klebstofffugendicke in der Kontaktfläche zwischen Klebstoff und Gewindestange eine deutliche Zunahme der maximalen Bruchlast und Scherfestigkeit mit sich zieht, wohingegen eine größere Fugendicke in der Kontaktfläche Holz-Klebstoff keine Erhöhung der Scherfestigkeit zu haben scheint.

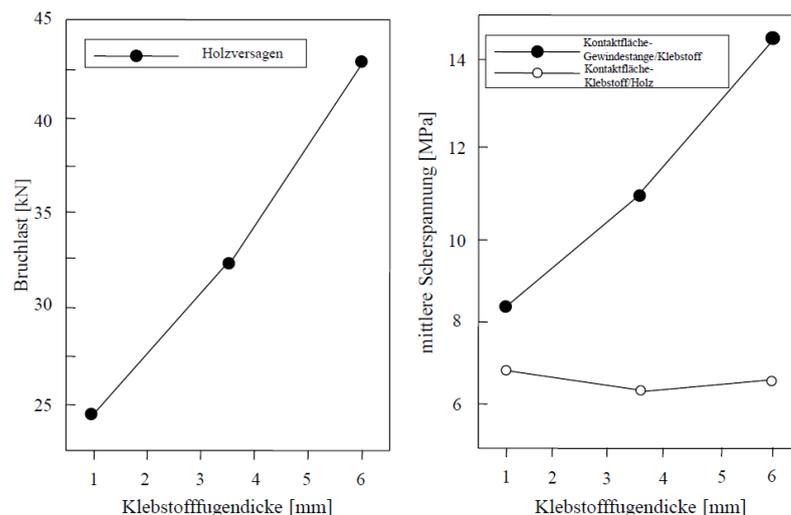


Abbildung 3.2: Einfluss der Klebstofffugendicke auf die Bruchlast und die Scherspannung [12]

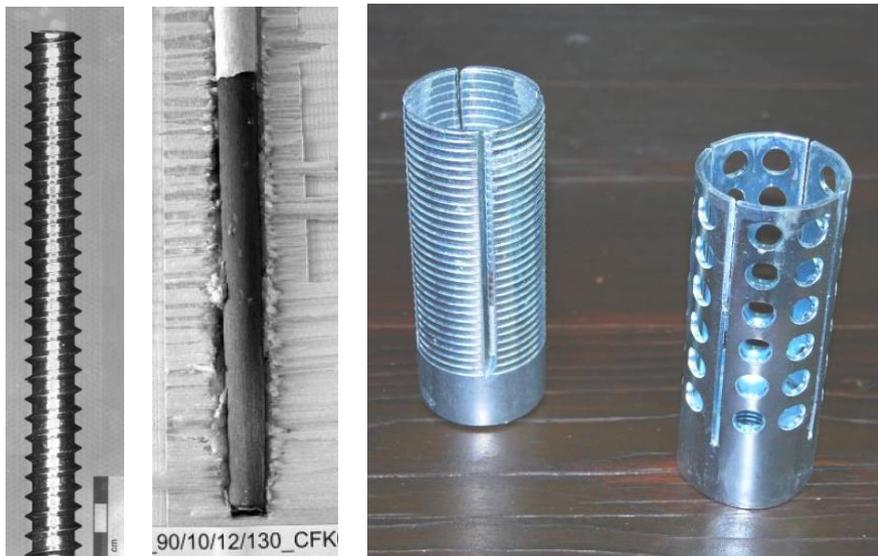
### 3-3 WEITERE EINGEKLEBTE VERBINDUNGSMITTEL

[36]

Neben eingeklebten Gewindestangen wurden auch neue Arten von Verbindungsmittel, die in Holz eingeklebt werden, entwickelt. Dabei wurde in den vergangenen Jahren besonders an der Universität Kassel vermehrt das Verbundverhalten von in Holz eingeklebten faserverstärkten Kunststoffstäben untersucht. Diese Verbindungsart dient in der Praxis dazu, zimmermannsmäßige Verbindungen, die ursprünglich nur Druckkräfte übertragen konnten, nach ihrer Ertüchtigung mittels Kunststoffstäben auf Zug zu beanspruchen. Gegenüber Stahlstäben sind eingeklebte Kunststoffstäbe in ihrer Korrosionsbeständigkeit und dem einfacheren Zuschnitt vorteilhafter. Des Weiteren können sie im Vergleich zu Stahlstäben durch ihre höhere Festigkeit mit geringeren Stabdurchmessern eingebaut werden.

[43]

Eine weitere Holzverbindung wurde, wie die Abbildung 3.3 zeigt, durch eingeklebte Rohrhülsen aus Stahl entwickelt. Schreyer untersucht in [43] das Tragverhalten von hohlzylindrischen Rohrhülsen, welche durch Rippen und in späterer Folge auch durch Lochungen einen besseren Klebeverbund mit dem Holz erzielen sollen. Am Ende der Hülse wird eine Stahlkappe mit Innengewinde aufgeschweißt, wodurch sich mittels Gewindestange eine Anschlussverbindung ausbilden lässt. Schreyer führt im Rahmen der Untersuchungen Druck-, Zug- und Scherversuche durch. Dabei zeigen die Zugversuche ein abruptes Spröbruchversagen. Jene Proben auf Druck zeigen ein duktileres Versagen, was auf die Verformungscharakteristik des Holzes zurückzuführen wird. Um die Tragfähigkeit der Verbindung zu steigern, ging man von sandgestrahlten Oberflächen hin zu gerippten Strukturen und in weiterer Folge zu gelochten Oberflächen.



**Abbildung 3.3: eingeklebte Gewindestange (links) [15], faserverstärkte Kunststoffstäbe (Mitte) [36], HSK® Rohrverbinder (rechts) [54]**

### 3-4 EINGEKLEBTE STAHLBLECHE

[29]

Im Vergleich zu eingeklebten Gewindestangen, deren Bemessung bereits in den entsprechenden Normen geregelt wird, gibt es auf dem Gebiet der eingeklebten Bleche noch Forschungsbedarf. Die größere Querschnittsschwächung des Holzes, die sich durch eingeklebte Bleche ergeben, ließ die Forschungstätigkeit lange Zeit auf der Strecke. Bereits in den 1950iger Jahren entwickelte Dr. Emil Staudacher neue Knotenlösungen mit in Holz eingeklebten Stahllaschen. Seine Idee wird im Zuge des Baues einer Werkshalle in der Schweiz verwirklicht. Dabei wurden Fachwerksknoten als leicht demontierbare, gelenkige Verbindungen mit Metallaschen und Bolzen ausgeführt. Anfängliche Probleme beim Verklebungsprozess wurden durch die Entwicklung kalthärtender Epoxidharze in den darauffolgenden Jahren weitgehend eliminiert.

[24]

Gruber et al. führt 1988 weiterführende Untersuchungen an eingeklebten Blechen durch. Den Fokus der Untersuchung legt er auf die Oberflächenbehandlung der Metalloberflächen, um die mechanische Adhäsion und somit die Verbundwirkung weiter zu steigern. Des Weiteren variiert er den Klebstofftyp, die Blechart, das Lagerungsklima, die Einklebelänge sowie die Einleimrichtung. Die Prüfungen führen, wie in Abbildung 3.4 ersichtlich, zu den Ergebnissen, dass die mechanische Adhäsion bis zu einer bestimmten Tiefe der Oberflächenrauigkeit steigt und bei weiterer Zunahme wieder fällt. Sandgestrahlte Oberflächen erzielen im Gegensatz zu geschliffenen oder nur entfetteten Oberflächen wesentlich bessere Scherfestigkeiten.

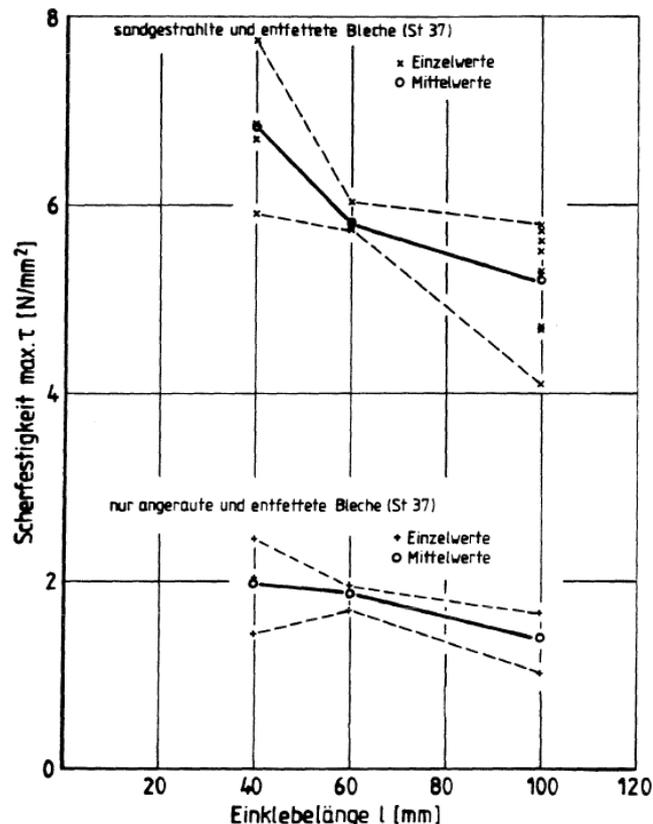


Abbildung 3.4: Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung des Bleches und der Einklebelänge, [24]

Deutlich zu erkennen ist in Abbildung 3.5, dass die PU-Klebstoffe wesentlich höhere Scherfestigkeiten erreichen, als es bei den Epoxidharzen (EP) der Fall ist. Die Resorzinharz-Prüfkörper (PR) schneiden vergleichsweise schlecht ab. Auf Grund der größeren Oberflächenrauigkeit und somit besseren Adhäsionsvermögens liegen die Festigkeitswerte der sandgestrahlten V4a-Bleche deutlich höher, als jene für die feuerverzinken St 37 Bleche. Die Zugscherprüfkörper schneiden im Vergleich zu den Druckversuchskörpern deutlich schlechter ab, was auf eine Überlagerung der Scherspannungen mit den beim Zugscherversuch auftretenden Querzugspannungen zurückzuführen ist. Deutlich zu erkennen ist, dass die Scherfestigkeit mit zunehmender Einklebelänge (50, 100, 150 mm) abnimmt.

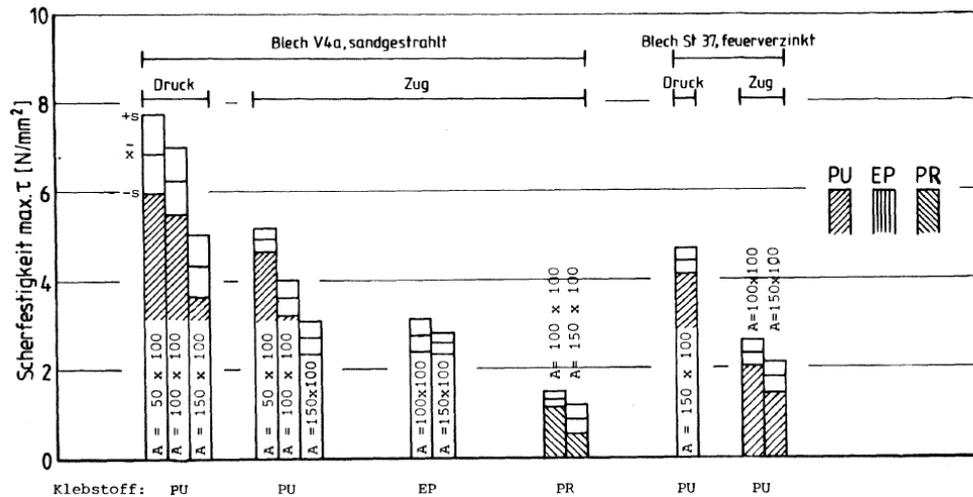


Abbildung 3.5: Einfluss der Blech- und Klebstoffart auf die Scherfestigkeit (Druck- und Zugscherversuche), [24] [3]

In den darauffolgenden Jahren werden an der Forschungs- und MPA Baden-Württemberg weiterführende Forschungsarbeiten hinsichtlich der Klebstoffgugendicke, der Temperatur- und Langzeitbeanspruchung und zur Relativverschiebung des Bleches zum Holzfügeteil durchgeführt. Um die Versuchsergebnisse interpretieren zu können, werden analytische und numerische Berechnungen der Schubspannungsverläufe und Relativverschiebungen durchgeführt. Neben Prüfserien mit Epoxidharzen und Polyurethanen werden auch Prüfserien mit Polyurethan-Kleb-Dichtmassen in die Versuche miteinbezogen. Diese wird jedoch auf Grund ihrer verhältnismäßig geringen Tragfähigkeit nicht weiter untersucht. Zu erwähnen ist jedoch, dass wie in Abbildung 3.6 zu erkennen, bei den Polyurethan-Kleb-Dichtmassen ein hohes Relativverschiebungsverhalten mit ausgeprägtem elastischem Verhalten zu erkennen ist.

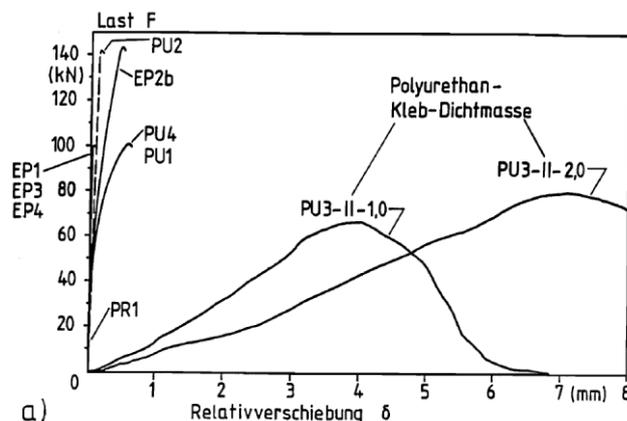


Abbildung 3.6: Einfluss der Klebstoffart auf die Last und die Relativverschiebung, [3]

Die vorliegende Arbeit befasst sich auch mit dem Einfluss von Perforierungen durch gelochte Bleche, daher werden im Folgenden die bisherigen Erkenntnisse mit Lochblechen zusammengefasst:

[6]

Die MPA Wiesbaden widmet sich seit dem Jahre 2007 vermehrt der Untersuchung von eingeklebten Lochblechen. Dabei führt Bathon et al. neben Temperaturversuchen, auch Druckscherversuche sowie Rahmeneckenversuche mit eingeklebten Lochblechen durch. Verwendet werden 2,5 mm dicke Bleche mit Lochdurchmessern von 3 mm bis 12 mm. Die Druckscherversuche werden mit zwei eingeklebten Blechen, welche an einem 10 mm dicken Stahlblech aufgeschweißt werden, durchgeführt. Durch das Fließen entlang der äußersten Lochreihen, tritt ein Versagen durch Erreichen der Stahlzugfestigkeit ein, was auf eine sehr duktile Verbindung schließen lässt. In Abbildung 3.7 ist im Kraft-Verschiebungs-Diagramm zunächst ein linear-elastischer Anstieg zu erkennen, der in weiterer Folge in einem ausgeprägten plastischen Verhalten zum duktilen Bruch führt.

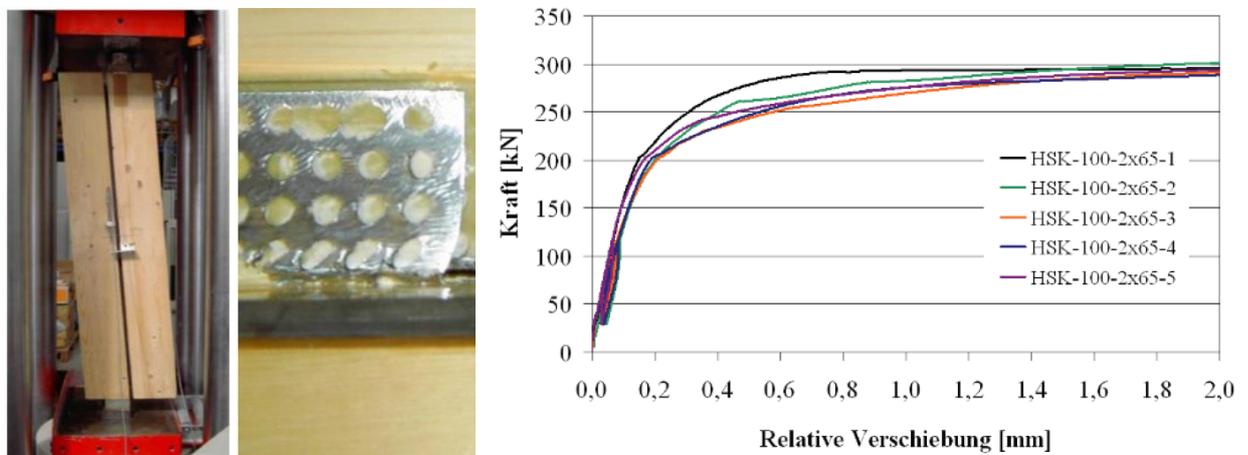


Abbildung 3.7: Druckscherversuch: Versuchsaufbau (links), Versagen des Bleches (Mitte), Kraft-Verschiebungskurve der Versuche (rechts), [6]

Bei den Rahmeneckenversuchen werden keilgezinkte Eckausbildungen den Rahmenecken mit eingeklebten Lochblechen gegenübergestellt. Dabei werden zwei perforierte Bleche auf ein 10 mm dickes Stahlblech aufgeschweißt und in die Ecken eingeklebt. Bei den keilgezinkten Versuchen tritt wie in Abbildung 3.8 (links) ein Spröbruchversagen des Holzes auf der Zugseite ein. Jene mit gelochten Blechen in der Abbildung rechts versagen mit einer deutlich höheren Bruchlast und einem duktileren Versagen.

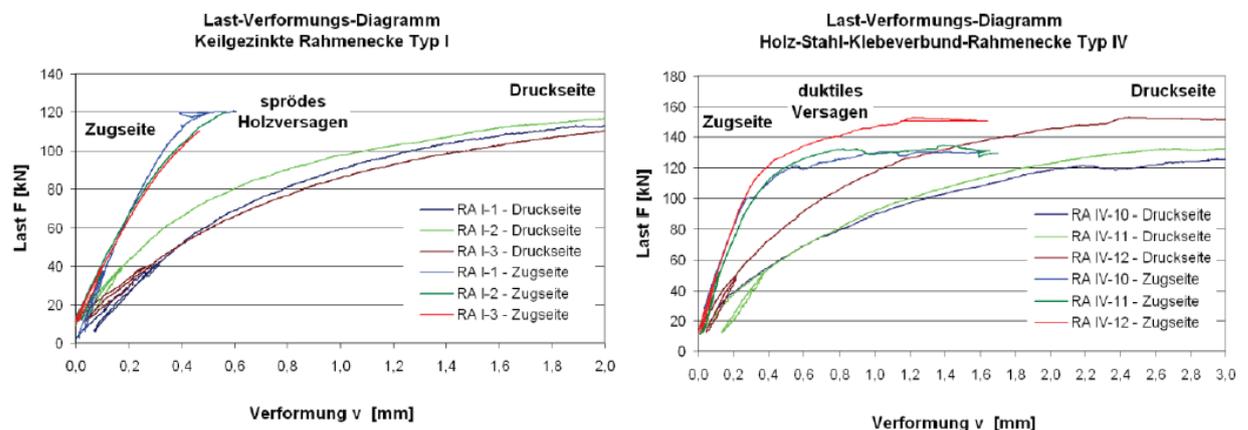


Abbildung 3.8: Rahmeneckenversuch Last-Verformungs-Kurve: keilgezinkt (links), gelochte Bleche (rechts), [6]

[8]

Im Zeitraum von 2010 bis 2013 wird ein an der Hochschule Rhein Main durchgeführtes Forschungsprojekt für eingeklebte Lochbleche in Fachwerksknoten durchgeführt. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen Lösungsansätze für innenliegende Lochbleche gefunden werden, die Druckstreben, Zugstreben sowie Diagonalen des Fachwerks miteinander verbinden sollen. Im Bereich der Verbindung soll die Kraftweiterleitung einerseits infolge der Adhäsion des Klebstoffes mit dem Holz stattfinden. Zum anderen sollte sich ein mechanischer Verbund durch die sich ausbildenden erhärtenden Klebstoffdübel in den Lochblechen einstellen. Durch diese Anforderungen wird angestrebt, eine nahezu schlupffreie und starre Verbindung mit gleichzeitigem duktilem Verhalten im Versagensfall zu entwickeln. Die praktischen Versuche werden durch Prüfungen in kleinerem Maßstäben unter statischen, zyklischen und klimatischen Randbedingungen sowie Großversuche im Maßstab 1:1 unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung durchgeführt. Im Vordergrund der Untersuchungen steht die Auswahl der einsetzbaren Klebstoffsysteme. Für die Kurzzeitversuche werden 2K- Klebstoffe auf Epoxidharz und Polyurethanbasis mit ausreichender Fließfähigkeit herangezogen. Dabei werden 4 mm dicke Lochbleche aus verzinktem Stahl mit Lochdurchmessern von 10 mm in Nadelholzprüfkörper eingeklebt. Die Schlitzweite der Klebstofffugen variiert zwischen 4, 6 und 8 mm. Die Versuchskörper werden auf ein Versagen der Klebstoffdübel ausgelegt. Neben dem Klebstoffsystem wird auch das Material des Lochbleches, die Lochblechdicke, die Schlitzbreite sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Lochbleche variiert. Als Ergebnis ist in Abbildung 3.9 die Last-Verformungs-Kurven von drei Prüfkörpern zu sehen. Dabei sind das hohe Traglastniveau von 162 kN und die hohe Steifigkeit deutlich zu erkennen.

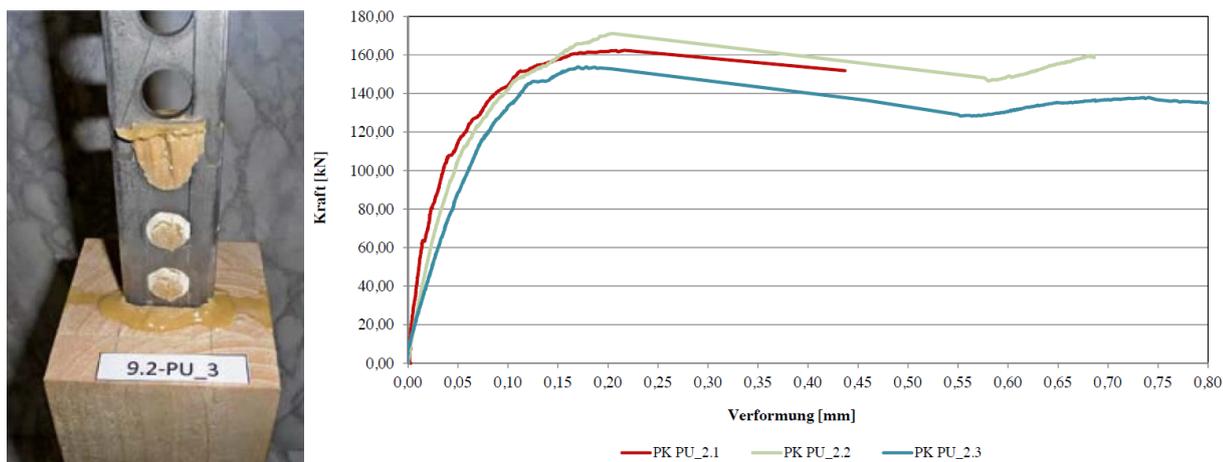
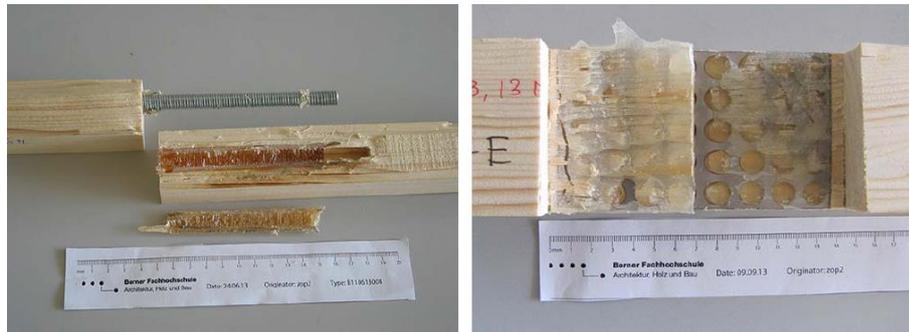


Abbildung 3.9: Prüfkörper (links), Last-Verformungs-Versuche mit Lochblechen (rechts), [8]

[60]

Zock et al. stellt im Jahre 2014 eine Versuchsreihe mit eingeklebten Lochblechen und eingeklebten Gewindestangen an, um diese hinsichtlich ihres Tragverhaltens miteinander zu vergleichen. Die Prüfkörper wurden aus fehlerfreiem Fichtenholz hergestellt. Die durchgeführten Zugprüfungen ergeben bei den eingeklebten Gewindestangen eine mittlere Schubfestigkeit von  $6,1 \text{ N/mm}^2$ . Bei den Lochblechen gilt es zwei Betrachtungsweisen zu unterscheiden: Zum einen wird die gesamte Kontaktfuge der Klebung zum Holz mit einer mittleren Schubfestigkeit von  $3,0 \text{ N/mm}^2$  betrachtet. Andererseits kann man auch lediglich die Querschnittsfläche der Lochung heranziehen und kommt somit auf einen Wert von  $7,6 \text{ N/mm}^2$ . Bei der Verklebung der Lochbleche wurden im Gegensatz zu Gewindestangen Lufteinschlüsse und Exzentrizitäten beim Einbau festgestellt. Diese haben aber nur einen geringen Einfluss auf die Prüfergebnisse. Die Prüfungen ergeben, dass ein Versagen durch große plastische Verformungen der

Lochbleche begleitet wird, wobei, wie in Abbildung 3.10 ersichtlich, die vordersten Lochreihen die größten Verformungen aufweisen.



**Abbildung 3.10: Prüfkörper: mit eingeklebter Gewindestange (links), Lochblech (rechts), [60]**

[28]

Seit 2014 wird an der TU Graz gemeinsam mit der holz.bau forschungs gmbh das Verhalten von in Holz eingeklebten Blechen untersucht. Dabei wird im Rahmen einer Masterarbeit das Tragverhalten an zugbeanspruchten, faserparallel eingeklebten Blechen in Furnierschichtholz aus Buche untersucht. Jeleč [28] führt Zugversuche unter Variation des Klebstofftyps, des Flachkörpermaterials und dessen Oberflächenbehandlung und Perforation durch. Des Weiteren werden eingeklebte Sika-CarboDur-Lamellen in unterschiedlichen Anordnungen bezogen auf die Furnierlagen untersucht.

Die Prüfkörper wurden auf eine Länge von 360 mm bzw. 500 mm abgelängt und anschließend auf Querschnitte von 60/60 mm bzw. 80/80 mm gehobelt. Die Schlitzweiten für den Klebstoff variierten zwischen 3,5 mm und 8 mm. Die Einklebelänge wird bei allen Prüfkörpern mit 100 mm festgelegt. Als Flachkörpermaterialien werden Edelstahlbleche, Lochbleche, Kohlefaser, Streckmetalle sowie Stahlbleche eingesetzt. Für die Versuche werden sechs unterschiedliche Klebstofftypen (zwei PU- und vier Epoxid-Klebstoffe) verwendet. Die Prüfkörper werden anschließend einer Zug-Zug-Belastung ausgesetzt. Um auftretende Verformungen des Holzes sowie des Verbindungsmittels zu erfassen, werden die Prüfkörper der Hauptversuche, wie in Abbildung 3.11 zu sehen, mit Wegaufnehmer an unterschiedlichen Positionen des Probekörpers ausgestattet.

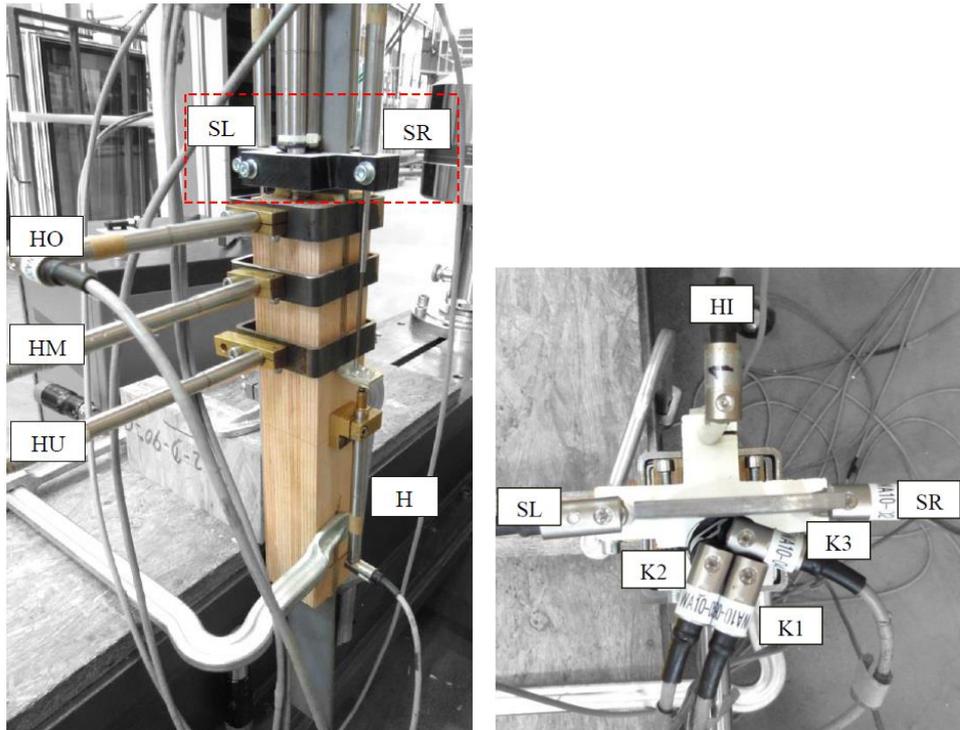


Abbildung 3.11: Positionen der Wegaufnehmer, [28]

In einer Prüferserie wird durch Aufkleben von Dehnmessstreifen auf die Stahlfläche die Stahldehnung entlang des eingeklebten Bleches errechnet. Dies dient der Abschätzung des Schubspannungsverlaufes in der Klebefuge. Dabei stellt sich wie in Abbildung 3.12 heraus, dass ein Abfall der Normalspannung im Stahlblech mit fortgeschrittener Einklebelänge stattfindet. Diese Spannungsverläufe entsprechen auch jenen, festgestellt von Wissenschaftlern aus vergangenen Jahren mit eingeklebten Gewindestangen.

Die errechneten Schubspannungen in Abbildung 3.13 stimmen mit den analytischen Lösungen qualitativ gut überein.

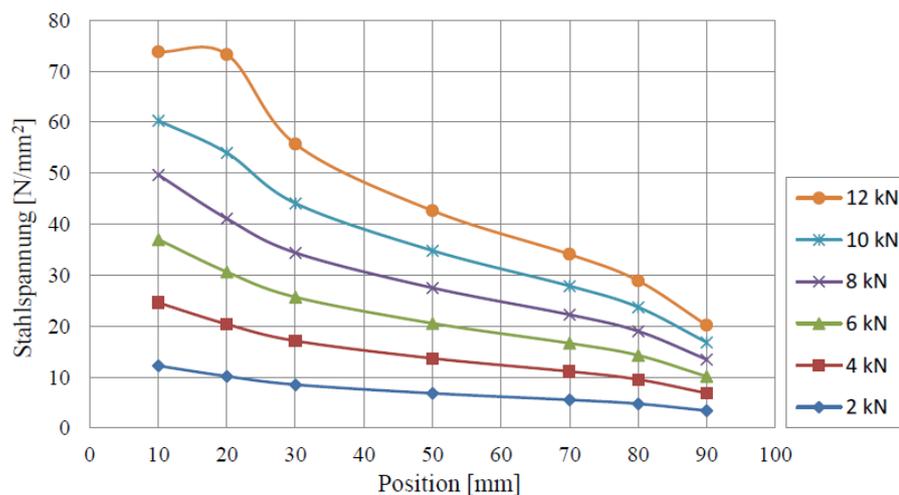


Abbildung 3.12: DMS-Positionen mit errechneten Normalspannung im Stahlblech, [28]

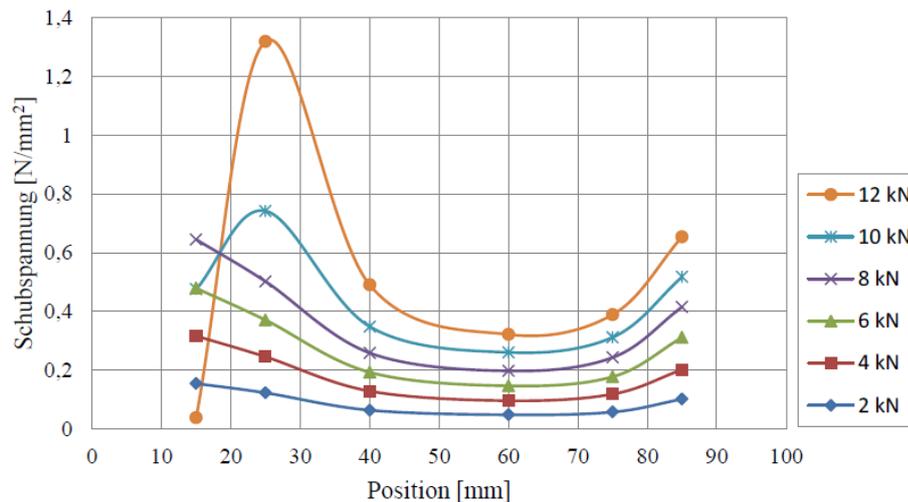


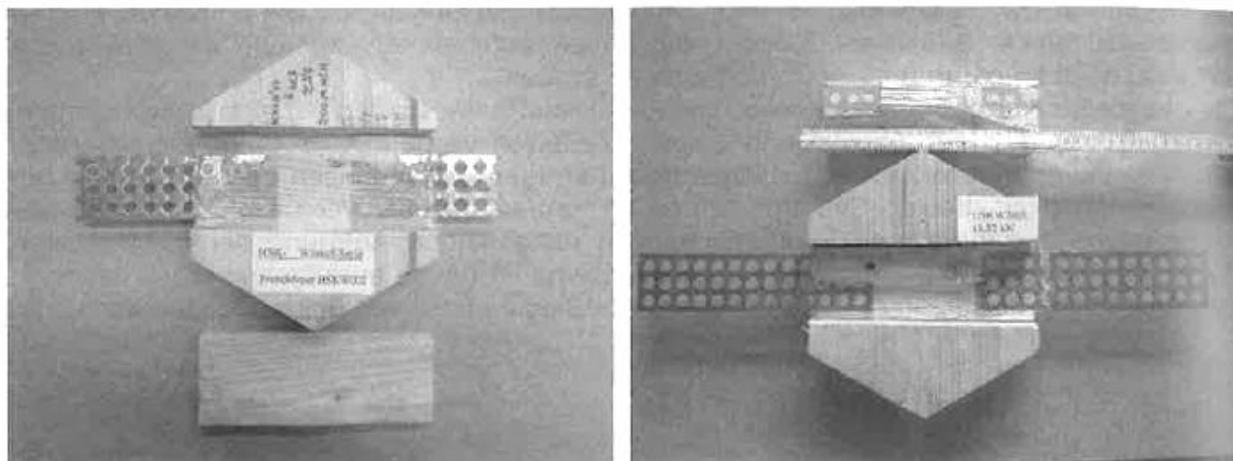
Abbildung 3.13: DMS-Positionen mit Schubspannungen, [28]

Im Zuge der Vorversuche wurde ersichtlich, dass die mechanische Verankerung des Klebstoffes mit dem Stahl einen nicht unwesentlichen Faktor darstellt. Somit wurden in weiterer Folge auch eingeklebte Streckmetalle und Lochbleche aus Aluminium geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass die Perforation innerhalb des Verbundbereiches eine Tragfähigkeitssteigerung um bis zu 20 % bewirkt. Dabei ist zu erwähnen, dass die Steifigkeit der Verbindung unwesentlich beeinflusst wird. Probleme ergeben sich nach [28] einerseits durch einen ungenügenden Verbund des Klebstoffes mit dem Stahl, andererseits besteht noch Optimierungsbedarf in der Klebstoffwahl, da die Viskosität (nieder, hoch) die Verarbeitbarkeit erschweren kann. Ein weiterer zu untersuchender Aspekt liegt in der Bestimmung der globalen Verformung. Die Versuche zeigen neben Schubverformungen am Hirnholz auch nicht zu vernachlässigende Querverformungen im Krafteinleitungsbereich. In Folge dessen wird durch die Querverformungen und daraus resultierenden Schälbeanspruchungen das Tragvermögen bei zugbeanspruchten Prüfkörpern stark beeinflusst.

[5]

Bathon führt 2015 auf Basis vorangegangener Untersuchungen zu Holz-Stahl-Klebeverbindungen der Hochschule Rhein-Main in Wiesbaden [6] Versuche zu eingeklebten Lochblechen, sowie HKS-Verbindern, welche in BSP eingeklebt werden, durch. Auf Grund der Versuchsergebnisse aus [6], ist davon auszugehen, dass diese flächigen Verbindungsmittel auch in der Holz-Massivbauweise ihre Anwendungen finden. Um die Beanspruchungen in der Stoßfuge der Verbindung untersuchen zu können werden statische Zugversuche, Scherversuche, sowie Versuchsreihen unter zyklischer Belastung für Erdbebenbeanspruchung durchgeführt.

Bathon untersucht zunächst den Winkeleinfluss zwischen der aufgetragenen Kraft und den Holzfasern in Zugversuchen. Hierfür entwickelt er zwei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Klebstoffdübelanzahl, welche in Abbildung 3.14 zu sehen sind. Die Lochbleche, welche mit der Stahlgüte S235 und einer Stahldicke von 2,5 mm eingeklebt werden, haben einen Lochdurchmesser von 10 mm und einen Abstand von 15 mm. Als Holzwerkstoff wird ein 3-schichtiges BSP mit einer Mittellage von 20 mm verwendet.



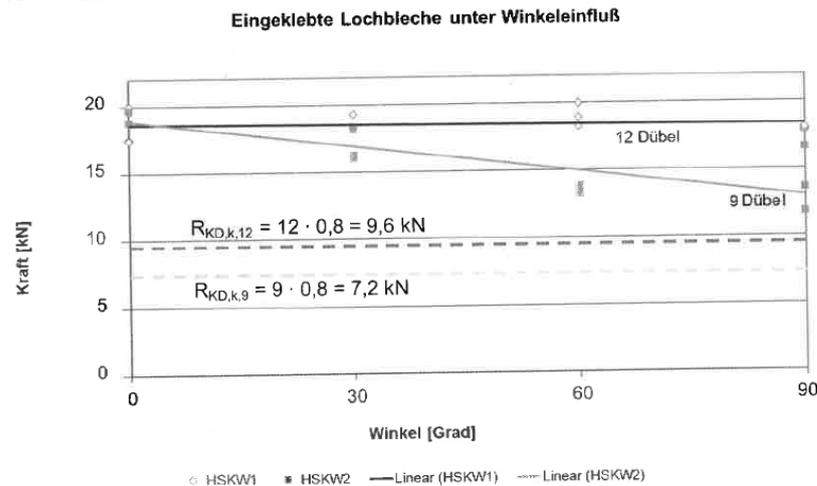
*Abbildung 3.14: Prüfkörper der Versuchsreihe 1 und 2, [5]*

In Abbildung 3.15 werden die Ergebnisse der Versuche in Abhängigkeit der unterschiedlichen Winkel zwischen Faser und Kraft zusammengefasst.

Bezeichnung	Winkel Kraft/Faser	Schlitztiefe	mittlere Bruchlast	Dübel	Kraft / Dübel
	[°]	[cm]	[kN]	[-]	[kN]
HSKW1001 bis 3	0	6,5	18,31	12	1,53
HSKW1301 bis 3	30	6,5	18,60	12	1,55
HSKW1601 bis 3	60	6,5	19,03	12	1,59
HSKW1901 bis 3	90	6,5	17,92	12	1,49
HSKW2001 bis 3	0	5,0	19,57	9	2,17
HSKW2301 bis 3	30	5,0	15,95	9	1,77
HSKW2601 bis 3	60	5,0	13,69	9	1,52
HSKW2901 bis 3	90	5,0	14,15	9	1,57

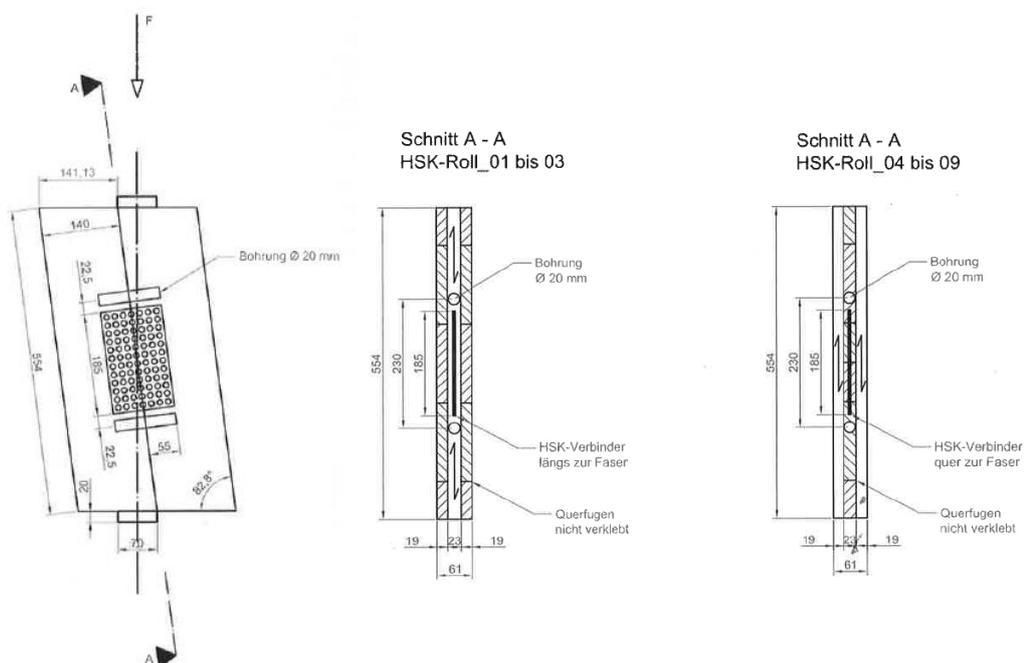
*Abbildung 3.15: Ergebnisse unter Variation des Winkels Kraft zur Faser, [5]*

Die Ergebnisse aus Versuchsreihe 1 mit zwölf Klebstoffdübeln zeigen, dass sich bei allen Prüfkörpern ein Stahlversagen des Bleches einstellt. Die mittleren Bruchlasten der Serie 1, welche in Abbildung 3.16 zu erkennen sind, variieren nur geringfügig. In Versuchsreihe 2 mit neun Klebstoffdübeln stellt sich vorwiegend ein Holz-Klebstoffversagen bzw. ein reines Klebstoffversagen ein. Im Kraft-Winkeldiagramm ist ein deutlicher Einfluss, gekennzeichnet durch eine fallende Trendlinie, der Faserorientierung für die Versuchsserie 2 zu erkennen. Zusätzlich werden in Abbildung 3.16 die charakteristischen Tragwiderstände nach [13] für HSK-Systeme eingezeichnet, um sie mit den erreichten Bruchlasten zu vergleichen.



**Abbildung 3.16: Kraft-Winkel Diagramm der Lochbleche, [5]**

Um die Scherbeanspruchungen von HSK-Systemen in Brettsperrholz zu untersuchen, werden auch Druck-Scherprüfungen durchgeführt. Als Prüfkonfiguration wird ein zweiteiliger Prüfkörper um 7,2° gedreht in eine Prüfmaschine so eingespannt, dass die von oben aufgebrachte Last genau durch den Mittelpunkt der Scherfuge und des Verbindungsmittels führt. (siehe Abbildung 3.17) Das Blech mit den Abmessungen 110 x 185 x 2,5 mm wird auf der Schmalseite mit einer Einklebelänge von 55 mm in die 23 mm dicke Mittellage der beiden BSP-Prüfkörper geklebt. Dabei werden zwei Prüfserien hergestellt, die sich hinsichtlich der Orientierung der Mittellage in Faserrichtung und quer zu Faserrichtung unterscheiden (siehe Abbildung 3.17 Mitte und rechts. Als Klebstoff kommt in [5] ein 2K-Epoxidharz zum Einsatz. Um ein Abstützen an der Mittellage der Lochbleche an den Kanten zu vermeiden, werden 20 mm starke Bohrungen ober und unterhalb der Bleche angeordnet. Somit kann sichergestellt werden, dass nur die Scherfläche des Lochbleches an der Kraftabtragung aktiviert wird. An der Vorder- und Hinterseite des Prüfkörpers wurden induktive Wegaufnehmer angebracht, um die Relativverschiebungen zu erfassen. Die Aufbringung der Last erfolgt kraftgeregelt als Hysterese.



**Abbildung 3.17: Druck-Scherprüfung [5]**

Das Kraftverformungsdiagramm für beide Prüfkörper aus Abbildung 3.18 zeigt einen zunächst linearen Anstieg bis zu einer Scherkraft von ca. 32 kN und geht nach weiterer Laststeigerung in ein Stahlfließen über. Das Fließen des Stahlbleches ist an der deutlich ausgeprägten plastischen Verformung der mittleren Lochreihe in Abbildung 3.18 rechts zu erkennen.

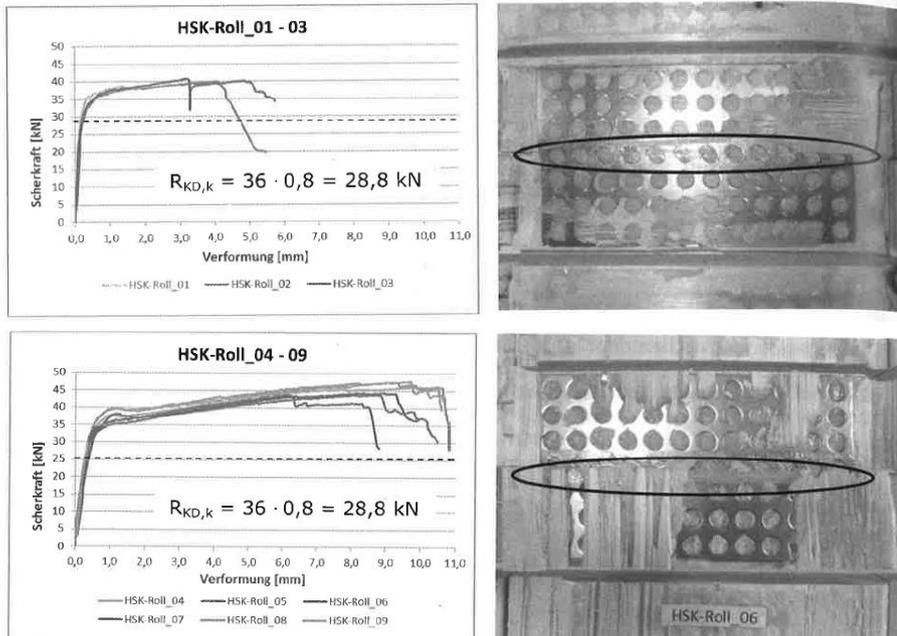


Abbildung 3.18: Kraftverformungsdiagramm und Versagensbilder: längs zur Faser (oben), quer zur Faser (unten), [5]

In Abbildung 3.19 werden die Ergebnisse aus den Versuchen in Faserrichtung und quer zur Faser dargestellt.

Versuchskörper	maximale Scherkraft	Scherspannung im Stahl	Scherspannung im Kleber	Kraft pro Dübel
	$F_{\text{Scher}}$	$\tau_{\text{Scher,u}}$	$\tau_{\text{kl}}$	$F_D$
	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]
HSK-Roll_01*	38,85	239,1	1,91	1,08
HSK-Roll_02	40,02	246,3	1,97	1,11
HSK-Roll_03*	40,67	250,3	2,00	1,13
Ø	39,84	245,2	1,96	1,11

Versuchskörper	maximale Scherkraft	Scherspannung im Stahl	Scherspannung im Kleber	Kraft pro Dübel
	$F_{\text{Scher}}$	$\tau_{\text{Scher}}$	$\tau_{\text{kl}}$	$F_D$
	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]
HSK-Roll_04	46,12	283,8	2,27	1,28
HSK-Roll_05	43,85	269,9	2,15	1,22
HSK-Roll_06	44,44	273,5	2,18	1,23
HSK-Roll_07	43,79	269,5	2,15	1,22
HSK-Roll_08	47,10	289,8	2,31	1,31
HSK-Roll_09	47,71	293,6	2,34	1,33
Ø	45,50	280,0	2,24	1,26

Abbildung 3.19: Ergebnisse der Druckscherprüfung: längs zur Faser (oben), quer zur Faser (unten), [5]

Um die Einsetzbarkeit dieser Verbindungssysteme für Erbebenbelastungen zu untersuchen, werden in weiterer Folge HSK-Systeme zyklischen Belastungen ausgesetzt. Für die Versuche werden, wie in Abbildung 3.20 dargestellt, zwei Brett-schichtholz Balken der Güte GL24 h mit einer Gesamtlänge von 333 cm durch ein vertikal eingeklebtes Lochblech mit den Abmessungen 170 x 125 mm verbunden. Die Einklebelänge beträgt auf beiden Seiten je 62,5 mm, wobei zwischen den Balken ein 45 mm breiter Abstand, für eine höhere Verformbarkeit des Bleches, freigelassen wird.

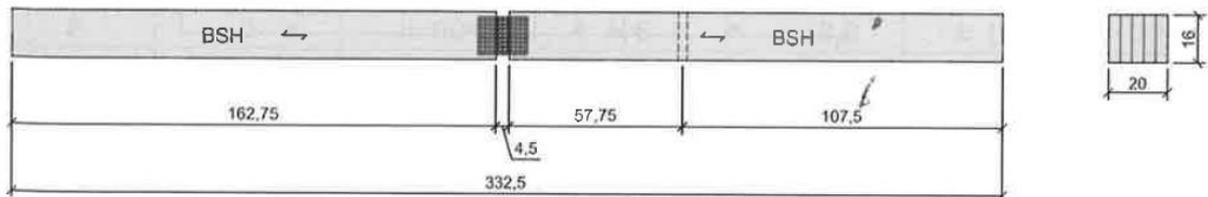


Abbildung 3.20: BSH-Prüfkörper für zyklische Belastung, [5]

Die Abbildung 3.21 links zeigt die Kraft-Verformungsversuche einer Prüfserie, wobei zu erkennen ist, dass die plastischen Verformungen mit steigender Belastung zunehmen.

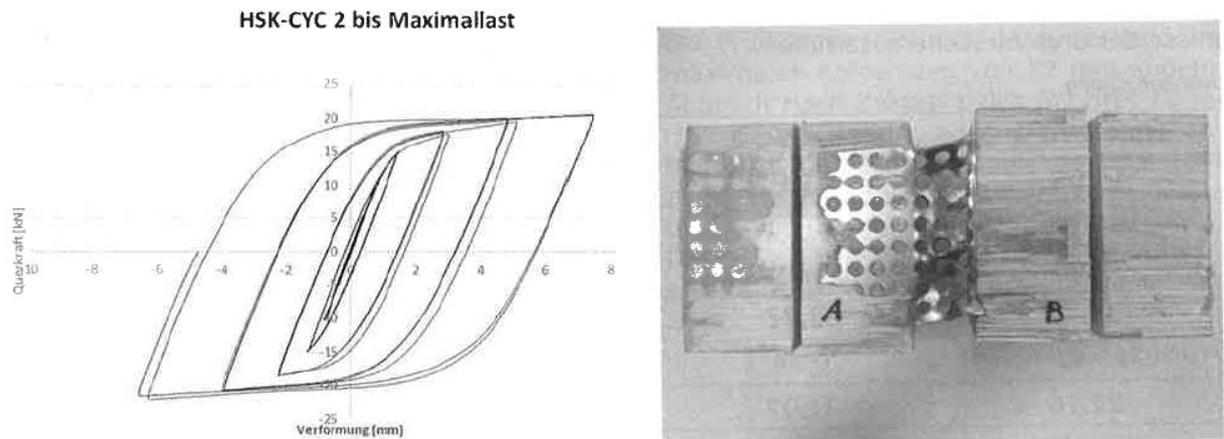


Abbildung 3.21: Kraft-Verformungs-Kurve (links), Bruchbild (rechts) für zyklische Belastung, [5]

Der Prüfkörper in Abbildung 3.21 rechst, zeigt an den eingeklebten Stellen der Klebstoffdübel keine Schädigung des Lochbleches, wohingegen das Blech ohne Klebstoff im Mittelteil gerissen ist. Aus den Versuchen ist zu sagen, dass eingeklebte Lochbleche auch für Erdbebenbeanspruchungen so konzipiert werden können, dass der Stahl als schwächstes Glied der Verbindungskette ausgelegt werden kann, und durch Perforation eine hohe Duktilität der Verbindung realisiert werden kann.

[59]

In jüngster Zeit wird besonders in Nordamerika vermehrt an der Weiterentwicklung des Wohngeschossbaues in Holzbauweise gearbeitet. Für die Errichtung große Hybridbauwerke eignen sich dabei besonders gut Furnierschichthölzer (FSH) oder Brettsperrhölzer (CLT). Die Zukunft liegt in der Entwicklung höherer Gebäudekonstruktionen, wobei die Herausforderung darin besteht, die zusätzlich auftretenden Kräfte, welche durch Wind und Erdbeben erzeugt werden, über hochleistungsfähige Niederhaltevorrichtungen in den Untergrund abzuleiten. Das Umkippen kann als der begrenzende Faktor für die Niederhaltesysteme und das Fundamentdesign angesehen werden. Dem Widerstand gegen Umkippen bei hohen Holz-Hybrid Strukturen muss entweder durch die Verringerung der Auftriebskräfte oder durch verbesserte Niederhaltelösungen entgegengewirkt werden. Um einen Widerstand gegen das Kippmoment zu bieten, werden Anker oder Niederhalter am unteren Rand der Wandelemente angebracht. Die Niederhaltevorrichtungen müssen in der Lage sein, die zusätzlich auftretenden Kräfte auf die Fundamentplatte zu übertragen, um ein Umkippen des Gebäudes zu verhindern.

Dabei stellt Zhang et al. [59] am Material Engineering Laboratory an der Universität British Columbia (UBC) mehrere Versuchsreihen an. Es werden sowohl Zugversuche als auch Scherversuche mit eingeklebten perforierten Stahlblechen in Brettsperrholz durchgeführt.

Schneider et al. entwickelte, wie in Absatz 3-3 bereits erwähnt, einen neuartigen Rohrverbinder, der als Niederhaltelösung in massiven Holzkonstruktionen Verwendung findet. Dieser Verbinder besteht aus hohlen Stahlrohren, welche sich innerhalb der CLT-Platten befinden. Er hat eine hohe Anfangssteifigkeit, während er eine entsprechende Duktilität bereitstellt. Außerdem ist er einfach herzustellen, zu installieren, zu überprüfen und zu ersetzen. Die Holz-Stahl-Komposit-Systeme (HSK) <sup>TM</sup>, welche auf eingeklebten perforierten Stahlblechen basieren, sind eine weitere Option für Niederhaltungs-Systeme. Die Festigkeit einer HSK-Verbindung wird durch i) die Stahlplatte, ii) die Klebeverbindung, und iii) die Holzfestigkeit bestimmt. Die Verbindungslösung kann auf ein duktiles Stahlversagen auf der Bruchlastniveau unter statischen sowie dynamischen Lasten ausgelegt werden. Der Verbinder wurde bereits in mehreren hohen Gebäuden angewendet, wie beispielsweise beim Holzinnovations Design Center in Prince George, welches bis dato Nordamerikas höchstes und modernstes Holzgebäude ist. Die geometrischen Parameter eines typischen perforierten Stahlbleches sind in Abbildung 3.22 dargestellt. Die Löcher in der Platte sind durch den Klebstoff gefüllt, welcher beim Erhärten sogenannte "Klebedübel" (AD) ausbildet. Die "Klebekapazität" wird über die Summe der einzelnen AD (Klebedübel) berechnet. Die Verbindungen zwischen den Löchern bilden die sogenannten Stahlglieder (SL), welche die Duktilität der Stahlplatte bestimmen.

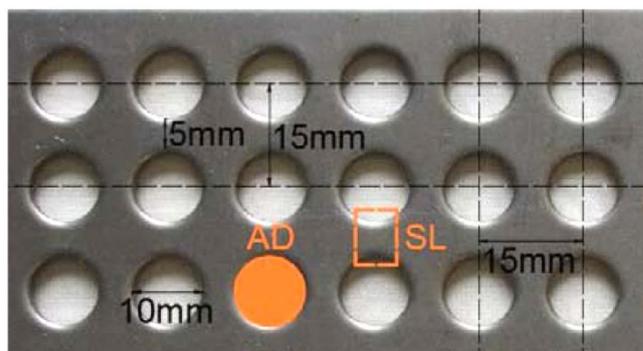


Abbildung 3.22: geometrische Parameter des perforierten Stahlbleches, [59]

Bei herkömmlichem HSK-Verbindern, wie in der Abbildung 3.23 (links), werden die perforierten Stahlplatten auf eine sich verjüngende Stahlplatte geschweißt. Diese Ausführungsform kann auf Grund des Mangels an Forschung in zyklisch belasteten seismischen Zonen bei Holzkonstruktionen nicht angewendet werden. Darüber hinaus kann die geschwächte Stahlplatte bei Druckbeanspruchung beulen was eine negative Auswirkung auf die Gesamtstabilität der Struktur zur Folge hätte. Ziel der Arbeit [59] ist es, experimentell die Leistung modifizierter HKS-Verbinder als Niederhaltesysteme weiter zu entwickeln und zu verbessern. Dabei werden sie, wie in der Abbildung 3.23 rechts durch Abdecken zweier Loch-Reihen mittels eines Klebebandes so verändert, dass kein Klebeverbund in diesen Reihen gebildet wird. Diese Modifikation ermöglicht einen Fließ-Mechanismus des Stahls im Bereich der beklebten Lochungen, wodurch einem Einknicken entgegengewirkt wird.

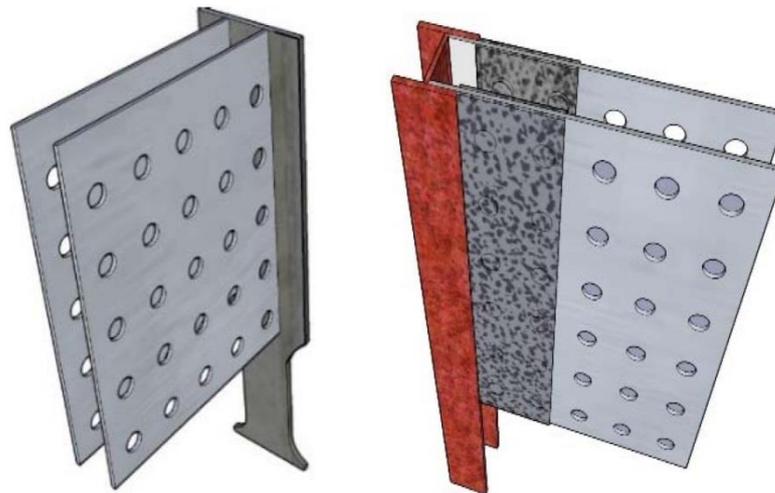


Abbildung 3.23: HSK-Verbindungen: konventionell (links), modifiziert (rechts), [59]

## ZUGPRÜFUNG

Es werden drei verschiedene Serien von quasi-statisch einfachen Zugversuchen durchgeführt. Die Versuche wurden im Material Engineering Laboratory an der University of British Columbia (UBC) durchgeführt:

- (i) Prüfungen zur Bestimmung der Stahlstärke der perforierten Stahlplatten (Reihe 1-1)
- (ii) Prüfungen, um die Festigkeit der Klebeverbindung zu bestimmen (Reihe 1-2)
- (iii) Prüfungen um die Verbindungseigenschaften zu bestätigen (Serie 1-3).

Die perforierten Stahlplatten mit der Güte S275 werden mit einer einheitliche Lochgröße mit einem Durchmesser von  $d = 10$  mm hergestellt. Die Lochabstände (SL) betragen 5 mm und die Dicke der Platte beträgt 2.55 mm. Als Holz wird Douglasie-Tanne 20f-E verklebt mit einer durchschnittlichen Rohdichte von  $530 \text{ kg / m}^3$  und einem Feuchtigkeitsgehalt von 11% (+/- 2%) herangezogen. Als Klebstoff wird ein Zweikomponenten-Polyurethan-Klebstoff (CR-421® von PURBOND®) verwendet.

In Serie 1-1 werden die perforierten Stahlplatten in die Prüfmaschine eingeklemmt (Abbildung 3.24 links); danach wurde die Last mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2 mm / min bis zum Versagen aufgebracht. Die Kraftverschiebungs-Kurven erlauben es, die Fließ- und Bruchgrenze der Verbindungen,

sowie die Duktilität  $\mu$ , welche als Verhältnis der Gesamtverschiebung zur Verschiebung der Fließgrenze bestimmt wird, zu ermitteln. Die Verbindungssteifigkeit  $K_e$  wird aus dem Verhältnis der Lastdifferenz ( $0.4F_{\max} - 0.1F_{\max}$ ) zur Verschiebungsdifferenz ( $0.4D_{\max} - 0.1D_{\max}$ ) berechnet.

Die Herstellung der Proben für die Serie 1-2 und 1-3 besteht aus fünf Schritten:

1) Einschlitzeln des Holzes; 2) Schneiden der HSK Platte auf die erforderliche Länge; 3) Platzieren der Stahlbleche in den Schlitz und anschließendes Verkleben; 4) Härten der Probekörper; 5) Platzierung der Probe in der Testvorrichtung (Abbildung 3.24, rechts).

Serie 1- 2 wird mit 6 AD in das Holz geklebt, während Serie 1-3 aus 15 AD besteht. Die Abbildung 3.25 zeigt die Probengeometrie für Serie 1-2 und 1-3. Die Körper werden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2 mm / min bis zum Versagen belastet.



Abbildung 3.24: Versuchsserien: 1-1 (links), 1-2 und 1-3(rechts); [59]

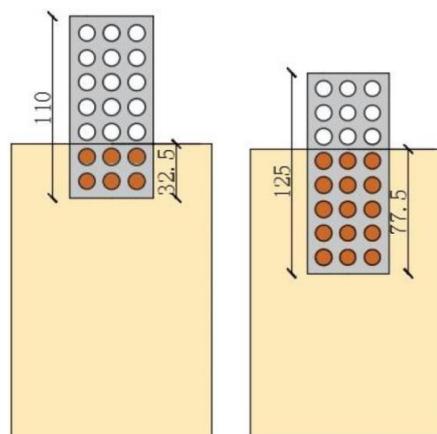


Abbildung 3.25: Einklebegeometrien: 1-2 (links), 1-3 (rechts); [59]

In der folgenden Abbildung 3.26 werden die typischen Versagensarten der drei Versuchsserien dargestellt. Als Versagensmodus der perforierten Stahlplatte (Reihe 1-1) tritt ein Fließen des Stahls zwischen den Löchern bis zum Bruch zu erkennen (Bild links). Die Serie 1-2 hatte ein Sprödbruchversagen der Verklebung zur Folge, was ein Ausziehen der perforierten Stahlplatte hervorruft.

Die Prüfsreihe 1-3 wird darauf ausgelegt ein Stahlfließen zwischen den Löchern auszulösen. Dieser Versagensmodus wird in der Abbildung 3.26 rechts gezeigt.



Abbildung 3.26: Versagensmodi: 1-1 (links), 1-2 (Mitte), 1-3 (rechts); [59]

Die Form der Kraft-Weg-Kurve des Versuches 1-3 ist sehr ähnlich der Kurve von Zugversuchen mit reinen Stahlblechen (Serie 1-1) was das duktile Stahlversagen bestätigt.

Die folgende Abbildung 3.27 zeigt die Last-Verschiebungskurven für jede Versuchsreihe. Die Kurven aus Serie 1-1, mit perforierten Stahlblechen, bestätigen einen duktilen Versagensmodus des Stahles.

In Serie 1-2 ist der Versagensmodus ein spröder adhäsiver Bruch zwischen Holz und Klebstoff. Die erwartete Kapazität für  $1AD = 1.2 \text{ kN}$  wird aus früheren Versuchen berechnet. Basierend auf den Testergebnissen ist der Wert für jeden AD  $1.7 \text{ kN}$ , der signifikant größer ist, als die erwartete Kapazität von  $1.2 \text{ kN}$ . Das erhaltene Duktilitätsverhältnis ergibt sich mit einem Wert von nur  $1,1$ , was die Sprödigkeit durch das Klebstoffversagen bestätigt.

Die Versuchsserie 1-3 bestätigt, dass das gewünschte Stahlversagen erhalten werden kann, wenn die Tragfähigkeit der Klebstoffdübel (AD) größer ist, als die Tragfähigkeit über die Lochabstände (SL). Der Stahl beginnt bei  $12.2 \text{ kN}$  zu fließen und erreicht bei  $15.0 \text{ kN}$  die Lochleibungsfestigkeit. Erst bei  $25.5 \text{ kN}$  erreichte er die Klebstoffdübel-Festigkeit. Das erhaltene  $M_y$  ist ähnlich dem aus Serie 1-1, was die Duktilität der Stahlplatte widerspiegelt.

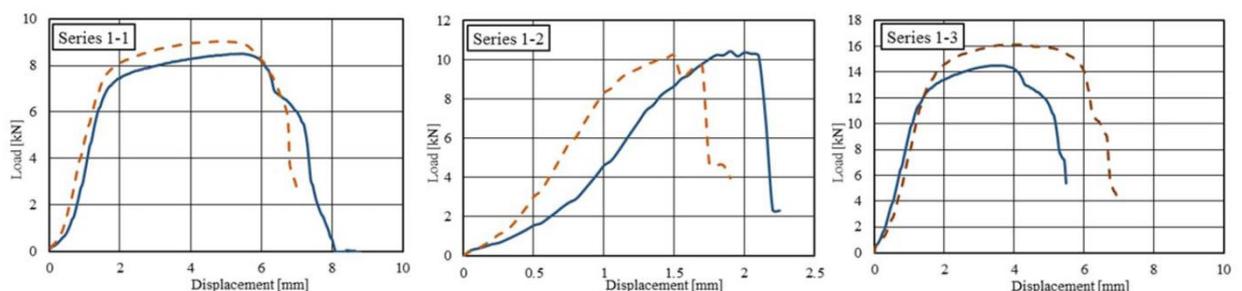


Abbildung 3.27: Last-Verschiebungskurven: 1-1 (links), 1-2 (Mitte), 1-3 (rechts); [59]

## Scherprüfungen

Basierend auf den vorangegangenen Zugprüfungen sind die erhaltenen Werte für 1SL unter Zugbelastung  $F_y = 3.6 \text{ kN}$  und  $F_{\max} = 4.4 \text{ kN}$ . Die Klebstoffdübel-Kapazität beträgt  $1.7 \text{ kN / Dübel}$ . Diese Daten werden für die Entwicklung der quasi-statischen einfachen und zyklischen Scherbelastungsprüfungen an Holz-Verbindungen mit perforierten Stahlblechen herangezogen. Hier wird die HSK-Niederhaltungs-Verbindung für Hochbauweisen aus Holz untersucht. Dabei wird Kreuzlagenholz (CLT) als Material für die Verbindungen herangezogen. Es werden 3- und 5-Schicht Platten verwendet. Es werden zwei 3s – 5s-Verbindungen mit zwei unterschiedlichen Größen entwickelt. Das Stahlblech in der kurzen Verbindung enthält  $10 \times 8$  Löcher mit 11SL pro Reihe, wobei die mittleren beiden Reihen beidseitig mittels Klebeband abgedeckt werden (Abbildung 3.28 links). Das längere Stahlblech hat  $22 \times 7$  Löcher mit 23SL pro Reihe, während nur eine Reihe in der Mitte durch das Klebeband (Abbildung 3.28 rechts) abgedeckt wird.

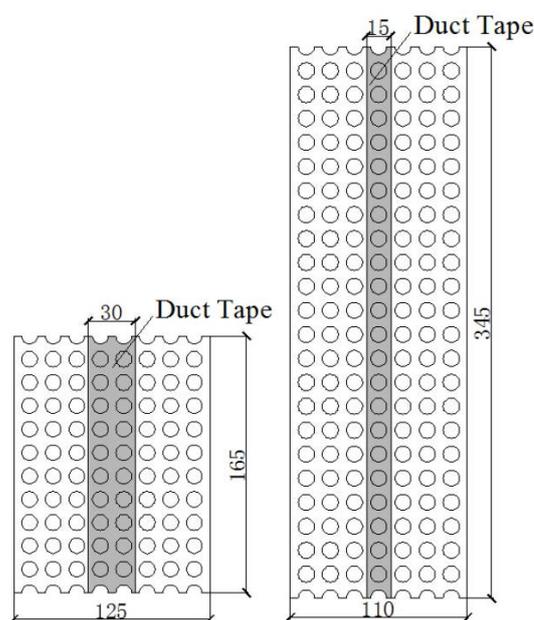


Abbildung 3.28: Lochblechgeometrie: Versuchsserie 2-1 (links), Versuchsserie 2-2 (rechts), [59]

Es werden vier Serien hergestellt. Serie 2-1 umfasst kurze Stahlplatten mit zwei Reihen, die in einem senkrecht zum Faserholz 3-lagigen CLT-Prüfkörper geklebt werden. Serie 2-2 wird ebenfalls mit kurzen Stahlblechen hergestellt, hier werden jedoch die Bleche parallel zur Holzfaser von 5-lagigen CLT-Körpern eingeklebt. Serie 2-3 verwendet lange Stahlbleche, welche senkrechte zur Faser in 3-lagigen CLT-Körper eingebettet werden. Serie 2-4 verwendet lange Stahlbleche, die parallel zur Faser in 5-lagiges Brettsperrholz eingeklebt werden.

Für die Herstellung wird zunächst eine Seite des Lochbleches eingeklebt. Klebeband und Kunststoffstreifen werden zwischen zwei benachbarte CLT-Körper platziert, um einen Verbund dieser auszuschließen. Nach zwei Tagen werden die perforierten bereits eingeklebten Stahlbleche auf der anderen Seite in einen zweiten CLT-Prüfkörper geklebt. Die fertigen Proben härten anschließend mindestens eine Woche aus, bevor sie geprüft werden. Um die plane Scherfestigkeit der Verbindung zu untersuchen, werden die Testproben um  $14.5^\circ$  gedreht, ähnlich der Empfehlung der EN 408 [51] (Abbildung 3.29 links). Dieser Versuchsaufbau wurde bereits in der bisherigen Forschung unter quasi-statischen monotonen Lasten erfolgreich angewendet. In Anbetracht des  $14.5^\circ$ -Winkels, kann die tatsächliche Scherkraft in der Verbindung durch den Kosinus des Winkels berechnet werden. Die monotonen Tests werden unter Laststeuerung mit einer Geschwindigkeit von  $2 \text{ mm / min}$  durchgeführt.

Um die Relativverschiebung der beiden CLT-Körper zu erfassen, werden Wegaufnehmer (Differentialtransformatoren LVDT) in der Scherfuge angeordnet. Der Aufbau der zyklischen Tests war ähnlich der einfachen Scherprüfungen, wie in Abbildung 3.29 rechts gezeigt. Das Curée-Basisbelastungs-Protokoll wird mit der verwendeten durchschnittlichen maximal erhaltenen Verschiebung von einfachen Prüfungen als Zielverschiebung für die gewählte zyklische Prüfung herangezogen. Die Versuche werden unter Verwendung eines MTSFlexTest ® Controller-System (250 kN) im UBC Holz Mechanics Lab durchgeführt und werden unter Verschiebungsbelastung mit einer Geschwindigkeit von 1 mm / sec gesteuert. Zusätzlich wird auch die Energieableitung (ED) berechnet. ED stellt die Gesamtverlustenergie, als der Bereich innerhalb der Hystereseschleife unter allen berechneten Lastzyklen, dar. ED ist dabei ein Indikator, um seismische Leistungen für verschiedene Testreihen zu vergleichen.

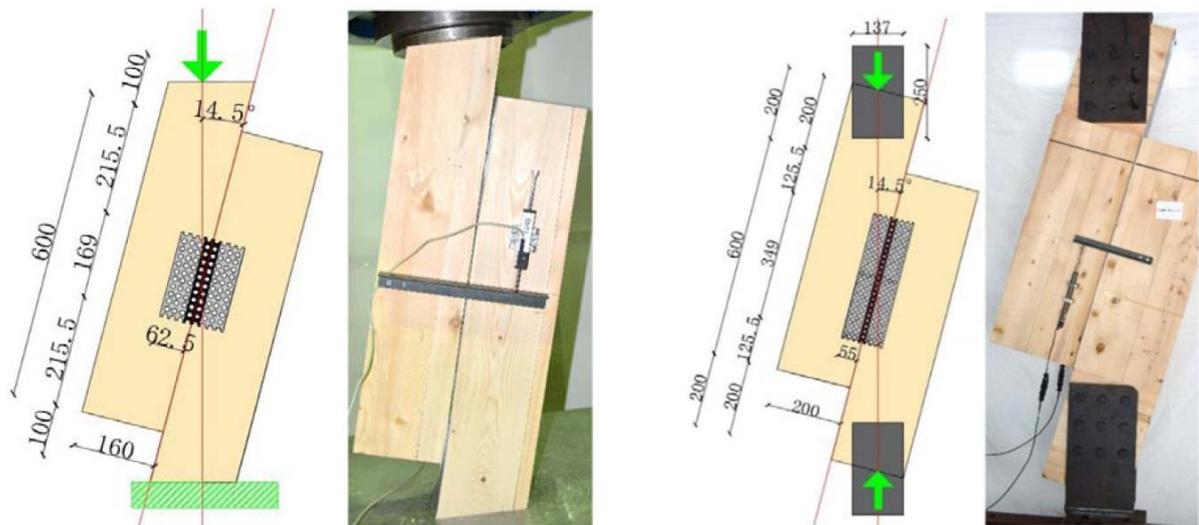
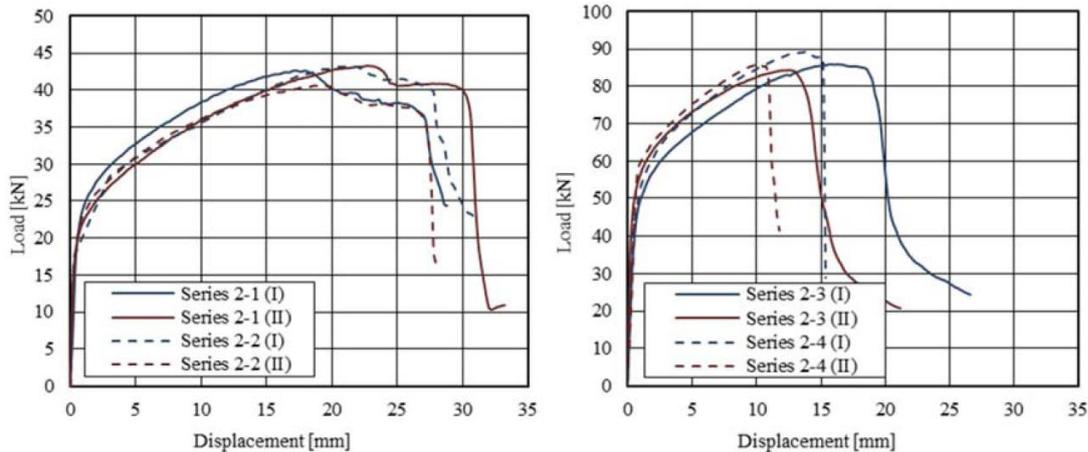


Abbildung 3.29: Prüfkongfigurationen Schertest: einfache Belastung (links), zyklische Belastung (rechts), [59]

Ergebnisse der einfachen Scherprüfungen: In den einfachen Scherprüfungen wurde die Kraft bis zum Versagen der Proben gesteigert. Nach den Versuchen wird die Relativverschiebung zwischen den beiden CLT-Prüfkörpern erfasst. Die Proben aus den Testreihen in denen zwei Reihen mit Klebeband abgedeckt waren, zeigten viel größere Verschiebungen (ca. 30 mm), als im Vergleich zu jenen, wo nur eine Reihe mit Klebeband abgedeckt (ca. 17 mm) war. Diese Verschiebungen stellen die Bewegung der Lochbleche im Inneren des Brettsperrholzkörpers dar. Die Last-Verformungs-Kurven von allen vier Serien sind in der Abbildung 3.30 dargestellt. Die Last-Verformungskurven zeigen, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen Proben gibt, wo das Stahlblech parallel zur Faser oder senkrecht zur Faserrichtung eingeklebt wird, sowohl für die kurzen als auch die langen Bleche. Durch das Überschreiten der AD-Kapazität vor der SL-Kapazität erhält man somit einen duktilen Versagensmechanismus. Die Klebeverbindung zwischen CLT-Körpern und Stahlblechen können starr betrachtet werden. Die Fließkraft  $F_y$ , die maximale Kraft  $F_{max}$ , und die Steifigkeit  $K_e$ , von den Proben mit langer Stahlplatte ist fast zweimal so groß, als jene von Körpern mit kurzen Blechen. Die maximale Verschiebung und Duktilität der langen Bleche zeigt doppelt so hohe Werte, als jene der Proben mit kurzen Stahlblechen. Dieser Zusammenhang wird jedoch nicht durch die Länge der Stahlplatten (Anzahl von SL oder AD), sondern ausschließlich durch die Anzahl der abgeklebten Reihen von Klebeband verursacht.



**Abbildung 3.30: Kraft-Verschiebungsdiagramm Schertest: 2-1, 2-2 (links); 2-3, 2-4 (rechts), [59]**

Die Abbildung 3.31 zeigt die Versagensmechanismen des Stahls mit zwei abgeklebten Reihen und einer abgeklebten Reihe mit Klebeband. Bild links zeigt, dass die Verschiebung in den Reihen der abgeklebten Löcher verursacht wird, die durch das Klebeband bedeckt waren. Diese Löcher können sich frei verformen. In den langen perforierten Stahlplatten kann sich nur die mittlere Reihe mit Löchern verformen, da der Rest der Platte sehr steif ist, wie im rechten Bild zu sehen. Die Gesamtverschiebung hängt von der Anzahl an abgeklebten Reihen ab, wobei sich jede Reihe nahezu identisch verformt. Die Duktilität der Verbindungen mit zwei freien Lochreihen ist fast doppelt so hoch, wie jene bei Verbindungen mit nur einer abgeklebten Lochreihe.



**Abbildung 3.31: Versagensmechanismen unter einfacher Scherbelastung: kurzes Blech mit zwei abgeklebten Reihen (links); langes Blech mit einer abgeklebten Reihe (rechts), [59]**

Ergebnisse der zyklischen Scherbelastung: Vergleicht man die Scherkapazität von 1SL unter monotoner und zyklischer Belastung, sind die Mittelwerte von  $F_y$  ähnlich (2.2 kN und 2.3 kN). Für  $F_{max}$  ergibt sich eine Reduktion von 14% in den zyklischen Scherversuchen im Vergleich zu den einfachen Scherprüfungen (3.3 kN vs. 3.8 kN). Diese Reduktion wird durch die Stahlermüdung verursacht. Der Durchschnittswert von  $K_e$  unter zyklischer Belastung war ähnlich der von einfachen Belastungsversuchen (5.0 kN / mm vs. 4.1kN / mm). Die Ermüdung, führt, wie in Abbildung 3.32 zu erkennen, zu einem vollständigen Bruch des Bleches, bevor Unterschiede im Verformungsvermögen zwischen den Reihen auftreten können.



*Abbildung 3.32: Versagensmechanismus unter zyklischer Scherbelastung, [59]*

Auf der Grundlage der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse, werden die folgenden Schlussfolgerungen gezogen:

- 1) Der modifizierte HSK -Anschluss hat eine hohe Anfangssteifigkeit bei einer großen Duktilität, solange das Klebstoffdübeltragvermögen (AD) größer ist, als das Stahltragvermögen zwischen den Löchern (SL).
- 2) Die Leistungsfähigkeit und die Steifigkeit können bei Bekanntheit der Stahleigenschaften und der Anzahl der SL und AD zuverlässig hervorgesagt werden.
- 3) Die Orientierung der Stahlbleche in CLT hat keinen Einfluss auf die Verbindungsleistung.
- 4) Die Duktilität der Verbindung kann durch Abkleben einzelner Lochreihen mit Klebeband verbessert werden, um das Fließen des Stahl in diesem Bereich zu erleichtern und eine Plastifizierung innerhalb des CLT –Körpers zu erreichen.

## KAPITEL 4: MECHANISCHES VERHALTEN

### 4-1 ALLGEMEIN

---

[25]

Kleben zählt zu den stoffschlüssigen Fügeverfahren, bei denen durch die Zugabe eines Fügepartners, in diesem Fall der Klebstoff, eine Verbindung zwischen den Fügeteilen hergestellt wird. Die Festigkeit einer Klebeverbindung ist abhängig vom Klebstofftyp, von der Beanspruchung, von der Geometrie und von den Eigenschaften der verwendeten Fügepartnerwerkstoffe. Gegenüber anderen Fügeverfahren erfolgt eine Kraftübertragung senkrecht zur Belastungsrichtung über einen flächenförmigen Verbund. Ein Vorteil besteht in der Verarbeitbarkeit unter Raumtemperaturen, wodurch es zu keinen thermischen Fügebeeinflussungen kommt. Als Nachteil treten in Beanspruchungsrichtung an den Überlappungsenden Spannungsspitzen auf. Die Wärmebeständigkeit der Klebeschichten schwankt bei Dauerbeanspruchung je nach Klebstoffart zwischen 120 °C – 300°C. Ebenso kann durch Feuchteinfluss die Festigkeit erheblich abgemindert werden. Um eine ausreichende Haftung am Klebstoffuntergrund zu erzielen, müssen die Fügepartner meist einer Oberflächenbehandlung unterzogen werden. Klebstoffe werden nach unterschiedlichen Kriterien eingeteilt. In dieser Arbeit erfolgt eine Unterscheidung nach ihrer Aushärtungsart.

#### **Reaktionsklebstoffe (chemisch abbindende Klebstoffe)**

Der flüssige Klebstoff besteht aus sehr kleinen Monomermolekülen. Nach dem Applizieren des Klebstoffes und dem anschließenden Fügen der Verbindungsteile, findet in der Klebefuge eine chemische Reaktion statt. Dadurch bilden die flüssigen Monomere eine harte Klebstoffschicht aus.

#### **Physikalisch abbindende Klebstoffe**

Die Reaktion der Monomere zu Polymere kann bereits durch den Klebstoffhersteller erfolgen. Als Folge sind die verzweigten Netzstrukturen nicht mehr verarbeitbar und müssen mittels Wärmezufuhr, Dispersion oder Lösemittel erneut in den flüssigen Zustand übergeführt werden. Um eine Verbundwirkung der Fügepartner zu erzielen, müssen Dispersionen und Lösemittel vor dem Abbindevorgang entweichen bzw. verdunsten. Dieser Vorgang basiert auf einer rein physikalischen Vorgangsweise, wodurch diese Klebstoffe nicht in die Kategorie der chemischen Klebstoffe einzuordnen sind. Im Näheren wird in der vorliegenden Arbeit auf die für die Versuche benötigten Zweikomponentigen Reaktionsklebstoffe eingegangen. Dabei sind Epoxidharzklebstoffe auf Grund ihrer hohen Festigkeit, bedingt durch den starken Vernetzungsgrad der Polymere, besonders wärmebeständig. Ein weiterer Vorteil besteht in der guten Resistenz gegen Feuchte- und Alterungseinflüssen. Nachteilig wirkt sich die begrenzte Verformbarkeit dieses Klebstoffes aus. Polyurethanklebstoffe härten ebenfalls durch Polyaddition aus. Dabei reagieren niedermolekulare Polycyanat-Gruppen mit den niedermolekularen Hydroxid-Gruppen (Alkohole). Durch die relativ kleinen Moleküle lassen sich die beiden Komponenten leicht vermischen, was auf eine geringe Viskosität schließen lässt. Der Vorteil vom Polyurethanklebstoff liegt in seiner Anwendbarkeit für biegebeanspruchten Werkstoffe, da er sehr flexible Eigenschaften aufweist.

## 4-2 VERBUNDWIRKUNG VON KLEBEVERBINDUNGEN

[25]

Eine Klebung wird, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, als Gesamtsystem von Füge­teilen, Grenzschichten und Klebstoff gesehen, welche durch ihre Einzelfestig­keiten bestimmt werden.

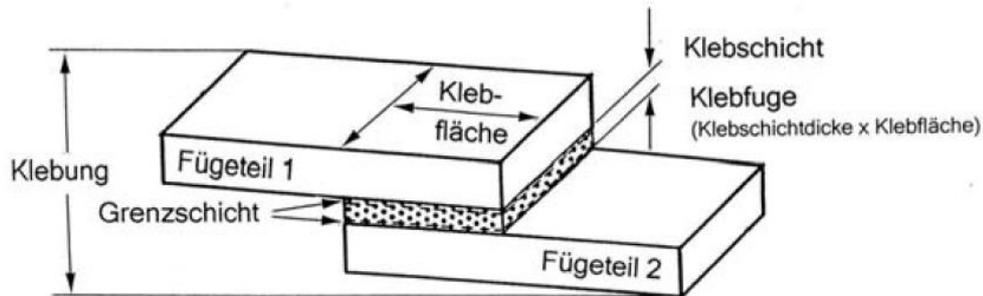


Abbildung 4.1: Aufbau einer einschnittig überlappten Verklebung, [25]

### 4-2.1 ADHÄSION

Als Adhäsion (Oberflächenhaftung) wird die Verbundwirkung zwischen Klebstoff und Füge­teil verstanden und wirkt ausschließlich in der Grenzschicht der Klebe­verbindung. Dabei findet ein mechanisches Verhaken des Klebstoffes in der „rauen“ Oberfläche der Füge­partner statt. Die ursprüngliche Bedeutung des Wortes stammt aus dem Lateinischen und bedeutet adhaesio oder adhaerere = „an etwas haften“.

Grundprinzip: Alle Stoffe bestehen aus Atomen, welche sich durch elektrische Kräfte zusammenhalten. Im inneren eines Stoffes herrscht an den benachbarten Teilchen ein Gleichgewicht. Im Gegensatz dazu, herrscht an den Oberflächenatomen jedoch kein elektrisches Gleichgewicht mehr, wodurch die elektrische Ladung die Teilchen in ihrer umgebenden Fläche anzieht wie z.B. Staubpartikel.

Neben den zwischenmolekularen Bindungskräften wirken besonders bei Metallklebe­verbindungen die chemischen Bindungsmechanismen: Hierbei gehen Metalloxide mit den Klebstoffmolekülen sehr feuchteresistente Komplexverbindungen ein.

Die maximale Entfernung in der die Adhäsion wirkt, beschränkt sich auf Größenordnungen von hunderttausendstel Millimeter. Hierbei ist es sehr wichtig, dass der Klebstoff nur aufgetragen werden kann, wenn nicht zuvor eine Verbundwirkung von Staubpartikeln oder Feuchtigkeit an der Oberfläche stattgefunden hat.

### 4-2.2 KOHÄSION

Diese Kräfte wirken im Inneren der Klebschicht und halten den Klebstoff zusammen. Je höher die Kohäsion, desto formbeständiger ist der Klebstoff. Wichtig für eine gute kohäsive Bindung ist eine gleichmäßige, luftblasenfreie Klebeschicht. Einen wichtigen Parameter bildet die Kohäsionsfestigkeit in Bezug auf das Kriechen und Fließen des Klebstoffes unter mechanischer Belastung.

### 4-2.3 OBERFLÄCHENSANNUNG

Ein fester Körper wird im Inneren durch die gleichmäßigen Anziehungskräfte der Moleküle zusammengehalten. An der Oberfläche wirkt wie in Abbildung 4.2 auf Grund des nicht vorhandenen Kräftegleichgewichts eine nach innen gerichtete Kraft, die versucht, den festen Körper zu verkleinern.

Wird nun auf einen Körper Klebstoff aufgetragen, werden zwei unterschiedliche Oberflächenspannungen miteinander vereinigt. Dabei ist entscheidend, wie hoch die Differenz der Oberflächenspannung des Fügepartners im Vergleich zum Klebstoff ist. Je höher der Unterschied ist, desto besser haften die Komponenten Klebstoff und Fügepartner aneinander. Besonders gute Wirkungen lassen sich bei Verklebungen mit Stahl erzielen.

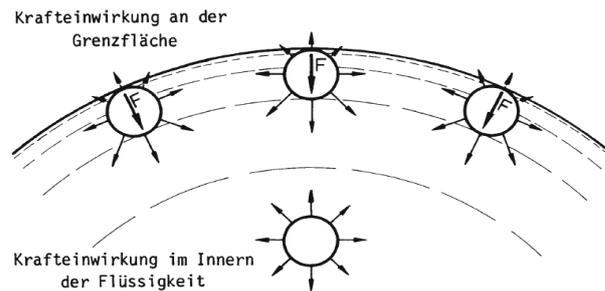


Abbildung 4.2: Oberflächenspannung - Entstehung, [25]

### 4-2.4 BENETZUNG

[25], [26]

Um eine gute adhäsive Wirkung zu erreichen, ist eine ausreichende Fließfähigkeit des Klebstoffes von großer Bedeutung. Dabei stellen niedrig viskose Klebstoffe mit einem niedrigen Benetzungswinkel  $< 30^\circ$  ein gutes Benetzungsverhalten des Fügepartners dar. In Abbildung 4.3 wird die Abhängigkeit des Benetzungsverhaltens vom Winkel dargestellt.

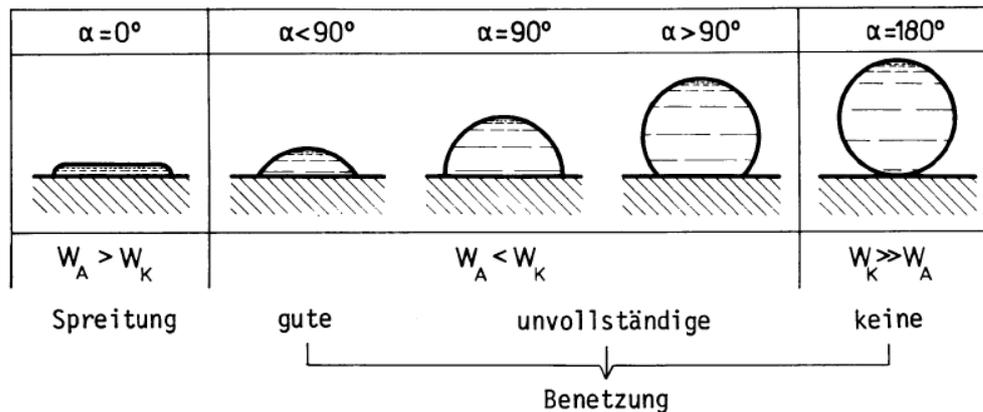


Abbildung 4.3: Abhängigkeit des Benetzungsverhaltens vom Benetzungswinkel, [26]

## 4-3 KLEBTECHNISCHE EIGENSCHAFTEN METALLISCHER WERKSTOFFE

---

[25], [26]

Hinsichtlich der Festigkeit zeichnen sich metallische Werkstoffe im Vergleich zu nichtmetallischen durch eine geringere Verformbarkeit aus. Dies führt dazu, dass bei mechanischer Beanspruchung wie Zug, Druck, Scherung oder Biegung der Klebstoff derselben Verformungsbeanspruchung unterliegt. Aufgrund der Undurchlässigkeit von Lösemitteln in metallischen Werkstoffen, ist darauf zu achten, die maximalen Trockenzeiten einzuhalten, um die Festigkeit der Verbindung durch eingeschlossene Lösemittelreste nicht herabzusetzen. Generell sollten lösemittelhaltige Klebstoffe nicht für Metallklebungen eingesetzt werden. Dasselbe gilt aus den gleichen Gründen für Dispersionsklebstoffe.

Von großer Bedeutung für eine kraftschlüssige Klebeverbindung von metallischen Fügepartnern ist die Vorbehandlung der Metalloberflächen. Dabei werden die Oberflächen von Ölen und Fetten gereinigt. Um einen größeren mechanische Verbund zu erreichen, werden die Füge Teile durch Strahlen, Schleifen oder Bürsten aufgeraut. Um das Verhalten der metallischen Flachkörper in dieser Arbeit genauer zu erläutern, wird im Folgenden auf die verwendeten Metalle genauer eingegangen:

- Aluminium und dessen Legierungsformen gehören zur Gruppe der unedlen Metalle, welche bei Lagerung dazu neigen, sich mit einer Oxydschicht zu ummanteln. Folglich bietet die Haftung des Klebstoffes auf dem Grundmetall keine ausreichende Festigkeit mehr, wodurch eine mechanische Oberflächenvorbehandlung unumgänglich ist.
- Allgemeine Baustähle gliedern sich ebenfalls in die Reihe der unedlen Metalle und bilden bei Sauerstoffkontakt eine Oxydschicht („Rost“), die ohne mechanische Oberflächenvorbehandlung ein ausreichendes Haftvermögen zwischen Stahl und Klebstoff verhindert.
- Feinkornbaustähle eignen sich auf Grund ihres niedrigen Kohlenstoffgehaltes von unter 0,2 % besonders gut zum Schweißen. Sie zeichnen sich im Vergleich zu allgemeinen Baustählen durch eine höhere Streckgrenze aus und besitzen wegen ihrer feinkörnigen Struktur, welche durch bestimmte Legierungselemente hervorgerufen wird, duktilere Eigenschaften.

## 4-4 BRUCHVERHALTEN VON KLEBEVERBINDUNGEN

### 4-4.1 BRUCHMECHANISMEN IN KLEBEVERBINDUNGEN

[25], [26]

#### 4-4.1.1 Adhäsionsbruch

Er weist auf eine Trennung des Fügeteils und des Klebstoffes hin. Meist treten Adhäsionsbrüche als Mischbrüche auf, da ein reiner Adhäsionsbruch mit vollständiger Trennung des Stahls und Klebstoffes auf Grund der chemischen Bindungsmechanismen mit dem Stahl praktisch nicht möglich ist (siehe Abschnitt 4-2.1) In den meisten Fällen ist eine unzureichende Oberflächenvorbehandlung ein Indiz für ein adhäsives Bruchversagen. Mischbrüche treten vorwiegend bei nicht vollständig oder ungleichmäßiger Entfettung der metallischen Oberflächen auf. Ebenso soll nach dem Strahlen eine erneute Entfettung durchgeführt werden, da die Druckluft eventuell nicht fettfrei ist. Durch eine zu geringe Klebstoffstärke oder eine überschrittene Topfzeit kann ebenfalls ein Adhäsionsbruch eintreten.

#### 4-4.1.2 Kohäsionsbruch

Beim Kohäsionsbruch erfolgt der Bruch im Klebstoff selbst. Dabei wird das Bruchverhalten, welches spröde oder zäh sein kann, wesentlich von der Morphologie und dem Vernetzungszustand der Polymere beeinflusst. Ein ausgeprägtes Spröbruchverhalten weisen stark vernetzte Polymere auf. Im Gegensatz dazu verformen sich beim zähen Bruch die Polymere, um die mechanische Beanspruchung über die Verformungen abzubauen. Ob eine Klebschicht spröde oder zäh ist hängt im Wesentlichen von der Beanspruchungsgeschwindigkeit, der Temperatur und dem Spannungszustand ab. Die größte Bruchgefahr geht bei Klebeverbindungen nicht von der mittleren Beanspruchung im Klebefugenbereich aus, sondern erfährt im Bereich hoher Spannungskonzentrationen, wie z.B. Kerben ihre Maximalwerte. Im Bereich von Überlappungsenden treten bei Schub- und Zugbeanspruchungen teils hohe Spannungsspitzen auf, welche zum Ausgangspunkt eines Bruches führen können. Kohäsionsbrüche können bei nicht vollständig ausgehärteten Klebstoffschichten oder unter Verwendung eines falschen Klebstofftyps auftreten. Ebenso kann ein solches Versagen bei Lufteinschlüssen in der Klebschicht auftreten.

Besonderer Bedeutung ist dem Verklebungsvorgang zu schenken. Durch eingeschlossene Luftblasen kommt es zu einem fehlenden Verbund zwischen Flachkörper-Klebstoff oder Klebstoff-Holzkörper, wodurch die maximale erreichbare Traglast massiv herabgesetzt wird. In der folgenden Abbildung 4.4 werden drei Bruchversagensarten von Verklebungen aufgezeigt.

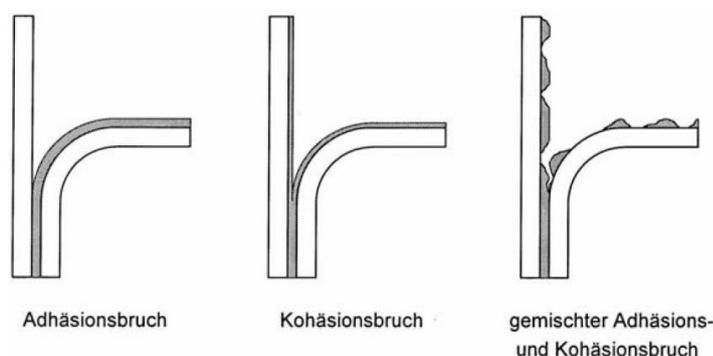


Abbildung 4.4: Brucharten von Verklebungen, [25]

## 4-4.2 VERSAGENSMECHANISMEN VON VERBINDUNGEN MIT IN HOLZ EINGEKLEBTEN BLECHEN

Bedingt durch die vorliegende Arbeit wird in der folgenden Tabelle 4.1 ein Überblick über die unterschiedlichen Versagensmodi bezogen auf die einzelnen Materialkomponenten gegeben. Die Abbildung 4.5 zeigt beispielhaft einige Bruchbilder aus den Vorversuchen dieser Arbeit.

*Tabelle 4.1: Mögliche Versagensmodi von Holz-Prüfkörper mit eingeklebten Blechen*

Material	Versagensmodus
<b>Holz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abscheren des Holzes nahe der Klebstofffuge (Scherversagen)</li> <li>- Abriss des gesamten Holzquerschnittes unter dem eingeklebten Blech (Überschreiten der Zugfestigkeit des Holzes)</li> <li>- Querkzugversagen durch Aufspalten des Holzes unter dem eingeklebten Blech</li> </ul>
<b>Blech</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fließen des Bleches bei Erreichen der Fließgrenze</li> <li>- Blechbruch durch überschreiten der Zugfestigkeit</li> </ul>
<b>Klebstoff</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adhäsionsversagen im Klebstoff-Holz</li> <li>- Kohäsionsbruch durch Abscheren des Klebstoffes</li> <li>- Adhäsionsversagen Klebstoff-Blech</li> </ul>



*Abbildung 4.5: Versagensbilder von Verbindungen mit in Holz eingeklebten Blechen: Aluminiumbruch (links), Holzbruch (Mitte), Kohäsionsversagen im Klebstoff (rechts)*

## 4-4.3 SCHÄLSPANNUNGEN

Schälspannungen treten auf Grund von senkrecht zur Belastungsrichtung wirkenden Zugkräften auf. Schälspannungen sind vorwiegend auf exzentrische Beanspruchungen zurückzuführen und spielen eine wesentliche Rolle in Bezug auf die erreichbare Verbundfestigkeit einer Klebeverbindung. Dabei entstehen wie in Abbildung 4.6 an den Überlappungsenden hohe Spannungskonzentrationen, die ein Versagen bei entsprechendem Lastniveau einleiten können. Bei der Ausbildung einer Klebeverbindung ist daher auf eine gleichmäßige und möglichst schälspannungsarme Lasteinleitung Wert zu legen. Der

Schälwiderstand steigt mit einem höheren E-Modul des Fügeteils. Ebenso erhöht er sich mit zunehmender Blech- und Klebstoffdicke.

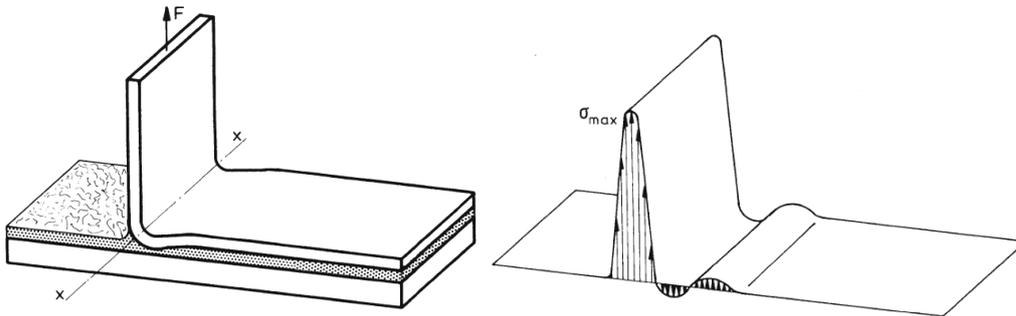


Abbildung 4.6: Schälspannungsverteilung in einer Klebeverbindung bei Schälbeanspruchung, [26]

#### 4-4.4 EINFLUSS DER KLEBEFUGENGEOMETRIE

[26]

Die wichtigste Einflussgröße ist hierbei die Überlappungslänge, über welche sich die Spannungsverteilung in Belastungsrichtung ändert. Bei zu geringer Überlappungslänge ist die übertragbare Kraft durch die geringe Klebefläche so klein, dass die vorhandene Spannung unterhalb der ausnutzbaren Werkstofffestigkeit liegt. Bei zu großer Überlappungslänge liegt die Fügeiteilspannung oberhalb der 0,2 % Dehngrenze. Die Fügeiteile werden an den Überlappungsenden plastisch gedehnt, wodurch sich der Klebstoff nicht mehr an der Dehnungsaufnahme beteiligen kann. Somit kommt es zum Versagen an den Überlappungsenden, da sich dort hohe Spannungsspitzen ausbilden. Aus diesem Grund leitet sich der Gedanke ab bei reinen Metallklebeverbindungen, die Streckgrenze nur bis zur 0,2 % Dehngrenze zu führen.

Als weiterer Faktor wäre hierbei die Fügeiteildicke zu nennen, welche bei einer Erhöhung eine Reduktion der Spannungsspitzen an den Überlappungslängen nach sich zieht. Dabei ist jedoch zu erwähnen, dass durch die sich dadurch ergebenden höheren Steifigkeiten eine größere Mitwirkung der Klebefuge ergeben.

Eine ebenso wichtige Rolle spielt die Klebeschichtdicke. Durch geringe Klebeschichtdicken wird, wie die Abbildung 4.7 zeigt, die Querkontraktion in der Klebeschicht behindert, was zu einer Festigkeitssteigerung führt. Bei zu großen Schichtdicken ist die Gefahr von Schwindspannungen nicht außer Acht zu lassen.

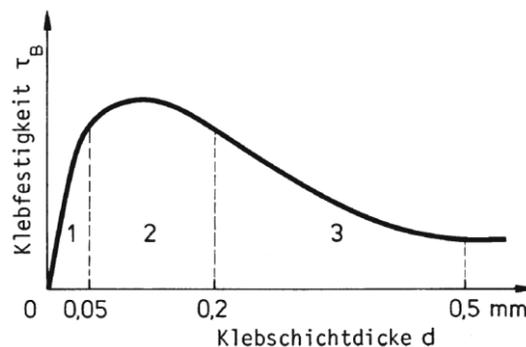


Abbildung 4.7: Abhängigkeit der Klebefestigkeit von der Klebstoffdicke, [26]

## 4-4.5 EINFLUSS DER OBERFLÄCHENGEOMETRIE

[26]

Eine nicht zu verachtende Rolle spielt neben der molekularen Oberflächenbeschaffenheit, in der sich die Adhäsionskräfte aufbauen, die makroskopische Oberflächenstruktur. Diese dient der mechanischen Verankerung des Klebstoffes an den Fügepartnern. Um die Einflüsse der Oberflächenrauheit zu bestimmen werden, wie in Abbildung 4.8 dargestellt, grundsätzlich drei Sichtweisen der Oberflächenbetrachtung vorgestellt. Dabei ist die geometrische Oberfläche als Abmessung der Breite und der Überlappungslänge der geklebten Fläche zu verstehen. Im Vergleich dazu, schließt die wahre Oberfläche mikroskopische Oberflächenrauigkeiten mit ein, was zu einer Oberflächenvergrößerung führt. Daraus resultiert, dass dem Klebstoff mehr Grenzflächen für die Haftung zu Verfügung gestellt werden. Da in der Praxis jedoch nicht die gesamte Oberfläche benetzt werden kann, wurde der Begriff der wirksamen Oberfläche eingeführt, der nur anteilmäßig der wahren Oberfläche entspricht.

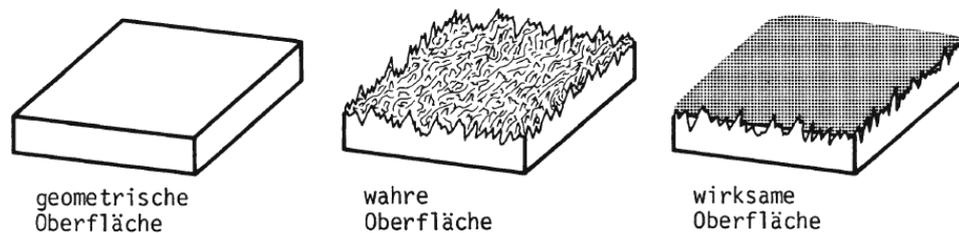


Abbildung 4.8: Oberflächenarten, [26]

Aus Untersuchungen ergibt sich, dass die Klebeschichtdicke bei Oberflächenbehandlungen einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit besitzt. Folglich kann es bei zu geringen Klebeschichtdicken zu Spitzenberührungen der Fügepartneroberflächen kommen. Die Gestaltung der Oberflächenrauheit spielt bei der Eindringung des Klebstoffes eine bedeutende Rolle. Dabei wird zwischen parallelen oder kreuzenden Kanälen wie z. B. spanabhebenden Oberflächenbearbeitungen und kapillarförmigen oder chemischen Oberflächenbehandlungen, wie z.B. Sandstrahlen unterschieden. Die richtungsabhängige Ausbreitung des Klebstoffes wird bei spanabhebenden Bearbeitungen durch den kanalförmigen Verlauf verursacht. Dabei spielt die Geometrie des Kanalquerschnittes wiederum eine bedeutende Rolle, da sie den Benetzungsgrad wesentlich beeinflusst.

## 4-5 KETTENMODELL

[46]

Bei einer Verbindung mit in Holz eingeklebten Blechen sollte das gesamte System im Versagensfall als duktile Verbindung wirken, wonach sich durch große Deformationen ein Versagen ankündigt. Um nun bei Bruchlastniveau ein planmäßiges duktiler Versagen herbeizuführen erscheint es sinnvoll durch Wahl entsprechender Randbedingungen (z.B. Geometrie des Bleches, Querschnittsschwächung des Bleches, Klebefläche, Einklebelänge, ...) eine Plastifizierung der Blechkomponente zu erreichen. Um die Verbindung möglichst leistungsfähig (hoher Wirkungsgrad) zu gestalten, bedarf es bei vorliegender Beanspruchungssituation genauer Kenntnisse über die Eigenschaften der einzelnen Fügepartner. Insofern muss es Ziel sein unter Berücksichtigung der streuenden Eigenschaften des Fügepartners Holz, die wesentlichen Parameter zur Abschätzung der Tragfähigkeit bei Holzversagen zu identifizieren. Darauf basierend kann eine Optimierung der Klebeverbindung hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und des

Tragverhaltens erfolgen. Das Grundprinzip vorgestellten Konzeptionierung einer Holz-Blech Klebeverbindung wird in Abbildung 4.9 anhand des „Kettenmodells“ veranschaulicht.

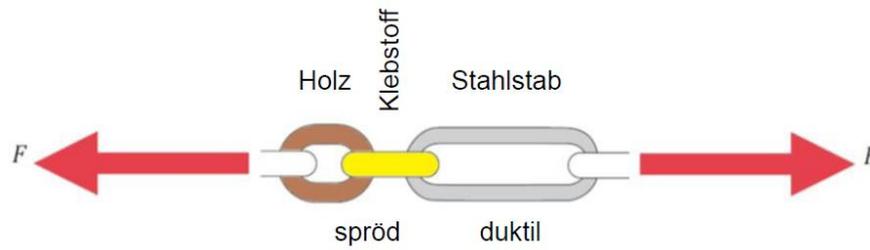


Abbildung 4.9: „Kettenmodell“ von Klebeverbindungen, [46]

# KAPITEL 5: RECHENMODELLE FÜR KLEBEVERBINDUNGEN

## 5-1 ALLGEMEINES

---

[26], [53], [55], [57]

Für die Nachweisführung und Dimensionierung von Bauteilen ist die gesicherte und zuverlässige Kenntnis der wirksamen Beanspruchungen bzw. Spannungen erforderlich. In der Fuge von geklebten Verbindungen tritt im Allgemeinen ein mehrachsiger Spannungszustand mit nicht-linearem Verlauf auf.

Dabei wirken unterschiedliche Typen und Orientierungen von Spannungen, wie

- Schubspannungen parallel und quer zur Klebefläche,
- Normalspannungen (Zug- und Druck) auf die Klebefläche sowie
- Zugspannungen und
- Biegespannungen in den beteiligten Klebpartnern bzw. den zu verbindenden Bauteilen.

Die auftretenden Spannungen hängen nach Qualität und Quantität wiederum von mehreren Parametern, wie

- der Geometrie der Bauteile,
- den mechanischen Kenngrößen der Fügepartner – insbesondere der Steifigkeiten (E-Modul, Schubmodul) – aber auch den Festigkeitseigenschaften,
- der vorliegenden Beanspruchung sowie
- den zu berücksichtigenden Randbedingungen

ab.

Für die Verifikation und den Vergleich von Prüfergebnissen mit den Ergebnissen von Rechenmodellen sind weiter

- die vorausgesetzten Annahmen und Vereinfachungen,
- die Art des Rechenmodells (analytisch/numerisch) und
- das verwendete Rechenmodell an sich und dessen Restriktionen

von Relevanz.

Zusammenfassend muss daher festgestellt werden, dass von den zur Verfügung stehenden (Ingenieur-) Modellen und wegen den vorliegenden komplexen Verhältnissen, keine präzise Vorhersage – insbesondere in quantitativer Hinsicht – erwartet werden kann. Vielmehr kann als Ergebnis der nachfolgend überblicksmäßig geschilderten Rechenmodelle lediglich ein phänomenologischer Einblick in die Beanspruchungen erwartet werden. Dies sollte bei der Beurteilung der Ergebnisse der Rechenmodelle in jedem Fall berücksichtigt werden.

Als historisch erstes analytisches Rechenmodell ist in diesem Zusammenhang die Theorie nach Volkersen zu nennen, welche auf dem Ansatz basiert, dass sich die Verbindung ausschließlich linear-elastisch verhält und keine Biegebeanspruchung der Fügebauteile stattfindet. Eine Weiterentwicklung stellt das Modell

nach Tsai et al. [55] (TOM-Theorie), welche zusätzlich die Schubverformungen in den Fügeteilen berücksichtigt. Im Weiteren wurde von Goland et al. noch zusätzlich die Exzentrizität der Fügeteile miteinbezogen. Die genannten analytischen Modelle können jedoch nur für relativ einfache Systeme herangezogen werden, da es im Falle komplexer Geometrien und auf Grund der Materialeigenschaften der Fügepartner (z. B. Anisotropie des Holzes) mit hohem Aufwand verbunden ist, diese Faktoren exakt miteinzubeziehen.

## 5-2 INGENIEURMÄSSIGE ABSCHÄTZUNG

Für eine grobe Abschätzung der Spannungssituation in der Klebefuge, sowie der auftretenden Schnittkräfte, wird der Prüfkörper am Ende der Einklebelänge gedanklich freigeschnitten und idealisiert als Kragarm beschrieben, sodass die Spannungseinflüsse vom Holzkörper unterhalb der Klebefuge nicht miteinbezogen werden. Um die auftretenden Spannungen in der Klebefuge sowie im Fügeteil zu veranschaulichen, wird, wie in Abbildung 5.1 zu sehen, für eine erste grobe Abschätzung ein konstanter Schubspannungsverlauf entlang der Verbundfuge angenommen. Neben den Schubspannungen ( $\tau$ ) in der Klebefuge werden auch die Normalspannungen im Fügeteil zufolge der Normalkraft (= Resultierende der Schubspannungen in der Klebefuge) ( $\sigma_N$ ), sowie des Biegemomentes (= Normalkraft mal Hebel) ( $\sigma_M$ ) betrachtet. Auf Grund des rüctreibenden Momentes der Normalspannungsanteile ( $\sigma_R$ ) der Verklebung wird dieses vermindert. Für eine erste Abschätzung dieses Anteiles wird angenommen, dass rund 10 % des Biegemomentes  $M$  durch die Verklebung abgetragen werden.

Im Folgenden wird eine Vorabschätzung anhand der durchschnittlich aufnehmbaren Normalkraft aller Zugprüfungen aus Kapitel 6 durchgeführt.

$$F = 40 \text{ kN} \quad b = 60 \text{ mm} \quad l_{ii} = 100 \text{ mm} \quad t_1 = 26,5 \text{ mm}$$

Die Scherspannungen dieser Verbindung in der Klebefuge berechnen sich wie folgt:

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot l_{ii} \cdot b} = \frac{40.000}{2 \cdot 100 \cdot 60} = 3,33 \text{ N / mm}^2 \text{ (konst.)}$$

Das Moment  $M_0$  mit dem Drehpunkt bei  $x = 100 \text{ mm}$  ergibt sich zu:

$$M_0 = \frac{F}{2} \cdot \frac{t_1}{2} = \frac{40.000}{2} \cdot \frac{26,5}{2} = 265.000 \text{ Nmm} = 0,265 \text{ kNm}$$

Die Normalspannung im Fügeteil zufolge Normalkraft und Moment berechnet sich wie folgt:

$$\sigma_N = \frac{F}{2 \cdot t_1 \cdot b} = \frac{40.000}{2 \cdot 26,5 \cdot 60} = 12,6 \text{ N / mm}^2$$

$$\sigma_M = \frac{M_0}{W} = \frac{265.000}{7023} = 37,7 \text{ N / mm}^2 \quad \text{mit} \quad W = \frac{b \cdot t_1^2}{6} = \frac{60 \cdot 26,5^2}{6} = 7023 \text{ mm}^3$$

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = 12,6 + 37,7 = 50,3 \text{ N / mm}^2$$

Die ergibt einen zu konservativen Fall (= zu hohe Beanspruchung), weil die durch die Verklebung auftretenden, rüctreibenden Normalspannungsanteile unberücksichtigt bleiben. Diese werden im Folgenden näherungsweise berücksichtigt.

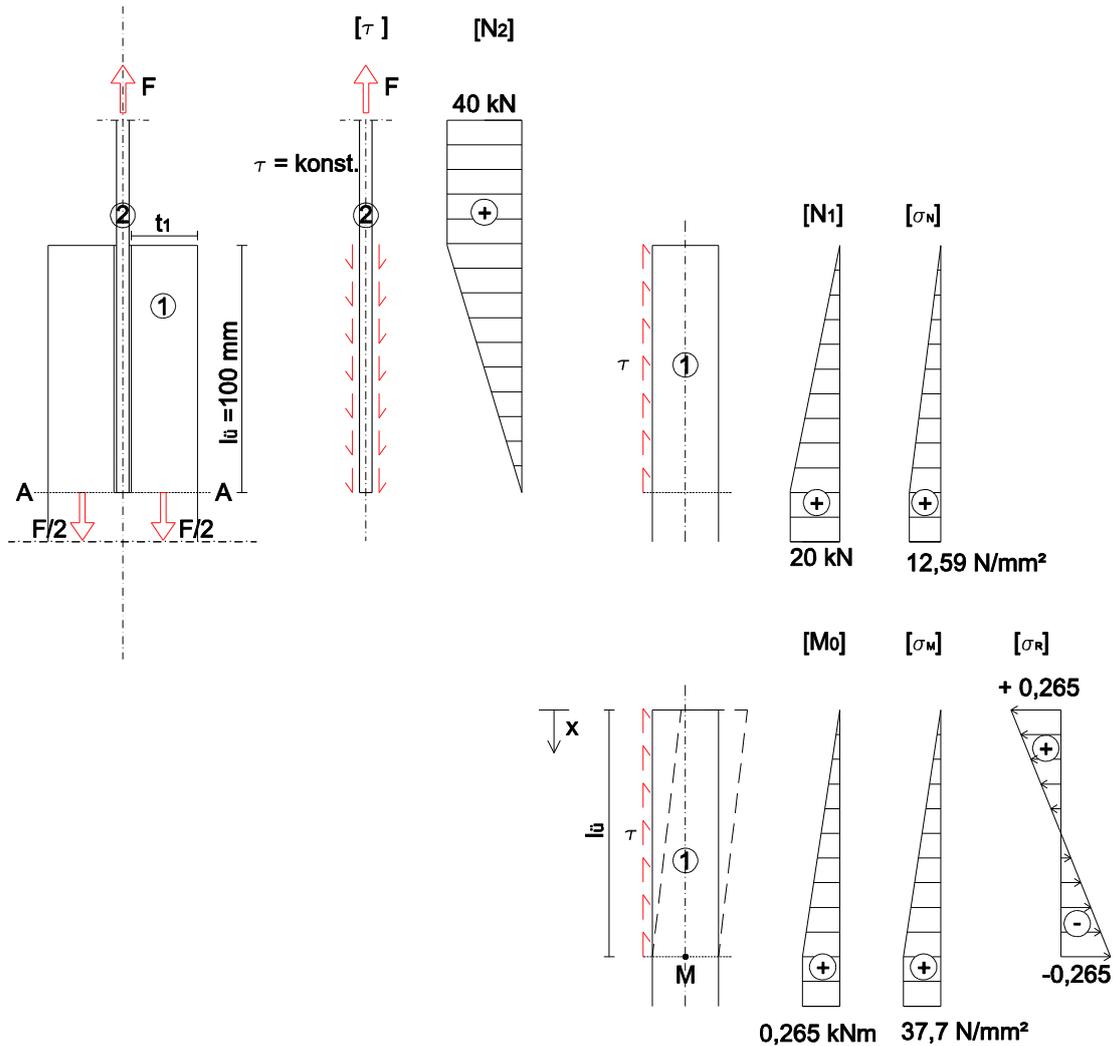


Abbildung 5.1: Vorabschätzung der Spannungs- und Schnittkraftverteilung in einem Prüfkörper

Der Momentenanteil, welcher Normalspannungen durch die Klebewirkung hervorruft, lässt sich folgend berechnen (Anteil geschätzt):

$$\Delta M = 0,10 \cdot M_0 = 26.500 \text{ Nmm} = 0,0265 \text{ kNm}$$

Anschließend wird die (Normal-) Randspannung  $\sigma_R$  folgendermaßen berechnet:

$$\sigma_R = \frac{6 \cdot \Delta M}{b \cdot l_{\ddot{u}}^2} = \frac{6 \cdot 26.500}{60 \cdot 100^2} = 0,265 \text{ N/mm}^2$$

Um den Verlauf für die Normalspannung über die gesamte Klebelänge zu erhalten, wird folgende Funktion aufgestellt:

$$\sigma_{(x)} = \sigma_R \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot x}{l_{\ddot{u}}}\right)$$

Das entlang der Längsachse auftretende Moment aus der Normalkraftbeanspruchung auf die Klebefuge ergibt sich aus als Integral der Normalspannung mal der Breite mal dem Abstand vom oberen Klebefugenende zu

$$\Delta M(x) = \int_0^{\bar{x}} \left[ \sigma_R \cdot b \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot x}{l_{ii}}\right) \right] \cdot x \cdot dx$$

Nach Integration der Funktion erhält man für  $\Delta M$  bei  $x = l_{ii}$ :

$$\Delta M(l_{ii}) = \sigma_R \cdot b \cdot \left(-\frac{l_{ii}^2}{6}\right)$$

Durch Einsetzen von  $l_{ii} = 100 \text{ mm}$  erhält man:

$$\Delta M(x = 100 \text{ mm}) = 0,265 \cdot 60 \cdot \left(-\frac{100^2}{6}\right) = -26.520 \text{ Nmm} (= 0,9 \cdot M_0)$$

Das auftretende Moment am Ende der Klebefuge ergibt sich zu:

$$M = 0,9 \cdot M_0 = 0,9 \cdot 265.000 = 238.500 \text{ Nmm}$$

Die Normalspannung im Füge teil zufolge Normalkraft beträgt wie oben:

$$\sigma_N = \frac{F}{2 \cdot t_1 \cdot b} = \frac{40.000}{2 \cdot 26,5 \cdot 60} = 12,6 \text{ N/mm}^2,$$

während der Biegemomentenanteil sich geringfügig verkleinert:

$$\sigma_M^* = \frac{0,9 \cdot M_0}{W} = \frac{0,9 \cdot 265.000}{7023} = 34,0 \text{ N/mm}^2 \quad \text{mit} \quad W = \frac{b \cdot t_1^2}{6} = \frac{60 \cdot 26,5^2}{6} = 7023 \text{ mm}^3$$

Für die resultierende Längsspannung an der inneren Randfaser ergibt sich:

$$\sigma^* = \sigma_N + \sigma_M^* = 12,6 + 34,0 = 46,6 \text{ N/mm}^2$$

Ein Vergleich der Ergebnisse dieser ingenieurmäßigen Abschätzung führt zu dem Schluss, dass die vorliegende Klebeverbindung auf Grund des Überschreitens der Biegespannung am unteren Ende der Klebefuge versagen dürfte. Im Vergleich dazu bewegen sich die – allerdings angenommenen – Normalbeanspruchungen auf die Klebefuge wie die auftretenden Schubspannungen in einem, für den Werkstoff Holz akzeptablen Rahmen. Zu erwähnen dabei ist, dass Interaktionen der Spannungskomponenten bei der vorliegenden, grob vereinfachten Betrachtung unberücksichtigt blieben.

## 5-3 RECHENMODELLE ZUR ERMITTLUNG DER SCHUBSPANNUNGEN IN KLEBEVERBINDUNGEN

[26], [56], [57]

### 5-3.1 EINFÜHRUNG UND ÜBERBLICK

Der Ursprung der Volkersen-Theorie [56] liegt in der Beschreibung der Kräfteverteilung in schubbeanspruchten Nietverbindungen, welche wie in Abbildung 5.2 dargestellt, auf die Wirkungsweise einer kontinuierlichen Klebeverbindung übertragen werden kann. Sie stellt die Beziehung zwischen Spannung und Verschiebung dar. Die Beanspruchungen werden einerseits von den Füge-teilen, welche nur Längskräfte übertragen, und andererseits von der Klebeschicht, welche ausschließlich die Schubbeanspruchungen aufnimmt, aufgenommen. Um die Gültigkeit dieser Theorie aufrechtzuhalten, müssen folgende Grundvoraussetzungen gelten:

- linear-elastisches Verhalten
- keine Biegebeanspruchung bzw. Biegesteifigkeit der Füge-teile ist sehr groß (Parameter:  $E \cdot I \gg \gg$ )
- gleichmäßige Normalspannungsverteilung in den Füge-teilen
- Füge-teile nehmen nur Längsdehnungen auf (Parameter: Dehnsteifigkeit  $E \cdot A$ )
- Klebefuge nimmt nur Schubspannungen auf (Parameter: Schubsteifigkeit  $G \cdot A$ )

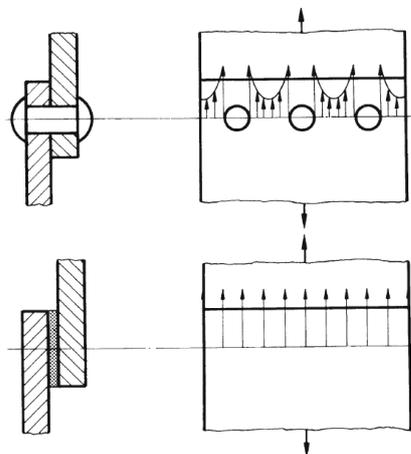


Abbildung 5.2: Spannungsverteilung in Niet- und Klebeverbindungen, [26]

Im folgenden Abschnitt wird auf die Auswirkungen einzelner Parametervariationen überblicksmäßig eingegangen.

Die mittlere Steifigkeit der kraftübertragenden Glieder ist ein maßgebender Faktor für die Verschiebungsform der Verbindung. Längs der Kraftwirkung sind die Nietkräfte in einer Zuglaschenverbindung an den äußersten Nieten am Höchsten und nehmen nach Innen hin ab. Dieses Verhalten lässt sich mit Hilfe von Differentialgleichungen für elastische Verformungen beschreiben. Um

die hohen Spannungsspitzen an den Enden zu vermindern, ist es von Vorteil, die Laschen z. B. konisch auszuführen. Eine weitere Möglichkeit die Spannungsspitzen abzubauen besteht darin, Keile an den Überlappungsstößen aufzusetzen.

Um die Kräfteverteilung und die Verschiebungsverhältnisse in den Übertragungsgliedern zu bestimmen, hat Volkersen drei Ansätze aufgestellt [56]:

Im ideal-elastischen Zustand geht die Schubkraft proportional zur Verformung ein, wobei eine geschlossene Lösung der Verschiebungsgleichung nur für konstante Querschnitte möglich ist. An den Laschenenden ergibt sich eine erhebliche Überbeanspruchung der Schubglieder (Nieten, Klebstoff). Dies kann ein Vielfaches der mittleren Schubkraft betragen. Werden diese Überbeanspruchungen an den Enden in der Spannungsberechnung nicht berücksichtigt, so stellen sich plastische Verformungen und letztlich Risse an den Laschenenden ein, welche zum Abbau der Schubspannungsspitzen führen. Speziell bei Zuglaschenverbindungen ist, wie in Abbildung 5.3 erkennbar, eine ausgeprägte Ungleichförmigkeit der Schubkraftverteilung zu erkennen.

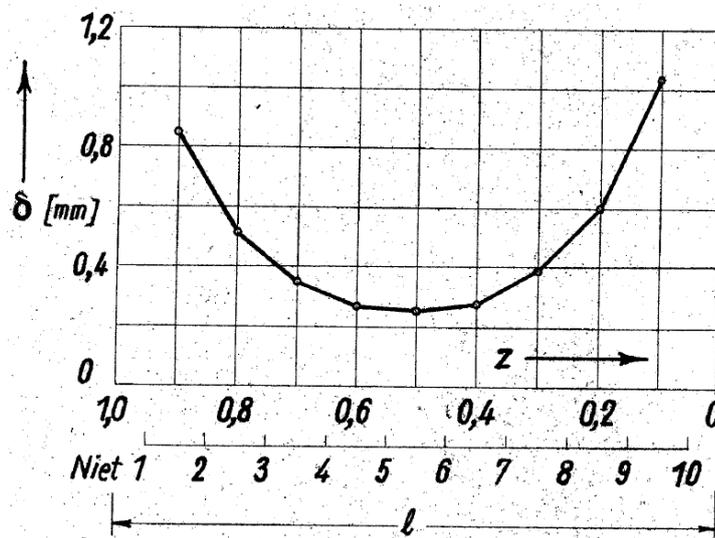


Abbildung 5.3: Ungleichförmigkeit der Schubkraftverteilung- ideal elastisch, [56]

Eine weitere Modellierung bietet der elastisch-plastische Ansatz: Dieser kann z. B. mit dem Potenzansatz von C. Bach und W. Schüle umgesetzt werden. Dabei wird der Abfall der Steifigkeit bei steigender Last berücksichtigt. Im Detail wird, auf Grund vorheriger Versuchsergebnisse von Volkersen, die Verformung proportional mit der dritten Potenz der Schubkraft angenähert. Dieser Ansatz eignet sich allerdings nur bei Vorliegen sehr kleiner Lasten, welche elastischen Verformungen ausgesetzt sind. Es ist ein Ungleichförmigkeitsgrad der Schubspannungsverteilung vorhanden. Auf Grund der Beziehung

$$\frac{\delta}{\delta_{\tau m}} = \left( \frac{\tau}{\tau_m} \right)^3$$

- mit:  $\delta \dots$  Verschiebung  
 $\delta_m \dots$  mittlere Verschiebung  
 $\tau \dots$  Schubspannung  
 $\tau_m \dots$  mittlere Schubspannung

ist die Ungleichförmigkeit der Verschiebungen wesentlich größer, als jene der Schubspannungen. Normale Betriebslasten verursachen einen erheblichen Spannungsspitzenabbau. In der Folge wird im Bruchzustand eine nahezu gleichförmige Spannungsverteilung in der Verbindungsfuge erreicht.

Der real plastische Zustand, wie in Abbildung 5.4 als oberste Kurve dargestellt, wird für erste grobe Abschätzungen in Ingenieuraufgaben herangezogen. Wie dort erkennbar, weicht dieser nur geringfügig vom elastisch-plastischen Verlauf, der in der Mitte dargestellt ist, ab. Um einen möglichst einfachen Ansatz für die Berechnung der Verschiebungskurve zu erhalten, wird die Schubspannung über die gesamte Überlappungslänge als konstant angenommen [57]. Mit diesem Ansatz lassen sich auch konische Laschen berechnen.

Die Form der Verschiebungskurven im Verbindungsmittel im ideal elastischen und real plastischen Zustand besitzt bei Gleichsetzen der mittleren Steifigkeit der Fügeiteile, große Ähnlichkeit. (Abbildung 5.4)

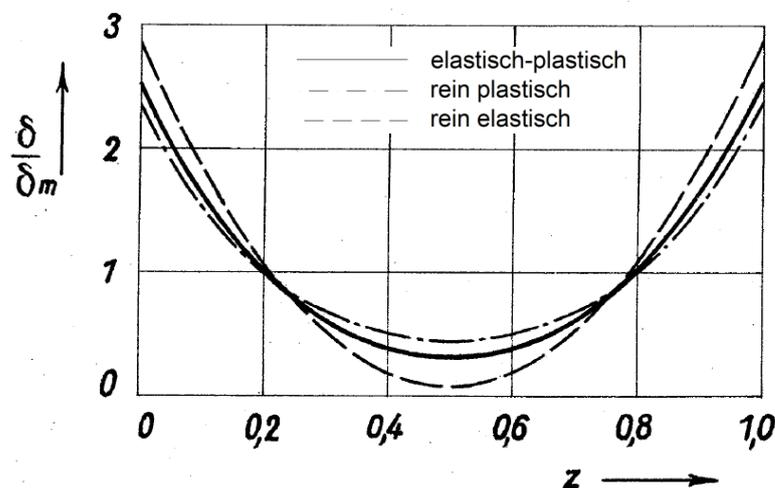


Abbildung 5.4: Verschiebungskurven der Klebeverbindung: rein elastisch, elastisch-plastisch, rein plastisch, [56]

In der folgenden Abbildung 5.5 wird der Einfluss der Kleberplastizität auf den Schubspannungsverlauf erläutert:

Nur beim ideal-elastischen Materialverhalten des Klebstoffes bilden sich ausgeprägte Spannungsspitzen an den Enden der Überlappungslänge aus. Durch den Einsatz eines Klebstoffes mit elastisch-plastischem Materialverhalten werden die Spannungsmaxima von den Randzonen in den weniger belasteten Mittelbereich verlagert [26].

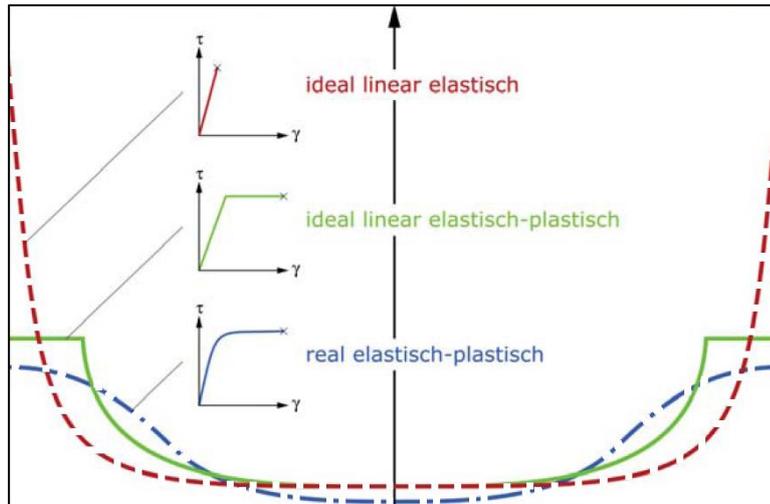


Abbildung 5.5: Einfluss der Kleberplastizität auf den Schubspannungsverlauf, [11]

Durch das Einbeziehen der Werkstoffparameter  $G$  und  $E$ , sowie der geometrischen Faktoren der Verklebung, wie der Klebestärke  $t_k$ , der Fügepartnerstärke  $t$  und der Überlappungslänge  $l_{\ddot{u}}$  entwickelte Volkersen die nachfolgende Gleichung zur Ermittlung der maximalen Schubspannung in Bezug auf die mittlere Schubspannung [26]:

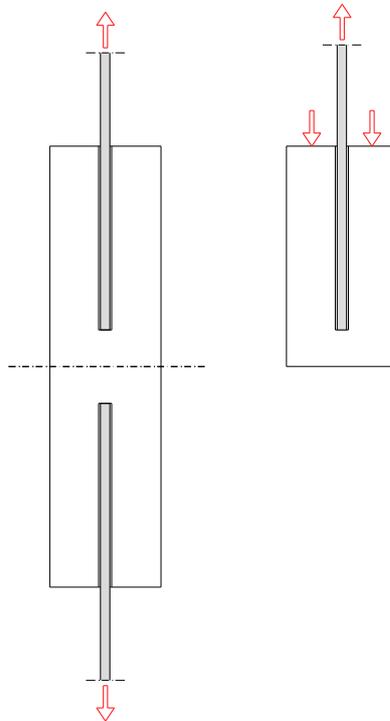
$$\tau_{max} = \tau_{avg} \cdot \left[ \sqrt{\frac{G \cdot l_{\ddot{u}}}{2 \cdot E \cdot t \cdot t_k}} * \coth \sqrt{\frac{G \cdot l_{\ddot{u}}}{2 \cdot E \cdot t \cdot t_k}} \right]$$

- mit:
- $\tau_{max}$  ... maximale Schubspannung
  - $\tau_{avg}$  ... mittlere Schubspannung
  - $G$  ... Schubmodul des Klebstoffes
  - $E$  ... Elastizitätsmodul der Fügepartner
  - $l_{\ddot{u}}$  ... Überlappungslänge
  - $t$  ... Fügepartnerstärke
  - $t_k$  ... Klebschichtdicke

Maßgeblich beteiligt an der Spannungsverteilung ist der Steifigkeitsfaktor  $\Delta = \frac{G \cdot l_{\ddot{u}}}{2 \cdot E \cdot t \cdot t_k}$ . Dabei sollte zur Erreichung einer hohen Klebefestigkeit (bei konstanten Werten von  $l_{\ddot{u}}$ ,  $t$  und  $t_k$ ) das Verhältnis  $G:E$  möglichst klein sein. Um große Spannungsspitzen zu vermeiden, soll ein elastischer Klebstoff verwendet werden. Im Gegensatz dazu sollen die Fügepartner starre Eigenschaften aufweisen. Obwohl die Gleichung von Volkersen eine vereinfachte Theorie darstellt, bildet sie eine gute Ausgangsbasis zur Spannungsbetrachtung einer Klebeverbindung, da alle wichtigen Werkstoffkenngrößen und geometrischen Parameter berücksichtigt werden. Bei der Anwendung der Volkersen-Theorie ist jedoch auf folgende Einschränkungen zu achten:

Betrachtet man die tatsächlichen Verhältnisse, so ist zu erkennen, dass die Bruchlast im proportionalen Bereich mit der Vergrößerung der Überlappungslänge bei geringen Werten zunimmt, da sich auf Grund der geringen Belastungen noch keine signifikanten Fügeteildehnungen einstellen. Mit steigender Beanspruchung beginnen sich die Fügeteile zu verformen bzw. aufzubiegen. Auf Grund der Normalspannungen, die sich durch die Momentenbeanspruchung ergeben, erfolgt ein Anstieg der Spannungsspitzen an den Überlappungsenden. Diese beiden Faktoren verursachen bei weiterer Steigerung der Überlappungslänge eine Abnahme der Bruchlast. Im Volkersen-Modell verhält sich die Klebefestigkeit proportional zur Klebschichtdicken, was sich in der Praxis nicht bestätigen lässt, da die Theorie elastische statt plastische Verformungen der Fügeteile und Klebschicht annimmt.

Um Schubspannungsverläufe von Prüfkörpern rechnerisch erfassen zu können, befasst sich diese Arbeit mit zwei unterschiedlichen Prüfkonfigurationen (siehe Abbildung 5.6). Dabei ist bei Zug-Zug-Körpern zu erkennen, dass beim unsymmetrischen Schubspannungsverlauf deutlich höhere Spannungsspitzen am Ende des Fügeteils, welches die höhere Dehnsteifigkeit besitzt, auftreten. Für die Übertragung der Schubspannungen im Zug-Druck-Körper wird lediglich die halbe Verbundlänge benötigt, wohingegen bei Zug-Zug-Körper die gesamte Überlappungslänge zur Schubübertragung herangezogen wird.



**Abbildung 5.6: Krafteinleitungssituationen: Pull-Pull (links), Push-Pull (rechts)**

### 5-3.2 HERLEITUNG DES SCHUBSPANNUNGSVERLAUFES NACH VOLKERSEN

[44], [37]

Die folgende mechanische Herleitung des Schubspannungsverlaufs gilt als allgemein gültiger Ansatz für elastische Werkstoffe. Zu den Herausforderungen in der mechanischen Beschreibung der Klebeverbindungen zählt vor allem die Beschreibung der Spannungsspitzen an den Überlappungsenden. Diese Singularitäten werden durch die elastischen Dehnungen der Fügeiteilpartner hervorgerufen. Wären die Fügeiteile dehnstarr, so würde sich ein gleichmäßig verteilter Schubspannungsverlauf über den Bereich der Überlappungslänge einstellen. Die größte Dehnungsdifferenz tritt an den Enden der Überlappung auf. In der Abbildung 5.7 in „c“ ist zu erkennen, dass das eine Ende des Fügeiteils noch ohne Dehnung und unbelastet ist, während die Normalspannung im anderen Teil auf den außen anliegenden Wert angestiegen ist und somit auch die Dehnung eine Zunahme erfährt.

Zur Analyse von Überlappungsfügungen kann die elasto-statische Analyse von Volkersen herangezogen werden. Dabei nehmen die Fügeiteile ausschließlich die wirkenden Normalkräfte auf, während die zwischen den Fügeiteilen liegende Klebeschicht gemäß den Modellansätzen nur Schubkräfte überträgt. Über die Dicke der Klebeschicht wird ein konstanter Schubfluss vorausgesetzt. Dabei erfolgt lediglich eine Änderung des Schubflusses in Längsrichtung. Die Theorie ist durch die Annahmen von linearen Elastizitätsgesetzen nur für kleine Klebeverformungen geeignet, d. h. eher für Strukturklebstoffe<sup>1</sup> anwendbar. Senkrecht zur Klebeschicht auftretende Verformungen werden vernachlässigt, wodurch der Klebstoff in dieser Richtung als dehnstarr angenommen wird. Sowohl die Fügeiteile, als auch die Klebeschicht werden als isotrope Werkstoffe betrachtet. Ebenso bleiben die auf Grund unvermeidbarer Exzentrizitäten auftretenden Biegemomente unberücksichtigt.

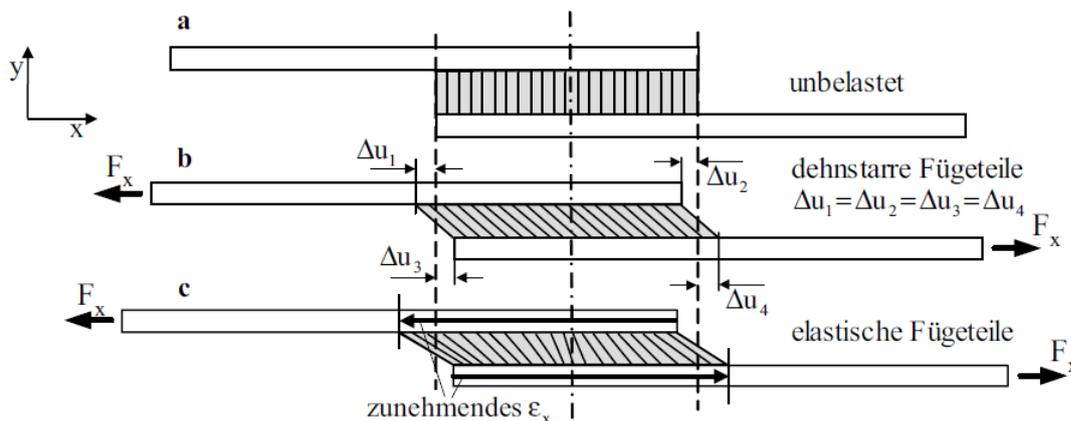


Abbildung 5.7: Schubspannungsverlauf zwischen zwei Fügeiteilen a) unbelastet b) dehnstarre Fügeiteile unter Zugbelastung c) elastische Fügeiteile unter Zugbelastung, [45]

Für die Herleitung wird, wie in Abbildung 5.8 dargestellt, den beiden Fügeiteilen jeweils ein E-Modul  $E_i$  sowie eine konstante Dicke  $t_i$  zugewiesen. Es wird dieselbe Breite  $b$  für beide Fügeiteile vorausgesetzt. Durch die drei Grundbeziehungen der Elasto-Statik werden anhand eines differentiellen Elementes über die Zuwachsformel die Zusammenhänge aufgestellt:

<sup>1</sup> Strukturklebstoffe werden für dünne Klebeschichten im zehntel Millimeterbereich eingesetzt und sind daher kaum in der Lage einen gummielastischen Effekt auszubilden. [35]

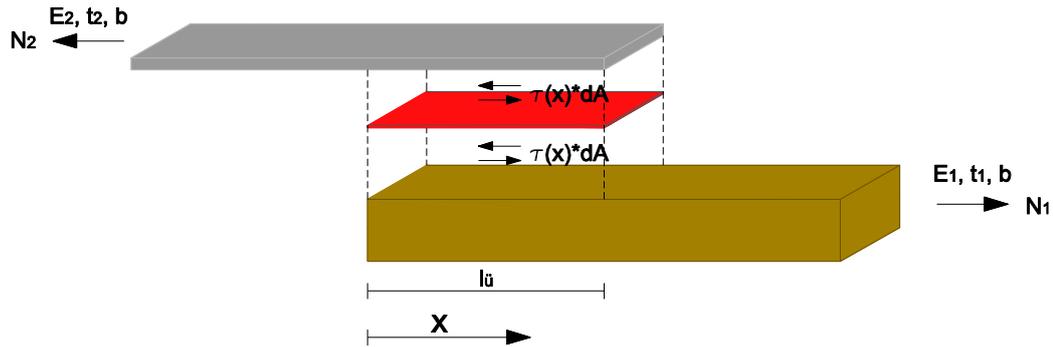


Abbildung 5.8: freigeschnittene Kräfte in der Klebeverbindung, [37]

### 1. Kräftegleichgewicht

Durch „Freischneiden“ der Fügepartner wird in Abbildung 5.9 das Kräftegleichgewicht für ein differentielles Element beschrieben.

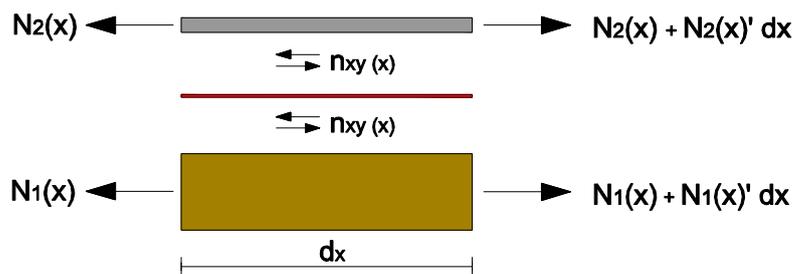


Abbildung 5.9: Kräftegleichgewicht am differentiellen Element nach Volkersen, [37]

Es ergibt sich für den

#### Fügeteil 1

$$\sum \vec{H} = 0$$

$$[-N_1(x) + N_1'(x)dx] + N_1(x) + n_{xy}(x)dx = 0$$

$$N_1'(x) = -n_{xy}(x) \tag{5.1}$$

$$N_1'(x) = -N_2'(x)$$

bzw. für den

### Fügeteil 2

$$\sum \vec{H} = 0$$

$$-N_2(x) + [N_2(x) + N_2'(x)dx] - n_{xy}(x)dx = 0$$

$$N_2'(x) - n_{xy}(x) = 0$$

$$N_2'(x) = n_{xy}(x) \tag{5.2}$$

$n_{xy}$ ... Schubfluss in der Klebefuge

## 2. Kinematische Beziehungen

Für die zweite Grundbeziehung werden die Zusammenhänge zwischen den Verschiebungen und Verzerrungen aufgestellt. Dabei werden die differentiellen Verschiebungen  $du_1$  und  $du_2$  nach der Länge  $dx$  abgeleitet, um die Verzerrungen der beiden Fügepartner zu erhalten.

$$\varepsilon_1 = \frac{du_1}{dx} = u_1'$$

$\varepsilon_i$ .....Längsverzerrungen der Fügepartner

$$\varepsilon_2 = \frac{du_2}{dx} = u_2'$$

Für die Schubverzerrung in der Klebefuge gilt:

$$\gamma_K = \frac{u_2 - u_1}{t_K}$$

$\gamma_K$ .....Schubverzerrungen des Klebstoffes

Index K....Klebstoff

## 3. Werkstoffgesetz

Um die Spannungen in den Fügeteilen zu ermitteln, werden mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes die zuvor ermittelten Dehnungen mit dem jeweiligen E-Modul multipliziert. Die Schubspannungen in der Klebeschicht werden über die Verzerrung und den Schubmodul ermittelt. Es ergibt sich:

$$\sigma_1 = E_1 \cdot u_1' \tag{5.3}$$

$$\sigma_2 = E_2 \cdot u_2' \tag{5.4}$$

$$n_{xy} = \tau_{(x)} \cdot b \quad \rightarrow n_{xy} = G_K \cdot \gamma_K \cdot b$$

### Zusammenhang der Kinematik mit dem Werkstoffgesetz:

$$\text{mit: } \sigma_i = E_i \cdot u_i' \quad \text{und} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad \rightarrow \frac{N_i}{A_i} = E_i \cdot u_i' \quad \rightarrow N_i = A_i \cdot E_i \cdot u_i'$$

$$\varepsilon_1 = u_1' = \frac{N_1}{E_1 \cdot A_1} \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_2 = u_2' = \frac{N_2}{E_2 \cdot A_2} \quad (5.6)$$

### Relativverschiebung zwischen Stahl und Holz:

$$\delta_{rel} = u_2 - u_1 \quad \rightarrow \quad \text{Einsetzen der Glg. (5.5) und (5.6)}$$

$$\delta_{rel}' = u_2' - u_1'$$

$$\delta_{rel}' = \frac{N_2}{E_2 \cdot A_2} - \frac{N_1}{E_1 \cdot A_1} \quad (5.7)$$

$$\rightarrow \quad \text{Einsetzen der Glg. (5.2) und (5.1)}$$

$$\delta_{rel}'' = n_{xy} \cdot \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \quad (5.8)$$

Im Weiteren wird die Annahme getroffen, dass nur geringe Schubverzerrungen in der Klebefuge auftreten. Somit kann näherungsweise angesetzt werden:  $\gamma_K = \tan \frac{\delta_{rel}}{t_K} \approx \frac{\delta_{rel}}{t_K}$

$$\gamma_K = \frac{\delta_{rel}}{t_K} = \frac{u_2 - u_1}{t_K}$$

$$\gamma_K' = \frac{u_2' - u_1'}{t_K} \quad (5.9)$$

$$n_{xy} = G_K \cdot \gamma_K \cdot b \rightarrow \gamma_K = \frac{n_{xy}}{G_K \cdot b} \rightarrow \gamma_K' = \frac{n_{xy}'}{G_K \cdot b} \quad (5.10)$$

Durch Gleichsetzen der Glg. (5.9) mit (5.10) folgt:

$$\frac{u_2' - u_1'}{t_K} = \frac{n_{xy}'}{G_K \cdot b} \rightarrow \delta_{rel}' = u_2' - u_1' = \frac{t_K}{G_K \cdot b} \cdot n_{xy}'$$

$$\delta_{rel}'' = \frac{t_K}{G_K \cdot b} \cdot n_{xy}'' \quad (5.11)$$

bzw. durch Gleichsetzen der Glg. (5.8) mit (5.11)

$$\frac{t_K}{G_K \cdot b} \cdot n_{xy}'' = n_{xy} \cdot \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \quad \text{mit: } n_{xy} = \tau(x) \cdot b$$

$$\frac{t_K}{G_K \cdot b} \cdot n_{xy}'' = \tau(x) \cdot b \cdot \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right]$$

ergibt sich die Gleichung des elastischen Verbundes:

$$\delta_{rel}'' = \tau(x) \cdot b \cdot \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \quad (5.12)$$

$$\tau(x) = G_K \cdot \gamma_K \rightarrow \tau = \frac{G_K}{t_K} \cdot \delta_{rel} \quad (5.13)$$

Durch Einsetzen der Glg. (5.13) in (5.12) ergibt sich weiters

$$\delta_{rel}'' - \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \cdot b \cdot \frac{G_K}{t_K} \cdot \delta_{rel} = 0 \quad (5.14)$$

**Folglich ergibt sich die homogene Differentialgleichung 2.Ordnung zur Beschreibung des elastischen Verbundes:**

$$\delta_{rel}'' - \omega^2 \cdot \delta_{rel} = 0 \quad (5.15)$$

mit dem Systemparameter :  $\omega^2 = \frac{G_K}{t_K} \cdot b \cdot \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right]$

Daraus folgt die allgemeine Lösung mit den beiden Koeffizienten zur Berücksichtigung der Randbedingungen A und B:

$$\delta_{rel} = A \cdot \sinh(\omega \cdot x) + B \cdot \cosh(\omega \cdot x) \quad (5.16)$$

### 5-3.2.1 Lösungen für spezielle Randbedingungen

Die Konstanten der allgemeinen Lösung sind von der Krafteinleitung der jeweiligen Prüfkfiguration abhängig und daher gesondert zu ermitteln. Dabei wird zwischen den Versuchen „Pull-Pull“ (Zug-Zug-Prüfung) und „Push-Pull“ (Druck-Zug-Prüfung) (siehe auch Abbildung 5.6) unterschieden.

### 5-3.2.2 PUSH-PULL Konfiguration

Im Folgenden wird die spezielle Lösung in Abbildung 5.10 für den Verbundspannungsverlauf in einer Klebefuge über die Randbedingungen hergeleitet:

$$N_2(x = 0) = 0$$

$$N_2(x = l_{\ddot{u}}) = F$$

$$N_1(x = 0) = 0$$

$$N_1(x = l_{\ddot{u}}) = -F$$

$l_{\ddot{u}}$  .... Überlappungslänge

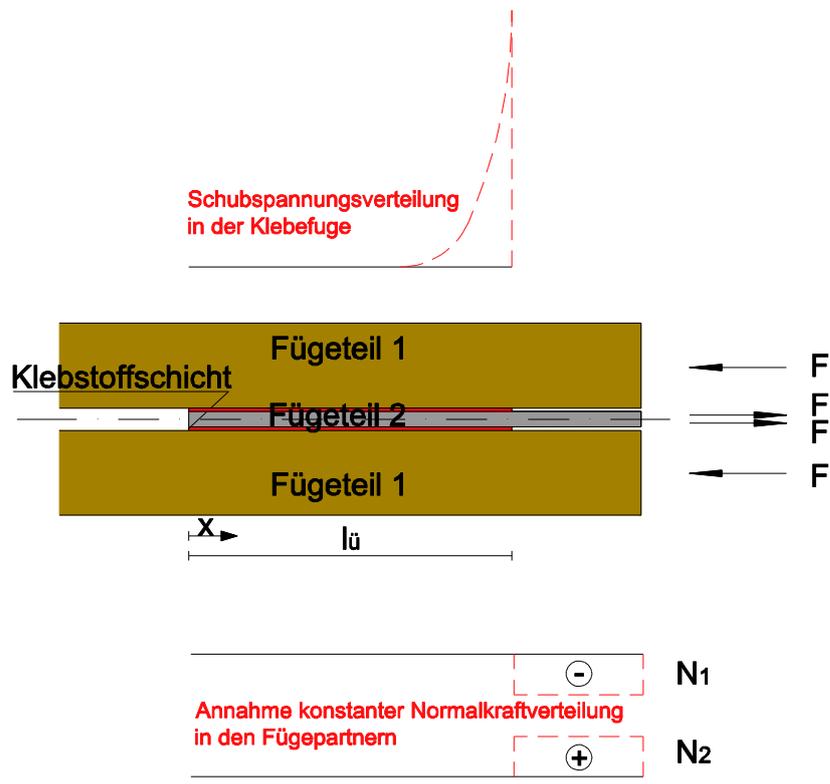


Abbildung 5.10: Normalkraftverlauf eines Push-Pull Körpers, [37]

Die Relativverformung in der Klebefuge lässt sich wie folgt herleiten:

Ableiten der allgemeinen Lösung aus Glg. (5.16)

$$\delta_{rel}' = A \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot x) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot x) \tag{5.17}$$

Einsetzen der Randbedingungen bei  $x = 0$  in Glg. (5.7)

$$\delta_{rel}'(x = 0) = \frac{0}{E_2 \cdot A_2} - \frac{0}{E_1 \cdot A_1} = 0 \tag{5.18}$$

Einsetzen der Glg. (5.18) (5.17)

$$A \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot 0) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot 0) = 0$$

$$\boxed{A = 0}$$

Einsetzen der Randbedingungen bei  $x = l_{ii}$  in Glg. (5.7)

$$\delta_{rel}'(x=l_{ii}) = \frac{F}{E_2 \cdot A_2} - \frac{(-F)}{E_1 \cdot A_1} = F \cdot \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \quad (5.19)$$

Einsetzen der Glg. (5.19) in (5.17)

$$F \cdot \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] = 0 \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot l_{ii}) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})$$

$$B = \frac{F}{\omega \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right] \quad / * \frac{\omega}{\omega}$$

$$B = \frac{F \cdot \omega}{\omega^2 \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right]$$

$$B = \frac{F \cdot \omega \cdot t_K}{G_K \cdot b \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})}$$

$$\text{mit: } \omega^2 = \frac{G_K}{t_K} \cdot b \cdot \left[ \frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1} \right]$$

aus (5.2)  $N_2' = n_{xy}$

mit:  $n_{xy} = \tau(x) \cdot b$

$$\tau(x) = \frac{G_K}{t_K} \cdot \delta_{rel}$$

weitere ist:

$$N_2' = \frac{G_K}{t_K} \cdot \delta_{rel} \cdot b$$

### Spezielle Lösung für die Push-Pull Konfiguration:

$$\delta_{rel} = B \cdot \cosh(\omega \cdot x)$$

$$\delta_{rel} = \frac{F \cdot \omega \cdot t_K}{G_K \cdot b \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \cosh(\omega \cdot x) \quad (5.20)$$

Einsetzen der Glg. (5.20) in (5.13)

$$\tau = G_K \cdot \frac{\delta_{rel}}{t_K} \rightarrow \tau = \frac{G_K}{t_K} \cdot \frac{F \cdot \omega \cdot t_K}{G_K \cdot b \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \cosh(\omega \cdot x)$$

Somit ergibt sich für den Prüfkörper folgende Gleichung für den Verlauf der Schubspannung:

$$\tau(x) = \frac{F \cdot \omega}{b \cdot \sinh(\omega \cdot l_{\ddot{u}})} \cdot \cosh(\omega \cdot x) \tag{5.21}$$

### 5-3.2.3 PULL-PULL Konfiguration

Durch die geänderte Krafteinleitung ergeben sich bei Pull-Pull-Prüfkörpern andere Randbedingungen und Normkraftverläufe, die im Folgenden in Abbildung 5.11 aufgezeigt werden:

$$\begin{aligned} N_2(x = 0) &= 0 & N_2(x = l_{\ddot{u}}) &= F \\ N_1(x = 0) &= F & N_1(x = l_{\ddot{u}}) &= 0 \end{aligned} \quad l_{\ddot{u}} \dots \text{Überlappungslänge}$$

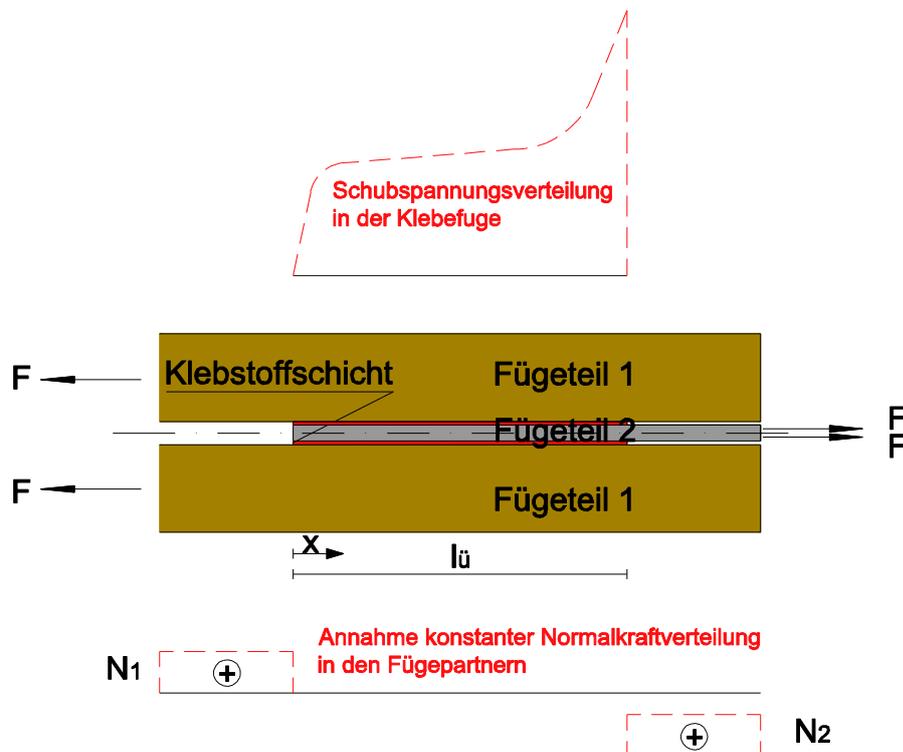


Abbildung 5.11: Normkraftverlauf eines Pull-Pull Körpers, [37]

Der Schubspannungsverlauf in der Klebefuge ergibt sich wie folgt:

Ableiten der allgemeinen Lösung aus Glg. (5.16)

$$\delta_{rel}' = A \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot x) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot x) \tag{5.22}$$

Einsetzen der Randbedingungen bei  $x = 0$  in Glg (5.7)

$$\delta_{rel}'(x=0) = \frac{0}{E_2 \cdot A_2} - \frac{F}{E_1 \cdot A_1} = -\frac{F}{E_1 \cdot A_1} \quad (5.23)$$

Einsetzen der Glg(5.23) in (5.22)

$$-\frac{F}{E_1 \cdot A_1} = A \cdot \omega \cdot \cosh(\omega \cdot 0) + B \cdot \omega \cdot \sinh(\omega \cdot 0)$$

$$A = -\frac{F}{E_1 \cdot A_1 \cdot \omega}$$

Einsetzen der Randbedingungen bei  $x = l_{ii}$  in Glg. (5.7)

$$\delta_{rel}'(x=l_{ii}) = \frac{F}{E_2 \cdot A_2} + \frac{0}{E_1 \cdot A_1} = \frac{F}{E_2 \cdot A_2} \quad (5.24)$$

Einsetzen der Glg. (5.24) in (5.22)

$$B = \left[ \frac{F}{\omega \cdot E_2 \cdot A_2} - A \cdot \cosh(\omega \cdot l_{ii}) \right] \cdot \frac{1}{\sinh(\omega \cdot l_{ii})}$$

$$B = \frac{1}{\sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \left[ \frac{F}{\omega \cdot E_2 \cdot A_2} + \frac{F}{\omega \cdot E_1 \cdot A_1} \right]$$

**Die spezielle Lösung für Pull-Pull-Prüfkörper folgt damit zu:**

$$\delta_{rel} = A \cdot \sinh(\omega \cdot x) + B \cdot \cosh(\omega \cdot x)$$

$$\delta_{rel} = \frac{1}{\sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \left[ \frac{F}{\omega \cdot E_2 \cdot A_2} + \frac{F}{\omega \cdot E_1 \cdot A_1} \cdot \cosh(\omega \cdot l_{ii}) \right] \cdot \cosh(\omega \cdot x) - \frac{F}{\omega \cdot E_1 \cdot A_1} \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})$$

$$\delta_{rel} = \frac{F}{\omega \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \left[ \frac{\cosh(\omega \cdot x)}{E_2 \cdot A_2} + \frac{\cosh(\omega \cdot l_{ii}) \cdot \cosh(\omega \cdot x)}{E_1 \cdot A_1} - \frac{\sinh(\omega \cdot x) \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})}{E_1 \cdot A_1} \right]$$

$$\delta_{rel} = \frac{F}{\omega \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \left[ \frac{\cosh(\omega \cdot x)}{E_2 \cdot A_2} + \left( \frac{\cosh(\omega \cdot (l_{ii} - x))}{E_1 \cdot A_1} \right) \right] \quad (5.25)$$

Einsetzen der Glg. (5.26) in (5.13)

$$\tau(x) = \frac{G_K}{t_K} \cdot \delta_{rel}$$

$$\tau(x) = \left( \frac{G_K}{t_K} \right) \cdot \frac{F \cdot \omega}{\sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \frac{t_k}{G_K \cdot b} \cdot \left( \frac{1}{\frac{1}{E_2 \cdot A_2} + \frac{1}{E_1 \cdot A_1}} \right)$$

$$\tau(x) = \frac{F \cdot \omega}{\sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \left( \frac{E_1 \cdot A_1 \cdot E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2} \right) \cdot \left( \frac{\cosh(\omega \cdot x) \cdot E_1 \cdot A_1 + \cosh(\omega \cdot (l_{ii} - x)) \cdot E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot A_1 \cdot E_2 \cdot A_2} \right)$$

$$\tau(x) = \frac{F \cdot \omega}{b \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \left( \frac{\cosh(\omega \cdot x) \cdot E_1 \cdot A_1 + \cosh(\omega \cdot (l_{ii} - x)) \cdot E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2} \right)$$

**Somit ergibt sich der Verlauf der Verbundspannung für einen Pull-Pull-Körper zu:**

$$\tau(x) = \frac{F \cdot \omega}{b \cdot \sinh(\omega \cdot l_{ii})} \cdot \left( \frac{\cosh(\omega \cdot x) + k \cdot \cosh(\omega \cdot (l_{ii} - x))}{1 + k} \right)$$

mit dem Verhältnis der Dehnsteifigkeiten  $k = \frac{E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot A_1}$ .

### 5-3.2.4 Einfluss relevanter Parameter auf die Verteilung der Schubspannungen

[45]

Aus den erhaltenen Schubspannungsverläufen der beiden Konfigurationen lässt sich der Einfluss der beeinflussenden Parameter sehr gut darstellen. Durch eine Vergrößerung der Fügeteilbreite werden die Spannungsspitzen abgemindert. Für den Einfluss der Überlappungslänge zeigt sich, dass bei kürzeren Längen höhere Spannungsspitzen zu erwarten sind. Wird die Überlappung vergrößert, zeigt sich ab einem definierten Grenzwert der Überlappungslänge kein Einfluss mehr auf die Schubspannungsspitzen. Eine hohe Steifigkeit der Fügeteile, bedingt durch einen höheren E-Modul oder eine größere Fügeteildicke, hat geringere Spannungsspitzen im Kleber zur Folge. Der Schubmodul des Klebstoffes senkt zwar die Beanspruchung im Kleber, die Klebung wird jedoch dehnweicher. Um die Spannungsspitzen zu senken, kann prinzipiell auch die Klebstoffdicke vergrößert werden. Zur Erzielung einer hohen Festigkeit der Klebung haben sich bei hochbelasteten Strukturklebstoffen jedoch dünne Klebeschichten in der Praxis bewährt.

Bei unterschiedlicher Dicken der Fügeteile wird der Schubspannungsverlauf unsymmetrisch. Wie in Abbildung 5.12 ersichtlich, werden am unbelasteten Ende des dehnsteiferen Fügeteils 2 höhere Spannungsspitzen ausgebildet. Das dehnweichere Fügeteil 1 erfährt an dieser Stelle eine größere Dehnung, als der dehnsteife Fügepartner an der gegenüberliegenden Seite, wodurch sich eine stärkere Schubverformung des Klebstoffes an den Rändern einstellt. Dabei erreichen die Schubspannungen im mittleren Bereich den Wert Null. Die Normalspannungen in den Fügeteilen verlaufen bei langen Überlappungslängen in diesem Bereich nahezu konstant. Bei kurzen Überlappungslängen wird ein starker linearer Anstieg der Normalspannungen bis zur Schnittspannung im ungestörten Bereich beobachtet.

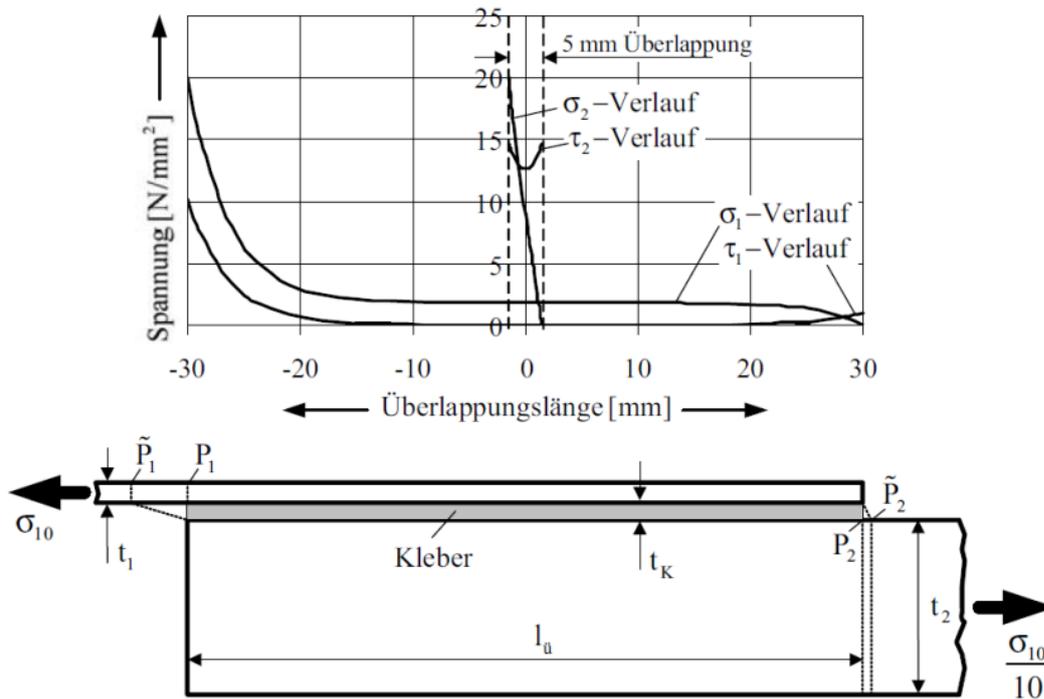


Abbildung 5.12: Spannungsverläufe bei Fügeteilen unterschiedlicher Dicke

### 5-3.3 „TOM“-THEORIE

[55]

Abweichend zum Modell nach Volkersen, bei dem sich die Fügepartner nur in Längsrichtung deformieren, werden bei der Theorie nach Tsai et al. [55] (TOM-Theorie) zusätzlich die Schubverformungen in den Fügeteilen berücksichtigt. Ein Vergleich der beiden Theorieansätze in Abbildung 5.13 lässt darauf schließen, dass die experimentell ermittelten Werte mit der analytischen Berechnung der TOM-Theorie besser übereinstimmen, als jene nach Volkersen. Folglich sollten die Schubverformungen in den Fügeteilen bei Verklebungen insbesondere von Holzwerkstoffen auf Grund des Verhältnisses von Schub- zu Dehnsteifigkeit berücksichtigt werden. Auch die TOM-Theorie geht von einem elastischen Materialverhalten aus, d.h. das Hooke'sche Gesetz besitzt Gültigkeit.

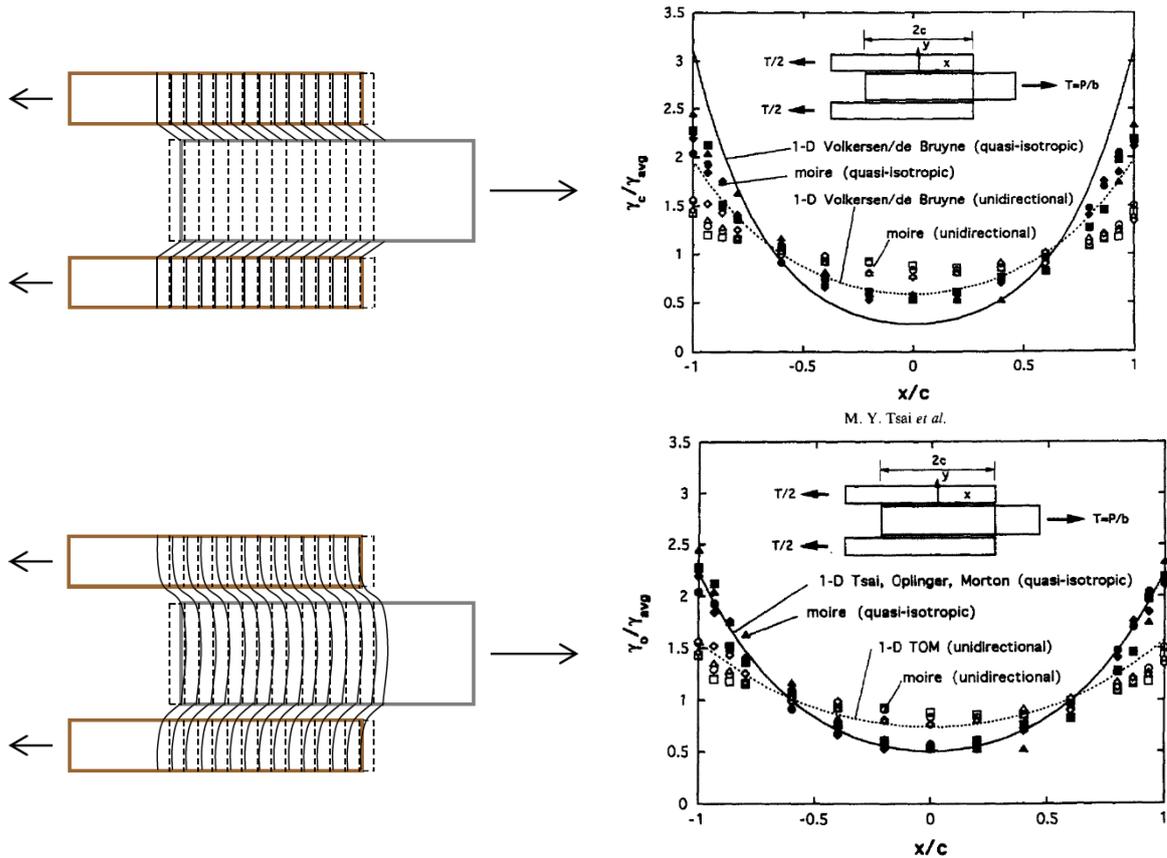


Abbildung 5.13: Vergleich der Schubspannungsverteilung, oben Volkersen, unten Tsai, [28], [55]

### 5-3.3.1 Zug-Zug-Versuch

In Abbildung 5.14 werden die geometrischen Abmessungen sowie die Materialparameter einer zweischnittigen Verbindung eines Zug-Zug-Versuches dargestellt. Dabei stellen  $E_1$  und  $E_2$  die Elastizitätsmoduln der Fügepartner dar. Des Weiteren sind auch die Schubmoduln derselben als  $G_1$  und  $G_2$ , sowie jener des Klebstoffes als  $G_k$  angegeben. Die Klebstoffdicke wird als  $t_k$  bezeichnet, die Dicken der äußeren und inneren Fügepartner als  $t_1$  bzw.  $t_2$ .

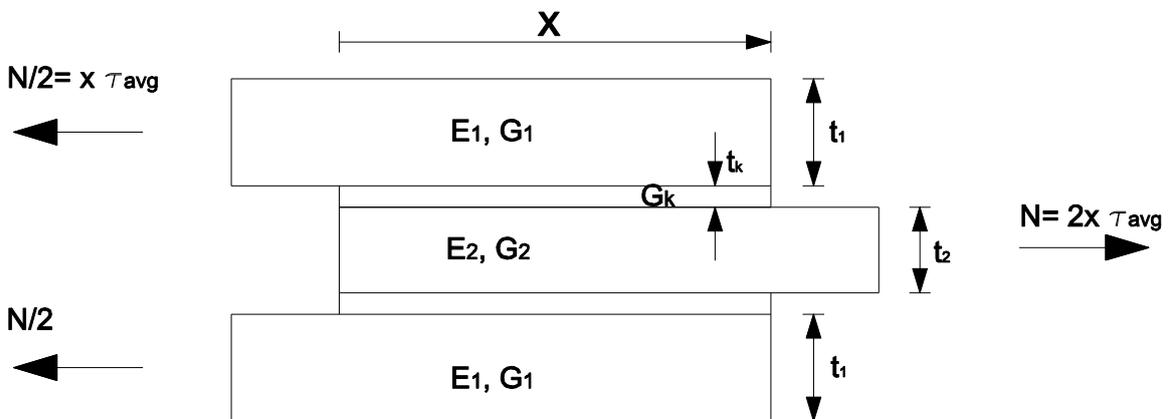


Abbildung 5.14: Geometrie und Materialparameter einer zweischnittigen Verbindung, [55]

Um die Gleichung für die Schubspannung in der Klebefuge zu formulieren, wird durch Freischneiden der Fügepartner in Abbildung 5.15 ein differentielles Element zur Aufstellung des Kräftegleichgewichts dargestellt. In der Klebefuge repräsentiert  $\tau_c$  die Schubspannungen, wohingegen  $\tau_{avg}$  aus Abbildung 5.14 die mittlere Schubspannung darstellt. Neben den Schubspannungen werden auch die Verformungen  $u_{xx}$  der Fügepartner bestimmt.

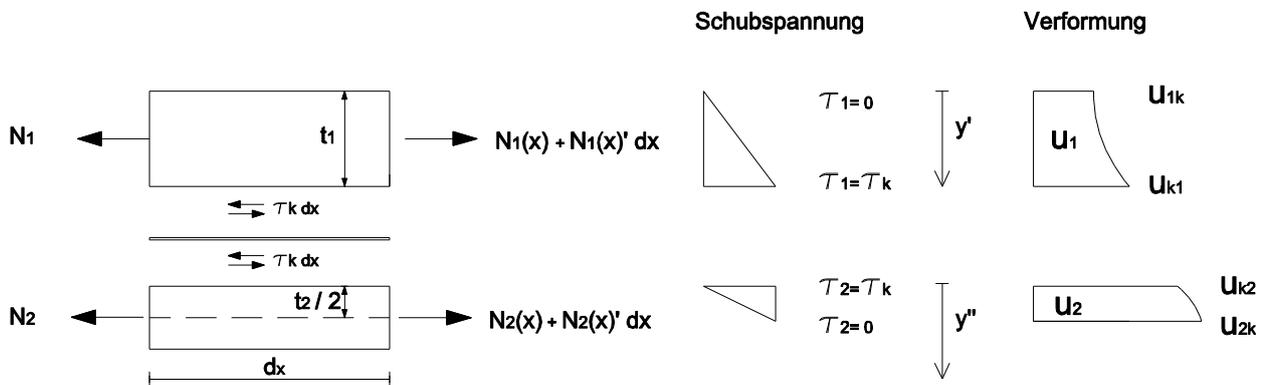


Abbildung 5.15: Kräftegleichgewicht am differentiellen Element nach Tsai, [28]

Setzt man 
$$\gamma_k = \frac{1}{t_k} \cdot (u_{k2} - u_{k1})$$

in die Gleichung 
$$\tau_k = \frac{G_k}{\gamma_k}$$

so erhält man: 
$$\tau_k = \frac{G_k}{t_k} \cdot (u_{k2} - u_{k1}) \quad (5.27)$$

- mit:
- $\gamma_k \dots$  Schubverzerrungen
  - $\tau_k \dots$  Schubspannungen in der Klebefuge
  - $t_k \dots$  Klebefugendicke
  - $G_k \dots$  Schubmodul des Klebstoffs
  - $u_{k2} \dots$  Verformung zwischen Klebstoff und inneren Fügepartner
  - $u_{k1} \dots$  Verformung zwischen Klebstoff und äußeren Fügepartner

Differenziert man nun die Glg. (5.27) zweimal nach  $dx$  und setzt die Normalkräfte  $N_1$  und  $N_2$  der Fügepartner in die Gleichung ein, erhält man folgende Differentialgleichung:

$$\frac{d^2 \tau_k}{dx^2} - \beta^2 \cdot \tau_k = 0 \quad (5.28)$$

Der Schubspannungsverlauf der Klebefuge nach der TOM-Theorie kann mit Hilfe weiterer Parameter und den sich daraus ergebenden Konstanten beschrieben werden. Der Parameter  $\lambda$  berücksichtigt dabei die

Dicken der Bestandteile der Verbindung, sowie die Elastizitätsmoduln der Fügepartner und den Schubmodul des Klebstoffes.

$$\lambda^2 = \frac{G_k}{t_k} \cdot \left( \frac{2}{E_2 \cdot t_2} + \frac{1}{E_1 \cdot t_1} \right) \quad (5.29)$$

mit:  $\lambda$  ... Parameter zur Berücksichtigung der Dehnsteifigkeit

Der zweite Parameter  $\alpha$  hängt ebenfalls von den Dicken der Verbindungsbestandteile ab und wird zusätzlich von den Schubmoduln  $G_1, G_2$  der Fügepartner und des Klebstoffschubmoduls  $G_c$  beeinflusst. Über die mittlere Schubspannung, die sich aus Integration über die Schubspannung im Klebstoff ergibt, und die beiden zuvor erwähnten Parameter  $\alpha$  und  $\lambda$ , können die Konstanten A und B errechnet werden.

Der Parameter  $\alpha$  ist dabei wie folgt definiert:

$$\alpha^2 = \left[ 1 + \frac{G_k}{t_k} \cdot \left( \frac{t_2}{6 \cdot G_2} + \frac{t_1}{3 \cdot G_1} \right) \right]^{-1} \quad (5.30)$$

mit:  $\alpha$  ... Parameter zur Berücksichtigung der Schubsteifigkeit

Der Parameter  $\beta$  kann als Produkt der Parameter  $\alpha$  und  $\lambda$  definiert werden, wobei gilt:

$$\beta^2 = \alpha^2 \cdot \lambda^2 \quad (5.31)$$

Der Schubspannungsverlauf der Klebefuge ergibt folgende Lösung der allgemeinen Differentialgleichung:

$$\tau_k = A \cdot \sinh(\beta \cdot x) + B \cdot \cosh(\beta \cdot x) \quad (5.32)$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen für eine Pull-Pull-Prüfung erhält man die Konstanten A und B.

$$\text{Bei } x = -c: \quad N_1 = \frac{T}{2} = x \cdot \tau_{avg} \quad N_2 = 0$$

$$\text{Bei } x = c: \quad N_1 = 0 \quad N_2 = T = 2x \cdot \tau_{avg}$$

wie folgt:

$$A = \frac{\beta \cdot x \cdot \tau_{avg}}{\cosh(\beta \cdot x)} \cdot \left[ \frac{1 - \frac{E_2 \cdot t_2}{2 \cdot E_1 \cdot t_1}}{1 + \frac{E_2 \cdot t_2}{2 \cdot E_1 \cdot t_1}} \right] \quad B = \frac{\beta \cdot x \cdot \tau_{avg}}{\sinh(\beta \cdot x)}$$

Bei Betrachtung einer zweischnittigen symmetrischen Verbindung mit gleichen Materialparametern der Fügepartner ( $E_2 = E_1 = E, G_2 = G_1 = G, t_2 = 2 \cdot t_1 = 2 \cdot t$ ) tritt der stärkste Unterschied der beiden Theorien von

Volkersen und TOM auf. Durch die nun gleichen Materialparameter lassen sich die Gleichungen einfacher formulieren, wobei sich das Verhältnis der beiden Maximalspannungen wie folgt ergibt:

$$\frac{\max \tau_k (TOM)}{\max \tau_k (Volkersen)} = \frac{\alpha \cdot \coth(\alpha \cdot \lambda \cdot x)}{\coth(\lambda \cdot x)}$$

In Abbildung 5.16 wird die Abhängigkeit des Verhältnisses der maximalen Schubspannungen nach beiden Theorien dargestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass bei kleinem  $\alpha$  bzw.  $\lambda \cdot c$  die maximale Schubspannung nach der TOM-Theorie sinkt. Umgekehrt verhält es sich bei der Theorie nach Volkersen, wo die maximale Schubspannung mit größeren Parameterwerten steigt. Kleine Faktorenwerte  $\alpha$  und  $\lambda \cdot c$  sind durch kleinere Schubmoduln der Fügeiteile, sowie große Überlappungslängen ( $x$ ) bedingt.

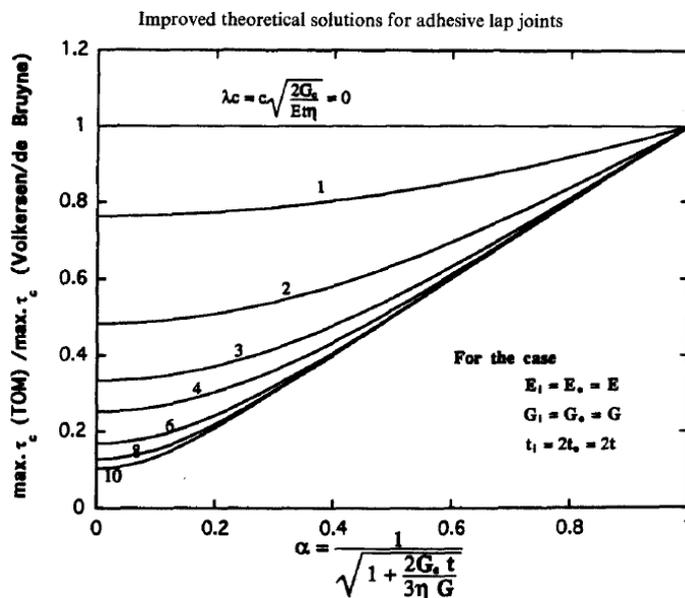


Abbildung 5.16: Abhängigkeit des Verhältnisses der maximalen Schubspannungen der Theorien nach Volkersen und TOM, [55]

Nimmt man den Schubmodul der Fügeiteile mit hohen Werten und die Fügeiteildicken mit relativ kleinen Werten an, so nähert sich der Parameter  $\alpha$  dem Wert 1. Folglich gleichen sich die Ergebnisse der beiden Theorien, wobei der Schubmodul der Fügeiteile nahezu keinen Einfluss mehr hat.

### 5-3.4 RECHENMODELL NACH GOLAND UND REISSNER

[26], [23], [37]

Neben dem Kräftegleichgewicht, welches sich in Beanspruchungsrichtung einstellt, bezieht dieses Modell auch das Kräftegleichgewicht senkrecht dazu mit in die Berechnung ein. Ebenso werden auftretende Biegemomente, die durch die exzentrische Krafteinleitung entstehen, mitberücksichtigt. Wie in Abbildung 5.17 zu erkennen ist, werden den Fügepartnern neben dem Elastizitätsmodul auch die Schubmodul  $G_1$  und  $G_2$  sowie die Querdehnraten  $\nu_1$  und  $\nu_2$  zugewiesen. Die Klebstoffschicht wird zusätzlich zum Schubmodul  $G_k$  durch einen Elastizitätsmodul  $E_k$  beschrieben, welcher beim Volkersen-Modell unberücksichtigt bleibt.

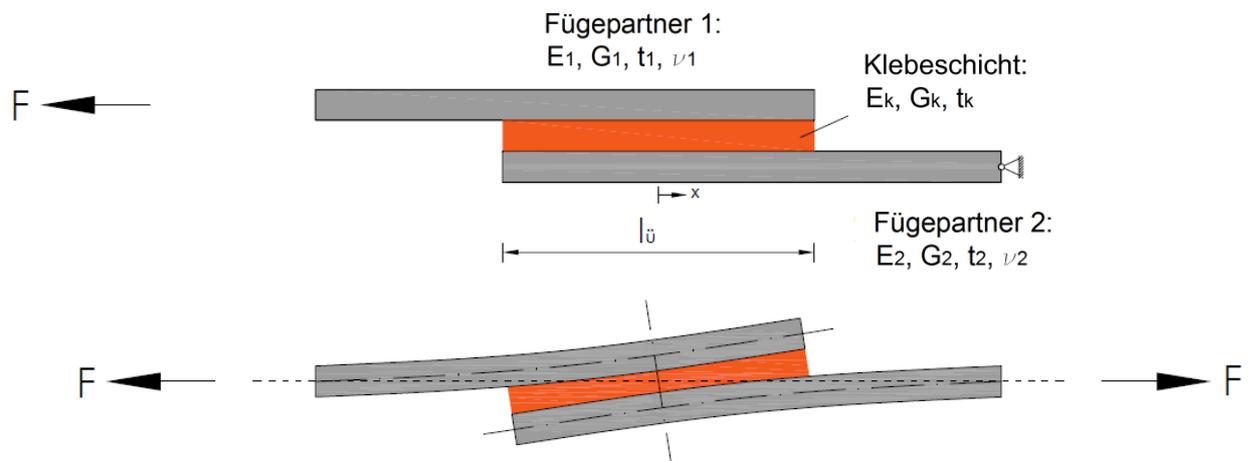


Abbildung 5.17: einschnittige Überlappungsverklebung nach Goland und Reissner, [37]

Aus den genannten Gründen ist dieses Rechenmodell nach Goland und Reissner realitätsnäher als jenes von Volkersen, da durch die auftretenden Schälspannungen, welche von der Biegebeanspruchung verursacht werden, der Bruch im Klebstoff eintritt. Zur Berücksichtigung der Biegeanteile enthält die Gleichung für die Schubspannungsberechnung einen Exzentrizitätsfaktor  $k$ , welcher sich bei Steigerung der Biegebeanspruchung dem Grenzwert Null nähert. Somit ergeben sich an den Überlappungsenden der Verklebung höherer Spannungsspitzen, als es bei der Theorie nach Volkersen der Fall ist. Bei geringen Verformungen der Fügepartner, verursacht durch hohe Steifigkeiten oder geringe Belastung, nimmt der Faktor den Wert  $k = 1$  an. Folglich ähnelt in diesem speziellen Fall die Gleichung (5.33) jener der Volkersen-Gleichung.

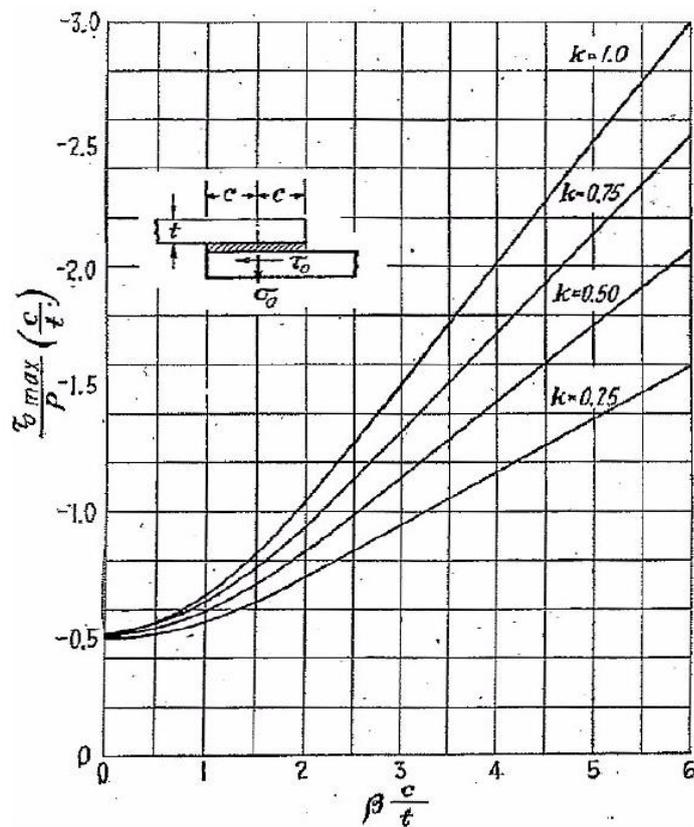


Abbildung 5.18: Maximale Schubspannung des Klebstoffes in Abhängigkeit des Exzentrizitätsfaktor  $k$ , [23]

$$k = \frac{\cosh(u_2 \cdot c)}{\cosh(u_2 \cdot c) + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sinh(u_2 \cdot c)} \quad \text{mit: } u_2 = \sqrt{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{2}} \cdot \frac{1}{t} \cdot \sqrt{\frac{P}{t \cdot E_{1,2}}}$$

$$\tau_{avg,max} = \tau_{avg} \cdot \left[ \frac{1 + 3 \cdot k}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot G_k \cdot l_{\ddot{u}}^2}{E_{1,2} \cdot t \cdot t_k}} \cdot \coth \sqrt{\frac{2 \cdot G_k \cdot l_{\ddot{u}}^2}{E_{1,2} \cdot t \cdot t_k}} + \frac{3}{4} \cdot (1 - k) \right] \quad (5.33)$$

- mit:
- $\tau_{avg}$ ... mittlere Klebefestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]
  - $k$ ... Exzentrizitätsfaktor [-]
  - $t$ ... Fügeteildicke [mm]
  - $t_k$ ... Klebstoffdicke [mm]
  - $G_k$ ... Schubmodul Klebstoff [Nmm<sup>2</sup>]
  - $E_{1,2}$ ... Elastizitätsmoduln der Fügeteile [N/mm<sup>2</sup>]
  - $P$ ... Zugbelastung pro Einheitsbreite [N/mm]

Abbildung 5.19 zeigt einen Vergleich der beiden Modellansätze für unterschiedliche Überlappungslängen, in denen die höheren Spannungsspitzen nach Goland et al. [26] deutlich zu erkennen sind. Die höheren Spannungsspitzen sind neben der Biegebeanspruchung auch auf die zusätzlich auftretenden Normalspannungen zurückzuführen.

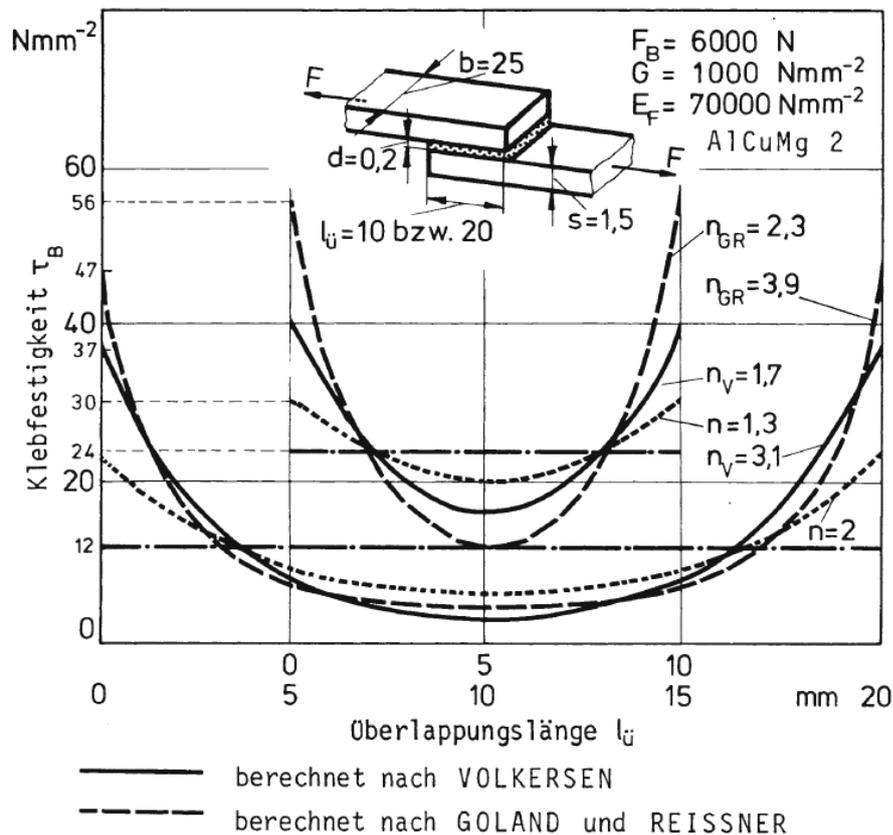


Abbildung 5.19: Schubspannungsverteilung bei  $l_{\bar{u}}=10$  mm,  $l_{\bar{u}}=20$  mm, [26]

### 5-3.5 RECHENMODELLE NACH HART-SMITH

[27]

Dieses Modell basiert auf dem Ansatz elastisch-plastischer Schubspannungen. Durch zusätzliche Randbedingungen, welche den Einfluss der Klebstoffschicht auf die Füge­teile berücksichtigen, erweitert Hart-Smith den Modellansatz von Goland und Reissner. Des Weiteren führt Hart-Smith einen Korrekturfaktor  $k_B$  für anisotrope Füge­teilwerkstoffe, wie z. B. faserverstärkte Kunststoffe, ein. Dieser Faktor ermöglicht eine getrennte Betrachtung der Dehn- von der Biegesteifigkeit.

Um eine einschnittige Überlappungsklebung zu berechnen, teilte Hart-Smith, wie in Abbildung 5.20 dargestellt, die Klebeverbindung in vier Bereiche ein. Des Weiteren wird die Annahme gleicher Geometrien und Materialkennwerte der Füge­teile vorausgesetzt.

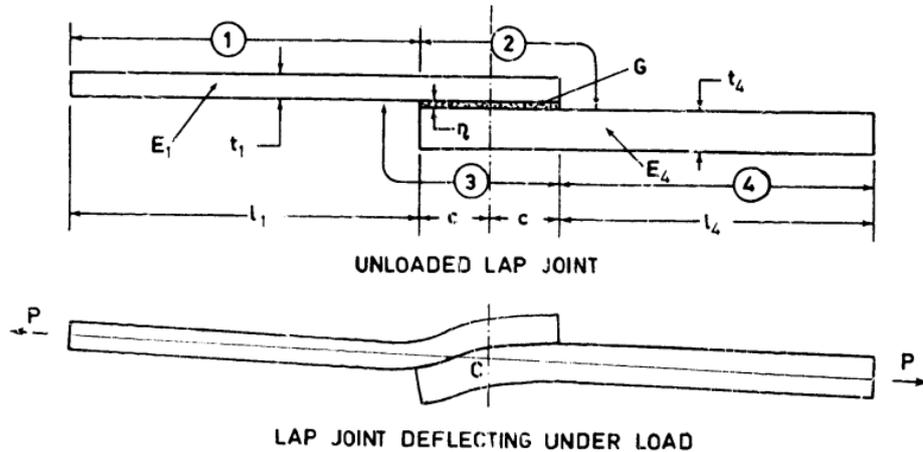


Abbildung 5.20: einschnittige Überlappungsklebung mit Einteilung in vier Bereiche (oben), Verformung unter Belastung (unten), [27]

$$k_B = \frac{D}{\left[ \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \right]} \quad (5.34)$$

mit:  $k_B$  = Biegesteifigkeitsparameter für anisotrope Fügeile

$D$  = Biegesteifigkeit der Fügeile

$E$  = Elastizitätsmodul der Fügeile

$t$  = Dicke der Fügeile

$\nu$  = Querdehnungszahl der Fügeile

Neben dem Biegesteifigkeitsparameter  $k_B$  werden in den Bereichen der Verklebung (siehe Abbildung 5.20) die Längsverschiebungen ( $u_2, u_3$ ) der Fügeile wie folgt ermittelt:

$$\frac{du_2}{dx} = \frac{1}{E \cdot t} \cdot \left[ N_2 + \frac{6 \cdot (1 - \nu^2) \cdot M_2}{k_B \cdot t} \right] \quad (5.35)$$

$$\frac{du_3}{dx} = \frac{1}{E \cdot t} \cdot \left[ N_3 + \frac{6 \cdot (1 - \nu^2) \cdot M_3}{k_B \cdot t} \right] \quad (5.36)$$

mit:  $M_{2,3} \dots$  Biegemomente in den Fügeilen im Bereich 2 und 3

$N_{2,3} \dots$  Normalschnittkräfte in den Fügeilen im Bereich 2 und 3

$u_{2,3} \dots$  Längsverschiebung der Fügeile im Bereich 2 und 3

für:  $\gamma < \gamma_e$   $\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{(u_3 - u_2)}{t_k}$  (5.37)

für:  $\gamma \geq \gamma_e$   $\tau = \tau_p$  (5.38)

- Mit:  $\gamma$ ... Schubverzerrung in der Klebefuge  
 $\gamma_e$ ... elastische Schubverzerrung in der Klebefuge  
 $\tau$ ... Schubspannung in der Klebefuge  
 $\tau_p$ ... plastische Schubspannung in der Klebefuge  
 $G$ ... Schubmodul des Klebstoffes  
 $t_k$ ... Klebstoffdicke

Durch Einsetzen der Glg. (5.35) und (5.36) in die Glg. (5.37) erhält man:

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{G}{t_k} \cdot \left[ \frac{du_3}{dx} - \frac{du_2}{dx} \right] = \frac{G}{E \cdot t \cdot t_k} \cdot \left[ N_3 - N_2 - \frac{6 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (M_3 + M_2)}{k_B \cdot t} \right] \quad (5.39)$$

Die Variable  $\lambda$  stellt das Verhältnis des Schubmoduls des Klebstoffes zum Elastizitätsmodul der Fügeiteile dar und wird wie folgt beschrieben:

$$\lambda^2 = \frac{2 \cdot G}{E \cdot t \cdot t_k} \quad (5.40)$$

Um eine getrennte Betrachtung der Dehnsteifigkeit und der Biegesteifigkeit für faserverstärkte Kunststoffe zu erhalten, wird im Folgenden die Variable  $\lambda'$  eingeführt:

$$(\lambda^2)' = \left[ \frac{1 + 3 \cdot (1 - \nu^2)}{\frac{k_B}{4}} \right] \cdot \lambda^2 \quad (5.41)$$

Aus Gleichung (5.39) wird die allgemeine Lösung der Differentialgleichung beschrieben, welche sich auf Grund der berücksichtigten Momentenbeanspruchung nur durch den letzten Term von der Volkersen-Gleichung unterscheidet:

$$\tau = A_2 \cdot \cosh(2 \cdot \lambda' \cdot c) + B_2 \cdot \sinh(2 \cdot \lambda' \cdot c) + C_2 \quad (5.42)$$

Auf Grund der Asymmetrie der einschnittigen Verbindung kann die Konstante  $B_2$  Null gesetzt werden. Durch die Gleichgewichtsbedingung in Horizontalrichtung der Verbindung kann folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$P = \int_{-c}^c \tau ds = 2 \cdot \tau_{avg} \cdot c = 2 \cdot \frac{A_2}{2 \cdot \lambda'} \cdot \sinh(2 \cdot \lambda' \cdot c) + 2 \cdot C_2 \cdot c \quad (5.43)$$

Die maximale Schubspannung kann unter zu Hilfenahme der aufgestellten Gleichung aus (5.42) berechnet werden. Unter Verwendung isotroper Fügeiteile erhält man die Lösung nach Goland und Reissner (siehe Glg. (5.33)).

$$\tau_{max} = \tau_{avg} \cdot \left\{ 1 + \left[ 1 + \frac{3 \cdot k \cdot (1 - \nu^2)}{k_B} \cdot \left( 1 + \frac{\eta}{t} \right) \right] \cdot \left[ \frac{\lambda^2}{4 \cdot \lambda'^2} \right] \cdot \left[ \frac{2 \cdot \lambda' \cdot c}{\tanh(2 \cdot \lambda' \cdot c)} - 1 \right] \right\} \quad (5.44)$$

mit:  $\tau_{max} \dots$  maximale Schubspannung in der Klebeschicht

$\tau_{avg} \dots$  mittlere Schubspannung in der Klebeschicht

$k \dots$  Biegemomentenfaktor

$c \dots$  halbe Überlappungslänge

Abbildung 5.21 veranschaulicht die beiden unterschiedlichen  $k$ -Faktoren der Ansätze nach Goland und Reissner bzw. nach Hart-Smith. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Verläufen ist, dass sich das Moment in Goland und Reissners Ansatz bei großen Überlappungslängen asymptotisch einem Grenzwert nähert, während bei der Theorie nach Hart-Smith das Moment gegen Null tendiert. Aus diesem Grund hat die Lösung nach Hart-Smith geringere Biegemomente zur Folge. Durch kleinere Biegemomente resultieren auch kleinere Schälbeanspruchungen am Rand der Klebefuge, sowie kleinere Faserbiegebeanspruchungen in den Fügeiteilen.

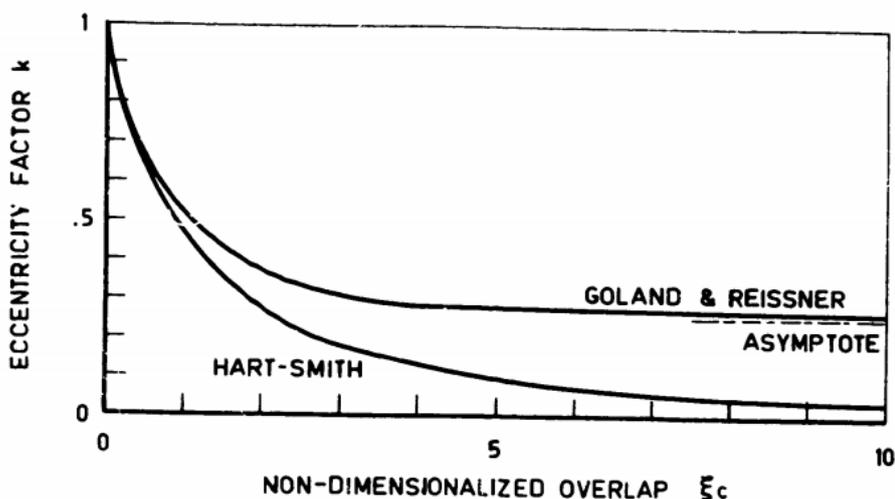


Abbildung 5.21:  $k$ -Faktoren im Verhältnis zur Überlappungslänge, [27]

### 5-3.6 BILINEARER VERBUNDANSATZ MIT ENTFESTIGUNG

[34]

Um Spannungsspitzen realitätsnäher zu betrachten, besteht die Möglichkeit einen Verbundansatz zu formulieren, der das entfestigende Verhalten einer Klebeverbindung miteinbezieht. Zunächst erreichen die Verbundspannungen am belasteten Stabende ein Maximum ( $x = l_{ii}$ ). Bei weiterer Laststeigerung fällt die Spannung wieder ab. Dabei wandert das Spannungsmaximum, wie in Abbildung 5.22 zu sehen, in Richtung des unbelasteten Stabendes ( $x = 0$ ). Folglich haben sich zwei Bereiche ausgebildet:

- Bereich I: linear elastisches Verbundverhalten
- Bereich II: entfestigendes Verbundverhalten

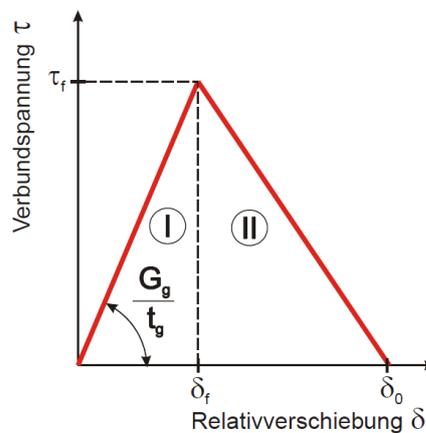


Abbildung 5.22: bilineare Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung, [37]

In Abbildung 5.23 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. links wird eine zweischnittige Klebeverbindung mit deren Werkstoff- sowie Geometrie-Parametern dargestellt.

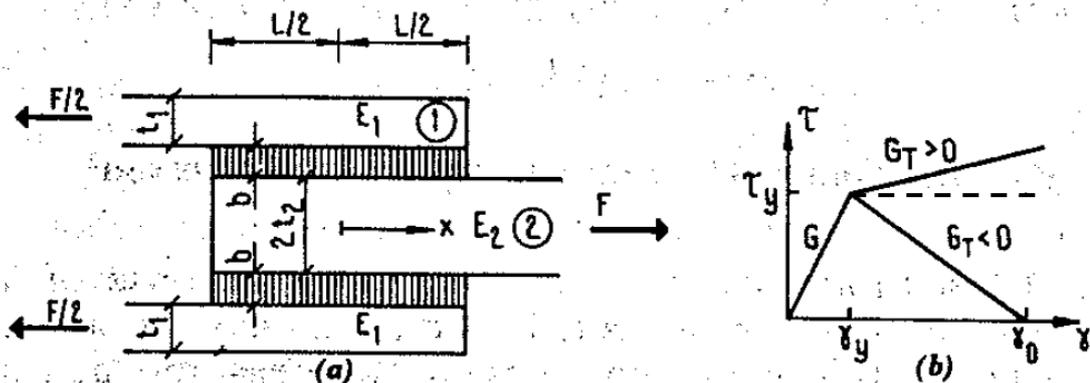


Abbildung 5.23: zweischnittige Klebeverbindung (links), bilinearer Verbundansatz (rechts), [34]

- mit:
- $\gamma$ ... Schubverzerrung in der Klebefuge
  - $G$ ... elastischer Schubmodul
  - $G_T$ ... plastischer Schubmodul
  - $\tau_y$ ... Schubfließspannung
  - $\gamma_y$ ... Schubfließverzerrung

Das Scherverhalten des Klebstoffes wird als bilinear angenommen. Ist der plastische Schubmodul  $G_T > 0$ , so wird dies als „Hardening-Effekt“ bezeichnet, bei dem die Schubspannungen nach Ausbildung des linear-elastischen Verhaltens (Bereich I) weiter ansteigen. Wird  $G_T = 0$  angenommen, so bildet sich ein ideales plastisches Verhalten aus, welches sich durch einer horizontalen Linie in Abbildung 5.23 äußert. Bei der Annahme, dass  $G_T < 0$  ist, tritt der „Softening-Effekt“ (Entfestigung) ein, in welchem die Schubspannungen an der betrachteten Stelle bei weiterer Laststeigerung sinken.

Im Folgenden werden die Gleichungen für die Schubspannungen der beiden Bereiche aufgestellt:

$$\text{Bereich I: } \tau = G \cdot \gamma \quad (5.45)$$

$$\text{Bereich II: } \tau = G_T \cdot \gamma + \tau_y \cdot \left(1 - \frac{G_T}{G}\right) \quad (5.46)$$

Unter Annahme des Hooke'schen Gesetzes ergibt sich folgende homogene Differentialgleichung:

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} - \omega^2 \cdot \tau = 0 \quad (5.47)$$

$$\text{mit: } \omega^2 = A = \frac{G_T}{b} \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot t_1} + \frac{1}{E_2 \cdot t_2} \right)$$

- **linear elastischer Bereich**

Ersetzt man in Gleichung  $\frac{d^2\tau}{dx^2} - \omega^2 \cdot \tau = 0$  (5.47)  $G_T$  durch  $G$  und führt die Konstante  $\lambda_e$  ein,

so ergibt sich folgende allgemeine Lösung für die Schubspannungen vom linear-elastischen Ansatz:

$$A_e = \frac{2 \cdot G}{b \cdot E_1 \cdot t_1} \quad (5.48)$$

$$\lambda_e = \sqrt{A_e} \quad (5.49)$$

$$\tau = C_1 \cdot \sinh(\lambda_e \cdot x) + C_2 \cdot \cosh(\lambda_e \cdot x) \quad (5.50)$$

(Für den Bereich I können die Gleichungen auch analog des Abschnittes 5-1.3.2 herangezogen werden.)

- **plastisches Verfestigen (Hardening-Effekt)**

Die Kraft steigt über die Fließgrenze  $F_y$ . Dieses Verhalten tritt besonders bei duktilen Klebstoffen wie z.B. schlagzähem Epoxidharzklebstoffen auf.

$$\lambda = \sqrt{A} \quad (5.51)$$

$$\text{für: } x_p \leq x \leq \frac{L}{2} \quad \tau = C_3 \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + C_4 \cdot \cosh(\lambda \cdot x) \quad (5.52)$$

- **plastische Entfestigung (Softening-Effekt)**

Nach Erreichen der Fließgrenze erfolgt eine Abnahme der Schubspannung, wobei die Abnahme immer noch im Bezug zu den plastischen Verformungen des Klebstoffes steht. Dabei tritt keine elastische Entlastung mehr durch den Kleber auf.

$$\lambda_s = \sqrt{-A} \quad (5.53)$$

$$\text{für: } x_p \leq x \leq \frac{L}{2} \quad \tau = C_5 \cdot \sin(\lambda_s \cdot x) + C_6 \cdot \cos(\lambda_s \cdot x) \quad (5.54)$$

$$G_T = 0$$

### 5-3.7 PROBABILITISCHES RECHENMODELL

[53]

Durch holzspezifische Eigenschaften, wie der ausgeprägten Anisotropie und der Sprödeheit des Materialverhaltens, lässt sich eine Vorhersage der Spannungsspitzen für Holzbauteile nur mit großem Aufwand beschreiben. Daher ist ein deterministischer Spannungsnachweis nur beschränkt zur Beschreibung geeignet. Es bietet sich daher ein probabilistischer Ansatz zur Beschreibung des Tragverhaltens an. Wichtig ist dabei eine möglichst exakte mechanische Erfassung der Werkstoffeigenschaften und Charakterisierung des Bruchverhaltens über ein mehraxiales Bruchkriterium wie beispielsweise das Norris-Kriterium. Als weitere anwendbare Bruchkriterien sind neben anderen das Kriterium nach Mc Kinnon, sowie das Tsai-Hill-Kriterium zu nennen.

Bei den probabilistischen Verfahren stellte Vallee et al. [53] ein Bemessungskonzept für spröde, geklebte Anschlüsse vor, indem er den Größeneffekt implementierte. Der Größeneffekt besagt, dass die Festigkeit von kleineren Proben höher ist, da die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fehlstellen geringer ausfällt, als jene von großen Probekörpern. Der Größeneffekt kann u. a. unter Zuhilfenahme der Weibull-Theorie beschrieben werden. Um die Vorgehensweise für die Konfigurationen von Vallee zu erläutern bedarf es zunächst einer numerischen Modellierung, in der an Stellen mit Spannungssingularitäten, ein feineres Netz (Diskretisierung) entwickelt wird. Die Verläufe der Axialspannungen, der Schubspannungen in der Klebefuge, sowie der Querspannungen senkrecht zur Faser werden erfasst. Dabei stellt sich eine Spannungskonzentration an den Überlappungsenden ein, von wo die Rissbildung ausgeht. Durch eine ausreichende statistische Charakterisierung der Werkstoffe, wird jedem finiten Element eine „Überlebenswahrscheinlichkeit“ zugewiesen. Durch Aufsummierung der einzelnen Wahrscheinlichkeiten erhält man die Gesamtwahrscheinlichkeit  $P_s$ , die besagt, dass jeder Last nur der Anteil der Probekörper zugewiesen wird, der keine Rissbildung erfährt. Die probabilistische Bruchlast ist die zu  $P_s = 50\%$  gehörende Last, die dem Mittelwert der Festigkeit einer Versuchsreihe entspricht. Vallee konnte folgende Aussagen über die durchgeführten Versuchsreihen tätigen:

- Die Spannungsbilder werden unwesentlich von der Klebstoffdicke beeinflusst.
- Die Spannungsspitzen werden durch längere Überlappungen nicht vermindert.
- Durch das Einsetzen von duktilen Klebstoffen erfolgt eine gleichmäßigere Spannungsverteilung über die Überlappungslänge.

## 5-4 RECHENMODELLE ZUR ERMITTLUNG DER NORMALSPANNUNGEN IN KLEBEVERBINDUNGEN

Während die Erfassung der, in der Klebefuge, wirkenden Schubspannungen mit den in Abschnitten 5-3 vorgestellten Theorien in, für die praktische Verwendung, ausreichendem Maße gegeben ist und entsprechend viele Publikationen dazu vorliegen, ist für die Ermittlung der Normalspannungen in Klebeverbindungen nach Meinung der Verfasserin noch Forschungsbedarf gegeben.

Aus mechanischer Sicht bietet sich dazu in erster Linie der elastisch gebettete Balken, mitunter in der Literatur auch als Winkler-Balken bezeichnet an. Auch zu diesem mechanischen „Grundelement“ bietet sich die Verwendung von verfeinerten Varianten an, auf die in dieser Arbeit aber nicht weiter Bezug genommen wird.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Zusammenhänge für den elastisch gebetteten Balken angeführt und schließlich auf eine mögliche Anwendung einer analogen Berechnungssituation hingewiesen.

### 5-4.1 ELASTISCH GEBETTETER BALKEN

#### 5-4.1.1 Allgemeines

[14], [21]

Ursprünglich stellte sich bei Fundamenten in der Bodenmechanik die Frage, wie groß die Sohldruckverteilung und die Schnittgrößen im Fundament sind. Da eine Abhängigkeit der Spannungsverteilung von den Schnittgrößen besteht, kann die Frage nur gemeinsam beantwortet werden, wodurch sich das Problem der statischen Unbestimmtheit ergibt. Auf Grund der Tatsache, dass sich die Spannungsverteilung von biegeweichen Fundamentbalken nicht mehr über die Gleichgewichtsbedingungen lösen lässt, wurde das elastische Modell des gebetteten Balkens eingeführt, indem, wie die Abbildung 5.24 zeigt, gedanklich unter dem Durchlaufträger unendlich viele Federn platziert wurden. Somit wurde der Balken aber auch unendlich statisch unbestimmt. 1867 schrieb Winkler das Hooke'sche Gesetz zur kontinuierlichen Modellierung der elastischen Bettung in Form der nachfolgenden Gleichung an:

$$q_{(x,y,w)} = k_{(y,w)} * y_{(x)} \quad \left[ \frac{kN}{m^2} \right] \quad (5.55)$$

mit:  $q$  = Druckspannung

$k$  = Bettungsziffer

$y$  = vertikale Auslenkung

Die Gleichung (5.55) wurde in späterer Folge als Winkler'sche Bettung bezeichnet. Die Bettungsziffer  $k$  [ $kN/m^3$ ] ist jener Sohldruck  $q$  der sich bei einer Setzung  $y$  von 1,0 m einstellt. Folgende Annahmen liegen der Theorie der elastischen Bettung zu Grunde:

- schubstarrer Balken  $G \cdot A \rightarrow \infty$
- es wirken keine Reibungskräfte im Boden
- der umliegende Boden um die elastische Sohle wird als starr angenommen
- in Horizontalrichtung ist das System kinematisch  $\rightarrow$  horizontale Wegfessel

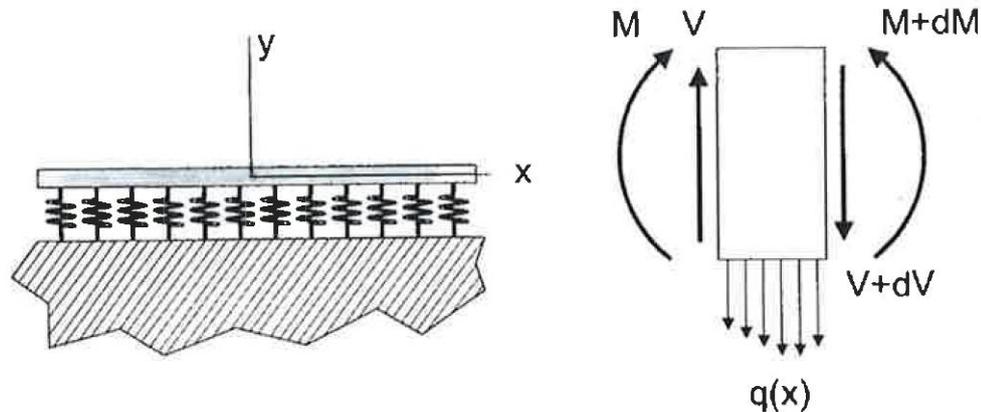


Abbildung 5.24: Modell des elastisch gebetteten Balkens, [14]

Dieser Ansatz lässt sich auf geklebte Verbindungen umlegen, um somit die Normalspannungsverteilung in der, normal zur Klebefuge, elastischen Bettung zu ermitteln. Durch die balkenartige Klebfläche ist dieses Modell für eine Vielzahl von Verbindungen wie Überlappungsklebung anwendbar. Die Füge-teile, als auch der Klebstoff werden als linear-elastisch angenommen, der Klebstoff als elastische Bettung mit der Federsteifigkeit  $k$  modelliert. Die Füge-teile werden als schubstarre Balken definiert. Die Biegesteifigkeit ( $E \cdot I$ ) der Füge-teile und die Federsteifigkeit  $k$  des Klebstoffes bestimmen die Form der resultierenden Spannungsverteilung, sowie die Auslenkung der Federn.

### 5-4.1.2 Differentialgleichung des elastisch gebetteten Balkens

Für ein infinitesimales Element lässt sich die folgende gewöhnliche Differentialgleichung 4. Ordnung,

$$\frac{d^4 y(x)}{dx^4} + 4 \cdot \lambda^4 \cdot y(x) = 0 \quad (5.56)$$

mit dem Parameter,

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \text{ ableiten.}$$

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass aus Darstellungsgründen auf die Berücksichtigung möglicher auftretender Querbeanspruchung  $q(x)$  verzichtet und das mechanische Verhalten eines elastisch gebetteten Balkens im Weiteren für, an einem Ende des Balkens, angreifende Einzelkräfte und –momente geschildert wird (= Reduzierung auf die homogene Lösung der DGL.).

Die allgemeine Lösung von Glg. 5.57 lautet:

$$y(x) = e^{-\lambda x} \cdot [A \cdot \cos(\lambda \cdot x) + B \cdot \sin(\lambda \cdot x)] + e^{\lambda x} \cdot [C \cdot \cos(\lambda \cdot x) + D \cdot \sin(\lambda \cdot x)] \quad (5.58)$$

Der Klebstoff mit der Dicke  $h$  wird als linear-elastisch mit einem Elastizitätsmodul  $E_a$  angenommen, welcher unbeeinflusst vom umgebenden Material über die Breite  $b$  der Klebefläche wirkt. Unter diesen Bedingungen kann die Federsteifigkeit folgendermaßen angeschrieben werden:

$$k = \frac{E_a}{h} \cdot b$$

mit  $E_a \dots$  Elastizitätsmodul des Klebstoffes  
 $h \dots$  Dicke der Klebeschicht  
 $b \dots$  Breite der Klebeschicht

Diese Erweiterung von Winkler besitzt streng genommen nur dann Gültigkeit, wenn jedes infinitesimal kleine Klebstoffelement vom benachbarten Element hinsichtlich der Auslenkungen unbeeinflusst bleibt. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise die Querkontraktionszahl des Klebstoffes Null wäre und wenn die Scherspannungen in der Klebefuge vernachlässigbar sind. Anders verhält es sich, wenn die Klebstoffschicht elastisch angenommen wird. Ferner wird angenommen, dass sich nur die Klebeschicht in vertikale Richtung bzw. aus der Ebene verformen kann. Unter Verwendung von Fügebauteilen aus anisotropen Materialien wie Holz oder Komposit-Werkstoffen werden die Ergebnisse durch diese Annahmen eher ungenau.

Für am Balkenende angreifende Einzelkräfte bzw. –momente ergibt sich der in Abbildung 5.25 dargestellte Verlauf der normierten Normalspannungen. Charakteristisch dabei ist der, vom Parameter  $\beta$  bzw. dessen Kehrwert, abhängige Verlauf der Biegelinie. Dieser bleibt, bei ausreichend langen Balken, auf einen relativ kleinen Bereich am Träger bzw. Verklebungsende beschränkt.

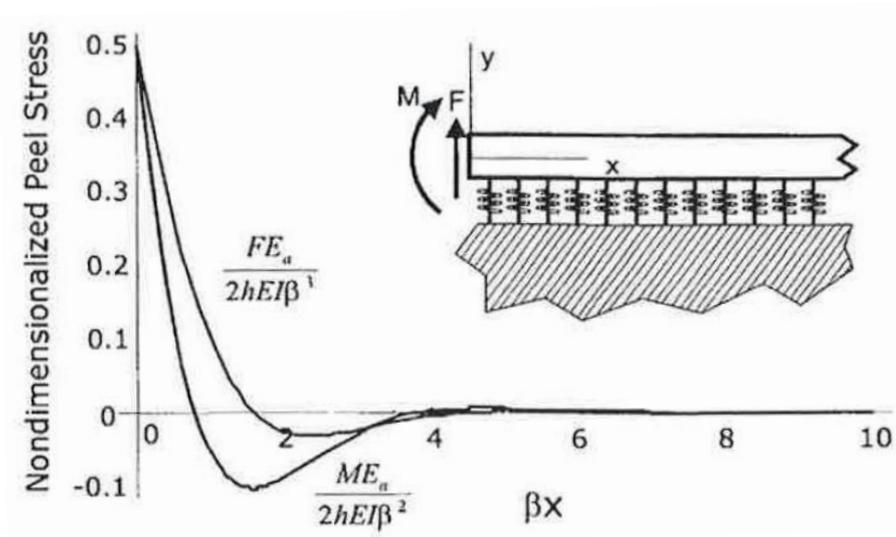


Abbildung 5.25: elastisch gebetteter Balken mit Querkraft und Moment, [14]

Für einen relativ langen elastisch gebetteten Balken ergeben sich die Schubspannungsverteilungen nach folgender Gleichung:

$$\sigma(x) = \frac{E_a}{2 * h * EI * \beta^3} * e^{-\beta * x} * \{ F * \cos(\beta x) + M * \beta * [\cos(\beta x) - \sin(\beta x)] \} \quad (5.59)$$

- mit: E·I... Biegesteifigkeit der Füge­teile  
 E<sub>a</sub>... Elastizitätsmodul des Klebstoffs  
 F... Querkraft  
 M... Moment

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a * w}{4 * EI * h}}$$

Ist der Balken kürzer als  $5/\beta$ , hat die vorangegangene Gleichung 5.57 des Normalspannungsverlaufes keine Gültigkeit mehr und muss adaptiert werden. Der Kehrwert von  $\beta$  besitzt eine Einheitslänge und ist ein Maß für die charakteristische Strecke, über welche die Spannungen verteilt sind. Verkleinert sich der Wert von  $\beta$ , so verteilt sich die Spannung gleichmäßiger über die verklebte Länge, wodurch sich die Spannungsspitzen verringern. Die trigonometrischen Terme aus Gleichung 5.57 deuten darauf hin, dass sich die Lösungen zwischen Zug- und Druckspannungen abwechseln. Der abwechselnde Verlauf zwischen Zug- und Druckzone im äußeren Bereich der aufgetragenen Querkraft und des Momentes erfolgen jedoch so schnell, dass diese in der graphischen Darstellung kaum erkennbar sind. Das Flächenintegral über die Spannungskurve im Inneren des Klebstoffes muss gleich der aufgetragenen Querkraft sein. Für das aufgetragene Moment gilt, dass die Fläche unter der Spannungskurve gleich Null sein muss und das aufgetragene Moment gleich dem resultierenden Kräftepaar entspricht. Die Zug- und Druckzonen wirken einander entgegen, so dass keine Nettokraft vorhanden ist. Obwohl die Flächen unter den jeweiligen Abschnitten der Kurve gleich sind, ist die Spitze am Ende der Verbindung signifikant größer als die der inneren Spitze. Eine Richtungsänderung des aufgetragenen Momentes führt zu einer Umkehrung dieses Vergleichs und hat positive Auswirkungen auf die Gestaltung der Verbindung. Auf Grund der Tatsache, dass der Klebstoff für Zugbeanspruchungen weniger geeignet ist, als für Druckbeanspruchungen, ist bei einer äußeren großen Zugspitzenspannung mit häufigeren Fehlern bzw. Versagen in der Klebefuge zu rechnen. Besonders an den äußeren Bereichen der Verklebung ist im Laufe der Zeit eine Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Haftungsfehlern auf Grund der äußeren Einflüsse gegeben.

Die Theorie des elastisch gebetteten Balkens diente als wichtige Schlüsselfunktion in der Analyse der Schäl-Geometrien nach Kaelble, welche in späterer Folge durch Dahlquist korrigiert wurden. Kaelble zeigte durch experimentelle Untersuchungen die Spannungsverläufe in Klebeverbindungen. Speziell die Druckzone kann durch Aufkleben eines druckempfindlichen Klebebandes auf eine Glasscheibe und anschließendes Anheben des freien Klebestreifenendes dargestellt werden. Trotz der Tatsache, dass kein äußerer Druck auf das Klebeband aufgebracht wurde, um auf der Glasscheibe haften zu bleiben, ist eine nicht unwesentliche Kraft erforderlich, um das Klebeband wieder zu entfernen. Laut Kaelbles Untersuchungen haftet der Klebstoff tatsächlich an den Füge­teilen auf Grund der Bildung von Druckzonen, wobei sich in Weiterer Folge Zugzonen ausbilden können. Dieses Phänomen diente als Basis für die Entwicklung mehrerer Klebetest wie dem „Loop-Tack-Test“ (Schleifentest) und den „Quick-Stick-Test“, um das Haftungsvermögen von Klebstoffen zu untersuchen.

## 5-4.2 ANALOGIE ZUR ERMITTLUNG DER NORMALSPANNUNGEN (VERBUNDBALKEN)

[1]

Im Folgenden wird ein Analogon zur Ermittlung der Normalspannungen in Form eines theoretischen Ansatzes der Spannungsanalyse für einen einfachen Verbundbalken vorgestellt, der an der Unterseite mit einer Stahlplatte verstärkt wurde. Dieser Ansatz, entwickelt für mit Glasfaserlamellen verstärkte Betonbalken, bezieht die Schubverformungen in der Klebefuge mit ein, indem eine Schubspannung entlang der Grenzfläche zwischen den Fügepartnern angenommen wird. Die Ergebnisse zeigten, dass die resultierenden Spannungskonzentrationen beträchtlich kleiner ausfallen, als bei anderen Modellen, die eine Schubverformung in der Klebefuge vernachlässigen. Es wird gezeigt, dass sowohl die Normal-, als auch die Schubspannungen an der Grenzfläche durch das Material, sowie die Geometrieparameter des Verbundbalkens beeinflusst werden. Um eine Abschätzung der Spannungsverläufe für geklebte Verbindungen zu erhalten, wird am Verbundträger auf die Berücksichtigung einer Streckenlast  $q$  verzichtet. Des Weiteren wird der äußere Fügepartner auf Grund der, für die Verklebung vorliegenden Symmetriebedingungen mit einer unendlichen Biegesteifigkeit angenommen ( $(E \cdot I)_1 \rightarrow \infty$ ). In Abbildung 5.26 wird der Verbundbalken samt seinen Materialparametern dargestellt.

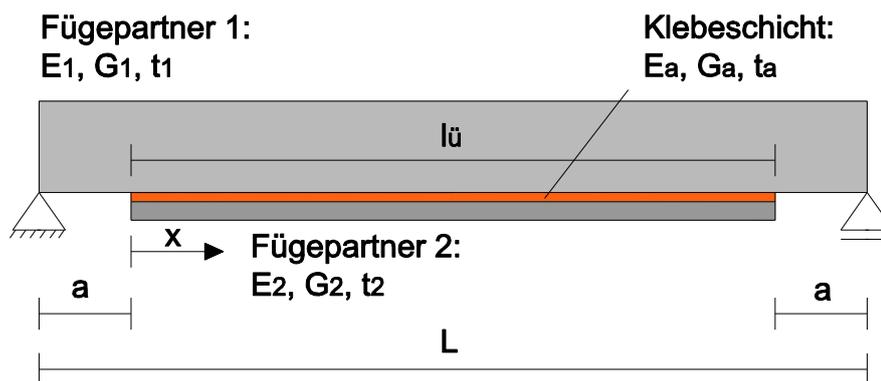


Abbildung 5.26: Verbundbalken mit verstärkter Stahlplatte

Aus dem Verbundbalken wird in weiterer Folge ein infinitesimales Element mit den angreifenden Schnittkräften (Abbildung 5.27) herausgeschnitten. In der vorliegenden Betrachtung wird ein linear elastisches Verhalten aller Materialien der Verbindung angenommen. Es wird weiter unterstellt, dass die Klebeschicht lediglich eine Rolle bei der Übertragung der Schubspannung spielt und die Schubspannungen über die Dicke der Klebeschicht konstant bleiben.

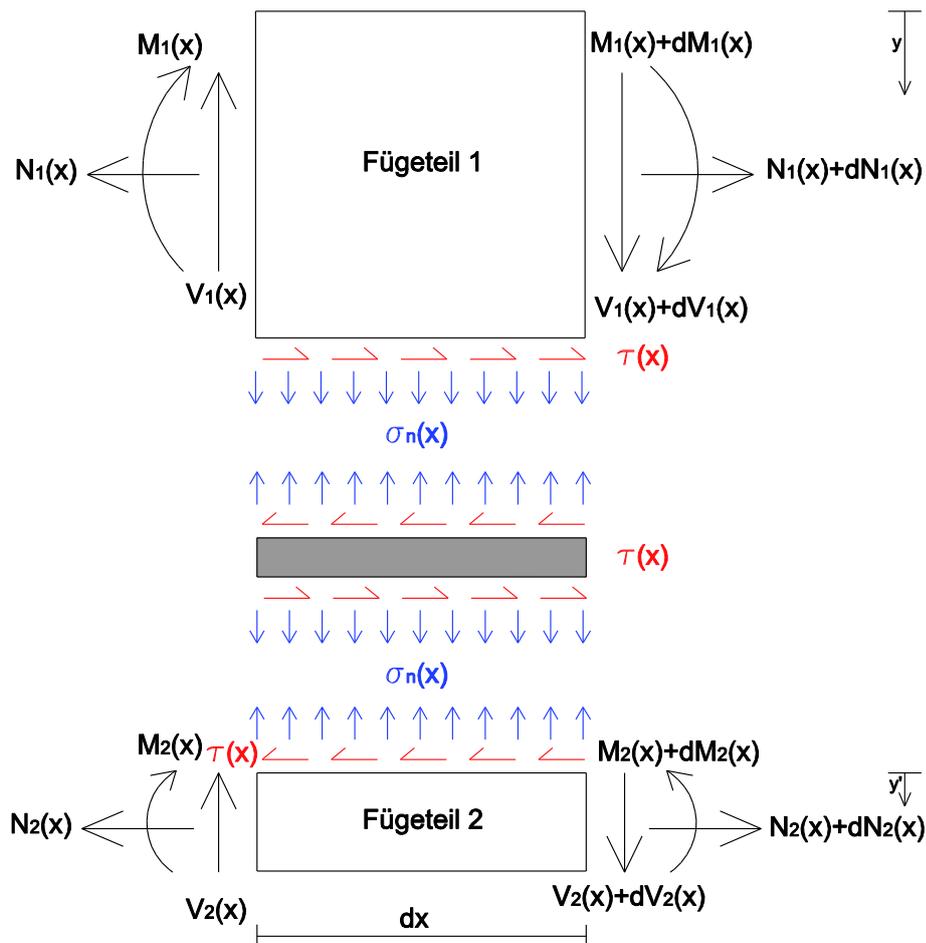


Abbildung 5.27: Schnittkräfte im infinitesimalen Element des Verbundbalkens

Im Folgenden wird die Gleichung der Normalspannungsverteilung entlang der Grenzflächen aufgestellt. Die Normalspannung im Klebstoff wird definiert als:

$$\sigma_n(x) = K_n \cdot [w_2(x) - w_1(x)] \tag{5.60}$$

- mit:  $\sigma_n$ ... Normalspannung im Klebstoff [N/mm<sup>2</sup>]
- $K_n$ ... Normalsteifigkeit des Klebstoffes pro Längeneinheit []
- $w_1$ ... Vertikalverschiebung Fügeteil 1 [mm]
- $w_2$ ... Vertikalverschiebung Fügeteil 2 [mm]

wobei die Normalsteifigkeit des Klebstoffes wie folgt definiert werden kann:

$$K_n = \frac{E_a}{t_a}$$

Unter Zugrundelegung der Gleichgewichtsbedingungen (5.60), sowie (5.62) der beiden Fügeiteile, gelten die folgenden Differentialgleichungen (5.61), (5.63) für die Durchbiegung der Fügeiteile 1 und 2:

### Fügeiteil 1

$$\frac{dM_1(x)}{dx^2} = V_1(x) - b_2 \cdot y_1 \cdot \tau(x) \quad (5.61)$$

$$\frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = \frac{1}{E_1 \cdot J_1} \cdot b_2 \cdot \sigma_n(x) + \frac{y_1}{E_1 \cdot J_1} \cdot b_2 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} + \frac{q}{E_1 \cdot J_1} \quad (5.62)$$

### Fügeiteil 2

$$\frac{dM_2(x)}{dx^2} = V_2(x) - b_2 \cdot y_2 \cdot \tau(x) \quad (5.63)$$

$$\frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -\frac{1}{E_2 \cdot J_2} \cdot b_2 \cdot \sigma_n(x) + \frac{y_2}{E_2 \cdot J_2} \cdot b_2 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (5.64)$$

- mit:  $V_1(x)$ ... Querkraft [N]  
 $b_2$ ... Breite Fügeiteil 2 [mm]  
 $\tau(x)$ ... Scherspannung in der Klebefuge [N/mm<sup>2</sup>]  
 $E_1$ ... Elastizitätsmodul Fügeiteil 1 [N/mm]  
 $E_2$ ... Elastizitätsmodul Fügeiteil 2 [N/mm]  
 $J_1$ ... Trägheitsmoment Fügeiteil 1 [mm<sup>4</sup>]  
 $J_2$ ... Trägheitsmoment Fügeiteil 2 [mm<sup>4</sup>]

Das Einsetzen der Gleichung (5.61) und (5.63) in die vierte Ableitung der Grenzflächennormalspannung aus Gleichung (5.59) ergibt sich die folgende Differentialgleichung:

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + \frac{E_a}{t_a} \cdot b_2 \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot J_1} + \frac{1}{E_2 \cdot J_2} \right) \cdot \sigma_n(x) + \frac{E_a}{t_a} \cdot b_2 \cdot \left( \frac{y_1}{E_1 \cdot J_1} - \frac{y_2}{E_2 \cdot J_2} \right) \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} + q \cdot \frac{E_a}{t_a} \cdot \frac{1}{E_1 \cdot J_1} = 0$$

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung 4. Ordnung lautet:

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta \cdot x} \cdot [C_1 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot x)] + e^{\beta \cdot x} \cdot [C_3 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_4 \cdot \sin(\beta \cdot x)] - n_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 \cdot q$$

Für ausreichend große Überlappungslängen kann angenommen werden, dass die Normalspannung sich zu Null ergibt und somit  $C_3 = C_4 = 0$  ist. Die Koeffizienten  $C_1$  und  $C_2$  sind Konstanten und werden über die Randbedingungen bestimmt.

Die allgemeine Lösung lautet daher wie folgt:

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta \cdot x} \cdot [C_1 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot x)] - n_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 \cdot q \quad (5.65)$$

mit den Parametern

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a}{t_a} \cdot b_2 \cdot \left( \frac{1}{E_1 \cdot J_1} + \frac{1}{E_2 \cdot J_2} \right)}$$

$$n_1 = \frac{y_1 \cdot E_1 \cdot J_1 - y_2 \cdot E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2}$$

$$n_2 = \frac{E_2 \cdot J_2}{b_2 \cdot (E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2)}$$

### 5-4.2.1 spezielle Lösungen für eine symmetrische Zugscherprüfung

Es wird angenommen, dass die Biegesteifigkeit des äußeren Fügeteils 1 auf Grund der einzuhaltenden Symmetriebedingung so groß ist, dass die Durchbiegung zu Null wird. Folglich wird nur der Fügeteil 2 für die nachstehende Berechnung herangezogen.

$$w_1(x) \equiv 0 \text{ bzw. } E_1 \cdot J_1 \rightarrow \infty$$

Die Normalspannung in der Klebefläche wird definiert als:

$$\sigma_n(x) = K_n \cdot w_2(x) \quad (5.66)$$

Die Ableitungen der Differentialgleichungen der Durchbiegung der Fügeteile folgen zu:

#### **Fügeteil 1**

$$\frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} = 0 \rightarrow w_1(x) \equiv 0 \quad (5.67)$$

#### **Fügeteil 2**

$$\frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = -\frac{1}{E_2 \cdot J_2} \cdot b_2 \cdot \sigma_n(x) + \frac{y_2}{E_2 \cdot J_2} \cdot b_2 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \quad (5.68)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (5.66) und (5.67) in die vierte Ableitung der Gleichung (5.65) folgt die Differentialgleichung für die Normalspannung zu:

$$\frac{d^4 \sigma_n(x)}{dx^4} + \left( \frac{E_a}{t_a} \cdot b_2 \cdot \frac{1}{E_2 \cdot J_2} \right) \cdot \sigma_n(x) - \left( \frac{E_a}{t_a} \cdot b_2 \cdot \frac{y_2}{E_2 \cdot J_2} \right) \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} + 0 = 0 \quad (5.69)$$

Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung lautet für den vorliegenden Fall einer Klebeverbindung wie folgt:

$$\sigma_n(x) = e^{-\beta \cdot x} \cdot [C_1 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot x)] + e^{\beta \cdot x} \cdot [C_3 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_4 \cdot \sin(\beta \cdot x)] - n_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx}$$

Bei einer ausreichend große Überlappungslänge wird die Normalspannung somit folgendermaßen definiert:

$$\boxed{\sigma_n(x) = e^{-\beta \cdot x} \cdot [C_1 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot x)] - n_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx}} \quad (5.70)$$

mit:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_a}{t_a} \cdot b_2 \cdot \frac{1}{E_2 \cdot J_2}}$$

$$n_1 = \frac{y_1 \cdot E_2 \cdot J_2 - y_2 \cdot E_1 \cdot J_1}{E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2} = \frac{\infty}{\infty} \rightarrow \text{Regel von D'Hospital} \rightarrow \frac{0 - y_2}{1 + 0} = -y_2$$

$$n_2 = \frac{E_2 \cdot J_2}{b_2 \cdot (E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2)} = 0$$

Randbedingung:  $V_2(0) = 0$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - b_2 \cdot y_2 \cdot \tau(x)$$

$$\sigma_n''(x) = K_n \cdot w_n''(x) = K_n \cdot -\frac{M_2(x)}{E_2 \cdot J_2}$$

$$\sigma_n'''(x) = K_n \cdot w_n'''(x) = -\frac{K_n}{E_2 \cdot J_2} \cdot \frac{dM_2(x)}{dx}$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = -\frac{E_2 \cdot J_2}{K_n} \cdot \frac{d^3 \sigma_n(x)}{dx^3} = V_2(x) - b_2 \cdot y_2 \cdot \tau(x)$$

$$\boxed{\rightarrow C_2 = -\frac{n_1}{2 \cdot \beta^2} \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3}} \quad (5.71)$$

An der Stelle  $x=0$  gilt:

$$\begin{aligned} -\frac{E_2 \cdot J_2}{K_n} \cdot \sigma_n'''(0) &= V_2(x) - b_2 \cdot y_2 \cdot \tau(0) \\ 2 \cdot \beta^3 \cdot e^{-\beta \cdot 0} \cdot [(C_1 + C_2) \cdot \cos(\beta \cdot 0) - (C_1 - C_2) \cdot \sin(\beta \cdot 0)] - n_1 \cdot \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} &= \frac{K_n}{E_2 \cdot J_2} \cdot [-V_2(x) + b_2 \cdot y_2 \cdot \tau(0)] \\ 2 \cdot \beta^3 \cdot e^{-\beta \cdot 0} \cdot [(C_1 + C_2) \cdot \cos(\beta \cdot 0) - (C_1 - C_2) \cdot \sin(\beta \cdot 0)] &= 0 + \frac{K_n}{E_2 \cdot J_2} \cdot b_2 \cdot y_2 \cdot \tau(0) + n_1 \cdot \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} \\ C_1 &= \frac{1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \frac{K_n}{E_2 \cdot J_2} \cdot b_2 \cdot y_2 \cdot \tau(0) + \frac{n_1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} - \left( -\frac{n_1}{2 \cdot \beta^2} \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \left[ \frac{K_n}{E_2 \cdot J_2} \cdot b_2 \cdot y_2 \cdot \tau(0) + n_1 \cdot \left( \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \left[ n_3 \cdot \tau(0) + n_1 \cdot \left( \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \right] \end{aligned}$$

mit:

$$n_3 = K_n \cdot b_2 \cdot \frac{y_2}{E_2 \cdot J_2}$$

$$\boxed{\rightarrow C_1 = \frac{1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \left[ n_3 \cdot \tau(0) + n_1 \cdot \left( \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \cdot \frac{d^3 \tau(x)}{dx^3} \right) \right]} \quad (5.72)$$

Nach Einsetzen der Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  aus Gleichung (5.70) und (5.71) erhält man:

$$\begin{aligned} \sigma_n(x) &= e^{-\beta \cdot x} \cdot [C_1 \cdot \cos(\beta \cdot x) + C_2 \cdot \sin(\beta \cdot x)] - n_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} = \\ &= e^{-\beta \cdot x} \cdot \left\{ \frac{1}{2 \cdot \beta^3} \cdot \left[ n_3 \cdot \tau(0) + n_1 \cdot \left( \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \right] \cdot \cos(\beta \cdot x) - \frac{1}{2 \cdot \beta^2} \cdot n_1 \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \cdot \sin(\beta \cdot x) \right\} - n_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} = \\ &= \frac{e^{-\beta \cdot x}}{2 \cdot \beta^3} \cdot \left\{ \left[ n_3 \cdot \tau(0) + n_1 \cdot \left( \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \right] \cdot \cos(\beta \cdot x) - n_1 \cdot \beta \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \cdot \sin(\beta \cdot x) \right\} - n_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx} \end{aligned}$$

$$\sigma_n(x) = \frac{e^{-\beta \cdot x}}{2 \cdot \beta^3} \cdot \left\{ \left[ n_3 \cdot \tau(0) + n_1 \cdot \left( \frac{d^4 \tau(0)}{dx^4} + \beta \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \right) \right] \cdot \cos(\beta \cdot x) - n_1 \cdot \beta \cdot \frac{d^3 \tau(0)}{dx^3} \cdot \sin(\beta \cdot x) \right\} - n_1 \cdot \frac{d\tau(x)}{dx}$$

Aus der Betrachtung des Aufbaues der Differentialgleichung wird erkennbar, dass die Normalspannungen vom Klebeflächenende hin exponentiell abklingen. Neben dem Parameter  $\beta$  des elastisch getbetteten Balkens wird der Verlauf der Normalspannungen weiters durch die Biegesteifigkeit des „Kragarmes“ sowie die Größe der Schubspannung am freien Ende sowie den Gradienten der wirksamen Schubspannung beeinflusst.

## 5-5 NUMERISCHE RECHENMODELLE

[36]

Mit numerischen Rechenmodellen lässt sich im Gegensatz zu analytischen Modellen eine wesentlich genauere Abbildungen der Spannungsverläufe in der Verbundfuge von Klebeverbindungen ermitteln. Durch Verwendung verschiedener numerischer Programme wie z. B. RFEM oder ABAQUS können räumliche (3D) Spannungssituationen wesentlich genauer erfasst werden. Des Weiteren ist es auch möglich, komplexe Geometrien zu modellieren. Dabei ergeben sich hinsichtlich der Modellbildung einige wichtige Aspekte, die zu beachten sind und auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll.

Um den Krafterleitungsbereich mit seinen hohen Spannungsgradienten realitätsnah abbilden zu können, muss das Netz in diesem Bereich und in der Verbundzone sehr fein diskretisiert werden, d. h. engmaschiger gewählt werden.

Unter anderen Autoren untersuchte Pörtner [36] in seiner Arbeit das Verbundverhalten eingeklebter Stahlstäbe mit numerischen Methoden. Diese Arbeit kann als Vergleich zu in Holz eingeklebten Flachkörpern herangezogen werden, da die Spannungszustände entlang der Klebefuge jenen von Stäben ähneln. Die Abbildung der Materialien der Fügepartner erfolgte dabei als dreidimensionaler orthotroper Werkstoff. Die Klebefuge wurde als isotropes Material in die Berechnung eingeführt. Für die Modellierung der Klebefuge stellt Pörtner in seiner Arbeit zwei unterschiedliche Herangehensweisen vor:

- Um Spannungs- und Verzerrungszustände einer Klebefuge ermitteln zu können, ist es ausreichend das Werkstoffmodell als linear-elastisch zu modellieren. Vorteilhaft bei dieser Herangehensweise ist, dass schon zwei der drei Werkstoffkenndaten (E-Modul, Schubmodul oder Querdehnzahl) des Klebstoffes für eine elastische Beschreibung genügen.
- Ein ideal elastisch-plastisches Verhalten sorgt für ein gleichmäßigeres Verbundspannungsverhalten entlang der Klebefuge und einen Abbau der Spannungsspitzen. Das Modell ist jedoch nur mittels eines nichtlinearen Materialgesetzes modellierbar.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden lediglich elastische Berechnungen mit dem FEM-Paket RFEM durchgeführt. Diese dienten vorwiegend dem Vergleich mit den vorgestellten Berechnungsmodellen und sollten zum Verständnis des Tragverhaltens der durchgeführten Prüfungen beitragen. Es wird auf das Kapitel 7 verwiesen.

# KAPITEL 6: PRÜFUNGEN

## 6-1 ALLGEMEIN

---

Grundsätzlich stellen sich bei den experimentellen Untersuchungen zwei wesentliche Fragen:

### 1. Wie wird geprüft bzw. welche Prüfkonfigurationen kommen zum Einsatz?

Grundvoraussetzung ist die Kenntnis über die Beanspruchung in der Konstruktion. Da sich die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung einer Stoßverbindung aus BSP-Elementen befasst, resultierte durch die Krafterleitungssituation eine Modellierung als Zugstoß sowie einer Entwicklung als reine Scherverbindung. Des Weiteren wird auch eine geeignete Messeinrichtung an den Prüfkörpern angebracht, um die Bauteilverformungen erfassen zu können. Als weiterer Einfluss auf die Prüfkonfiguration ist die Festlegung der Prüfkörpergeometrie zu nennen. Nach Festlegen der vorangegangenen Überlegungen werden die Prüfungen als

- „Pull-Pull“,
- „Push-Pull“ sowie in Form von
- Scherprüfungen durchgeführt.

### 2. Welche Einflussfaktoren werden untersucht (Prüfprogramm)?

Durch die vorhergehende Literaturrecherche ergeben sich nachfolgende Fragen, die beantwortet werden sollen:

- Welchen Einfluss haben die unterschiedlichen Oberflächenprofilierungen (Mikro → Makro) der Flachkörper auf die Tragfähigkeit?
- Kann durch Profilierung und Perforierung des Flachkörpers eine Steigerung der Tragfähigkeit erzielt werden?
- Welche Zugtragfähigkeiten lassen sich mit in Fichtenvollholz eingeklebten Flachkörpern erreichen?
- Welche Scherfestigkeiten erzielen eingeklebte Bleche in BSP-Prüfkörpern?
- Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Blecharten, -qualitäten und -formen auf das Trag- und Verformungsverhalten?
- Wie beeinflusst die Beanspruchungsart das Verformungsverhalten des Seiten- und Stirnholzes?

Grundsätzlich werden sieben Prüfserien realisiert. Die ersten vier Prüfserien werden mit in Buchen-Furnierschichtholz eingeklebten Blechen unterschiedlicher Festigkeiten, Profilierungen und Perforierungen durchgeführt. Zwischen den einzelnen Prüfserien wird die Einklebelänge der Bleche in den Holzquerschnitt sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Bleche variiert. Einzelne Prüfkörper werden mittels Quersugsicherungen aus Schellen bzw. Bohrstabdübel verstärkt. Um ein frühzeitiges

Aufspalten des Holzes im unteren Bereich des Prüfkörpers zu verhindern, werden zusätzlich Zwingen angebracht. In den Prüfserien 01, 02, 03, 04 wird ohne Wegmessung geprüft. Das Hauptaugenmerk der Prüfserien 01 und 02 richtet sich dabei primär auf die Auswirkung der Oberflächenprofilierung der Bleche unter Verwendung gleicher Klebstofffugendicke und gleichem Klebstoff. Dabei werden die Bleche nur auf einer Stirnseite eingeklebt. Ziel ist es, durch Variation der Oberflächenbeschaffenheit der Bleche eine Steigerung der Zugtragfähigkeit der Verbindung zu erreichen. Die Prüfserie 03 wird zusätzlich um perforierte Prüfkörper erweitert, wobei hier an beiden Stirnseiten Bleche eingeklebt werden. Um zusätzlich den Einfluss der unterschiedlichen Lasteinleitungssituation der Zugprüfungen untersuchen zu können, wird die Prüfserie 04 als „Push-Pull“-Prüfung durchgeführt. Die Prüfserie 05 wird mit BSP-Prüfkörpern unter Scherbeanspruchung durchgeführt. Um einen Vergleich der Zugtragfähigkeit zwischen Buchenfurnierschichtholz- und Fichtenvollholz-Prüfkörpern zu erhalten, werden zusätzlich zwei Prüfungen mit in Fichtenvollholz eingeklebten Zugkörpern als „Pull-Pull“- bzw. „Push-Pull“-Konfiguration geprüft. (06, 07) Da sich die Schubspannungsverläufe bis dato nur durch verschiedene Modellansätze beschreiben lassen und der tatsächliche Verlauf noch weitgehend unbekannt ist, wurde dieser Verlauf in der Klebefuge mittels theoretischer Methoden näher untersucht. Diese Prüfungen sollen Aufschluss darüber bringen, wie sich das Holz während des Zugversuches seitlich des Bleches durch Aufspalten und unter dem Blech durch Quersugversagen verformt. Da sich der Prüfumfang mancher Serien teilweise nur auf einzelne Prüfkörper beschränkt, können bei diesen keine statistischen Auswertungen hinsichtlich der Tragfähigkeit durchgeführt werden. Zur Prüfdurchführung wird eine Universalprüfmaschine der Firma Zwick eingesetzt. In Abbildung 6.1 stellt einen Überblick über die einzelnen Prüfserien inklusive Ausprägungen dar. Die Bruchbilder der Prüfungen finden sich im Anhang B. Insgesamt wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit 185 Einzelprüfungen durchgeführt.

	<b>Konfiguration</b>	<b>Holz</b>	<b>Blech</b>	<b>Blechoberfläche</b>	<b>Klebstoff</b>	<b>Sonstiges</b>
01	<b>PULL-PULL</b> einseitiges Blech 2 Vollgewinde- schrauben  Klemmbacken	Buchen- furnierschichtholz	<b>Aluminium</b> AlMgSi0,5	<b>Profilierung</b> geschliffen Einrieb Kreuzhieb	<b>Polyurethan</b> Purbond CR 421	<b>Aufspaltsicherung</b> Schellen Zwingen Bohrstabdübel
02	<b>PULL-PULL</b> einseitiges Blech 2 Vollgewinde- schrauben  Bolzen	Buchen- furnierschichtholz	<b>Stahl</b> S 760 MC	<b>Profilierung</b> geschliffen  <b>Perforierung</b> Langlöcher	<b>Polyurethan</b> Purbond CR 421	
03	<b>PULL-PULL</b> zweiseitiges Blech  Klemmbacken	Buchen- furnierschichtholz	<b>Aluminium</b> AlZnMgCu1,5  <b>Stahl</b> S 760 MC	<b>Profilierung</b> geschliffen Einrieb Kreuzhieb  <b>Perforierung</b> Langlöcher Rundlöcher	<b>Polyurethan</b> Purbond CR 421	<b>Aufspaltsicherung</b> Bohrstabdübel
04	<b>PUSH-PULL</b> einseitiges Blech  Gewindeanker DM16 Stahlplatte	Buchen- furnierschichtholz	<b>Aluminium</b> AlZnMgCu1,5  <b>Stahl</b> S 760 MC	<b>Profilierung</b> geschliffen Kreuzhieb  <b>Perforierung</b> Langlöcher Rundlöcher	<b>Polyurethan</b> Purbond CR 421	<b>Aufspaltsicherung</b> Bohrstabdübel
05	<b>Scherversuch</b>  14° Konfiguration (schräg) nach EN 408:2012	Brettsperrholz Fichte  (3-lagig) Mittellage 0°, 90°	<b>Stahl</b> S 760 MC	<b>Profilierung</b> geschliffen sandgestrahlt	<b>Polyurethan</b> Purbond CR 421	induktive Wegaufnehmer
06	<b>PULL-PULL</b> zweiseitiges Blech  Klemmbacken	Fichte-Vollholz	<b>Aluminium</b> AlZnMgCu1,5  <b>Stahl</b> S 760 MC	<b>Profilierung</b> blank geschliffen sandgestrahlt  <b>Perforierung</b> Langlöcher Rundlöcher	<b>Polyurethan</b> Purbond CR 421	induktive Wegaufnehmer
07	<b>PUSH-PULL</b> einseitiges Blech  Gewindeanker DM16 Stahlplatte	Fichte-Vollholz	<b>Aluminium</b> AlZnMgCu1,5  <b>Stahl</b> S 760 MC	<b>Profilierung</b> blank geschliffen sandgestrahlt  <b>Perforierung</b> Langlöcher Rundlöcher	<b>Polyurethan</b> Purbond CR 421	induktive Wegaufnehmer

Abbildung 6.1: Prüfschema

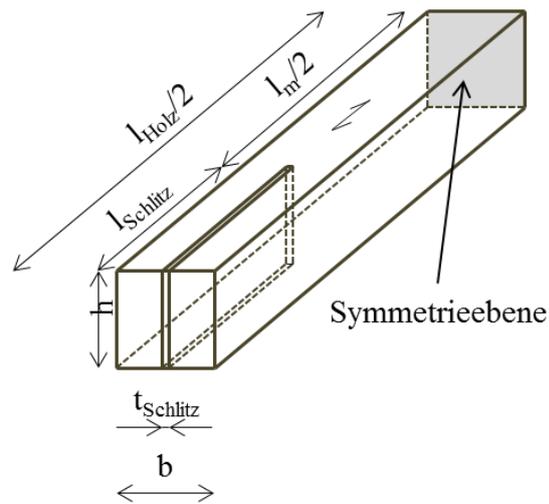
## 6-2 VERSUCHSMATERIALIEN

### 6-2.1 HOLZWERKSTOFFE

Für die Prüfungen kommen drei unterschiedliche Holzwerkstoffe zum Einsatz. Für die Zugprüfkörper werden Buchenurnierschichtholz und Vollholz aus Fichte eingesetzt. In der folgenden Tabelle 6.2 sind die Geometrievariationen der Zugprüfkörper dargestellt, welche in den einzelnen Prüfserien verwendet werden.

Tabelle 6.1: Geometrie der Zugkörper, [28]

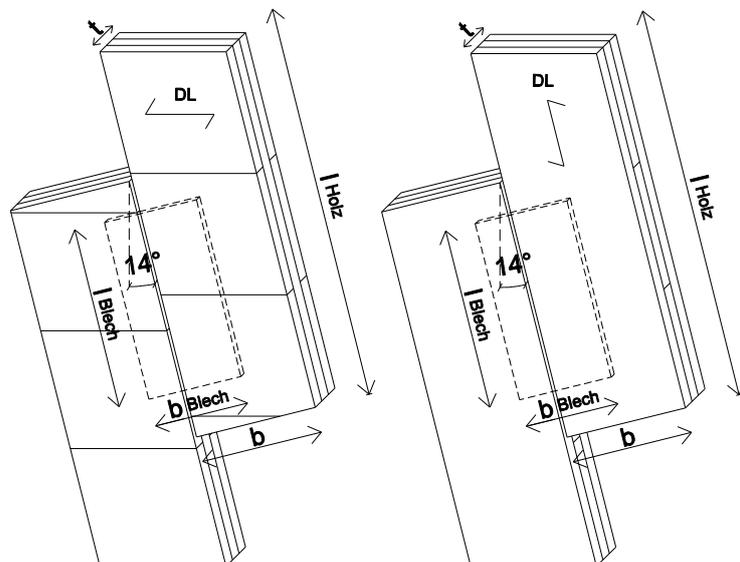
Bezeichnung		Abmessung [mm]
Breite	$b$	60
Höhe	$h$	60
Gesamtlänge	$l_{\text{Holz}}$	400 / 380 / 360 / 345
Mittelholzlänge	$l_m$	260 / 210 / 200 / 180 / 160
Schlitzlänge	$l_{\text{Schlitz}}$	100 / 75 / 50
Schlitzbreite	$t_{\text{Schlitz}}$	7,0



Die Scherprüfkörper werden aus BSP-Platten hergestellt. Tabelle 6.2 gibt einen Überblick über die Geometrieverhältnisse der Scherprüfkörper, wobei die Mittellage des BSP, in welcher die Bleche eingeklebt wurden, einmal in Faserrichtung und einmal quer zur Faser eingeklebt wurde.

Tabelle 6.2: Geometrie der Scherkörper

Bezeichnung		Abmessung [mm]
Breite	$b$	200
Dicke	$t$	3 x 30
Gesamtlänge	$l_{\text{Holz}}$	653,5
Blecbreite	$b_{\text{Blech}}$	155
Blechlänge	$l_{\text{Blech}}$	280
Schlitzbreite	$t_{\text{Schlitz}}$	7,0



## Buchenfurnierschichtholz

Für die ersten vier Prüfserien werden zunächst Furnierschichtholz-Prüfkörper aus BauBuche S der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG verwendet. Dieser mehrschichtig aufgebaute Holzwerkstoff besteht aus einzelnen Furnierlagen, deren Faserrichtung gänzlich in einer Richtung orientiert ist. Nach dem Zuschneiden auf die gewünschten Prüfkörperabmessungen werden die Holzteile in einer Klimakammer bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % bis zur Ausgleichsfeuchte von rund 12 % gelagert. Um die Rohdichte zu bestimmen, werden die Holzkörper mittels Schiebelehre gemessen und danach abgewogen. Dabei werden je zwei Werte der Höhe und Breite im Mittel erfasst. Im nächsten Schritt werden die Probekörper mittels Kreissäge auf die gewünschte Länge eingeschlitzt. In Abbildung 6.2 finden sich die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte von Buchenfurnierschichtholz („Buchen-FSH längslagig“).

Charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte in N/mm<sup>2</sup> und charakteristische Rohdichte in kg/m<sup>3</sup> für "Buchen-FSH längslagig" und "Buchen-FSH querlagig" gemäß Leistungserklärung des Herstellers

Art der Beanspruchung		Furnierschichtholz "Buchen-FSH längslagig"	Furnierschichtholz "Buchen-FSH querlagig"
Neendicke in mm		20 ≤ B ≤ 120	20 ≤ B ≤ 100
<b>Festigkeitskennwerte</b>			
<b>Plattenbeanspruchung</b>			
Biegung	f <sub>m 0,k</sub>	65	45
Druck	f <sub>c,90,k</sub>	10	10
Schub (Roll)	f <sub>v,k</sub>	3,3	
<b>Scheibenbeanspruchung</b>			
Biegung <sup>a)</sup>	f <sub>m,k</sub>	70	60
Zug    zur Faser	f <sub>t,0,k</sub>	70	40
Zug ⊥ zur Faser	f <sub>t,90,k</sub>	1,5	17
Druck    zur Faser	f <sub>c,0,k</sub>	41,6	24,2
Druck ⊥ zur Faser	f <sub>c,90,k</sub>	14	14
Schub	f <sub>v,k</sub>	9	
<b>Steifigkeitskennwerte</b>			
Elastizitätsmodul	E <sub>0,mean</sub>	16800	11800
Elastizitätsmodul	E <sub>0,05</sub>	14900	10700
Elastizitätsmodul	E <sub>90,mean</sub>	470	3700
Schubmodul hochkant	G <sub>mean</sub>	760	890
Schubmodul flachkant	G <sub>mean</sub>	850	430
Rohdichte	ρ <sub>k</sub>	680	
a) Werte gelten für h ≤ 300 mm. Für 300 < h ≤ 1000 mm ist der charakteristische Festigkeitswert mit dem Beiwert k <sub>h</sub> = (300/h) <sup>0,12</sup> zu multiplizieren. h ist die für die Biegebeanspruchung maßgebende Abmessung des Gesamtquerschnitts in mm.			

Abbildung 6.2: Festigkeits- und Steifigkeitswerte von Buchenfurnierschichtholz, [17]

**Fichte (Vollholz)**

Da die zu entwickelnden Systemverbinder in Brettsper Holz eingeklebt werden sollen, werden Zugprüfungen mit eingeklebten Blechen in Fichten-Vollholzkörpern durchgeführt. Die erreichten Zugtragfähigkeiten bieten eine gute Vergleichsbasis zu den vorangegangenen Prüfungen mit Buchenfurnierschichtholz. In Abbildung 6.3 sind die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte für Fichten-Vollholz aufgelistet.

<b>C24</b>			Modifikationsbeiwert			
			0,9	0,8	0,7	0,6
Biegung	$f_{m,k}$	24,0	16,62	14,77	12,92	11,08
Zug	$f_{t,0,k}$	14,0	9,69	8,62	7,54	6,46
	$f_{t,90,k}$	0,4	0,28	0,25	0,22	0,18
Druck	$f_{c,0,k}$	21,0	14,54	12,92	11,31	9,69
	$f_{c,90,k}$	2,5	1,73	1,54	1,35	1,15
Schub und Torsion	$f_{v,k}$	2,3	1,59	1,42	1,24	1,06
Rollschub	$f_{r,k}$	1,0	0,69	0,62	0,54	0,46
E-Modul	$E_{0,mean}$	11000	$\gamma_M = 1,30$ $X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_M}$			
	$E_{90,mean}$	370				
	$E_{0,05}$	7333				
Schubmodul	$G_{0,mean}$	690				
	$G_{90,mean}$	69				
	$G_{0,05}$	460				
Rohdichte	$\rho_k$	350				

Abbildung 6.3: Festigkeits- und Steifigkeitswerte von Fichte-Vollholz, [19]

### Brettsperrholz (BSP Fichte)

In Prüfserie 05 umfasst Scherprüfungen an in BSP eingeklebten Blechen. Die Scherprüfungen (05) werden an dreischichtigen Brettsperrholz- Prüfkörper durchgeführt. Das eingeklebte Blech wird je nach Lage der mittleren Schicht auf Schub in Faserrichtung oder auf Rollschub (quer zur Faser) beansprucht. Die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte von Brettsperrholz sind in Abbildung 6.4 aufgelistet.

CL24h			Modifikationsbeiwert			
			0,9	0,8	0,7	0,6
Biegung	$f_{m,CLT,k}$	24,0	17,28	15,36	13,44	11,52
Zug	$f_{t,0,CLT,net,k}$	16,0	11,52	10,24	8,96	7,68
	$f_{t,90,CLT,k}$	0,5	0,36	0,32	0,28	0,24
Druck	$f_{c,0,CLT,net,k}$	24,0	17,28	15,36	13,44	11,52
	$f_{c,90,CLT,k}$	3,0	2,16	1,92	1,68	1,44
Schub und Torsion	$f_{v,net,k,ref}$	5,5	3,96	3,52	3,08	2,64
	$f_{v,gross,k}$	3,5	2,52	2,24	1,96	1,68
	$f_{T,node,k}$	2,5	1,80	1,60	1,40	1,20
	$f_{V,CLT,k}$	3,5	2,52	2,24	1,96	1,68
Rollschub	$f_{r,CLT,k} - w_B/t_B \geq 4:1$	1,4	1,01	0,90	0,78	0,67
	$f_{r,CLT,k} - w_B/t_B < 4:1$	0,8	0,58	0,51	0,45	0,38
E-Modul	$E_{0,CLT,mean}$	11600	$\gamma_M = 1,25$ $X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_M}$			
	$E_{0,CLT,05}$	9667				
	$E_{90,CLT,mean}$	300				
	$E_{90,CLT,05}$	250				
	$E_{c,90,CLT,mean}$	450				
	$E_{c,90,CLT,05}$	375				
Schubmodul	$G_{CLT,mean}$	650				
	$G_{CLT,05}$	540				
	$G_{r,CLT,mean} - w_B/t_B \geq 4:1$	100				
	$G_{r,CLT,mean} - w_B/t_B < 4:1$	65				
	$G_{r,CLT,05} - w_B/t_B \geq 4:1$	83				
	$G_{r,CLT,05} - w_B/t_B < 4:1$	54				
Rohdichte	$\rho_k$	385				

Abbildung 6.4: Festigkeits- und Steifigkeitswerte von Brettsperrholz, [18]

## 6-2.2 KLEBSTOFF

### Purbond CR 421

Sämtliche Bleche werden mittels Purbond CR 421 eingeklebt. Das verwendete Klebstoffsystem ist ein zweikomponentiges, lösemittelfreies Gemisch und zählt zur Gruppe der Polyurethanklebstoffe. Es wird mittels einer Applikationspistole aufgetragen. Das Mischen des Harzes mit dem Härter erfolgt beim Herauspressen aus der Handpistole im statischen Mischrohr. Bei der Verarbeitung darf die Holzfeuchte laut Produktdatenblatt [2] 15 % nicht überschreiten. Die zu klebenden Bauteile müssen frei von Stoffen wie Staub und Fetten sein. Die Verarbeitungszeit des Purbondklebstoffes beträgt 10 Minuten, danach ist die Gelzeit<sup>2</sup> abgeschlossen. Die Prüfungen erfolgen erst nach Erreichen der Endfestigkeit [2]. Abbildung 6.5 zeigt den Aushärtegrad in Abhängigkeit der Tage nach erfolgter Verklebung.

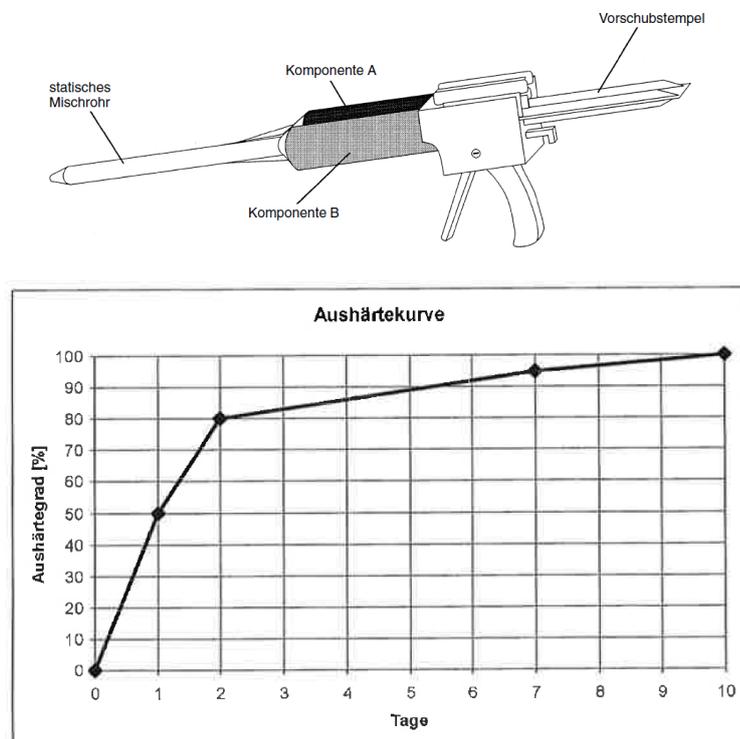


Abbildung 6.5: Handpistole für die Verarbeitung von 2-Komponenten-Klebstoffen [26], Aushärtekurve des Purbond CR 42, [2]

## 6-2.3 BLECH

Im Rahmen der Prüfungen werden zwei unterschiedliche Werkstoffe für eingeklebte Bleche herangezogen. Es werden Aluminiumbleche und Stahlbleche unterschiedlicher Güte verwendet. Alle Flachkörper haben eine Stärke von 5 mm und werden je nach Oberflächenbehandlung auf einen Nettoquerschnitt von 3 mm für die Serien 01 und auf 4 mm für die Serien 03 und 04 reduziert. Die Einklebelängen variieren je nach Prüfserie zwischen 50, 75, oder 100 mm. Die Oberflächen der Bleche werden zum einen mit Mikroprofilierungen (blank, geschliffen, sandgestrahlt) und zum anderen mit Makroprofilierungen (Kreuzhieb, Einhieb) bearbeitet. Eine weitere Bearbeitung der Bleche erfolgt durch

<sup>2</sup> Die Gelzeit ist bei Zweikomponenten-Systemen jene Zeitspanne, in welcher ein gebrauchsfertiger Klebstoffansatz vom fließfähigen in den ablauffesten Zustand übergeht.

Perforation mittels Langlöcher und Rundlöcher, um einen Einfluss der erhärteten Klebstoffdübel auf die Tragfähigkeit zu untersuchen.

### Aluminium

Aluminium ist ein einfach zu bearbeitendes Leichtmetall und eignet sich daher hervorragend für die Oberflächenprofilierungen und Perforierungen der einzuklebenden Flachkörper. Die Serien mit Aluminiumblechen werden auf Grund ihrer einfacheren Verarbeitbarkeit als Referenz für die Stahlbleche herangezogen. Für die Prüfserie 01 werden Aluminiumbleche der Firma Zultner Metall GmbH der Güte AlMgSi0,5 mit einer Zugfestigkeit von  $R_m = 200 \text{ N/mm}^2$  und einer 0,2%-Dehngrenze von  $R_{p0,2} = 160 \text{ N/mm}^2$  eingesetzt. Dabei zeigt sich auf Grund von einer großen Anzahl an Aluminiumbrüchen, dass eine Güte höherer Festigkeit für weitere Prüfungen verwendet werden muss. Hierfür wird eine Aluminiumlegierung (AlZnMgCu1,5) mit einer Zugfestigkeit von  $R_m = 540 \text{ N/mm}^2$  und einer 0,2%-Dehngrenze von  $R_{p0,2} = 485 \text{ N/mm}^2$  verwendet. Die Blechtafeln wird auf die gewünschten Abmessungen abgelängt und anschließend mittels Fräsen (Abbildung 6.6) und Bohrer für die Prüfungen vorbereitet.



*Abbildung 6.6: Herstellen der Oberflächenprofilierung*

### Stahl (Feinkornbaustähle)

S 355: Dieser Stahl ist ein Standardstahl für den Stahlbau und weist einen Zugfestigkeit von rund  $R_m = 520 \text{ N/mm}^2$  und eine 0,2%-Dehngrenze von  $R_{p0,2} = 355 \text{ N/mm}^2$  auf.

S 760 MC: Diese Stahlsorte gliedert sich in den Bereich der mikrolegierten Feinkornbaustähle und zeichnet sich durch ihre hohe Sprödbbruchfestigkeit aus. Sie weist eine Zugfestigkeit von  $R_m = 850 \text{ N/mm}^2$  und eine 0,2%-Dehngrenze von  $R_{p0,2} = 760 \text{ N/mm}^2$  auf.

## 6-3 VERSUCHSKONFIGURATIONEN

[20], [33]

Die Versuchskonfigurationen unterscheiden sich zwischen den einzelnen Prüfserien hinsichtlich der Krafteinleitungssituation. Die Zugprüfungen erfolgten in Anlehnung an ÖNORM EN 1382 (1999) [33] an. Der Anwendungsbereich dieser Norm bezieht sich auf in massives Leimholz eingeklebte Nägel, Schrauben oder Klammern. Da es sich im vorliegenden Fall um eingeklebte Verbindungsmittel handelt, werden die Konfigurationen der ÖNORM EN 1382 [33] für eingeklebte Bleche übernommen. Dabei sind

in der Literatur mehrere Prüfkfigurationen beschrieben, die die Ausziehfestigkeit eingeklebter Stäbe beschreiben. Bereits Bainbridge et. al (2000) führte „Pull-Pull“-Versuche mit beidseitig faserparallel eingeklebten Stäben durch. Darüber hinaus wurden auch „Push-Pull“-Versuche von Rajcic et al. (2006) aus [47] durchgeführt. Tlustochowicz et al. (2011) aus [20] stellte fest, dass „Push-Pull“-Versuche nicht den praktischen Anwendungen entsprechen. Dieses Verfahren dient auf Grund der Einfachheit lediglich dem Vergleich der Ergebnisse mit ähnlichen experimentellen Arbeiten von anderen Wissenschaftlern. Ein Aufspalten der Probe kann durch Reibung zwischen dem Holz und dem Stahlblech weitgehend verhindert werden. Ein Scherbruch kann

- (1) entlang des Bleches in der Klebstoffschicht,
- (2) im Holz um den Flachkörper,
- (3) in Kombination von (1) und (2) und
- (4) unter Fließen des Flachkörpers

auftreten.

Um die Scherbeanspruchung in der Fuge zwischen Flachkörper und Holzwerkstoff erfassen zu können, wird zusätzlich eine Scherversuchsserie in Anlehnung an die ÖNORM EN 408 (2012) [51] realisiert.

• **PULL-PULL**

Die Prüfkörper werden entweder beidseitig, wie in Abbildung 6.7 (links) oder an einem Blechende (rechts) in die Universal Prüfmaschine zwischen zwei hydraulische „Klemmbacken“ eingespannt. Um für anfängliche grobe Abschätzungen des Tragverhaltens den Aufwand, jeweils zwei Bleche an einem Prüfkörper einzukleben, zu reduzieren, werden an der unteren Stirnseite des Prüfkörpers zwei Vollgewindeschrauben 10 x 300 für die Verankerung im Abstand von 32 mm eingeschraubt. Dabei wird die erforderliche Schraubkraft über die Zugfestigkeit des Aluminiums von 200 N/mm<sup>2</sup> und dem Bruttoquerschnitt des Bleches (5 mm x 60 mm) umgerechnet. Die Schraubenverbindung wird derart ausgelegt, dass das Versagen möglichst im Bereich der Klebeverbindung eintritt. Die Durchführung erfolgt als „Pull-Pull“-Prüfung. Die Einklebelängen der Flachkörper variieren je nach Prüfserie zwischen 50 und 100 mm. Die Prüfkörper werden mit Längen von 34,5 cm – 40,0 cm hergestellt. Um das Aufspalten des Holzes im Klebebereich zu verhindern, werden einzelne Serien mit Bohrstabdübel Ø 7 mm der Firma Schmidt und Schraubzwingen sowie Schellen auf Querkzug verstärkt.

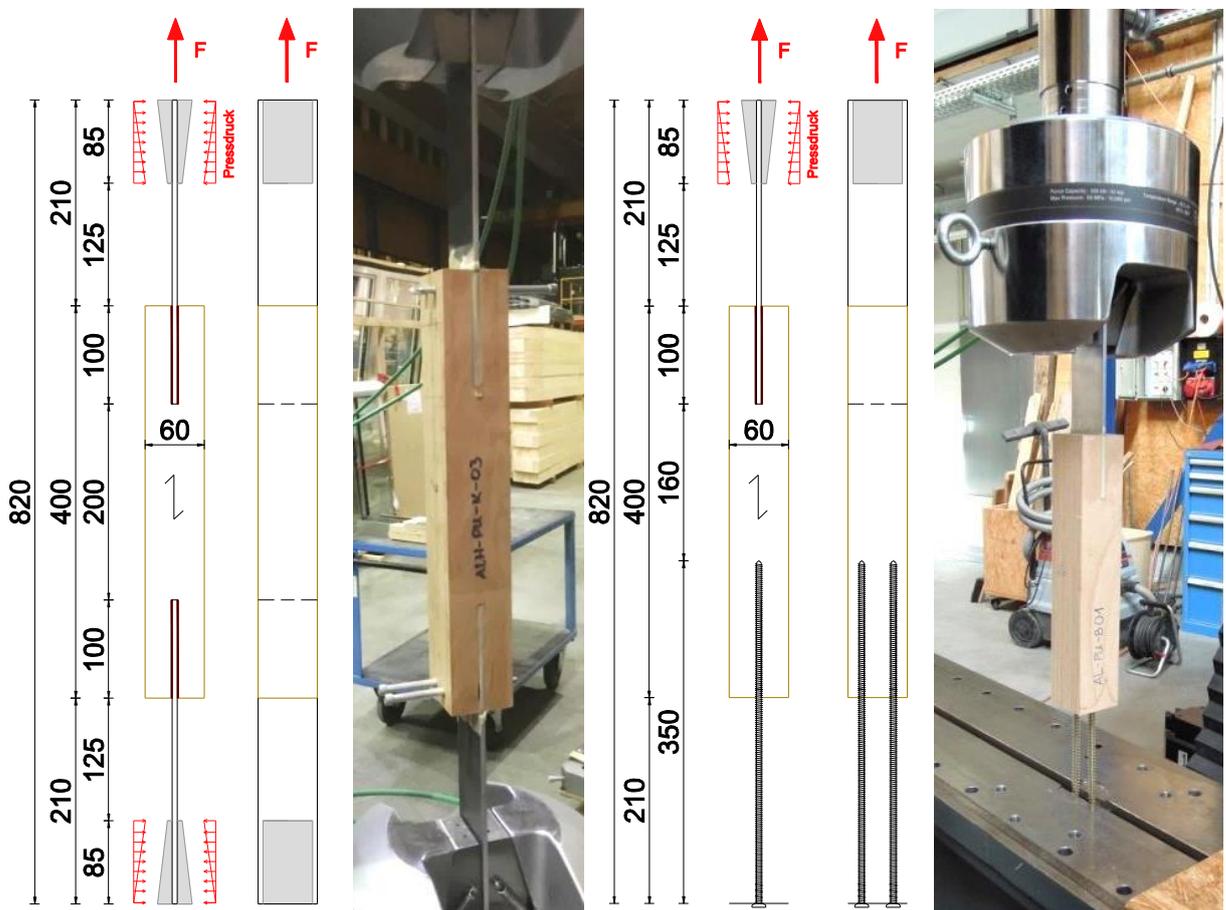


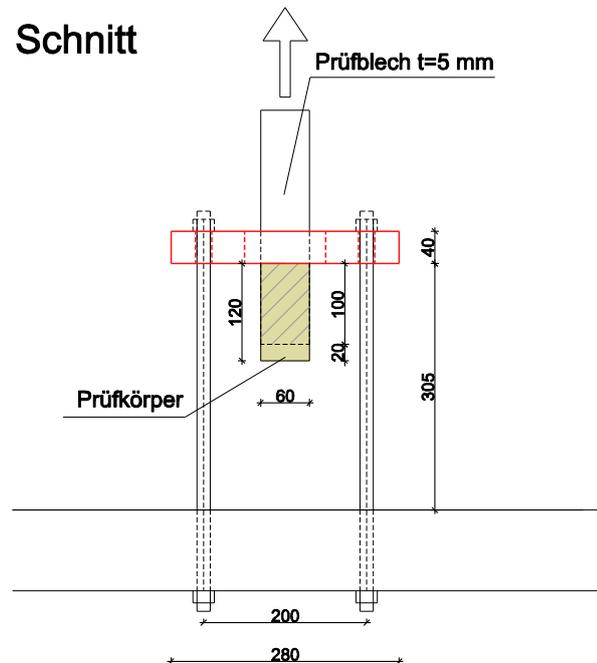
Abbildung 6.7: „PULL-PULL“-Prüfung: zwei Bleche (links); einseitiges Blech mit Vollgewindeschrauben (rechts)

• **PUSH-PULL**

Bei dieser Konfiguration wird einseitig ein Flachkörper im Stirnholz eingeklebt, an dem am oberen Ende über hydraulische Klemmbacken eine Zugprüfkraft aufgebracht wird. Die Gegenkraft wird durch eine 40 mm dicke Stahlplatte erzeugt, die durch vier Gewindeanker  $\varnothing 16$  nach unten gehalten wurde.



**Schnitt**



**Grundriss**

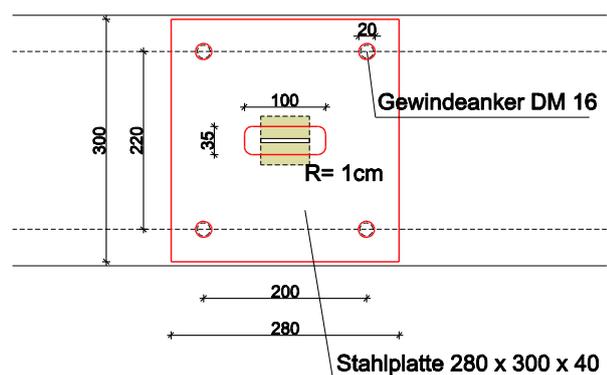


Abbildung 6.8: „PUSH-PULL“-Prüfkonfiguration

- **SCHERPRÜFUNG**

Die Scherprüfkonfiguration wird in Anlehnung an die ÖNORM EN 408 [51] gewählt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Faserorientierung der mittleren BSP-Schicht. Die eingeklebten Bleche werden zum einen in Faserrichtung abgeschert, zum anderen wurden auch Bleche mit Mittellagen des BSP quer zur Faserrichtung beansprucht. Die beiden Holzprüfkörper mit innenliegendem, eingeklebtem Blech sind entsprechend der Darstellung in Abbildung 6.9 um  $14^\circ$  geneigt so in die Prüfmaschine zu positionieren, dass eine kontinuierliche Krafteinleitung über die Auflagerplatte sichergestellt werden kann. Somit soll gewährleistet werden, dass die Kraftresultierende durch den Mittelpunkt des in Abbildung 6.9 rechts dargestellten Prüfkörpers verläuft, wodurch Exzentrizitäten vermindert werden sollen.

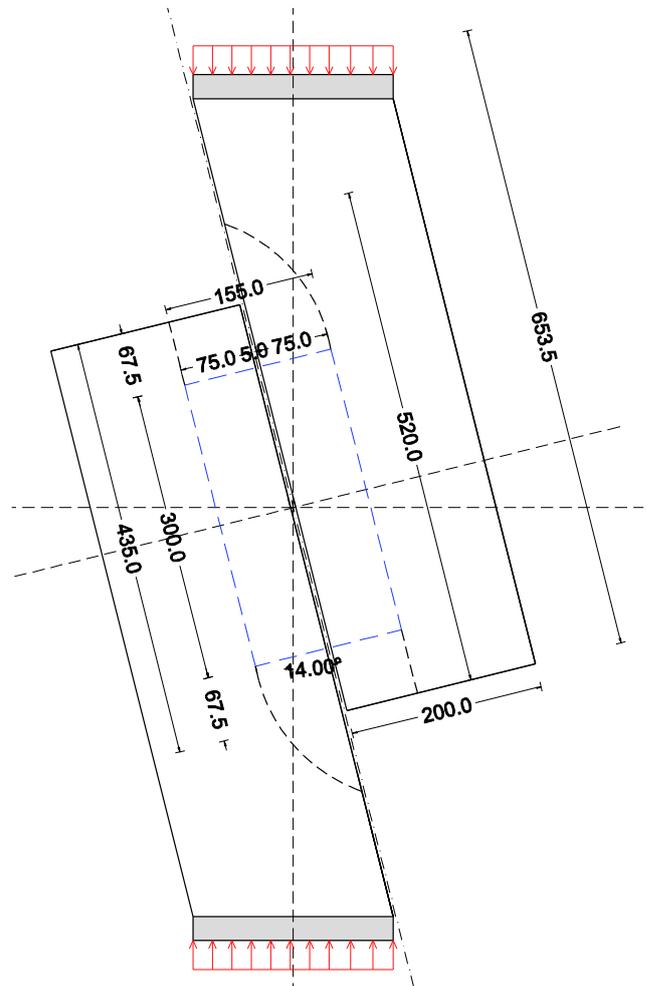


Abbildung 6.9: Scherprüfkonfiguration

## 6-4 PRÜFDATEN

### 6-4.1 HOLZFEUCHTE

Die Bestimmung der Holzfeuchte erfolgt nach ÖNORM EN 13183-1 (2004) [50]. Dabei wurden Darrprobenstücke aus den bereits durchgeführten Prüfkörpern herausgeschnitten und nach Lagerung in der Klimakammer abgewogen. Anschließend werden die Proben im Darrschrank bei 103°C bis zur Massekonstanz getrocknet und erneut gewogen. Mit Hilfe der Gleichung 6.1 erfolgt die Bestimmung der Holzfeuchte:

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad (6.1)$$

u... Holzfeuchtigkeit [%]

m<sub>1</sub>... Masse des feuchten Prüfkörpers (Nassgewicht) [g]

m<sub>0</sub>... Masse des trockenen Prüfkörpers (Darrgewicht) [g]

### 6-4.2 ROHDICHTE

Die Rohdichtebestimmung erfolgt gemäß der ON ISO 3131 (1996) [49]. Die herausgeschnittenen Holzproben werden nach Lagerung in der Klimakammer gewogen und mit Hilfe einer Schiebelehre und eines Rollmaßbandes gemessen. Dabei wurden die Breite, die Höhe und die Länge an je zwei unterschiedlichen Stellen gemessen und gemittelt. Über die folgende Gleichung 6.2 wurde die Rohdichte ermittelt:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6.2)$$

mit:  $V = b \cdot h \cdot l$

ρ... Holzrohndichte [g/cm<sup>3</sup>]

m... Masse des Prüfkörpers nach Lagerung in der Klimakammer [g]

V... Volumen des Prüfkörpers [cm<sup>3</sup>]

b... Breite des Prüfkörpers [cm]

h... Höhe des Prüfkörpers [cm]

l... Länge des Prüfkörpers [cm]

### 6-4.3 EINZELAUSWERTUNG DER ZUGPRÜFUNGEN

Alle Prüfungen wurden mit Hilfe des Computerprogrammes Excel 2010 ausgewertet. Im ersten Schritt wurden die Messdaten (Zeit, Standardkraft, Standardweg) eingelesen. Als nächster Schritt erfolgte die Eingabe aller benötigten Geometrieparameter des Holzes, des Bleches sowie des Klebstoffs für jeden Prüfkörper. Mit Hilfe der eingegebenen Daten konnten nun folgende Schritte durchgeführt werden.

- Darstellung der Kraft/Weg-Diagramme, aus denen ihr unterschiedliches Trag- und Verformungsverhalten der Verbindungen ersichtlich wird. Sie korrelieren mit den jeweiligen Bruchbildern der Prüfkörper aus Anhang B
- Ermittlung der maximalen Traglast
- Berechnung der Bruttonormalspannungen im Holz
- Berechnung der Brutto- und Nettonormalspannungen im Stahl
- Berechnung der Scherspannungen in der Klebefuge

Die nachstehenden Gleichungen (6.3) bis (6.6) dienen der Berechnung der zuvor erwähnten Spannungen.

$$\text{mit: } A_{H,b} = b \cdot h \qquad \sigma_{H,b} = \frac{F_{max}}{A_{H,b}} \qquad (6.3)$$

$\sigma_{H,b}$ ... Bruttonormalspannung im Holz [N/mm<sup>2</sup>]

$F_{max}$ ... Maximalkraft [N]

$A_{H,b}$ ... Bruttoquerschnittsfläche des Holzes [mm<sup>2</sup>]

$b$ ... Breite des Holzprüfkörpers [mm]

$h$ ... Höhe des Holzprüfkörpers [mm]

$$\text{mit: } A_{B,b} = b \cdot t \qquad \sigma_{B,b} = \frac{F_{max}}{A_{B,b}} \qquad (6.4)$$

$\sigma_{B,b}$ ... Bruttonormalspannung im Blech [N/mm<sup>2</sup>]

$F_{max}$ ... Maximalkraft [N]

$A_{B,b}$ ... Bruttoquerschnittsfläche des Bleches [mm<sup>2</sup>]

$b$ ... Breite des Bleches [mm]

$t$ ... Dicke des Bleches [mm]

$$\text{mit: } A_{B,n} = b_n \cdot t_n \qquad \sigma_{B,n} = \frac{F_{max}}{A_{B,n}} \qquad (6.5)$$

$\sigma_{B,n}$ ... Nettonormalspannung im Blech [N/mm<sup>2</sup>]

$F_{max}$ ... Maximalkraft [N]

$A_{B,n}$ ... Nettoquerschnittsfläche des Bleches [mm<sup>2</sup>]

$b_n$ ... Nettobreite des Bleches (Abzüglich der Lochbreiten) [mm]

$t_n$ ... Nettodicke des Bleches (Abzüglich der Profilierungstiefe) [mm]

mit:  $A_K = b \cdot l_k$   $\tau_K = \frac{F_{max}}{A_K}$  (6.6)

$\tau_K$ ... Scherspannungen in der Klebefuge [N/mm<sup>2</sup>]

$F_{max}$ ... Maximalkraft [N]

$A_K$ ... Klebefläche [mm<sup>2</sup>]

$b$ ... Breite der Klebefläche [mm]

$l_k$ ... Einklebelänge [mm]

## 6-4.4 EINZELAUSWERTUNG DER SCHERPRÜFUNGEN

Für die Scherprüfung, welcher in Abbildung 6.10 dargestellt wird, muss zur Ermittlung der Scherfestigkeit eine nähere Betrachtung der einwirkenden Beanspruchungen erfolgen. Die aufgebrachte Prüfkraft wird über die Klebeverbindung, welche vorwiegend auf Schub beansprucht wird, in das Auflager eingeleitet. Aufgrund der gewählten Prüfkongfiguration und des beobachteten Scherversagens im Holz bzw. in der Klebefuge kann grundsätzlich eine Berechnung der maximalen Schubspannung auf Basis eines baustatischen Modells durchgeführt werden. Bei Freischneiden des Bleches außerhalb des Verbundbereiches wirkt aus Gleichgewichtsbedingungen am Schnittufer eine vertikale Reaktionskraft. Diese Reaktionskraft kann in Bezug auf das in Abb. dargestellte Koordinatensystem (in Blechebene) in eine x- und y-Komponente  $T_x$ ,  $T_y$  aufgeteilt werden. Führt man nun einen weiteren Freischnitt entlang der zwei rechten Klebefugen durch, so resultieren Schubspannungen. Zusätzlich ergibt sich aus Gleichgewichtsgründen ein Torsionsmoment, das zu Torsionsschubspannungen innerhalb der freigeschnittenen Ebenen führt. Somit besteht die zu ermittelnde maximale Schubspannung aus drei Teilen:

- Torsionsschubspannung  $\tau_{tor}$
- Schubspannung in x-Richtung  $\tau_x$  und
- Schubspannung in y-Richtung  $\tau_y$ .

Die Größe der einzelnen Spannungskomponenten wird nicht nur von der Geometrie, sondern insbesondere von den Steifigkeitsverhältnissen (Schubmoduln) der am Lastabtrag beteiligten Füge-teile bestimmt. Aufgrund der im Rahmen der Arbeit nicht durchgeführten Prüfungen am Ausgangsmaterial zur Ermittlung erforderlicher Grundkenngrößen (Klebstoff, Holz) könnte eine Ermittlung nur durch Annahme von Steifigkeitsverhältnissen erfolgen. Erschwerend, in Bezug auf eine „genauere“ Abschätzung der maximalen Schubspannung, kommt hinzu, dass infolge der vorherrschenden Spannungssituation eine Interaktionsbeziehung zwischen den Spannungskomponenten angenommen werden müsste (Holzversagen) um auf eine Schubfestigkeit bestimmen zu können. Da diese bis dato nach Kenntnisstand

der Verfasserin fehlt, wird in den weiteren Ausführungen und Darstellungen in Anlehnung an Auswertemethoden in [5] nur die Schubspannung zufolge der Last in y-Richtung angegeben.

### Schnitt

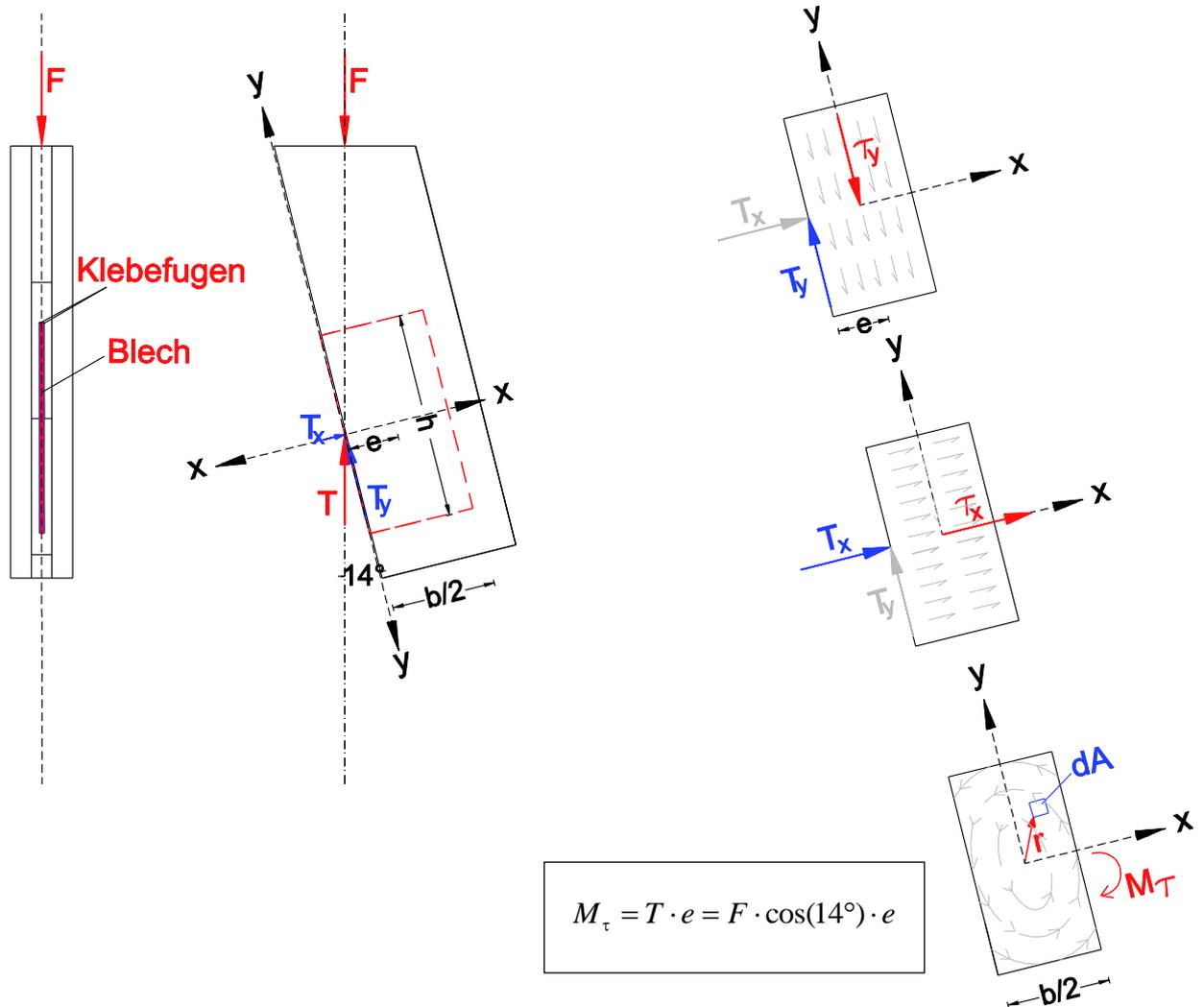


Abbildung 6.10: Scherversuch mit Torsionsmoment

Die Ermittlung der mittleren Schubspannung  $\tau_{\text{avg}, 14^{\circ}}$  aus der  $14^{\circ}$ -Scherprüfung erfolgte nach:

$$\tau_{\text{avg}, 14^{\circ}} = \frac{F \cdot \cos(14^{\circ})}{2 \cdot (h \cdot b)} \quad (6.7)$$

mit:

- b... Einklebbebreite des Bleches [mm]
- h... Höhe des eingeklebten Bleches [mm]
- F... Prüfkraft [N]

Neben den zuvor ermittelten Spannungen, wird in weiterer Folge auch der Verschiebungsmodul  $K_{\text{ser}}$  der Verbindung berechnet. Dies erfolgt in Anlehnung an die EN 408:2010 [51]. Dabei wird der Abschnitt

zwischen  $0,1F_{\max}$  und  $0,4F_{\max}$  für eine Regressionsanalyse herangezogen. Die Berechnung des Verschiebungsmodules  $K_{\text{ser}}$  erfolgte nach Gleichung (6.8)

$$K_{\text{ser}} = \frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1} \quad (6.8)$$

$K_{\text{ser}}$ ... Verschiebungsmodul der Verbindung [N/mm]

$F_2 - F_1$ ... Laststeigerung im Bereich der Last-Verformungskurve zwischen  $0,1F_{\max}$  und  $0,4F_{\max}$  [N]

$w_2 - w_1$ ... Verformungszunahme zufolge  $F_2 - F_1$  [mm]

## 6-4.5 STATISTISCHE AUSWERTUNG

[38]

Für Prüfserien mit einem Umfang größer als fünf Einzelproben erfolgte eine statistische Auswertung mittels des Computerprogramms Excel 2010. Die benötigten statistischen Kenngrößen nach [38] wurden folglich samt Gleichung beschrieben.

Der arithmetische Mittelwert wird als das Verhältnis der Summe aller Beobachtungen durch die Anzahl der Beobachtungen beschrieben.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Durch die Standardabweichung wird die Streuung metrischer Daten durch eine gemittelte Abweichung vom Mittelwert beschrieben. Dabei stellt die Standardabweichung die positive Quadratwurzel der Varianz dar und gibt somit die Streubreite um den Mittelwert an.

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

Die Varianz wird als das Quadrat der Dimension der einzelnen Beobachtungen angegeben.

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

Um die Variabilität der Verteilung zu vergleichen, wird der Variationskoeffizient eingeführt. Dieser wird als Quotient der Standardabweichung zum arithmetischen Mittelwert dargestellt.

$$COV = \frac{s}{\bar{x}}$$

Um einen schnellen Überblick über die statistische Verteilung der Daten zu erhalten, wurden die Daten gleicher Prüfserien in Form eines Boxplots zusammengefasst. Dabei wurden Streuungs- sowie Lagemaße in einer graphischen Darstellung zusammengefasst, wodurch erkennbar wurde, in welchem Bereich die Daten liegen und wie sie sich über den Bereich verteilen. Für die Prüfserien 05, 06, 07 wurden Boxplots zum Vergleich holzspezifischer und mechanischer Kenngrößen herangezogen. Die Beurteilung des Einflusses der Oberflächenbearbeitungen der Bleche auf die Tragfähigkeit erfolgt mit Hilfe von „Signifikanzbändern“, welche das 95 %-Konfidenzintervall des Medians (mit Hilfe des Statistikprogramms „R“) der jeweiligen Referenzserie abdecken. Dies entspricht einem Signifikanztest des Median, (Wilcoxon-Mann-Whitney-Test), der aufgrund der geringen Anzahl an Prüfungen je Serie ausgewählt wurde. Durch die Darstellung als „gekerbter“ Boxplot kann eine Aussage darüber gemacht werden, ob die Lage der einzelnen Verteilungen unterschiedlich ist, oder ob sich dieser Unterschied auf Grund von Zufallsschwankungen erklären lässt. Die Kerbenlänge lässt erkennen, wie sehr der Median durch die Anzahl der Prüfkörper und die Streuung der Verteilung schwanken kann. Bei Überschneidung der „Notches“ (Kerben) zwischen den Prüfserien, sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Prüfserien zu erwarten. In Abbildung 6.11 werden die Bestandteile eines Boxplots genauer beschrieben.

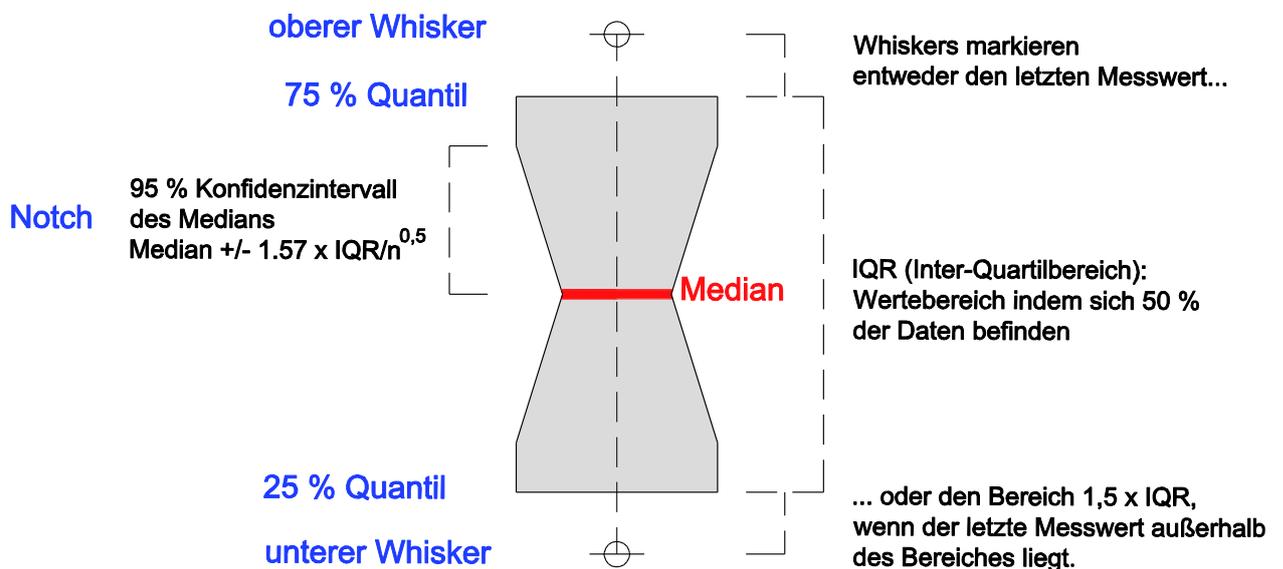


Abbildung 6.11: Beschreibung eines Boxplots

## 6-5 PRÜFSERIE 01

### 6-5.1 MATERIAL

#### 6-5.1.1 Aluminiumblech

Es wurde ein Aluminiumblech der Firma Zultner Metall GmbH der Güte AlMgSi0,5 mit einer Zugfestigkeit von  $R_m = 200 \text{ N/mm}^2$  und einer 0,2%-Dehngrenze von  $R_{p0,2} = 160 \text{ N/mm}^2$  eingesetzt. Die Aluminiumblechstreifen wurden auf die Maße  $5 \times 60 \times 225 \text{ mm}$  zugeschnitten und im Folgenden, wie in Abbildung 6.13, durch unterschiedliche Fräsungen als Kreuzhieb oder Einhieb auf eine Nettoquerschnittsdicke von  $3 \text{ mm}$  bearbeitet. Die blanken Bleche mit einer Nettoblechstärke von  $5 \text{ mm}$  mussten wegen der Oxidschicht an der Oberfläche angeraut werden. Um einen guten Klebeverbund zu gewährleisten, mussten alle Bleche vor dem Einbringen in die Prüfkörper mit Aceton gereinigt werden. Um beim Kreuzhieb eine volle Einbindung der überschrittenen Fräsung zu erhalten, wurde in Abbildung 6.12 über die Winkelfunktionen die Mindestlänge des Kreuzhiebpatterns berechnet.

$$\tan 10^\circ = \frac{2x}{b}$$

$$2x = \tan 10^\circ * b = 10,58 \text{ mm}$$

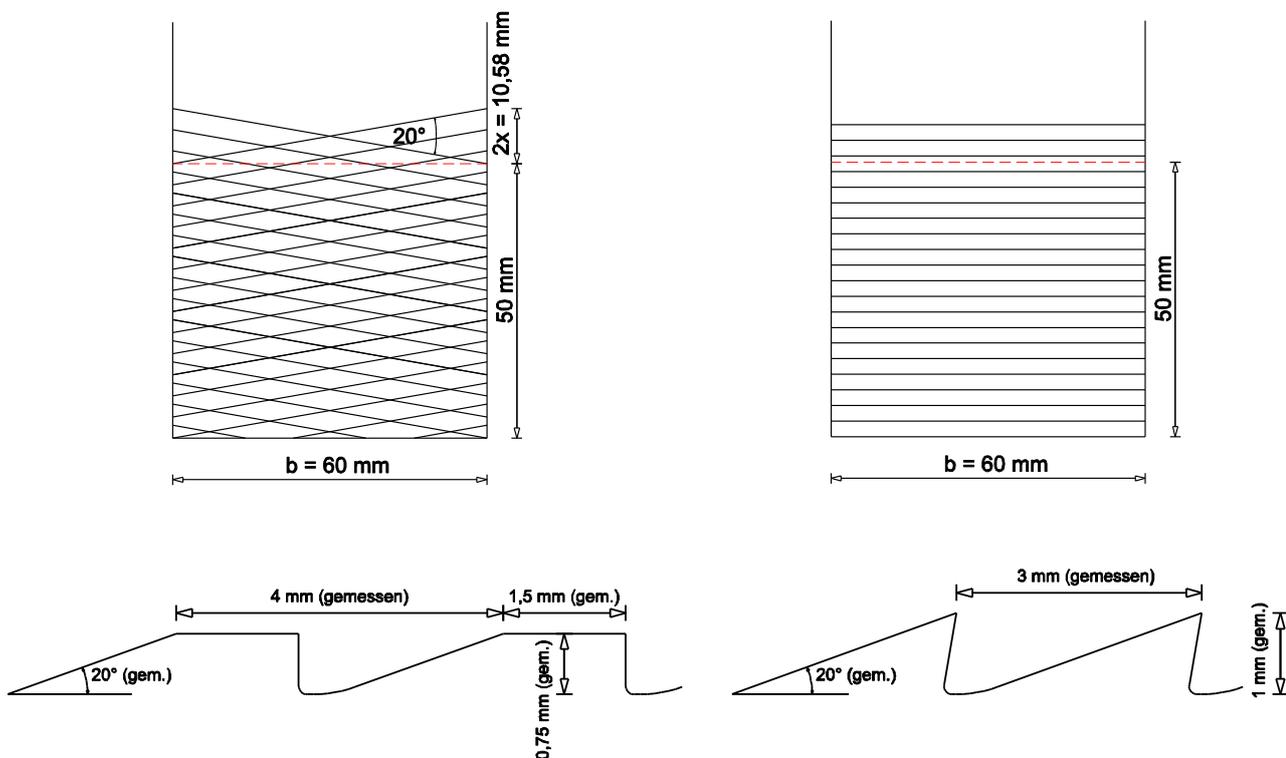


Abbildung 6.12: Geometrie Kreuzhieb (links), Einhieb(rechts)

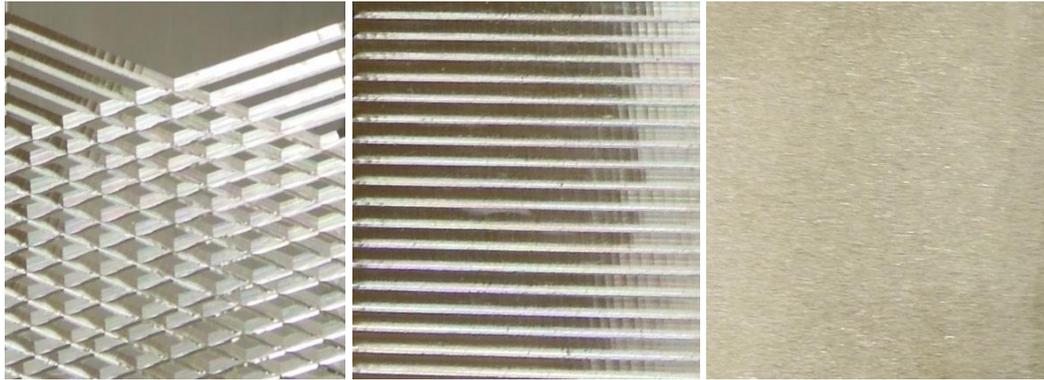


Abbildung 6.13: Oberflächenbehandlung (Kreuzhieb, Einrieb, geschliffen)

### 6-5.1.2 Holzwerkstoff

Für die Prüfsérie 01 wurden 15 Prüfkörper aus Buchenfurnierschichtholz der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG auf die Maße 60 x 60 x 345 mm zugeschnitten. Grund für die Holzwerkstoffwahl ist die höhere Festigkeit und höhere Homogenität dieses Materials im Vergleich zu Fichtenvollholz.

### 6-5.2 VERSUCHSANORDNUNG

Wie in Tabelle 6.3 zu sehen, wurden fünf Untergruppen für die Prüfsérie 01 definiert, die sich hinsichtlich der Einklebelänge des Bleches und der Quersugsicherung unterscheiden. Um einen Aluminiumbruch zu verhindern, wurde die Einklebelänge an Probenserie 3, 4, und 5 auf 50 mm reduziert. Durch die Zugbeanspruchung, welche auf das Blech wirkt, neigte das seitliche Holz dazu, sich aufzubiegen. Um dies zu verhindern, wurde im oberen Bereich des Prüfkörpers ein Bohrstabdübel als Quersugsicherung appliziert. (siehe Abbildung 6.14, links) Dabei wurde zuerst eine 7 mm Bohrung vorgebohrt und anschließend der Dübel mit einem Kerndurchmesser von 6,9 mm eingeschraubt. Eine weitere Möglichkeit ein Aufspalten zu unterbinden, ist das Aufbringen von Schellen um den Holzkörper. Bei der größeren Einklebelänge von 75 mm wurden je zwei Schellen pro Prüfkörper verwendet. Im Gegensatz dazu wurde bei 50 mm Einklebelänge nur eine Schelle angebracht.



Abbildung 6.14: Bohrstabdübel (links), Schellen (rechts)

**Tabelle 6.3: Versuchsanordnung Prüfsrie 01**

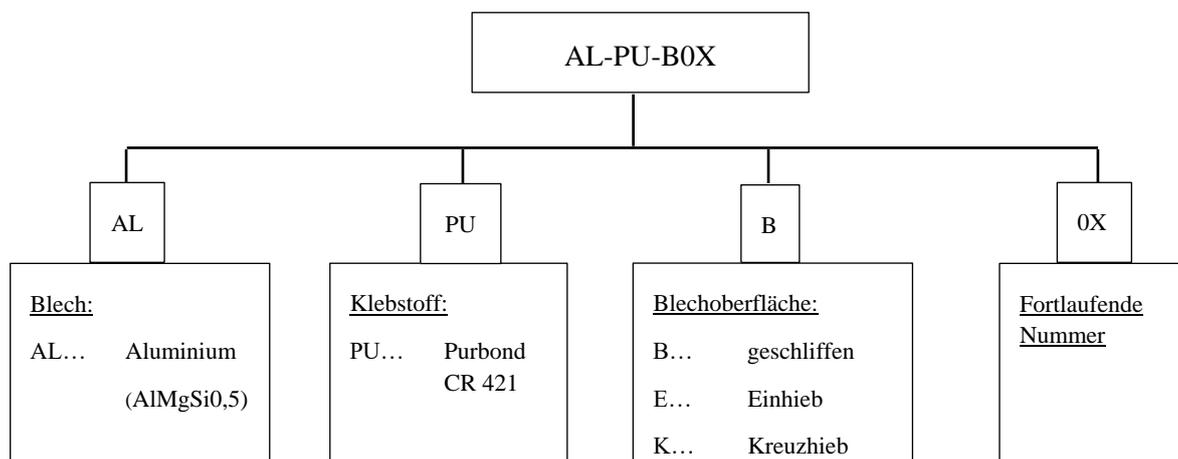
1	2	3	4	5
ohne Schellen	mit 2 Schellen	ohne Schelle	mit Schelle	mit Schraube
75 mm		50 mm		50 mm

Grundsätzlich wurden 15 Prüfkörper für die Prüfsrie 01 hergestellt. Dabei wurden je fünf Probekörper der gleichen Oberflächenbehandlung unterzogen. Diese fünf gleichen Prüfkörper wurden wiederum, wie in Tabelle 6.4 ersichtlich, nach Einklebelänge des Bleches und hinsichtlich der Quersugsicherung variiert.

**Tabelle 6.4: Prüfkörperbezeichnung Prüfsrie 01**

Prüfkörperbezeichnung	Blechwerkstoff	Oberflächenbehandlung	Klebstoff	Klebstofffugendicke [mm]	Anzahl	Aushärtezeit [Tage]
AL-PU-B0X	Aluminium	geschliffen	PU	1	5	10
AL-PU-E0X	Aluminium	Einrieb	PU	1	5	10
AL-PU-K0X	Aluminium	Kreuzrieb	PU	1	5	10
$\Sigma$ 15						

Die Prüfkörperbezeichnungen für Zugprüfungen aus Prüfsrie 01 werden im Folgenden erläutert:



### 6-5.3 PRÜFKÖRPERVORBEREITUNG

Alle Prüfkörper wurden mit der Kreissäge auf 345 mm abgelängt und danach auf einen quadratischen Querschnitt von 60 mm x 60 mm gehobelt. Die Prüfkörper wurden in einer Klimakammer bei einer Normtemperatur von 20 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 65 % gelagert. Anschließend wurden an einer Stirnfläche des Holzkörpers eine 7 mm breite und 75 mm bzw. 50 mm tiefe Sägefuge eingeschlitz, welche anschließend mittels Klebeband abgeklebt wurde, um ein späteres Auslaufen des Klebstoffes zu verhindern. Wie die Abbildung 6.15 zeigt, wurden die Prüfkörper im Anschluss mit Zwingen zu Paketen zusammengeklemt und von oben mit einem Zwei-Komponenten Polyurethan-Klebstoff der Firma

Purbond AG (Purbond CR 421) mittels einer Applikationspistole verfüllt. Die Klebefuge wies beidseitig eine Stärke von je 1 mm auf. Um spätere Lastimperfektionen durch Schiefstellung der Bleche zu verhindern, wurde besonders auf das zentrische Einbringen dieser geachtet. Dies ließ sich durch Spaltklötze, welche seitlich in die Fuge geklemmt wurden, erreichen. Da es sich bei den Prüfungen um einen „Pull-Pull“-Versuch handelte bei dem Blechmaterial eingespart werden soll, wurde anstatt eines Bleches auf der zweiten Stirnfläche des Prüfkörpers eine Verankerungsmöglichkeit durch zwei 300 mm lange Vollgewindeschrauben vorgesehen. Dafür wurden in den Holzkörpern an der gegenüberliegenden Stirnfläche zwei Bohrlöcher vorgebohrt, um danach die Schrauben mit einem Durchmesser von 10 mm einzudrehen. (Rapid Vollgewinde 10 x 300 / 288). Die Berechnung der Eindrehtiefe der Vollgewindeschrauben findet sich in Abschnitt 6-5.4.



Abbildung 6.15: Herstellen der Prüfkörper

## 6-5.4 BERECHNUNG DER SCHRAUBENEINDREHTIEFE VON VOLLGEWINDESCHRAUBEN

[48]

Um ein Versagen der Klebeverbindung zu gewährleisten, wurde die Schraubenverbindung sowie Einklebelänge bzw. Klebefläche derart ausgelegt, dass das Versagen möglichst im Bereich der Klebeverbindung eintritt. Die Abschätzung des Tragwiderstands der Schraubenverbindung ist nachfolgend beschrieben.

Blech-QS:  $5 \times 60 = 300 \text{ mm}^2$

Blech-Zugfestigkeit:  $\sigma_{Rm} = 200 \text{ MPa}$

$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow F = 200 \times 300 = 60.000 \text{ N}$  → 2 x Ø10 Schrauben müssen je 30 kN aufnehmen

Ø10 Gruppe E → Zugtragfähigkeit pro Schraube 40 kN > 30 kN

$$k_{ax} = 0,3 + \frac{0,7 \cdot \alpha^2}{45} = 1,7 \quad \text{mit:} \quad \alpha = 90^\circ$$

$$f_{ax,k,\alpha} = k_{ax} \cdot f_{ax,k,90^\circ} = 1,7 \cdot 12,5 = 21,25 \text{ N/mm}^2 \dots \text{Ausziehparameter}$$

$$F_{ax,\alpha,d} = f_{ax,k,\alpha} \cdot d \cdot l_{ef}$$

$$30000 \text{ N} = 21,25 \cdot 10 \cdot l_{ef} \quad \rightarrow \quad l_{ef} = 141 \text{ mm} \dots \text{Eindrehtiefe}$$

**Tabelle A6.8 Charakteristische Tragfähigkeiten für Schmid Schrauben RAPID®, STARDRIVE und SP für Produkteigenschaften Gruppe E; Schraubendurchmesser 8 bis 12 mm**

Produkteigenschaften: Gruppe E			Schraubendurchmesser		
Produkteigenschaft			8	10	12
Max. Länge	$l_{max}$	mm	1000	1000	1000
Charakteristische Zugtragfähigkeit	$f_{tens,k}$	kN	24,1	40,0	46,7
Charakteristisches Fließmoment	$M_{y,k}$	Nm	20,3	36,7	48,5
Charakteristischer Ausziehparameter Winkel zwischen Schraubenachse und Fasern: 90° ( $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ )	$f_{ax,k,90^\circ}$	N/mm <sup>2</sup>	13,1	12,5	11,2
Charakteristische Fließgrenze	$f_{yk}$	N/mm <sup>2</sup>	950		
Charakteristische Torsionsfestigkeit	$f_{or,k}$	Nm	25,8	55,0	77,1
Einschraubdrehmoment ( $\rho_k = 450 \text{ kg/m}^3$ )	$R_{tor,m,HT}$	Nm	8,7	15,6	27,9
Verschiebungsmodul	$K_{sif}$	N/mm	see A.6.4		

Abbildung 6.16: Auszug aus der Schraubenzulassung ETA-12/0373, [48]

## 6-5.5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Prüfserie 01 wurde als „Pull-Pull“-Versuch mit einseitig eingeklebtem Blech durchgeführt. Die Prüfkörper wurden vertikal in der Prüfmaschine zwischen die hydraulischen Klemmbacken positioniert. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die zentrische Positionierung der Flachkörper zwischen den Klemmbacken gelegt, da diese breiter sind als die Klemmvorrichtung. An der Unterseite wurden die zwei eingeschraubten Vollgewindeschrauben in die Maschine eingehängt. Um ein Aufspalten des Holzes durch diese Schrauben zu unterbinden, wurden Zwingen an der Unterseite des Holzkörpers montiert. Die Kraftaufbringung erfolgte ohne Hysterese mit Wegsteuerung. Der Klemmdruck betrug 3 MPa. Es wurde eine Vorkraft von 200 N aufgebracht. Die Prüfungsgeschwindigkeiten wurden so festgelegt, dass ein Versagen des Prüfkörpers innerhalb von 300 sec auftreten konnte. Sie wurden mit 0,4 mm/min und 0,7 mm/min je nach Probekörper angepasst. Alle Prüfkörper wurden bis zum Bruch belastet.

## 6-5.6 AUSWERTUNG

Die mittlere Rohdichte der Prüfkörper aus Buchenfurnierschichtholz der Prüfserie 01 betrug 785,6 kg/m<sup>3</sup>, die mittlere Holzfeuchte betrug 8,1 %. Die Prüfserie 01 sollte Aufschluss über den Einfluss der

Einklebelänge, der Profilierung und die Verwendung mit/ohne Aufspaltsicherung geben. Hierbei sei noch erwähnt, dass es sich für die Prüfsreihe 01 um Einzelversuche handelt.

### 6-5.6.1 Tragfähigkeit

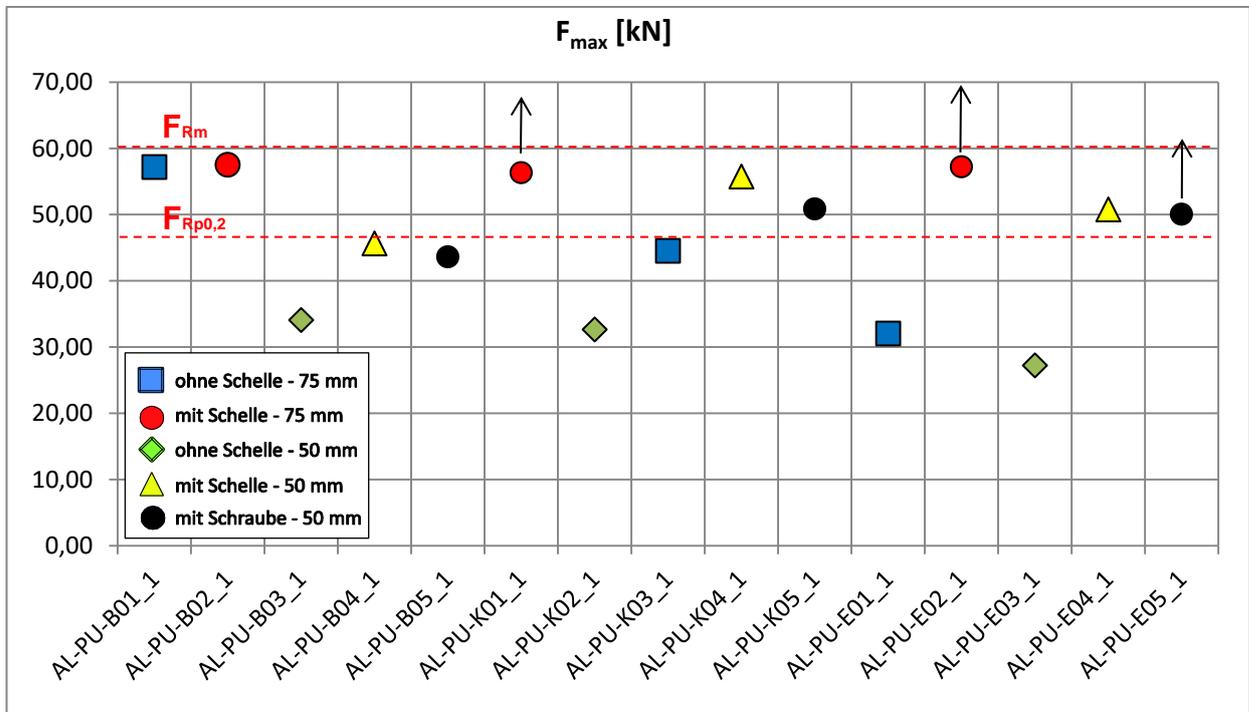


Abbildung 6.17: maximale Tragfähigkeiten, Prüfsreihe 01

Der niedrigste Wert von 27,26 kN wurde bei kurzer Einklebelänge ohne Aufspaltsicherung und mit Einrieb-Profilierung erreicht (AL-PU-E03\_1). Das Anbringen der Schelle wirkte sich positiv auf die Tragfähigkeit der Prüfkörper aus, da dadurch das Entstehen der Klebstoffscherkeile unterbunden wurde (siehe Abbildung 6.21). Eine Aufspaltsicherung durch Schrauben bewirkte eine deutliche Laststeigerung. Durch die größere Einklebelänge von 75 mm wurde bei profilierten Prüfkörpern ohne Aufspaltsicherung eine Verschlechterung des Tragverhaltens beobachtet (AL-PU-K03\_1, AL-PU-E03\_1). Durch Anbringen der zwei Schellen wurde jedoch bei profilierten Prüfkörpern eine Laststeigerung über die Zugtragfähigkeit des Aluminiums erreicht (AL-PU-K01\_1, AL-PU-E02\_1).

### 6-5.6.2 Vergleich der Aluminiumoberflächen

Im Folgenden wird auf den Einfluss der unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten der Flachkörper näher eingegangen. Dabei wurden nur jene Prüfkörper mit gleicher Einklebelänge verglichen. Eine weitere Unterscheidung findet hinsichtlich der Aufspaltsicherung statt. Als Referenzkraft wurde jeweils das geschliffene Blech der einzelnen Serien herangezogen. Des Weiteren finden sich für jeden Prüfkörper die Bruchbilder für den Holzwerkstoff sowie für das Blech.

Tabelle 6.5: Vergleich der Tragfähigkeiten „ohne Schelle –kurz“

Parameter	B		E		K	
Oberfläche	geschliffen		Einrieb		Kreuzzieb	
$F_{\max}$ [kN]	34,90		27,26		32,66	
$F_{\max}/F_{\max,ref}$	1,00		0,78		0,94	
<b>Holz</b> (FSH Buche)						
<b>Blech</b> (Aluminium)						

Bei der Serie „ohne Schelle, kurz“ ist eine Verschlechterung der Tragfähigkeit durch die Oberflächenprofilierung zu vermerken, was auf die Aufspaltwirkung durch das „Ausdrehen“ der Klebstoffkeile (siehe Abbildung 6.21) zurückzuführen ist.

Tabelle 6.6: Vergleich der Tragfähigkeiten „ohne Schelle –lang“

Parameter	B		E		K	
Oberfläche	geschliffen		Einrieb		Kreuzzieb	
$F_{\max}$ [kN]	57,19		32,04		44,53	
$F_{\max}/F_{\max,ref}$	1,00		0,56		0,78	
<b>Holz</b> (FSH Buche)						
<b>Blech</b> (Aluminium)						

Es ist zu vermuten, dass bei größeren Einklebelängen die Profilierung einen größeren Einfluss auf die Tragfähigkeit hat. Dies müsste aufgrund des geringen Prüfumfanges (Einzelwertvergleiche) mit weiteren Prüfungen näher untersucht werden.

*Tabelle 6.7: Vergleich der Tragfähigkeiten „mit Schelle –kurz“*

Parameter	B		E		K	
<b>Oberfläche</b>	geschliffen		Einrieb		Kreuzrieb	
<b>F<sub>max</sub>[kN]</b>	45,66		50,80		55,77	
<b>F<sub>max</sub>/F<sub>max,ref</sub></b>	1,00		1,11		1,22	
<b>Holz</b> (FSH Buche)						
<b>Blech</b> (Aluminium)						

Durch das Verhindern der Aufspaltwirkung mittels Schelle wirkten sich die Profilierungen der Bleche positiv auf die Tragfähigkeit aus, wodurch sich ein Anstieg der Kraft auf bis zu 22 % vermerken ließ.

*Tabelle 6.8: Vergleich der Tragfähigkeiten „mit Schelle –lang“*

Parameter	B		E		K	
<b>Oberfläche</b>	geschliffen		Einrieb		Kreuzrieb	
<b>F<sub>max</sub>[kN]</b>	57,52		57,21		56,32	
<b>F<sub>max</sub>/F<sub>max,ref</sub></b>	1,00		0,99 (Blechbruch)		0,98 (Blechbruch)	
<b>Holz</b> (FSH Buche)						
<b>Blech</b> (Aluminium)						

Bei den größeren Einklebelängen wurden zwei Schellen angebracht, die das Aufspalten des Holzes verhindern sollten. Dadurch wurde die Zugtragfähigkeit im Aluminiumblech überschritten und es kam in der Folge zum Netto-Querschnittsbruch des Flachkörpers. Durch Verwendung höherer Festigkeiten der Bleche ließe sich bei Prüfkörpern mit profilierten Blechen eine weitere Steigerung der Tragfähigkeit erzielen.

Tabelle 6.9: Vergleich der Tragfähigkeiten „mit Schraube –kurz“

Parameter	B	E	K
Oberfläche	geschliffen	Einrieb	Kreuzrieb
$F_{\max}$ [kN]	43,62	50,04	50,85
$F_{\max}/F_{\max,ref}$	1,00	1,15 (Blechbruch)	1,17
Holz (FSH Buche)			
Blech (Aluminium)			

Erfolgte die Aufspaltsicherung durch Schrauben, war ein Anstieg der Maximalkraft bei profilierten Blechen, insbesondere beim Einrieb, zu erkennen. Durch einen Nettobruck im Aluminium, wie es beim Einrieb der Fall war, wären noch höhere Maximallasten möglich.

### 6-5.6.3 Spannungen

#### Zugnormalspannungen im Holz

Die Ausnützung im Bruttoquerschnitt des Holzes errechnete sich unter Berücksichtigung des charakteristischen Wertes der Zugfestigkeit von  $f_{t,0,k} = 70 \text{ N/mm}^2$  für BauBuche S. Bei Zugbelastung bewegte sich der Ausnutzungsgrad des Holzes zwischen 9% - 19%. Auf Grund der erhaltenen Daten in Abbildung 6.18 konnte die Zugnormalspannung im Holz vernachlässigt werden.

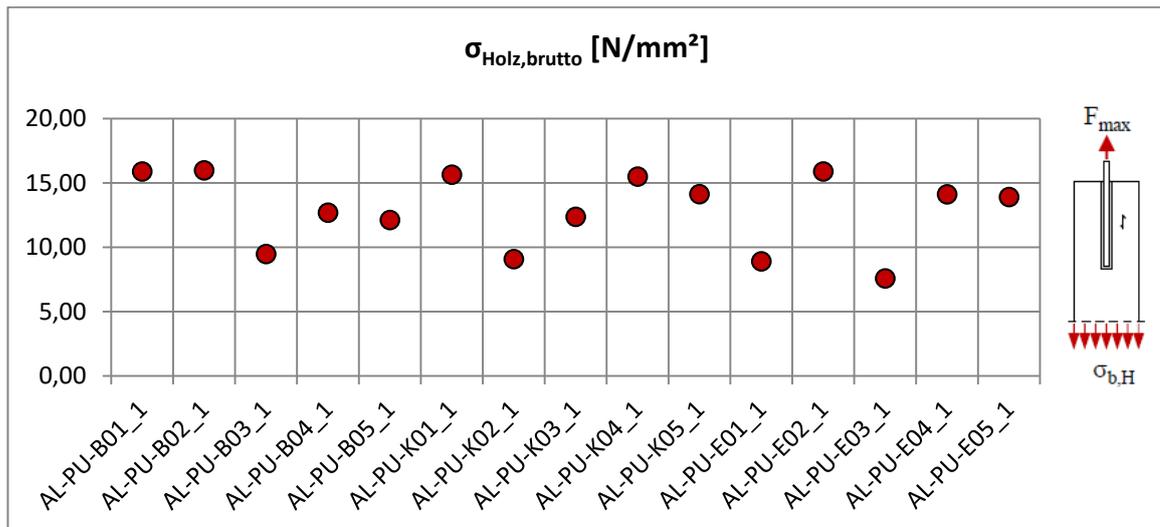


Abbildung 6.18: Normalspannungen im Holzquerschnitt (brutto), Prüfserie 01

### Zugnormalspannungen im Aluminium

Im Folgenden wurden die Normalspannungen im Bruttoquerschnitt des Aluminiums dargestellt. In Abbildung 6.19 wurden die Streckgrenze bei 160 N/mm<sup>2</sup> und die Zugfestigkeit mit 200 N/mm<sup>2</sup> eingezeichnet. Wie aus der Abbildung 6.19 ersichtlich, kam es bei drei Prüfkörpern, mittels Pfeil dargestellt, zum Aluminiumbruch, die nahe der Zugfestigkeit des Aluminiumbleches lagen. Durch die Schwächung des Aluminiumquerschnittes bei den Oberflächenbearbeitungen liegen die tatsächlichen Spannungen deutlich über den Spannungen der Bruttoquerschnitte.

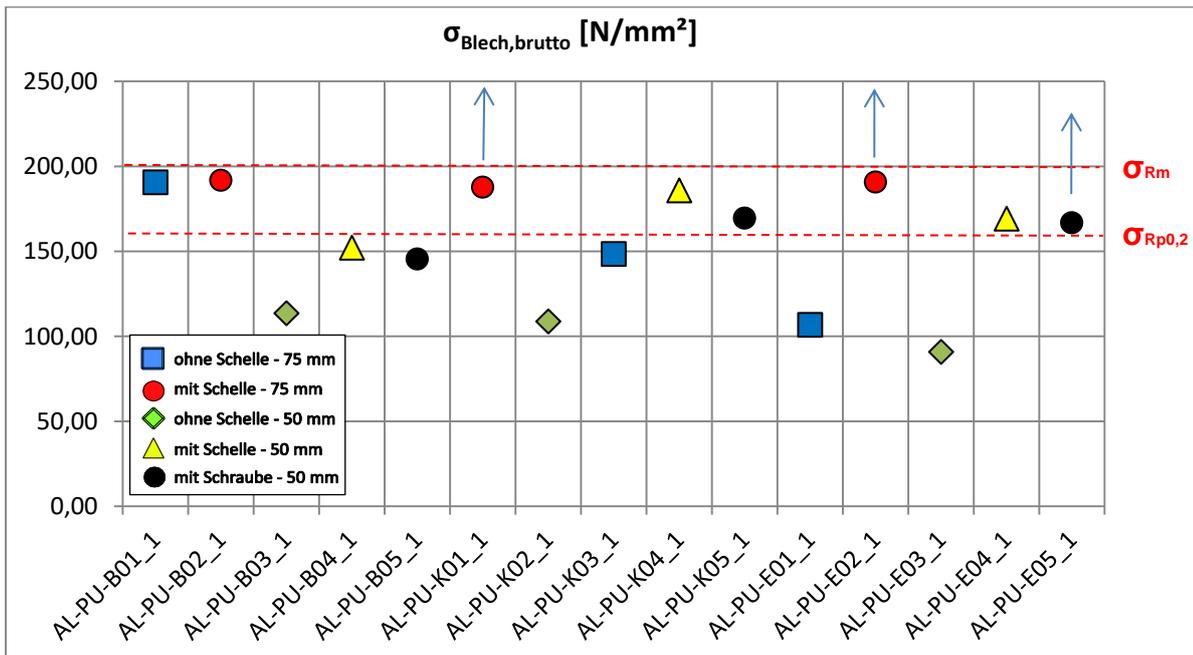


Abbildung 6.19: Normalspannungen im Aluminiumquerschnitt (brutto), Prüferie 01

### Schubspannungen in der Klebefläche

Die Schubspannungen wurden mit der Gleichung (6.6) aus Abschnitt 6-4.3 berechnet. In Abbildung 6.20 lagen die Schubspannungswerte zwischen 3,56 N/mm<sup>2</sup> - 9,29 N/mm<sup>2</sup>. Die analytisch berechneten Werte wichen nur geringfügig von jenen der Prüfungen ab. Das zeigt, dass die analytische Berechnung ihre Berechtigung zur Vorabschätzung hat. Die charakteristische Scherfestigkeit von Buchenurnierschichtholz wurde mit 9,0 N/mm<sup>2</sup> nur einmal überschritten. Dennoch befanden sich Holzfasern an den Flachkörpern. Teilweise versagten manche Prüfkörper auch im Holz neben der Klebefuge. (siehe Bruchbilder im Anhang B)

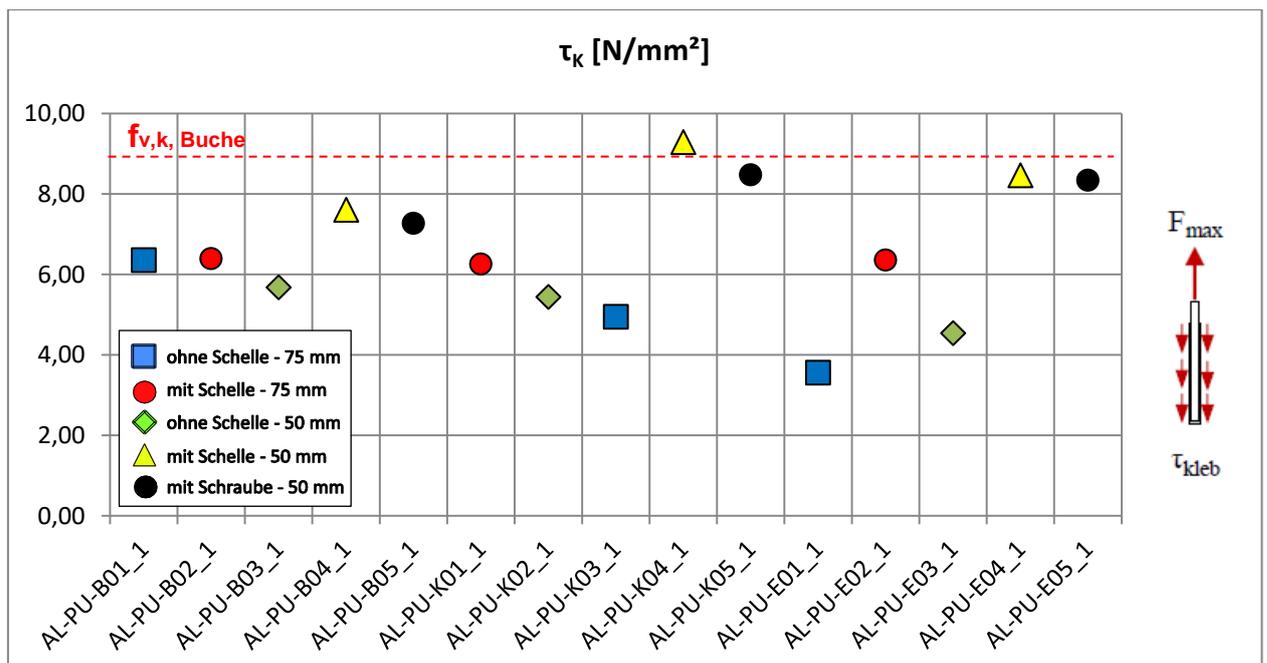


Abbildung 6.20: Scherspannungen in der Klebeschicht, Prüfsrie 01

## 6-5.7 SCHLUSSFOLGERUNG PRÜFSRIE 01

### Einfluss der Einklebelänge

Durch die Steigerung der Einklebelänge von 50 mm auf 75 mm wurde die Tragfähigkeit der Verbindung um bis zu 60 % erhöht. Des Weiteren ist in Abbildung 6.20 auch zu erkennen, dass durch die Vergrößerung der Einklebelänge die Schubspannungen kleiner wurden.

### Einfluss der Profilierung

Die Oberflächenprofilierung alleine beeinflusste die Leistungsfähigkeit der Prüfkörper ohne Quersugsicherung negativ, da eine Keilwirkung durch Scherbrüche im Klebstoff entstand. (Abbildung 6.21) Um dies zu unterbinden, wurden Schellen angebracht, wodurch in Kombination mit diesen sehr wohl eine Laststeigerung möglich war. Um die Keilwirkung in den folgenden Versuchen möglichst zu vermeiden, wurde die Profiltiefe in den folgenden Prüfungen von 1,0 mm auf 0,5 mm reduziert.

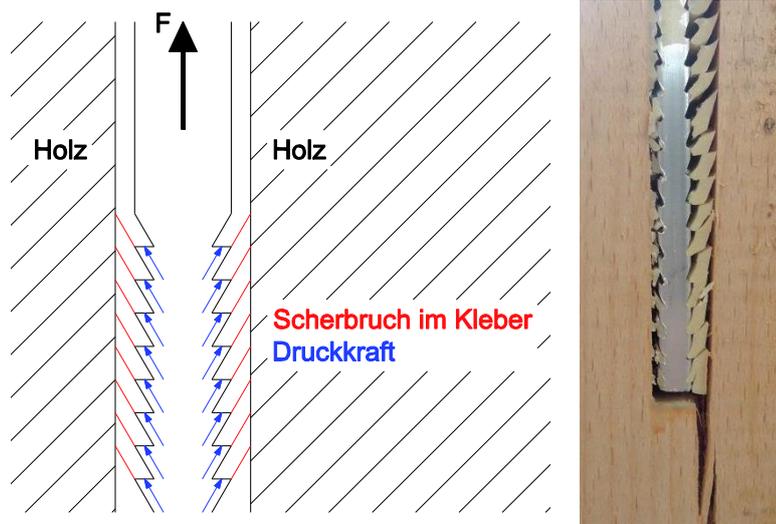


Abbildung 6.21: Ausdrehen der Klebstoffkeile

### Einfluss des Flachkörpermaterials

Die Versuche wurden mit einem Aluminiumblech geringerer Festigkeit durchgeführt. Dies führte bei den Versuchen mit Schellen und Profilierung bei langer Einklebelänge teilweise zum Überschreiten der Zugfestigkeit des Aluminiumbleches und somit zum Nettoquerschnittsbruch. Dem konnte in den folgenden Prüfreihen mit einem größeren Nettoquerschnitt der Bleche entgegengewirkt werden (Verringerung der Profiltiefe). Eine weitere Möglichkeit einen Blechbruch zu verhindern, bestand in der Verwendung höherwertiger Aluminiumlegierungen oder der Verwendung von Stahlblechen.

### Einfluss der Quersugsicherung

Durch die Quersugsicherung mittels Schellen oder Schrauben wurde die Traglast bei Prüfkörpern mit profilierten Blechen gesteigert, da durch die Klebstoffkeile ein Aufbiegen des Holzes verhindert wurde. Dies führte in einigen Fällen sogar bis zum Aluminiumbruch, wodurch eine weitere Laststeigerung bei Erhöhen des Nettoquerschnittes oder unter Verwendung von Blechen mit höherer Festigkeit möglich wäre.

### Spaltverhalten des Holzes bei profilierten Blechen

[15]

Die axiale Zugkraft im Blech verursachte rechtwinklig zur Beanspruchungsrichtung auftretende Kräfte, die zu einer Aufspaltwirkung des Holzes führten. Durch das Aufspalten wurde der Verbund zwischen den Komponenten Blech-Klebstoff-Holz geschwächt, was zu einer deutlichen Ausziehtragfähigkeitsabnahme führte. Folglich war eine Aufspaltsicherung aus Bohrstabdübeln zur Erreichung einer hohen Tragfähigkeit unabdingbar.

## 6-6 PRÜSERIE 02

### 6-6.1 MATERIAL

#### 6-6.1.1 Blech

Als Blech wurde ein hochlegierter Stahl der Güte S 760 MC eingesetzt. Mittels einer Stahlbandsäge wurde das Blech abgelängt und auf die Maße 5 x 60 x 225 mm zugeschnitten. Um eine Dübelwirkung des Klebstoffes zu erzielen, wurden in das Stahlblech drei Langlöcher mit einer Lochbreite von 8 mm eingefräst. Vor dem Einkleben des Purbond CR 421 wurde das Blech mit Schleifpapier angeraut und anschließend mit Aceton gereinigt, um Schmutzreste zu entfernen und so die Haftfähigkeit des Klebstoffes zu verbessern.



Abbildung 6.22: Stahlblech Prüferserie 02

#### 6-6.1.2 Holzwerkstoff

Für diese Prüfung wurde ein Prüfkörper aus Buchenfurnierschichtholz auf die Maße 60 x 60 x 345 mm zugeschnitten. In den Holzkörper wurde ein 7 mm breiter und 75 mm tiefer Schlitz entlang der gesamten Holzbreite eingefräst.

### 6-6.2 PROBENVORBEREITUNG

Nach dem Ablängen des Furnierprüfkörpers wurde der Prüfkörper in der Klimakammer bei 20° und 65% Luftfeuchtigkeit bis zur Erreichung der Holzgleichsfeuchte gelagert. Anschließend wurde die an der Stirnfläche des Holzkörpers befindliche Fuge mittels Klebeband abgeklebt. Der Prüfkörper wurde anschließend mit PU 421 CR mittels einer Applikationspistole von oben verfüllt. Auch hier wurden, wie bei Prüferserie 01, anstatt eines zweiten Bleches auf der gegenüberliegenden Seite, zwei Bohrlöcher für die 300 mm langen Vollgewindeschrauben gebohrt.

### 6-6.3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Prüferserie 02 wurde als „Pull-Pull“-Konfiguration mit einseitig eingeklebtem Stahlblech durchgeführt. Dabei wurden als Gegenverankerung zwei 300 mm lange Vollgewindeschrauben 140 mm in den Holzkörper eingedreht. Im Gegensatz zur Prüferserie 01 wurde hier das obere Stahlblech nicht mittels hydraulischer Klemmbacken gehalten, sondern durch einen Bolzen, der wie in Abbildung 6.22 durch ein Loch des Flachkörpers geschoben wurde. Dieser Vorversuch wurde ohne zusätzliche Aufspaltsicherung bzw. ohne Zwingen durchgeführt. Die Prüfungsgeschwindigkeit wurde auf 1 mm/min eingestellt. Die Vorkraft betrug 200 N.

## 6-6.4 AUSWERTUNG

Durch Perforieren des Flachkörpers sollte in dieser Prüfung der Unterschied zur Prüfserie 01 hinsichtlich der Tragfähigkeit gefunden werden. Als Referenzprüfung kann der Prüfkörper mit 75 mm Einklebelänge, geschliffen und ohne Quersugsicherung aus Prüfserie 01 herangezogen werden, welche eine Traglast von 57,19 kN erreichte.

Der perforierte Prüfkörper der Prüfserie 02 erreichte eine Maximallast von 61,05 kN und liegt mit 7% leicht über der Referenzprüfung. Dadurch, dass keine Schellen oder Zwingen aufgebracht wurden, konnte sich das seitliche Holz ungehindert aufbiegen, wodurch es unter dem eingeklebten Blech zu einem Quersugsversagen des Holzkörpers kam. Der Prüfkörper versagte auf einer Seite durch Abscheren der Klebstoffdübel in den Langlöchern. Die gegenüberliegende Seite versagte nahe der Klebefuge im Holz. (siehe Abbildung 6.23)



*Abbildung 6.23: Bruchbilder Prüfserie 02*

### 6-6.4.1 Spannungen

#### Zugnormalspannungen im Holz

Im Bruttoquerschnitt des Holzes erreichte die Normalspannung bei Zugbelastung einen Wert von 16,96 N/mm<sup>2</sup>. Unter Berücksichtigung des charakteristischen Wertes für BauBuche von  $f_{t,0,k} = 70$  N/mm<sup>2</sup> erfolgte eine Ausnützung der Zugfestigkeit von 24 %.

#### Zugnormalspannungen im Stahl

Im Stahlquerschnitt erreichten die Bruttonormalspannungen einen Maximalwert von 203,5 N/mm<sup>2</sup>. Da diese Stahlgüte durch eine Fließgrenze von 760 N/mm<sup>2</sup> gekennzeichnet ist, lag die Maximalspannung weit darunter, wodurch ein Fließen des Stahls sowie ein Stahlbruch ausgeschlossen werden konnte.

#### Schubspannungen in der Klebefläche

Die Schubspannungen in der Klebefuge erreichten einen Wert von 6,78 N/mm<sup>2</sup>. Obwohl die charakteristische Schubfestigkeit der BauBuche von 9 N/mm<sup>2</sup> nicht überschritten wurde, zeigte sich in Abbildung 6.23 links an einer Flachkörperseite ein Scherbruch des Holzes nahe der Klebefuge.

### 6-6.5 SCHLUSSFOLGERUNG PRÜFSERIE 02

Eine Steigerung der Tragfähigkeit lässt auf die Perforierung durch Langlöcher schließen.

## 6-7 PRÜSERIE 03 (PULL-PULL)

### 6-7.1 MATERIAL

#### 6-7.1.1 Blech

- **Aluminium**

Um den Aluminiumbrüchen aus der Vorversuchsreihe 01 entgegenzuwirken, wurde ein Aluminium höherer Festigkeit eingesetzt. Es wurden Aluminiumtafeln der Firma Zultner Metall GmbH mit der Güte AlZnMgCu1,5 auf Streifengrößen von 5 x 60 x 330 mm zugeschnitten. Das Aluminium besitzt laut Angaben des Herstellers eine Zugfestigkeit von  $R_m = 540 \text{ N/mm}^2$  und einer 0,2%-Dehngrenze von  $R_{p0,2} = 485 \text{ N/mm}^2$ , was nahezu einer Verdreifachung der Festigkeitswerte im Vergleich zum Aluminium aus Prüfserie 01 entspricht. Die Blechstreifen wurden teilweise mit unterschiedlichen Fräsungen (Einrieb, Kreuzhieb) von 0,5 mm Tiefe auf eine Nettoquerschnittsbreite von 4 mm bearbeitet und lagen somit über jenen von Prüfserie 01 (3 mm). Durch die feinere Profilierung sollte einer Aufspaltwirkung durch die sich aufdrehenden Klebstoffkeile entgegengewirkt werden. Außerdem wurden zusätzliche Flachkörper mit Perforierungen durch Rundlöcher ( $\varnothing 8 \text{ mm}$ ) und Langlöcher gefertigt, um die Dübelwirkung des Klebstoffes zu untersuchen.

- **Stahl**

Für die Prüfserie 03 wurden neben Aluminiumblechen auch Stahlbleche der Güte S 760 MC eingesetzt. Die Stahlblechstreifen wurden mit den fertigen Abmessungen 5 x 60 x 330 mm und den Rundloch- bzw. Langlochperforierungen über die Firma Zultner bestellt. In Tabelle 6.10 sind die Festigkeitswerte der verwendeten Bleche laut Angaben des Herstellers aufgelistet.

*Tabelle 6.10: Blechmaterial Prüfserie 03*

Werkstoff	Bezeichnung	0,2 %-Dehngrenze	Zugfestigkeit
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Aluminium	AlZnMgCu1,5	485	540
Stahl	S760 MC	760	850

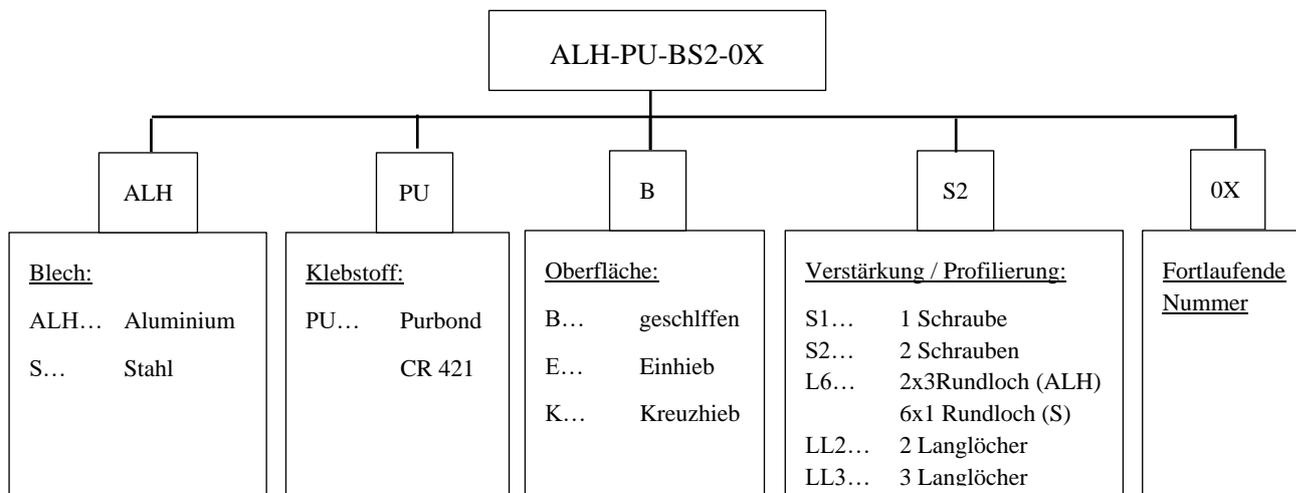
#### 6-7.1.2 Holzwerkstoff

Als Holzwerkstoff wurde Buchenfurnierschichtholz eingesetzt. Die zu prüfenden Körper haben Abmessungen von 60 x 60 x 400 mm.

### 6-7.2 VERSUCHSANORDNUNG

Es wurden zehn Prüfserien für Aluminiumbleche und drei Serien für Stahlbleche entwickelt von denen jeder einer anderen Oberflächenbehandlung und / oder Perforierung durch Rundlöcher oder Langlöcher unterzogen wurde. Dabei variierte die Anzahl der Prüfkörper je nach Prüfserie zwischen 1 und 5. Alle Versuchskörper wurden mit dem Klebstoff Purbond CR 421 und einer 1 mm dicken Klebefuge gefertigt. Ebenso war die Einklebelänge mit 100 mm bei allen Prüfkörpern ident. Einige Prüfserien wurden mit einem oder zwei Bohrstabdübel der Firma Schmid mit ( $\varnothing 7 \text{ mm}$ ) gegen Aufspalten des Holzes gesichert. In Tabelle 6.11 sind die Prüfserien mit ihren Bezeichnungen aufgelistet.

Die Prüfkörperbezeichnungen für Zugprüfungen aus Prüferserie 03 und Prüferserie 04 werden im Folgenden erläutert:



**Tabelle 6.11: Prüfkörperbezeichnung Prüferserie 03**

Prüfkörperbezeichnung	Blech	Oberflächenbehandlung	Klebstoff	Klebstoffdicke [mm]	Anzahl	Aushärtezeit [Tage]
<b>ALH-PU-B-0X</b>	Alu	geschliffen	PU	1	2	10 (11)*
<b>ALH-PU-BS2-0X</b>	Alu	geschliffen	PU	1	3	10 (11)*
<b>ALH-PU-E-0X</b>	Alu	Einhieb	PU	1	1	10 (11)*
<b>ALH-PU-K-0X</b>	Alu	Kreuzhieb	PU	1	2	10 (11)*
<b>ALH-PU-KLL2-0X</b>	Alu	Kreuzhieb	PU	1	1	10 (11)*
<b>ALH-PU-KS1-0X</b>	Alu	Kreuzhieb	PU	1	1	10 (11)*
<b>ALH-PU-KS2-0X</b>	Alu	Kreuzhieb	PU	1	2	10 (11)*
<b>ALH-PU-L6-0X</b>	Alu	geschliffen	PU	1	3	10 (11)*
<b>ALH-PU-L62S-0X</b>	Alu	geschliffen	PU	1	2	10 (11)*
<b>ALH-PU-LL2S-0X</b>	Alu	geschliffen	PU	1	1	10 (11)*
<b>S-PU-L6-0X</b>	Stahl	geschliffen	PU	1	5	10 (11)*
<b>S-PU-L9-0X</b>	Stahl	geschliffen	PU	1	5	10 (11)*
<b>S-PU-LL3-0X</b>	Stahl	geschliffen	PU	1	1	10 (11)*

**Σ 29**

\* Die Klammerwerte beziehen sich auf die zuerst eingeklebte Seite

In Abbildung 6.24 oben sind Geometrieverhältnisse der Prüfkörper mit Perforierungen dargestellt.

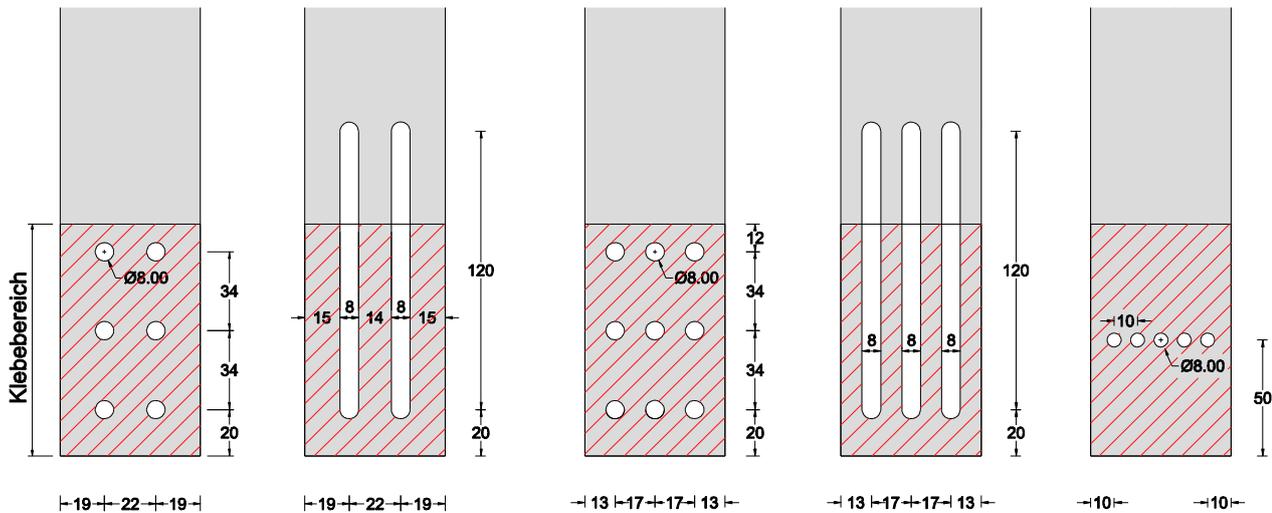


Abbildung 6.24: Oberflächenbehandlungen und Perforierung der Bleche, Prüfsreihe 03

## 6-7.3 PROBENVORBEREITUNG

Die Prüfkörper wurden mit der Kreissäge auf eine Länge von 400 mm abgelängt und auf einen Querschnitt von 60 x 60 mm gehobelt. Nach dem Lagern in der Klimakammer wurden die Holzkörper beidseitig auf eine Länge von 100 mm und eine Schlitzbreite von 7 mm gefräst. Anschließend wurden die Holzkörper paketweise mit Zwingen zusammengespannt. Nach Abkleben mit dem Klebeband wurden die Schlitzlöcher der Holzkörper mit Purbond CR 421 von oben gefüllt und die Flachkörper eingesetzt. Nach einer Aushärtezeit von einem Tag wurden an der gegenüberliegenden Seite die Bleche eingeklebt. Nach einer Aushärtezeit von weiteren 10 Tagen erreichte der Klebstoff laut Datenblatt seinen vollen Aushärtungsgrad und die Probekörper können geprüft werden.

## 6-7.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Prüfsreihe 03 wurde als „Pull-Pull“-Versuch mit beidseitig eingeklebten Blechen durchgeführt. Dabei wurden die Prüfkörper vertikal und zentrisch in die Prüfmaschine zwischen die hydraulischen Klemmbanken positioniert. Die Klemmbanken wirkten mit einem Klemmdruck von 3 MPa. Um eine gleichmäßige Belastung auf den Prüfkörper aufzubringen, wurde eine Vorkraft von 200 N aufgebracht. Die Prüfgeschwindigkeit wurde mit 1 mm/min festgelegt, um in der Zeitspanne von 300 sec einen Bruch erwarten zu können. Um ein plastisches Verhalten der Bleche auszuschließen, wurde nur bis zur 0,2%-Streckgrenze des Blechmaterials belastet.

## 6-7.5 AUSWERTUNG

Die mittlere Rohdichte der Prüfkörper aus Buchenfurnierschichtholz der Prüfsreihe 03 betrug 807,3 kg/m<sup>3</sup>, die mittlere Holzfeuchte betrug 6,4 %. Die Prüfsreihe 03 soll Aufschluss über

- den Einfluss der Reduzierung der Profilierungstiefe,
- das Verwenden unterschiedlicher Blechmaterialien,
- der Anordnung von Aufspaltsicherungen (Bohrstabdübel)
- sowie der Perforierung von Blechen geben.

### 6-7.5.1 Tragfähigkeit

Unter der Tragfähigkeit der Verbindung wurde die Maximalkraft verstanden, die bei der Prüfung erreicht und aufgezeichnet wurde. Die Streckgrenze der Aluminiumbleche erreichte einen Wert von 107 kN und eine Zugfestigkeit von 119 kN. Die Stahlbleche könnten bis zu einer Streckgrenze von 137 kN und einer Zugfestigkeit von 153 kN belastet werden. Dabei überschritten beide Probekörper der Serie ALH-PU-KS2 die Streckgrenze des Aluminiumbleches von 107 kN, wodurch sich ein Nettoquerschnittsbruch im Blech einstellte.

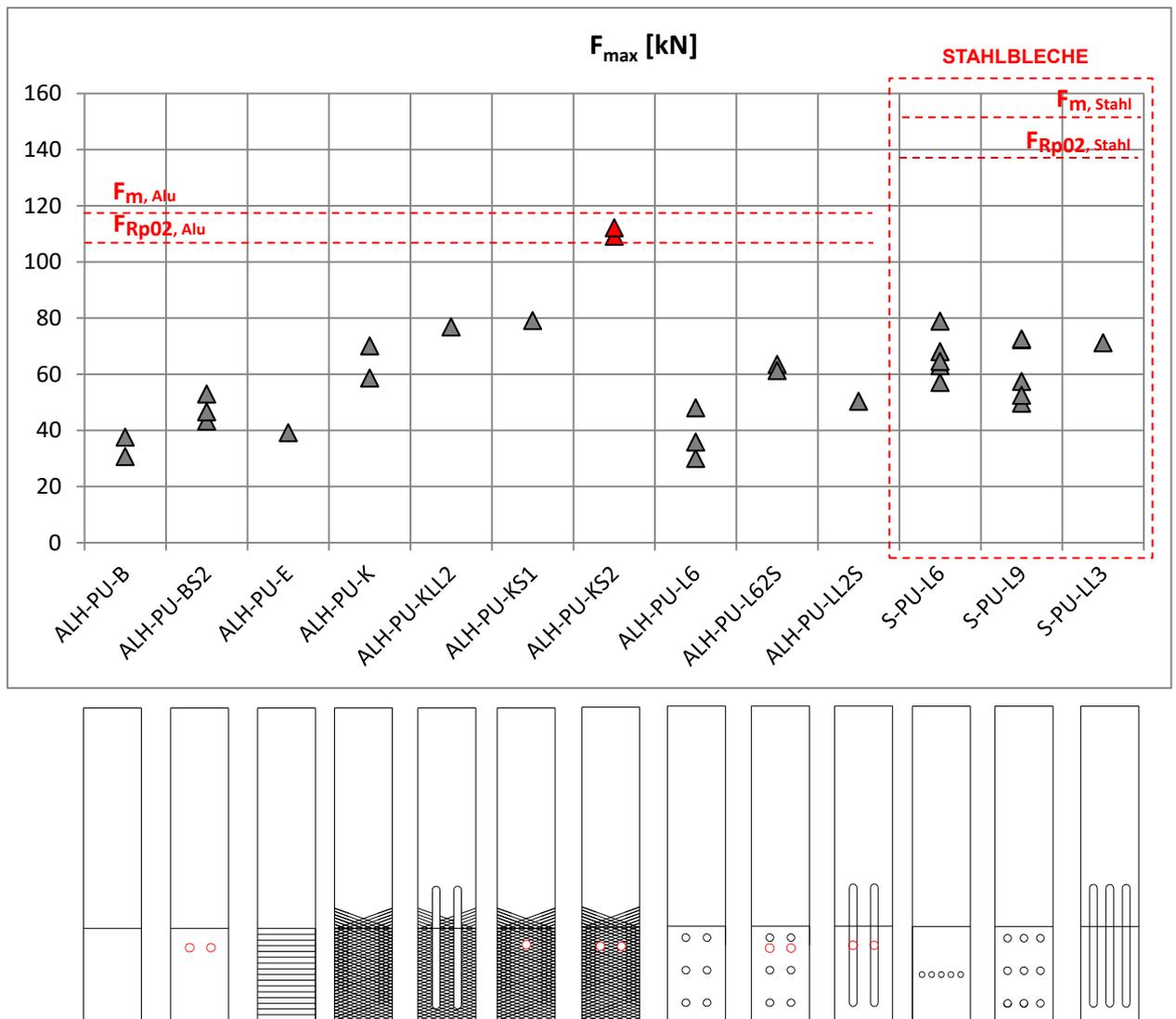


Abbildung 6.25: maximale Tragfähigkeiten der Prüfsreihe 03

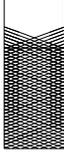
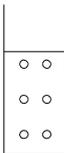
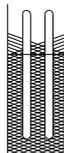
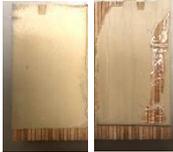
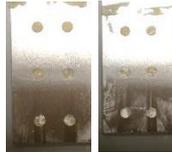
Der niedrigste Wert von 30,0 kN wurde auf Grund von Fehlverklebungen bei den Aluminiumprüfkörpern mit 6 Löchern erzielt. Auch bei der Einrieb-Proflierung war mit 39,2 kN keine wesentliche Steigerung der Tragfähigkeit zu erkennen. Durch die Bearbeitung der Bleche mit Kreuzrieb-Proflierung (K) wurde eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung auf bis zu 70,1 kN erreicht. Durch das Verstärken mit Bohrstabdübel und der Perforierung mit Langlöchern erreichten Kreuzrieb-Prüfkörper ein Lastniveau bis

über die Streckgrenze des Aluminiumbleches. Ein Perforieren der geschliffenen Bleche mit Rundlöchern erzielte eine Steigerung der Tragfähigkeit auf 48,1 kN (ALH-PU-L6). Wurden zusätzlich zwei Bohrstabdübel eingeschraubt, wurde die Traglast auf 63,5 kN gesteigert (ALH-PU-L62S). Die Probekörper mit zwei Langlöchern und zusätzlich zwei Bohrstabdübel erzielten mit nur 50,4 kN weniger gute Werte, als Kreuzzieb mit zwei Langlöcher. Die Prüfkörper mit Stahlbleche erreichten mit einem Maximalwert von 78,9 kN (ALH-PU-L6) nahezu die doppelte Tragfähigkeit, wie jene der „Pull-Pull“-Prüfungen nach Jeleč [28] mit 40,0 kN.

## 6-7.5.2 Vergleich der Tragfähigkeiten

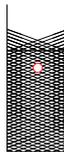
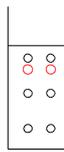
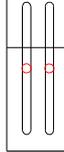
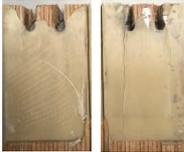
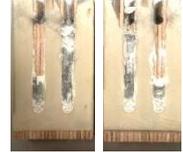
Im Folgenden wurde auf den Einfluss der unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten (Profilierung und Perforierung) näher eingegangen. Eine weitere Unterscheidung fand hinsichtlich der Aufspaltsicherung statt. Als Referenzkraft wurde der Mittelwert der geschliffenen Aluminiumbleche herangezogen, welcher ins Verhältnis für alle Mittelwerte der weiteren Prüfserien gesetzt wurde. Um die Stahlbleche mit einem Referenzwert vergleichen zu können, wurde aus der Arbeit von Jeleč [28], in welcher Zugprüfungen unter denselben Randbedingungen und Werkstoffen geprüft wurden, ein Vergleichswert für sandgestrahlte Stahlbleche von 40,0 kN herangezogen. Die Bruchbilder stellen die häufigste Versagensart der jeweiligen Prüfserie dar.

*Tabelle 6.12: Vergleich der Tragfähigkeiten „Aluminiumbleche ohne Aufspaltsicherung“, Prüfserie 03*

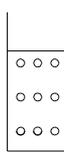
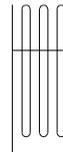
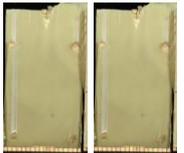
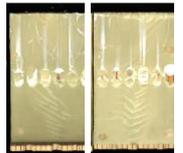
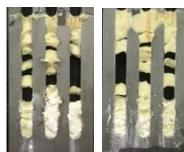
Parameter	-	-	-	6-Loch	2-Langloch
					
Oberfläche	geschliffen*	Einrieb	Kreuzzieb	geschliffen	Kreuzzieb
$F_{\text{mean}}[\text{kN}]$	34,2	39,2	64,4	38,0	76,8
$F_{\text{mean}}/F_{\text{mean,ref}}$	1,00	1,15	1,88	1,11	2,25
Holz (FSH Buche)					
Blech (Aluminium)					

\*Referenzwert

*Tabelle 6.13: Vergleich der Tragfähigkeiten „Aluminiumbleche mit Aufspaltsicherung“*

Parameter	2 Stabdübel	1 Stabdübel	2 Stabdübel	6-Loch + 2 Stabdübel	2-Langloch + 2 Stabdübel
					
<b>Oberfläche</b>	geschliffen	Kreuzhieb	Kreuzhieb	geschliffen	geschliffen
<b>F<sub>mean</sub>[kN]</b>	47,6	79,2	110,7 (Blechbruch)	62,4	50,4
<b>F<sub>mean</sub>/F<sub>mean,ref</sub></b>	1,40	2,32	3,24	1,83	1,47
<b>Holz (FSH Buche)</b>					
<b>Blech (Aluminium)</b>					

*Tabelle 6.14: Vergleich der Tragfähigkeiten „Stahlbleche“, [28]*

Parameter	PU [28]	PUL [28]	6-Loch	9-Loch	3-Langloch
					
<b>Oberfläche</b>	sandgestrahlt	sandgestrahlt	geschliffen	geschliffen	geschliffen
<b>F<sub>mean</sub>[kN]</b>	<b>40,0</b>	48,1	66,3	60,9	71,2
<b>F<sub>mean</sub>/F<sub>mean,ref</sub></b>	1,00	1,20	1,66	1,52	1,78
<b>Holz (FSH Buche)</b>					
<b>Blech (Stahl)</b>					

### 6-7.5.3 Spannungen

#### Zugnormalspannungen im Holz

Die Ausnützung im Bruttoquerschnitt des Holzes errechnete sich unter Berücksichtigung des charakteristischen Wertes der Zugfestigkeit von  $f_{t,0,k} = 70 \text{ N/mm}^2$  für BauBuche S. Bei Zugbelastung bewegte sich der Ausnutzungsgrad des Holzes zwischen 12% - 45 %.

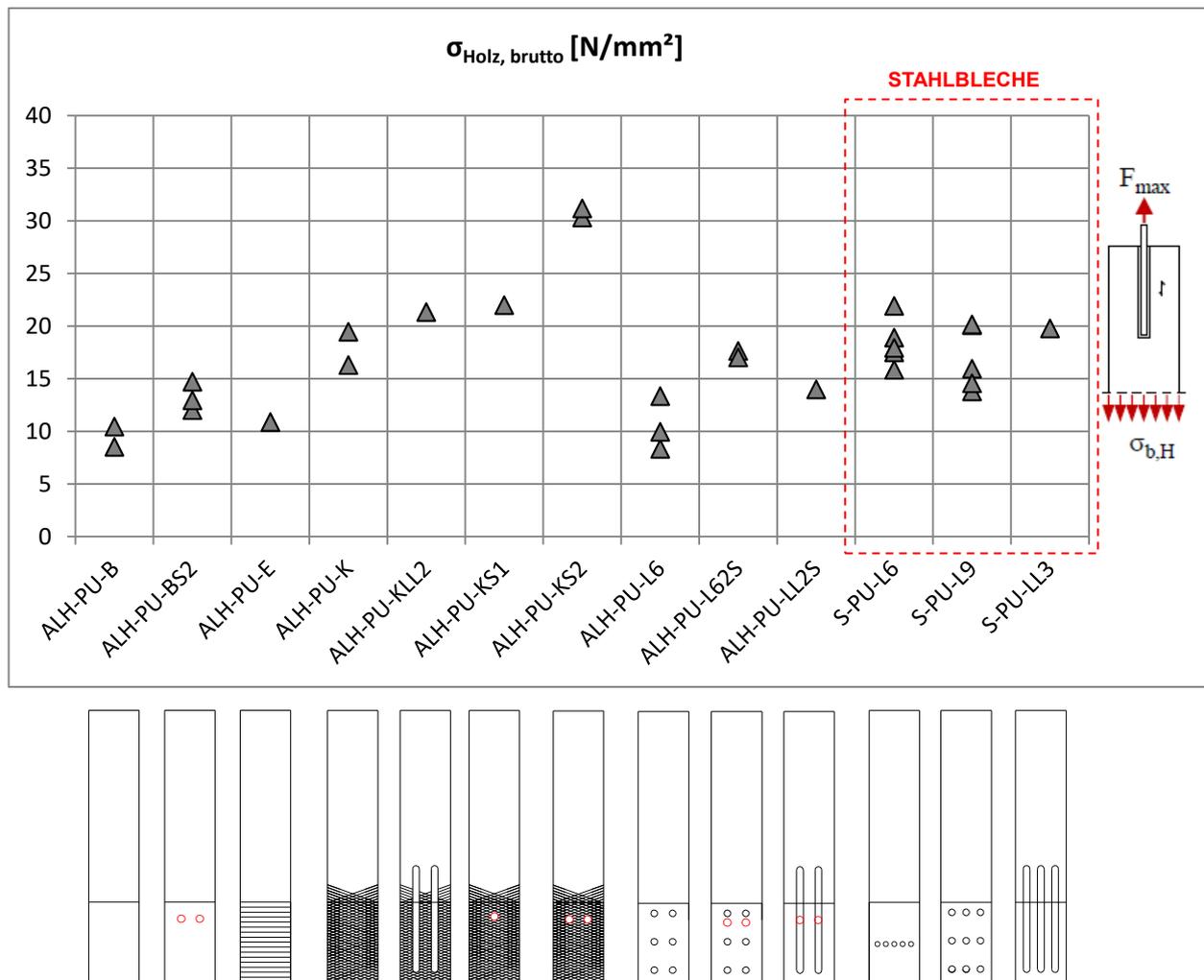


Abbildung 6.26: Zugnormalspannungen im Holzquerschnitt (brutto), Prüferserie 03

**Zugnormalspannungen im Blech**

Im Folgenden wurden die Normalspannungen im Bruttoquerschnitt des Bleches dargestellt. Wie aus der Abbildung 6.27 ersichtlich, kam es bei den Prüfkörpern mit Kreuzzieb und zwei Bohrstabdübeln, in rot dargestellt, zum Aluminiumbruch, da die Nettospannungen deutlich über der Zugfestigkeit des Aluminiumbleches lagen. Durch die Schwächung der Blechquerschnitte durch Profilierung und Perforierung lagen die tatsächlichen Spannungen deutlich über den Spannungen der Bruttoquerschnitte.

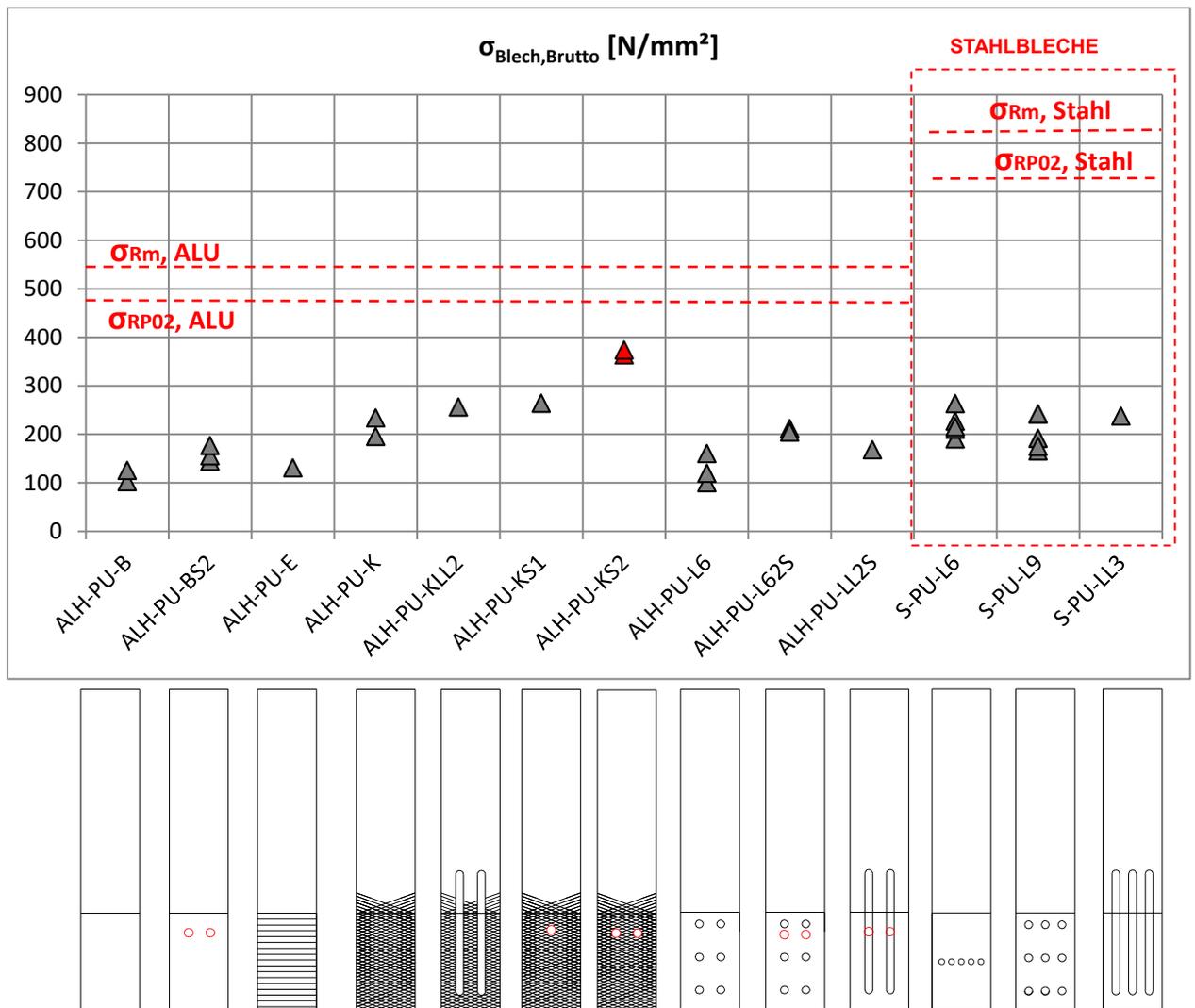


Abbildung 6.27: Normalspannungen im Blechquerschnitt (brutto), Prüfsérie 03

### Scherspannungen in der Klebefläche

Die Scherspannungen wurden mittels der Gleichung (6.6) aus Abschnitt 6-4.3 berechnet. In Abbildung 6.28 bewegten sich die Scherspannungswerte zwischen  $2,56 \text{ N/mm}^2$  -  $9,43 \text{ N/mm}^2$ . Die analytisch berechneten Werte aus Kapitel 7 wichen nur geringfügig von jenen der experimentellen Versuche ab. Das zeigte, dass die analytischen und numerischen Berechnungen ihre Berechtigung zur Vorabschätzung haben. Die charakteristische Scherfestigkeit von Buchenurnierschichtholz wurde mit  $9 \text{ N/mm}^2$  nur in einer Prüfserie überschritten, obwohl sich laut Bruchbildern bei allen kreuzziebprofilierten Prüfkörper Holzscherberüche nahe der Klebefuge einstellen.

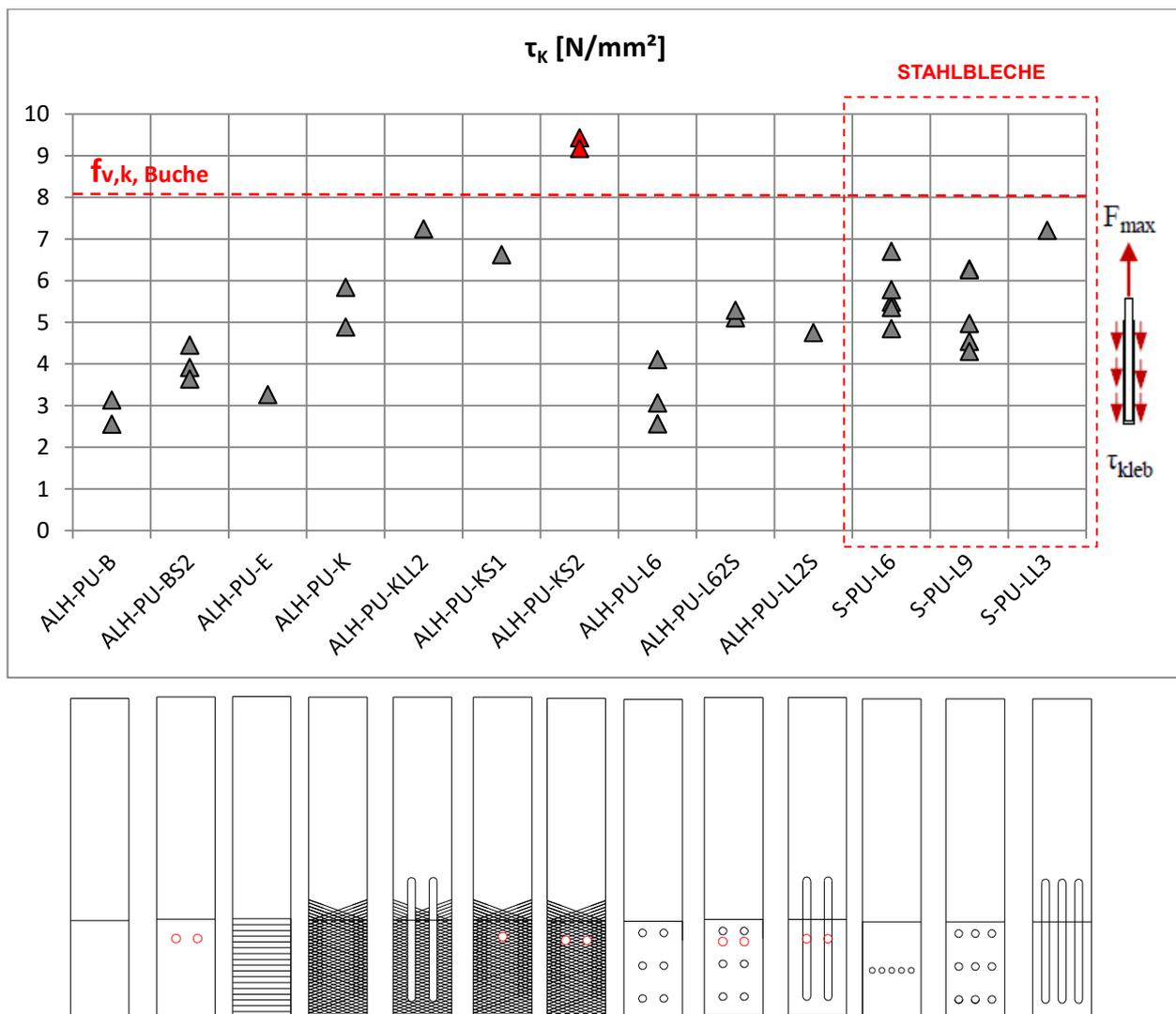


Abbildung 6.28: Scherspannungen in der Klebeschicht, Prüfserie 03

## 6-7.6 SCHLUSSFOLGERUNG PRÜFSERIE 03

### Einfluss der Profilierung

Die Einrieb-Profilierung erzielte trotz der Verringerung der Profiltiefe keine Verbesserung der Tragfähigkeit und wurde in den folgenden Prüfungen nicht weiter untersucht. Im Gegensatz dazu steigerte sich die Maximallast bei kreuzriebprofilierten Prüfkörpern deutlich.

### Einfluss der Perforierung

Die Langlöcher erzielten bei den Aluminiumblechen eine Tragfähigkeitssteigerung von rund 35%. Die Rundlochperforierung führte bei korrekter Verklebung ebenso zu einer um 30% höheren Tragfähigkeit. Bei den rundlochperforierten Prüfkörpern ergaben sich jedoch große Probleme durch Lufteinschlüsse im Klebstoff, wodurch die Tragfähigkeit bei den fehlverklebten Proben keine Laststeigerung mit sich brachte.

### Einfluss des Flachkörpermaterials

Durch die Verwendung von Aluminiumblechen höherer Festigkeit wurden die Flachkörperbrüche weitgehend eliminiert. Nur bei Prüfkörpern mit Kreuzrieb und zwei Bohrstabdübel überschritt das Aluminiumblech die Zugfestigkeitsgrenze, wodurch sich ein Nettoquerschnittsbruch im Blech einstellte.

### Einfluss der Quersicherung

Durch die Quersicherung mittels Bohrstabdübel wurde neben der Duktilität auch die Traglast besonders bei Prüfkörpern mit profilierten Blechen gesteigert, da durch die Aufspaltwirkung des Klebstoffes ein Aufbiegen des Holzes verhindert wurde. Von großer Bedeutung ist auch die Anzahl der Bohrstabdübel. Gut zu erkennen war die um 60 % höhere Tragfähigkeit von profilierten Prüfkörpern mit zwei Dübeln im Vergleich zu jenen mit einem Bohrstabdübel.

## 6-8 PRÜFSERIE 04 (PUSH-PULL)

### 6-8.1 ANORDNUNG

Für die Prüfsreihe 04 wurden die noch intakten Versuchskörper der Prüfsreihe 03 herangezogen, wobei die Bohrstabdübel als Quersugsicherung entfernt wurden. Dabei ergaben sich, wie in Tabelle 6.15 ersichtlich, acht Prüfsreihen für Aluminiumbleche und zwei für Stahlbleche. Die Anzahl der Versuchskörper pro Serie bewegte sich zwischen 1 und 5.

Tabelle 6.15: Prüfkörperbezeichnung Prüfsreihe 04

Prüfkörperbezeichnung	Blechwerkstoff	Oberflächenbehandlung	Klebstoff	Klebstoffdicke [mm]	Anzahl	Aushärtezeit [Tage]
ALH-PU-B-0X	Aluminium	geschliffen	PU	1	1	19 (20)*
ALH-PU-BS2-0X	Aluminium	geschliffen	PU	1	2	19 (20)*
ALH-PU-K-0X	Aluminium	Kreuzhieb	PU	1	2	19 (20)*
ALH-PU-KLL2-0X	Aluminium	Kreuzhieb	PU	1	1	19 (20)*
ALH-PU-KS1-0X	Aluminium	Kreuzhieb	PU	1	1	19 (20)*
ALH-PU-KS2-0X	Aluminium	Kreuzhieb	PU	1	1	19 (20)*
ALH-PU-L6-0X	Aluminium	geschliffen	PU	1	3	19 (20)*
ALH-PU-LL2S-0X	Aluminium	geschliffen	PU	1	1	19 (20)*
S-PU-L9-0X	Stahl	geschliffen	PU	1	5	19 (20)*
S-PU-LL3-0X	Stahl	geschliffen	PU	1	1	19 (20)*
					$\Sigma$	

\* Die Klammerwerte beziehen sich auf die zuerst eingeklebte Seite

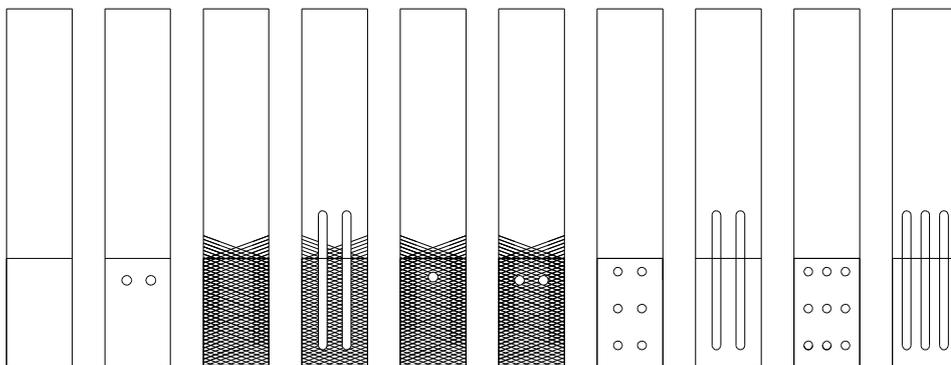


Abbildung 6.29: Oberflächenbehandlungen und Perforierung der Bleche (ohne Aufspaltsicherung), Prüfsreihe 04

## 6-8.2 PRÜFDURCHFÜHRUNG

Für die Prüfungen 04 wurden die Versuchskörper der Prüfserie 03 auf eine Länge von 12 cm abgelängt und mittels einer „Push-Pull“-Konfiguration in der Maschine der Firma Zwick geprüft. Dabei wurden, wie in Abbildung 6.30 zu sehen, die Prüfkörper mit Hilfe einer 40 mm dicken Stahlplatte durch vier Gewindeschrauben  $\varnothing 16$  mm nach unten verankert. Das Prüfblech wurde von oben über hydraulische Klemmbacken mit 150 kN herausgezogen. Zu beachten war, dass die Schlitzaussparung in der Stahlplatte um das Blech so groß gewählt werden soll, dass keine Scherbeanspruchung in der Klebefuge stattfindet. Außerdem musste die Durchbiegung der Stahlplatte begrenzt werden, was unter Zuhilfenahme einer Modellbildung im Programm RFEM nachgeprüft wurde. Folglich konnte die Dicke der Stahlplatte mit 40 mm festgelegt werden.

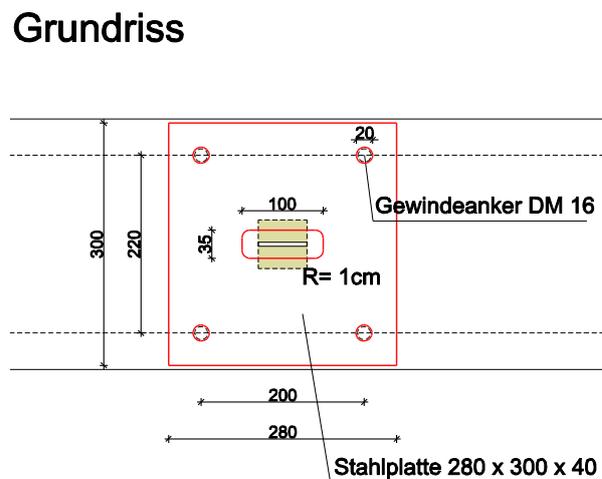
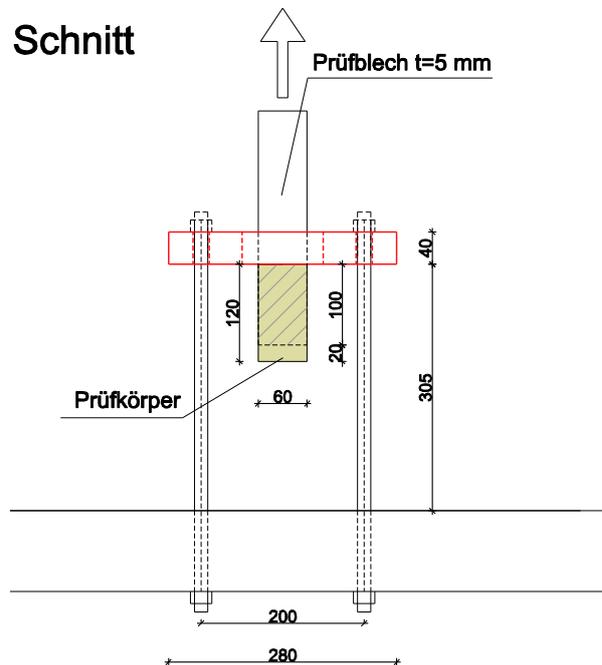


Abbildung 6.30: Prüfkonfiguration, Prüfserie 04

## 6-8.3 AUSWERTUNG

### 6-8.3.1 Tragfähigkeit

In Abbildung 6.31 sind alle Traglasten der Einzelprüfungen dargestellt. Dabei variierte die Tragfähigkeit innerhalb einiger Prüfserien sehr stark, was auf Fehlverklebungen zurückgeführt werden konnte. Die Zugfestigkeit von 540 N/mm<sup>2</sup>, sowie die Streckgrenze von 485 N/mm<sup>2</sup> wurden in keinem Aluminiumblech erreicht. Gleiches galt auch für die Stahlbleche, wo die Zugfestigkeit Werte von 850 N/mm<sup>2</sup> erreichte. Die Serien KS1, KS2 und KLL2 erzielten im Vergleich zum Referenzprüfkörper (B) nahezu doppelt so hohe Tragfähigkeitswerte. Durch die fehlerhaften Verklebungen der Prüfkörper mit Rundlöchern (L6) wurden nur geringfügige Tragfähigkeitssteigerungen beobachtet.

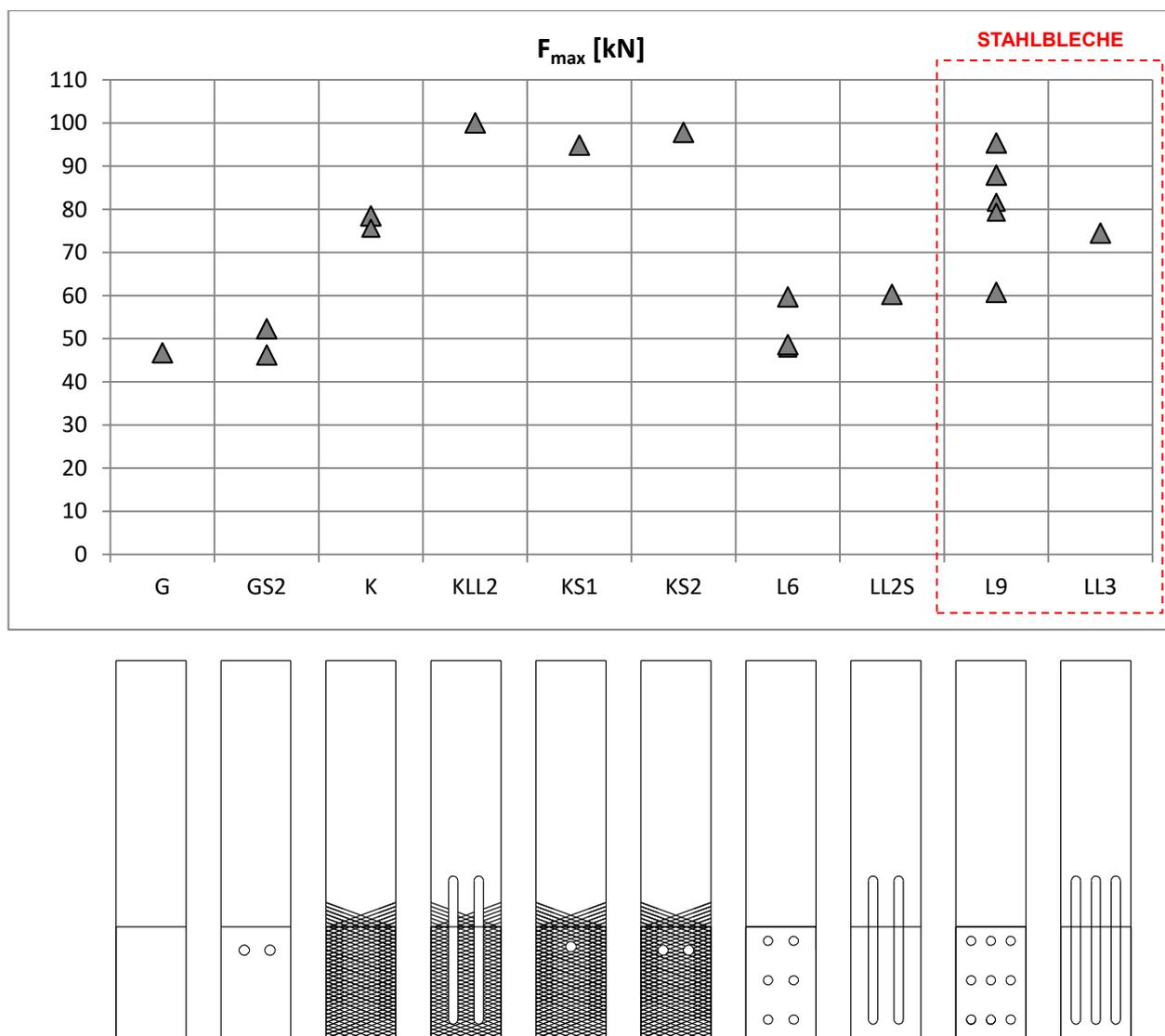
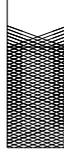
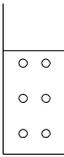
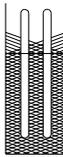


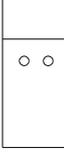
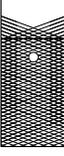
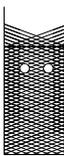
Abbildung 6.31: maximale Tragfähigkeiten, Prüfserie 04

**Tabelle 6.16: Vergleich der Tragfähigkeiten „Aluminiumbleche ohne Aufspaltsicherung“, Prüfsrie 04**

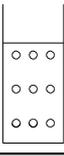
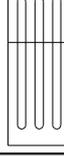
Parameter	-	-	6-Loch	2-Langloch
				
<b>Oberfläche</b>	geschliffen*	Kreuzhieb	geschliffen	Kreuzhieb
<b>F<sub>mean</sub>[kN]</b>	<b>46,7</b>	77,0	52,1	100
<b>F<sub>mean</sub>/F<sub>mean,ref</sub></b>	1,00	1,65	1,16	2,14

\*Referenzwert

**Tabelle 6.17: Vergleich der Tragfähigkeiten „Aluminiumbleche Aufspaltsicherung entfernt“, Prüfsrie 04**

Parameter	-	-	-	2-Langloch
				
<b>Oberfläche</b>	geschliffen	Kreuzhieb	Kreuzhieb	geschliffen
<b>F<sub>mean</sub>[kN]</b>	49,3	94,9	97,8	60,3
<b>F<sub>mean</sub>/F<sub>mean,ref</sub></b>	1,06	2,03	2,09	1,29

**Tabelle 6.18: Vergleich der Tragfähigkeiten „Stahlbleche (ohne Referenz)“, Prüfsrie 04**

Parameter	9-Loch	3-Langloch
		
<b>Oberfläche</b>	geschliffen	geschliffen
<b>F<sub>mean</sub>[kN]</b>	81,0	74,5

### 6-8.3.2 Spannungen

#### Zugnormalspannungen im Holz

Die Ausnützung im Bruttoquerschnitt des Holzes errechnete sich unter Berücksichtigung des charakteristischen Wertes der Zugfestigkeit von  $f_{t,0,k} = 70 \text{ N/mm}^2$  für BauBuche S. Bei Zugbelastung bewegte sich der Ausnutzungsgrad des Holzes zwischen 15 % - 33 %.

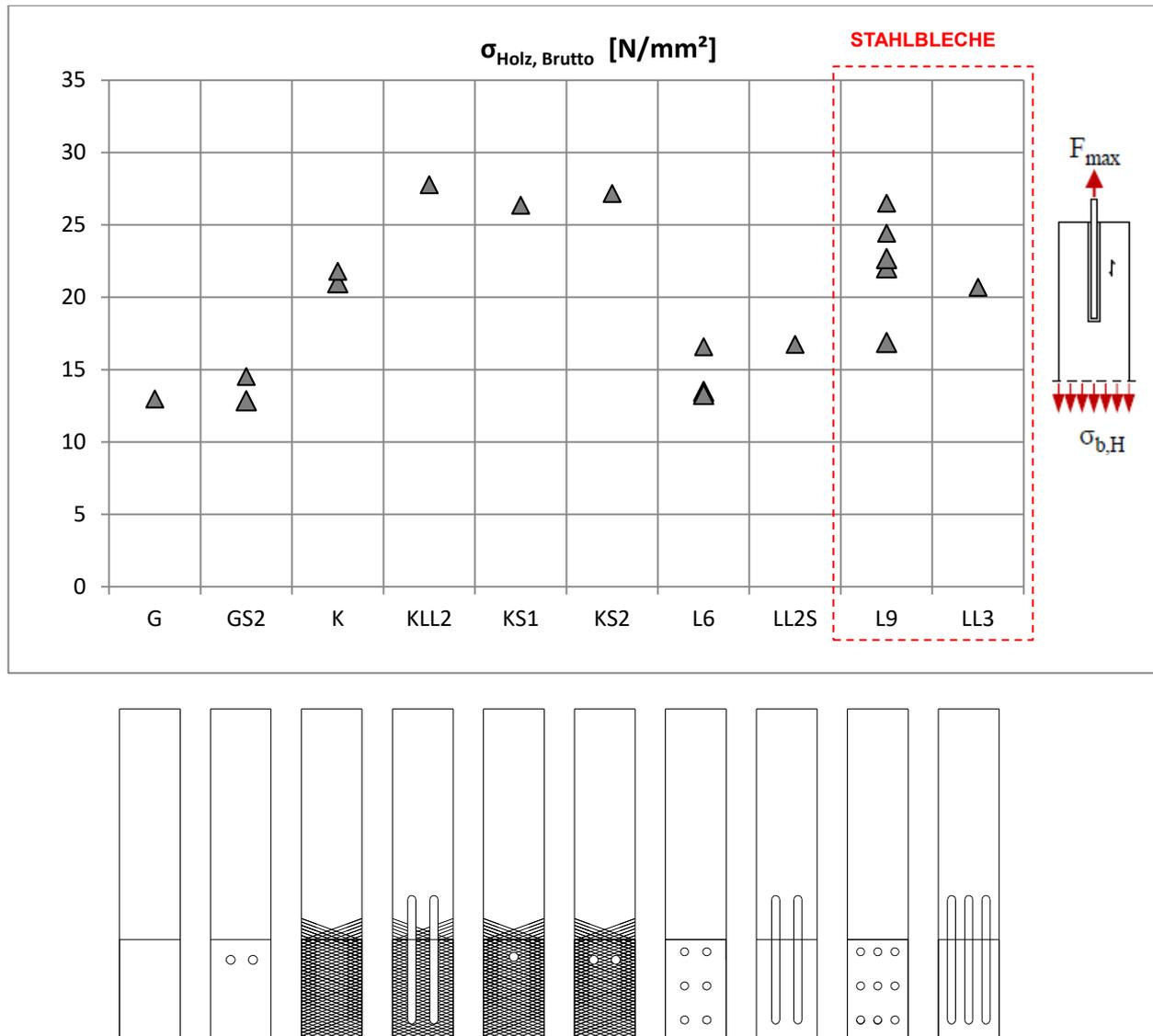
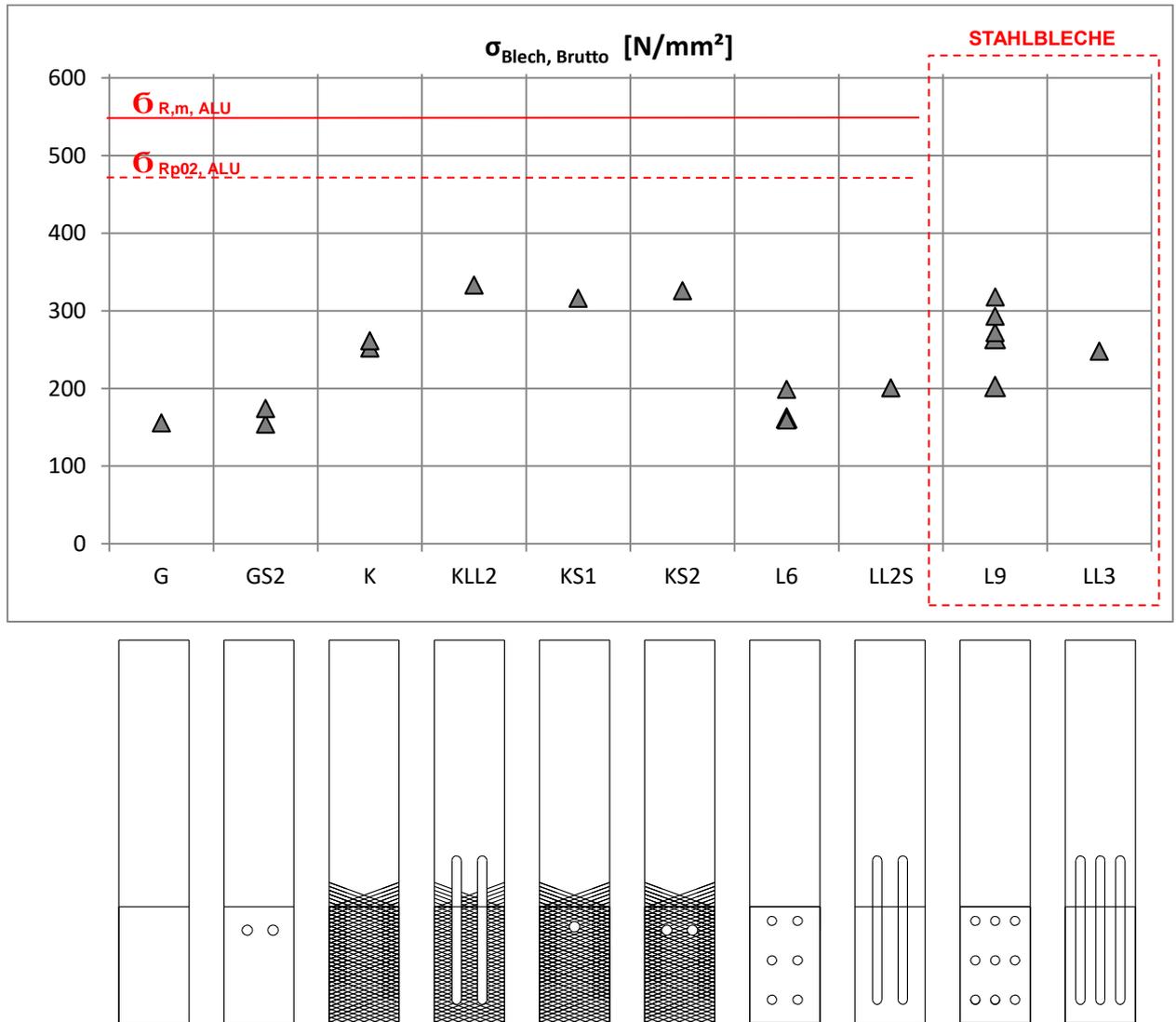


Abbildung 6.32: Zugnormalspannungen im Holzquerschnitt (brutto), Prüfserie 04

**Zugnormalspannungen im Blech**

Im Folgenden wurden die Zugnormalspannungen im Bruttoquerschnitt des Bleches dargestellt. In Abbildung 6.33 wurden die Streckgrenze bei 485 N/mm<sup>2</sup> und die Zugfestigkeit mit 540 N/mm<sup>2</sup> für Aluminiumbleche eingezeichnet. Gleiches galt für Stahlbleche mit einer Streckgrenze von 760 N/mm<sup>2</sup> und einer Zugfestigkeit von 850 N/mm<sup>2</sup>.



*Abbildung 6.33: Normalspannungen im Aluminiumquerschnitt (brutto), Prüferserie 04*

### Scherspannungen in der Klebefläche

In Abbildung 6.34 bewegten sich die Scherspannungswerte zwischen  $3,89 \text{ N/mm}^2$  -  $9,43 \text{ N/mm}^2$ . Vergleicht man die Bruchbilder aus Anhang B ist zu erkennen, dass sich bei den kreuzhiebprofilierten Aluminiumblechen sowie bei den Stahlblechen mit neun Rundlochperforierungen Holzscherberüche nahe der Klebefuge einstellen, da sie die charakteristische Scherfestigkeit des Furnierschichtholzes von  $9 \text{ N/mm}^2$  zum Teil überschritten.

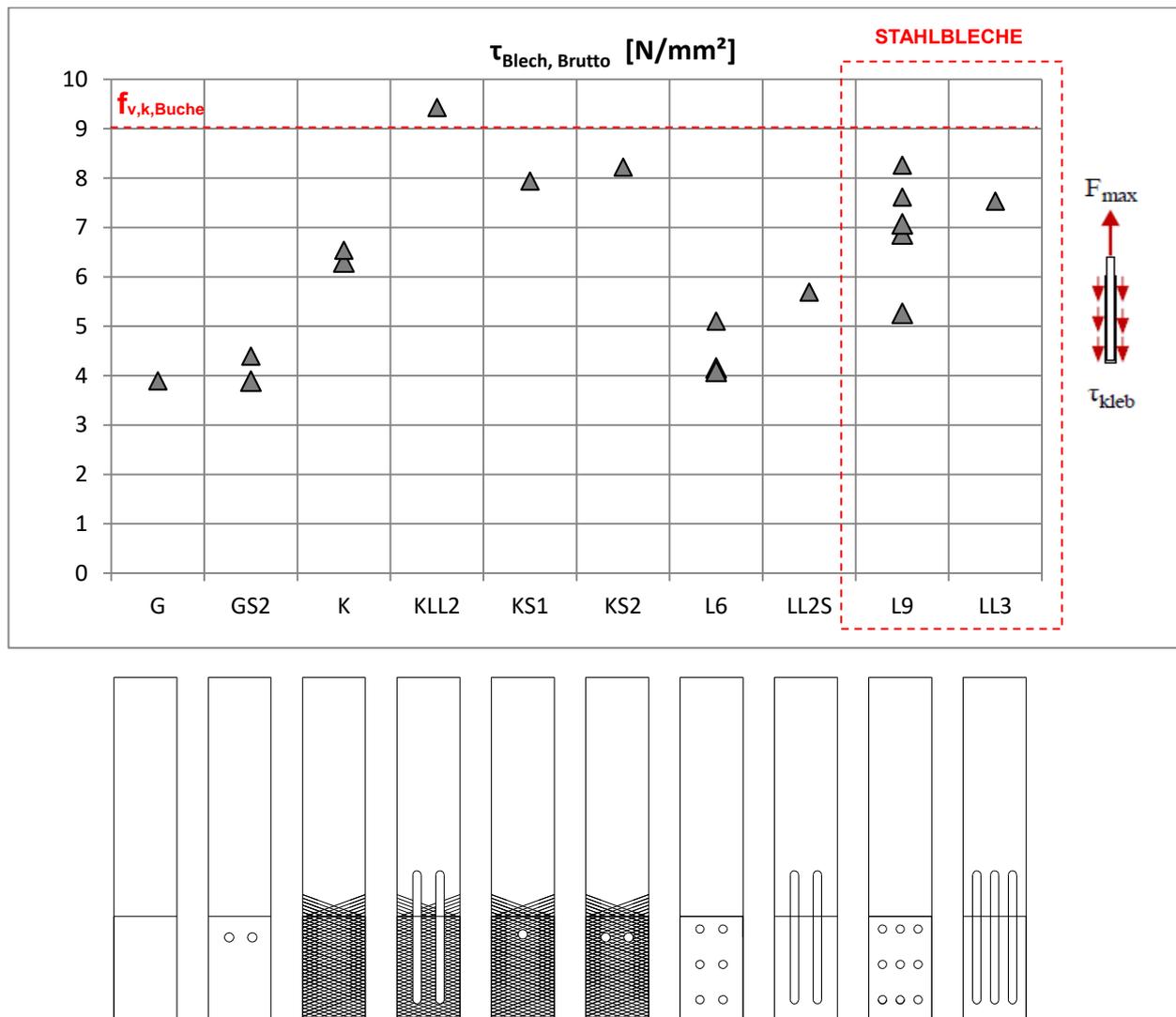


Abbildung 6.34: Scherspannungen in der Klebeschicht, Prüfserie 04

## 6-8.4 SCHLUSSFOLGERUNG PRÜFSERIE 04

### Einfluss der Prüfkonfiguration

Unter Verwendung der „Push-Pull“-Prüfkonfiguration sind im Vergleich zu „Pull-Pull“-Prüfungen höhere Traglasten sowie höhere Spannungen erreichbar. Grund hierfür sind zum einen die andere Lasteinleitung und die sich anderen einstellenden Spannungszustände. Zum anderen wurde durch die aufliegende Stahlplatte beim „Push-Pull“-Versuch eine Reibung zwischen dem Holzkörper und der Stahlplatte aktiviert, wodurch ein Aufspalten des Holzes weitgehend verhindert wurde. Abbildung 6.35 stellt den Unterschied hinsichtlich Kräfteinleitung und Verformung der beiden Prüfkonfigurationen gegenüber.

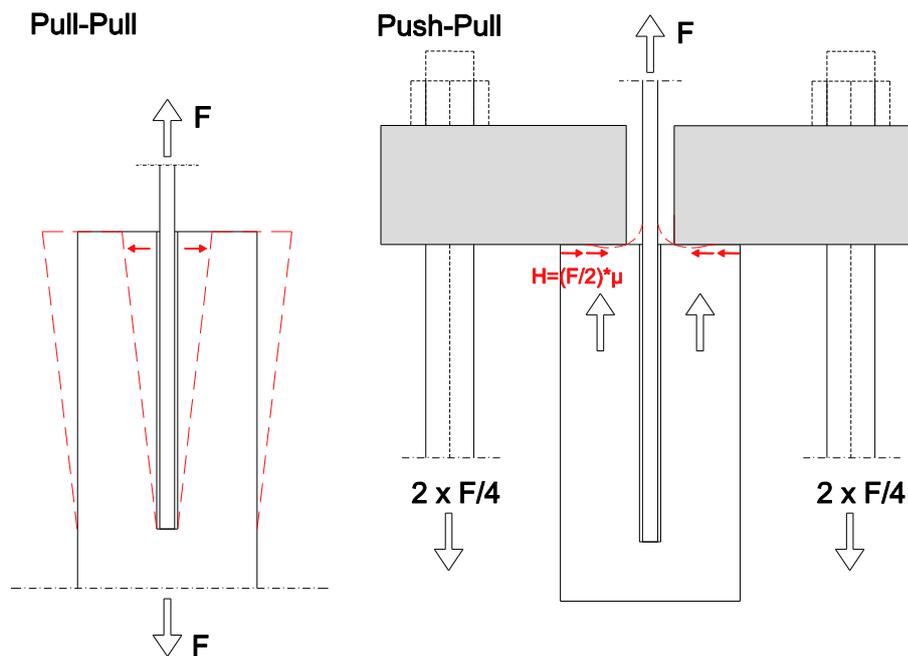


Abbildung 6.35: Lasteinleitung „Pull-Pull“ (links) vs. „Push-Pull“ (rechts)

## 6-9 PRÜFSERIE 05 (SCHERPRÜFUNG)

### 6-9.1 MATERIAL

#### 6-9.1.1 Blech

- Stahl S 355

Für die Scherprüfungen wurden Feinkornstahlbleche der Güte S 355 auf die Abmessungen von 300 x 155 x 5 mm zugeschnitten. Hierbei soll der Unterschied der mikroskopischen Oberflächenbearbeitungen untersucht werden. Es wurden, wie in Abbildung 6.36 zu sehen, geschliffene und sandgestrahlte Bleche hergestellt. Dazu wurden die Blechtafeln mittels einer Stahlsäge auf die erforderlichen Maße zugeschnitten und entgratet. Die geschliffenen Bleche wurden mit Hilfe eines Winkelschleifers mit Fächeraufsatz bearbeitet. In der folgenden Tabelle 6.19 sind die Festigkeitswerte des verwendeten Blechmaterials aufgelistet.

*Tabelle 6.19: Blechmaterial Prüfsrie 05*

Werkstoff	Bezeichnung	0,2 %-Dehngrenze	Zugfestigkeit <sup>3</sup>
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Stahl	S 355	355	490-630



*Abbildung 6.36: Oberflächenprofilierung (geschliffen oben, sandgestrahlt unten)*

<sup>3</sup> nach DIN EN 10025

### 6-9.1.2 Holzwerkstoff

Für die Scherprüfungen wurden je zwei Brettsperrholzkörper pro Prüfung aus Fichtenholz mit den Maßen 654 x 200 x 90 mm hergestellt. Die BSP-Herstellung erfolgte am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz. 16 BSP-Prüfkörper wurden aus Fichten-Kanthölzer aus dem Bestand des Institutes hergestellt. Im ersten Schritt erfolgte das Zuschneiden der Kanthölzer auf eine Brettstärke von 30 mm. Anschließend wurde auf die einzelnen Bretter ein 1-Komponenten PU-Klebstoff von Purbond über eine Klebstoff-Auftragmaschine (siehe Abbildung 6.37, oben rechts) aufgetragen. Nach kreuzweiser Schichtung der Brettlagen zu einem dreischichtigen Aufbau, wurden die BSP-Körper bei einem Pressdruck von 0,5 N/mm<sup>2</sup> für 1,5 Stunden in einer hydraulische Presse belastet und anschließend in die Klimakammer zur Lagerung gebracht.



*Abbildung 6.37: Herstellungsschritte der BSP-Platten*

## 6-9.2 POSITION DER BLECHE IM BSP

Für die Scherprüfungen wurden vier Untergruppen innerhalb der Prüfserie 05 mit Stahlbleche definiert. Davon werden zwei der Untergruppen mit Stahlbleche 90° zur Faserrichtung eingeklebt, welche somit vorwiegend auf Rollschub beansprucht werden. Die Anzahl der Prüfkörper pro Prüfserie wird mit je vier Prüfkörpern festgelegt. Die Klebefuge wird mit einer Stärke von 1 mm hergestellt. Die Einklebelänge erfolgt beidseitig mit 75 mm, wobei zwischen den Holzkörpern ein 5 mm breiter Spalt ausgelassen wird. Tabelle 6.20 schafft einen Überblick über das Prüfprogramm samt den Bezeichnungen der Prüfserien.

Die Prüfkörperbezeichnungen für die Tabelle 6.20 wird im Folgenden erläutert:

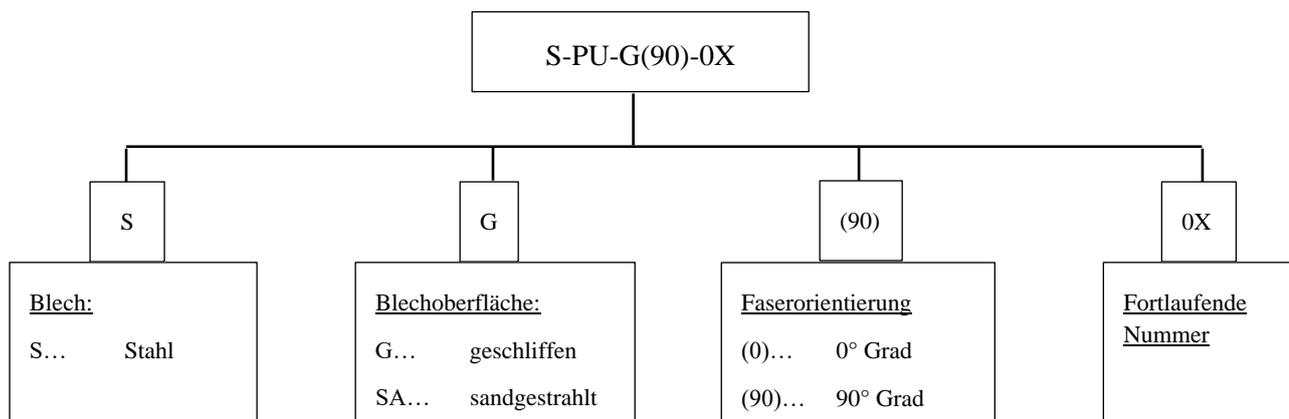


Tabelle 6.20: Prüfkörperbezeichnung, Prüfserie 05

Prüfkörperbezeichnung	Blechwerkstoff	Oberflächenbehandlung	Klebstoff	Klebstoffdicke [mm]	Anzahl	Aushärtezeit [Tage]
S-PU-G(0)-0X	S 355	geschliffen	PU	1	4	15 (16)*
S-PU-SA(0)-0X	S 355	sandgestrahlt	PU	1	4	20 (21)*
S-PU-G(90)-0X**	S 355	geschliffen	PU	1	4	14 (15)*
S-PU-SA(90)-0X**	S 355	sandgestrahlt	PU	1	4	20 (21)*
					<b>Σ 16</b>	

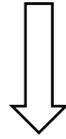
\* Die Klammerwerte beziehen sich auf die zuerst eingeklebte Seite

\*\* Die Bleche werden 90° zur Faserrichtung eingeklebt

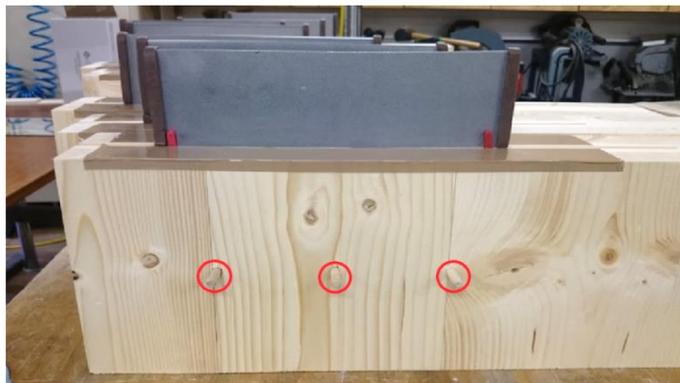
### 6-9.3 PROBENVORBEREITUNG

Nach dem Aushärten des Klebstoffes wurden die vorgefertigten BSP-Platten wie in Abbildung 6.38 auf die Maße 653 x 200 x 90 mm zugeschnitten und beidseitig mit einer Schlitztiefe von 75 mm eingefräst. Dabei wurde darauf geachtet, den Schlitz nicht durchgängig durch die Mittellage zu fräsen, um so an der Kraftereinleitungsstelle keine Querschnittsschwächung zu verursachen. Die Stirnholzseiten wurden mittels Kreissäge abgeschrägt, um so die später um 14° geneigten Prüfkörper in die Prüfmaschine positionieren zu können. Die Bleche wurden am Rand mit 1 cm breitem Schaumstoffklebeband umwickelt, um ein seitliches Auslaufen des Klebstoffes zu verhindern. Hierdurch verringerte sich die zu klebende Fläche auf 280 x 75 mm. Die Klebstoffeinbringung erfolgte einseitig und senkrecht zur Decklage durch drei 8 mm großen Bohrlöcher, welche in Abbildung 6.38 durch rote Kreise markiert sind. Nach dem Säubern der Holzkörper mittels Pressluft und dem Reinigen der Bleche mit Aceton, wurden diese mit Hilfe von Abstandhaltern mittig mit Purbond CR 421 in die Mittellage der Schmalseite des dreischichtigen BSP-Körpers eingeklebt. Nach einer Aushärtezeit von einem Tag erfolgte das Einkleben der anderen Blechseite in den zweiten Holzkörper. In weiterer Folge wurden die hergestellten Prüfkörper mindestens 10 Tage in der Klimakammer bei 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % gelagert. Um die BSP-Körper auch auf Rollschubbeanspruchung zu untersuchen, wurden 8 Prüfkörper mit einer Mittellage 90° zur Faser hergestellt.

1. Herstellen der Bohrung für die Klebstoffeinbringung



2. Einkleben in den ersten Holzkörper



3. Einkleben in den zweiten Holzkörper



*Abbildung 6.38: Herstellungsschritte der BSP-Prüfkörper*

## 6-9.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

[51]

Als Prüfkfiguration wurde die 14°-Scherkonfiguration in Anlehnung an ÖNORM EN 408 [51] herangezogen. Dabei wurden zwei BSP Prüfkörper mit den Abmessungen 653 x 200 mm hochkant parallel zueinander in einer 14°-Neigung zur senkrechten Achse in die Universalprüfmaschine positioniert. Die Lasteinleitung erfolgte über eine starre Kontaktplatte an der Prüfkörperoberseite. Dort wurde die Kraft über eine starr gelagerte Platte eingeleitet. Als Widerlager diente eine Kontaktplatte an der Unterseite. Die beiden BSP-Holzkörper wurden durch ein in der Mittellage eingeklebtes Blech mit den Abmessungen 300 x 155 mm und einer Klebefläche von 280 x 75 mm gekoppelt. Die Prüfkörper wurden so positioniert, dass die Mittellage, in der sich das eingeklebte Blech befindet, bei 8 Prüfkörpern längs zur Faser beansprucht wird. Des Weiteren wurden 8 Prüfkörper, in denen die Beanspruchung der Stahlbleche um 90° zur Faserrichtung erfolgte, auf Rollschubbeanspruchung untersucht. Um die Vertikalverformungen zu erfassen wurde als Messeinrichtung, wie in Abbildung 6.39 ersichtlich, an der Vorder- und Rückseite des Prüfkörpers in halber Höhe der eingeklebten Bleche ein induktiver Wegaufnehmer positioniert, der die Verschiebungen der beiden Holzkörper zueinander erfasst. Nach Aufbringen einer Vorkraft von 300 N wurde der Versuchskörper bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/sec bis zum Bruch gefahren.

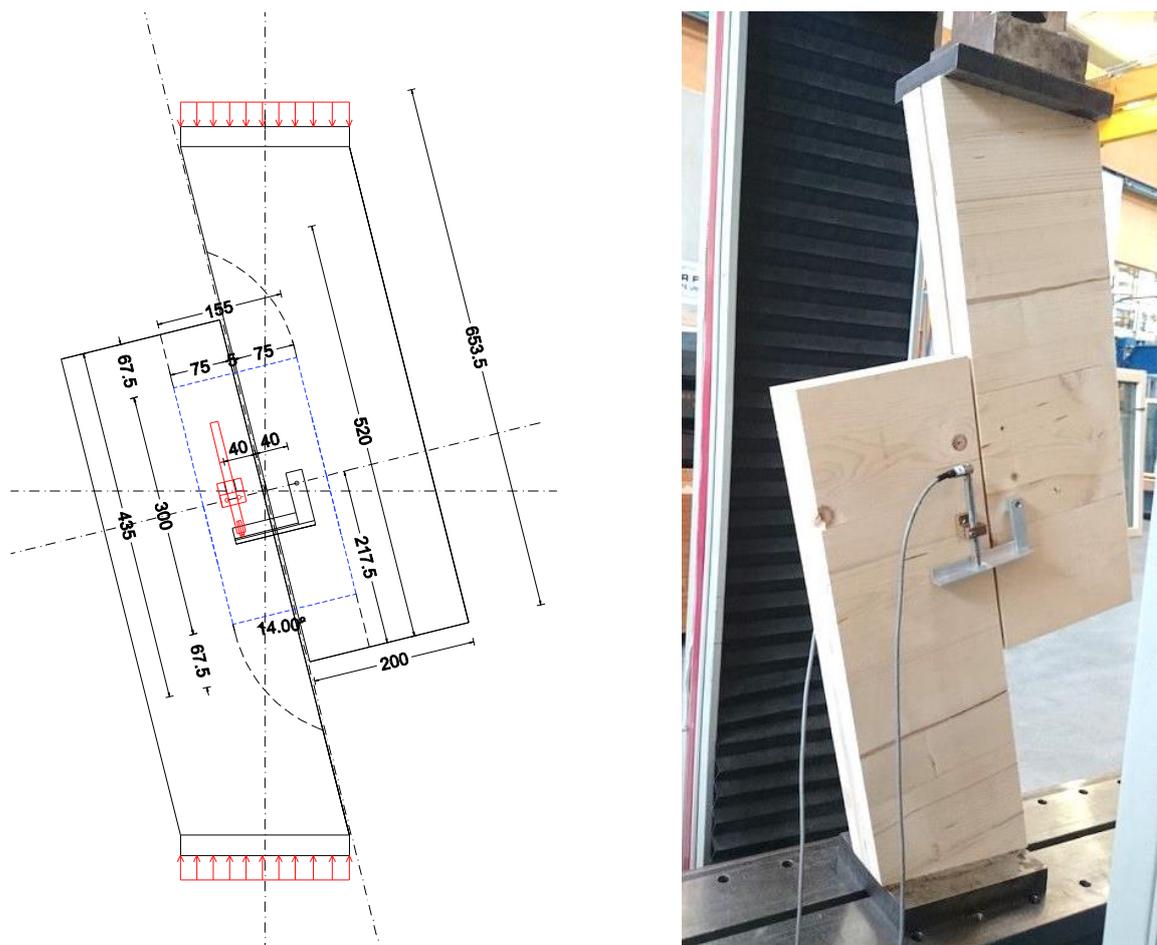


Abbildung 6.39: Prüfkfiguration mit induktiven Wegaufnehmern, Prüfserie 05

Anmerkung: Um die optimalen geometrischen Parameter des Prüfkörpers sowie des Bleches bestimmen zu können, wurde zunächst ein Vorversuch mit einem geschliffenen Stahlblech der Abmessungen 75 x 150 mm erprobt. Dabei wurde mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/sec geprüft und eine Vorkraft von 300 N aufgebracht. Um die Wegaufnehmer nicht zu beschädigen, wurden diese bei etwa 60 kN entfernt. Der Probekörper, welcher in Faserrichtung beansprucht wurde, erreichte eine Prüfkraft von 71,7 kN. Die maximal erreichte Schubspannung von 3,19 N/mm<sup>2</sup> hatte einen Holzbruch längs zur Faser zur Folge. (siehe Abbildung 6.40) In Folge dessen, wurde die Fläche des Bleches von 75 x 150 mm auf 75 x 280 mm erhöht, um das Widerstandsmoment des Bleches zu erhöhen, wodurch eine geringere Torsionsbeanspruchung auf die Klebefläche wirkt.



*Abbildung 6.40: Vorversuch Bruchflächen, Prüfserie 05*

## 6-9.5 AUSWERTUNG

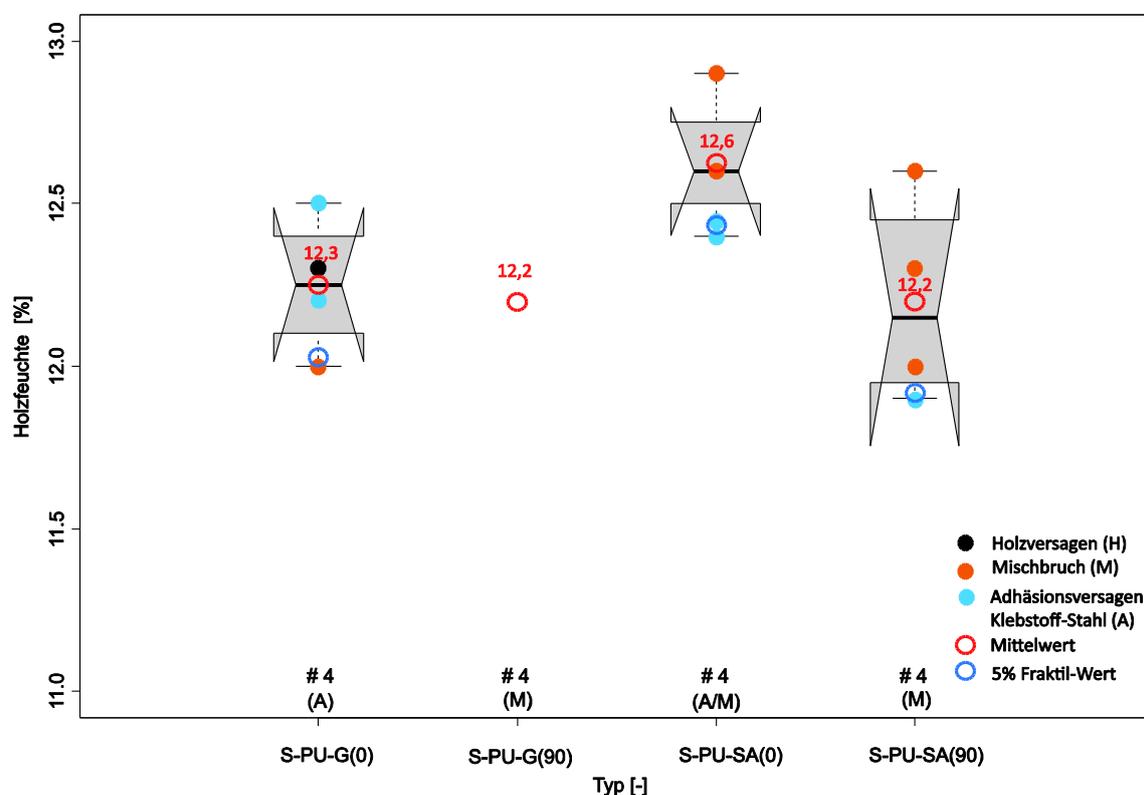
Die statistischen Kenngrößen der vier Prüfserien wurden mittels einer zusammenfassenden Darstellung und einer vergleichenden Betrachtungsweise der Prüfergebnisse erfasst. Auf Grund des größeren Prüfumfanges pro Serie wurden die Ergebnisse für eine einfachere Darstellung als Boxplots mit Hilfe des Programms „R“ erstellt. Die statistischen Lageparameter Minimum, Maximum, Mittelwert, Median und der Streuungsparameter wurden mit Hilfe der Gleichungen aus Abschnitt 6-4.5 bestimmt. Für die Einzelauswertungen der Prüfungen wurden die Gleichungen aus Abschnitt 6-4.3 herangezogen, um die Holzparameter (Holzfeuchte, Rohdichte), sowie die Tragfähigkeiten, Spannungen und Steifigkeiten der Verbindung berechnen zu können. Weiteres wurde noch auf die Unterschiede der Oberflächenbearbeitung der Bleche sowie auf die Orientierung der Bleche bezüglich der Faserrichtung eingegangen.

## 6-9.5.1 Holzfeuchte

Der Mittelwert der Holzfeuchte wich mit 12,3 % nur geringfügig von der Referenzholzfeuchte ab, welche 12 % beträgt. In Anbetracht der Boxplots in Abbildung 6.41 kann gesagt werden, dass die Lagerung in der Klimakammer eine deutliche Reduzierung der Streuung bewirkte, wodurch nur geringe Abweichungen vom Referenzwert erkennbar waren. Die Holzfeuchte lag im Bereich zwischen 11,9 % und 12,9 %. Die Tabelle 6.21 schafft einen Überblick über die statistischen Kenngrößen der Holzfeuchte in Abhängigkeit der Prüfserie. In Abbildung 6.41 wird die Verteilung der Holzfeuchte mittels Boxplots veranschaulicht, in dem die Mittelwerte der einzelnen Prüfserien (rote Kreise) sowie 5%-Quantile (blaue Kreise) dargestellt sind.

*Tabelle 6.21: Statistische Kenngrößen der Holzfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfung05*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-G(0)	S-PU-G(90)	S-PU-SA(0)	S-PU-SA(90)
Anzahl	[-]	4	4	4	4
Min	[%]	12,0	12,2	12,4	11,0
Max	[%]	12,5	12,2	12,9	12,6
Mittelwert	[%]	12,3	12,2	12,6	12,2
COV	[%]	1,70	-	1,63	2,59
5% Quantil	[%]	12,0	12,2	12,3	11,9



*Abbildung 6.41: Holzfeuchteverteilung der Prüfserie 05*

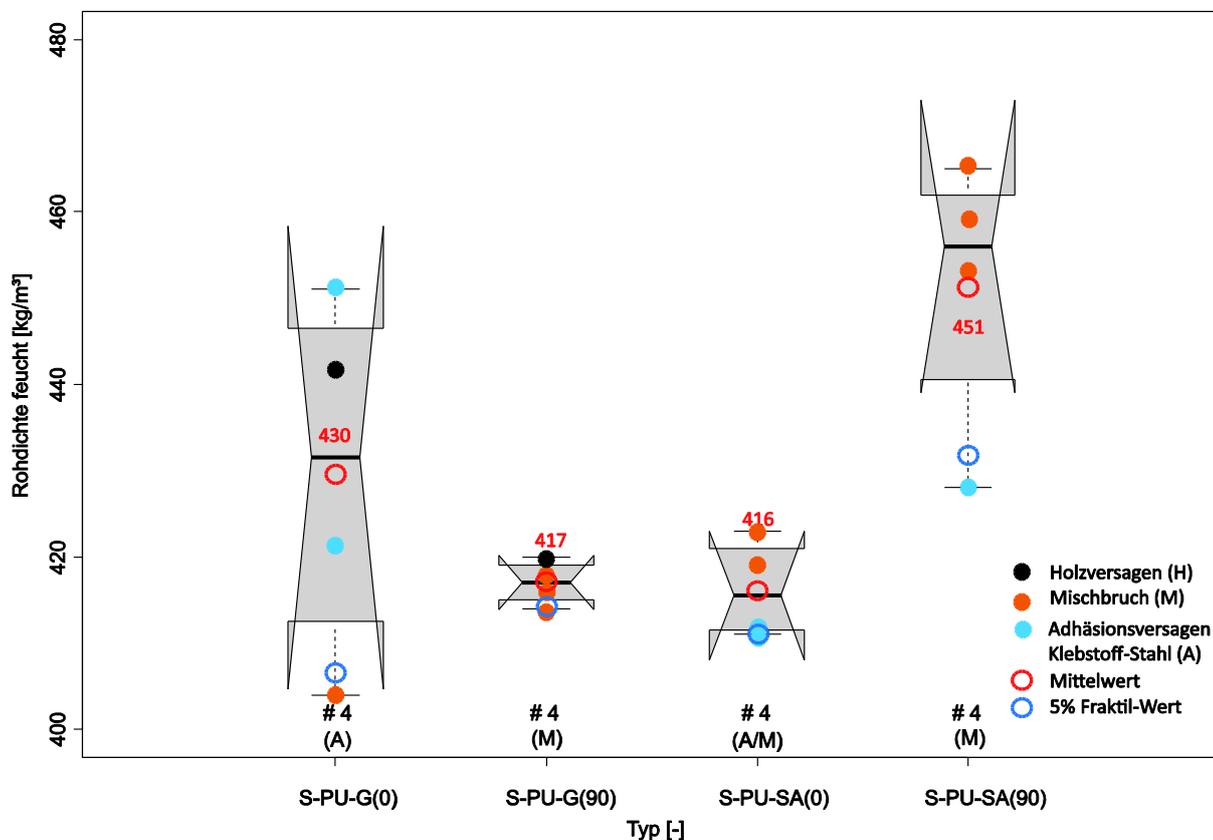
### 6-9.5.2 Rohdichte

Direkt nach erfolgter Scherprüfung wurden Kleinproben zur Bestimmung der Rohdichte aus den Brettsperrholzprüfkörpern ausgeschnitten. Die Auswertung ergab eine mittlere Rohdichte der vier Prüfserien von  $429 \text{ kg/m}^3$ . Die Rohdichte der Prüfkörper lag im Bereich von  $404 \text{ kg/m}^3$  bis  $465 \text{ kg/m}^3$ . In der untenstehenden Tabelle 6.22 wurden die statistischen Kenngrößen der Rohdichte aufgelistet.

*Tabelle 6.22: Statistische Kenngrößen der Rohdichte in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 05*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-G(0)	S-PU-G(90)	S-PU-SA(0)	S-PU-SA(90)
<b>Anzahl</b>	[-]	4	4	4	4
<b>Min</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	404	414	411	428
<b>Max</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	451	420	423	465
<b>Mittelwert</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	430	417	416	451
<b>COV</b>	[%]	4,92	0,62	1,38	3,60
<b>5% Quantil</b>	[kN]	407	414	411	432

Aus Abbildung 6.42 ist der Mittelwert jeder Prüfserie (roter Kreis) sowie der 5%-Quantil-Wert (blauer Kreis) erkennbar.



*Abbildung 6.42: Rohdichteverteilung der Prüfserie 05*

### 6-9.5.3 Tragfähigkeit

Folgend wurden die Tragfähigkeiten der unterschiedlichen Prüfserien miteinander verglichen. Dabei ist in Abbildung 6.43 deutlich zu erkennen, dass die Prüfkörper in Faserrichtung gegenüber jenen, welche 90° zur Faser beansprucht wurden, geringere Tragfähigkeiten erzielten. Die Tabelle 6.23 gibt einen Überblick über die statistischen Kenngrößen in Abhängigkeit der Prüfserien.

*Tabelle 6.23: Statistische Kenngrößen der Tragfähigkeit des Holzes in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 05*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-G(0)	S-PU-G(90)	S-PU-SA(0)	S-PU-SA(90)
<b>Anzahl</b>	[-]	4	4	4	4
<b>Min</b>	[kN]	87,2	97,5	57,6	98,0
<b>Max</b>	[kN]	103	115	88,3	113
<b>Mittelwert</b>	[kN]	92,7	106	71,8	107
<b>COV</b>	[%]	8,10	7,10	19,9	6,20
<b>5% Quantil</b>	[kN]	87,3	98,3	58,3	99,3

Im Weiteren erkannte man bei Prüfkörpern auf Rollschubbeanspruchung (grün) gering streuende Belastungswerte zwischen 97,5 kN und 115 kN, unabhängig von der Oberflächenbehandlung des Bleches, wodurch hier in jedem Fall die Faserorientierung als maßgebendes Kriterium für die Tragfähigkeit herangezogen werden konnte. Diese Prüfserien wiesen geringe Streuungen von 7,10 % (G-90) bzw. 6,20 % (SA-90) auf.

Bei in Faserrichtung beanspruchten Prüfkörpern ist noch eine Überschneidung der „Notches“ zwischen der geschliffenen und der sandgestrahlten Prüfserie erkennbar, jedoch traten hier größere Traglastunterschiede auf. Besonders großen Streuungen war die sandgestrahlte Prüfserie mit 19,9 % unterworfen. Die Mittelwerte der beiden Prüfserien unterschieden sich mit 92,7 kN (G) und 71,8 kN (SA) deutlicher, als bei rollschubbeanspruchten. Hier trat der Einfluss der Oberflächenbehandlung stärker hervor, was sich in den Bruchbilder besonders bei sandgestrahlten Blechen durch fehlendes Haftvermögen des Klebstoffes am Blech zeigte.

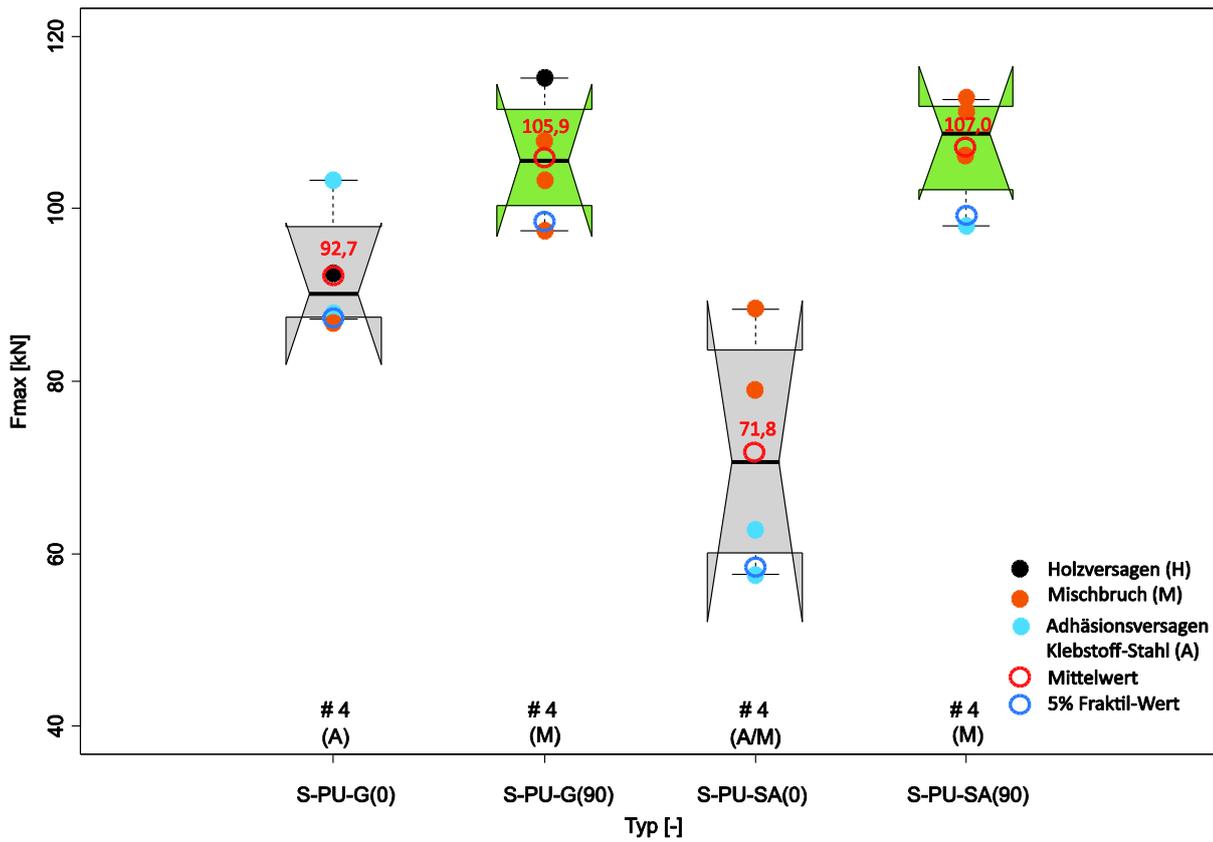


Abbildung 6.43: Tragfähigkeitsverteilung der Prüfserie 05

#### 6-9.5.4 Scherspannungen in der Klebefläche

[52]

Die Berechnung der Scherspannung in der Klebefläche erfolgte nach Gleichung (6.7). In Abbildung 6.44 ist die kleinere Streuung der auf Rollschub beanspruchten Prüfkörper ersichtlich. Durch die geringere Rollschubfestigkeit des Holzes von 1,4 N/mm<sup>2</sup> stellten sich bei 90° zur Faser geprüften Körpern mehr Holzbrüche ein, als bei in Faserrichtung beanspruchten Prüfkörpern. Die mittleren Scherspannungen (rote Kreise) der Serie G-90 und SA-90 erreichen Werte von 2,52 N/mm<sup>2</sup> bzw. 2,55 N/mm<sup>2</sup>. Damit liegen sie im Vergleich zu den in Faserrichtung beanspruchten Körpern, welche nur 2,21 N/mm<sup>2</sup> (G) bzw. 1,71 N/mm<sup>2</sup> (SA) erreichten, darüber. Die geringsten Scherspannungen von 1,33 N/mm<sup>2</sup> erreichte die sandgestrahlten Prüferserie S-PU-SA in Faserrichtung. Der Maximalwert von 2,66 N/mm<sup>2</sup> wurde bei der geschliffenen Serie S-PU-G90 erreicht. Die Tabelle 6.24 fasst die wichtigsten statistischen Kenngrößen der Scherspannungen in Abhängigkeit der Prüferserie zusammen.

*Tabelle 6.24: Statistische Kenngrößen der Scherspannung in Abhängigkeit der Prüferserie, Prüferserie 05*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-G(0)	S-PU-G(90)	S-PU-SA(0)	S-PU-SA(90)
<b>Anzahl</b>	[-]	4	4	4	4
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,04	2,25	1,33	2,26
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,39	2,66	2,04	2,60
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,16	2,45	1,66	2,47
<b>COV</b>	[%]	7,53	7,10	19,9	6,22
<b>5% Quantil</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,04	2,27	1,35	2,29

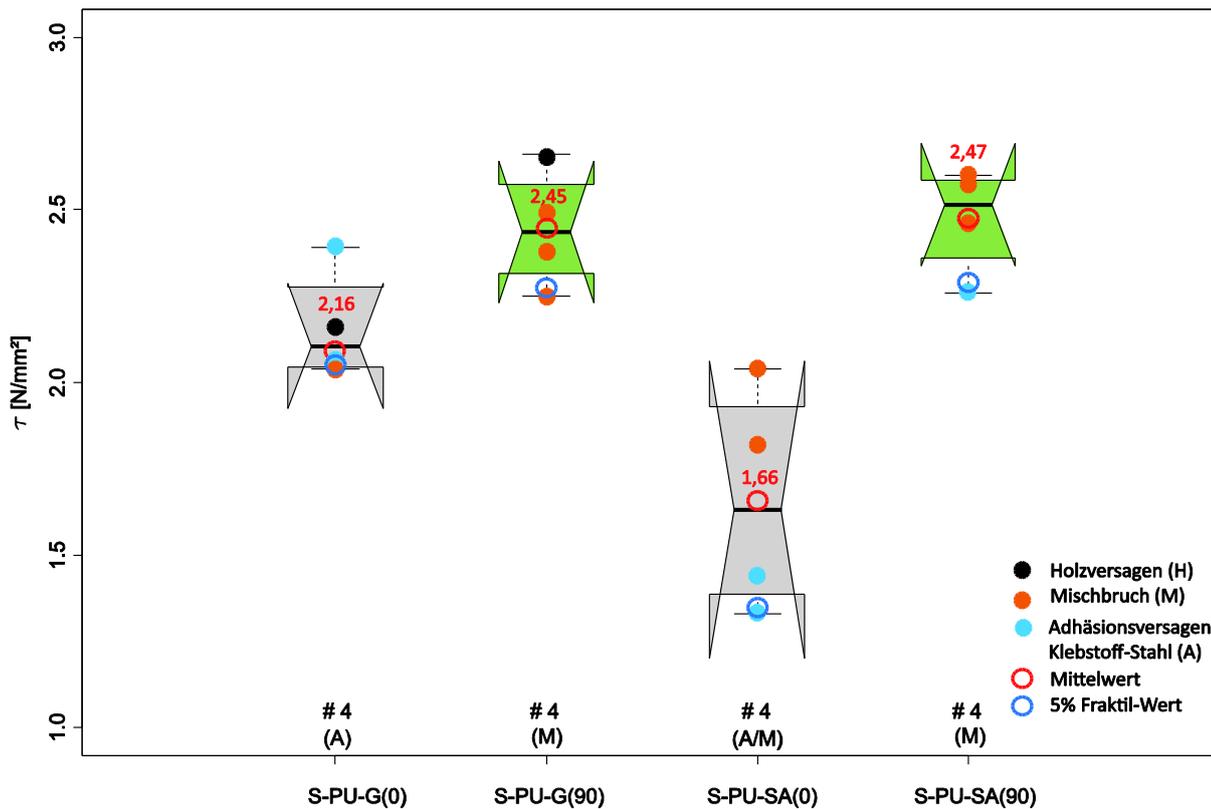


Abbildung 6.44: Scherspannungen der Prüferserie 05

### 6-9.5.5 Steifigkeit der Verbindung

Wie zuvor schon in Abschnitt 6-4.3 erwähnt, wird die Steifigkeit der Verbindung im linearen Bereich zwischen 10 % und 40 % der Lastkurve ermittelt. Die Ergebnisse der ermittelten Steifigkeiten sind in nachfolgender Tabelle angeführt.

Tabelle 6.25: Statistische Kenngrößen der Steifigkeit in Abhängigkeit der Prüferserie, Prüferserie 05

Bezeichnung	Einheit	S-PU-G(0)	S-PU-G(90)	S-PU-SA(0)	S-PU-SA(90)
<b>Anzahl</b>	[-]	4	4	4	4
<b>Min</b>	[kN/mm]	839	182	708	202
<b>Max</b>	[kN/mm]	1390	213	1510	232
<b>Mittelwert</b>	[kN/mm]	1170	198	999	214
<b>COV</b>	[%]	20,4	7,40	35,9	6,10
<b>W<sub>lok, mean</sub></b>	[mm]	0,83	1,00	0,77	0,86

Aus Abbildung 6.45 geht hervor, dass die Steifigkeiten der in Faserrichtung beanspruchten Prüfkörper der Serien G und SA größeren Streuungen von 20,4 % bzw. 35,9 % unterworfen sind und deutlich über jenen der rollschubbeanspruchten Körper liegen. Die Verschiebungsmoduln der Serien G-90 sowie SA-90 wiesen wesentlich geringere Streuungen von 7,40% bzw. 6,10 % auf.

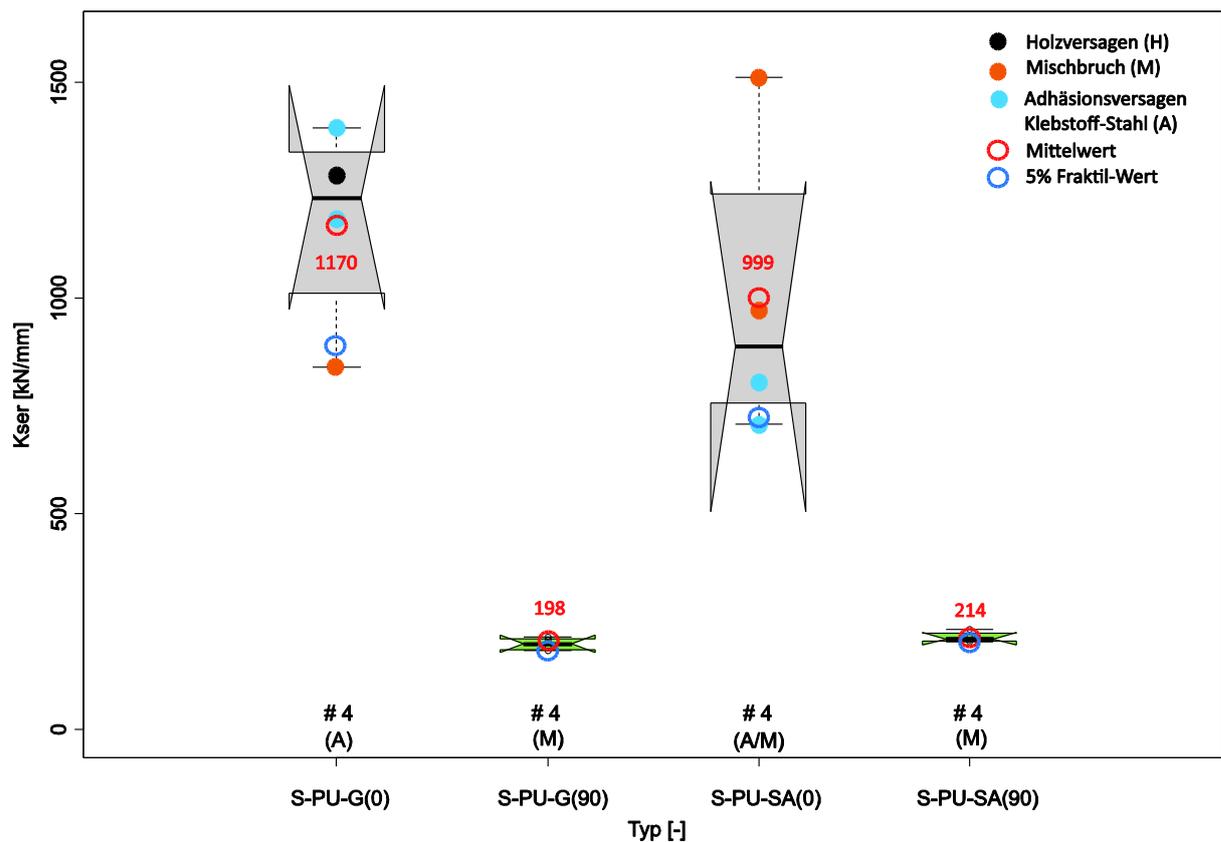


Abbildung 6.45: Steifigkeitsverteilung der Prüfserie 05

Vergleicht man nun die lokalen Last-Verschiebungskurven der einzelnen Serien aus Abbildung 6.46, fällt auf, dass keine signifikanten Steifigkeitsunterschiede zwischen den beiden Serien in Faserrichtung festzustellen sind (rot). Dies gilt ebenso für die auf Rollschub beanspruchten Prüfserien in blau dargestellt. Folglich kann gesagt werden, dass die Oberflächenbearbeitung der Bleche keinen wesentlichen Einfluss auf das Steifigkeitsverhalten hat. Vielmehr beeinflusst die Faserrichtung des Holzkörpers das Steifigkeitsverhalten der Klebeverbindung. Die in „blau“ dargestellten Linien verlaufen im Gegensatz zu den „roten“ Linien wesentlich flacher, was auf eine geringere Steifigkeit der 90° zur Faserrichtung beanspruchten Prüfkörper deuten lässt.

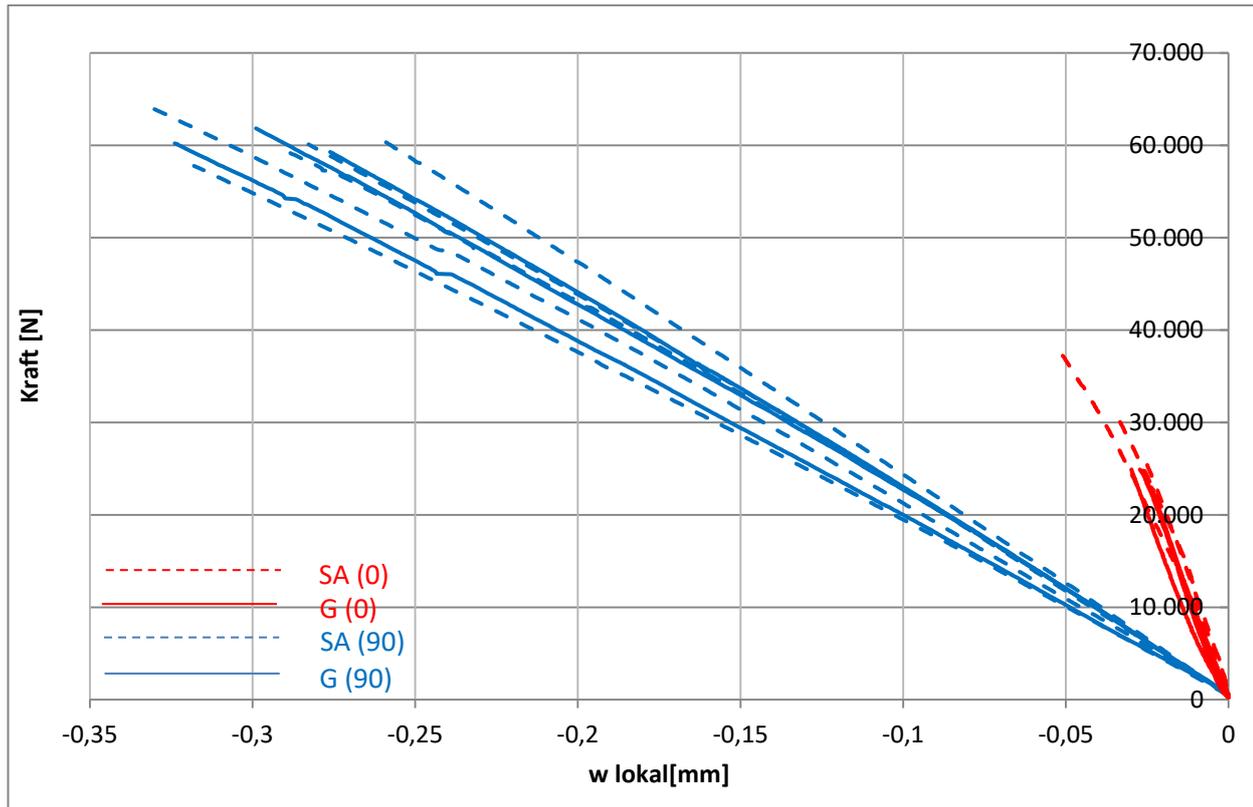


Abbildung 6.46: lokales Kraft-Weg-Diagramm, Prüfsérie 05

## 6-9.6 SCHLUSSFOLGERUNG PRÜFSERIE 05

Die Oberflächenbearbeitung hatte entgegen den Erwartungen weniger Einfluss auf die Tragfähigkeit als angenommen. Besonders innerhalb der auf Rollschub beanspruchten Prüfkörper zeigten sich keine signifikanten Unterschiede. Sehr wohl konnte man am Bruchbild der sandgestrahlten Prüfkörper in Faserrichtung ein schlechtes Adhäsionsvermögen zwischen Klebstoff und Stahl erkennen, als bei geschliffenen Blechen in Faserrichtung.

Der größte Einfluss auf die Tragfähigkeit ergab sich durch die Orientierung des Bleches in Bezug auf die Faserrichtung des Holzes. Entgegen den Erwartungen, dass sich in Faserrichtung höhere Traglasten erzielen lassen, erreichten die rollschubbeanspruchten Prüfkörper wesentlich höhere Tragfähigkeiten. Grund hierfür könnte eine zusätzliche mechanische Verzahnung der quer beanspruchten Fasern mit dem Klebstoff sein.

## 6-10 PRÜFSERIE 06 (PULL-PULL)

### 6-10.1 MATERIAL

#### 6-10.1.1 Blech

- **Aluminium**

Um eine Oberflächenperforierung der Bleche zu realisieren, wurden Aluminiumbleche eingesetzt, da sie im Vergleich zu Stahlblechen leichter zu bearbeiten sind. Die Aluminiumtafeln mit der Güte AlZnMgCu1,5 wurden auf Streifengrößen von 5 x 60 x 330 mm zugeschnitten. Die Blechstreifen wurden einer Oberflächenbearbeitung (schleifen) unterzogen. Ein Teil der Aluminiumbleche wurde mit Rundlöcher n (Ø8 mm) perforiert, um die Dübelwirkung des Klebers in den Löchern zu aktivieren.

- **Stahl**

Für die Prüfsreihe 06 wurden neben Aluminiumblechen auch Stahlbleche der Güte S 760 MC eingesetzt. Die bereits teilweise perforierten Stahlblechstreifen wurden mittels einer Bandsäge auf die Abmessungen 5 x 60 x 340 mm abgelängt. Die Oberflächenbearbeitung der Stahlbleche erfolgte neben blanken Oberflächen als geschliffene und sandgestrahlte Oberfläche. Als Perforierung kamen neben Rundlöcher mit Durchmessern von 8 mm auch Langlöcher (Ø8 mm) zum Einsatz. In Tabelle 6.26 sind die Festigkeitswerte der verwendeten Bleche aufgelistet.

*Tabelle 6.26: Prüfmaterial Prüfsreihe 06 (Festigkeitswerte laut Angaben des Herstellers)*

Werkstoff	Bezeichnung	0,2 %-Dehngrenze	Zugfestigkeit
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Aluminium	AlZnMgCu1,5	485	540
Stahl	S760 MC	760	850

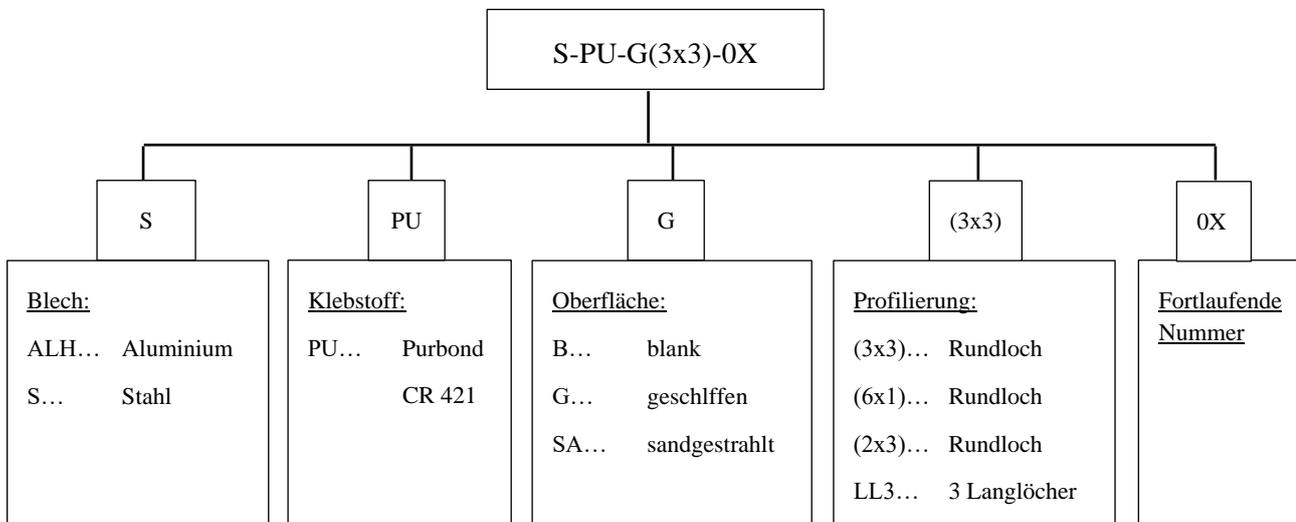
#### 6-10.1.2 Holzwerkstoff

Um das Tragvermögen der Buchenfurnierschichthölzer mit anderen Holzarten zu vergleichen, wurden für diese Prüfsreihe Prüfkörper aus Fichten-Vollholz mit den Abmessungen 60 x 60 x 380 mm hergestellt.

### 6-10.2 VERSUCHSANORDNUNG

Es wurden sieben Untergruppen innerhalb der Prüfsreihe 06 für Stahlbleche und zwei Serien für Aluminiumbleche definiert, von denen jede einer anderen Oberflächenbehandlung (blank, geschliffen, sandgestrahlt) und / oder Perforierung durch Rundlöcher oder Langlöcher unterzogen wurde. Dabei variierte die Anzahl der Prüfkörper je nach Prüfsreihe zwischen 1 und 10. Alle Prüfkörper wurden mit dem Klebstoff Purbond CR 421 und einer 1 mm dicken Klebefuge gefertigt. Ebenso waren die Einklebelänge von 100 mm und die Einklebbebreite von 60 mm bei allen Prüfkörpern ident. In Tabelle 6.11 sind die Prüfsreihen mit ihren Bezeichnungen aufgelistet.

Die Prüfkörperbezeichnungen für Zugprüfungen aus Prüfserie 06 und Prüfserie 07 werden im Folgenden erläutert:



*Tabelle 6.27: Prüfkörperbezeichnung, Prüfserie 06*

Prüfkörperbezeichnung	Blech	Oberflächenbehandlung	Klebstoff	Klebstoffdicke [mm]	Anzahl	Aushärtezeit [Tage]
<b>S-PU-B-0X</b>	Stahl	blank	PU	1	6	11 (12)*
<b>S-PU-G-0X</b>	Stahl	geschliffen	PU	1	10	18 (19)*
<b>S-PU-SA-0X</b>	Stahl	sandgestrahlt	PU	1	9	18 (19)*
<b>S-PU-G(3x3)-0X</b>	Stahl	geschliffen	PU	1	5	11 (12)*
<b>S-PU-G(6x1)-0X</b>	Stahl	geschliffen	PU	1	5	20 (21)*
<b>S-PU-SA(6x1)-0X</b>	Stahl	sandgestrahlt	PU	1	5	19 (20)*
<b>S-PU-G(3LL)-0X</b>	Stahl	geschliffen	PU	1	1	18 (19)*
<b>ALH-PU-G-0X</b>	Alu	geschliffen	PU	1	8	29 (30)*
<b>ALH-PU-G(2x3)-0X</b>	Alu	geschliffen	PU	1	3	29 (30)*

**Σ 52**

\* Die Klammerwerte beziehen sich auf die zuerst eingeklebte Seite

In Abbildung 6.47 sind alle Bleche der Prüfserie 06 mit ihren Oberflächenbehandlungen dargestellt, welche beidseitig in den Holzkörper geklebt wurden. Die Durchmesser der Perforierungen wurden nach Abbildung 6.24 analog der Prüfserie 03 hergestellt.

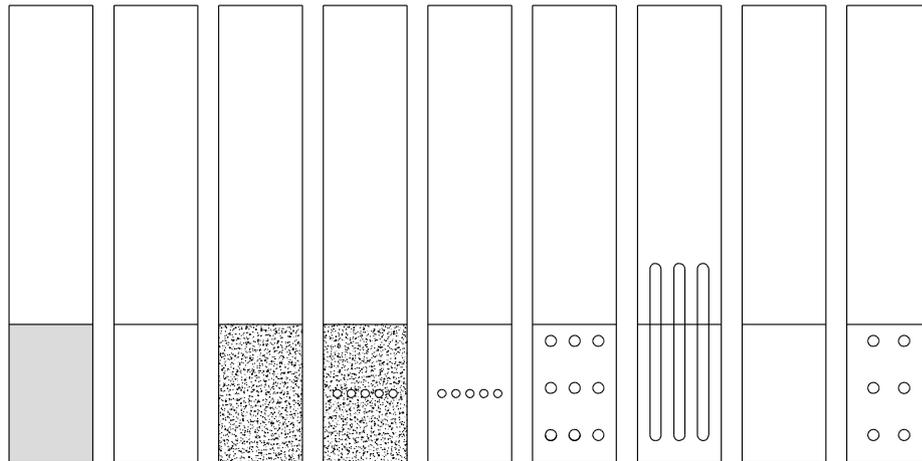


Abbildung 6.47: Oberflächenbehandlungen und Perforierung der Bleche, Prüfserie 06

### 6-10.3 PROBENVORBEREITUNG

Alle Prüfkörper wurden mit der Kreissäge auf 380 mm abgelängt und danach auf einen quadratischen Querschnitt von 60 mm x 60 mm gehobelt. Die Proben wurden laut ISO 554 in einer Klimakammer bei einer Normtemperatur von 20 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 65 % bis zu einer Holzgleichsfeuchte von 12 % gelagert. Wie in Abbildung 6.48 zu sehen, wurden anschließend in beiden Stirnflächen des Holzkörpers 7 mm breite und 100 mm tiefe Sägefugen eingeschlitzt, welche anschließend mittels Klebeband abgeklebt wurden, um ein späteres Auslaufen des Klebstoffes zu verhindern.



Abbildung 6.48: Herstellen der Prüfkörper 06

Für die Klebstoffeinbringung wurde, wie in Abbildung 6.49 ersichtlich, unter der Klebefuge ein Bohrloch mit einem Durchmesser von 7 mm seitlich in den Holzkörper gebohrt. Die Prüfkörper wurden anschließend mit Zwingen zu Paketen zusammengeklemt und durch das Bohrloch mit einem 2-Komponenten-Polyurethan-Klebstoff der Firma Purbond AG (Purbond CR 421) mittels einer Applikationspistole verklebt. Um ein Auslaufen des Klebstoffes zu verhindern, wurde das Bohrloch anschließend mit einem Holzdübel im unteren Bereich verschlossen. Die Klebefuge wies beidseitig eine Stärke von je 1 mm auf. Um Lastimperfektionen durch Schiefstellung der Bleche zu verhindern, wurde besonders auf das zentrische Einbringen dieser geachtet. Dies ließ sich durch Spaltklötze, welche seitlich in die Fuge geklemmt wurden, erreichen. Zusätzlich wurden die Bleche am unteren Ende angespitzt und in eine zuvor eingefrästen Holznut versenkt. Um eine vollständige Verklebung entlang der gesamten Klebefläche zu gewährleisten, wurden die Bleche am unteren Ende zusätzlich mit einem Winkelschleifgerät eingekerbt, um somit das Durchfließen des Klebstoffes auf die gegenüberliegende Seite des Bleches zu ermöglichen. Nach einer Trocknungszeit von etwa einem Tag, wurden die Holzkörper umgedreht und die zweiten Bleche eingeklebt. Zu beachten war, dass die Bleche vor dem einkleben durch Aceton entfettet und mittels eines Luftkompressors gesäubert werden mussten, um eine optimale Verbundwirkung mit dem Klebstoff eingehen zu können.

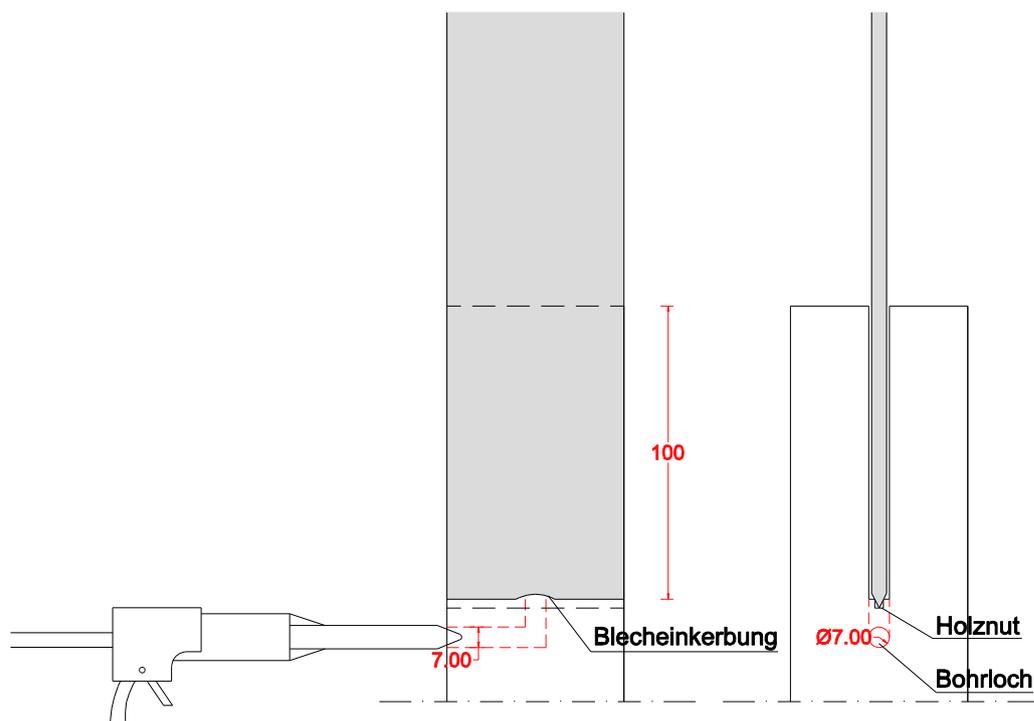


Abbildung 6.49: Einkleben der Prüfkörper 06

## 6-10.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Prüfserie 06 wurde als „Pull-Pull“-Versuch mit beidseitig eingeklebtem Blech durchgeführt. Vor dem Positionieren des Prüfkörpers zwischen die zwei hydraulischen Klemmbacken wurden, wie in Abbildung 6.51 dargestellt, an der Stirnholzoberfläche links und rechts des Bleches zwei induktive Wegaufnehmer, welche über zwei Stahllaschen am Blech befestigt wurden, angebracht. Diese wurden möglichst weit am Rand positioniert, da dort auf Grund der geringsten Vertikalverformung des Stirnholzes der maximale vertikale Verformungsunterschied zum Blech gemessen werden konnte, um in weiterer Folge die Nachgiebigkeit der Verbindung berechnen zu können. Um die reine vertikale Stahlverformung des eingeklebten Bleches von der gesamten Vertikalverformung des Prüfkörpers abziehen zu können, musste die Höhe von 30 mm zwischen Horizontalachse der Stahllaschen und der Oberkante des Stirnholzes mitberücksichtigt werden. Die Prüfkörper wurden anschließend vertikal in die Prüfmaschine zwischen die hydraulischen Klemmbacken positioniert. Dabei wurde auf die zentrische Positionierung der Flachkörper zwischen den Klemmbacken geachtet, da diese breiter waren als die Klemmvorrichtung. Die Kraftaufbringung erfolgt ohne Hysterese mit Wegsteuerung. Der Klemmdruck betrug 3 MPa. Es wurde eine Vorkraft von 200 N aufgebracht. Die Prüfgeschwindigkeiten wurden so festgelegt, dass ein Versagen des Prüfkörpers innerhalb von 300 sec auftritt. Sie wurden mit 0,2 mm/min und 0,4 mm/min je nach Probekörper angepasst. Alle Prüfkörper wurden bis zum Bruch belastet.





*Abbildung 6.51: Induktive Wegaufnehmer mit Stahllaschen, Prüfserie 06*

## 6-10.5 AUSWERTUNG

In diesem Abschnitt wird auf die Auswertung der „Pull-Pull“-Prüfungen mit Fichten-Vollholz näher eingegangen. Durch den größeren Prüfumfang pro Prüfserie erfolgte eine statistische Auswertung der Datensätze. Zudem wurden Boxplot-Diagramme mittels des Softwarepakets „R“ erstellt. Die Auswertung umfasst die Holzparameter (Rohdichte, Holzfeuchte) sowie die Darstellung der Spannungen im Stahl, Holz sowie in der Klebefläche, welche mit den Gleichungen aus Abschnitt 6-4 bestimmt wurden. Im Folgenden wurde die Steifigkeit der Verbindung mit Hilfe der Gleichungen aus Abschnitt 6-4.3 berechnet. Zudem wurde noch auf die Unterschiede der Parametereinflüsse Perforierung und Profilierung der Bleche sowie auf die unterschiedlichen Blechmaterialien eingegangen. Abschließend wurde ein Vergleich hinsichtlich der Tragfähigkeit von Holzprüfkörpern aus Fichten-Vollholz und Buchenfurnierschichtholz angestellt.

### 6-10.5.1 Holzfeuchte

Auf Grund der unterschiedlichen Holzpfosten, welche für die Probekörperherstellung verwendet wurden, war eine deutlich größere Feuchtigkeits- und Rohdichteunterschiede zu erwarten. Die Holzfeuchte lag im Bereich zwischen 11,1 % und 14,1 %. Auf Grund der teilweise großen Abweichung der Holzfeuchte, konnte ein Einfluss dieser auf die Tragfähigkeit nicht ausgeschlossen werden und wurde daher näher untersucht. Die Tabelle 6.28 schafft einen Überblick über die statistischen Kenngrößen der Holzfeuchte in Abhängigkeit der Prüfserie. In Abbildung 6.52 wird die Verteilung der Holzfeuchte mittels eines Boxplots veranschaulicht, in dem die Mittelwerte der einzelnen Prüfserien (rote Kreise) sowie 5%-Quantile (blaue Kreise) dargestellt sind.

*Tabelle 6.28: Statistische Kenngrößen der Holzfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 06*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	9	5	5
<b>Min</b>	[%]	13,3	11,1	13,2	11,6	11,5
<b>Max</b>	[%]	14,0	13,3	13,8	14,1	13,8
<b>Mittelwert</b>	[%]	13,7	12,6	13,5	12,2	12,5
<b>COV</b>	[%]	1,77	7,14%	1,44%	8,81%	7,94%
<b>5% Quantil</b>	[%]	13,4	11,2	13,2	11,6	11,6

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA(6x1)	S-PU-(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[%]	11,6	-	11,2	13,2
<b>Max</b>	[%]	13,9	-	13,9	13,8
<b>Mittelwert</b>	[%]	12,5	13,1	12,1	13,6
<b>COV</b>	[%]	8,00	-	7,66	2,55
<b>5% Quantil</b>	[%]	11,6	-	11,3	13,3

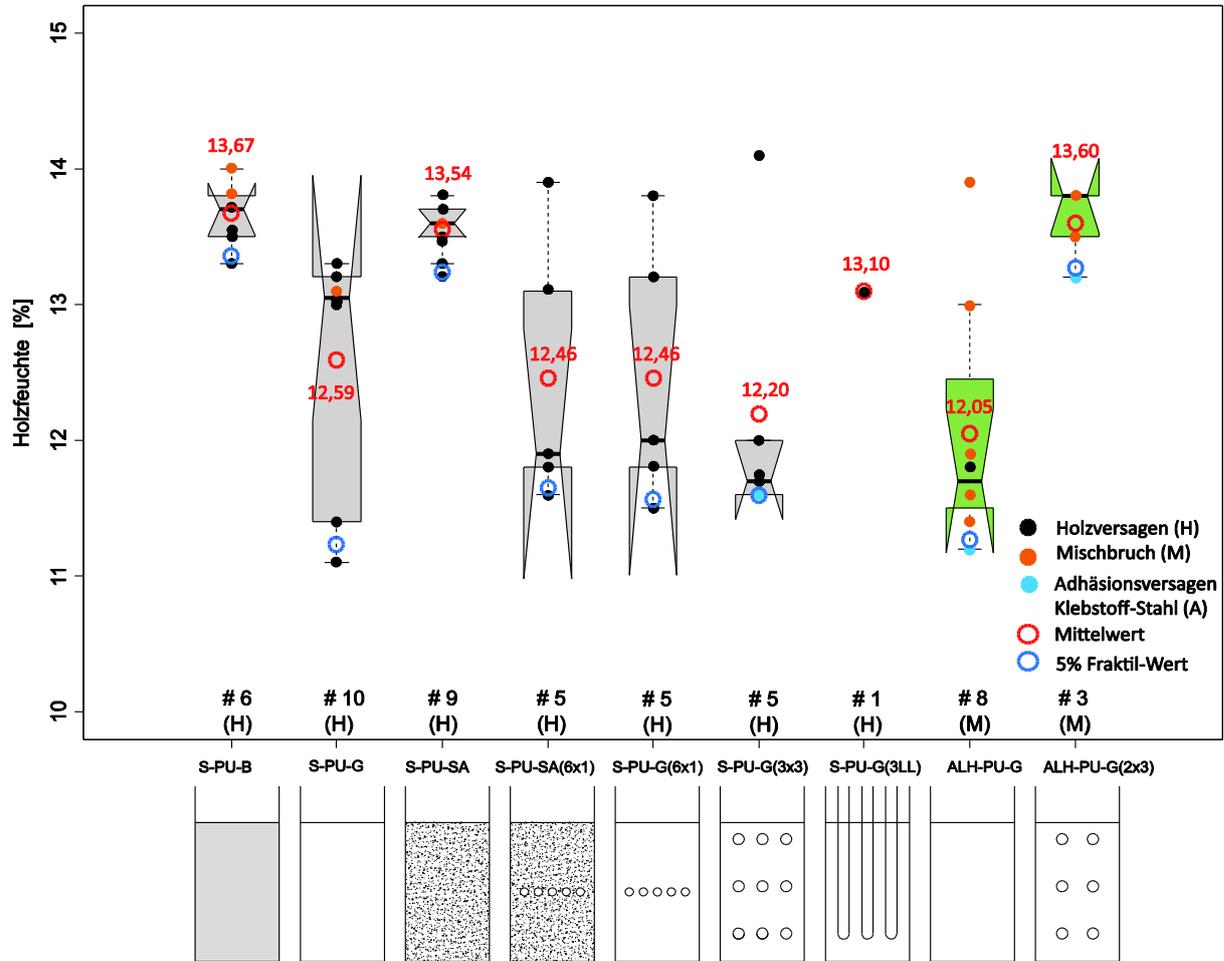


Abbildung 6.52: Holzfeuchteverteilung der Prüferserie 06

Um zu untersuchen, ob die Holzfeuchte einen Einfluss auf die Scherfestigkeit der Verbindung hat, wurde in Abbildung 6.54 die Holzfeuchteverteilung in Abhängigkeit der Scherfestigkeit dargestellt. Auf Grund der horizontal verlaufenden Trendlinie kann eine Beeinflussung der Prüfergebnisse durch die Holzfeuchte ausgeschlossen werden.

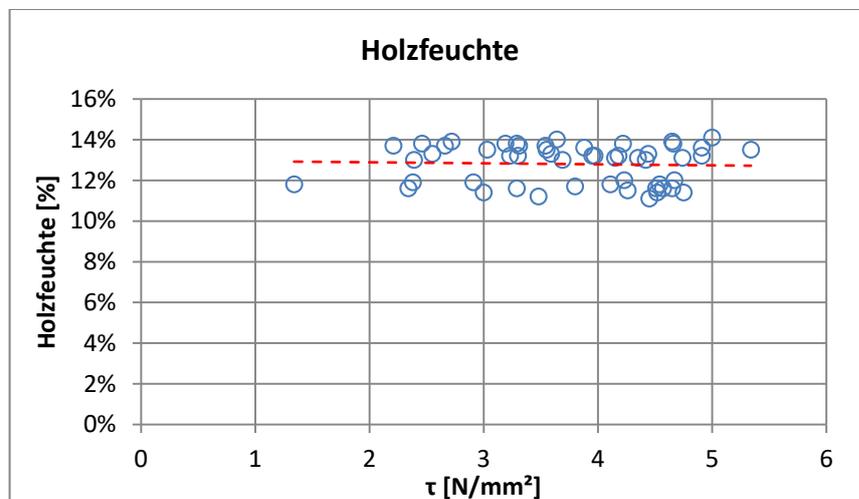


Abbildung 6.53: Holzfeuchte in Abhängigkeit der Scherfestigkeit, Prüferserie 06

## 6-10.5.2 Rohdichte

In der untenstehenden Tabelle 6.29 sind die statistischen Kenngrößen der Rohdichte aufgelistet. In Abbildung 6.54 werden die Mittelwerte jeder Prüfserie (rote Kreise) sowie die 5%-Quantile (blaue Kreise) dargestellt.

Der Minimal- bzw. Maximalwert entsprach  $381 \text{ kg/m}^3$  bzw.  $556 \text{ kg/m}^3$ .

*Tabelle 6.29: Statistische Kenngrößen der Rohdichte in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 06*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	9	5	5
<b>Min</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	389	389	390	430	381
<b>Max</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	462	468	556	460	469
<b>Mittelwert</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	425	415	449	444	425
<b>COV</b>	[%]	8,05	7,39	10,8	2,86	8,43
<b>5% Quantil</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	390	389	394	431	485

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA(6x1)	S-PU-(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	403	-	405	452
<b>Max</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	465	-	549	464
<b>Mittelwert</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	443	452	463	458
<b>COV</b>	[%]	5,62	-	11,6	1,31
<b>5% Quantil</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	409	-	408	453

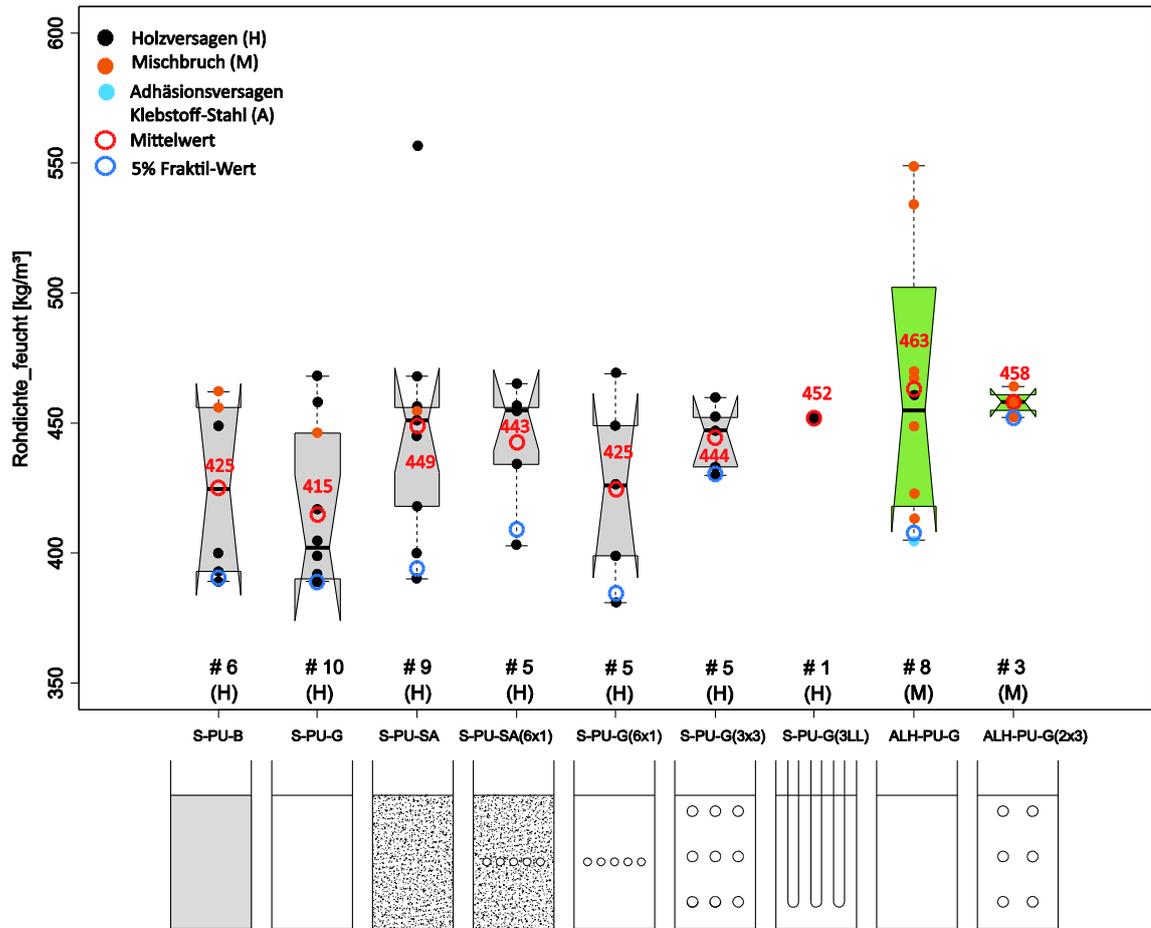


Abbildung 6.54: Rohdichteverteilung der Prüferserie 06

Um zu untersuchen, ob die Rohdichte einen Einfluss auf die Scherfestigkeit der Verbindung hat, wurde in Abbildung 6.55 die Rohdichteverteilung in Abhängigkeit der Scherfestigkeit dargestellt. Auf Grund der horizontal verlaufenden Trendlinie kann eine Beeinflussung der Prüfergebnisse ausgeschlossen werden.

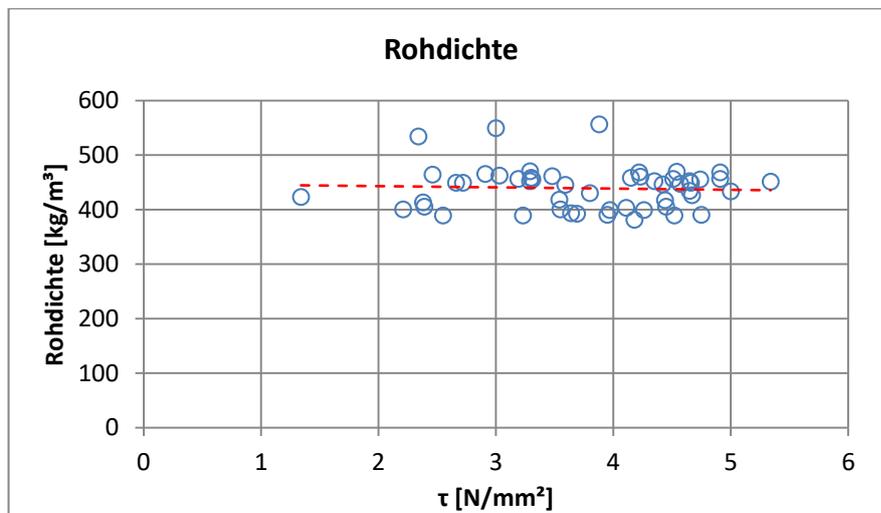


Abbildung 6.55: Rohdichte in Abhängigkeit der Scherfestigkeit, Prüferserie 06

### 6-10.5.3 Tragfähigkeit

In der folgenden Boxplot-Grafik in Abbildung 6.56 werden die Tragfähigkeitsverteilungen der Prüfserien veranschaulicht. Als Referenzprüfserie wurden Prüfkörper mit geschliffenen Stahlblechen (S-PU-B) herangezogen. Dabei wurde die Tragfähigkeit einerseits von der Oberflächenbehandlung des Bleches beeinflusst. Deutlich zu erkennen war ein Anstieg der Tragfähigkeit im Vergleich zu jenen mit blanken Oberflächen bei geschliffenen Blechen. Bei Prüfkörpern mit sandgestrahlten Blechen wurde eine geringfügig niedrigere Traglaststeigerung erzielt, als bei jenen mit geschliffenen Blechen. Dabei wird deutlich, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den Prüfkörpern mit und ohne Perforierung bestand. Die Prüfungen mit einer Lochreihe (6 x 1) und drei Lochreihen (3 x 3) sowie einer Anordnung mit Langlöchern (3LL) deuten in jedem Fall auf eine Steigerung hinsichtlich der Tragfähigkeit hin. Neben Stahlbleche wurden zudem geschliffene Aluminiumbleche eingeklebt. Diese wiesen im Vergleich zu perforierten, geschliffenen Aluminiumblechen eine um 14 % geringere Tragfähigkeit auf. Dies lässt auf die Vermutung einer Tragfähigkeitssteigerung durch Perforierung bei den Aluminiumblechen rückschließen. Um das Bruchverhalten der Prüfkörper in jeder Serie vergleichen zu können, wurden die Einzelwerte im Boxplot durch farbige Kreise (schwarz, orange, blau) gekennzeichnet, welche sich durch unterschiedliche Bruchmechanismen (Holzversagen, Mischbruch, Adhäsionsversagen zwischen Blech und Klebstoff) unterscheiden. Alle perforierten Stahlbleche wiesen durchwegs vollständige Holzscherbrüche nahe der Klebefuge auf. In Tabelle 6.30 sind die statistischen Kenngrößen der Tragfähigkeit des Holzes in Abhängigkeit der Prüfserie dargestellt.

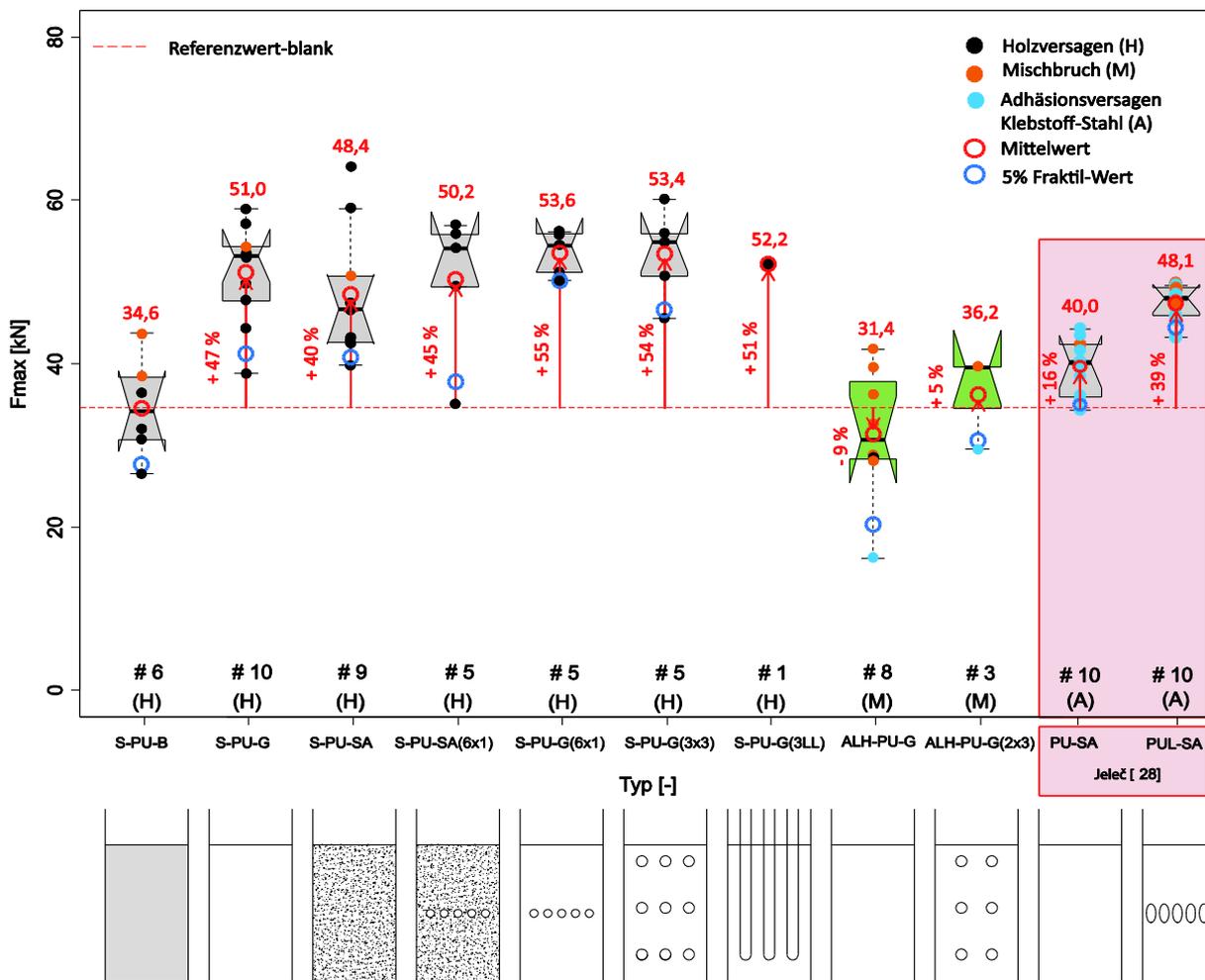


Abbildung 6.56: Tragfähigkeiten der Prüfserie 06

**Tabelle 6.30: Statistische Kenngrößen der Tragfähigkeit des Holzes in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 06**

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	9	5	5
<b>Min</b>	[kN]	26,5	38,7	39,7	45,5	50,2
<b>Max</b>	[kN]	43,7	58,9	64,1	60,0	56,1
<b>Mittelwert</b>	[kN]	34,6	51,0	48,4	53,40	53,6
<b>COV</b>	[%]	17,7	11,9	17,0	10,3	5,1
<b>5% Quantil</b>	[kN]	27,6	41,2	40,8	46,6	50,4

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA6x1)	S-PU-G(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[kN]	34,9	-	16,1	29,5
<b>Max</b>	[kN]	56,9	-	41,7	39,5
<b>Mittelwert</b>	[kN]	50,2	52,2	31,4	36,2
<b>COV</b>	[%]	18,0	-	25,7	16,0
<b>5% Quantil</b>	[kN]	37,8	-	20,3	30,5

Jeleč [28] stellte in ihrer Arbeit vergleichbare Versuche aus Buchenfurnierschichtholzkörpern mit eingeklebten sandgestrahlten Stahlblechen derselben Güte (S 760 MC), Einklebelänge (100 mm) und Prüfkörpergeometrie (60 x 60 mm) vor. Dabei wurden neben anderen Klebstofftypen auch zwei Prüfserien mit Purbond 421 CR realisiert, wovon eine Serie mit elliptischen Lochungen (siehe Abbildung 6.44) hergestellt wurde. Diese beiden Prüfserien konnten für einen Vergleich mit den Prüfkörpern in der vorliegenden Arbeit herangezogen werden. Zu beachten war jedoch die unterschiedliche Klebstofffugendicke, welche bei den Prüfkörpern von Jeleč 1,5 mm betrug und im Vergleich zu den in dieser Arbeit durchgeführten Prüfungen, welche mit 1,0 mm hergestellt wurden. Festzustellen war, dass die sandgestrahlten Prüfkörper (PU-SA) von Jeleč mit einer durchschnittlichen Tragfähigkeit von 40,0 kN deutlich geringere Tragfähigkeiten als jene der sandgestrahlten Prüfkörper aus dieser Arbeit (S-PU-SA) mit durchschnittlich 48,4 kN erzielten. Die geringeren Tragfähigkeiten von Jeleč lassen sich durch ein Adhäsionsversagen zwischen Klebstoff und Blech erklären, weshalb das Tragfähigkeitspotential der sandgestrahlten Prüfkörper nicht erreicht wurde. Die Bruchbilder der Prüfserien von Jeleč werden in Abbildung 6.58 den beiden Prüfserien der vorliegenden Arbeit gegenübergestellt. Die Prüfkörper mit elliptischen Lochungen (PUL-SA) erreichten im Vergleich dazu beinahe dieselben Traglasten (48,1 kN), wie jene Versuche mit Rundlöchern (S-PU-SA6x1), welche 50,2 kN erreichten.

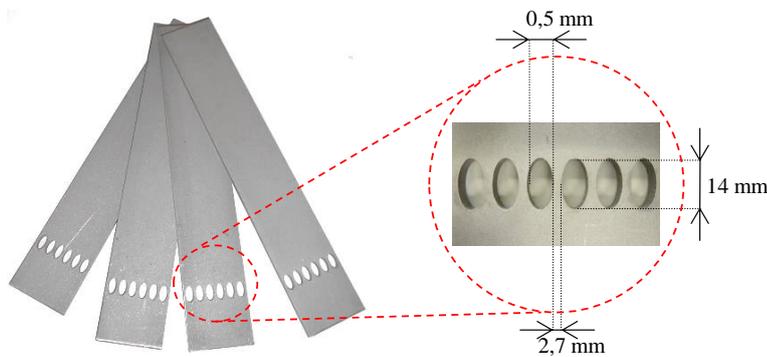


Abbildung 6.57: Geometrie der elliptischen Lochung, [28]

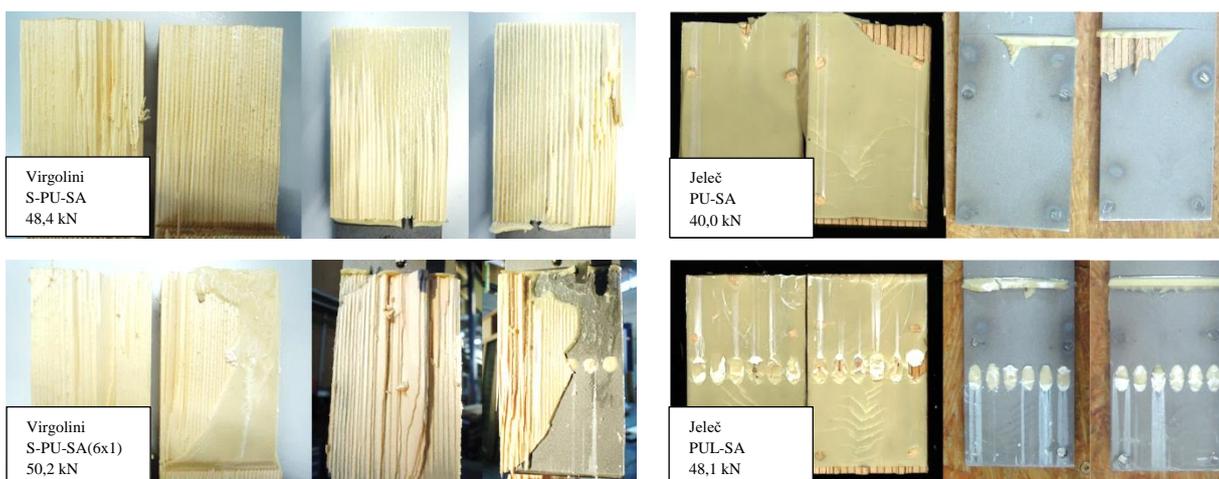


Abbildung 6.58: Bruchbilder: Virgolini (links), Jeleč (rechts), [28]

Um den Einfluss der unterschiedlichen Holzwerkstoffe der Prüfungen 03 und 06 zu erhalten, werden in Abbildung 6.59 die Tragfähigkeiten von Buchenfurnierschichtholz (grün) und Fichte Vollholz (grau) gegenübergestellt. Hierfür wurden fünf Prüfserien, welche mit gleichen Stahl- bzw. Aluminiumblechen eingeklebt wurden, für einen Vergleich herangezogen. Dabei fällt auf, dass die Aluminiumprüfkörper nahezu dieselbe Streuung sowie dieselben Mittelwerte aufweisen. Vergleicht man die Prüfkörper mit Stahlbleche, erkennt man die höheren Mittelwerte der FSH-Prüfkörper.

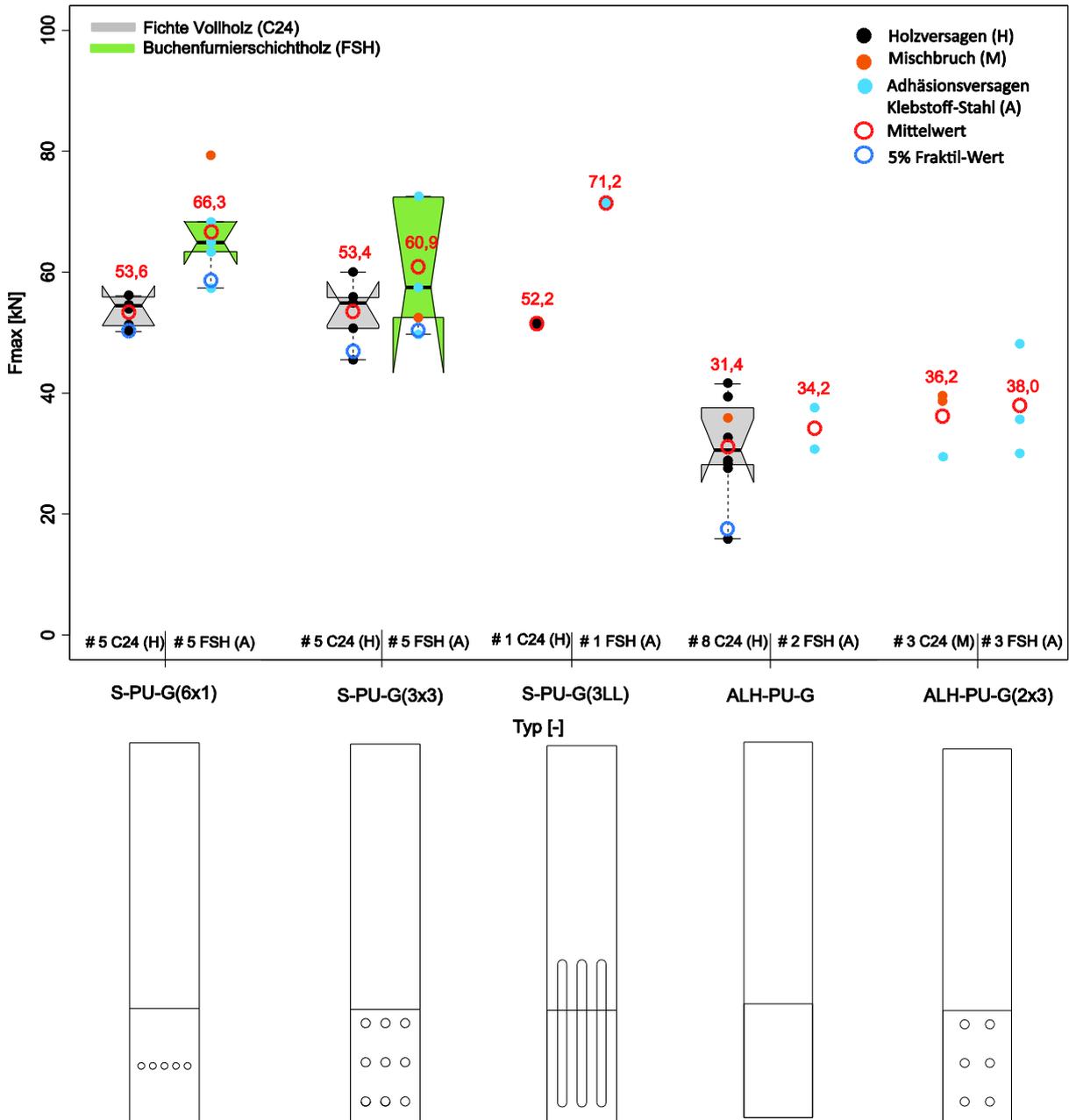


Abbildung 6.59: Tragfähigkeitsvergleich 03 und 06

### 6-10.5.4 Zugspannungen im Bruttoquerschnitt des Holzes

In Tabelle 6.31 sind die rechnerischen Zugnormalspannungen, zusammenfassend dargestellt. Das Tragvermögen des Bruttoquerschnitts ist wie in Tabelle 6.31 ersichtlich bei der gewählten Einklebelänge von 100 mm noch wenig ausgenützt.

*Tabelle 6.31: Statistische Kenngrößen der Brutto-Zugspannungen des Holzes in Abhängigkeit der Prüferie*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	9	5	5
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	7,37	10,8	11,03	12,7	13,9
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	12,1	16,4	17,8	16,7	15,6
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,60	14,2	13,4	14,8	14,9

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA6x1)	S-PU-G(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,69	-	4,47	8,19
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	15,8	-	11,6	11,0
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,9	14,5	8,92	10,0

### 6-10.5.5 Zugspannungen im Blech

In Bezug auf die 0,2%-Dehngrenze des Stahl- und Aluminiumbleches, welche laut Produktdatenblatt für diesen Stahl 760 N/mm<sup>2</sup> bzw. für dieses Aluminiumblech 485 N/mm<sup>2</sup> beträgt und als Streckgrenze  $R_{p,0.2}$  angegeben wurde, erreichten die Ausnutzungsgrade der mittleren Bruttozugspannungen bezogen auf die Streckgrenze des Bleches 15,2 % bis 24,9 %. Folglich wäre es besonders bei Stahlblechen wirtschaftlicher, Stahlgüten geringerer Festigkeit einzusetzen.

*Tabelle 6.32: Statistische Kenngrößen der Bruttozugspannungen des Bleches in Abhängigkeit der Prüfserie*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	9	5	5
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	88,4	129,1	132,4	151,8	167,2
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	146	197	214	200	187
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	115	170	161	178	179
$\sigma_{b,Stahl} / f_{t,002}$	[%]	15,2	22,4	21,2	23,4	23,5

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA6x1)	S-PU-G(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	116	-	53,7	98,3
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	190	-	139	132
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	167	174,0	105	121
$\sigma_{b,Stahl} / f_{t,002}$	[%]	22,0	22,9	21,6	24,9

## 6-10.5.6 Scherfestigkeit in der Klebefläche

Die Berechnung der Scherfestigkeit in der Klebefläche erfolgte nach Gleichung (6.6). In Tabelle 6.33 werden die rechnerischen Scherfestigkeiten der unterschiedlichen Prüfserien dargelegt. Daraus lässt sich auf den Einfluss der Lochung sowie des unterschiedlichen Blechmaterials gut rückschließen. Die Mittelwerte der Scherfestigkeit sind als rote Kreise markiert. Alle statistischen Kenngrößen sind in Tabelle 6.33 zusammengefasst.

*Tabelle 6.33: Statistische Kenngrößen der Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Untergruppen, Prüfserie 06*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	9	5	5
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,21	3,23	3,31	3,80	4,18
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,64	4,91	5,34	5,00	4,67
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,88	4,25	4,03	4,45	4,46
<b>COV</b>	[%]	17,7	11,9	17,0	10,2	5,12
<b>5% Quantil</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,30	3,44	3,40	3,89	4,20

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA(6x1)	S-PU-(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,91	-	1,34	2,46
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,74	-	3,48	3,30
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,18	4,35	2,62	3,02
<b>COV</b>	[%]	17,8	-	27,3	16,0
<b>5% Quantil</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,15	-	1,69	2,54

Die geringste Scherfestigkeit von 1,34 N/mm<sup>2</sup> erreichte die Aluminiumserie ALH-PU-G. Der Maximalwert von 5,34 N/mm<sup>2</sup> wurde bei der sandgestrahlten Serie S-PU-SA erreicht. Die größte Streuung trat bei der Aluminiumserie ALH-PU-G auf, wobei hier ein geringerer Prüfumfang mit zu berücksichtigen war. Ebenfalls große Streuungen verzeichneten die Serien S-PU-B, S-PU-SA und S-PU-S-PU-SA (6x1). Ein deutlicher Anstieg der mittleren Scherfestigkeit war bei allen oberflächenbearbeiteten und besonders bei perforierten Stahlblechen zu erkennen. Ebenso war ein Anstieg der Scherfestigkeit bei der Aluminiumserie ALH-PU-G (2x3) im Vergleich zur Aluminiumserie ALH-PU-G zu erkennen.

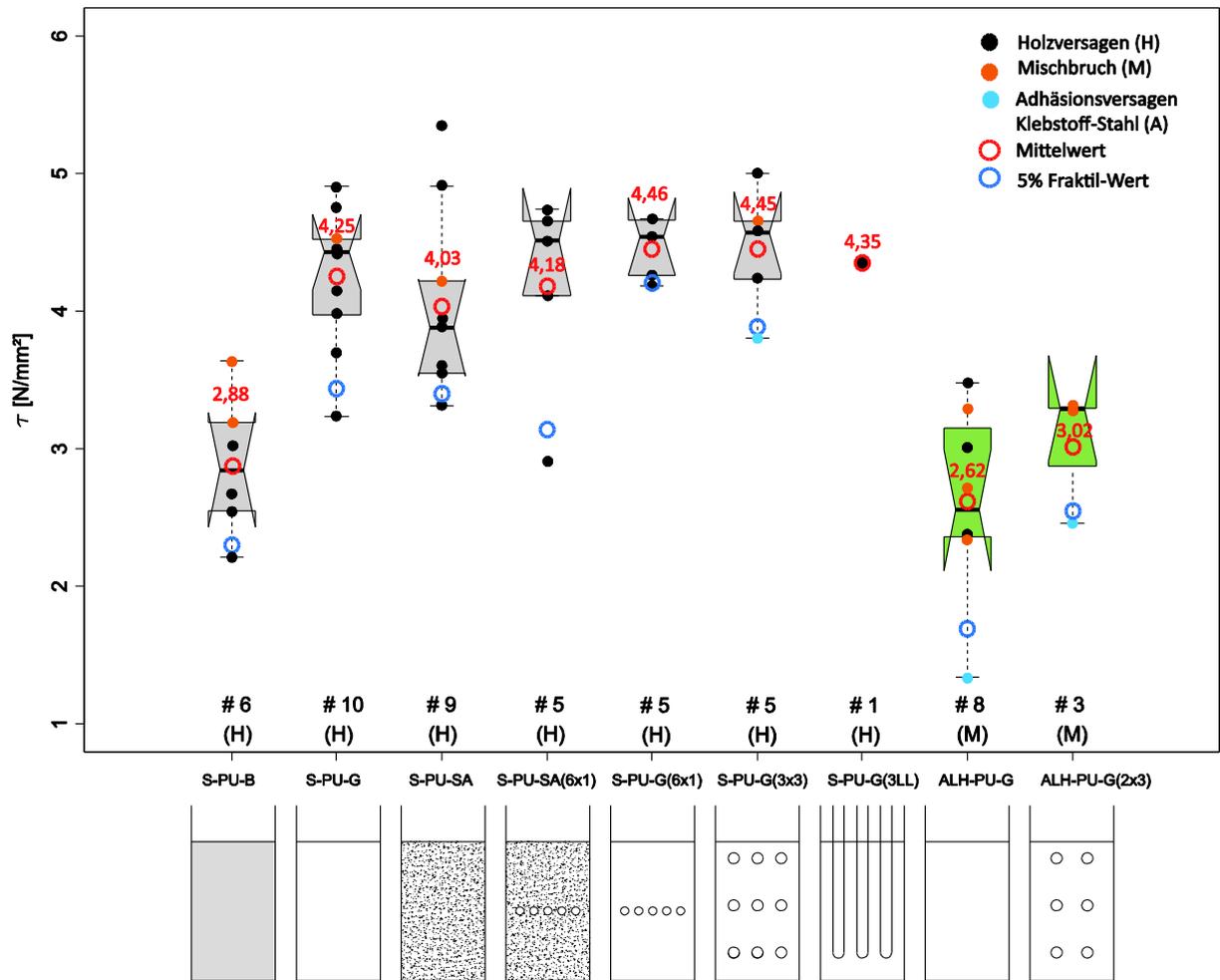


Abbildung 6.60: Scherfestigkeiten der Prüfsreihe 06

Um den Einfluss des Holzwerkstoffes auf die Scherspannungen zu erhalten, zeigt Abbildung 6.61 eine Gegenüberstellung von Buchenfurnierschichtholz- und Vollholzkörpern aus Fichte. Hierbei wiesen die Buchenfurnierschichtholzkörper höhere mittlere Scherfestigkeiten auf. Für die Serien G(6x1) und G(3LL) ist anzunehmen, dass durch die aufgebrachtten Schellen an den Vollholzkörpern die etwa selben Mittelwerte erreicht wurden.

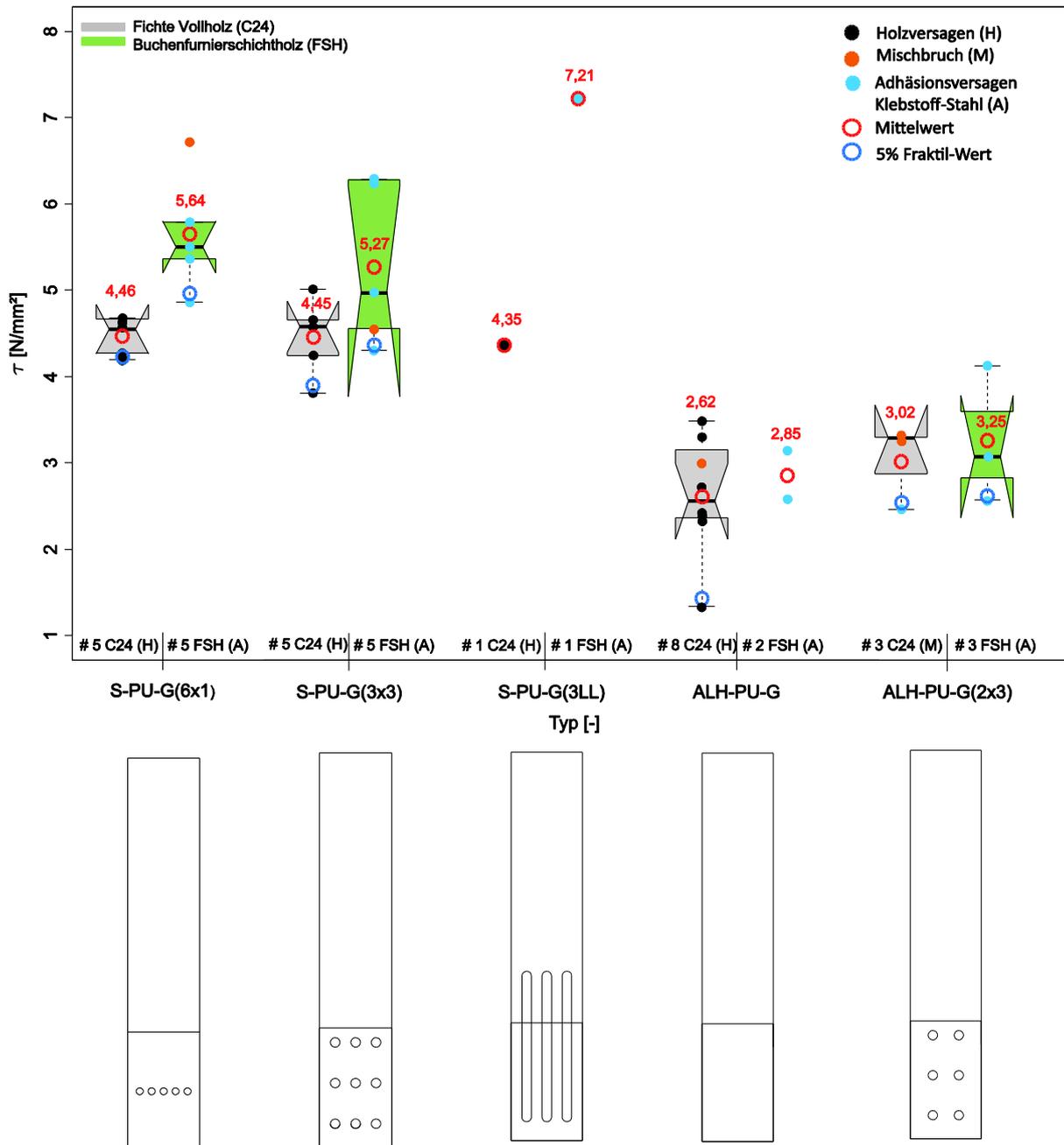


Abbildung 6.61: Scherspannungsvergleich Prüferserie 03 und 06

### 6-10.5.7 Steifigkeit der Verbindung

Wie zuvor schon in Abschnitt 6-4.3 erwähnt, wurde die Steifigkeit der Verbindung im linearen Bereich zwischen 10 % und 40 % der Lastkurve ermittelt. Hierfür wurde eine Regressionsgerade aus dem lokalen durchschnittlichen  $K_{ser}$ -Wert nach Abschnitt 6-4.3 ermittelt, welcher nur die Verformungen der Verbindung einschließt. Die Dehnungen des Bleches im Bereich zwischen Stirnholz und Achse des Wegaufnehmers wurden im Vorhinein abgezogen.

Die Steifigkeiten der Prüfserien mit Stahlbleche wiesen durchwegs nahezu gleiche Mittelwerte auf. Einzig die Prüfserie mit drei Langlöchern (3LL) zeigte Abweichungen von rund 100.000 N/mm auf, da sich durch die wesentlich geringere Nettofläche des Stahls auf Grund der Langlöcher die Nachgiebigkeit der Verbindung erhöhte. Jene Prüfkörper mit perforierten Aluminiumblechen (G 2x3) wiesen geringfügig kleinere Steifigkeitswerte als im Vergleich zu geschliffenen Blechen (G) auf. Der Prüfkörper 3 der Serie (G 2x3) wurde auf Grund einer fehlerhaften Wegaufnehmerbefestigung als Ausreißer behandelt und floss daher nicht in die Auswertung mit ein.

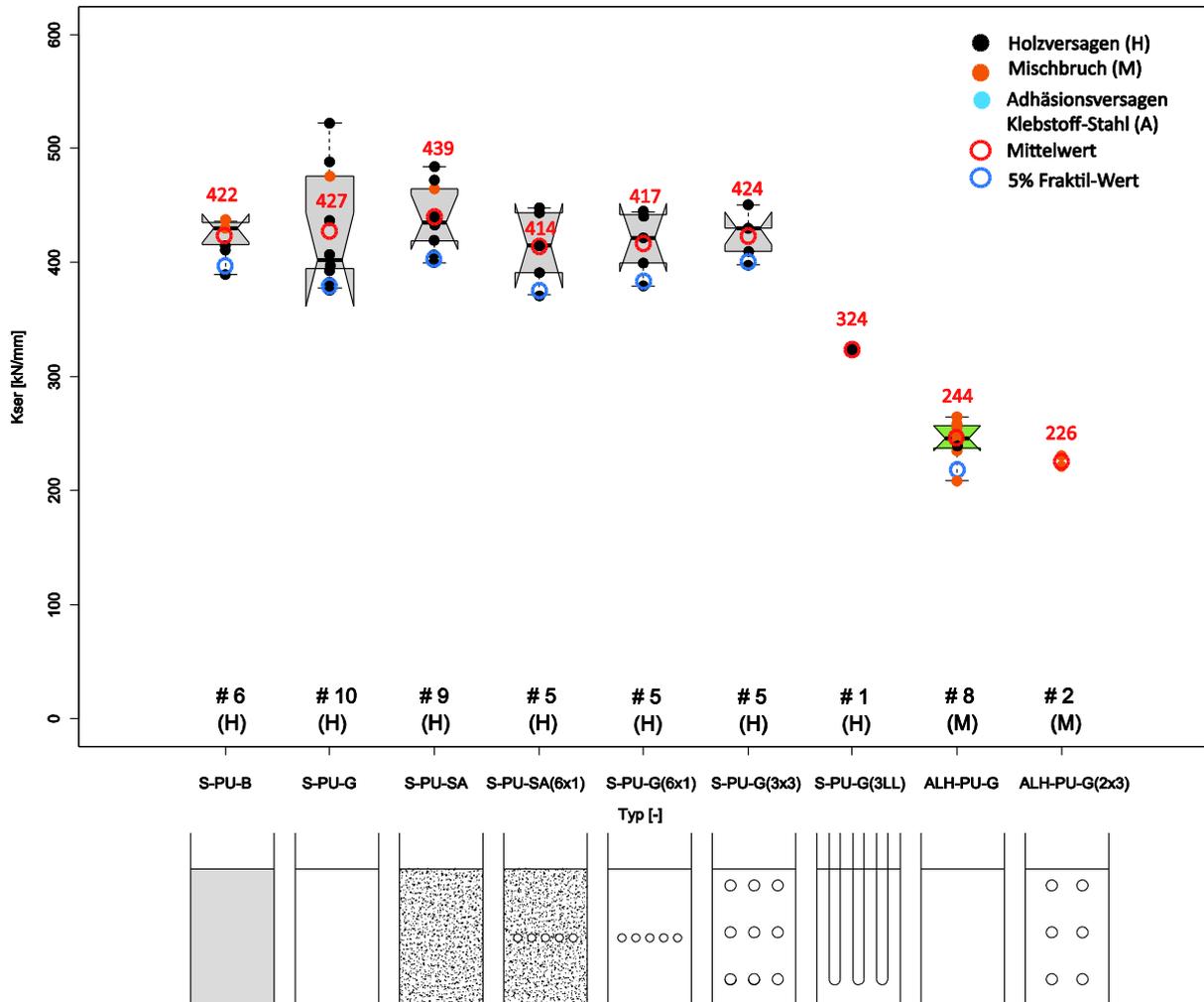


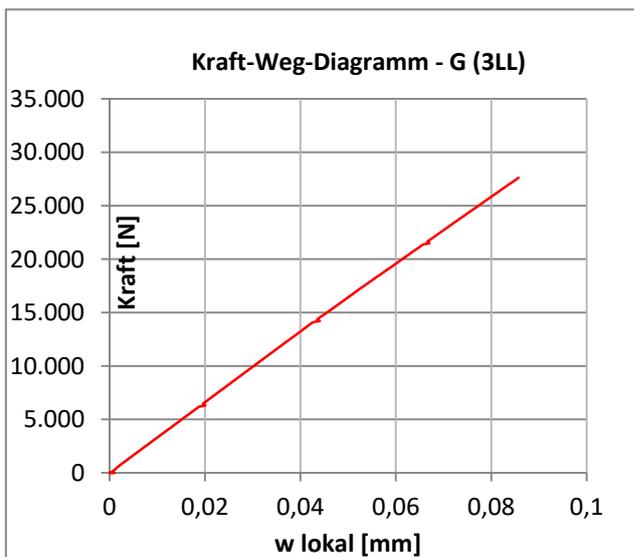
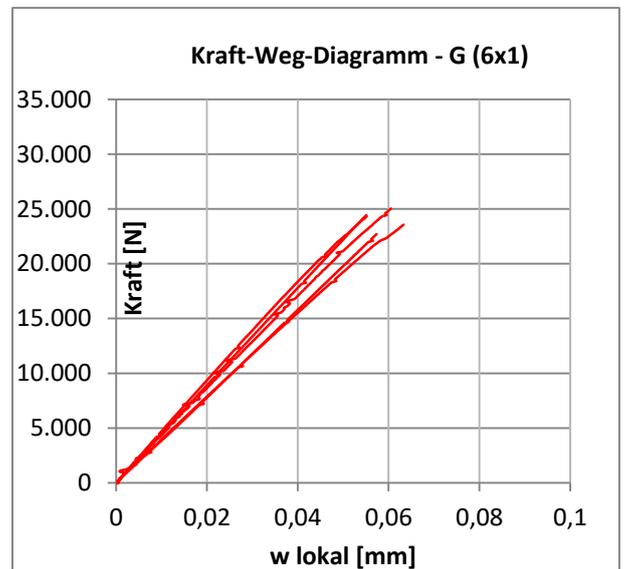
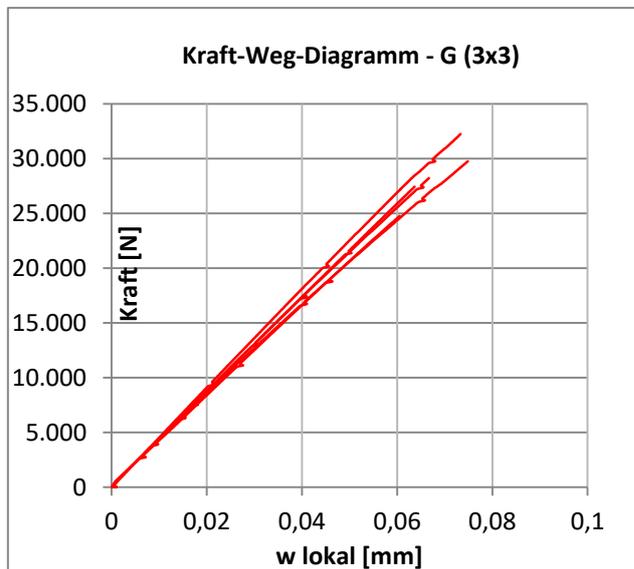
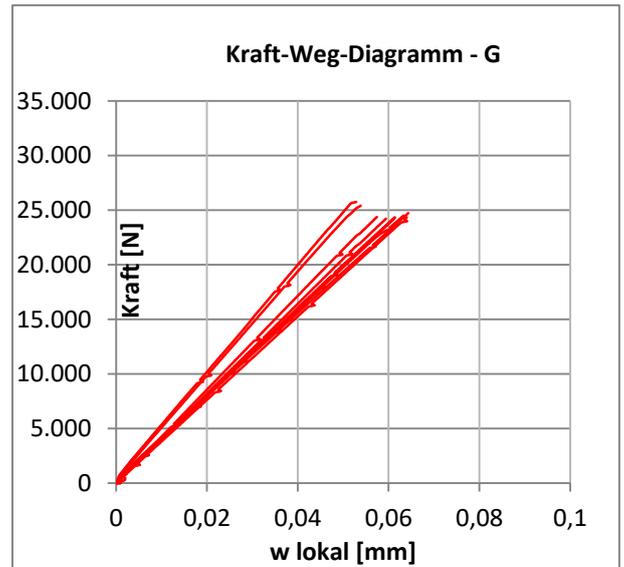
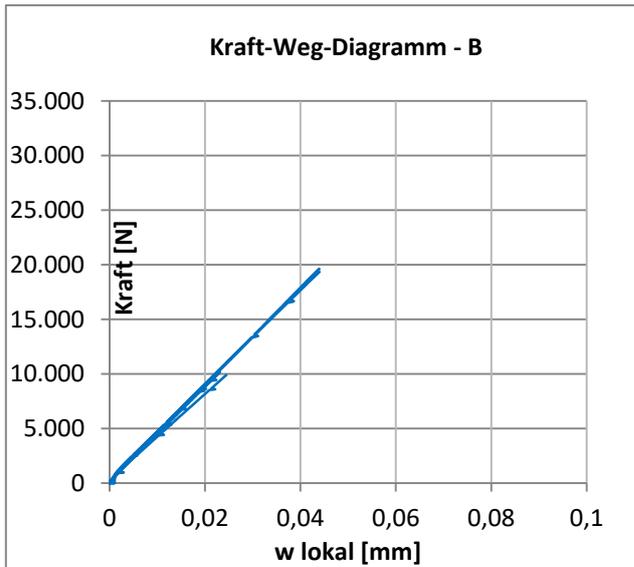
Abbildung 6.62: Steifigkeitsverteilung (bereinigt), Prüfserie 06

Tabelle 6.34: Statistische Kenngrößen der Steifigkeit in Abhängigkeit der Prüfserie

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	9	5	5
<b>Min</b>	[kN/mm]	390	378	400	398	379
<b>Max</b>	[kN/mm]	436	522	484	450	444
<b>Mittelwert</b>	[kN/mm]	422	427	439	424	417
<b>COV</b>	[%]	4,23	11,8	6,71	4,74	6,66
<b>W<sub>lok, mean</sub></b>	[mm]	0,03	0,06	0,06	0,07	0,06

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA(6x1)	S-PU-(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	2
<b>Min</b>	[kN/mm]	372	-	209	221
<b>Max</b>	[kN/mm]	448	-	264	231
<b>Mittelwert</b>	[kN/mm]	414	324	244	226
<b>COV</b>	[%]	7,91	-	7,08	2,95
<b>W<sub>lok, mean</sub></b>	[mm]	0,06	0,09	0,05	0,06

In Abbildung 6.63 sind die lokalen Last-Verschiebungskurven jeder Prüfserie dargestellt. Hierfür wurde der durchschnittliche Verformungsweg beider induktiver Wegaufnehmer herangezogen. Für perforierte Stahlbleche, besonders bei jenen mit Langlöchern, ergaben sich im Durchschnitt geringfügig flachere Steigungen der Regressionsgeraden als es bei nicht perforierten Stahlblechen der Fall war. Vergleicht man die Stahl-Prüfkörper mit den Aluminium-Prüfkörpern fällt jedoch ein signifikanter Steifigkeitsunterschied ins Auge, der darauf hinweist, dass Aluminium durch sein duktileres Verhalten eine wesentlich nachgiebigere Verbindung darstellt. Dies ist durch die flachere Neigung der Geraden deutlich zu erkennen. Da geklebte Verbindungen im Allgemeinen sehr steife Verbindung darstellen, bewegten sich die Verformungen nur im hundertstel Millimeter Bereich (0,03 mm bis 0,09 mm).



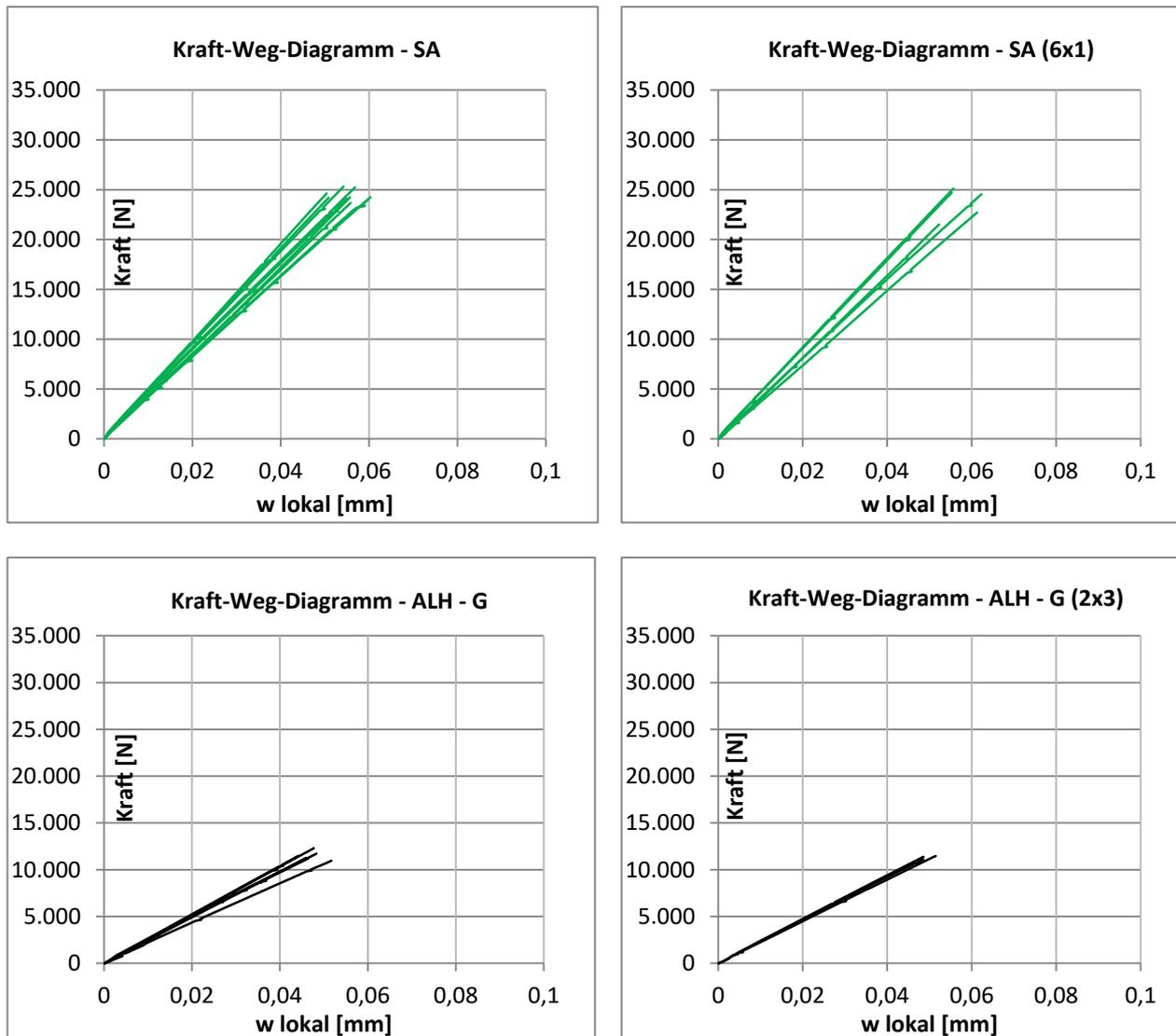


Abbildung 6.63: lokale Kraft-Verschiebungsdiagramme, Prüfsrie 06

## 6-10.6 SCHLUSSFOLGERUNG PRÜSERIE 06

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Oberflächenbehandlung der Bleche durch Schleifen und Sandstrahlen eine deutliche Traglaststeigerung mit sich brachte. Zusätzliche Perforierungen durch Rundlöcher und Langlöcher trugen zu einer weiteren Laststeigerung bei. Hinsichtlich der Bruchflächen, welche sich bei Prüfkörpern mit Stahlblechen durchwegs als Holzbrüche nahe der Klebefuge einstellten, war eine maximale Ausnützung der Festigkeitswerte des Fichten-Vollholzes zu erkennen. Betrachtete man die Aluminium-Prüfkörper, erkannte man an den Bruchflächen ein schlechtes Adhäsionsvermögen zwischen Klebstoff und Stahl, wodurch auch weniger hohe Traglasten erreicht wurden. Das Steifigkeitsverhalten der Prüfsrie mit Stahlblechen verhielt sich durchwegs gleich. Bei größeren Perforierungen, wie Langlöcher, zeigte das Last-Verschiebungsdiagramm jedoch ein nachgiebigeres Verhalten.

## 6-11 PRÜFSERIE 07 (PUSH-PULL)

### 6-11.1 VERSUCHSANORDNUNG

Für die Prüfsreihe 07 wurden die noch intakten Prüfkörper der Prüfsreihe 06 herangezogen. Dabei ergaben sich, wie in Tabelle 6.35 ersichtlich, sieben Prüfsreihen für Stahlbleche und zwei für Aluminiumbleche. Die Anzahl der Versuchskörper pro Serie bewegte sich zwischen 1 und 10.

*Tabelle 6.35: Prüfkörperbezeichnung Prüfsreihe 07*

Prüfkörper- bezeichnung	Blech	Oberflächen- behandlung	Klebstoff	Klebstoff- dicke [mm]	Anzahl	Aushärtezeit [Tage]
S-PU-B-0X_A	Stahl	blank	PU	1	6	13 (14)*
S-PU-G-0X_A	Stahl	geschliffen	PU	1	10	20 (21)*
S-PU-SA-0X_A	Stahl	sandgestrahlt	PU	1	8	20 (21)*
S-PU-G(3x3)-0X_A	Stahl	geschliffen	PU	1	5	13 (14)*
S-PU-G(6x1)-0X_A	Stahl	geschliffen	PU	1	5	22 (23)*
S-PU-SA(6x1)-0X_A	Stahl	sandgestrahlt	PU	1	5	21 (22)*
S-PU-G(3LL)-0X_A	Stahl	geschliffen	PU	1	1	20 (21)*
ALH-PU-G-0X_A	Alu	geschliffen	PU	1	8	31 (32)*
ALH-PU-G(2x3)-0X_A	Alu	geschliffen	PU	1	3	31 (32)*

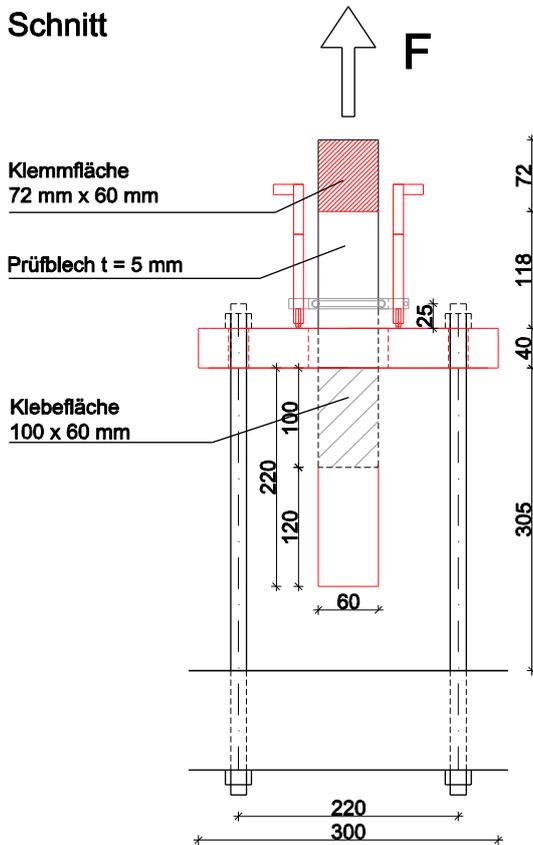
Σ 51

\* Die Klammerwerte beziehen sich auf die zuerst eingeklebte Seite

### 6-11.2 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die unbeschädigten Prüfkörper aus Prüfung V06 wurden auf eine Länge von 220 mm abgelängt und als „Push-Pull“-Prüfkörper in die Universalprüfmaschine einseitig mittels hydraulischer Klemmbacken zentrisch eingespannt. Die Klemmfläche variierte je nach Blechmaterial und wurde bei Stahlblechen mit 60 mm x 72 mm bzw. bei Aluminiumblechen mit 60 mm x 60 mm festgelegt. Der Holzkörper wurde über eine 40 mm dicke Stahlplatte mittels vier Gewindeschrauben Ø16 nach unten verankert. Um die vertikalen Verformungen des Stirnholzes zu erfassen, wurden zwei induktive Wegaufnehmer über Laschen am Stahlblech befestigt, welche auf die Oberfläche der horizontalen Stahlplatte die Verformungen des Holzes maßen. Das eingeklebte Blech wurde über die hydraulischen Klemmbacken mit einer Zugkraft von 150 kN herausgezogen. Die Kraftaufbringung erfolgte ohne Hysterese. Die Prüfgeschwindigkeit wurde den jeweiligen Prüfkörpern so angepasst, dass ein Versagen innerhalb von 300 s auftrat und betrug je nach Prüfkörper 0,2 mm/min, 0,3 mm/min bzw. 0,4 mm/min. Die Abbildung

6.64 bietet eine Übersicht über die schematische Darstellung des Prüfaufbaues sowie der Positionierung der induktiven Wegaufnehmer.



**Grundriss**

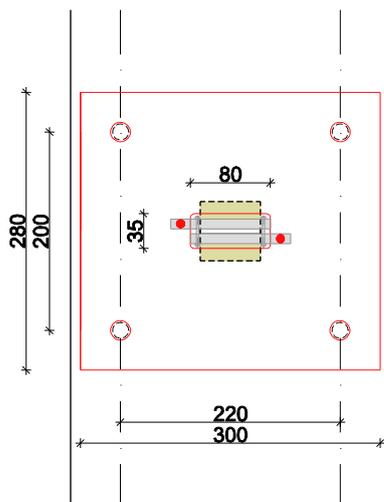


Abbildung 6.64: „Push-Pull“-Prüfserie 07: schematische Darstellung (links); Position der induktiven Wegaufnehmer (rechts)

## 6-11.3 AUSWERTUNG

Um den Einfluss der unterschiedlichen Randbedingungen von der „Push-Pull“-Prüfkonfiguration mit den „Pull-Pull“-Prüfkörpern vergleichen zu können, wurden im Folgenden eine Auswertung für die Prüfsreihe 07 durchgeführt.

### 6-11.3.1 Tragfähigkeit

In Abbildung 6.65 sind die Tragfähigkeiten der „Push-Pull“-Prüfkörper ersichtlich. Hierbei fielen die ähnlichen Mittelwerte der Prüfsreihen untereinander ins Auge. Auffällig waren die hohen Tragfähigkeiten der Aluminium-Prüfkörper, welche mit bis zu 25 % deutlich über jenen der „Pull-Pull“-Prüfungen lagen.

Hinsichtlich des Bruchbildes der Klebefugen ließen sich bei Prüfkörpern mit oberflächenbehandelten und perforierten Blechen durchwegs Holzbrüche nahe der Klebefuge feststellen. Bei den blanken Referenzprüfkörpern mit Stahlblechen und den Aluminiumblechen waren neben Holzbrüchen auch Mischbrüche zu erkennen, was auf ein ungenügendes Adhäsionsvermögen zwischen Stahl und Klebstoff schließen ließ. In Tabelle 6.36 wurden die statistischen Kenngrößen der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Verbindung dargestellt.

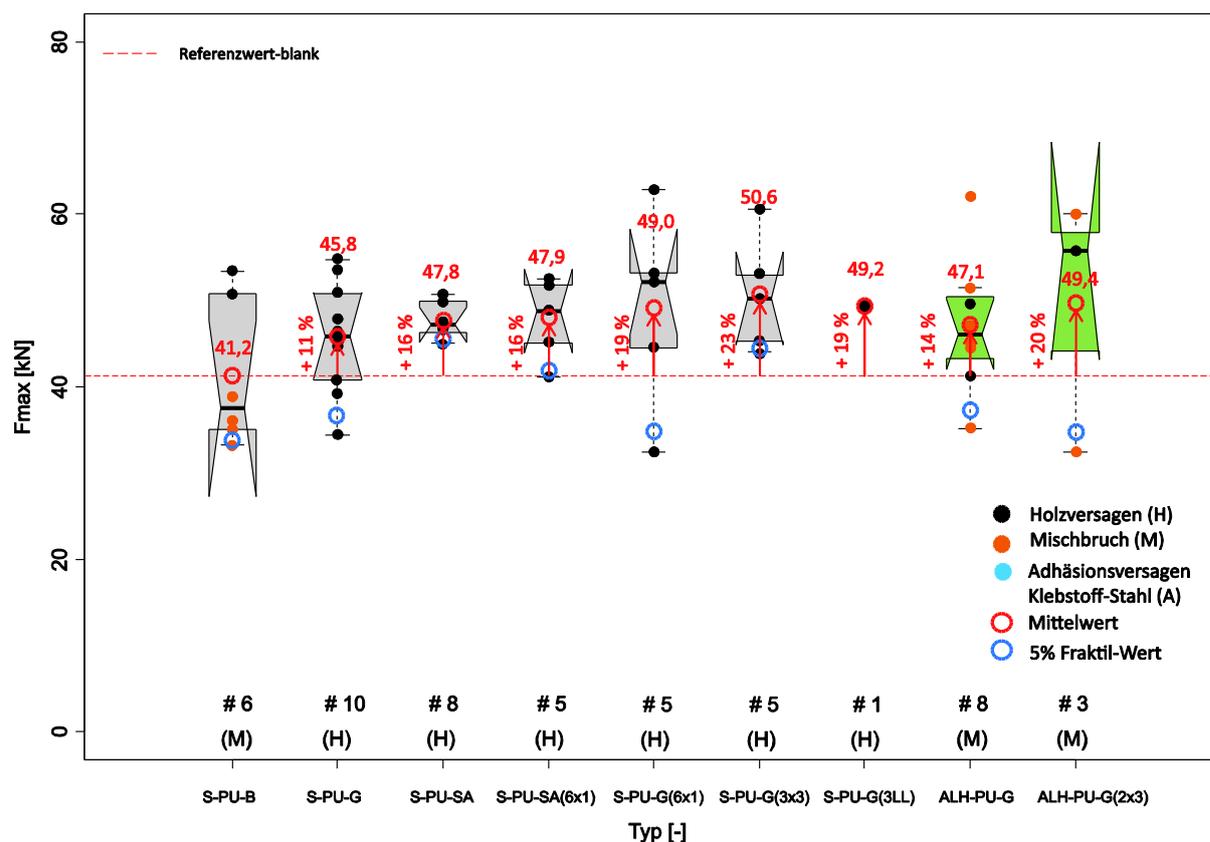


Abbildung 6.65: Tragfähigkeiten der Prüfsreihe 07

Tabelle 6.36: Statistische Kenngrößen der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Untergruppen, Prüfsreihe 07

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	8	5	5
<b>Min</b>	[kN]	33,3	34,3	45,0	44,0	32,5
<b>Max</b>	[kN]	53,4	54,7	50,6	60,6	62,8
<b>Mittelwert</b>	[kN]	41,2	45,8	47,8	50,6	49,0
<b>COV</b>	[%]	20,9	14,1	4,3	13,2	23,1
<b>5% Quantil</b>	[kN]	33,7	36,5	45,7	44,3	34,9

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA6x1)	S-PU-G(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[kN]	41,1	-	35,2	32,5
<b>Max</b>	[kN]	52,5	-	62,1	60,0
<b>Mittelwert</b>	[kN]	47,6	49,2	47,1	49,4
<b>COV</b>	[%]	10,0	-	16,7	30,0
<b>5% Quantil</b>	[kN]	41,9	-	37,3	34,8

### 6-11.3.2 Zugspannungen im Bruttoquerschnitt des Holzes

In Tabelle 6.37 sind die rechnerischen Zugnormalspannungen, zusammenfassend dargestellt. Das Tragvermögen des Bruttoquerschnitts ist wie in Tabelle 6.37 ersichtlich, bei der gewählten Einklebelänge von 100 mm noch wenig ausgenützt.

*Tabelle 6.37: Statistische Kenngrößen der Bruttozugspannung des Holzes in Abhängigkeit der Prüfserie*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	8	5	5
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	9,24	9,53	12,5	12,2	9,02
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,8	15,2	14,1	16,8	17,5
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	11,5	12,7	13,3	14,1	13,6

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA6x1)	S-PU-G(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	11,4	-	9,77	9,02
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	14,6	-	17,3	16,7
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	13,3	16,7	13,1	13,7

### 6-11.3.3 Zugspannungen im Stahl

In Bezug auf die 0,2%-Dehngrenze des verwendeten Stahl- und Aluminiumbleches, welche laut Produktdatenblatt für diesen Stahl 760 N/mm<sup>2</sup> bzw. für dieses Aluminiumblech 485 N/mm<sup>2</sup> beträgt und als Streckgrenze  $R_{p,0.2}$  angegeben wurde, erreichten die Ausnutzungsgrade der mittleren Brutto-Stahlspannungen bezogen auf die Streckgrenze des Bleches 18,1 % bis 34,0 %.

*Tabelle 6.38: Statistische Kenngrößen der Bruttozugspannungen des Stahls in Abhängigkeit der Prüfserie*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	8	5	5
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	111	114	150	147	108
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	178	182	169	202	209
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	137	153	159	169	163
$\sigma_{b,Stahl} / f_{t,0.02}$	[%]	18,1	20,1	21,0	22,2	21,5

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA(6x1)	S-PU-G(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	137	-	117	108
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	175	-	207	200
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	160	164	157	165
$\sigma_{b,Stahl} / f_{t,0.02}$	[%]	21,0	21,6	32,4	34,0

### 6-11.3.4 Scherspannungen in der Klebefläche

Die Berechnung der Scherfestigkeit in der Klebefläche erfolgte nach Gleichung (6.6). In Abbildung 6.66 wurden die rechnerischen Scherspannungen der unterschiedlichen Prüfserien dargelegt. Daraus lässt sich auf den Einfluss der Lochung sowie des unterschiedlichen Blechmaterials gut rückschließen. Die Mittelwerte der Scherfestigkeiten sind als rote Kreise markiert. Alle statistischen Kenngrößen sind in Tabelle 6.39 zusammengefasst.

*Tabelle 6.39: Statistische Kenngrößen der Scherspannungen in Abhängigkeit der Prüfserie*

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	8	5	5
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,77	2,86	3,75	3,67	2,71
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,45	4,56	4,22	5,05	5,24
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,44	3,82	3,99	4,22	4,09
<b>COV</b>	[%]	21,0	14,1	4,31	13,1	23,1
<b>5% Quantil</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,81	3,04	3,79	3,69	2,91

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA(6x1)	S-PU-(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,43	-	2,93	2,71
<b>Max</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,37	-	5,18	5,00
<b>Mittelwert</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,99	4,10	3,93	4,12
<b>COV</b>	[%]	9,91	-	16,7	29,9
<b>5% Quantil</b>	[N/mm <sup>2</sup> ]	3,50	-	3,11	2,90

Die geringste Scherfestigkeit von 2,71 N/mm<sup>2</sup> erreichte die Aluminiumserie ALH-PU-G(2x3). Der Maximalwert von 5,24 N/mm<sup>2</sup> wurde bei der geschliffenen Serie S-PU-G(6x1) erreicht. Die größte Streuung mit 29,9 % trat bei der Aluminiumserie ALH-PU-G(2x3) auf.

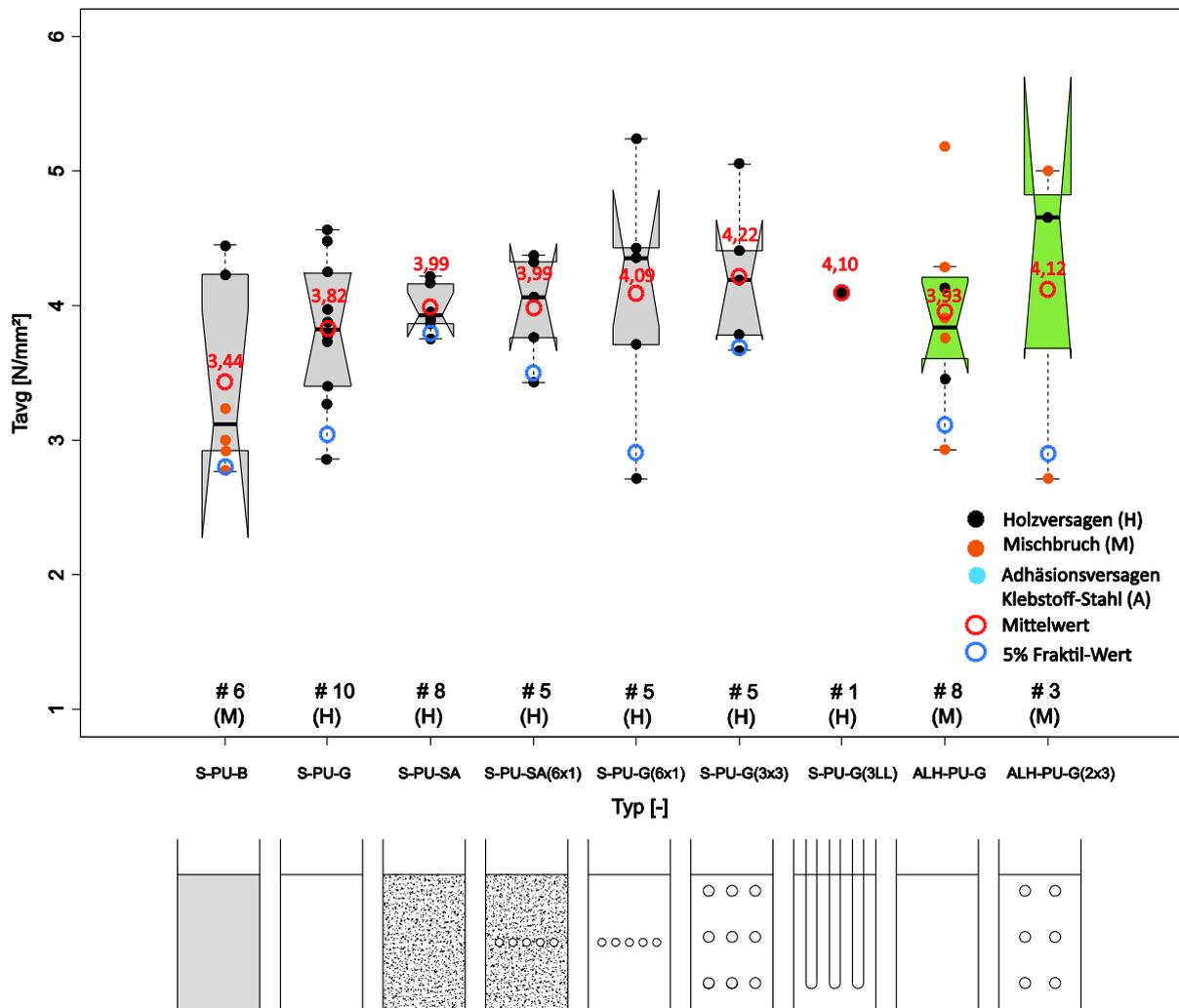


Abbildung 6.66: Scherfestigkeiten der Prüfsreihe 07

### 6-11.3.5 Steifigkeit der Verbindung

In Abbildung 6.67 sind die deutlichen Steifigkeitsunterschiede der beiden Prüfkongfigurationen „Push-Pull“ sowie „Pull-Pull“ ersichtlich. Die Probekörper der Prüferserie 07 wiesen im Schnitt nur ein Viertel der Steifigkeiten von „Pull-Pull“-Prüfungen auf. Ebenso bewegen sich die lokalen Wegmessungen im Zehntel-Millimeterbereich, wohingegen sie sich in Prüferserie 06 im Hundertstel-Millimeterbereich bewegten. Der größere Verformungsanteil der „Push-Pull“-Prüfungen ergibt sich durch das Eindringen des Stirnholzes, auf welches die Stahlplatte von oben drückt. Die Messspitze der Wegaufnahme wurden, wie in Abbildung 6.64 ersichtlich, auf der Stahlplatte positioniert. Durch die Positionierung der Wegaufnahme direkt auf der Hirnholzoberfläche würde dieser Verformungsanteil nicht mitgemessen werden. Neben statistischen Kennzahlen des Steifigkeitswertes  $K_{ser}$  werden in Tabelle 6.40 die mittleren, lokalen Vertikalverschiebungen der Verbindung veranschaulicht.

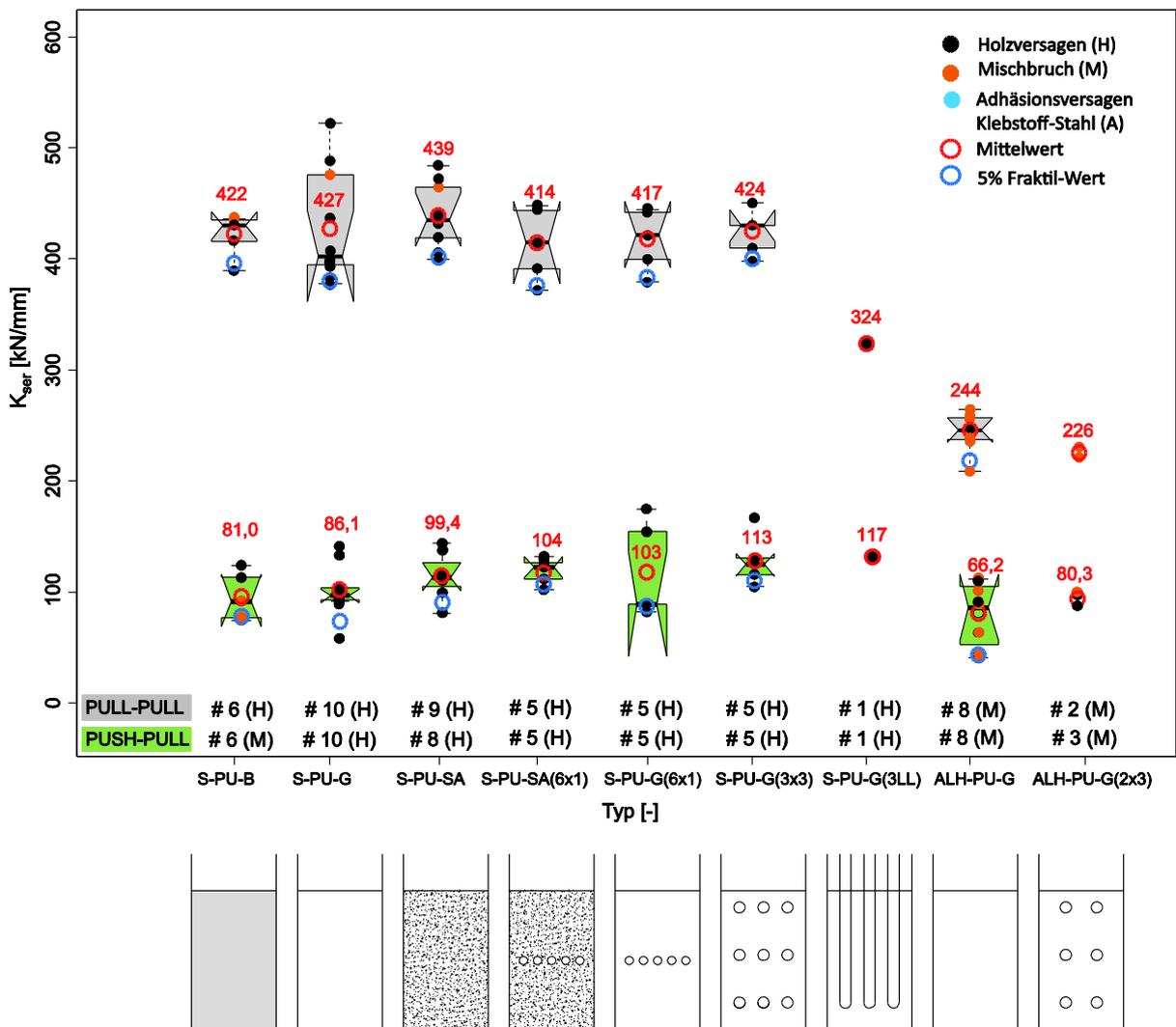


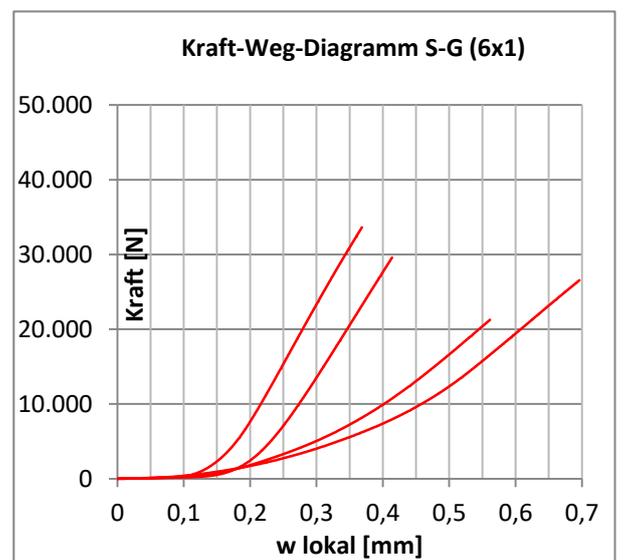
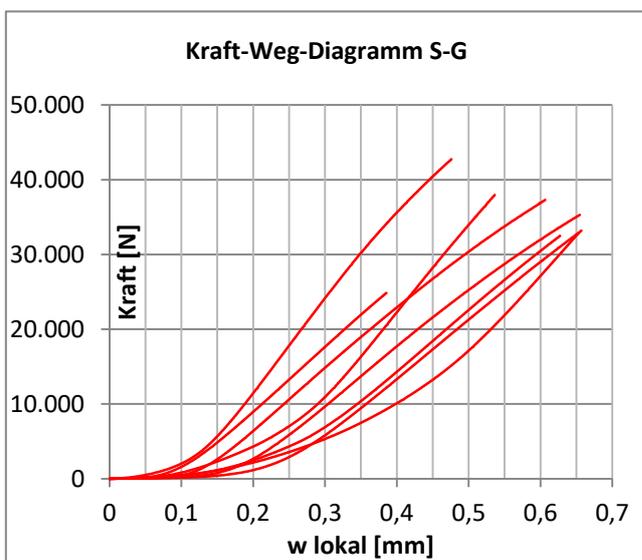
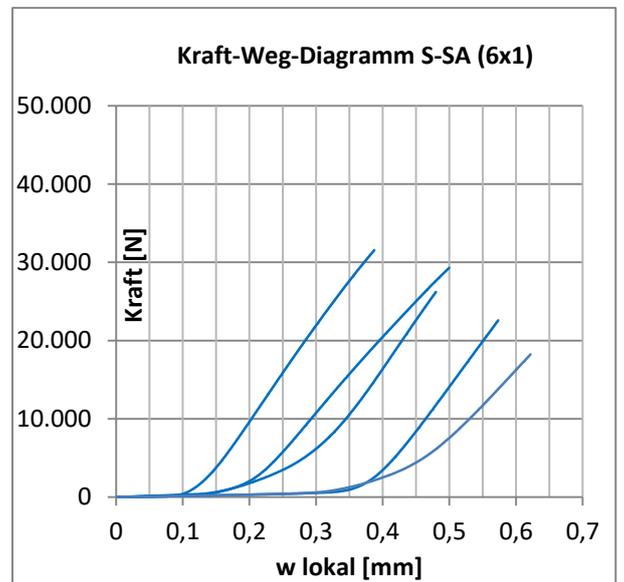
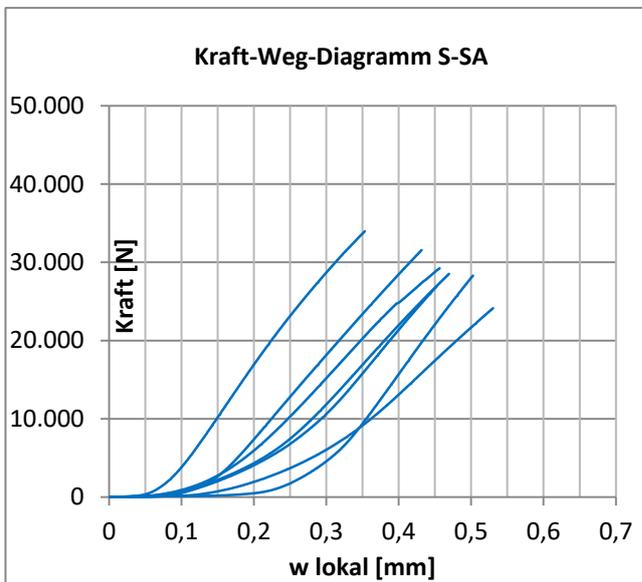
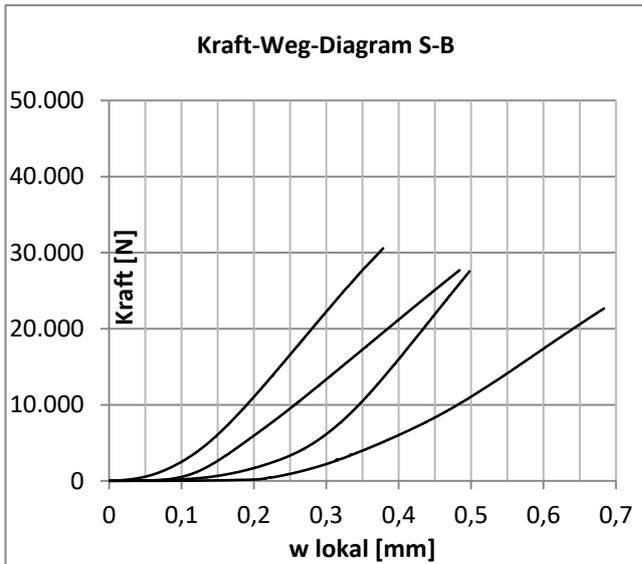
Abbildung 6.67: Steifigkeitsunterschied „Pull-Pull“ (06) und „Push-Pull“ (07)

Tabelle 6.40: Statistische Kenngrößen der Steifigkeit in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 07

Bezeichnung	Einheit	S-PU-B	S-PU-G	S-PU-SA	S-PU-G(3x3)	S-PU-G(6x1)
<b>Anzahl</b>	[-]	6	10	8	5	5
<b>Min</b>	[kN/mm]	60,5	45,1	66,7	89,7	68,8
<b>Max</b>	[kN/mm]	108	126	128	150	158
<b>Mittelwert</b>	[kN/mm]	81,0	86,1	99,4	113	103
<b>COV</b>	[%]	23,5	25,9	19,4	20,2	41,2
<b>W<sub>lok, mean</sub></b>	[mm]	0,53	0,48	0,44	0,43	0,47

Bezeichnung	Einheit	S-PU-SA(6x1)	S-PU-(3LL)	ALH-PU-G	ALH-PU-G(2x3)
<b>Anzahl</b>	[-]	5	1	8	3
<b>Min</b>	[kN/mm]	87,9	-	27,3	73,1
<b>Max</b>	[kN/mm]	116	-	97,1	84,5
<b>Mittelwert</b>	[kN/mm]	104	117	66,2	80,3
<b>COV</b>	[%]	10,8	-	41,9	7,82
<b>W<sub>lok, mean</sub></b>	[mm]	0,54	0,46	0,51	0,46

In Abbildung 6.68 sind die lokalen Last-Verschiebungskurven aller Prüfserien aus Prüfserie 07 dargestellt. Bei den einzelnen Prüfungen fiel auf, dass die Wegmessung der Verbindung erst nach einem großen Schlupf startet. Dies wurde darauf zurückgeführt, da der Holzkörper einen gewissen Weg überwinden musste, bis er an der Stahlplatte ansetzte und die Wegmessung der Verbindung beginnen konnte. Die mittleren, lokalen Wegmessungen ergaben Vertikalverformungen der Verbindung im Bereich von 0,43 mm – 0,54 mm.



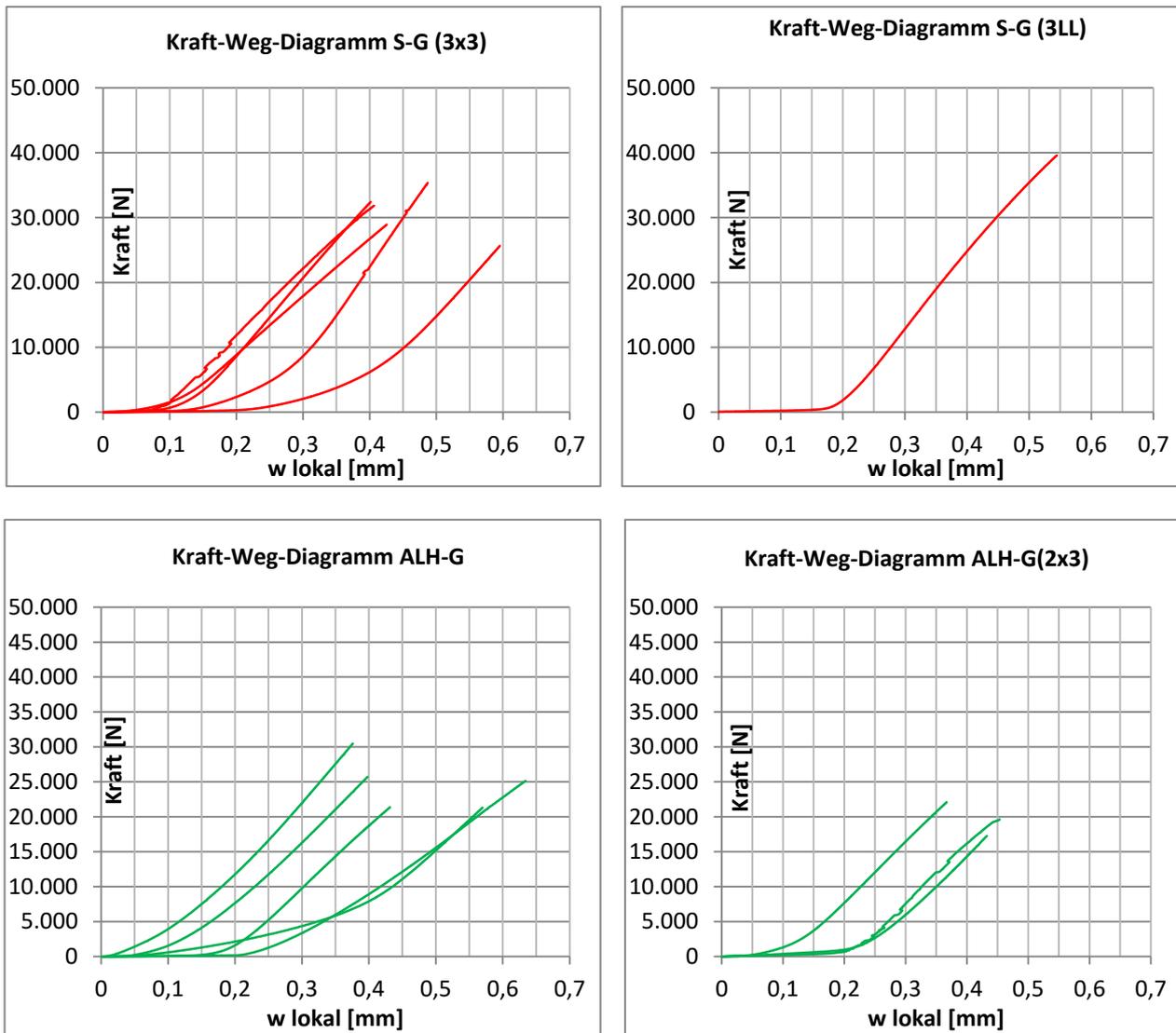


Abbildung 6.68: lokale Kraft-Verschiebungsdiagramme, Prüfsreihe 07

### 6-11.4 SCHLUSSFOLGERUNG PRÜFSERIE 07

Im Hinblick auf die Tragfähigkeit erreichten die blanken Stahl-Prüfkörper, sowie die Aluminium-Prüfkörper höhere Werte als jene aus Prüfsreihe 06. Der Einfluss von Profilierung und Perforierung zeigte sich im Hinblick auf die Tragfähigkeit bei dieser Prüfkonfiguration weniger, wodurch sich nur geringfügig höhere Werte für bearbeitete Bleche ergaben. Des Weiteren fielen die deutlich geringeren Steifigkeiten auf, welche nur 25 % der von „Pull-Pull“- Prüfungen entsprachen.

## 6-12 ERGEBNISVERGLEICH MIT LITERATUR

### 6-12.1 VERGLEICH MIT [3] UND [24]

Nach Abschluss der experimentellen Untersuchungen gilt es, die erhaltenen Ergebnisse mit den Prüfergebnissen aus der Literatur nach Abschnitt 3-4 zu vergleichen. Im Wesentlichen soll der Einfluss der Einklebelänge und des Holzwerkstoffes auf die Scherfestigkeit verglichen werden. Hierfür führten Gruber et al. [24] und Aicher [3] ähnliche Zugscherversuche an eingeklebten Blechen durch, welche unter Zugrundelegung gleicher Blechstärke (5 mm), gleicher Klebstoffugendicke (1 mm) und gleichem Klebstoff (2K-PU) geprüft wurden.

Die Prüfkörperbezeichnungen für die Abbildung 6.69 wird im Folgenden erläutert:

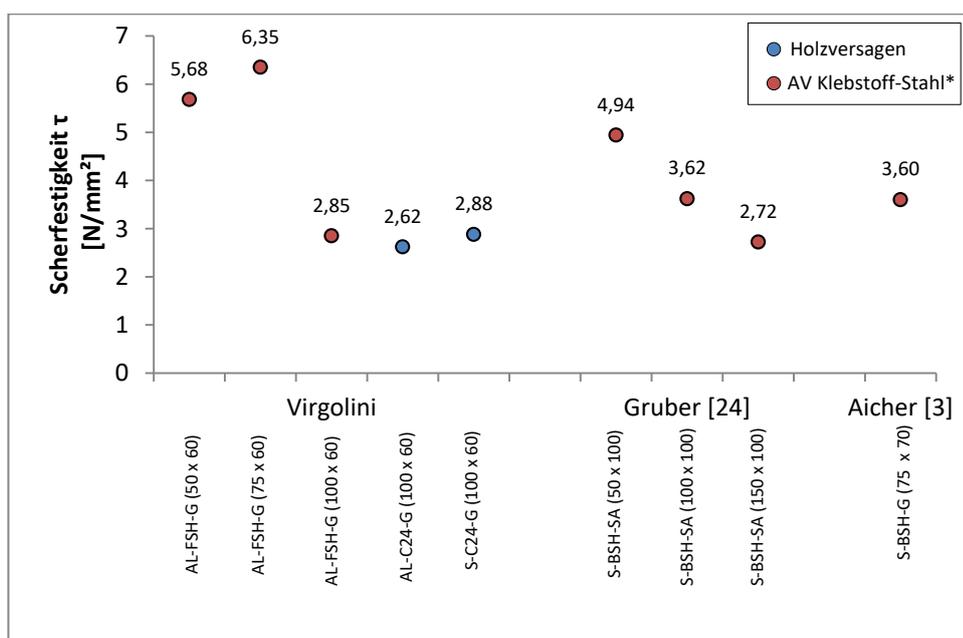
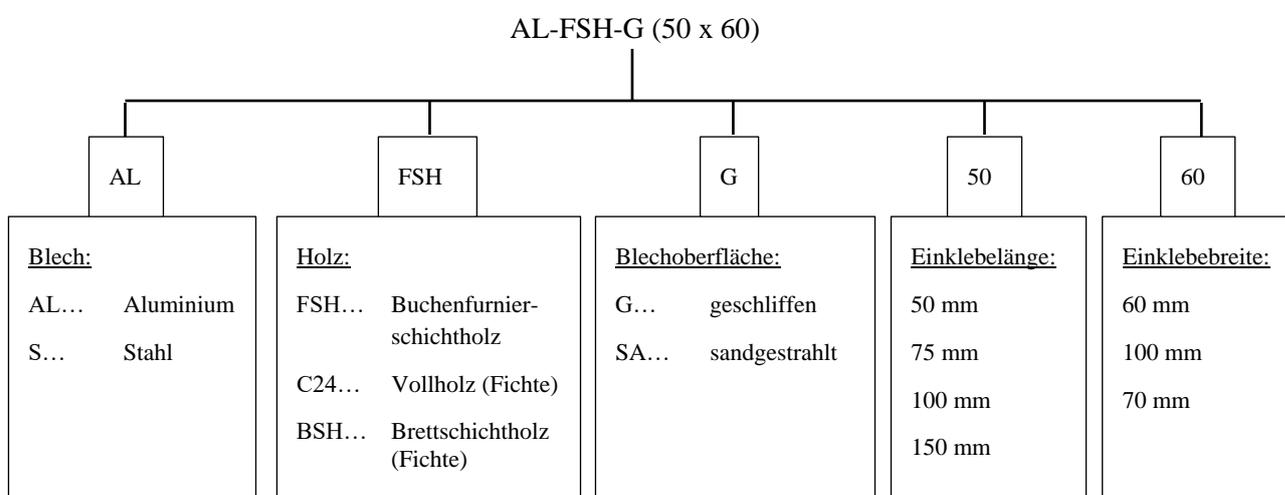


Abbildung 6.69: Scherfestigkeitsvergleich mit Versuchen aus der Literatur, [3], [24]

\*Adhäsionsversagen zwischen Klebstoff und Stahl

In Abbildung 6.69 sind die Mittelwerte der Scherfestigkeiten der einzelnen Prüfserien dargestellt. Anhand des Diagramms ist nach Gruber et al. [24] ein Abfall der rechnerischen Scherfestigkeiten mit zunehmender Einklebelänge festzustellen. Das Potential der FSH- und BSH-Prüfkörper wurde auf Grund des Adhäsionsversagens zwischen Klebstoff und Blech bei allen Prüfserien in Abbildung 6.69 nicht erreicht. Folglich können nach Optimierung des Haftvermögens zwischen den Verbundpartnern Klebstoff und Blech für die Prüfkörper aus FSH und BSH höhere Scherfestigkeitswerte erwartet werden.

## 6-12.2 VERGLEICH MIT [28]

Für einen weiteren Vergleich der Tragfähigkeiten der Serie S-PU-L6 aus Prüfserie 03 wurden die Serien „PU“ und „PUL“ aus der Literatur nach Jeleč [28] herangezogen. Die Prüfkörper aus [28] versagten überwiegend als Adhäsionsbruch zwischen Stahl und Klebstoff, wodurch sie auch geringere Tragfähigkeiten erzielten. Die fehlende Adhäsion der Fügepartner könnte auf eine schlechte Verarbeitung bei der Prüfkörperherstellung hindeuten. Im Vergleich dazu versagten jene Lochbleche aus der vorliegenden Arbeit großteils als Mischbruch. Wie bei den Prüfkörpern nach [28] zu erkennen ist, hat die Perforierung der Bleche aus Serie „PUL“ eine Steigerung der Tragfähigkeit von ca. 20 % zur Folge. Die Prüfkörper aus der vorliegenden Arbeit erreichten durch ihr besseres Adhäsionsvermögen und durch die Perforierung eine Traglaststeigerung von ca. 66 % im Vergleich zur Prüfkörperserie „PU“ nach Jeleč. Die Bruchbilder finden sich in Tabelle 6.14 und stellen jeweils die häufigste Versagensart der jeweiligen Prüfserie dar.

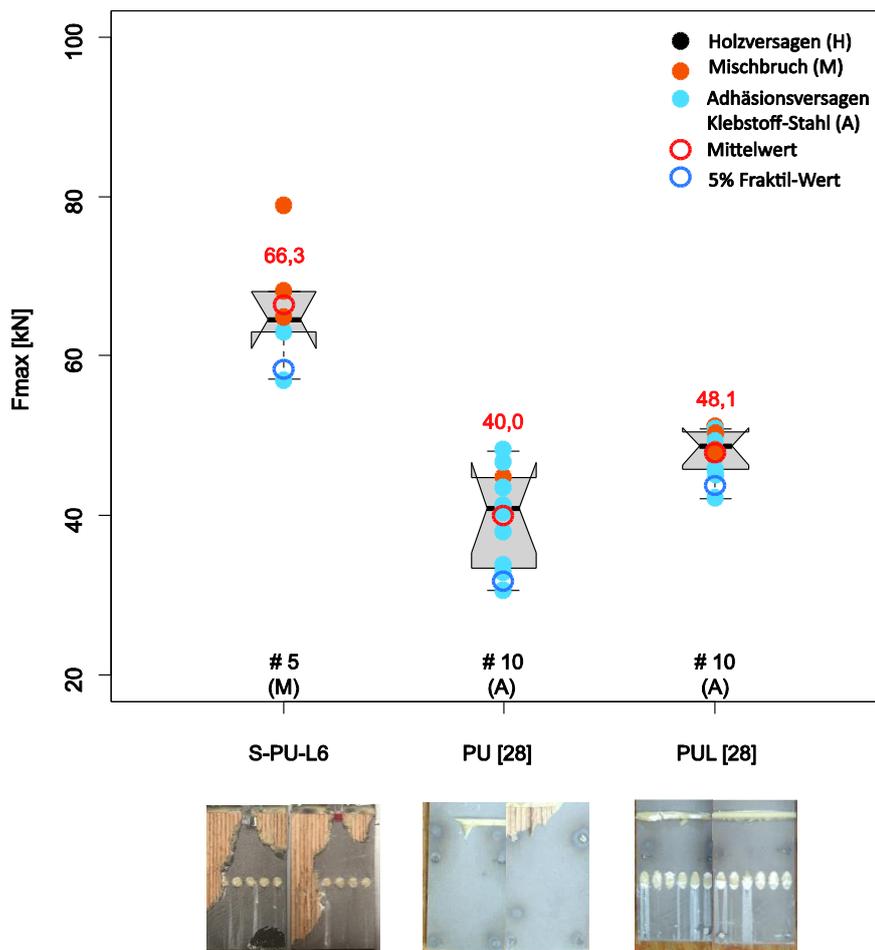


Abbildung 6.70: Tragfähigkeitsvergleich, Prüfserie 03 (S-PU-L6) vs. Jeleč [28]

# KAPITEL 7: SPANNUNGSVERGLEICHE

## 7-1 ALLGEMEINES

Im Folgenden wurden die geometrischen und materiellen Parameter der Zug- und Scherprüfkörper aus Kapitel 6 herangezogen, um die Spannungszustände in der Klebefuge mittels analytischer und numerischer Methoden zu berechnen und zu vergleichen. Hierfür wurde eine Parameterstudie durchgeführt, die unter Variation

- der Einklebelänge (50 mm, 100 mm, 250 mm),
- der Seitenholzdicke (15 mm, 26,5 mm, 50 mm),
- des Holzwerkstoffes ( Fichte-Vollholz, Buchenfurnierschichtholz (BauBuche), Brettspertholz),
- sowie des unterschiedlichen Blechmaterials (Aluminium, Stahl)

Aufschluss über den Einfluss der Spannungsverläufe in der Klebefuge (Scherspannungen), als auch im angrenzenden Holz (Querzugspannungen, Längsspannungen) geben sollen.

Die analytischen Berechnungen erfolgten mit den, in Tabelle 7.1, angegebenen Parametern im Tabellenkalkulationsprogramm Excel.

*Tabelle 7.1: Eingangparameter*

	Holz (BauBuche)	Fichte	BSP (Fichte)	Aluminium	Stahl	Klebstoff
$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	16.800	11.000	11.000	72.000	210.000	500
$E_{90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	470	370	100 200 300			
$G_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	780	690	690 ( $G_{90} \sim 69$ )	27.100	81.000	400
t [mm]	15 26,5 50	15 26,5 50	30	5	5	1

Die numerischen Berechnungen wurden mit Hilfe des Programms RFEM durchgeführt. In der Abbildung 7.1 wird die Modellierung der Zugprüfkörper im finite Element Programm mit eingeklebten Blechen dargestellt. Anzumerken ist, dass für die beiden Prüfkörper in der Modellbildung nur eine Hälfte auf Grund der vertikalen Symmetrieebene herangezogen wurde. Um bei der Kraftübertragung vom Blech über den Klebstoff und weiter zum angrenzenden Holzwerkstoff keine zu hohen Steifigkeitssprünge zu erhalten, wurde die Klebefuge am Ende der Einklebelänge durch eine Fuge vom Holz getrennt. Das Ausrunden der Fuge sollte Spannungssingularitäten in der Berechnung mindern.

Besonders stark trat der Effekt zu hoher Steifigkeitssprünge bei Prüfkörpern in Kraft, welche, wie die Fichtenholzprüfkörper, in Faserrichtung eingeklebt wurden. Der Vertikalschnitt, in denen die relevanten Spannungsverläufe liegen, wurde für Fichtenvollholz-Prüfkörper im Abstand von 3,6 mm von der Symmetrieachse entfernt festgelegt und lag somit direkt neben der Klebefuge im Holz.

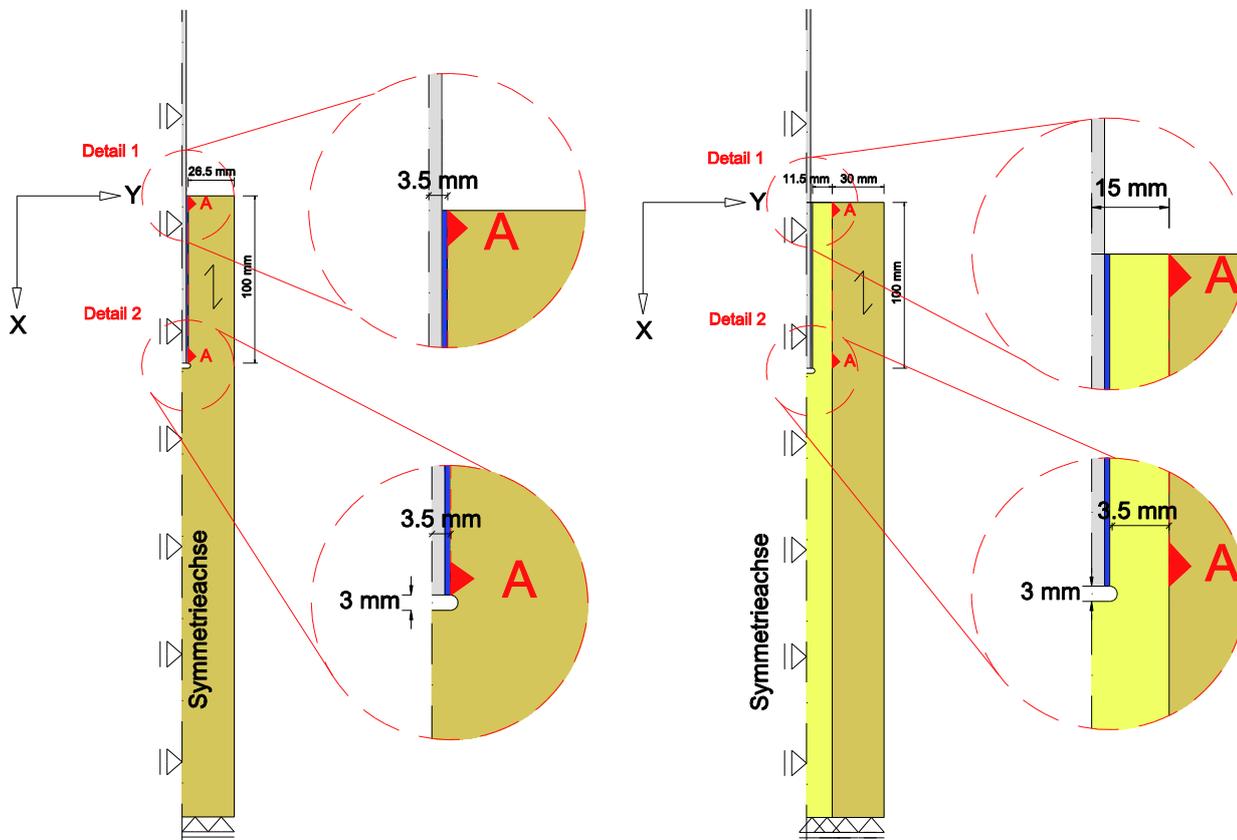


Abbildung 7.1: Modellierung Zugprüfkörper Fichte-Vollholz (links), BSP (rechts)

Da der Holzwerkstoff BSP als ein orthogonal geschichteter Aufbau aus verklebten Holzbrettern beschrieben werden kann, erfolgte eine getrennte Werkstoffparametereingabe für die Schub- und Elastizitätsmoduln (in Faserrichtung ( $0^\circ$  zur Faserrichtung) und rechtwinklig dazu ( $90^\circ$  zur Faserrichtung)) der beiden unterschiedlich orientierten Holzschichten. Die Rollschicht bei den BSP-Prüfkörpern wirkte durch ihren geringen Schubmodul ( $G_{90}$ ) „dämpfend“ auf die Steifigkeitsänderungen beim Übergang der unterschiedlich steifen Materialien bzw. Brettlagen. Für die Bleche, welche  $90^\circ$  zur Faser eingeklebt wurden und sich die tragende Holzschicht somit im äußeren Bereich des Prüfkörpers befand, wurde ein Vertikalschnitt 15 mm von der Symmetrieachse entfernt durch das Holz in Faserrichtung gelegt.

Die Abbildung 7.2 zeigt eine schematische Darstellung der Schubspannungsverläufe  $\tau_{xy}$  in der Klebefuge, sowie der Längsspannungen  $\sigma_y$  und der Querkzug- bzw. Querdruckspannungen  $\sigma_x$  im Seitenholz.

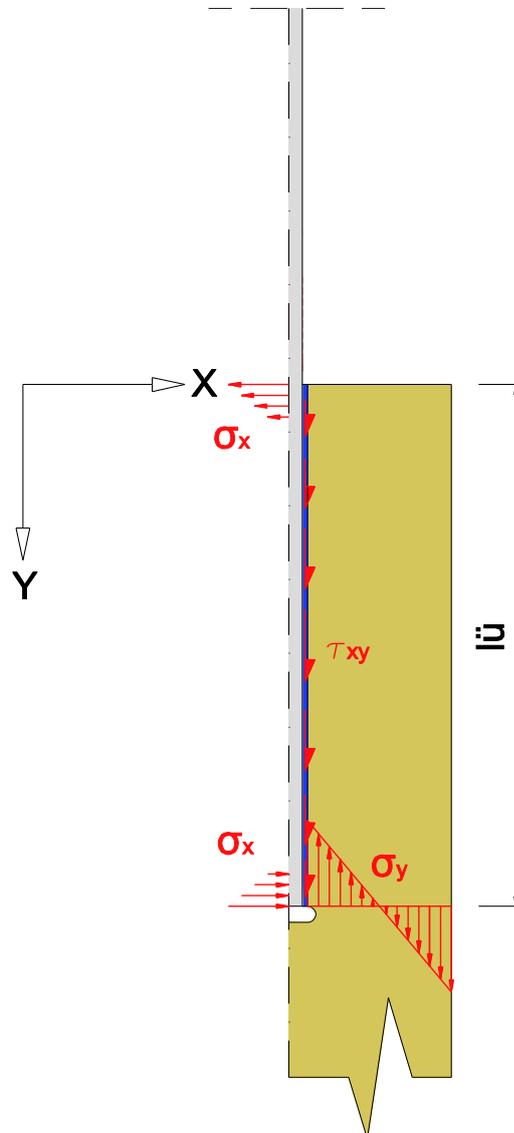


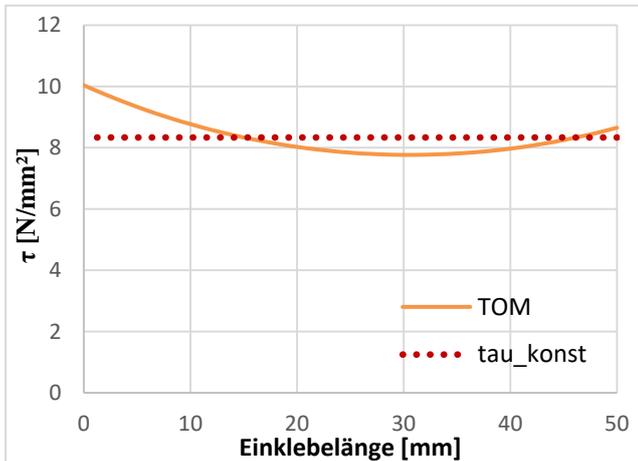
Abbildung 7.2: Schubspannungen  $\tau_{xy}$ , Längsspannungen  $\sigma_y$ , Querkzug- und Querdruckspannungen  $\sigma_x$

Die jeweiligen Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt und durch kurze verbale Beschreibungen erläutert.

## 7-2 VERLAUF DER SCHUBSPANNUNGEN

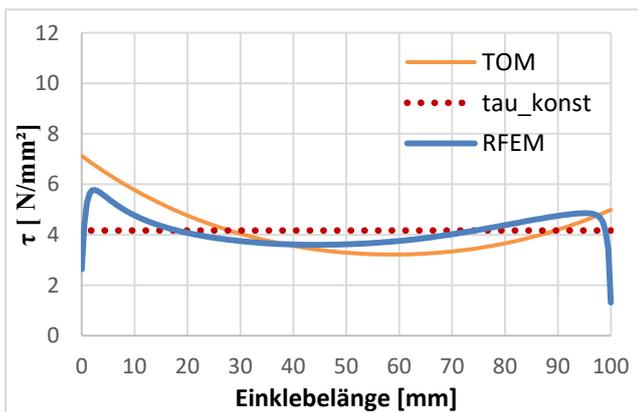
### 7-2.1 VARIATION DER EINKLEBELÄNGE

Fichte-Aluminium;  $L = 50 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$



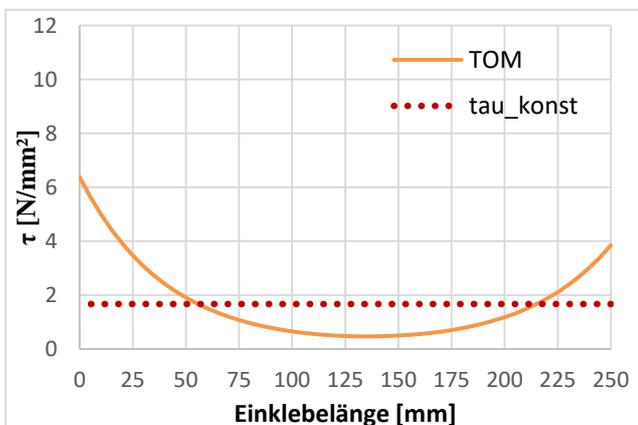
Eine Verringerung der Einklebelänge bewirkt zu einem einen Erhöhung der mittleren Schubspannung. Andererseits hat eine Verkleinerung der Einklebelänge auch eine Verringerung der Spannungsspitzen an den Enden der Verklebung zur Folge, da sich die Schubspannungen in den mittleren Bereich der Einklebung verlagern.

Fichte-Aluminium;  $L = 100 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$



Anhand des FE-Modells, in blau dargestellt, ist im Vergleich zur „TOM“-Theorie (orange) ein wesentlicher Abbau der Spannungsspitzen an den Enden zu erkennen. Dies hat den Grund, da am Anfang der Einklebelänge in der Realität keine Schubspannungen auftreten können. Das numerische Modell bildet den wirklichen Verlauf realitätsnäher ab. Die Schuspannungen am Rand sind zwar nicht zur Gänze abgebaut, es kommt aber zu einer signifikanten Reduzierung der Spannungsspitze.

Fichte-Aluminium;  $L = 250 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$

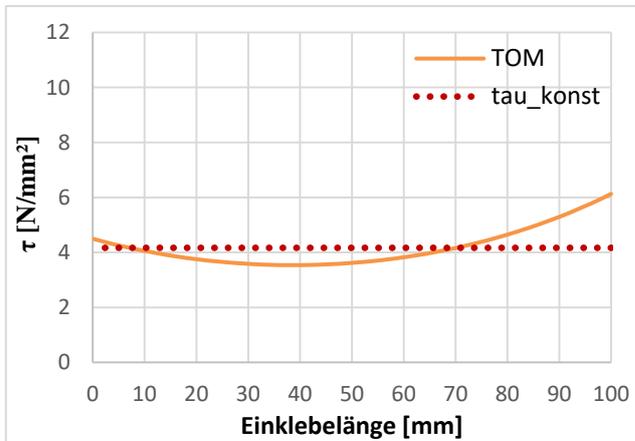


Im nebenstehenden Diagramm sind die deutlich größeren Spannungsspitzen für große Einklebelängen deutlich zu erkennen. Insbesondere fällt die Spannungskonzentration zu den Enden hin im Vergleich zur mittleren Schubspannung auf. Generell lässt sich jedoch ein Schubspannungsabbau im Vergleich zu den geringen Einklebelängen erkennen.

Abbildung 7.3: Variation der Einklebelänge-Verlauf der Schubspannungen

## 7-2.2 VARIATION DES BLECHMATERIALS

Fichte-Stahl;  $L = 100\text{mm}$ ;  $t_1 = 26,5\text{ mm}$

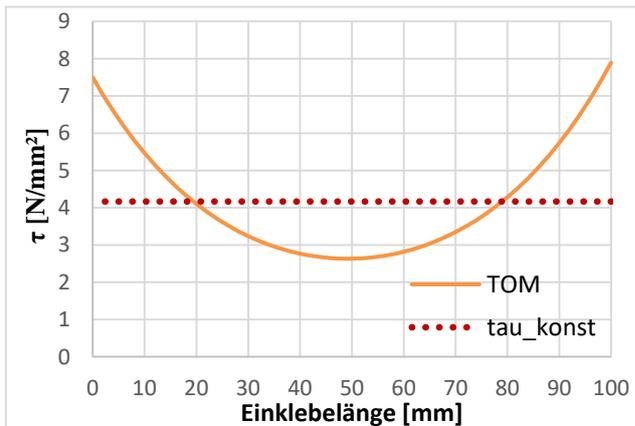


Durch die Änderung des Blechmaterials auf ein steiferes Material verlagern sich die Schubspannungsspitzen an das gegenüberliegende Ende der Einklebelänge, da sich das Steifigkeitsverhältnis  $(E \cdot A)_{\text{BLECH}} / (E \cdot A)_{\text{HOLZ}}$  ändert.

Abbildung 7.4: Variation des Blechmaterials-Schubspannungen

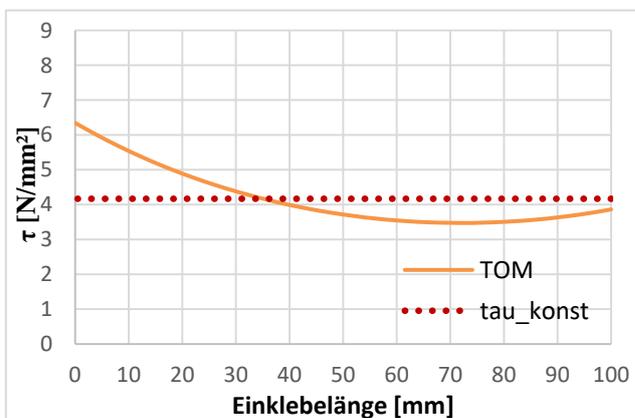
## 7-2.3 VARIATION DER SEITENHOLZDICKE

Fichte-Aluminium;  $L = 100\text{mm}$ ;  $t_1 = 15\text{ mm}$



Die Verkleinerung der Seitenholzdicke bewirkt einen symmetrischeren Schubspannungsverlauf nach der „TOM“-Theorie, der jedoch höhere Spannungsspitzen nach sich zieht. Die mittlere Schubspannung wird durch die Veränderung der Seitenholzdicke auf Grund der unveränderten Geometrie nicht wesentlich beeinflusst.

Fichte-Aluminium;  $L = 100\text{mm}$ ;  $t_1 = 50\text{ mm}$

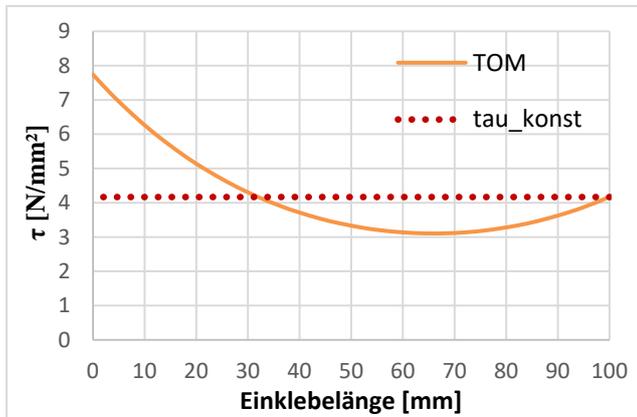


Eine Vergrößerung der Seitenholzdicke geht mit einem unsymmetrischen Spannungsverlauf einher, wobei sich die Spannungsspitzen am Anfangspunkt der Einklebelänge befinden.

Abbildung 7.5: Variation der Seitenholzdicke-Verlauf der Schubspannungen

## 7-2.4 VARIATION DES HOLZWERKSTOFFES

Buche-Aluminium;  $L = 100 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$

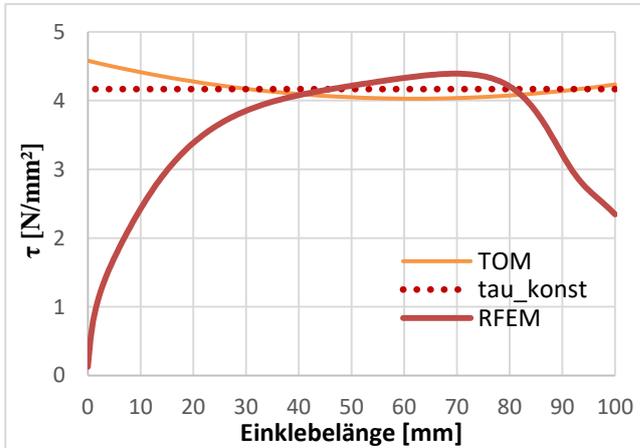


Wird anstatt des Holzwerkstoffes Fichten-Vollholz ein Buchenfurnierschichtholz (BauBuche) eingesetzt, vergrößern sich auf Grund des sich ändernden Steifigkeitsverhältnisses  $(E \cdot A)_{\text{BLECH}} / (E \cdot A)_{\text{HOLZ}}$  die Spannungsspitzen am Beginn der Einklebung.

Abbildung 7.6: Variation des Holzwerkstoffes-Verlauf der Schubspannungen

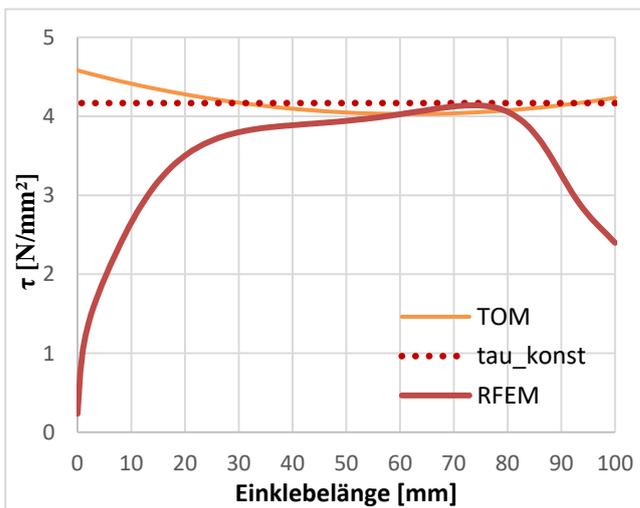
## 7-2.5 BSP-PRÜFKÖRPER

BSP-Alu L = 100 mm;  $t_1 = 26,5$  mm;  $E_{1,90} = 100$  N/mm<sup>2</sup>



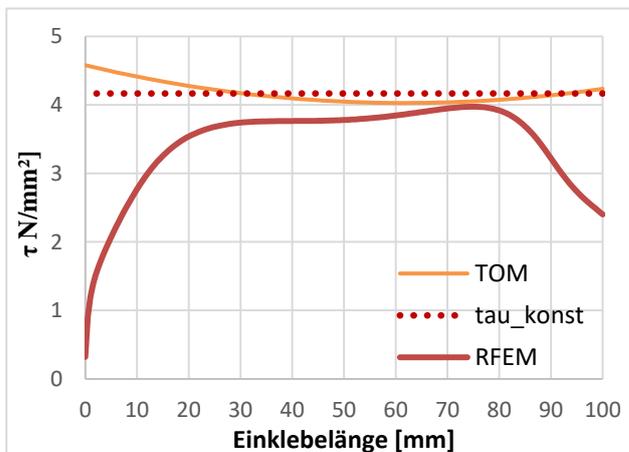
Der Schubspannungsverlauf nach der „TOM“-Theorie nähert sich dem Verlauf mit konstanter Schubspannung an. Die Finite-Element-Lösung dagegen, verlagert ihr Spannungsmaximum in die Mitte der Klebefuge, wo es ähnliche Werte, wie die beiden anderen Verläufe annimmt. Am Anfangspunkt der Einklebelänge verlaufen die Spannungen gegen Null. Anzumerken ist, dass der Schubspannungsverlauf in der fasernparallelen Schicht dargestellt wird.

BSP-Alu L = 100 mm;  $t_1 = 26,5$ mm;  $E_{1,90} = 200$  N/mm<sup>2</sup>



Eine Erhöhung des E-Moduls ( $E_{90}$ ) bewirkt eine leichte Verlagerung der Schubspannungen in Richtung der Ränder. Die Verläufe („TOM“-Theorie und konstante Schubspannung) zeigen keine maßgebliche Änderung des Schubspannungsverlaufes.

BSP-Alu L = 100 mm;  $t_1 = 26,5$  mm;  $E_{1,90} = 300$  N/mm<sup>2</sup>



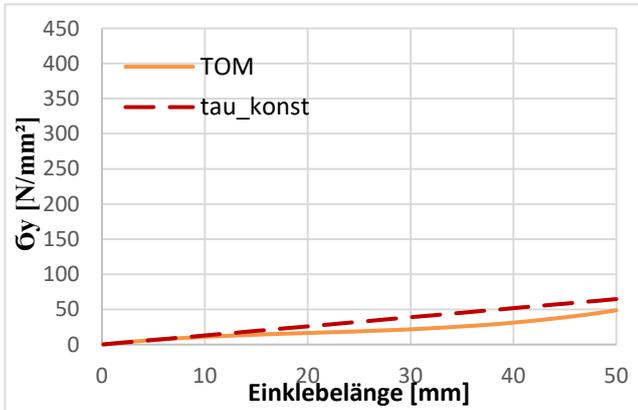
Hier bildet sich im Gegensatz zum E-Modul mit  $E_{1,90} = 100$  N/mm<sup>2</sup> eine wesentlich flachere Kurve des FE-Modells aus.

Abbildung 7.7: BSP-Körper-Verlauf der Schubspannungen

## 7-3 VERLAUF DER LÄNGSSPANNUNGEN

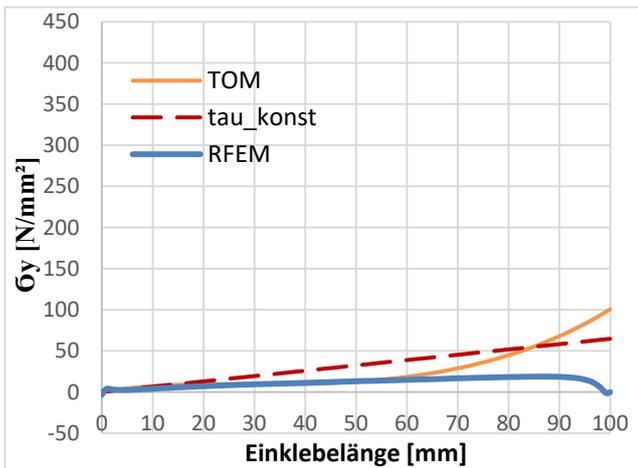
### 7-3.1 VARIATION DER EINKLEBELÄNGE

Fichte-Aluminium;  $L = 50 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$



Je kleiner die Einklebelänge wird, desto mehr nähern sich die Längsspannungen der „TOM“-Theorie einer steigenden Geraden in Richtung Einklebeende.

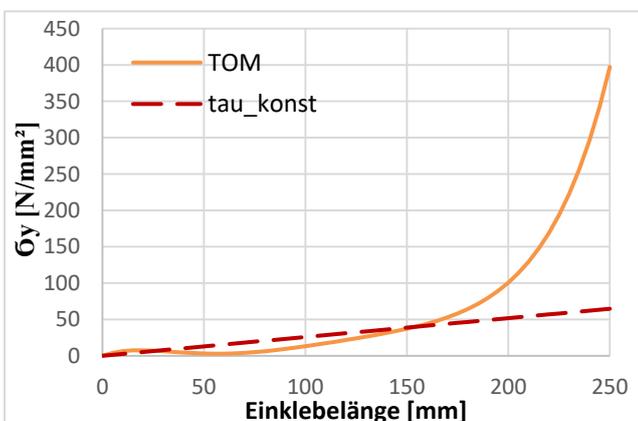
Fichte-Aluminium;  $L = 100 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$



Der Längsspannungsverlauf der „TOM“-Theorie bildet sich erst zum Ende der Einklebelänge als Maximum aus, wobei die Spannungsspitzen mit der Einklebelänge deutlich zunehmen.

Das Finite-Element-Modell bildet einen gleichmäßigeren Spannungsverlauf über die Klebefuge aus, wobei sich an beiden Enden der Klebefuge die Längsspannungen abbauen.

Fichte-Aluminium;  $L = 250 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$

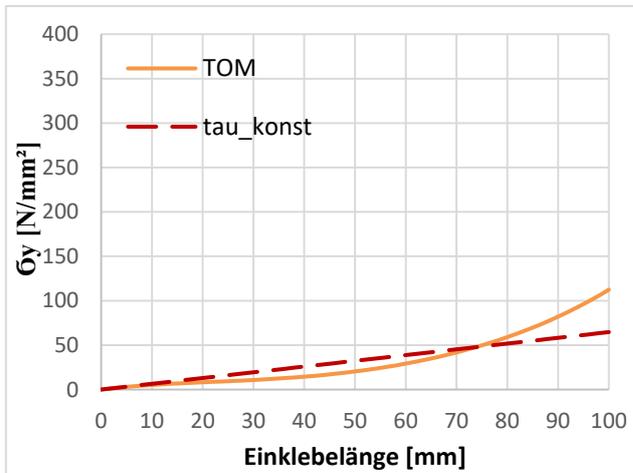


Durch die große Einklebelänge von 250 mm bildet sich nach dem Verlauf der „TOM“-Theorie eine deutliche Spannungsspitze am Ende der Einklebelänge aus.

Abbildung 7.8: Variation der Einklebelänge-Verlauf der Längsspannungen

### 7-3.2 VARIATION DES BLECHMATERIALS

Fichte-Stahl;  $L = 100\text{mm}$ ;  $t_1 = 26,5\text{ mm}$

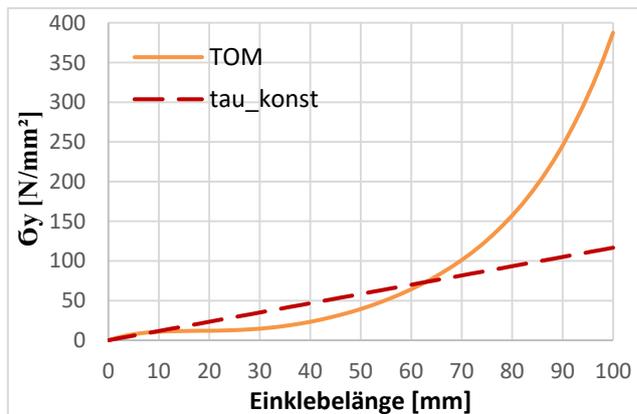


Durch die Verwendung eines Stahl-, anstatt eines Aluminiumbleches verursacht das sich ändernde Steifigkeitsverhältnis  $(E \cdot A)_{\text{BLECH}} / (E \cdot A)_{\text{HOLZ}}$  eine höhere Spannungsspitze am Überlappungsende der Verklebung. Durch die Umlagerung der Spannungen vom Mittelbereich an das Einklebeende, vergrößern sich die Spannungsspitzen bei Verwendung steiferer Blechmaterialien.

Abbildung 7.9: Variation des Blechmaterials-Verlauf der Längsspannungen

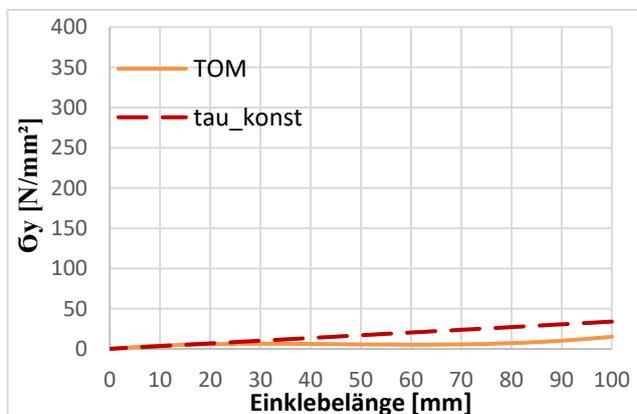
### 7-3.3 VARIATION DER SEITENHOLZDICKE

Fichte-Aluminium;  $L = 100\text{mm}$ ;  $t_1 = 15\text{ mm}$



Bei Verringerung der Seitenholzdicke bilden sich am Ende der Einklebelänge sehr hohe Längsspannungsspitzen aus.

Fichte-Aluminium;  $L = 100\text{mm}$ ;  $t_1 = 50\text{ mm}$

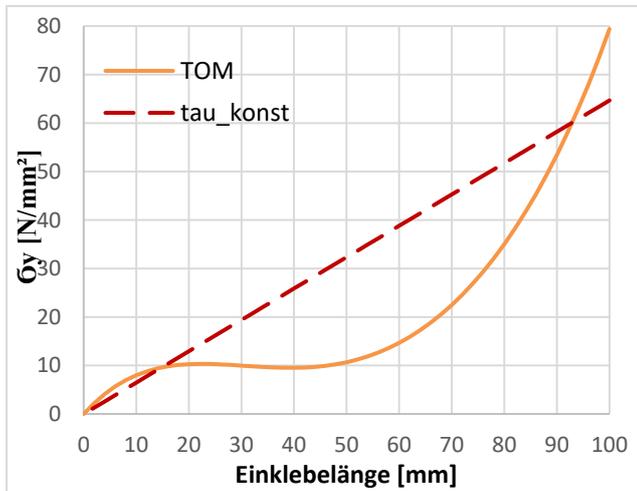


Bei einer größeren Seitenholzdicken nähert sich der Längsspannungsverlauf nach der „TOM“-Theorie der linear verlaufende Längsspannung.

Abbildung 7.10: Variation der Seitenholzdicke-Verlauf der Längsspannungen

### 7-3.4 VARIATION DES HOLZWERKSTOFFES

Buche-Aluminium;  $L = 100 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$

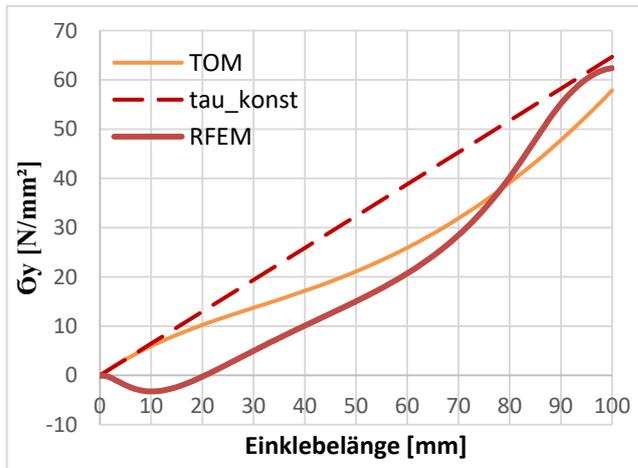


Wird anstatt des Holzwerkstoffes Fichten-Vollholz ein Buchenfurnierschichtholz eingesetzt, verringern sich auf Grund des sich ändernden Steifigkeitsverhältnisses  $(E \cdot A)_{\text{BLECH}} / (E \cdot A)_{\text{HOLZ}}$  die Spannungsspitzen, welche sich über die Einklebelänge verteilen.

Abbildung 7.11: Variation des Holzwerkstoffes-Verlauf der Längsspannungen

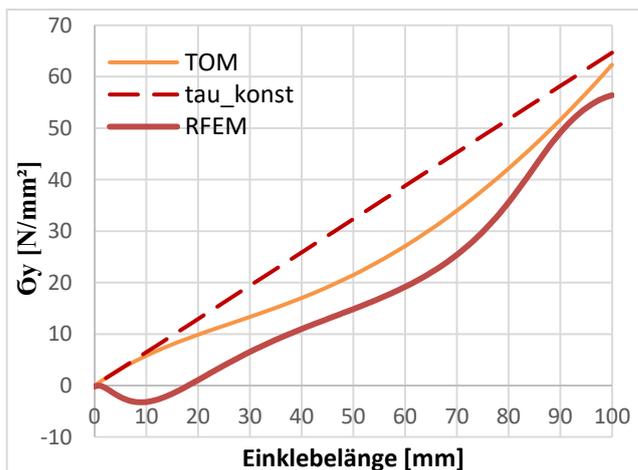
### 7-3.5 BSP-PRÜFKÖRPER

BSP-Alu; L = 100 mm;  $t_1 = 26,5$  mm;  $E_{1,90} = 100$  N/mm<sup>2</sup>



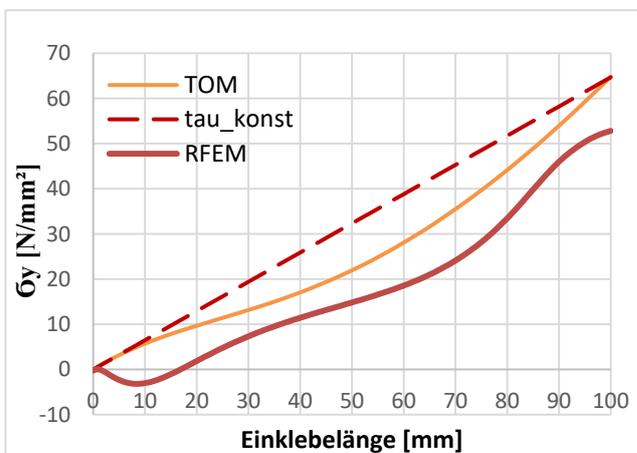
Der lineare Längsspannungsverlauf für konstante Schubspannungen ändert sich durch eine Veränderung des E-Moduls nicht signifikant.

BSP-Alu; L = 100 mm;  $t_1 = 26,5$  mm;  $E_{1,90} = 200$  N/mm<sup>2</sup>



Der Verlauf nach der „TOM“-Theorie zeigt mit steigendem E-Modul eine Abflachung des Verlaufs und nähert sich der linearen Längsspannung für konstante Schubspannungen an.

BSP-Alu; L = 100 mm;  $t_1 = 26,5$  mm;  $E_{1,90} = 300$  N/mm<sup>2</sup>



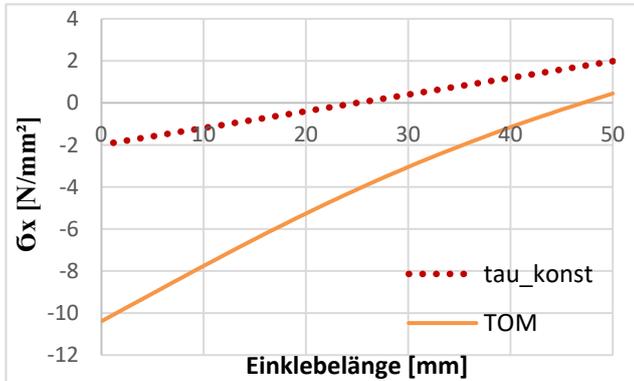
Durch die Erhöhung des Elastizitätsmoduls lässt sich eine weitere Annäherung an einen linearen Normalspannungsverlauf erkennen. Die Spannungsspitzen am Ende der Einklebelänge verringern sich und verteilen sich entlang der Klebefuge.

Abbildung 7.12: BSP-Körper-Verlauf der Längsspannungen

## 7-4 VERLAUF DER QUERZUGSPANNUNGEN

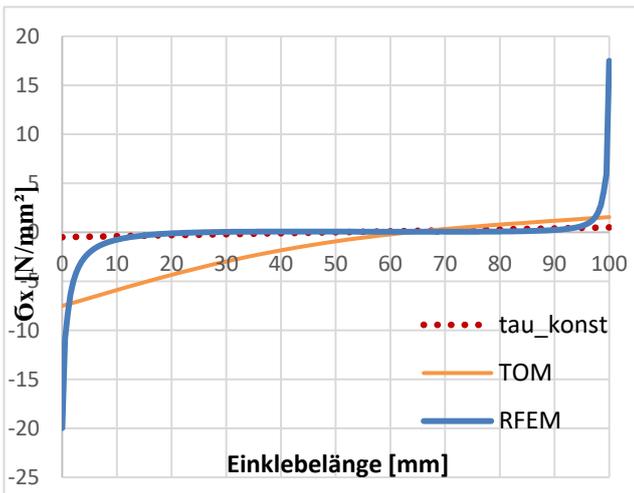
### 7-4.1 VARIATION DER EINKLEBELÄNGE

Fichte-Aluminium;  $L = 50 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$



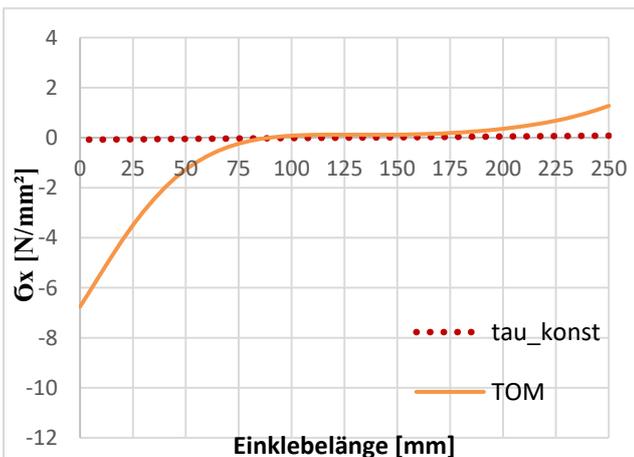
Durch die Verringerung der Einklebelänge bilden sich am Anfang der Einklebelänge besonders bei den Verläufen nach der „TOM“-Theorie hohe Querzugspannungen aus.

Fichte-Aluminium;  $L = 100 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$



Das Finite-Element-Modell besitzt entlang der Klebefuge keine ausgeprägten Querzugspannungen, welche sich jedoch an den beiden Einklebeenden zu hohen Spannungsspitzen aufbauen. Der Verlauf nach dem Analogiemodelle verläuft kontinuierlich über die Einklebelänge und weicht an den Verklebungsenden deutlich vom FEM-Ergebnis ab.

Fichte-Aluminium;  $L=250\text{mm}$ ;  $t_1=26,5 \text{ mm}$



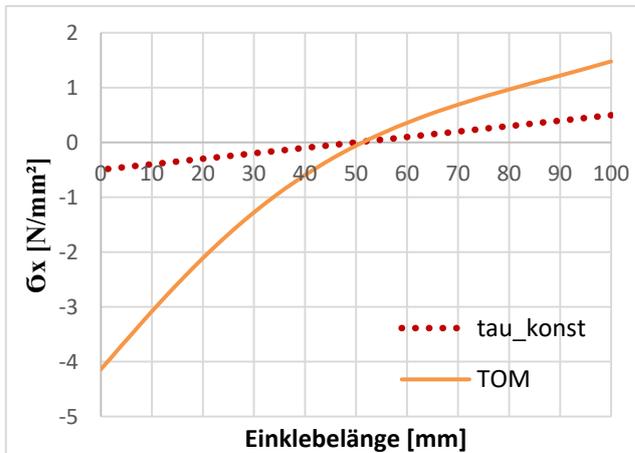
Wird die Einklebelänge sehr groß, verlagern sich die Querzugspannungen vom Anfang der Einklebelänge in den Endbereich. Im mittleren Bereich der Einklebelänge werden nahezu keine Querzugspannungen gebildet.

Die Querzugspannungen für konstante Schubspannungen verursachen weiters nahezu keine Querzugspannungen, wobei sich der lineare Verlauf einer Horizontalen nähert.

Abbildung 7.13: Variation der Einklebelänge-Verlauf der Querzugspannungen

### 7-4.2 VARIATION DES BLECHMATERIALS

Fichte-Stahl; L = 100mm; t<sub>1</sub> = 26,5 mm

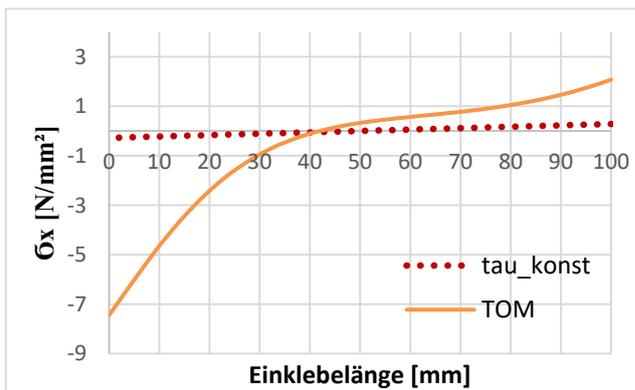


Der Einsatz von Stahlblechen bewirkt eine Änderung des Steifigkeitsverhältnisses  $(E \cdot A)_{\text{BLECH}} / (E \cdot A)_{\text{HOLZ}}$ , was mit einer Verringerung der Spannungsspitzen einhergeht.

Abbildung 7.14: Variation des Blechmaterials-Verlauf der Querspannungen

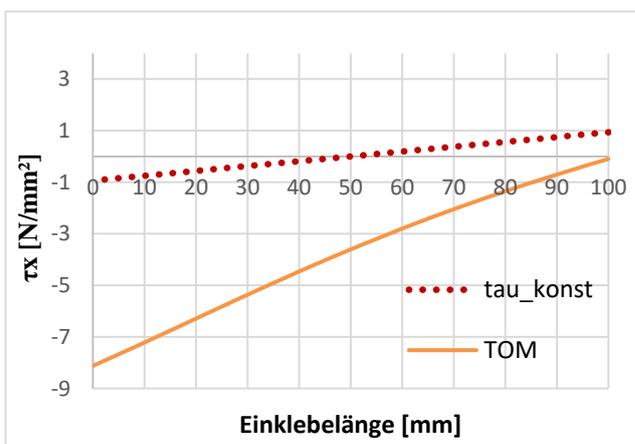
### 7-4.3 VARIATION DER SEITENHOLZDICKE

Fichte-Aluminium; L = 100mm; t<sub>1</sub> = 15 mm



Durch die Verringerung der Seitenholzdicke, lagern sich die Querspannung der „TOM“-Theorie aus dem Mittelbereich an die Einklebeenden.

Fichte-Aluminium; L = 100mm; t<sub>1</sub> = 50 mm

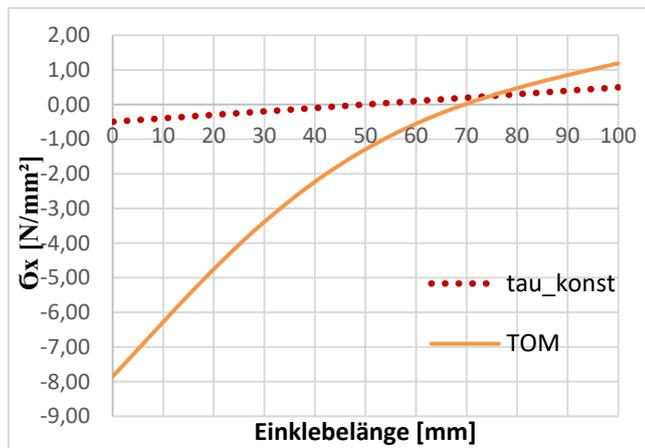


Die Erhöhung der Seitenholzdicke bewirkt eine Erhöhung des Gradienten der Querspannungen mit konstanten Schubspannungen. Der Verlauf nach der „TOM“-Theorie nähert sich einer Geraden an, da sich die Spannungsspitzen des Einklebeendes in die Mitte der Klebefläche verlagern.

Abbildung 7.15: Variation der Seitenholzdicke-Verlauf der Querspannungen

## 7-4.4 VARIATION DES HOLZWERKSTOFFES

Buche-Aluminium;  $L = 100 \text{ mm}$ ;  $t_1 = 26,5 \text{ mm}$

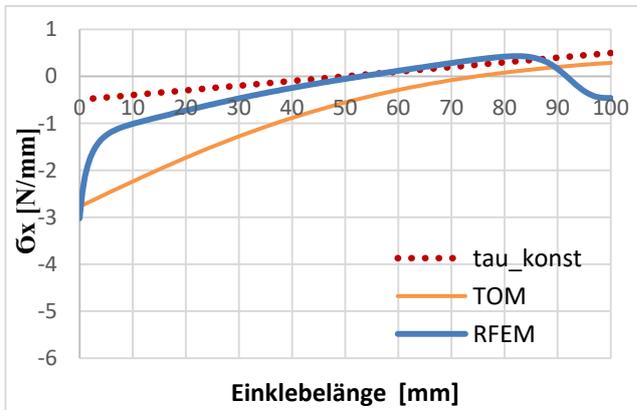


Wird der Holzwerkstoff durch ein steiferes Material mit höherem E-Modul ersetzt, so erfolgt ein leichter Spannungsspitzenabbau am Einklebeende.

Abbildung 7.16: Variation des Holzwerkstoffes-Verlauf der Querkzugspannungen

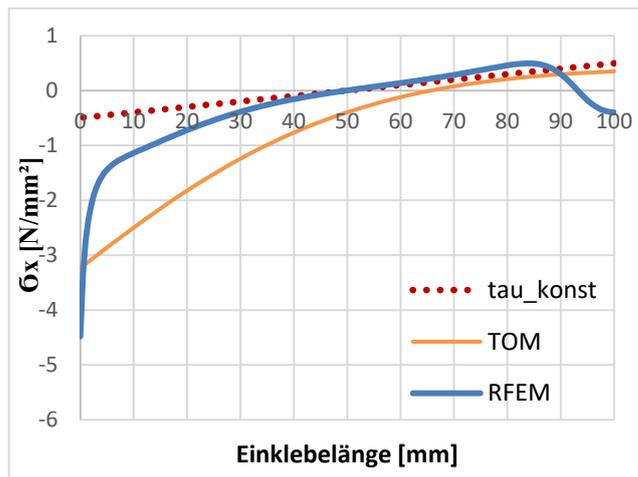
### 7-4.5 BSP-PRÜFKÖRPER

BSP-Alu; L = 100 mm;  $t_1 = 26,5\text{mm}$ ;  $E_{1,90} = 100\text{ N/mm}^2$



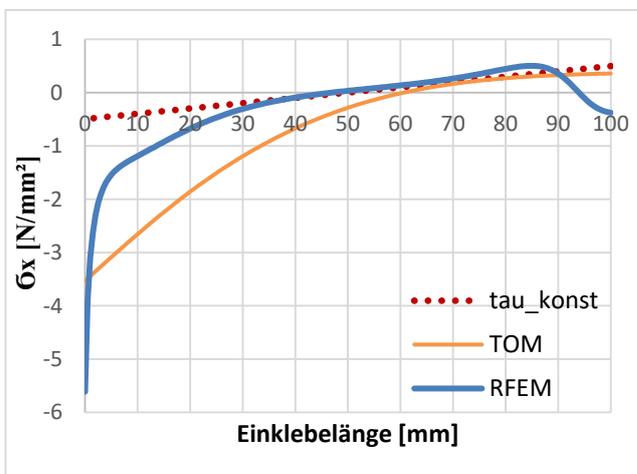
Das FE-Modell bildet durch die Steifigkeitsdämpfung der um  $90^\circ$  zur Faser gedrehten BSP-Schicht niedrige Querspannungen an den Einklebeenden aus. Alle drei Verläufe ähneln sich im Verlauf und der Höhe der Spannungseerte, wodurch festgestellt werden kann, dass die analytischen Modelle ihre Berechtigung zur Vorabschätzung besitzen.

BSP-Alu; L = 100 mm;  $t_1 = 26,5\text{mm}$ ;  $E_{1,90} = 200\text{ N/mm}^2$



Eine Erhöhung des E-Moduls ( $E_{90}$ ) hat eine Steigerung der Spannungsspitzen am Anfang der Einklebelänge zur Folge. Dieser Effekt ist besonders im FE-Modell deutlich zu erkennen. Im FE-Modell fällt auch auf, dass die Querspannungen in der halben Verbundlänge zu Null werden.

BSP-Alu; L = 100 mm;  $t_1 = 26,5\text{mm}$ ;  $E_{1,90} = 300\text{ N/mm}^2$



Für die Verläufe nach der „TOM“-Theorie ist eine Umlagerung der Querspannungen vom Mittelbereich der Verbundlänge in den Anfangsbereich der Einklebelänge festzustellen.

Abbildung 7.17: BSP-Körper-Verlauf der Querspannungen

# KAPITEL 8: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

## 8-1 ZUSAMMENFASSUNG

---

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst auf die Einsatzmöglichkeiten von Brettspertholz eingegangen. In weiterer Folge wurden unterschiedlichen Verbindungstechniken für BSP-Elemente angeführt. Hierbei sind einige Anschlusslösungen mittels eingeklebter Bleche als Entwurfsbeispiele vorgestellt worden, welche in späterer Folge als Entwurfsansatz für die Entwicklung von Systemverbindern herangezogen werden können. Um aus technischer Sicht eine optimierte Anschlusslösung zu entwickeln, wurde näher auf wesentliche Aspekte von Klebeverbindungen und deren Eigenschaften eingegangen. Darauf folgend wurde eine Literaturstudie zu geklebten Verbindungen angestellt, um die maßgebenden Parameter, welche die Tragfähigkeit beeinflussen, zu identifizieren. Nach Feststellung der wesentlichen Einflussparameter, wurden experimentelle Untersuchungen an Zug-, sowie Scherprüfkörpern unter Variation des Holzwerkstoffes, des Blechmaterials, sowie dessen Oberflächenbeschaffenheit durchgeführt, um die Festigkeitskenngrößen in der Klebeverbindung bestimmen zu können.

Das Prüfprogramm gliederte sich in sieben Prüfserien, wobei die Zugprüfserien 01 - 04 mittels Einzelversuche jene Parameter identifizieren sollten, welche das Tragvermögen wesentlich beeinflussen. Prüfserie 06 und 07 werden ebenfalls als Zugprüfungen durchgeführt. Zum Unterschied sollen hier induktive Wegaufnehmer Aufschluss über die Nachgiebigkeit der Klebeverbindung bringen. Die Prüfserie 05 soll als Scherversuch die Scherbeanspruchung der Klebefuge untersuchen, sowie das Steifigkeitsverhalten der Verbindung erfassen. Die Lasteinleitungssituation der Zugprüfserien 04 und 07 („Push-Pull“) unterscheidet sich durch eine andere Prüfkfiguration und sollen für einen Vergleich der Tragfähigkeiten mit den Zugprüfkörpern der Pull-Pull-Prüfserien 03 und 06 herangezogen werden können.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen kurz zusammengefasst:

Die Erkenntnisse aus den Einzelprüfungen („PULL-PULL“) an in Buchenfurnierschichtholz eingeklebten Aluminiumblechen deuten auf eine Steigerung der Tragfähigkeit um 60% durch die Vergrößerung der Einklebelänge von 50 auf 75 mm hin. Des Weiteren ist auch eine Verringerung der mittleren Schubspannung durch größere Einklebelängen festzustellen.

Die Zugprüfungen („PULL-PULL“) an in Fichtenvollholz eingeklebten Stahlblechen lassen den Schluss zu, dass eine Oberflächenbehandlung der Bleche durch Schleifen und Sandstrahlen eine deutliche Traglaststeigerung von rund 40 % mit sich bringt. Zusätzliche Perforierungen tragen zu einer weiteren Steigerung der Maximallast von rund 5 % bei. Holzfaserbeläge auf den herausgezogenen Blechen weisen auf eine maximale Ausnutzung der Materialfestigkeit des Fügepartners Fichtenholz hin.

Das schlechtere Adhäsionsvermögen des Aluminiumbleches an Fichtenvollholz spiegelt sich in den Bruchbildern aus Anhang B wieder und geht mit schlechteren Tragfähigkeiten im Vergleich zu Stahlblechen einher. Hinsichtlich des Steifigkeitsverhaltens der Klebeverbindungen ist ein deutlicher

Unterschied bei größeren Perforierungen (Langlöcher) zu erkennen, wo sich ein nachgiebigeres Verhalten einstellt.

Der Versagensmechanismus der Klebefuge lässt sich generell durch einen Initialriss im Holz am Fußpunkt der Einklebung beschreiben, da dort eine nicht zu vernachlässigende Biegemomentenbeanspruchung auftritt. Am oberen Verklebungsbereich tritt in der Folge ein Querschnittversagen des Holzes ein, welches durch Bohrstabdübel, wie in Prüfserie 03 durchgeführt, bis zum Erreichen der Zugfestigkeitsgrenze des Bleches, unterbunden werden kann.

Vergleicht man die „Pull-Pull“ Prüfungen mit den „Push-Pull“-Prüfungen, fallen aufgrund der unterschiedlichen Lasteinleitungssituation und Spannungszustände im Holzkörper, die höheren Lasten für Push-Pull Prüfkörper ins Auge.

Die Scherprüfungen mit BSP lassen den Schluss zu, dass ein deutlicher Einfluss der Faserorientierung auf die Tragfähigkeit stattfindet. Die Prüfungen der rollschubbeanspruchten Körper weisen deutlich höhere Tragfähigkeiten auf, als jene die in Faserrichtung beansprucht wurden. Des Weiteren ist im Steifigkeitsverhalten der in Faserrichtung beanspruchten Prüfkörper zu erkennen, dass das Steifigkeitsverhältnis zwischen BSP parallel zur Faser und Stahl wesentlich kleiner ist, als jenes der rollschubbeanspruchten Fasern. Somit ergeben sich für die in Faserrichtung beanspruchten Prüfkörper deutlich höhere Steifigkeitswerte.

Um die experimentellen Untersuchungen über geometrische und materielle Einflussparameter auf vorhandene Spannungsspitzen zu analysieren und zu bewerten, wurden unterschiedliche Berechnungsansätze zur Vorhersage des Versagens und der Tragfähigkeit herangezogen und miteinander verglichen.

Folgende Aussagen können anhand der Spannungsanalyse getroffen werden:

Eine Verringerung der Einklebelänge hat eine Erhöhung der mittleren Schubspannungen und somit eine Verringerung der Spannungsspitzen an den Einklebeenden durch Spannungsumlagerung zur Folge.

Durch die Querlage des BSP-Körpers erfolgt ein Abbau der Spannungsspitzen, da sie die Steifigkeitssprünge zwischen Klebefuge und Holz in Faserrichtung durch ihren geringen E-Modul und Schubmodul in Querrichtung abbauen.

Die Fügepartner sollten ein möglichst ähnliches Steifigkeitsverhalten aufweisen, um Spannungsspitzen zu reduzieren.

## 8-2 AUSBLICK

---

Anhand der Spannungsanalyse wurden die maßgebenden Parameter, wie die Einklebelänge, die Seitenholzdicke, sowie das Steifigkeitsverhältnis der Fügepartner identifiziert, wodurch die Prüfkörper optimiert werden können, um sie erneuten Zug- und Scherprüfungen zu unterziehen. Infolgedessen sind verbesserte Tragfähigkeiten der Verbindung, sowie geringere Spannungsspitzen in der Klebefuge zu erwarten.

Die erhaltenen Festigkeitskenngrößen, wie Zug- und Scherfestigkeiten, bilden in weiterer Folge die Grundlage zur Entwicklung eingeklebter Systemverbinder in BSP-Elementen. Aus diesem Grund sollten zusätzliche Zugprüfungen mit Blechen, welche in unterschiedlichen Faserrichtungen ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) in BSP-Prüfkörper eingeklebt werden, geprüft werden.



# ANHANG A VERZEICHNISSE

## A-1 Literaturverzeichnis

- [1] Abdelouahed, T. (2005), Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strenghtstrenght FRP plate, Technical Report, Laboratoire des Materiaux et Hydrologie, Universite de Sidi Bel Abbès.
- [2] AG, P. (2013), Datenblatt Purbond CR421
- [3] Aicher, S. (1993), Kostensparende Holzverbindungen durch eingeleimte Metallbleche unter Verwendung neuartiger Kleber mit erhöhter Leimfugendicke, Technical Report, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg.
- [4] Bahmer, R. (2010), Geklebte Stahl/Holz/Verbindungen - starre Verbindungen mit geringer Querschnittsschwächung, in '1. Internationale Holzbrückentage'.
- [5] Bathon, L. (2015), Starre und duktile Klebeverbindungen für BSP-Anwendungen, Technical Report, Internationales Holzbauforum.
- [6] Bathon, L., Bletz-Mühldorfer, O., Schmidt, J., Weber, M. & Weil, M. (2009), Holz-Stahl-Klebeverbindung mit Flachkörpern - Entwicklungen und Anwendungen, in '15. Internationales Holzbau-Forum'.
- [7] Battisti, V. (2009), Faltwerke aus Brettspertholz, Master's Thesis, Technische Universität Graz.
- [8] Bletz-Mühldorfer, O., Bathon, L., Diehl, F., Schmidt, J. & Weil, M. Wagner, A. (2014), 'Warum nicht mal kleben? - Fachwerkträger mit eingeklebten Lochblechen / Teil 1: Projektvorstellung und Voruntersuchungen', *HOLZBAU die neue Quadriga* **3**, 34–39.
- [9] Brandner, R. (2010), Modern Products and Solutions for the structural Use of Wood (Roofs and Houses), Technical Report, Institute of Timber Engineering and Wood Technology.
- [10] Brandner, R. (2011), Präsentation Brettspertholz: Technologie und Anwendung, TU Graz.
- [11] Brandner, R. & Thiel, A. (2015), *Klebertechnologie und Holzwerkstoffe*.
- [12] Broughton, J. & Hutchinson, A. (2001), 'Adhesive systems for structural connections in timber', *International Journal of Adhesion & Adhesives* **21**, 177–186.
- [13] Deutsches Institut für Bautechnik (2014), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-770, Holz-Stahl-Klebeverbindungssystem (HSK-System) mit eingeklebten HSK-Verbindern
- [14] Dillard, D. A. (2002), *Fundamentals of stress transfer in bonded systems*, Department of Engineering Science and Mechanics.
- [15] Enders-Comberg, M. (2015), Leistungsfähige Verbindungen des Ingenieurholzbau / Ersatzmöglichkeiten für Nadel- und Laubholz, PhD Thesis, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie.
- [16] Feligioni, L., Lavisci, P., Duchanois, G., De Ciechi, M. & Spinelli, P. (2003), 'Influence of glue rheology and joint thickness on the strenght of bonded-in rods', *Holz als Roh- und Werkstoff* **61**(281-287).

- [17] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, D. I. (2013), Z-9.1-838
- [18] Formelsammlung BSP, Holzbauinstitut TU Graz, T. G. I. (2016a)
- [19] Formelsammlung Holzbau, Holzbauinstitut TU Graz, T. G. I. (2016b)
- [20] Frank Hunger, F. & Mislav Stepinac, M. . V. R. V. . v. d. K. J. (2016), ‘Pull-compression tests on glued-in metric thread rods parallel to grain in glulam and laminated veneer lumber of different timber species’.
- [21] *Geschichte auf dem Gleichgewicht der Baustatik* (2016), Kurrer, K.
- [22] GmbH, R. B. (12.01.2017), Technischer Leitfaden X-RAD, <http://www.rothoblaas.com>
- [23] Goland, M. & Reissner, E. (1944), ‘The Stresses in Cemented Joints’.
- [24] Gruber, R., Radovic, B. & Werner, G. (1988), Kostensparende Holzverbindungen durch eingeleimte Metallbleche, Technical Report, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg.
- [25] Habenicht, G. (2006), *Kleben – erfolgreich und fehlerfrei*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag & GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- [26] Habenicht, G. (2009), *Kleben-Grundlagen Technologien Anwendungen*, Wiesbaden.
- [27] Hart-Smith, L. J. (1973), Adhesive-Bonded Single-Lap Joints, Technical Report, Douglas Aircraft Company.
- [28] Jeleč, B. (2016), Untersuchungen zugbeanspruchter faserparallel eingeklebte in Furnierschichtholz aus Buche, Master’s Thesis.
- [29] Kühne, Helmut (1979), ‘70 Jahre geleimte Holz-Tragwerke in der Schweiz’, *Schweizer Ingenieur und Architekt* pp. 577–593.
- [30] Meyer, N. (2016), Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen Bauteilen aus Furnierschichtholz aus BauBuche, Technical Report, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- [31] Möhler, K. & Lautenschläger, R. (1978), Großflächige Queranschlüsse bei Brettschichtholz, PhD Thesis, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe.
- [32] Moers, F. (1981), Anschluss mit eingeleimten Gewindestäben, Technical Report.
- [33] ON Österreichisches Normungsinstitut (1999), ÖNORM EN 1382 / Holzbauwerke - Prüfverfahren- Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmiteln, Österreichisches Normungsinstitut.
- [34] Ottosen, N. S. & Olsson, K. (1988), ‘Hardening / Softening plastic analysis of adhesive joint’, *Journal of Engineering Mechanics* .
- [35] Pröbster, M. (2011), *Baudichtstoffe-erfolgreich Fugen abdichten*, Vieweg und Teubner Verlag.
- [36] Pörtner, C. (2005), Untersuchungen zum Verbund zwischen eingeklebten stiftförmigen faserverstärkten Kunststoffen und Holz, PhD Thesis, Universität Kassel.
- [37] Purgstaller, T. (2010), Das mechanische Verhalten von Klebeverbindungen im Holzbau, Master’s Thesis, TU Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [38] Sachs, L. & Jürgen, H. (2006), *Angewandte Statistik / Methodensammlung mit R*.
- [39] Schickhofer, G. (2009), *Holzbauskriptum Teil B*, TU Graz.
- [40] Schickhofer, G. (2015), Cross Laminated Timber (CLT) – Overview and Development

- [41] Schickhofer, G. & Thiel, A. (2010), 'Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz'.
- [42] Schickhofer, G., Bogensperger, T., Moosbrugger, T., Jöbstl, R., Augustin, M., Thiel, A., Traetta, G., Ferk, H., Ebner, H., Blaß, H. J., Uibel, T., Hamm, P., Richter, A., Frangi, A. & Fontana, M. (2010), *BSPHandbuch - Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz*, Technische Universität Graz - Institut für Holzbau und Holztechnologie & holz.bau forschungs gmbh, Graz, Österreich.
- [43] Schreyer, A., Lam, F., Prion, H. G. L. & Bathon, L. (2001), 'Strength capacities and behaviour of new composite timber-steel connector', *Journal of structural engineering* pp. 888–893.
- [44] Schürmann, H. (2004), *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.
- [45] Schürmann, H. (2007), *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg.
- [46] Steiger, R. (2012), In Brettsperrholz eingeklebte Gewindestangen – Stand des Wissens zu einer leistungsfähigen Verbindungstechnik, in '18. Internationales Holzbau-Forum'.
- [47] Stepinac, M., Rajcic, V., FUNGER, F., van de Kuilen, J.-W., Tomasi, R. & Serrano, E. (2013), Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in european standards, in 'International council for research and innovation in building and construction / Working commission W18 - Timber structures'.
- [48] Österreichisches Institut für Bautechnik (2012), Europäisch technische Zulassung ETA-12/0373
- [49] Österreichisches Normungsinstitut (1996), ON ISO 3131:1996 / Holz Bestimmung der Dichte für physikalische und mechanische Prüfungen
- [50] Österreichisches Normungsinstitut (2004), ÖNORM EN 13183-1 / Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren / Ausgabe: 2004-02-01
- [51] Österreichisches Normungsinstitut (2012), ÖNORM EN 408 / Holzbauwerke-Bauholz für tragende Zwecke und Brettsperrholz - Bestimmung einiger physikalischen und mechanischen Eigenschaften / Ausgabe: 2012-09-01, Austrian Standards Institut.
- [52] Österreichisches Normungsinstitut (2016), ÖNORM EN 384 / Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte
- [53] Tannert, T., Hehl, S. & Vallee, T. (2010), 'Probabilistische Bemessung von geklebten Anschlüssen im Holzbau', *Bautechnik* **87**(10), 623–629.
- [54] TiComTec (2010), Eingeklebte HSK - Rohrverbinder / Technisches Dossier, Technical Report, TiComTec GmbH.
- [55] Tsai, M. Y., Oplinger, D. W. & Morton, J. (1998), 'Improved theoretical solutions for adhesive lap joints', *International Journal of Solids and Structures* **35** (12), 1163–1185.
- [56] Volkersen, O. (1943), Die Schubkraftverteilung auf die Verbindungselemente langer Laschenverbindungen, PhD thesis, Technische Hochschule Wien, Wien.
- [57] Volkersen, O. (1953), 'Die Schubkraftverteilung in Leim- Niet- und Bolzenverbindungen'.
- [58] Wernly, Wirschenbart, P. Z. G. (15.07.2016), Wunderkammer des Brotes
- [59] Zhang, X., Popovski, M. & Tannert, T. (2016), 'High-Capacity Hold-Down for tall timber buildings', *WCTE 2016* .

[60] Zock, P. (2014), Neue Verbindungen für die robotergestützte Herstellung komplexer Holzstrukturen, Technical Report, Berner Fachhochschule, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur ETH Zürich, Professur für Architektur und Digitale Fabrikation.

## A-2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bezeichnungen für ein fünfschichtig aufgebautes Brettsperrholzelement, [9].....	2
Abbildung 2: Einsatzmöglichkeiten von BSP, [10] .....	3
Abbildung 3: Kontaktfugen einer Brettsperrholzstruktur, [40].....	3
Abbildung 4: baustellenseitige Verschraubung von BSP-Elementen, [58].....	4
Abbildung 5: Systemverbinder für BSP, X-RAD, Rotho Blaas GmbH, [22] .....	5
Abbildung 2.6: eingeklebtes Verbindungselement.....	7
Abbildung 2.7: auftretende Schnittkräfte in der Faltwerkskante, [7] .....	8
Abbildung 2.8: Herstellung eines gelenkigen Faltwerksanschlusses .....	8
Abbildung 2.9: gelenkiger Faltwerksanschluss .....	9
Abbildung 2.10: Dachgeschoss in Faltwerksbauweise, [42].....	10
Abbildung 3.1: Einfluss des Klebstoffvolumens auf die Ausziehfestigkeit, [16] .....	13
Abbildung 3.2: Einfluss der Klebstofffugendicke auf die Bruchlast und die Scherspannung [12].....	13
Abbildung 3.3: eingeklebte Gewindestange (links) [15], faserverstärkte Kunststoffstäbe (Mitte) [36], HSK® Rohrverbinder (rechts) [54].....	14
Abbildung 3.4: Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung des Bleches und der Einklebelänge, [24] .....	15
Abbildung 3.5: Einfluss der Blech- und Klebstoffart auf die Scherfestigkeit (Druck- und Zugscherversuche), [24].....	16
Abbildung 3.6: Einfluss der Klebstoffart auf die Last und die Relativverschiebung, [3] .....	16
Abbildung 3.7: Druckscherversuch: Versuchsaufbau (links), Versagen des Bleches (Mitte), Kraft-Verschiebungskurve der Versuche (rechts), [6] .....	17
Abbildung 3.8: Rahmeneckenversuch Last-Verformungs-Kurve: keilgezinkt (links), gelochte Bleche (rechts), [6] .....	17
Abbildung 3.9: Prüfkörper (links), Last-Verformungs-Versuche mit Lochblechen (rechts), [8] .....	18
Abbildung 3.10: Prüfkörper: mit eingeklebter Gewindestange (links), Lochblech (rechts), [60].....	19
Abbildung 3.11: Positionen der Wegaufnehmer, [28].....	20
Abbildung 3.12: DMS-Positionen mit errechneten Normalspannung im Stahlblech, [28].....	20
Abbildung 3.13: DMS-Positionen mit Schubspannungen, [28] .....	21
Abbildung 3.14: Prüfkörper der Versuchsreihe 1 und 2, [5] .....	22
Abbildung 3.15: Ergebnisse unter Variation des Winkels Kraft zur Faser, [5].....	22
Abbildung 3.16: Kraft-Winkel Diagramm der Lochbleche, [5].....	23
Abbildung 3.17: Druck-Scherprüfung [5] .....	23
Abbildung 3.18: Kraftverformungsdiagramm und Versagensbilder: längs zur Faser( oben), quer zur Faser (unten), [5] .....	24

Abbildung 3.19: Ergebnisse der Druckscherprüfung: längs zur Faser (oben), quer zur Faser (unten), [5]	24
Abbildung 3.20: BSH-Prüfkörper für zyklische Belastung, [5]	25
Abbildung 3.21: Kraft-Verformungs-Kurve (links), Bruchbild (rechts) für zyklische Belastung, [5]..	25
Abbildung 3.22: geometrische Parameter des perforierten Stahlbleches, [59]	26
Abbildung 3.23: HSK-Verbindungen: konventionell (links), modifiziert (rechts), [59]	27
Abbildung 3.24: Versuchsserien: 1-1 (links), 1-2 und 1-3(rechts); [59]	28
Abbildung 3.25: Einklebegeometrien: 1-2 (links), 1-3 (rechts); [59]	28
Abbildung 3.26: Versagensmodi: 1-1 (links), 1-2 (Mitte), 1-3 (rechts); [59]	29
Abbildung 3.27: Last-Verschiebungskurven: 1-1 (links), 1-2 (Mitte), 1-3 (rechts); [59]	29
Abbildung 3.28: Lochblechgeometrie: Versuchsserie 2-1 (links), Versuchsserie 2-2 (rechts), [59]	30
Abbildung 3.29: Prüfkfigurationen Schertest: einfache Belastung (links), zyklische Belastung (rechts), [59]	31
Abbildung 3.30: Kraft-Verschiebungsdiagramm Schertest: 2-1, 2-2 (links); 2-3, 2-4 (rechts), [59]	32
Abbildung 3.31: Versagensmechanismen unter einfacher Scherbelastung: kurzes Blech mit zwei abgeklebten Reihen (links); langes Blech mit einer abgeklebten Reihe (rechts), [59]	32
Abbildung 3.32: Versagensmechanismus unter zyklischer Scherbelastung, [59]	33
Abbildung 4.1: Aufbau einer einschnittig überlappten Verklebung, [25]	35
Abbildung 4.2: Oberflächenspannung - Entstehung, [25]	36
Abbildung 4.3: Abhängigkeit des Benetzungsverhaltens vom Benetzungswinkel, [26]	36
Abbildung 4.4: Brucharten von Klebungen, [25]	38
Abbildung 4.5: Versagensbilder von Verbindungen mit in Holz eingeklebten Blechen: Aluminiumbruch (links), Holzbruch (Mitte), Kohäsionsversagen im Klebstoff (rechts)	39
Abbildung 4.6: Schälspannungsverteilung in einer Klebeverbindung bei Schälbeanspruchung, [26]..	40
Abbildung 4.7: Abhängigkeit der Klebefestigkeit von der Klebstoffdicke, [26]	40
Abbildung 4.8: Oberflächenarten, [26]	41
Abbildung 4.9: „Kettenmodell“ von Klebeverbindungen, [46]	42
Abbildung 5.1: Vorabschätzung der Spannungs- und Schnittkraftverteilung in einem Prüfkörper	45
Abbildung 5.2: Spannungsverteilung in Niet- und Klebeverbindungen, [26]	47
Abbildung 5.3: Ungleichförmigkeit der Schubkraftverteilung- ideal elastisch, [56]	48
Abbildung 5.4: Verschiebungskurven der Klebeverbindung: rein elastisch, elastisch-plastisch, rein plastisch, [56]	49
Abbildung 5.5: Einfluss der Kleberplastizität auf den Schubspannungsverlauf, [11]	50
Abbildung 5.6: Krafteinleitungssituationen: Pull-Pull (links), Push-Pull (rechts)	51
Abbildung 5.7: Schubspannungsverlauf zwischen zwei Fügeteilen a) unbelastet b) dehnstarre Fügeteile unter Zugbelastung c) elastische Fügeteile unter Zugbelastung, [45]	52

Abbildung 5.8: freigeschnittene Kräfte in der Klebeverbindung, [37].....	53
Abbildung 5.9: Kräftegleichgewicht am differentiellen Element nach Volkersen, [37].....	53
Abbildung 5.10: Normalkraftverlauf eines Push-Pull Körpers, [37].....	57
Abbildung 5.11: Normalkraftverlauf eines Pull-Pull Körpers, [37].....	59
Abbildung 5.12: Spannungsverläufe bei Füge­teilen unterschiedlicher Dicke.....	62
Abbildung 5.13: Vergleich der Schubspannungsverteilung, oben Volkersen, unten Tsai, [28], [55]...	63
Abbildung 5.14: Geometrie und Materialparameter einer zweischnittigen Verbindung, [55].....	63
Abbildung 5.15: Kräftegleichgewicht am differentiellen Element nach Tsai, [28] .....	64
Abbildung 5.16: Abhängigkeit des Verhältnisses der maximalen Schubspannungen der Theorien nach Volkersen und TOM, [55] .....	66
Abbildung 5.17: einschnittige Überlappungsverklebung nach Goland und Reissner, [37] .....	67
Abbildung 5.18: Maximale Schubspannung des Klebstoffes in Abhängigkeit des Exzentrizitätsfaktor $k$ , [23] .....	68
Abbildung 5.19: Schubspannungsverteilung bei $l_{ü}=10$ m, $l_{ü} =20$ mm, [26] .....	69
Abbildung 5.20: einschnittige Überlappungsklebung mit Einteilung in vier Bereiche (oben), Verformung unter Belastung (unten) , [27].....	70
Abbildung 5.21: k-Faktoren im Verhältnis zur Überlappungslänge, [27].....	72
Abbildung 5.22: bilineare Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung, [37].....	73
Abbildung 5.23: zweischnittige Klebeverbindung (links), bilinearer Verbundansatz (rechts), [34].....	73
Abbildung 5.24: Modell des elastisch gebetteten Balkens, [14] .....	77
Abbildung 5.25: elastisch gebetteter Balken mit Querkraft und Moment, [14] .....	78
Abbildung 5.26: Verbundbalken mit verstärkter Stahlplatte.....	80
Abbildung 5.27: Schnittkräfte im infinitesimalen Element des Verbundbalkens .....	81
Abbildung 6.1: Prüfschema.....	89
Abbildung 6.2: Festigkeits- und Steifigkeitswerte von Buchenfurnierschichtholz, [17] .....	91
Abbildung 6.3: Festigkeits- und Steifigkeitswerte von Fichte-Vollholz, [19] .....	92
Abbildung 6.4: Festigkeits- und Steifigkeitswerte von Brettsperrholz, [18].....	93
Abbildung 6.5: Handpistole für die Verarbeitung von 2-Komponenten-Klebstoffen [26], Aushärtekurve des Purbond CR 42, [2].....	94
Abbildung 6.6: Herstellen der Oberflächenprofilierung .....	95
Abbildung 6.7: „PULL-PULL“-Prüfung: zwei Bleche( links); einseitiges Blech mit Vollgewindeschrauben (rechts).....	97
Abbildung 6.8: „PUSH-PULL“-Prüfkonfiguration.....	98
Abbildung 6.9: Scherprüfkonfiguration .....	99
Abbildung 6.10: Scherversuch mit Torsionsmoment.....	103
Abbildung 6.11: Beschreibung eines Boxplots .....	105

Abbildung 6.12: Geometrie Kreuzzieb (links), Einhiebs(rechts) .....	106
Abbildung 6.13: Oberflächenbehandlung (Kreuzzieb, Einhiebs, geschliffen) .....	107
Abbildung 6.14: Bohrstabdübel (links), Schellen (rechts) .....	107
Abbildung 6.15: Herstellen der Prüfkörper .....	109
Abbildung 6.16: Auszug aus der Schraubenzulassung ETA-12/0373, [48] .....	110
Abbildung 6.17: maximale Tragfähigkeiten, Prüfserie 01 .....	111
Abbildung 6.18: Normalspannungen im Holzquerschnitt (brutto), Prüfserie 01 .....	115
Abbildung 6.19: Normalspannungen im Aluminiumquerschnitt (brutto), Prüfserie 01 .....	116
Abbildung 6.20: Scherspannungen in der Klebeschicht, Prüfserie 01 .....	117
Abbildung 6.21: Ausdrehen der Klebstoffkeile .....	118
Abbildung 6.22: Stahlblech Prüfserie 02 .....	119
Abbildung 6.23: Bruchbilder Prüfserie 02 .....	120
Abbildung 6.24: Oberflächenbehandlungen und Perforierung der Bleche, Prüfserie 03 .....	124
Abbildung 6.25: maximale Tragfähigkeiten der Prüfserie 03 .....	125
Abbildung 6.26: Zugnormalspannungen im Holzquerschnitt (brutto), Prüfserie 03 .....	128
Abbildung 6.27: Normalspannungen im Blechquerschnitt (brutto), Prüfserie 03 .....	129
Abbildung 6.28: Scherspannungen in der Klebeschicht, Prüfserie 03 .....	130
Abbildung 6.29: Oberflächenbehandlungen und Perforierung der Bleche (ohne Aufspaltsicherung), Prüfserie 04 .....	132
Abbildung 6.30: Prüfkfiguration, Prüfserie 04 .....	133
Abbildung 6.31: maximale Tragfähigkeiten, Prüfserie 04 .....	134
Abbildung 6.32: Zugnormalspannungen im Holzquerschnitt (brutto), Prüfserie 04 .....	136
Abbildung 6.33: Normalspannungen im Aluminiumquerschnitt (brutto), Prüfserie 04 .....	137
Abbildung 6.34: Scherspannungen in der Klebeschicht, Prüfserie 04 .....	138
Abbildung 6.35: Lasteinleitung „Pull-Pull“ (links) vs. „Push-Pull“ (rechts) .....	139
Abbildung 6.36: Oberflächenprofilierung (geschliffen oben, sandgestrahlt unten) .....	140
Abbildung 6.37: Herstellungsschritte der BSP-Platten .....	141
Abbildung 6.38: Herstellungsschritte der BSP-Prüfkörper .....	144
Abbildung 6.39: Prüfkfiguration mit induktiven Wegaufnehmern, Prüfserie 05 .....	145
Abbildung 6.40: Vorversuch Bruchflächen, Prüfserie 05 .....	146
Abbildung 6.41: Holzfeuchteverteilung der Prüfserie 05 .....	147
Abbildung 6.42: Rohdichteverteilung der Prüfserie 05 .....	148
Abbildung 6.43: Tragfähigkeitsverteilung der Prüfserie 05 .....	150
Abbildung 6.44: Scherspannungen der Prüfserie 05 .....	152
Abbildung 6.45: Steifigkeitsverteilung der Prüfserie 05 .....	153

Abbildung 6.46: lokales Kraft-Weg-Diagramm, Prüfserie 05 .....	154
Abbildung 6.47: Oberflächenbehandlungen und Perforierung der Bleche, Prüfserie 06 .....	157
Abbildung 6.48: Herstellen der Prüfkörper 06 .....	157
Abbildung 6.49: Einkleben der Prüfkörper 06 .....	158
Abbildung 6.50: schematische Darstellung des Wegaufnehmersystems, Prüfserie 06 .....	160
Abbildung 6.51: Induktive Wegaufnehmer mit Stahllaschen, Prüfserie 06 .....	161
Abbildung 6.52: Holzfeuchteverteilung der Prüfserie 06.....	163
Abbildung 6.53: Holzfeuchte in Abhängigkeit der Scherfestigkeit, Prüfserie 06 .....	163
Abbildung 6.54: Rohdichteverteilung der Prüfserie 06.....	165
Abbildung 6.55: Rohdichte in Abhängigkeit der Scherfestigkeit, Prüfserie 06 .....	165
Abbildung 6.56: Tragfähigkeiten der Prüfserie 06.....	166
Abbildung 6.57: Geometrie der elliptischen Lochung, [28].....	168
Abbildung 6.58: Bruchbilder: Virgolini (links), Jeleč (rechts), [28].....	168
Abbildung 6.59: Tragfähigkeitsvergleich 03 und 06.....	169
Abbildung 6.60: Scherfestigkeiten der Prüfserie 06.....	173
Abbildung 6.61: Scherspannungsvergleich Prüfserie 03 und 06.....	174
Abbildung 6.62: Steifigkeitsverteilung (bereinigt), Prüfserie 06 .....	175
Abbildung 6.63: lokale Kraft-Verschiebungsdiagramme, Prüfserie 06 .....	178
Abbildung 6.64: „Push-Pull“-Prüfserie 07: schematische Darstellung (links); Position der induktiven Wegaufnehmer (rechts) .....	180
Abbildung 6.65: Tragfähigkeiten der Prüfserie 07.....	181
Abbildung 6.66: Scherfestigkeiten der Prüfserie 07.....	186
Abbildung 6.67: Steifigkeitsunterschied „Pull-Pull“ (06) und „Push-Pull“ (07) .....	187
Abbildung 6.68: lokale Kraft-Verschiebungsdiagramme, Prüfserie 07 .....	190
Abbildung 6.69: Scherfestigkeitsvergleich mit Versuchen aus der Literatur, [3], [24] .....	191
Abbildung 6.70: Tragfähigkeitsvergleich, Prüfserie 03 (S-PU-L6) vs. Jeleč [28] .....	192
Abbildung 7.1: Modellierung Zugprüfkörper Fichte-Vollholz (links), BSP (rechts).....	194
Abbildung 7.2: Schubspannungen $\tau_{xy}$ , Längsspannungen $\sigma_y$ , Querkzug- und Querdruckspannungen $\sigma_x$ .....	195
Abbildung 7.3: Variation der Einklebelänge-Verlauf der Schubspannungen .....	196
Abbildung 7.4: Variation des Blechmaterials-Schubspannungen .....	197
Abbildung 7.5: Variation der Seitenholzdicke-Verlauf der Schubspannungen.....	197
Abbildung 7.6: Variation des Holzwerkstoffes-Verlauf der Schubspannungen .....	198
Abbildung 7.7: BSP-Körper-Verlauf der Schubspannungen .....	199
Abbildung 7.8: Variation der Einklebelänge-Verlauf der Längsspannungen .....	200

---

Abbildung 7.9: Variation des Blechmaterials-Verlauf der Längsspannungen .....	201
Abbildung 7.10: Variation der Seitenholzdicke-Verlauf der Längsspannungen.....	201
Abbildung 7.11: Variation des Holzwerkstoffes-Verlauf der Längsspannungen.....	202
Abbildung 7.12: BSP-Körper-Verlauf der Längsspannungen.....	203
Abbildung 7.13: Variation der Einklebelänge-Verlauf der Querkzugspannungen .....	204
Abbildung 7.14: Variation des Blechmaterials-Verlauf der Querkzugspannungen .....	205
Abbildung 7.15: Variation der Seitenholzdicke-Verlauf der Querkzugspannungen.....	205
Abbildung 7.16: Variation des Holzwerkstoffes-Verlauf der Querkzugspannungen.....	206
Abbildung 7.17: BSP-Körper-Verlauf der Querkzugspannungen.....	207

## A-3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Mögliche Versagensmodi von Holz-Prüfkörper mit eingeklebten Blechen.....	39
Tabelle 6.1: Geometrie der Zugkörper, [28] .....	90
Tabelle 6.2: Geometrie der Scherkörper .....	90
Tabelle 6.3: Versuchsanordnung Prüfserie 01.....	108
Tabelle 6.4: Prüfkörperbezeichnung Prüfserie 01 .....	108
Tabelle 6.5: Vergleich der Tragfähigkeiten „ohne Schelle –kurz“ .....	112
Tabelle 6.6: Vergleich der Tragfähigkeiten „ohne Schelle –lang“ .....	112
Tabelle 6.7: Vergleich der Tragfähigkeiten „mit Schelle –kurz“ .....	113
Tabelle 6.8: Vergleich der Tragfähigkeiten „mit Schelle –lang“ .....	113
Tabelle 6.9: Vergleich der Tragfähigkeiten „mit Schraube –kurz“ .....	114
Tabelle 6.10: Blechmaterial Prüfserie 03 .....	122
Tabelle 6.11: Prüfkörperbezeichnung Prüfserie 03 .....	123
Tabelle 6.12: Vergleich der Tragfähigkeiten „Aluminiumbleche ohne Aufspaltsicherung“, Prüfserie 03 .....	126
Tabelle 6.13: Vergleich der Tragfähigkeiten „Aluminiumbleche mit Aufspaltsicherung“ .....	127
Tabelle 6.14: Vergleich der Tragfähigkeiten „Stahlbleche“, [28].....	127
Tabelle 6.15: Prüfkörperbezeichnung Prüfserie 04 .....	132
Tabelle 6.16: Vergleich der Tragfähigkeiten „Aluminiumbleche ohne Aufspaltsicherung“, Prüfserie 04 .....	135
Tabelle 6.17: Vergleich der Tragfähigkeiten „Aluminiumbleche Aufspaltsicherung entfernt“, Prüfserie 04 .....	135
Tabelle 6.18: Vergleich der Tragfähigkeiten „Stahlbleche (ohne Referenz)“, Prüfserie 04 .....	135
Tabelle 6.19: Blechmaterial Prüfserie 05 .....	140
Tabelle 6.20: Prüfkörperbezeichnung, Prüfserie 05 .....	142
Tabelle 6.21: Statistische Kenngrößen der Holzfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfung05 .....	147
Tabelle 6.22: Statistische Kenngrößen der Rohdichte in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 05 ...	148
Tabelle 6.23: Statistische Kenngrößen der Tragfähigkeit des Holzes in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 05 .....	149
Tabelle 6.24: Statistische Kenngrößen der Scherspannung in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 05 .....	151
Tabelle 6.25: Statistische Kenngrößen der Steifigkeit in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 05...	152
Tabelle 6.26: Prüfmaterial Prüfserie 06 (Festigkeitswerte laut Angaben des Herstellers).....	155
Tabelle 6.27: Prüfkörperbezeichnung, Prüfserie 06 .....	156

---

Tabelle 6.28: Statistische Kenngrößen der Holzfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 06.....	162
Tabelle 6.29: Statistische Kenngrößen der Rohdichte in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 06 ...	164
Tabelle 6.30: Statistische Kenngrößen der Tragfähigkeit des Holzes in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 06 .....	167
Tabelle 6.31: Statistische Kenngrößen der Brutto-Zugspannungen des Holzes in Abhängigkeit der Prüfserie .....	170
Tabelle 6.32: Statistische Kenngrößen der Bruttozugspannungen des Bleches in Abhängigkeit der Prüfserie .....	171
Tabelle 6.33: Statistische Kenngrößen der Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Untergruppen, Prüfserie 06.....	172
Tabelle 6.34: Statistische Kenngrößen der Steifigkeit in Abhängigkeit der Prüfserie .....	176
Tabelle 6.35: Prüfkörperbezeichnung Prüfserie 07 .....	179
Tabelle 6.36: Statistische Kenngrößen der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Untergruppen, Prüfserie 07.....	182
Tabelle 6.37: Statistische Kenngrößen der Bruttozugspannung des Holzes in Abhängigkeit der Prüfserie .....	183
Tabelle 6.38: Statistische Kenngrößen der Bruttozugspannungen des Stahls in Abhängigkeit der Prüfserie .....	184
Tabelle 6.39: Statistische Kenngrößen der Scherspannungen in Abhängigkeit der Prüfserie.....	185
Tabelle 6.40: Statistische Kenngrößen der Steifigkeit in Abhängigkeit der Prüfserie, Prüfserie 07 ...	188
Tabelle 7.1: Eingangsparameter .....	193

## ANHANG B BRUCHBILDER

### Prüfserie 01

AL-PU-B-01  $F_{\max} = 57,19 \text{ kN}$



AL-PU-B-02  $F_{\max} = 57,52 \text{ kN}$



AL-PU-B-03  $F_{\max} = 34,09 \text{ kN}$



AL-PU-B-04  $F_{\max} = 45,66 \text{ kN}$



AL-PU-B-05  $F_{\max} = 43,62 \text{ kN}$



AL-PU-E-01  $F_{\max} = 32,04 \text{ kN}$



AL-PU-E-02  $F_{\max} = 57,21 \text{ kN}$



AL-PU-E-03  $F_{\max} = 27,26 \text{ kN}$



AL-PU-E-04  $F_{\max} = 50,80 \text{ kN}$



AL-PU-E-05  $F_{\max} = 50,04 \text{ kN}$



AL-PU-K-01  $F_{\max} = 56,32 \text{ kN}$



AL-PU-K-02  $F_{\max} = 32,66 \text{ kN}$ AL-PU-K-03  $F_{\max} = 44,53 \text{ kN}$ AL-PU-K-04  $F_{\max} = 55,77 \text{ kN}$ AL-PU-K-05  $F_{\max} = 50,85 \text{ kN}$ **Prüfserie 02**S-PU-LL3-01  $F_{\max} = 61,05 \text{ kN}$ 

## Prüfsrie 03

 ALH-PU-B02  $F_{\max} = 30,69 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-B03  $F_{\max} = 37,62 \text{ kN}$ 

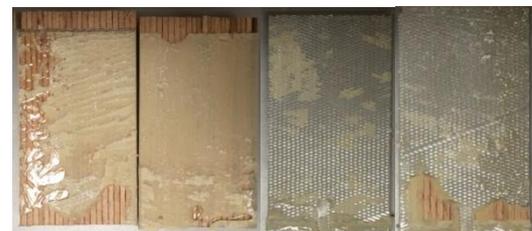
 ALH-PU-BS2-01  $F_{\max} = 43,31 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-BS2-04  $F_{\max} = 46,62 \text{ kN}$ 

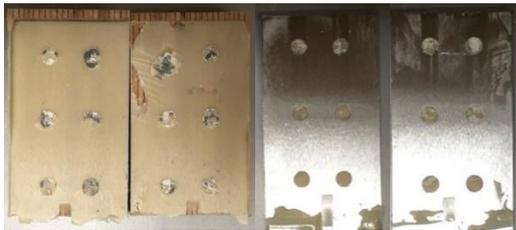
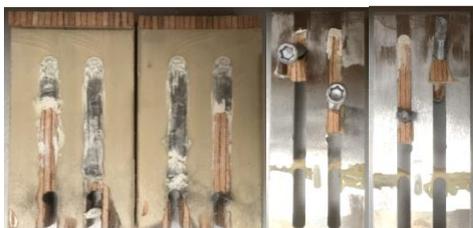
 ALH-PU-BS2-05  $F_{\max} = 52,97 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-E-01  $F_{\max} = 39,17 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-K-01  $F_{\max} = 70,09 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-K-02  $F_{\max} = 58,68 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-KLL2-01  $F_{\max} = 76,84 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-KS1-05  $F_{\max} = 79,16 \text{ kN}$ 


ALH-PU-KS2-03  $F_{\max} = 109,15 \text{ kN}$ ALH-PU-KS2-04  $F_{\max} = 112,23 \text{ kN}$ ALH-PU-L6-01  $F_{\max} = 30,00 \text{ kN}$ ALH-PU-L6-02  $F_{\max} = 48,06 \text{ kN}$ ALH-PU-L6-04  $F_{\max} = 35,84 \text{ kN}$ ALH-PU-L62S-03  $F_{\max} = 63,50 \text{ kN}$ ALH-PU-L62S-05  $F_{\max} = 61,31 \text{ kN}$ ALH-PU-LL2S-01  $F_{\max} = 50,37 \text{ kN}$ 

S-PU-L6-01  $F_{\max} = 57,09 \text{ kN}$



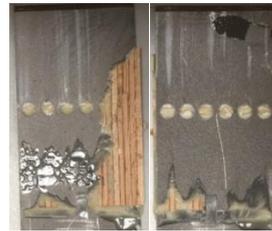
S-PU-L6-02  $F_{\max} = 63,03 \text{ kN}$



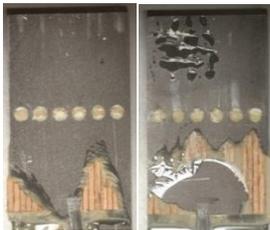
S-PU-L6-03  $F_{\max} = 78,93 \text{ kN}$



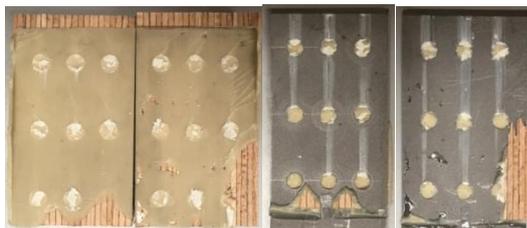
S-PU-L6-04  $F_{\max} = 68,07 \text{ kN}$



S-PU-L6-05  $F_{\max} = 64,57 \text{ kN}$



S-PU-L9-01  $F_{\max} = 57,42 \text{ kN}$



S-PU-L9-02  $F_{\max} = 49,66 \text{ kN}$



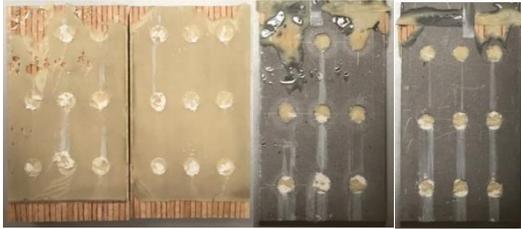
S-PU-L9-03  $F_{\max} = 52,46 \text{ kN}$



S-PU-L9-04  $F_{\max} = 72,34 \text{ kN}$



S-PU-L9-05

 $F_{\max} = 72,57 \text{ kN}$ 

S-PU-LL3-01

 $F_{\max} = 71,24 \text{ kN}$ **Prüfserie 04**

ALH-PU-B-02

 $F_{\max} = 46,72 \text{ kN}$ 

ALH-PU-B-03

 $F_{\max} = -$ 

ALH-PU-BS2-01

 $F_{\max} = 52,28 \text{ kN}$ 

ALH-PU-BS2-04

 $F_{\max} = 46,26 \text{ kN}$ 

ALH-PU-K-01

 $F_{\max} = 78,45 \text{ kN}$ 

ALH-PU-K-02

 $F_{\max} = 75,62 \text{ kN}$ 

ALH-PU-KLL2-01

 $F_{\max} = 100 \text{ kN}$  (Maximalkraft, durchrutschen der Klemmbacken)

ALH-PU-KS1-05

 $F_{\max} = 94,87 \text{ kN}$ 


ALH-PU-KS2-03

 $F_{\max} = -$ 


ALH-PU-KS2-04

 $F_{\max} = 97,81 \text{ kN}$ 


ALH-PU-L6-01

 $F_{\max} = 59,70 \text{ kN}$ 

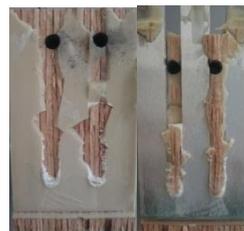

ALH-PU-L6-02

 $F_{\max} = 47,83 \text{ kN}$ 


ALH-PU-L6-04

 $F_{\max} = 48,61 \text{ kN}$ 


ALH-PU-LL2S-04

 $F_{\max} = 60,26 \text{ kN}$ 


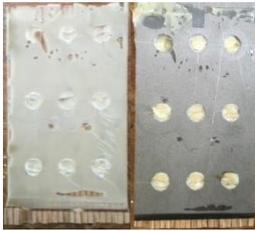
S-PU-L9-01

 $F_{\max} = 87,91 \text{ kN}$ 


S-PU-L9-02

 $F_{\max} = 81,64 \text{ kN}$ 


S-PU-L9-03

 $F_{\max} = 60,74 \text{ kN}$ 

S-PU-L9-04

 $F_{\max} = 95,38 \text{ kN}$ 

S-PU-L9-05

 $F_{\max} = 79,32 \text{ kN}$ 

S-PU-LL3-01

 $F_{\max} = 74,46 \text{ kN}$ **Prüfserie 05**

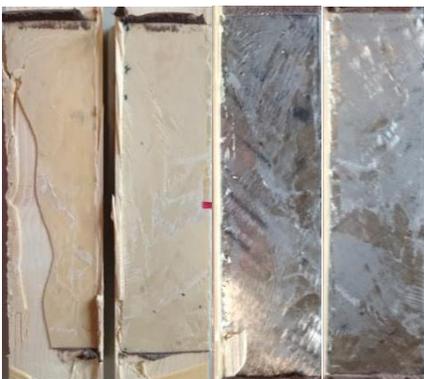
S-PU-G01

 $F_{\max} = 92,51 \text{ kN}$ 

S-PU-G02

 $F_{\max} = 87,23 \text{ kN}$ 

S-PU-G03

 $F_{\max} = 87,70 \text{ kN}$ 

S-PU-G04

 $F_{\max} = 103,29 \text{ kN}$ 

S-PU-SA01

 $F_{\max} = 78,32 \text{ kN}$ 

S-PU-SA02

 $F_{\max} = 88,27 \text{ kN}$ 

S-PU-SA03

 $F_{\max} = 62,43 \text{ kN}$ 

S-PU-SA04

 $F_{\max} = 57,59 \text{ kN}$ 

S-PU-G90\_01

 $F_{\max} = 96,86 \text{ kN}$ 

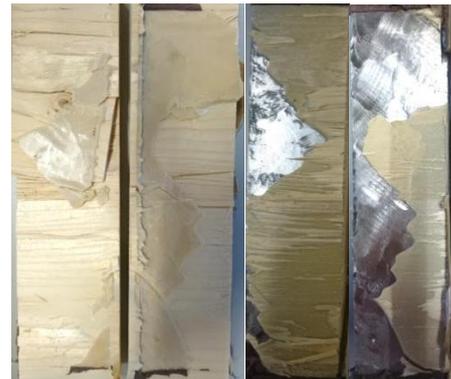
S-PU-G90\_02

 $F_{\max} = 103,21 \text{ kN}$ 

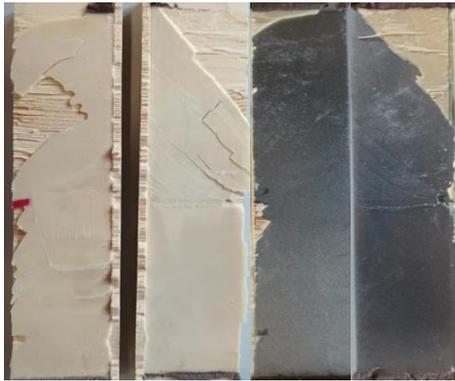
S-PU-G90\_03

 $F_{\max} = 107,93 \text{ kN}$ 

S-PU-G90\_04

 $F_{\max} = 115,12 \text{ kN}$ 

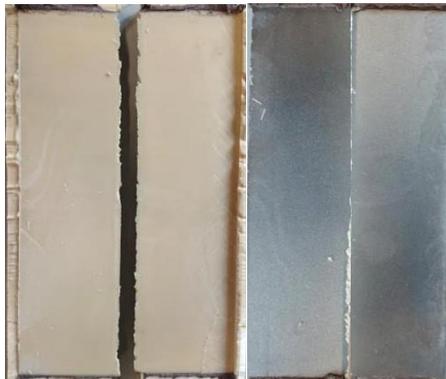
S-PU-SA90\_01

 $F_{\max} = 111,14 \text{ kN}$ 

S-PU-SA90\_02

 $F_{\max} = 106,36 \text{ kN}$ 

S-PU-SA90\_03

 $F_{\max} = 98,00 \text{ kN}$ 

S-PU-SA90\_04

 $F_{\max} = 112,65 \text{ kN}$ **Prüfserie 06**

ALH-PU-G01

 $F_{\max} = 32,62 \text{ kN}$ 

ALH-PU-G02

 $F_{\max} = 39,51 \text{ kN}$ 

ALH-PU-G03

 $F_{\max} = 16,10 \text{ kN}$ 

ALH-PU-G04

 $F_{\max} = 28,51 \text{ kN}$ 

ALH-PU-G05  $F_{\max} = 28,04 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-G06  $F_{\max} = 41,71 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-G07  $F_{\max} = 36,03 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-G08  $F_{\max} = 28,71 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-G(2x3)-01  $F_{\max} = 39,49 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-G(2x3)-02  $F_{\max} = 39,54 \text{ kN}$ 

 ALH-PU-G(2x3)-03  $F_{\max} = 29,48 \text{ kN}$ 

 S-PU-B01  $F_{\max} = 43,70 \text{ kN}$ 

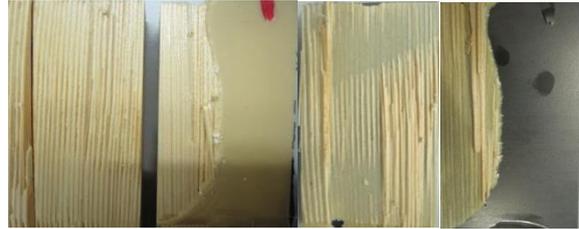
 S-PU-B02  $F_{\max} = 31,87 \text{ kN}$ 

 S-PU-B03  $F_{\max} = 36,30 \text{ kN}$ 


S-PU-B04

 $F_{\max} = 38,29 \text{ kN}$ 

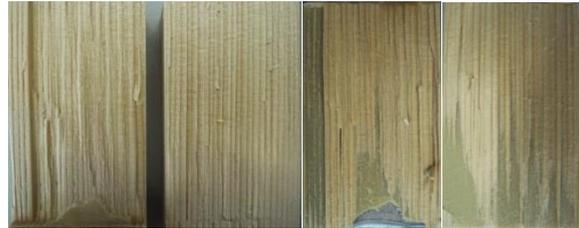
S-PU-B05

 $F_{\max} = 26,53 \text{ kN}$ 

S-PU-B06

 $F_{\max} = 30,61 \text{ kN}$ 

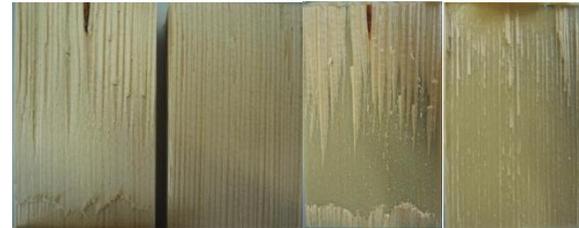
S-PU-G01

 $F_{\max} = 57,05 \text{ kN}$ 

S-PU-G02

 $F_{\max} = 54,25 \text{ kN}$ 

S-PU-G03

 $F_{\max} = 53,39 \text{ kN}$ 

S-PU-G04

 $F_{\max} = 53,23 \text{ kN}$ 

S-PU-G05

 $F_{\max} = 47,67 \text{ kN}$ 

S-PU-G06

 $F_{\max} = 44,22 \text{ kN}$ 

S-PU-G07

 $F_{\max} = 38,73 \text{ kN}$ 

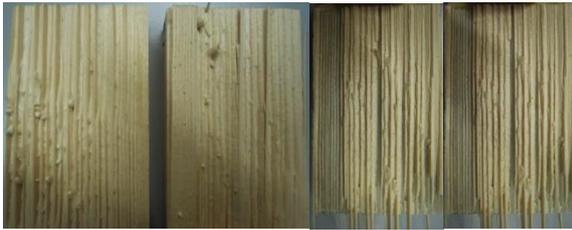
S-PU-G08

 $F_{\max} = 49,77 \text{ kN}$ 


S-PU-G09

 $F_{\max} = 58,97 \text{ kN}$ 


S-PU-G10

 $F_{\max} = 53,04 \text{ kN}$ 


S-PU-G(3LL)-01

 $F_{\max} = 52,20 \text{ kN}$ 


S-PU-G(3x3)-01

 $F_{\max} = 60,00 \text{ kN}$ 


S-PU-G(3x3)-02

 $F_{\max} = 45,54 \text{ kN}$ 


S-PU-G(3x3)-03

 $F_{\max} = 55,81 \text{ kN}$ 


S-PU-G(3x3)-04

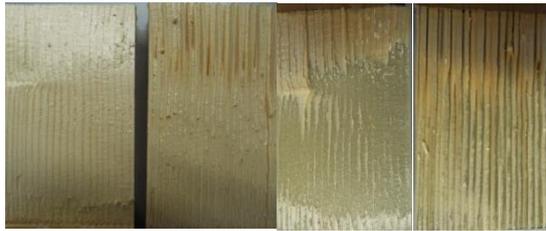
 $F_{\max} = 50,72 \text{ kN}$ 


-PU-G(3x3)-05

 $F_{\max} = 54,86 \text{ kN}$ 


S-PU-G(6x1)-01

 $F_{\max} = 55,90 \text{ kN}$ 


S-PU-G(6x1)-02  $F_{\max} = 54,45 \text{ kN}$ S-PU-G(6x1)-03  $F_{\max} = 56,09 \text{ kN}$ S-PU-G(6x1)-04  $F_{\max} = 51,17 \text{ kN}$ S-PU-G(6x1)-05  $F_{\max} = 50,17 \text{ kN}$ S-PU-SA01  $F_{\max} = 47,37 \text{ kN}$ S-PU-SA02  $F_{\max} = 42,55 \text{ kN}$ S-PU-SA03  $F_{\max} = 58,90 \text{ kN}$ S-PU-SA04  $F_{\max} = 64,05 \text{ kN}$ S-PU-SA05  $F_{\max} = 39,71 \text{ kN}$ S-PU-SA06  $F_{\max} = 43,08 \text{ kN}$ 

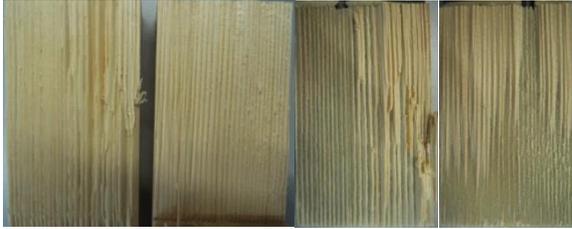
S-PU-SA07

 $F_{\max} = 50,70 \text{ kN}$ 


S-PU-SA08

 $F_{\max} = 42,46 \text{ kN}$ 


S-PU-SA09

 $F_{\max} = 46,59 \text{ kN}$ 


S-PU-SA(6x1)01

 $F_{\max} = 56,92 \text{ kN}$ 


S-PU-SA(6x1)02

 $F_{\max} = 55,76 \text{ kN}$ 

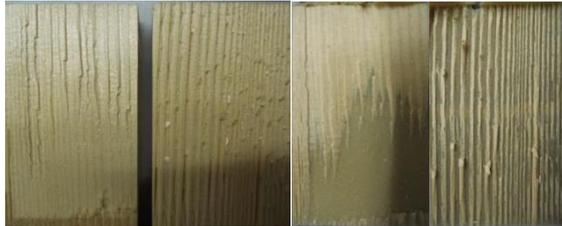

S-PU-SA(6x1)03

 $F_{\max} = 54,08 \text{ kN}$ 


S-PU-SA(6x1)04

 $F_{\max} = 49,35 \text{ kN}$ 


S-PU-SA(6x1)05

 $F_{\max} = 34,90 \text{ kN}$ 

**Prüfserie 07**

 ALH-PU-G01  $F_{\max} = 49,53 \text{ kN}$ 


ALH-PU-G02

 $F_{\max} = 45,09 \text{ kN}$ 


ALH-PU-G03  $F_{\max} = 51,46 \text{ kN}$ ALH-PU-G04  $F_{\max} = 45,17 \text{ kN}$ ALH-PU-G05  $F_{\max} = 35,16 \text{ kN}$ ALH-PU-G06  $F_{\max} = 46,96 \text{ kN}$ ALH-PU-G07  $F_{\max} = 62,11 \text{ kN}$ ALH-PU-G08  $F_{\max} = 41,38 \text{ kN}$ ALH-PU-G(2x3)\_01  $F_{\max} = 52,35 \text{ kN}$ ALH-PU-G(2x3)\_02  $F_{\max} = 60,04 \text{ kN}$ ALH-PU-G(2x3)\_03  $F_{\max} = 55,75 \text{ kN}$ S-PU-B01  $F_{\max} = 35,06 \text{ kN}$ 

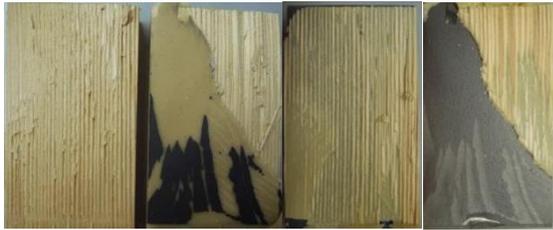
S-PU-B02  $F_{max} = 36,02 \text{ kN}$



S-PU-B03  $F_{max} = 50,80 \text{ kN}$



S-PU-B04  $F_{max} = 53,37 \text{ kN}$



S-PU-B05  $F_{max} = 33,28 \text{ kN}$



S-PU-B06  $F_{max} = 36,91 \text{ kN}$



S-PU-G(3LL)-01  $F_{max} = 49,19 \text{ kN}$



S-PU-G(3x3)-01  $F_{max} = 43,99 \text{ kN}$



S-PU-G(3x3)-02  $F_{max} = 50,24 \text{ kN}$



S-PU-G(3x3)-03  $F_{max} = 52,96 \text{ kN}$



S-PU-G(3x3)-04  $F_{max} = 45,23 \text{ kN}$



S-PU-G(3x3)-05  $F_{\max} = 60,61 \text{ kN}$ S-PU-G(6x1)-01  $F_{\max} = 32,49 \text{ kN}$ S-PU-G(6x1)-02  $F_{\max} = 53,16 \text{ kN}$ S-PU-G(6x1)-03  $F_{\max} = 62,83 \text{ kN}$ S-PU-G(6x1)-04  $F_{\max} = 44,49 \text{ kN}$ S-PU-G(6x1)-05  $F_{\max} = 52,15 \text{ kN}$ S-PU-G-01  $F_{\max} = 53,75 \text{ kN}$ S-PU-G-02  $F_{\max} = 54,69 \text{ kN}$ S-PU-G-03  $F_{\max} = 50,83 \text{ kN}$ S-PU-G-04  $F_{\max} = 45,36 \text{ kN}$ 

S-PU-G-05

 $F_{\max} = 39,21 \text{ kN}$ 


S-PU-G-06

 $F_{\max} = 34,31 \text{ kN}$ 


S-PU-G-07

 $F_{\max} = 40,81 \text{ kN}$ 


S-PU-G-08

 $F_{\max} = 44,81 \text{ kN}$ 


S-PU-G-09

 $F_{\max} = 47,62 \text{ kN}$ 


S-PU-G-10

 $F_{\max} = 46,42 \text{ kN}$ 


S-PU-SA(6x1)-01

 $F_{\max} = 45,06 \text{ kN}$ 


S-PU-SA(6x1)-02

 $F_{\max} = 52,47 \text{ kN}$ 


S-PU-SA(6x1)-03

 $F_{\max} = 48,77 \text{ kN}$ 


S-PU-SA(6x1)-04

 $F_{\max} = 51,84 \text{ kN}$ 


S-PU-SA(6x1)-05  $F_{\max} = 41,13 \text{ kN}$



S-PU-SA01  $F_{\max} = 46,30 \text{ kN}$



S-PU-SA02  $F_{\max} = 45,02 \text{ kN}$



S-PU-SA03  $F_{\max} = 49,90 \text{ kN}$



S-PU-SA04  $F_{\max} = 49,93 \text{ kN}$



S-PU-SA05  $F_{\max} = 46,39 \text{ kN}$



S-PU-SA07  $F_{\max} = 47,27 \text{ kN}$



S-PU-SA08  $F_{\max} = 47,08 \text{ kN}$



S-PU-SA09  $F_{\max} = 50,63 \text{ kN}$



Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte  
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl