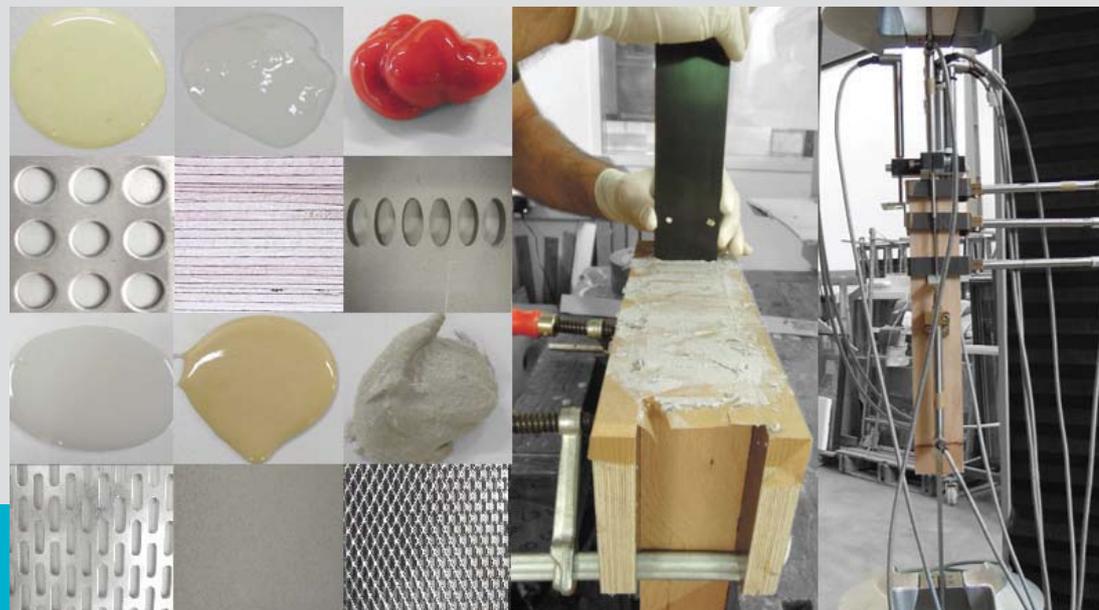


Untersuchungen zugbeanspruchter faserparallel eingeklebter Bleche in Furnierschichtholz aus Buche



M-4-3/2016

Blazenka Jelec
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Blaženka Jeleč, BSc

Untersuchungen zugbeanspruchter faserparallel eingeklebter Bleche in Furnierschichtholz aus Buche

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
Institut für Holzbau und Holztechnologie
DI Markus Grabner
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, Jänner 2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen 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

Ich möchte diese Zeilen nutzen, um mich recht herzlich bei all denjenigen zu bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit sowie während meines Studiums begleitet, motiviert und unterstützt haben.

Ganz besonders gilt dieser Dank dem Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer für die freundliche Aufnahme am Institut für Holzbau und Holztechnologie als Ferialarbeiterin und studentische Projektmitarbeiterin. Zudem möchte ich mich für die Möglichkeit, die Masterarbeit an diesem Institut zu verfassen und für die Begutachtung derselben herzlich bedanken.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Markus Grabner möchte ich mich für den Einsatz bei der Durchführung der Laborprüfungen, sowie für die Betreuung und Korrektur der Masterarbeit herzlich bedanken.

Ein großer Dank geht auch an den Herrn Dipl.-Ing. Manfred Augustin für die Motivationsgespräche, fachlichen Ratschläge und wertvollen Hinweise.

Weiters gilt mein Dank allen MitarbeiterInnen des Instituts für Holzbau und Holztechnologie, der holz.bau forschungs gmbh sowie den Mitarbeitern des Labors für konstruktiven Ingenieurbau für deren Beratungen, Hilfestellungen und tatkräftigen Unterstützungen.

Bei meinen StudienkollegInnen und Mitbewohnerinnen aus Rijeka, sowie aus Graz möchte ich mich für die stressige aber gleichzeitig auch schöne und lustige Studienzeit bedanken und ich bin froh, dass sie Teil meines Lebens waren und hoffentlich auch weiter bleiben. Am meisten bedanke ich mich bei Simone und Antonia, die einen großen Teil zur Vollendung dieser Arbeit beigetragen haben.

Doch mein größter Dank gebührt meinen Eltern, Ivka und Juro Jeleč und meinen Geschwistern, Marina und Antonella, die immer für mich da sind, meine Launen ertragen, mich bei allen Entscheidungen unterstützen und mich immer wieder fürs Weiterkämpfen motivieren.

Einen großen Dank auch an meinen Freund Predrag für seine Geduld, sein entgegengebrachtes Vertrauen und den Rückhalt, den er mir gibt.

Hvala vam svima!

Kurzfassung

In Holz eingeklebte Bleche aus Stahl können zur Aufnahme von Zug-, Druck- und Scherkräften zur Herstellung von Bauteilanschlüssen herangezogen werden. Trotz des breiten Anwendungsspektrums und der mittlerweile langjährigen Erfahrungen im Bereich der Klebetechnologie findet diese Verbindungstechnik in Form eingeklebter Loch- und Streckbleche erst in jüngster Zeit Eingang im konstruktiven Holzbau. Der Großteil der Arbeiten zum Thema Klebeverbindungen im Holzbau beschränkt sich auf die Entwicklung eingeklebter Anker- und Gewindestangen, die sich bereits als leistungsfähiges und robustes Verbindungssystem etablieren konnten. Demgegenüber sind eingeklebte Stahlblechverbindungen noch am Beginn ihrer Entwicklung. Die vorliegende Arbeit beinhaltet eine Literaturstudie zum Thema Klebeverbindungen im Holzbau, sowie experimentelle und analytische Studien zu zugbeanspruchten faserparallel eingeklebten Anschlüssen in Furnierschichtholz aus Buche und bildet die Grundlage für weiterführende Untersuchungen im Bereich der Klebetechnik. Schwerpunkt der Arbeit ist die Ermittlung des Auszieh Widerstandes und der Nachgiebigkeit einer Holz-Stahl-Zugverbindung unter Variation des Klebstofftyps, der Oberflächenbehandlung und der Perforation des Stahlbleches. Die Ergebnisse lassen auf eine Erhöhung des Tragvermögens durch Anordnung einer Perforation innerhalb des Verbundbereichs schließen. Bei Begutachtung des Bruchbildes ist unter den gegebenen Randbedingungen von einem ungenügenden Verbund zwischen Klebstoff und Stahl auszugehen. Es ist anzunehmen, dass durch mechanische Bearbeitung der Stahloberfläche (Vertiefungen im Stahl z. B. Kreuzhieb, Raspelhieb) sich deutliche Tragfähigkeitssteigerungen erreichen lassen.

Abstract

Glued-in steel plates can be used for timber joints that carry tension, compression and shear forces. Despite the versatility of its application range and the considerable experience that was meanwhile gained in the field regarding the adhesive technology, the joints consisting of glued-in perforated plates or glued-in extended metals have only been recently introduced in timber engineering. The vast majorities of studies related to adhesive joints in timber structures concern the development of glued anchor bars and threaded rods which have already been validated as effective and robust connection systems. On the contrary, timber joints with glued-in steel plates are at the beginning of their development. The present master thesis comprises a literature study on glued joints in timber, as well as experimental and analytical studies related to glued-in steel plates loaded in tension concerning in particular the laminated veneer lumber of beech. The thesis serves the basis for the further research in the field of adhesive technology. The focus of the work is the investigation of the pull-out strength and the load bearing behaviour of the timber-to-steel tension joint considering parameters such as (i) the type of adhesive, (ii) the surface treatment of perforated and unperforated steel plates. The results indicate that the load carrying capacity of such joint can be increased through arrangement of perforations in the glued part of connection. Based on the evaluated fracture patterns, it can be assumed that under given boundary conditions an adequate bond between adhesive and steel was not realized. Furthermore, it could be assumed that the mechanical treatment of the steel (the pits on the surface e.g. crosscut, rasp cut) enables considerable increase of the carrying capacity.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT	1
KAPITEL 2: BUCHEN-FURNIERSCHICHTHOLZ	3
2-1 HERSTELLUNG	3
2-2 BAUBUCHE PRODUKTE	4
2-3 ANWENDUNGSBEISPIELE FÜR DEN EINSATZ VON BAUBUCHE	5
2-4 PHYSIKALISCHE UND MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN	6
2-5 VERBINDUNGSMITTEL FÜR DIE BAUBUCHE	7
2-6 ÜBERSICHT ZU TYPEN UND ANWENDUNGSBEREICHEN FÜR EINGEKLEBTE VERBINDUNGSMITTEL	8
KAPITEL 3: HOLZ-STAHL-KLEBEVERBINDUNGEN	13
3-1 ALLGEMEIN	13
3-2 VERBUNDMECHANISMEN EINER KLEBEVERBINDUNG	13
3-3 ADHÄSION UND KOHÄSION	14
3-4 BENETZUNG	15
3-5 BESTANDTEILE DER HOLZ-STAHL-KLEBEVERBINDUNG	16
3-5.1 Holz	16
3-5.2 Stahl	16
3-5.3 Klebstoff	17
3-5.3.1 Zugelassene Klebstoffe	17
KAPITEL 4: EINGEKLEBTE STIFTFÖRMIGE VERBINDUNGSMITTEL	19
4-1 ALLGEMEIN	19
4-1.1 Merkmale der Verbindung	20
4-1.1.1 von der Geometrie der Verbindung abhängige Parameter	20
4-1.1.2 sonstige beeinflussende Parameter	25
4-1.2 Merkmale des Holzes	27
4-1.2.1 Rohdichte des Holzes	27
4-1.2.2 Holzfeuchte	29
4-1.2.3 Kraftwinkel zur Faserrichtung	30
4-1.3 Merkmale des Stahles	31
4-1.3.1 Oberflächenbehandlung der Stahlteile	31
4-1.3.2 Reinigung der Stahlteile	32
4-1.3.3 Korrosioneinfluss	32
4-1.4 Merkmale des Klebstoffes	32
4-1.4.1 Klebstofftyp	32

4-1.4.2	Temperaturbeständigkeit des Klebstoffes	33
4-1.4.3	Bruchverhalten des Klebstoffes	35
4-2	BRUCHARTEN UND BRUCHURSACHEN.....	36
4-3	QUERZUGVERSTÄRKUNG.....	37
KAPITEL 5: STAND DER TECHNIK – IN HOLZ EINGEKLEBTE STAHLBLECHE.....		39
5-1	EMPA, CH 1956.....	39
5-2	FORSCHUNGS- UND MPA BADEN- WÜRTTEMBERG, 1988.....	41
5-3	FORSCHUNGS- UND MPA BADEN- WÜRTTEMBERG, 1993.....	45
5-4	MPA WIESBADEN DER HOCHSCHULE RHEINMAIN, 2009 – 2014.....	50
5-5	VALEE ET AL., 2011	54
5-6	ETH ZÜRICH + BERNER FACHHOCHSCHULE, CH, 2014.....	55
5-7	TU GRAZ, 2015	56
KAPITEL 6: MECHANIK DER KLEBEVERBINDUNG.....		57
6-1	ALLGEMEIN	57
6-2	ANALYTISCHE ERMITTLUNG DES SPANNUNGSZUSTANDES	58
KAPITEL 7: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN.....		63
7-1	ALLGEMEIN	63
7-2	VERSUCHSPROGRAMM	63
7-3	PRÜFMATERIAL UND HERSTELLUNG.....	64
7-3.1	Holz.....	64
7-3.2	Bleche aus Stahl, Edelstahl, Aluminium und Kohlefaser	66
7-3.3	Verwendete Klebstoffe	72
7-3.4	Verkleben der Prüfkörper	76
7-4	PRÜFKONFIGURATION	77
7-5	MESSEINRICHTUNG.....	78
7-6	PRÜFDURCHFÜHRUNG	81
7-7	PRÜFDATEN.....	82
7-7.1	Rohdichte	82
7-7.2	Holzfeuchte	82
7-7.3	Einzelauswertung der Vorversuche	82
7-7.4	Einzelauswertung der Hauptprüfungen.....	84
7-7.5	Statistische Auswertung.....	85
7-8	BERECHNUNG DER CHARAKTERISTISCHEN WERTE.....	86
7-9	VORVERSUCHE.....	87
7-9.1	Vorversuch 01.....	87
7-9.2	Vorversuch 02.....	90
7-9.3	Vorversuch 03.....	91

7-9.4	Vorversuch 04	92
7-10	ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER VORVERSUCHE	94
7-10.1	Rohdichte und Holzfeuchte	94
7-10.2	Materialkennwerte des Edelstahlbleches	94
7-10.3	Tragverhalten der Vorversuche	94
7-10.4	Tragfähigkeit	99
7-10.5	Spannungen	101
7-10.6	Schlussfolgerungen.....	106
7-11	HAUPTPRÜFUNGEN.....	108
7-12	ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER HAUPTPRÜFUNGEN	111
7-12.1	Allgemein	111
7-12.2	Rohdichte.....	111
7-12.3	Holzfeuchte.....	112
7-12.4	Tragfähigkeit der Verbindung	113
7-12.5	Spannungen	114
7-12.6	E-Modul des Holzes	116
7-12.7	Steifigkeit der Verbindung	117
7-12.8	Bauteilverformungen im Verbundbereich	121
7-12.8.1	„seitliche“ Verformung	121
7-12.8.2	„mittige“ Verformung der Verbindung	123
7-12.8.3	Verformung an der Hirnholzoberfläche	124
7-12.8.4	Horizontale Bauteilverformungen	126
7-12.9	Bruchbilder	128
KAPITEL 8: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....		131
8-1	ZUSAMMENFASSUNG	131
8-2	AUSBLICK	132
ANHANG A VERZEICHNISSE		I
A-1	Literaturverzeichnis	I
A-2	Abbildungsverzeichnis	VI
A-3	Tabellenverzeichnis	X
ANHANG B BRUCHBILDER		XI

KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT

Der Klimawandel und die damit zusammenhängende Häufung von Extremereignissen führten in den letzten Jahrzehnten zu einem Umdenken in der forstlichen und wirtschaftlichen Nutzung unserer Wälder. Die dominierende Holzart in den mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern ist die Fichte. Diese Nadelholzart zeichnet sich durch vergleichsweise kurze Umtriebszeiten (rund 80 Jahre, je nach Standort) und einfach zu verarbeitendes Holz aus. Ernteausfälle aufgrund von Kalamitäten und die steigende Nachfrage nach verfügbarem, hochwertigem Holz für die Papier- und Holzindustrie sowie der Trend in Richtung Nutzung nachwachsender Rohstoffe für energetische Zwecke bedingen neue Ansätze in der Waldbewirtschaftung. Um das Produktionsrisiko und zukünftig den zunehmenden Holzbedarf zu decken, sieht sich die österreichische Holz- und Forstwirtschaft mit dem Thema der „naturnahen“ Waldbewirtschaftung und damit mit dem Thema Laubholz und Laubholzverwertung konfrontiert.

Um zukünftig die Resource Laubholz nutzen zu können, gibt es seit jüngerer Zeit intensivierte Bestrebungen im Bereich der Laubholzforschung verbunden mit der Entwicklung konkurrenzfähiger Laubholzprodukte für eine vorrangig stoffliche Verwertung. Bisherige Untersuchungen und Erfahrungen zur Verwendung von Laubholz als Ausgangsmaterial für Bauteile in Tragkonstruktionen, belegen das Potential einiger Laubholzarten für diese Einsatzzwecke. In Anbetracht der, im Vergleich zu Nadelholzarten, ausgeprägten Diversität holztechnologischer Eigenschaften von Laubholz, erfordern laubholzbasierte Produkte eine der jeweiligen Laubholzart angepasste Fertigungs- und Prozesstechnologie. In diesem Zusammenhang kann eine Eingrenzung und Unterteilung wirtschaftlich nutzbarer Laubholzarten unter Berücksichtigung holzartenspezifischer physikalischer und mechanischer Eigenschaften erfolgen.

Im mitteleuropäischen Raum ist es vor allem die Rotbuche (*Fagus sylvatica*), welche in hohem Maße verfügbar ist und sich hinsichtlich ihres Eigenschaftsprofils für eine Nutzung in Form von Bauteilen für Tragstrukturen eignet. Im Gegensatz zu brettbasierten Bauteilen aus Buche (Brettschichtholz, Brettsperrholz), welche gerade hinsichtlich der vergleichsweise ausgeprägten Quell- und Schwindverhaltens hohe Anforderungen an die Verklebung stellen, und sich derzeit aufgrund geringer Ausbeuten und hohem Fertigungsaufwand (Einschnitt, Trocknung, Verklebung) nur schwer am Markt durchsetzen können, sind es vor allem furnierbasierte Buchen-Produkte, wie Furnierschicht- und Furniersperrholz, welche aktuell das Potential des Ausgangsmaterials aus wirtschaftlicher und technischer Sicht am ehesten nutzen können.

Die hohe Leistungsfähigkeit dieser Bauprodukte stellt die Verbindungstechnik vor neue Herausforderungen. Bekannte und auf Nadelholz abgestimmte Anschlusslösungen mittels mechanischer Verbindungsmittel (Bolzen, Stabdübel, Nagel, Schraube, ...) können das Potential furnierbasierter Bauteile aus Buche, insbesondere hinsichtlich der hohen Zugfestigkeitseigenschaften parallel zur Faser, nur in beschränktem Maße abrufen.

Eine Alternative traditioneller Verbindungsarten bieten Klebeverbindungen in Form eingeklebter profilierter und nicht profilierter Stäbe aus Kunststoff, Glas-, Kohlefaser und Stahl. Während der Fokus der letzten Jahrzehnte klar auf eingeklebten „Rundkörpern“ (Anker, Gewindestange) gerichtet war, finden sich nur wenige verfügbare Arbeiten zum Tragverhalten von Klebeverbindungen mittels eingeklebter Bleche.

Motiviert durch eine mögliche Anwendung in gefalteten und aufgelösten Tragstrukturen stellt die vorliegende Masterarbeit einen Beitrag zur Entwicklung geklebter Verbindungselemente mittels eingeklebter Bleche dar. Ziel ist es, grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich des Tragverhaltens zugbeanspruchter Holz-Stahl-Klebeverbindungen zu schaffen, welche eine Basis für weiterführende Untersuchungen darstellen soll. Neben einer eingehenden Literaturrecherche zum Thema „Klebeverbindungen im Holzbau“ und einer zusammenfassenden Darstellung der daraus gewonnenen Erkenntnisse, wurden im Rahmen dieser Arbeit mittels experimenteller Untersuchungen sowie anhand analytischer Methoden relevante Einflussgrößen auf das Tragverhalten identifiziert und diskutiert.

KAPITEL 2: BUCHEN- FURNIERSCHICHTHOLZ

Furnierschichtholz ist ein mehrschichtig aufgebautes Holzprodukt, bestehend aus verklebten Furnierlagen, welche im Gegensatz zu Furniersperrholz in Bezug auf die Faserrichtung überwiegend in einer Richtung orientiert sind. Durch das Fügen der dünnen Furnierschichten werden festigkeitsmindernde Merkmale über den Querschnitt verteilt, wodurch ein vergleichsweise homogener Werkstoff mit sehr guten mechanischen Eigenschaften entsteht. Obwohl Gehri in [40] basierend auf einer bereits 1930 erschienenen Publikation das Potential von Furnierschichtholz aus Buche aufzeigte, wird erst seit Kurzem (2013) Buchenfurnierschichtholz im industriellen Maßstab erzeugt und in Form von Bauprodukten vermarktet. Durch optimierte Fertigungsprozesse können im Durchlaufverfahren platten- und stabförmige Halbprodukte gefertigt werden, welche in weiterer Folge zu leistungsfähigen Bauteilen und Tragstrukturen zusammengesetzt werden können. Durch das Schälverfahren, welches zur Herstellung des Ausgangsmaterials Furnier dient, lassen sich zudem im Vergleich zu traditionellen Einschnitttechnologien höhere Ausbeuten am Rundholzstamm erzielen.

2-1 HERSTELLUNG

In Abbildung 2.1 ist der Fertigungsprozess vom Baum bis zum Endprodukt Buchenfurnierschichtholz schematisch dargestellt. Die Buchen-Stämme werden im ersten Schritt in einem Heißwasserbad bei 80° C gedämpft. Nach Entindung erfolgt das Schälen des Rundholzstammes, wodurch ein Furnierband mit rund 3,5 mm Dicke entsteht. Im nächsten Schritt erfolgt die Trocknung auf 2 – 3 % Holzfeuchte mit anschließender Konditionierung auf 5 – 6 % Holzfeuchte. Darauf folgt der Klebstoffauftrag (Phenolharzleim) und die Anordnung der Furnierschichten mittels Furnierlegeanlage. Danach werden diese in einer Mikrowelle auf 70° C erwärmt und im Anschluss mit einem Pressdruck bis zu 5 N/mm² gepresst. Die Holzfeuchtigkeit liegt nach Produktion bei rund 8 % [59]. Auf diese Weise entsteht Buchenfurnierschichtholz, welches am Markt unter dem Namen BauBuche erhältlich ist.

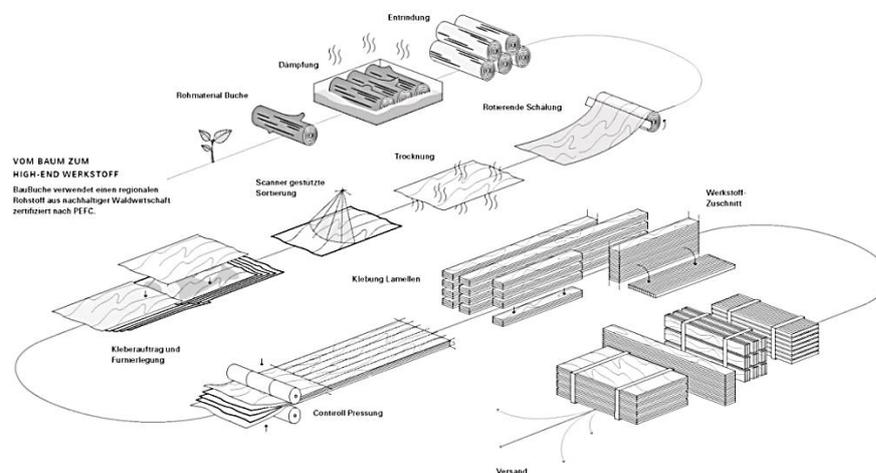


Abbildung 2.1: Produktionsweg der BauBuche [57]

2-2 BAUBUCHE PRODUKTE

In Tabelle 2.1 sind derzeit erhältliche Produkte aus BauBuche, mögliche Lieferdimensionen und Anwendungsbereiche zusammengestellt, wobei je nach Anforderung die Furnierlagen faserparallel oder anteilig Querlagen im Schichtaufbau enthalten sein können.

Tabelle 2.1: BauBuche Produkte [56]

Foto



Bezeichnung	BauBuche S	BauBuche Q	BauBuche GL 70	BauBuche Paneel
Herstellung	faserparallel verklebt	faserparallel verklebt mit ca. 20 % Querlagen	faserparallel verklebt 40 mm dicke S-Lamellen	Furnierlagen senkrecht zur Oberfläche
Höhe/Stärke	40 – 80 mm		80 – 600 mm	3 – 50 mm
Breite	bis 1850 mm		50 – 30 mm	bis 680 mm
Länge	18 m		18 m	16,5 m
Anwendung	zur Ausbildung stabförmiger Bauteile	für flächige Tragwerke (z. B. lastabtragende Wandscheiben) / zusammengesetzte Bauteile (z. B. Hohlkastenträger, Rippenplatte) / querzugbeanspruch- te Bauteilbereiche	für hohe Lasten und große Spannweiten	als Tischlerplatte, robuste Arbeitsfläche, Treppenstufen, Holzboden, Wand- und Deckenverkleidungen (für sichtbare Anwendungen)

2-3 ANWENDUNGSBEISPIELE FÜR DEN EINSATZ VON BAUBUCHE

Die folgenden Abbildungen zeigen eine Auswahl von Ausführungsbeispielen unter Verwendung von BauBuche im konstruktiven Bereich.



Abbildung 2.2: Einsatz der BauBuche im konstruktiven Bereich: Dachkonstruktion für eine Hallenerneuerung in Herschbach (oben links); Tischlerei "Anton Mohr" in Andelsbuch (oben rechts); Produktionshalle in Vorarlberg (unten links) und Hummelkaserne in Graz (unten rechts) [55]

2-4 PHYSIKALISCHE UND MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

Abbildung 2.3 enthält Angaben aus [27] zu den physikalischen und mechanischen Eigenschaften des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Buchenfurnierschichtholzes (Buchen-FSH längslagig).

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

Abbildung 2.3: mechanische Eigenschaften von BauBuche S/Q [27]

2-5 VERBINDUNGSMITTEL FÜR DIE BAUBUCHE

Gemäß Zulassung Z-9.1-838 [27] sind in der Deck- und Schmalfläche folgende mechanische Verbindungsmittel einsetzbar: Nägel, vorgebohrte Schrauben, Stabdübel, Bolzen und Ringdübel. Scheibendübel sowie vorgebohrte Holzschrauben im Winkel zwischen 45° und 90°, wobei festzuhalten ist, dass für die Schmalflächen gewisse Einschränkungen gelten. Als Verbindungsmittel in der Stirnfläche, sind derzeit nur Ringdübel, Scheibendübel sowie vorgebohrte Holzschrauben im Winkel zwischen 45° und 90° zugelassen (Abbildung 2.4).

	Berechnung nach	Deckfläche	Schmalfläche	Stirnfläche
Lochleibung				
Nägel, Schrauben, vorgebohrt	Gl. 8.16, DIN EN 1995-1-1	100 %	Variante A: 100 % Variante B: 60 %	Nicht zulässig
Stabdübel und Bolzen	Gl. 8.32, DIN EN 1995-1-1	100 %	Beanspruchung zur Plattenebene parallel: 70 % rechtwinklig: 40 %	Nicht zulässig
Tragfähigkeit einer Verbindungseinheit				
Ringdübel, Scheibendübel	NCI zu NA 8.11, DIN EN 1995-1-1/NA	100 %	100 %	100 %
Ausziehtragfähigkeit				
Holzschrauben, vorgebohrt (45° ≤ α ≤ 90°)	Gl. 8.38 (k _d = 1), DIN EN 1995-1-1	100 %	100 %	100 %
Variante A - "Buchen-FSH längslagig"; Variante B - "Buchen-FSH querlagig"				

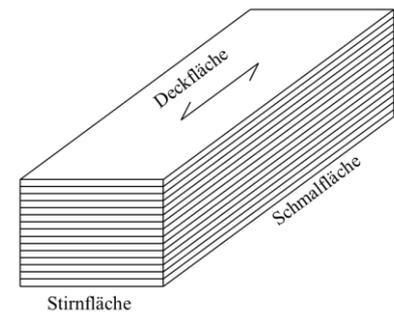


Abbildung 2.4: zugelassene Verbindungsmittel – BauBuche S/Q (links) und Flächenbezeichnungen (rechts) [27]

Für die Fügung von Bauteilen zu größeren Strukturen sind diese mit Hilfe von zimmermannsmäßigen, stiftförmigen (im Allgemeinen metallischen) oder flächenförmigen Verbindungsmitteln in Verbindungen zu verbinden. Eine hochleistungsfähige Verbindungsart sind dabei eingeklebte Stahlstäbe und -bleche. Auf Grund der hohen Tragfähigkeit des beschriebenen Produkts BauBuche macht es daher Sinn, auf das mechanische Potential dieser Verbindungsart näher einzugehen.

Im folgenden Abschnitt wird deshalb eine Übersicht über bekannte und verfügbare sowie z. T. in der Praxis eingesetzte Holz-Stahl-Klebeverbindungen gegeben.

2-6 ÜBERSICHT ZU TYPEN UND ANWENDUNGSBEREICHEN FÜR EINGEKLEBTE VERBINDUNGSMITTEL

Von den eingeklebten Verbindungsmitteln haben jene mit eingeklebten Gewindestangen und Betonrippenstähle die längste Entwicklungsgeschichte und die intensivsten Forschungsbemühungen sowie die umfassendste vorliegende Liste an Literaturquellen vorzuweisen. Neben diesen sind als neuere Verbindungsarten aus dem Bereich der Holz-Stahl-Klebeverbindungen eingeklebte Rohrhülsen, Lochbleche, Stahlbleche sowie eingeklebte Streckmetalle zu nennen.

Im Folgenden werden die genannten Verbindungsmittel kurz dargestellt und deren Einsatzbereiche an Hand der Verwendung in ausgewählten Bauwerken illustriert.

Eingeklebte Gewindestangen und Betonrippenstähle

Die bis jetzt für eingeklebte Gewindestangen definierten Bemessungsansätze sind dzt. noch nicht allgemein anerkannt und daher nur in wenigen Normen (z. B. DIN 1052) sowie allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen enthalten, weshalb ihr Einsatz im Bauwesen nur beschränkt Verwendung findet. Dennoch ist ihr möglicher Anwendungsbereich groß.

Eingeklebte Gewindestangen werden herangezogen für [62] [71]:

- Verstärkung von Trägern bei Aufsattelungen, Durchbrüchen und Ausklinkungen (grundsätzlich)
- Stützenverankerungen in Fundamenten
- biegesteife Verbindungen z. B. Rahmenecken
- Anschlüsse bei Knotenpunkten von Fachwerken
- Holz-Beton-Verbundelemente im Brückenbau und anderes.

Auf Grund der besonderen Bedeutung und der relativ hohen Anzahl bekannter Forschungsarbeiten wird im nächsten Kapitel auf Forschungsergebnisse zu eingeklebten Gewindestangen und die wesentlichen Einflussparameter dieser Holz-Stahl-Klebeverbindung im Detail eingegangen.



Abbildung 2.5: Gewindestangen [83] (links), Betonrippenstähle [80] (Mitte) und unter Verwendung von eingeklebten Gewindestangen errichtetes Bauwerk („Parasol“ in Sevilla) [22] (rechts)

Eingeklebte Rohrhülsen

Eingeklebte Rohrhülsen haben eine hohlzylindrische Form mit aufgeprägten Rippen (Abbildung 2.6). Dies führt zu kürzeren Einklebelängen und über die Innenrippen zu einer annähernden Verdoppelung der Einklebefläche. Somit können bei sehr kleinen Querschnittschwächungen sehr hohe Kräfte übertragen werden.

Schreyer et al. [67] haben zu diesem Verbindungsmittel umfangreiche Versuche durchgeführt, um die Tragfähigkeit zu definieren. Zug-, Druck- und Schubversuche sowie Zugversuche (z. T. unter wechselnden klimatischen Bedingungen) zeigten in der Grundform (sandgestrahlte Oberfläche) dabei vorerst zufriedenstellende Ergebnisse. Im Zuge der Entwicklung wurde zum Zweck der Steigerung der Tragfähigkeit von sandgestrahlten Oberflächen, über gerillte Oberflächen und letztlich zu Rohrhülsen mit gelochter Oberfläche übergegangen [79].

An der MPA Wiesbaden [12] wurden später weitere Parameter untersucht und optimiert. Die Rohrverbinder verfügen derzeit über keine bauaufsichtliche Zulassung. Ihr Einsatzbereich befindet sich in:

- Knotenpunkten
- Haupt- und Nebenträgeranschlüssen
- Stützenfußpunkten
- Geländeranschlüssen und anderen Bereichen.

Ein sehr repräsentatives und interessantes Bauwerk mit dieser Verbindungstechnik wurde im Jahr 2006 gebaut. Dabei handelt es sich um einen Fußball mit einem Durchmesser von 26 m, welcher als Raumfachwerk mit Holzstäben konstruiert wurde (Abbildung 2.6) [38].

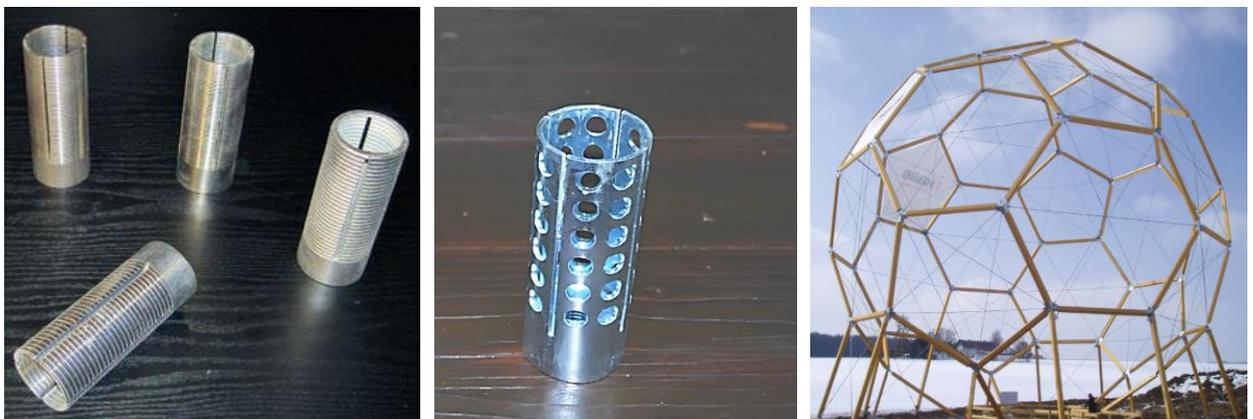


Abbildung 2.6: unterschiedliche Rohrhülsen [5] (links), gelochte Rohrhülse [79] (Mitte), unter Verwendung von eingeklebten Rohrhülsen errichtetes Bauwerk (Fußball – Fa. Haas) [79] (rechts)

Eingeklebte Streckmetalle

In Holz-Beton-Verbundkonstruktionen werden seit langer Zeit eingeklebte Streckmetalle eingesetzt. Die Verwendung dieses Verbindungsmittels ist über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Z-9.1-557 [25]) geregelt. Darin ist festgehalten, dass das Streckmetall mindestens 40 mm in das Holz und 50 mm in den Beton eingeklebt werden muss.

Im Zuge der Entwicklung wurden Zug- und Scherversuche in Holz-Holz-Verbindungen mit eingeklebten Streckmetallen durchgeführt. Die Zugkörper zeigten sich als sehr steif und die Scherholzkörper wichen nicht wesentlich von den Holz-Beton-Verbindungen, welche auch auf Scheren belastet wurden, ab.

Soweit bekannt, wurden Streckmetalle erstmalig im Holz-Beton-Verbund für den Bau einer kleinen Brücke in Luxemburg eingesetzt (Abbildung 2.7 – rechts) [5]. Zudem fanden Streckmetalle für Holz-Holz-Verbindungen zur Fügung eines Brettschichtholz-Hohlkastenträgers Verwendung (Abbildung 2.7 – links) [8].

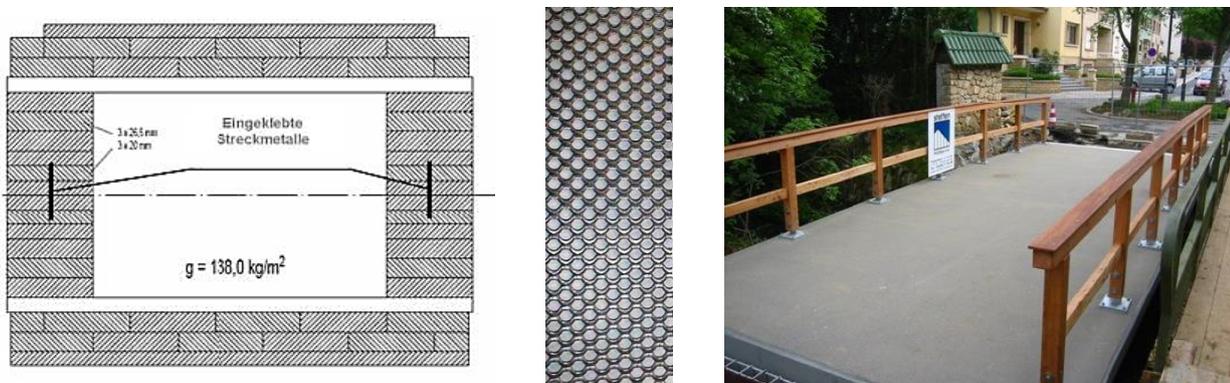


Abbildung 2.7: Hohlkastenträger mit Streckmetallen [8] (links), Streckmetall [4] (Mitte), unter Verwendung von eingeklebten Streckmetallen errichtetes Bauwerk (Brücke in Luxemburg) [4] (rechts)

Eingeklebte Lochbleche und Stahlbleche

Da die beschriebenen Streckmetalle nicht mit anderen Blechen verschweißt werden können, werden für die Nutzung im Bauwesen eher Lochbleche in Verbindung mit üblichen vollflächigen Blechen benutzt. Diese Verbindungen werden so ausgelegt, dass das Versagen möglichst in den letztgenannten Blechen eingeleitet wird.

Ein besonderes Bauwerk, welches mit eingeklebten Lochblechen errichtet wurde, stellt die vierstöckige, freitragende Treppe im Atrium einer Universität in Vancouver / CAN dar (Abbildung 2.8 – rechts). Dort wurden vorgefertigte Podeste und Treppenläufe mit eingeklebten Lochblechen verbunden [7]. Zu erwähnen wäre auch das erste Pilotprojekt in Europa, nämlich die Berghalle bei St. Moritz, welche mit HSK-Rahmenecken ausgeführt wurde (Abbildung 2.8). Die HSK-Verbindung besteht dabei aus eingeklebten Lochblechen, welche in den Einzelbauteilen – Stütze und Halbriegel – eingeklebt sind und danach über eine Bolzenverbindung zu biegesteifen Rahmenecken verbunden wurden [11].

Eingeklebte Lochbleche und Stahlbleche können grundsätzlich für:

- Knotenpunkte
- Rahmenecken und
- Stützeinspannungen

eingesetzt werden [62].

Eingeklebte Loch- und Stahlbleche bilden den Schwerpunkt der vorliegenden Masterarbeit und werden daher in Kapitel 5: im Detail beschrieben.



Abbildung 2.8: Lochblech [11] (links), unter Verwendung von eingeklebten Lochblechen errichtete Bauwerke (Berghalle bei St. Moritz [11] (Mitte) und freitragende Treppe im Atrium einer Universität im kanadischen Vancouver [7] (rechts))

KAPITEL 3: HOLZ-STAHL- KLEBEVERBINDUNGEN

3-1 ALLGEMEIN

Das Kleben stellt ein Verfahren zur Schaffung stoffschlüssiger Verbindungen zwischen gleichartigen oder verschiedenen Materialien mittels Klebstoffen dar. Die Anwendung von Klebstoffen spielt gerade im Holzbau eine wesentliche Rolle zur Ausbildung leistungsfähiger Verbindungen. Waren früher Holzprodukte bzw. -bauteile und deren Eigenschaften vor allem abhängig von den Abmessungen, der Form und Qualität des gewachsenen Stammes, so führte die Entwicklung von Klebstoffen, und damit neuer Fügeverfahren und Fertigungsprozesse, zur Herstellung von Holzwerkstoffen mit verbesserten und den Anforderungen angepassten Eigenschaften. Beispielsweise ermöglichte der Einsatz von Klebstoffen die Fertigung von Trägern nach Maß (Bauhöhe, Breite und Länge), wodurch im Hallenbau mittels weniger Bauteile größere Spannweiten überbrückt werden konnten.

Physikalische (wie z.B. Quell- und Schwindverhalten) und mechanische Eigenschaften des Endproduktes können durch Wahl und Anordnung der Halbprodukte (je nach Zerlegungsgrad: Brett, Furnier, Span, Faser) in Verbindung mit der Wahl geeigneter Klebstoffsysteme und Klebeverfahren entsprechend angepasst werden. Das Zerlegen und Fügen der Halbprodukte führte dazu, dass damit auch Sortimente geringerer Qualität einer Nutzung für lastabtragende Zwecke zugeführt werden können.

Neben der Herstellung von Holzwerkstoffen und -produkten wird die Verklebung heute auch zur Verstärkung von Bauteilen und zur Ausbildung von Bauteilverbindungen (Montagestöße, Anschlüsse) eingesetzt. Die breite Verwendung führte zur Entwicklung einer großen Palette von Klebstofftypen mit unterschiedlichsten Eigenschaften.

Die folgenden Ausführungen beinhalten überblicksmässige Erläuterungen über die Verbundmechanismen einer Klebeverbindung, die dabei auftretenden Kräfte sowie – allgemein – die Bestandteile einer Holz-Stahl-Klebeverbindung, die den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt.

3-2 VERBUNDMECHANISMEN EINER KLEBEVERBINDUNG

Eine Klebeverbindung kann vereinfacht mit dem Modell von Marra beschrieben werden [37], welches eine Charakterisierung und örtliche Zuordnung der Verbundfestigkeit und der wirksamen Bindemechanismen (Adhäsion und Kohäsion) ermöglicht. Dabei wird der Verbundbereich als Kette und deren einzelne Kettenglieder abgebildet. Jedes Kettenglied entspricht einer Zone, welche den jeweiligen Bindemechanismen zugeordnet wird. Ein Versagen tritt ein, wenn sich das schwächste Glied dieser Kette löst bzw. versagt.

Die einzelnen Kettenglieder sind in Abbildung 3.1 dargestellt und werden mit den Nummern von 1 bis 9 gekennzeichnet. Das Glied 1 entspricht den Materialeigenschaften („innere Festigkeit“) des Klebstoffes. Dementsprechend weisen auch die Glieder 8 und 9 die Eigenschaften des ungestörten Holzes („innere Festigkeit“) auf. Diese Glieder stellen anteilig das größte Volumen der Verbindung dar.

Die Kettenglieder 2 bis 7, die die Übergangsbereiche bzw. Grenzschichten charakterisieren, nehmen demgegenüber ein sehr kleines Volumen ein. Die Nummern 2 und 3 beschreiben die Klebstoffgrenzregion, innerhalb der die Vernetzungsschemie des Klebstoffes vom Holz beeinflusst wird, das heißt, die Schichten werden nicht vollständig ausgebildet und das Aushärten ist vor allem abhängig von der chemischen Struktur des anliegenden Holzes und des Klebstoffes.

Ähnlich ist es in den Gliedern 6 und 7, wo die Eigenschaften vorrangig durch die Oberflächenbehandlung des Holzfügeteiles (z. B. Hobeln, Schleifen, ...) beeinflusst werden. Die Glieder 4 und 5 stellen die Kontaktflächen dar, bei der eine direkte Interaktion (mechanische Verankerung) des Klebstoffes und des Holzes vorliegt.

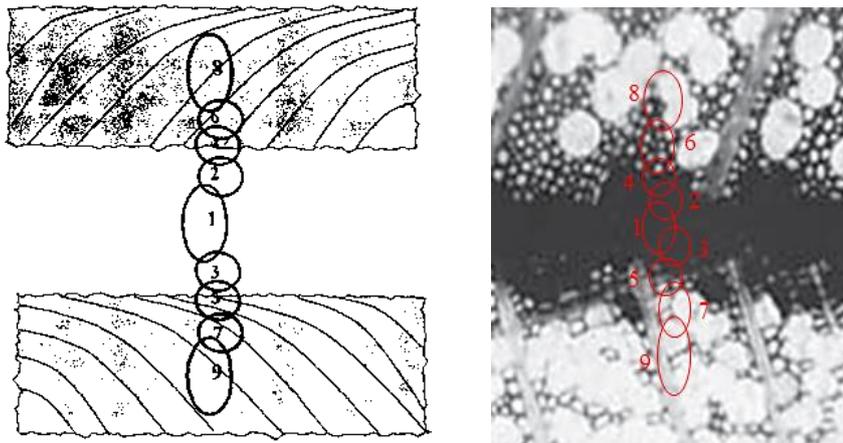


Abbildung 3.1: Ketten-Analogie für die Verbundfestigkeit nach Marra [37] (links) und rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Klebeverbindung [36] (rechts – bearbeitet)

3-3 ADHÄSION UND KOHÄSION

Zwischen den zwei Fügeteilen einer Klebeverbindung bilden sich zwei Arten von Bindekräften: (i) die Adhäsion und (ii) die Kohäsion.

Während der Begriff Adhäsion „an etwas haften“ bedeutet und die Haftkraft zwischen zwei unterschiedlichen Materialien darstellt, ist die Kohäsion die Kraft innerhalb eines Materials. Die Kohäsion entspricht damit einem Sonderfall der Adhäsion (Haftkraft zwischen gleichartigen Teilchen). Der Begriff bedeutet „sich gegenseitig anziehen“ und stellt die innere Festigkeit des Stoffes dar [44].

In Abbildung 3.2 sind die Bereiche innerhalb derer kohäsive und adhäsive Kräfte wirksam werden dargestellt, wobei das in Abschnitt 3-2 vorgestellte Modell zu erkennen ist.

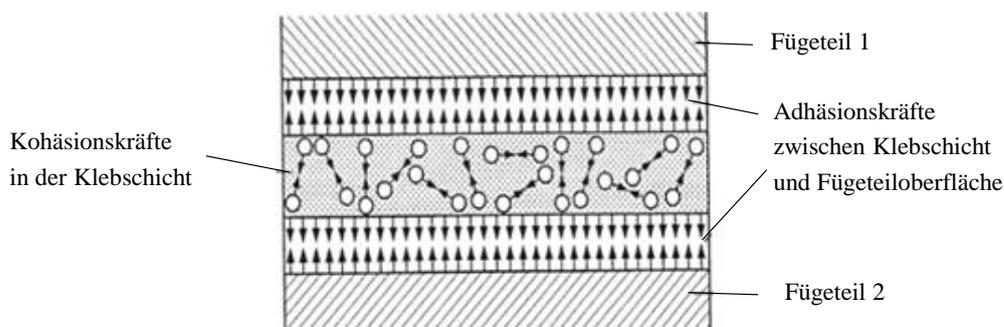


Abbildung 3.2: Bindungskräfte zwischen zwei Fügeteilen [44] (bearbeitet)

3-4 BENETZUNG

Damit sich die Klebstoffmoleküle in den Bereichen der wirkenden Adhäsionskräfte annähern können und miteinander chemisch oder physikalisch reagieren können und sich eine möglichst gleichmäßige Klebschicht nach Aushärtung ausbildet, muss eine gute Benetzung des Klebstoffes vorhanden sein. Um eine vollständige Benetzung zu gewährleisten, muss der Klebstoff eine entsprechende Viskosität bzw. Fließfähigkeit aufweisen. Der Unterschied der hoch- und niedrigviskosen Klebstoffe ist in Abbildung 3.3 grafisch dargestellt.

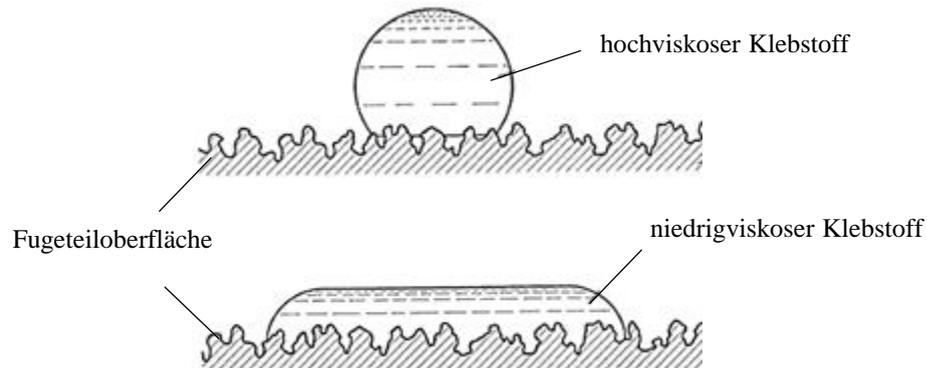


Abbildung 3.3: Benetzung unterschiedlicher Klebstoffe [44] (bearbeitet)

Die Benetzung kann durch den Benetzungswinkel beschrieben werden. Liegt der Winkel unter 30° , kann von einer guten Benetzung ausgegangen werden (Abbildung 3.4). Außer der Viskosität, hängt die Benetzung auch von der Oberflächenspannung des Klebstoffes ab [44].

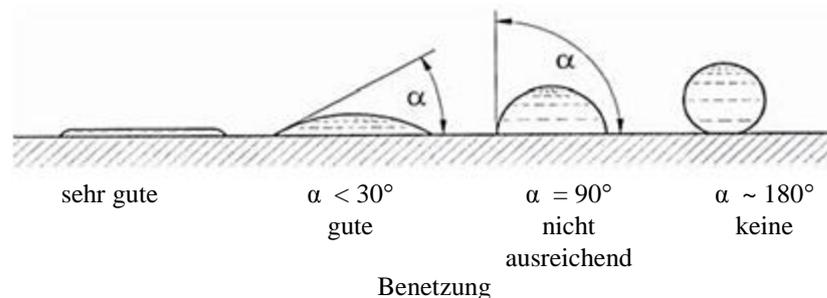


Abbildung 3.4: Benetzungswinkel (bearbeitet) [44]

3-5 BESTANDTEILE DER HOLZ-STAHKLEBEVERBINDUNG

Diese Verbindung vereint drei Materialien: Holz, Stahl und Klebstoff, wobei diese drei Fügepartner unterschiedliche Eigenschaften und Einflussparameter aufweisen. Das Zusammenwirken der drei an der Verbindung beteiligten Materialien muss zur Ausbildung einer ausreichend tragfähigen Klebeverbindung zuverlässig gesichert werden. Um eine gute Kraftübertragung zu gewährleisten, sollte die Verbindung dabei grundsätzlich so ausgelegt werden, dass dieselben Dehnsteifigkeiten ($E_{\text{Holz}} \cdot A_{\text{Holz}} = E_{\text{Stahl}} \cdot A_{\text{Stahl}}$) und Festigkeiten der zu verklebenden Fügebauteile vorliegen bzw. die Steifigkeiten und Festigkeiten der zu verbindenden Bauteile aufeinander abgestimmt sind [90].

Bei der Fügung zweier oder mehrerer unterschiedlicher Materialien, muss ebenfalls Rücksicht darauf genommen werden, dass diese unterschiedliche mechanische und physikalische Eigenschaften besitzen und demnach anders auf Veränderungen der Umgebungseinflüsse reagieren: Ein exemplarisches Beispiel dazu betrifft die Wärmeausdehnung unterschiedlicher Baustoffe im Verbund bei einer Temperaturänderung. Stahl und Beton zeigen dabei eine gute Kompatibilität, während Holz quer zu Faser eine über 70 % größere Wärmeausdehnung als Stahl und/oder Beton aufweist. Die großen Dehnungen quer zu Faser werden in der Verbindung jedoch meist durch das Schwinden und Quellen des Holzes kompensiert [76]. Längs zur Faser erreicht Holz demgegenüber rund die Hälfte des Temperaturexpansionskoeffizienten von Stahl bzw. Beton.

Eine weitere wesentliche Beeinflussung solcher Verbindungen betrifft das Feuchteverhalten: Bei einer Differenz der relativen Luftfeuchtigkeit von 40 % bis 100 % (ohne Behinderung) weist erneut Holz quer zur Faser die höchsten Werte der üblichen Baustoffe auf. Metalle und Glas zeigen keine oder vernachlässigbare Dimensionsveränderungen. Demgegenüber weist Holz längs zur Faser rund 95 % kleinere Werte auf als jene, die quer zu Faser entstehen können [76].

Diese Eigenschaften müssen auch bei der Holz-Stahl-Verklebung berücksichtigt werden. Im Weiteren wird kurz auf die einzelnen Bestandteile dieses Verbindungstypus eingegangen.

3-5.1 HOLZ

Um das Eindringen des Klebstoffes in die Mikroporen des Holzes zu ermöglichen, muss das Holz sorgfältig und mit scharfen Werkzeugen geschnitten werden. Bei der Auswahl der Klebstoffe und der Klebeverbindung muss beachtet werden, dass verschiedene Holzarten nach dem Hobeln unterschiedliche Substanzen (z. B. Parafine oder Säuren) ausscheiden können, die in Verbindung mit Klebstoffen unterschiedlich reagieren. Besondere Sorgfalt ist bei der Verwendung von altem Holz geboten, weil dessen chemische Aktivierungsenergie an der Oberfläche gering ist [18]. Auf die Einflussparameter Holzart, Rohdichte und Holzfeuchte wird im Rahmen dieser Arbeit nochmals im Detail eingegangen.

3-5.2 STAHL

Die verwendeten Stahlkomponenten in den bisher ausgeführten Holz-Stahl-Klebeverbindungen waren vorwiegend Gewindestangen und Betonrippenstäbe unterschiedlicher Durchmesser und Festigkeiten. Im Kapitel 5: werden einige, im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte, Versuche mit Stahl- und Lochblechen aus Baustahl S 235 und S 355 sowie im geringeren Maße, mit Edelstahl, vorgestellt. Die Dicken der Bleche wurden dabei variiert, um die gewünschte Maximierung der Zugfestigkeit zu erreichen.

Für alle Verbindungen im Bauwesen besteht das Ziel darin, ein duktileres Versagen der Verbindung zu erreichen, das heißt, das Versagen soll durch große Verformungszunahmen angekündigt werden. Dies wird in Stahl-Holz-Klebeverbindungen dann erreicht, wenn ein Versagen des Stahlteiles erfolgt (schwächstes Glied der Verbindungskette, siehe Abbildung 3.5), da die beiden übrigen Fügepartner Holz und Klebstoff für viele Beanspruchungsarten – insbesondere bei einer Zug-, Schub- und Rollschub sowie Querkzugbeanspruchung – ein sprödes mechanisches Verhalten aufweisen. Ein weiterer Grund für die Wahl eines bevorzugten Stahlversagens ist jener, dass die mechanischen Eigenschaften des Stahles weniger streuen und man somit auf der sichereren Seite bei der Bemessung der Bruchlast liegt. Aus den genannten Gründen sind die Stahlfestigkeiten für Klebeverbindung zu optimieren bzw. auf die Verbindung abzustimmen.

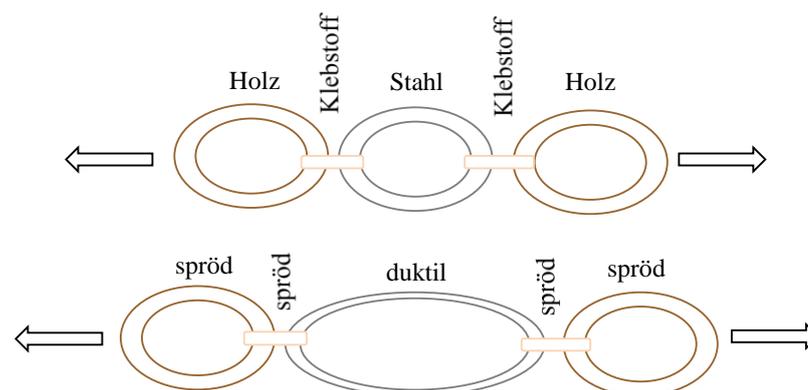


Abbildung 3.5: Holz-Stahl-Klebeverbindung

Neben dem Baustoff Stahl werden auch Faserverbundwerkstoffe zur Ausbildung von geklebten Verbindungen eingesetzt, wie z. B. aufgeklebte Kohlefaserlamellen als Biegeverstärkung im Zugbereich von biegebeanspruchten Bauteilen oder stiftförmige faserverstärkte Kunststoffe in biegesteifen Stößen und viele andere mehr.

3-5.3 KLEBSTOFF

Am Beginn der Forschung zu Holz-Stahl-Klebeverbindungen wurden Klebstoffe auf Basis von Phenolresorzin- (PRF) und Epoxidharzen (EPX) eingesetzt. Später kamen auch Klebstoffe auf Polyurethanbasis (PUR) zum Einsatz. Aus den weiteren vorliegenden Forschungsarbeiten geht hervor, dass die zweikomponentigen PUR- und EPX-Klebstoffe die beste Haftung zeigen und diese deshalb auch verstärkt für die publizierten Versuche jüngeren Datums verwendet wurden [63].

Um einen spröden Bruch auf Grund des Klebstoffversagens zu vermeiden, muss ein Klebstoff mit genügender Festigkeit und guter Haftung zu anderen Materialien ausgewählt werden. In einem solchen Falle stellt der Klebstoff im Allgemeinen nicht das schwächste Glied in der Versagenskette dar.

3-5.3.1 Zugelassene Klebstoffe

Zurzeit sind der Verfasserin drei Klebstoffe, die über eine Zulassung für das Einkleben der Gewindestangen ins Holz verfügen, bekannt. Auf Grund der vorherrschenden Mechanismen sollten diese auch prinzipiell für die Verklebung von Holz-Stahlblech-Klebeverbindungen geeignet sein.

Dabei handelt es sich um folgende Produkte:

- Zulassung Z-9.1-778
„2K-EP-Klebstoff GSA-Harz und GSA-Härter für das Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe“ [26]
- Zulassung Z-9.1-705
„2K-EP-Klebstoff WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B 22 TS zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe“ [29]
- Zulassung Z-9.1-707
„2K-PUR-Klebstoff LOCTITE CR 421 PURBOND zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe“ [30]

In der folgenden Tabelle sind Auszüge zu den wesentlichen Parametern sowie Eigenschaften der genannten Klebstoffe aus den Zulassungen zusammengestellt.

Tabelle 3.1: Vergleich wesentlicher Parameter und Eigenschaften der zugelassenen Klebstoffe für Holz-Stahl-Klebeverbindungen

Kriterium	Z-9.1-778	Z-9.1-705	Z-9.1-707
Geltungsdauer	31.10.2012 – 31.10.2017	31.01.2014 – 31.01.2019	01.06.2015 – 01.06.2016
anwendbare Holzarten	Vollholz, Balkenschichtholz, Brettschichtholz, sowie Furnierschichtholz aus Nadelholz (nicht nachgewiesen für Lärchenholz)	Brettschichtholz aus Nadelholz, sowie Furnierschichtholz aus Nadelholz (nachgewiesen für Fichte, Tanne und Kiefer)	Brettschichtholz aus Nadelholz, sowie Furnierschichtholz aus Nadelholz (nachgewiesen für Fichte, Tanne und Kiefer)
Nutzungsklassen	1 oder 2	1 oder 2	1
Temperaturbeständigkeit	bis 60°C	bis 60°C	bis 50°C
Belastung	vorwiegend ruhend belastet	vorwiegend ruhend / statisch / quasi statisch belastet	vorwiegend ruhend / statisch / quasi statisch belastet
Verwendung für Stahlteile	Gewindebolzen mit metrischem Gewinde aus Kohlenstoffstahl	Gewindebolzen mit metrischem Gewinde aus Kohlenstoffstahl und Betonrippenstähle	Gewindebolzen mit metrischem Gewinde aus Kohlenstoffstahl und Betonrippenstähle
Holzfeuchte	6 – 15 %	6 – 18 %	max. 15%
Raumtemperatur beim Einkleben und Aushärten	min. 20°C	min. 17°C	min. 20°C
volle Klebfugenfestigkeit (20°C)	nach 7 Tagen	nach 10 Tagen	nach 10 Tagen

In der Beschreibung der Zulassung Z-9.1-778 [26] wird festgehalten, dass auch ein Einsatz von Laubholz möglich ist (Esche/Buche/Robinie), obwohl noch keine spezifische Zulassung für diesen Einsatzbereich vorliegt.

KAPITEL 4: EINGEKLEBTE STIFTFÖRMIGE VERBINDUNGSMITTEL

4-1 ALLGEMEIN

Der Großteil der Literatur liegt zum Thema Holz-Stahl-Klebeverbindungen mit eingeklebten stiftförmigen Verbindungsmitteln (z. B. Gewinde- und Ankerstangen) vor. Vergleicht man diesen Verbindungstyp mit eingeklebten Blechen, so kann bei reiner Zugbeanspruchung von einem ähnlichen Tragverhalten ausgegangen werden, insbesondere dann, wenn es sich um glattschaftige Rundkörper handelt. Eine Krafteinleitung bzw. -übertragung erfolgt bei beiden Klebeverbindungen zwischen den Fügepartnern über die Klebeschicht, welche den Verbund zwischen Holz- und Stahlteil herstellt. Die zugrundeliegenden Haftmechanismen für eine Kraftübertragung sind prinzipiell dieselben.

Folglich können unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Querschnittsgeometrien (rund oder flach) und Beanspruchungssituationen Analogien zwischen diesen Verbindungstypen hergestellt werden. Aus diesem Grund erscheint eine nähere Betrachtung von Arbeiten zu den Einflussfaktoren auf das Tragverhalten eingeklebter Rundkörper auch für die in dieser Arbeit untersuchten Flachkörper bzw. Bleche sinnvoll.

Ziel der Literaturrecherche war es, eine zusammenfassende Darstellung jener Erfahrungen und Erkenntnisse, welche auch auf eingeklebte Bleche zutreffen sollten, zusammenzustellen.

In Hinblick auf die Beschreibung einer Holz-Klebeverbindung wurden die Literaturquellen gemäß der nachfolgenden Struktur ausgewertet. Diese gliedert sich in die folgenden Parameter:

Merkmale der Verbindung

- von der Geometrie abhängige Parameter
 - o Einklebelänge
 - o Größeneinfluss
 - o Klebefugendicke
- sonstige beeinflussende Parameter
 - o Art der Krafteinleitung („pull-pull“ / „push-pull“)
 - o klimatische Effekte
 - o Lasteinwirkungsdauer

Merkmale des Holzes

- Rohdichte
- Holzfeuchte
- Faserrichtung des Holzes

Merkmale des Stahles

- Oberflächenbehandlung der Stahlteile
- Reinigung der Stahlteile
- Korrosionseinfluss

Merkmale des Klebstoffes

- Typ des Klebstoffes
- Temperaturbeständigkeit des Klebstoffes
- Bruchverhalten des Klebstoffes

Im Folgenden wird auf die Einflüsse der einzelnen Parameter näher eingegangen.

4-1.1 MERKMALE DER VERBINDUNG

4-1.1.1 von der Geometrie der Verbindung abhängige Parameter

• Einklebelänge

Aus den Literaturergebnissen ist für eingeklebte Stahlbleche und Gewindestangen eine erhebliche Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der Einklebelänge erkennbar. Mit zunehmender Einklebelänge steigt die Ausziehtragfähigkeit der Verbindung an und nähert sich ab einer typischen Länge asymptotisch einem Maximalwert, gleichzeitig nimmt jedoch die übertragbare Schertragfähigkeit ab. Diese Erkenntnis kann mit den Ergebnissen in folgenden Arbeiten (hier nur auf die eingeklebten Gewindestangen bezogen) unterstrichen werden.

In [3] wurden Klebeverbindungen mit drei Einklebelängen untersucht: 100 mm, 300 mm, 600 mm. Als Resultat konnte eine abfallende Verbundfestigkeit und eine Verringerung der Streuung bei einer Zunahme der Einklebelänge festgestellt werden.

Weitere Versuche mit eingeklebten Gewindestangen und unterschiedlichen Einklebelängen von 40 mm bis 100 mm sind in [19] dargestellt. In der Abbildung 4.1 ist die Auswirkung der Steigerung der Einklebelänge auf die Bruchlast sowie auf die Scherfestigkeiten ersichtlich. Ab einer Einklebelänge von 80 mm bleibt bei der dort gewählten geometrischen Konfiguration die Scherfestigkeit konstant.

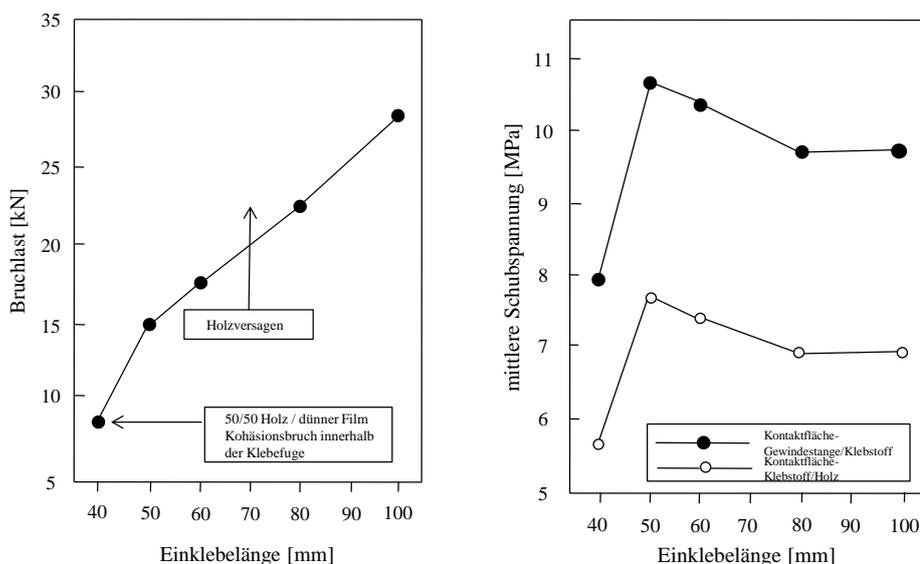


Abbildung 4.1: Einfluss der Einklebelänge auf die Tragfähigkeit (links) und auf die Scherfestigkeit (rechts) [19] (bearbeitet)

Zu den selben Aussagen gelangt auch eine Untersuchung, die in einem umfangreichen Prüfbericht der MPA Stuttgart [59] zu eingeklebten Gewindestangen und Betonrippenstählen mit dem Klebstoff Purbond CR 421 beschrieben wird. Der festgestellte Sachverhalt wird aus den folgenden Abbildung 4.2 ersichtlich.

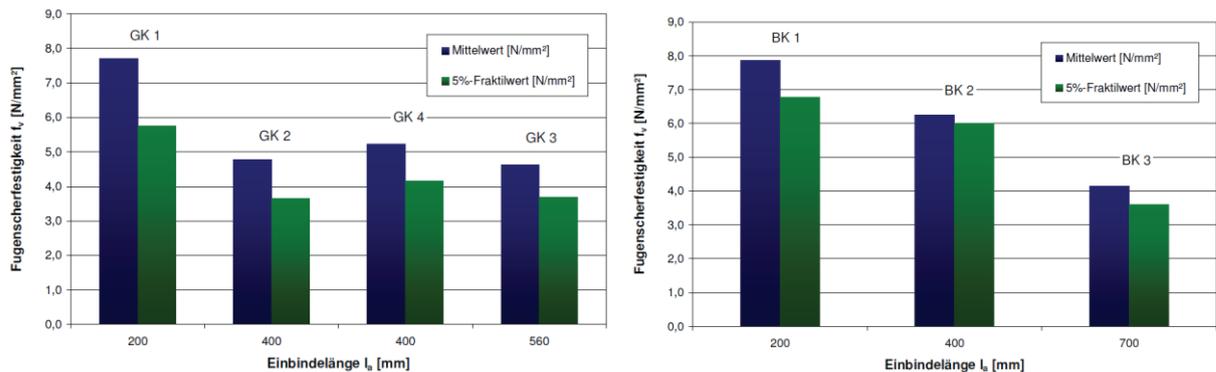


Abbildung 4.3: Einfluss der Einklebelänge auf die Scherfestigkeit bei Gewindestangen (links) und Betonrippenstählen (rechts) [59]

In [21] werden abweichend davon andere Schlüsse gezogen. Für die dort durchgeführten Druckversuche ist eine Erhöhung der Bruchlast mit steigender Einklebelänge nicht ausgeprägt (Abbildung 4.4 – links). Eine mögliche Erklärung dieser Ergebnisse ist die Verwendung von Laubholz für die Versuche.

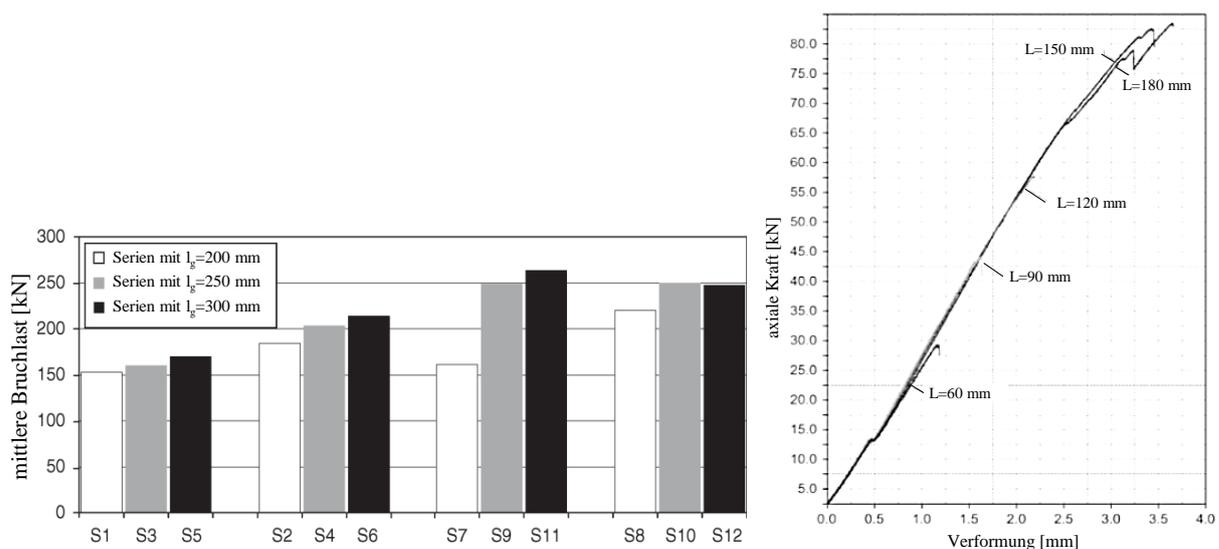


Abbildung 4.4: Einfluss der Einklebelänge auf die Bruchlast: links [21] (bearbeitet) und rechts [20]

Um diese Annahme zu überprüfen, wurden weitere Versuche mit Laubholz und mit demselben Klebstoff durchgeführt [20]. Für diese Prüfserie wurde abweichend jedoch eine „pull – pull“ Prüfkonfiguration (Zugversuche) gewählt. Die Einklebelängen wurden von 60 mm bis 120 mm variiert. Wie aus der Abbildung 4.4 (rechts) ersichtlich wird, traten keine signifikanten Unterschiede in der Steifigkeit auf, wohingegen für die maximale aufnehmbare Bruchlast Abweichungen erkennbar wurden.

Riberholt stellt in [64] fest, dass die Duktilität der Verbindung mit zunehmender Einklebelänge zunimmt. Die Ergebnisse der von ihm durchgeführten Versuche bestätigen auch die oben erwähnten Erkenntnisse, dass die Scherfestigkeit mit steigender Einklebelänge abnimmt und die maximal übertragbare Kraft steigt.

• Größeneffekt bei Verklebungen

Eine Erklärung für die Abnahme der Scherfestigkeit bei einer größeren Einklebelänge kann über den Größeneinfluss erklärt werden. Generell wird der Größeneinfluss wie folgt erläutert [77]: Je größer eine Fläche/Volumen eines spröden Materials ist, wie z. B. jenes des Holzes, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass darin mehr bruchauslösende Fehlstellen enthalten sind (Äste, Risse, ...), die sich wiederum negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken können. Deswegen weisen Prüfkörper mit kleineren Abmessungen höhere Festigkeiten auf, als solche mit Größeren (Abbildung 4.5).

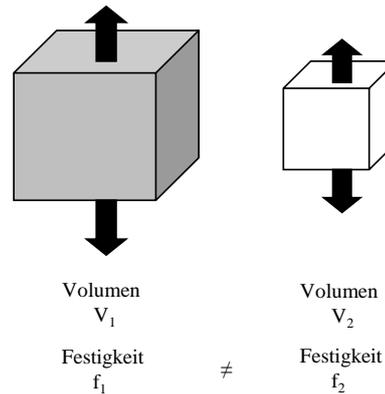


Abbildung 4.5: Größeneinfluss

Gehri hat in [41] den Effekt der Verminderung der Scherfestigkeit mit dem Größeneinfluss beschrieben. Bei der Ermittlung der Schubfestigkeit von Trägern wird die Scherfläche mit einem Exponenten von -0,28 berechnet. Dieser Exponent stammt von Longworth (1977) und ist auch auf die Scherfläche eingeklebter Gewindestangen ansetzbar, wobei der Exponent dabei mit einer Größe von -0,20 berücksichtigt werden sollte.

Die numerischen Berechnungen von Tannert, Valleé und Hehl [78], [77], [84], [85] für eingeklebte Holz Doppelanschlüsse und Stahlbleche zeigen die Spannungsverläufe (Scher- und Querspannung) für unterschiedliche Einklebelängen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass es bei beiden Spannungsverläufen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Werten der Spannungsspitzen gibt. Jedoch ist bei kleineren Einklebelängen ein gleichmäßigerer Verlauf ersichtlich.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen mit Dehnmessstreifen von Ehlbeck [31] sagen aus, dass bei großen Einklebelängen die Kraftübertragung nur im oberen Drittel der Einklebelänge erfolgt. Der übrige Teil beteiligt sich lediglich mit einem geringen Anteil an der Lastabtragung.

• Klebstofffugendicke

Zu Beginn der Verwendung von eingeklebten Gewindestangen wurde der Durchmesser des Loches gleich dem Durchmesser der Gewindestange gewählt [51]. Danach vergrößerte sich der Loch um die Klebstofffugendicke und es entstand eine reine Adhäsionsverbindung zwischen Holz und Stahl. Im Folgenden sind einige Versuche mit unterschiedlichen Klebstofffugendicken aufgelistet, welche nachfolgend in Hinblick auf ihren Einfluss interpretiert werden.

In [3] wird über Prüfungen von eingeklebten Gewindestangen in Brettschichtholz berichtet. Bei einer Einklebelänge von 600 mm zeigten die Prüfkörper mit einer Klebstofffugendicke von 1 mm bis 2 mm eine rund 30 % höhere Verbundfestigkeit, als die Prüfungen mit einer Klebstofffugendicken von 0,5 mm.

Broughton und Hutchinson beschreiben in [19] Versuche und deren Ergebnisse zur Optimierung der Klebstofffugendicke. Variiert wurden Klebstofffugendicken von 1 mm, 2 mm, 3,5 mm und 6 mm. Die Diagramme in Abbildung 4.6 zeigen deutlich, dass die Höchstlast sowie die Scherfestigkeit an der Gewindestange-Klebstoff-Fläche mit dem steigenden Fugendicken zunehmen, wobei die Scherfestigkeit an der Klebstoff-Holz-Fläche beinahe konstant bleibt.

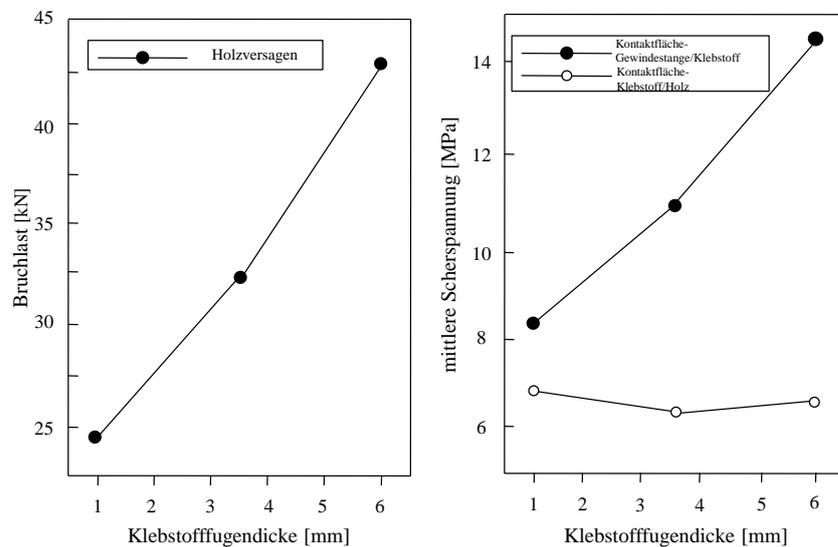


Abbildung 4.6: Einfluss der Klebstofffugendicke auf die Tragfähigkeit (links) und auf die Scherfestigkeit (rechts) von eingeklebten Gewindestangen [19] (bearbeitet)

Bei den Versuchen an der MPA Stuttgart [59] zeigen die unterschiedlichen Klebstofffugendicken keinen signifikanten Einfluss auf die Fugenschersfestigkeit der Verbindung (Abbildung 4.7).

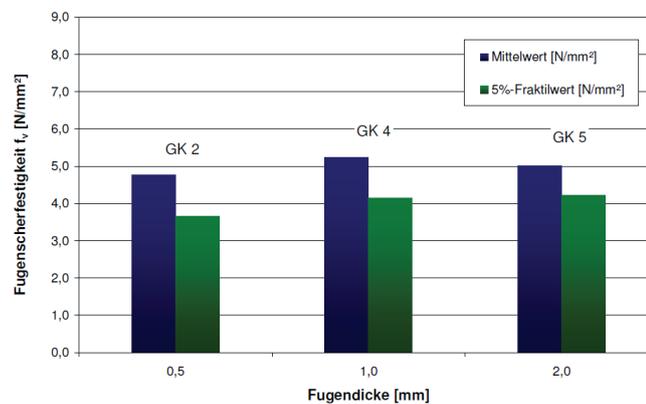


Abbildung 4.7: Einfluss der Klebstofffugendicke auf die Scherfestigkeit (links) [59]

Im Gegensatz zu der letztgenannten Forschungsarbeiten, zeigten die Ergebnisse in [21] eine Abhängigkeit der Bruchlast und der Klebstofffugendicke (Abbildung 4.8 – oben). Geprüft wurden Gewindestangen, die im Laubholz Elondo mit einer charakteristischen Rohdichte von 856 kg/m³ mittels Hilti HIT-RE 500 Epoxidklebstoff eingeklebt waren. In dieser Arbeit wurden Klebstofffugendicken von 1 mm und 3 mm verglichen. Die Prüferien S9 bis S12 sind durch einen Holzbruch gekennzeichnet und deswegen für den Vergleich nicht relevant. Eine der Schlussfolgerungen war, dass die dickeren Klebstofffugendicken ein duktileres Versagen aufweisen (Abbildung 4.8 – unten). Die maximale Bruchlast steigt lediglich um rund 10 – 40 %, obwohl die Klebstofffugendicke um 300 % erhöht wurde.

Dies war auch der Grund, dass weitere Versuche mit dünneren Klebstofffugendicken (1 mm) durchgeführt wurden [20]. Anzumerken ist außerdem, dass es sich um Druckversuche handelt.

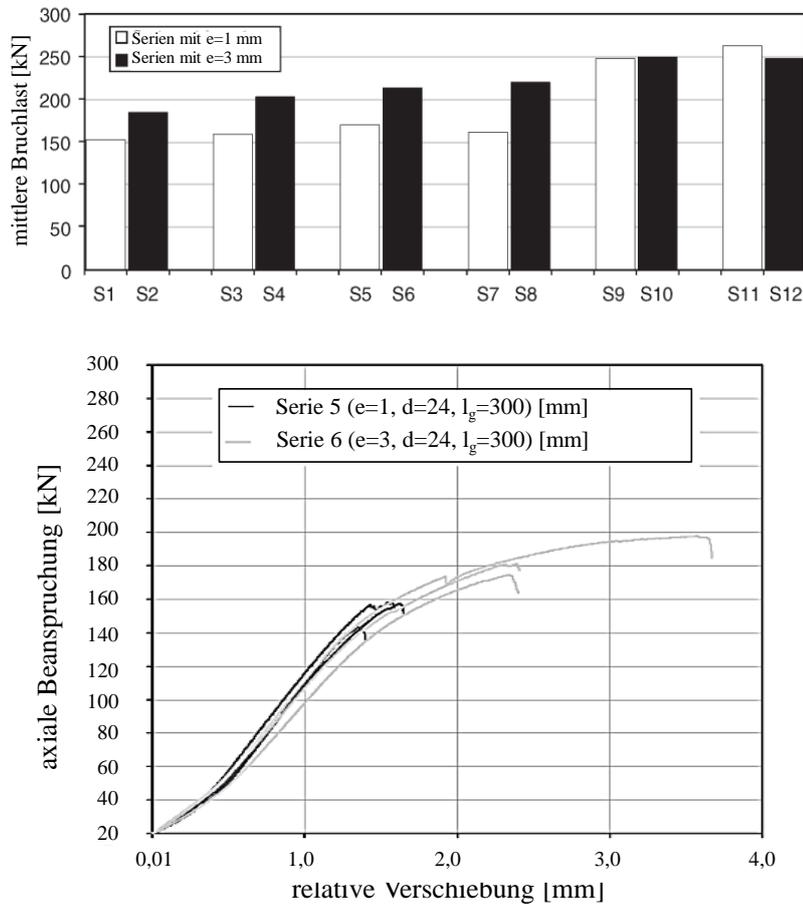


Abbildung 4.8: Einfluss der Klebstofffugendicke auf die Tragfähigkeit (oben) und auf die Duktilität der Verbindung (unten) (bearbeitet) [21]

Felligioni hat festgestellt, dass die Klebstofffugendicke mit der Art des Bruchversagens und mit der Ausziehtragfähigkeit [35] gut korreliert. Bei dem Klebstoffdicken von 1 mm wurde meistens ein Kohäsionsversagen beim Holz beobachtet. Mit höheren Klebstofffugendicken gingen ein Kohäsionsversagen im Klebstoff bei den spröden Klebstoffen und ein Adhäsionsversagen zwischen Stahl und Klebstoff bei den duktilen Klebstoffen hervor. Die zunehmende Dicke erhöhte die Tragfähigkeit.

Obwohl viele Untersuchungen über den Einfluss der Klebstoffdicke auf die Tragfähigkeit unternommen wurde, kann man nicht mit Sicherheit bestimmen, welche Dicke zur Steigerung der Tragfähigkeit am zielführendsten ist. Insbesondere hängt das erreichbare Potenzial von den Klebstoffeigenschaften ab. Während bei einigen Klebstofftypen mit zunehmender Dicke die Ausziehtragfähigkeit steigt, verhält es sich bei anderen umgekehrt.

4-1.1.2 sonstige beeinflussende Parameter

• Art der Krafteinleitung bzw. der verwendeten Prüfkfiguration

Die Art der Krafteinleitung hat ebenfalls einen Einfluss auf den Tragwiderstand einer Holz-Klebeverbindung und wird im Folgenden geschildert:

Wie bereits erwähnt, hat die Prüfkfiguration einen Einfluss auf die erreichbare Scherfestigkeit einer Holz-Stahl-Klebeverbindung. In [18] sind zwei unterschiedliche Prüfkfigurationen für eingeklebte Gewindestangen dargestellt und beschrieben:

- unsymmetrisch („pull-push“) und
- symmetrisch („pull-pull“) (Abbildung 4.9).

Es sind, neben den hier erwähnten Prüfkfigurationen, auch noch weitere möglich. Diese wurden jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Im Zuge der Durchführung der experimentellen Untersuchungen nach Kapitel 7:, wurde vor allem im Hinblick auf eine mögliche Anwendung der Verbindung für zugbeanspruchte Fachwerkstäbe eine symmetrische („pull-pull“) Prüfkfiguration gewählt.

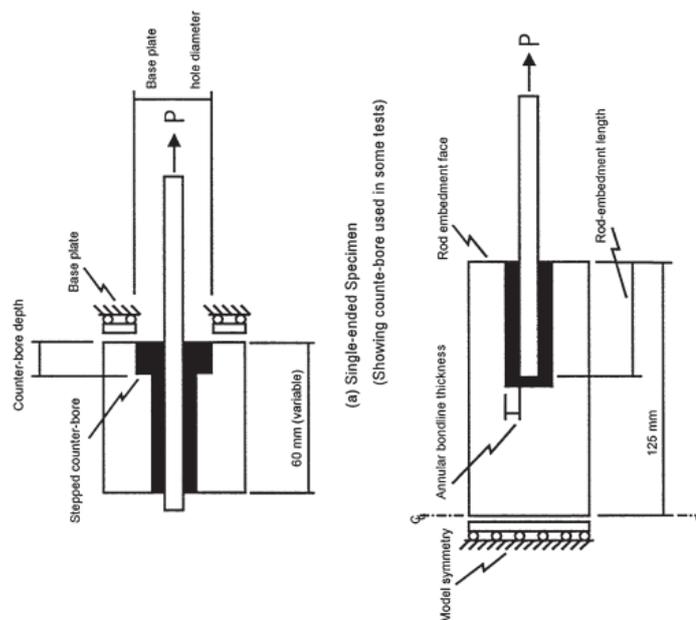


Abbildung 4.9: Prüfkfigurationen: unsymmetrisch („push-pull“) (links) und symmetrisch („pull-pull“) (rechts) [18]

Eine FEM-Analyse in [18] zeigt, dass die Scherspannungsspitzen bei den unsymmetrischen Prüfkfigurationen bis zu rund 50 % höher sind als bei den symmetrischen. Mit Hilfe der dort durchgeführten Versuche wird ebenfalls bestätigt, dass die unsymmetrisch beanspruchten Prüfkörper kleinere Ausziehtragfähigkeiten aufweisen [18].

• **klimatische Einflüsse und Lasteinwirkungsdauer**

Viele der in der Literatur auffindbaren Prüfdaten wurden aus Kurzzeitversuchen gewonnen, die statisch belastet wurden. Bisher gibt es wenige Daten, die einen Einblick in das Verhalten der Verbindung bei dynamischer Einwirkung erlauben. Dazu wurden an der MPA Wiesbaden [13] Versuche mit eingeklebten Gewindestangen sowie mit eingeklebten Lochblechen durchgeführt. Ziel war die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aber nicht näher auf diese Belastungsart eingegangen.

Der Einfluss der Kurz- und Dauerbelastung im Normalklima – und noch mehr bei einem Wechselklima – ist vermutlich der Grund, weshalb sich die Verwendung von Holz-Stahl-Klebeverbindungen noch nicht im großen Maßstab in der Praxis durchgesetzt hat. Dabei sind, wie bei der ausschließlichen Temperaturbelastung (siehe 4-1.4.2), Untersuchungen zu differenzieren, deren Prüfkörper vorklimatisiert und solche, deren Prüfkörper während der Belastung einer Wechselfeuchte (bzw. Wechseltemperatur) ausgesetzt wurden. Die nachfolgend erwähnten Untersuchungen sind chronologisch aufgelistet und beschrieben.

In Kurzzeitversuchen hat Riberholt [64] die Prüfkörperergebnisse mit und ohne Klimawechsellagerung verglichen. Als Schlussfolgerungen folgte: ein Feuchtegehalt von $u = 12 - 35 \%$ im Kern des Prüfkörpers induziert keine Festigkeitsreduktion, wenn die Prüfkörper „trocken“ getestet werden. Im Gegenteil dazu ist bei der Prüfung „nasser“ Prüfkörper von einer Festigkeitsreduktion von rund 15 % der Tragfähigkeit auszugehen.

Im Bericht von Ehlbeck et al. wurden keine signifikanten Festigkeitsverluste nach einer Klimabeanspruchung im Kurzzeitversuchen beobachtet [32]. Die Kurzzeitversuche umfassten acht Prüfkörper die einer Variation von $30^\circ \text{C} / 40 \%$ Luftfeuchte bis $30^\circ \text{C} / 90 \%$ Luftfeuchte ausgesetzt waren. Dabei wurden die negativen Dehnungen (Schwinden / Stauchen bei 40 %) und positive Dehnungen (Quellen bei 90 %) aufgezeichnet. Bei parallel zur Faser eingeklebten Gewindestangen liegen die erwähnten Dehnungen in der gleichen Größenordnung. Nach der Klimawechselbeanspruchung wurden Ausziehversuche mit denselben durchgeführt. Es konnte keine Reduktion der Haftfestigkeit festgestellt werden. Weiters wurden im Rahmen der Untersuchungen auch Langzeitversuche über sechs Jahre mit konstanter Lasteinwirkung durchgeführt. An den eingeklebten Gewindestangen wurden mittels Dehnmessstreifen die Spannungen während der Versuchszeit ermittelt. Zur Gewährleistung eines (natürlichen) Wechselklimas wurden die Prüfkörper in einer offenen Halle gelagert. Bei einer geringen konstanten Dauerbelastung wurden nach der Belastungszeit keine größeren Vorschädigungen festgestellt.

Aicher und Dill-Langer untersuchten in [2] das Verhalten unterschiedlicher Klebstoffe (PRF, PUR und EPX) bei verschiedenen klimatischen Bedingungen. Zuerst wurden Referenzprüfkörper hergestellt und auf die gewünschte Holzfeuchte klimatisiert (einmal in $20^\circ \text{C} / 65 \%$ rel. LF und einmal auf $20^\circ \text{C} / 85 \%$ rel. LF). Die darauf folgenden Kurzzeitversuche zeigten, dass der Epoxidklebstoff nicht negativ vom feuchten Klima beeinflusst wird. Die ermittelten Werte waren höher als im Normalklima. Ein möglicher Grund dafür könnte die Spannungsumlagerung zufolge des Feuchteinflusses sein. Im Gegensatz dazu, sind die PRF- und PUR-Klebstoffe sehr empfindlich, was sich in einer Reduktion der Festigkeiten bemerkbar macht. Dieselben Klebstoffe wurden weiters Langzeitversuchen ausgesetzt, einmal in einem konstanten, feuchten Klima von $20^\circ \text{C} / 85 \%$ rel. LF und einem Wechselklima, wobei die Temperatur von 25°C bis 55°C und die relative Luftfeuchte von 45 % bis 12 % variiert wurden. Die Prüfkörper wurden unter konstanten Lasten gehalten, welche 70 % bis 80 % der Last aus dem Kurzzeitversuchen entsprachen.

In den Versuchen mit konstanten, feuchten Klima (erste Gruppe) zeigten die PRF- und PUR-Klebstoffe wiederum die schlechteren Resultate bei einer kurzen Versuchsdauer bis zum Bruch und ein rasches Abfallen der Festigkeiten während der Zeit. Der EPX-Klebstoff zeigte demgegenüber längere Dauerhaftigkeit und eine flachere Neigung der Festigkeitsabfallkurve. Das Wechselklima (zweite Gruppe) unter einer konstanten Belastung führte zu erheblichen Festigkeitsverlusten bei allen Klebstofftypen.

Die Versuche an der MPA Stuttgart [59] lieferten ebenfalls wertvolle Daten über Verbindungen bei längerer Lasteinwirkung. Im Rahmen einer umfangreichen Untersuchung von parallel zu Faser eingeklebten Gewindestangen in Brettschichtholz, wurde unter anderem das Dauerstandverhalten unter wechselnder klimatischer Beanspruchung geprüft. Die Temperatur schwankte im Bereich von 20°C – 50°C und die Luftfeuchtigkeit dazugehörig im Rahmen von rund 85 % – 20 % rel. LF. Die Klimawechsel erfolgten nach der Aufbringung einer konstanten Last, welche innerhalb des linearen Bereiches aus den Kurzzeitversuchen bestimmt wurde. Die Versuche wurden über eine Zeitdauer von sechs Monaten gefahren. Danach wurden jene Prüfkörper, welche die Prüfung überstanden hatten, im Kurzzeitversuch bis zum Bruch belastet. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zeigen, dass 90 % der Festigkeiten der vergleichbaren Prüfkörper bei einer Kurzzeitbeanspruchung erreicht werden konnten.

4-1.2 MERKMALE DES HOLZES

Im Zuge der Literaturrecherche konnte festgestellt werden, dass der Großteil der experimentellen Untersuchungen mit Vollholz aus Nadelholz der Festigkeitsklasse C 24 oder vergleichbaren Festigkeitsklassen durchgeführt wurde. Zudem wurden häufig Brettschichtholz und Furnierschichtholz aus Nadelholz verwendet. Über die Verwendung von Laubholz gibt es nur wenige Erfahrungsberichte, obwohl gerade in der Sanierung historischer Gebäude häufig Klebeverbindungen unter Verwendung von Laubholz ausgeführt wurden [73].

4-1.2.1 Rohdichte des Holzes

Nach Durchsicht der Arbeiten, welche sich mit dem Einfluss der Rohdichte auf das Ausziehtragverhalten eingeklebter stiftförmiger Verbindungsmittel beschäftigen, liegen unterschiedliche Auffassungen vor:

Gustafsson und Serrano [43] sehen keinen signifikanten Unterschied der Ausziehtragfähigkeiten bei sich ändernder Rohdichte des Holzes. Zum selben Ergebnis kommt auch Feligioni et al. [35]. Chans [20] hat Prüfkörper mit Rohdichten von 747 kg/m³ bis 987 kg/m³ untersucht. Die Analyse der Ergebnisse zeigt ebenfalls keinen Zusammenhang der Rohdichte mit der maximalen Bruchlast.

Steiger et al. [70] wiesen, im Gegensatz dazu, eine Rohdichteabhängigkeit bei eingeklebten Gewindestangen nach. Die Ergebnisse aus [70] sind in Abbildung 4.10 dargestellt und zeigen dass höhere Rohdichten mit höheren mittleren Scherfestigkeiten korrelieren.

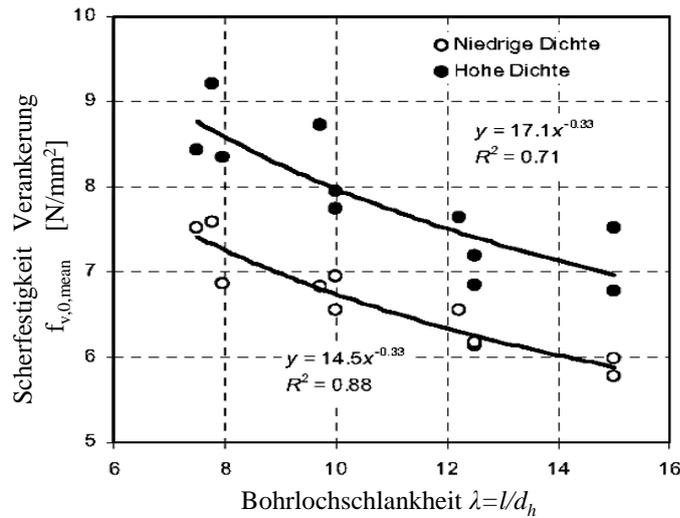


Abbildung 4.10: Einfluss der Rohdichte des Holzes auf die Scherfestigkeit bei parallel zur Faser eingeklebten Gewindestangen [70] (bearbeitet)

In [70] und [89] ist der Einfluss der Rohdichte des Holzes bei parallel und bei senkrecht zur Faserrichtung eingeklebten Gewindestangen beschrieben, wobei sich zeigte, dass die Abhängigkeit der Rohdichte in Anschlüssen parallel zur Faserrichtung stärker ausgeprägt ist (siehe Abbildung 4.11 aus [88]).

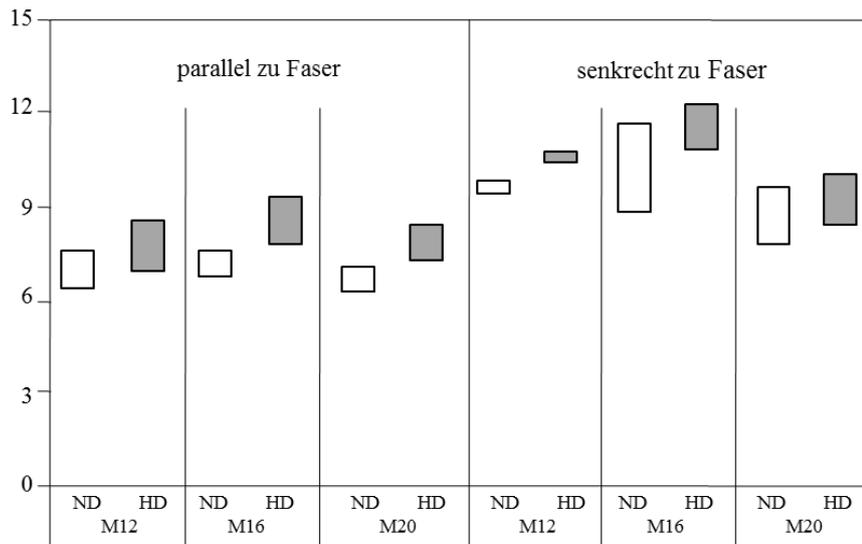


Abbildung 4.11: Einfluss der Rohdichte des Holzes auf die Scherfestigkeit bei parallel und senkrecht zu Faser eingeklebten Gewindestangen (ND ... niedrige Rohdichte; HD ... hohe Rohdichte) [88] (bearbeitet)

Die Änderung mechanischer Parameter (Festigkeit, Steifigkeit) lässt sich aufgrund der auftretenden Streuungen und der Vielzahl möglicher direkter und indirekter Einflussfaktoren nur schwer direkt auf eine Änderung der Rohdichte zurückführen. Beispielsweise kann Holz mit höherer Rohdichte auch höhere Scherfestigkeiten aufweisen. Jedoch kann gleichzeitig die Haftung zwischen Holz und Klebstoff infolge eines geringeren Porenvolumens in den Grenzschichten herabgesetzt werden (mechanische Adhäsion). Zudem können sich die Steifigkeitseigenschaften des Holzes mit der Rohdichte ändern, welche wiederum die Spannungsverteilung innerhalb des Verbundbereichs und damit das Tragverhalten der Verbindung wesentlich beeinflussen können [81].

4-1.2.2 Holzfeuchte

Durch die hygroskopischen Eigenschaften des Holzes kommt es zu Quell- und Schwinderscheinungen bei sich ändernden klimatischen Verhältnissen. Dies führt zu Spannungen innerhalb der Klebeschicht, die zu Kohäsionsversagen und damit zu einem Lösen des Verbundes (Delaminierung) führen können.

Bereits 1986 wurden von Riberholt [64] Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchte auf die Klebeverbindung durchgeführt. Bei der Verwendung von Polyurethanklebstoffen verringert eine zu hohe Feuchtigkeit, welche zum Aufschäumen des Klebstoffes führt, die Tragfähigkeit.

Broughton und Hutchinson [18] gehen auf den Einfluss des Feuchtegehalts in der Zeit des Klebens auf die Druckscherfestigkeit unter Berücksichtigung zweier Holzarten (Douglasie und Eiche), sowie zweier Klebstoffarten (Epoxid und Polyurethan) ein. Der Feuchtegehalt variierte von $u = 10\%$, über 18% bis zu $22+\%$. Die Polyurethane zeigen eine große Empfindlichkeit bei einer Feuchteänderung und versagen durch einen Kohäsionsbruch innerhalb der Klebefuge. Die Unterschiede der Scherfestigkeitsänderungen bei Epoxidklebstoff-Prüfkörpern sind weniger stark ausgeprägt. Das Versagen kann durch Holzbruch innerhalb des Querschnitts oder in der Nähe der Klebstoffschicht beschrieben werden, was auf die reduzierte Scherfestigkeit des Holzes mit steigender Feuchtigkeit zurückzuführen ist. Bei Epoxidklebstoff-Prüfkörpern zeigt die Holzart Douglasie höhere Scherfestigkeiten, wohingegen es sich bei Polyurethan-Prüfkörpern umgekehrt verhält. Prüfkörper mit der Holzart Eiche zeigten höhere Scherfestigkeiten.

In Abbildung 4.12 ist die Abhängigkeit der Ausziehlast vom Feuchtigkeitsgehalt der Eiche und Esche zum Zeitpunkt des Klebens dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass ein signifikantes Abfallen der Ausziehlast erst ab 25% Holzfeuchte auftritt, was das Einkleben in der Nutzungsklasse 2 (Holzfeuchte bis 20%) erlauben würde.

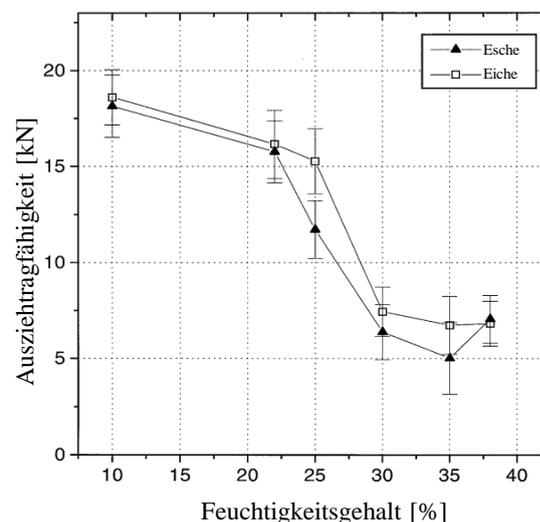


Abbildung 4.12: Einfluss des Feuchtegehalts auf die Ausziehungskraft [18]

Die Holzfeuchte aller geprüften Probekörper mit eingeklebten Gewindestangen in [59] betrug zwischen $u = 8\%$ und 13% . Die Firma TiComTec fordert in ihrem technischen Dossier zu eingeklebten Stahlstäben eine maximale Holzfeuchtigkeit von 15% , wobei die Materialtemperatur bei $> 18^\circ\text{C}$ und die Raumtemperatur bei $> 20^\circ\text{C}$ liegen sollen [80]. Weitere Angaben aus der Literatur zu Maximalwerten für die Holzfeuchte liegen zwischen 15% [8] und 20% [5], wobei anzustreben wäre, dass die Holzfeuchte bei der Verklebung jener Feuchte entspricht, der die Bauteile später ausgesetzt sind (Gleichgewichtsfeuchte).

4-1.2.3 Kraftwinkel zur Faserrichtung

Flustochowicz et al. haben in ihrer Studie [81] einen Vergleich mehrerer Ergebnisse für Einflussparameter auf die Holz-Stahl-Klebeverbindung geliefert. Während einige Forscher argumentieren, dass die Ausziehtragfähigkeit höher ist, wenn die Gewindestangen parallel zur Faser eingeklebt werden, sehen andere Autoren keinen Einfluss oder gehen gar vom Gegenteil aus.

Von einem theoretischen Standpunkt aus gesehen, sind die Steifigkeits- und Festigkeitswerte des Holzes in den verschiedenen anatomischen Richtungen unterschiedlich und damit auch deren Beanspruchbarkeit. Parallel zur Faser weist das Holz höhere Festigkeiten auf, als senkrecht dazu. Entsprechend sollten sich auch die Festigkeiten der eingeklebten Gewindestangen verhalten. Insbesondere treten bei unterschiedlichen Winkeln zwischen Kraft- und Faserrichtung unterschiedliche Steifigkeiten bzw. E-Module auf.

Man kann weiters davon ausgehen, dass auch die Verklebbarkeit nicht in allen Richtungen gleich ist. Zusätzlich ist noch zu bemerken, dass bei einer einwirkenden Kraft unter einem Winkel auch eine Rollschubbeanspruchung (rund 1/10 der Steifigkeit und Festigkeit von faserparallel beanspruchtem Holz) bewirkt. Um diesen Sachverhalte zu überprüfen, wurden Gewindestangen in [43] unter den Winkeln 0°, 22,5°, 45° und 90° mit einem Epoxidharz Klebstoff getestet.

Aus Abbildung 4.13 wird ersichtlich, dass die Tragfähigkeit mit steigendem Winkel abfällt und gleichzeitig die Spannungs-Verformungs-Kurve gleichmäßiger ist.

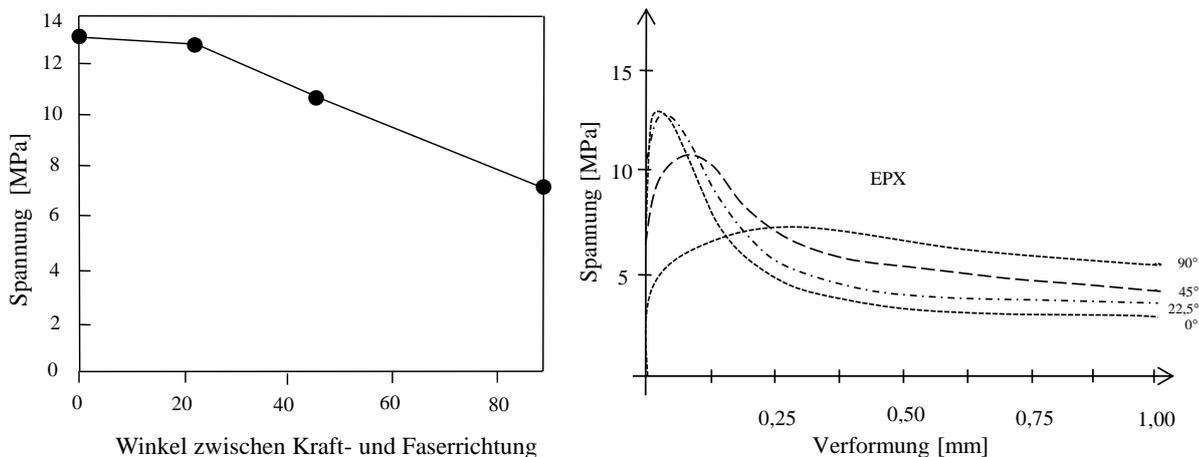


Abbildung 4.13: Einfluss des Winkels auf die übertragbare Scherfestigkeit (links) und auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung (rechts) [43] (bearbeitet)

Houte et al. stellen in [86] fest, dass für Kiefernurnierschichtholz nur 65 % der Festigkeit von parallel eingeklebten Gewindestangen erreicht werden konnte. Beobachtet wurde ein Adhäsionsversagen zwischen der Klebstoffschicht und des Holzes bei den senkrecht zu Faser eingeklebten Gewindestangen, was vermutlich auf das beschränkte Eindringen des Klebstoffes in die Holzfaser zurückzuführen ist.

Im Gegensatz dazu ist, wie bereits bei der Rohdichte erwähnt und in der Abbildung 4.11 dargestellt wurde, die mittlere Scherfestigkeit der senkrecht zur Faser eingeklebten Gewindestangen deutlich höher [89]. Die Tragfähigkeiten senkrecht zur Faser sind um 20 % bis 50 % höher als die Tragfähigkeiten der Prüfkörper mit parallel zur Faser eingeklebten Gewindestangen.

Versuche von Radovic et al. [42] zu eingeklebten Stahlblechen weisen demgegenüber darauf hin, dass sich kein signifikanter Einfluss des Winkels der aufgebracht Kraft einstellt.

Die Resultate der Versuche mit Dehnmessstreifen geben eine ausgleichendere Dehnungsverteilung bei senkrecht zur Faser eingeklebten Gewindestangen [31] wieder. Numerische Untersuchungen [15] zeigten einen beinahe linearen Normalspannungsverlauf und damit einhergehend einen annähernd konstanten Schubspannungsverlauf bei den senkrecht zur Faser eingeklebten Gewindestangen. Bei den parallel zur Faser eingeklebten Gewindestangen war keine Linearität bei den Normal-, und ausgeprägte Spitzen bei dem Schubspannungsverlauf zu erkennen.

4-1.3 MERKMALE DES STAHLES

4-1.3.1 Oberflächenbehandlung der Stahlteile

Obwohl bei einer mikroskopischen Betrachtung alle Stahloberflächen eine Rauigkeit aufweisen, ist diese für einen ausreichenden Verbund von Holz-Stahlblech-Klebeverbindungen oft unzureichend ausgeprägt. Alle metallischen Verbindungsmittel sollen daher einer Oberflächenbehandlung unterzogen werden, um eine bessere Haftung bzw. mechanische Verzahnung mit dem Klebstoff zu gewährleisten. Auf diese Art verhakt sich die Klebschicht an die raue oder poröse Oberfläche [44].

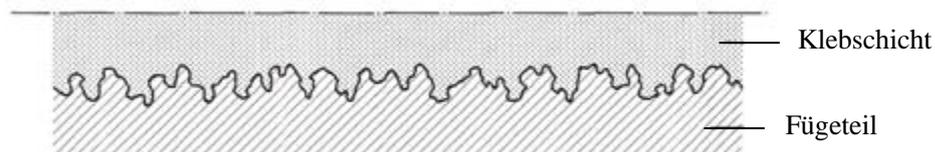


Abbildung 4.14 Verbindung des Fügeteils mit der Klebschicht [44]

Gewindestangen bzw. Betonrippenstähle weisen auf Grund deren Struktur eine mechanische Verzahnung zwischen Stahloberfläche und Klebschicht auf. Es sind jedoch auch bei deren Verwendung Unterschiede in den Versuchsergebnissen zu bemerken. In [59] wird festgestellt, dass die Betonrippenstähle aufgrund ihrer breiteren Rippen und deren versetzten Anordnung höhere Fugenscherfestigkeiten aufweisen als Gewindestangen. Auf Grund der höheren Robustheit ist für Holz-Stahlblech-Klebeverbindungen stets eine mechanische Verzahnung zwischen Stahloberfläche und Klebschicht [15] anzustreben.

Glatte Stahlstangen sowie sandgestrahlte Stahlstangen haben experimentell zu keinen ausreichenden Leistungsfähigkeiten geführt. Anzumerken ist dazu, dass es prinzipiell schwierig ist einen Klebstoff zu finden, der für beide Materialien (Holz und Stahl) gleich gut geeignet ist und mit denen ausreichende Adhäsionskräfte ausgebildet werden können.

Flache und glatte Fügemittel, wie z. B. Stahlbleche können einer mechanischen, physikalischen und chemischen Vorbehandlung ausgesetzt werden. Insbesondere ist eine mechanische Vorbehandlung mittels Bürsten, Schleifen und Sandstrahlen zielführend, wobei Letztere in vielen Forschungsarbeiten zu den besten Resultaten führten [42] (siehe auch 5-2).

Für eine mechanische Kraftübertragung können weiters Bohrungen in das Blech eingebracht werden, bei denen sich Klebstoffbolzen im Blech ausbilden. Diese verursachen ebenfalls einen Kontaktdruck über die Lochleibung bzw. werden auf Abscheren beansprucht und tragen zu einer wesentlichen Erhöhung der Tragfähigkeit der Verbindung bei [15].

Das Entfernen von Rost, Farbe und anderen Verunreinigungen gehört ebenfalls zur erforderlichen Oberflächenvorbehandlung der Stahlteile [44].

4-1.3.2 Reinigung der Stahlteile

Eine weitere Oberflächenbehandlung in den Veröffentlichungen erwähnte Methode zur Steigerung der Verbindungstragfähigkeit ist die Reinigung der Oberfläche mit Lösungsmittel, Aceton etc. Um den Einfluss von Verunreinigungen an den Stahloberflächen und deren unerwünschte Reaktion mit Klebstoffen zu verhindern, müssen die Stahlteile gereinigt und entfettet werden. Die Oberfläche muss staub- und fettfrei sein, um die Aktivierung der Adhäsionskräfte zu ermöglichen [44]. Die Reinigung kann beispielsweise mit Aceton oder Alkohol durchgeführt werden. Für eine bessere Haftung können auch zusätzliche Haftmittel oder Grundierungen benutzt werden [18].

4-1.3.3 Korrosioneinfluss

Zum Schutz vor Korrosion bei eingeklebten Gewindestangen bestehen unterschiedliche Möglichkeiten. In [64] wird die Verwendung einer Zinkbeschichtung vorgeschlagen, andererseits kann der Korrosionsschutz auch durch unterschiedliche Beschichtungssysteme hergestellt werden.

Die Prüfkörper wurden in [64] einerseits in Wasser und andererseits in Salzwasser eingetaucht und danach getrocknet. Die vorher belasteten Gewindestangen sowie auch nicht vorbelastete Gewindestangen wurden auf Ausziehen des Verbindungsmittels getestet. Die Untersuchungen ergaben, dass:

- eine Zinkbeschichtung – selbst unter Salzwasserbeanspruchung – ausreicht,
- es keine Unterschiede zwischen den Korrosionsschutzmaßnahmen der beiden verwendeten Klebstoffarten (Polyurethan und Araldit) gab,
- die nicht eingeklebten Teile der Gewindestangen signifikant mehr Korrosionserscheinungen aufwiesen als der eingeklebte Teil und
- die schon einmal geprüften Gewindestangen – auf Grund der vorhandenen Rissbildung – zu einer höheren Korrosionsbeanspruchung führten.

4-1.4 MERKMALE DES KLEBSTOFFES

4-1.4.1 Klebstofftyp

Die meisten Klebstoffe für das Einkleben von Gewindestangen basieren auf Epoxid- (EPX), Polyurethan- (PUR) und Phenolresorzin (PRF).

Riberholt hat in seinen Untersuchungen einen EPX- mit einem PUR-Klebstoff [64] verglichen. Der Araldit-Klebstoff (EPX) stellte sich als wesentlich steifer und spröder heraus als jener auf Polyurethan-Basis. Letzterer zeigte jedoch um rund 15 – 25 % geringere mittlere Ausziehfestigkeiten. Im Gegensatz dazu beobachtete Stepinac [72] keinen wesentlichen Unterschied zwischen den beiden Klebstoffarten EPX und PUR bei eingeklebten Gewindestangen in Buchenurnierschichtholz.

Verklebungen mit Phenolresorzinharz ergaben in [18] den geringsten Mittelwert der Bruchlast bzw. die geringste mittlere Schubspannung und führten einerseits zu einem Kohäsionsversagen innerhalb der Klebefuge sowie andererseits bei einem Teil der Prüfkörper zu Adhäsionsversagen. Diese Bruchursachen traten auch bei Klebstoffen auf Basis von Polyurethan auf. Im Gegensatz dazu zeigen die Epoxidklebstoffe signifikant höhere Tragfähigkeitswerte. Als Bruchursache konnte vorwiegend ein Holzversagen beobachtet werden. Der Grund dafür liegt in den höheren Werten des E-Moduls der Epoxidklebstoffe, die mit dem E-Modul der FSH-Holzkörper besser zusammenwirken (Abbildung 4.15).

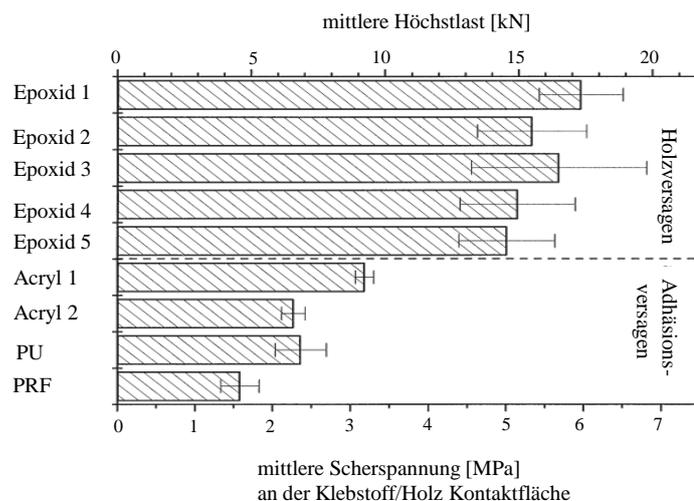


Abbildung 4.15: Einfluss der Klebstoffart auf die Ausziehtragfähigkeit [18] (bearbeitet)

In [6] sind Teile des GIROD Projekts (Glued in rods – Eingeklebte Gewindestangen) beschrieben. Unter anderen ist ein grober Überblick über die drei verwendeten Klebstoffe in Bezug auf Versagungsart und Haftung angegeben. So wird dem PRF-Klebstoff ein Kohäsionsversagen innerhalb der Klebefuge zugeordnet, welches auf das Schwinden während des Aushärtvorgangs und damit einhergehenden Ablöseerscheinungen zwischen Stahl und Klebschicht zurückgeführt wird. Der PU-Klebstoff entzieht dem Holz Wasser und produziert, während des Aushärtens CO_2 , was folglich Luftblasen induziert, welche wiederum zu einer abgeminderten Kohäsionsfestigkeit führen. Im Gegensatz dazu versagt der EPX-Klebstoff auf Holzscherversagen in unmittelbarer Nähe der Klebefuge. Es besteht eine sehr gute Haftung mit dem Holz sowie zum Stahl. Die Prüfkörper mit dem PUR-Klebstoff zeigen eine geringe Klebstoff-Holz-Haftung, wodurch in den Prüfungen ein Adhäsionsversagen in der Kontaktfuge folgte.

Aus den Ergebnissen in [18] und [6] sind ähnliche Verhältnisse zu erkennen. Es ist jedoch hervorzuheben, dass auch innerhalb einer Klebstoffgruppe Unterschiede auftreten können, das heißt, die Festigkeit hängt nicht nur vom Klebstofftyp, sondern auch von den Klebstoffeigenschaften der einzelnen Klebstoffe ab.

4-1.4.2 Temperaturbeständigkeit des Klebstoffes

Bei Arbeiten zur Temperaturbeständigkeit sind Untersuchungen mit vorgewärmten Prüfkörpern und solche mit nachträglicher Erwärmung unter einer konstanten Last der Prüfkörper zu unterscheiden. In diesem Abschnitt werden lediglich die Ergebnisse an Kurzzeitversuchen dargestellt, wobei die Prüfkörper vor der Prüfung im Ofen oder in der Klimakammer vorgeheizt und danach belastet wurden.

Zur Untersuchung der Temperaturbeständigkeit der Klebstoffe unter Dauerbelastung wurden Versuche an der MPA Stuttgart durchgeführt [59]. Es wurden Dauerstandversuche mit steigender Temperatur unter einem konstanten Lastniveau gefahren. Die Last wurde zuerst unter Normalbedingungen aufgebracht und danach wurde die Wärme in einer Temperaturkammer zugeführt. Zur Ermittlung der Temperatur wurden Temperaturfühler in den Gewindestangen eingeklebt. Im Bereich von 20°C bis rund 45°C steigt die Verformung sehr flach, aber linear an. Danach nehmen die Verformungen überproportional zu. Der erste Versuch erreichte die maximale Temperatur von 58°C nach 4 Stunden, womit die Anforderungen nicht erfüllt werden konnten. Im zweiten Versuch, mit geringerem Lastniveau, konnte eine Temperatur von 60°C nach 7 Stunden erreicht und noch 30 Minuten lang gehalten werden.

Eine weitere Untersuchung zur Temperaturbeständigkeit von Holz-Stahl-Klebeverbindung wurde in [13] geschildert. Dort wurden eingeklebte Gewindestangen sowie eingeklebte Lochbleche unter einem konstanten Lastniveau mit steigender Temperatur geprüft. Eine Temperaturbeständigkeit bis 60° C wurde gewährleistet bzw. erreicht.

Aicher und Dill-Langer [2] haben die Temperaturbeständigkeit unterschiedlicher Klebstoffe (EPX, PUR und PRF) bei den vorgeheizten Prüfkörpern (auf 50° C) untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass sich der Epoxidharz-Klebstoff durch höhere Festigkeiten kennzeichnet, wobei die beiden anderen Klebstoffe Verluste aufwiesen. Die hohe Temperatur führte zur Nachhärtung des Klebstoffes, was sich positiv auf die Festigkeiten auswirkte.

Das Verhalten und die Brucharten von eingeklebten Gewindestangen bei Temperaturen von 20° C bis 175° C sind in dem Bericht von Mischler [49] zu entnehmen. Dort wurden die Prüfkörper mit einem EPX-Klebstoff (GSA) in Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24 eingeklebt und im Ofen auf die gewünschte Temperatur aufgewärmt. Es wurden jeweils 8 bis 10 Prüfungen pro Temperatur geprüft und jeweils die mittlere Scherfestigkeit ermittelt (Abbildung 4.16).

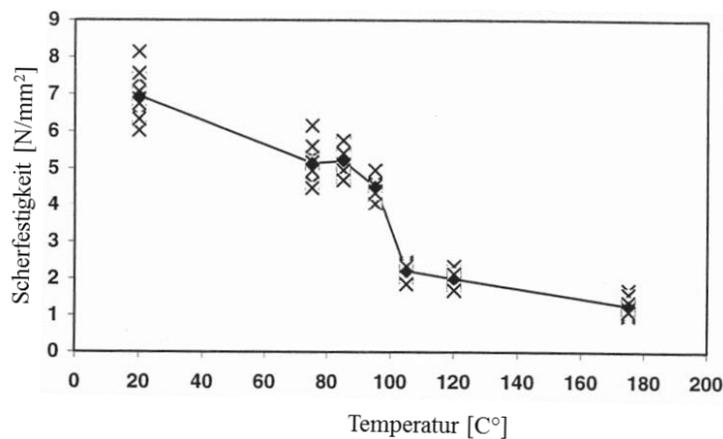


Abbildung 4.16: Scherfestigkeit der Klebeverbindung in Abhängigkeit von der Temperatur [49]

Aufgrund der großen Verformung des Stahles bei der Temperatur von 20° C, trat das Versagen in der Klebstofffuge auf. Der Klebstoff konnte die Verformung nicht aufnehmen. Bei einer Temperatur von 75° C konnte ein Holzscherversagen in der Mantelfläche des Klebstoffes beobachtet werden. Bei höheren Temperaturen, zwischen 85° C und 95° C trat überwiegend ein Adhäsionsversagen auf. Interessant ist, dass bei den höheren Temperaturen (85° C – 95° C) höhere Kräfte aufgenommen werden konnten als bei 75° C. Als mögliche Erklärung dafür ist die reduzierte Steifigkeit des Klebstoffes zu nennen, welche eine positive Auswirkung auf die Spannungsspitzen hatte. Noch höhere Temperaturen (105° C, 120° C und 175° C) führten zu einer Farb- und Konsistenzänderung des Klebstoffes. Dabei trat meist ein Adhäsionsversagen zum Stahl auf.

Colling untersuchte in Zusammenarbeit mit der WKI Braunschweig und WEVO (Klebstoffhersteller) die Temperaturbeständigkeit der eingeklebten Gewindestangen bei 80° C, obwohl laut europäischer Normung nur eine Temperaturbeanspruchung von 60° C gefordert ist [22]. Nach einer Lagerung der Prüfkörper in der Klimakammer bei 80° C und 17 % relativer Luftfeuchte, sowie Umwicklung der Prüfkörper mit einer Abdichtung während des Versuchs, wurde der erwünschte Stahlbruch einer Serie bei 80° C problemlos erreicht. Nach der Wahl höherer Stahlgüten wurde das Versagen in der Klebefuge hervorgerufen.

4-1.4.3 Bruchverhalten des Klebstoffes

In Abbildung 4.17 ist das unterschiedliche Bruchverhalten der Klebstoffe gleicher Basis dargestellt. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass das Bruchverhalten des Klebstoffes in der Tragfähigkeitsbetrachtung zu berücksichtigen ist. Die Klebstoffe können je nach Typ und Zusammensetzung ein sprödes, aber auch duktileres Verhalten aufweisen.

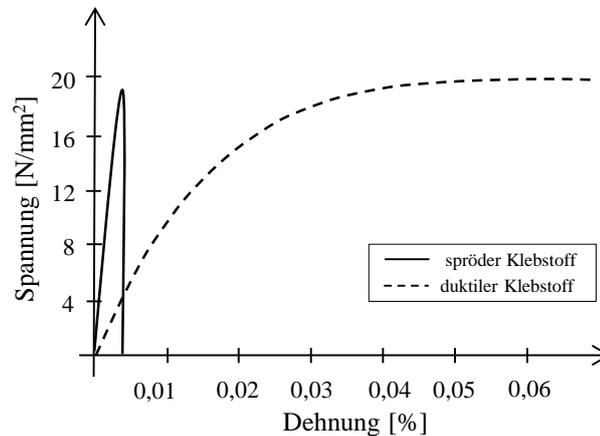


Abbildung 4.17: Spannungs-Dehnungs-Kurven unterschiedlicher Klebstoffarten (bearbeitet) [35]

Bei den Beschreibungen der Klebstoffarten wurden die Sprödigkeit und deren Einfluss auf die Tragfähigkeit und Bruchursache bereits angesprochen: Feligioni [35] zeigt in seiner Arbeit den Einfluss des Klebstoffverhaltens über einen Vergleich zweier Klebstoffe auf Epoxidbasis (duktiler und spröder Tragverhalten). Dabei wurde, auf Grund der vermuteten großen Beeinflussung, insbesondere die Klebstoffdicke variiert (1 mm, 2 mm und 5 mm). Der duktile Klebstoff zeigt höhere Festigkeiten, besonders bei den Prüfkörpern mit Klebstoffdicken von 5 mm, bei denen sich die Festigkeit im Vergleich zum spröden Klebstoff verdoppelt. Als weitere Schlussfolgerung dieser Forschungsarbeit trat zu Tage, dass die duktilen Klebstoffe besser mit der Ausziehtragfähigkeit korrelieren, wobei der spröde Klebstoff einen ausgeprägten Zusammenhang mit dem Stabdurchmesser aufweist. Weiters ist zu erwähnen, dass die Prüfkörper mit duktilem Klebstoff nach längerer Lagerung (60 statt 7 Tage) rund 25 % ihrer Festigkeit verloren. Dies war aber nicht der Fall bei den Prüfkörpern mit sprödem Klebstoff, bei denen kein signifikanter Verlust zu bemerken war.

4-2 BRUCHARTEN UND BRUCHURSACHEN

In [66] sind die möglichen Versagensarten für eingeklebte Gewindestangen bei axialer Beanspruchung aufgelistet. Es ist davon auszugehen, dass diese auch auf eingeklebte Stahlbleche übertragen werden können:

Versagen des Holzes in der Übergangsphase zum Klebstoff

Scherversagen des Holzes



Versagen der Kontaktfuge Holz / Klebstoff

Adhäsionsversagen



Versagen der Kontaktfuge Klebstoff / Stahl

Adhäsionsversagen



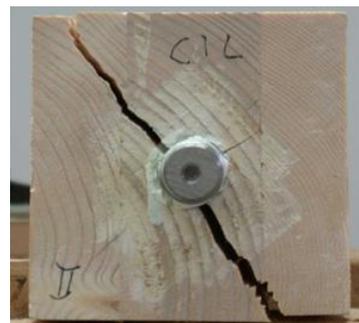
Versagen des Stahles

Überschreiten der Fließgrenze bzw. der Zugfestigkeit



Aufspalten des Holzes

zu geringe Abstände der Metallteile bzw. Überschreitung der Querkzugfestigkeit



Holzversagen

Überschreiten der Zugfestigkeit des Holzes



Abbildung 4.18: einige Brucharten bei eingeklebten Gewindestangen [71]

Zu erwähnen wäre noch ein Kohäsionsversagen des Klebstoffes, d. h., das Versagen innerhalb der Klebefuge wegen Überschreitung der Klebscherfestigkeit.

4-3 QUERZUGVERSTÄRKUNG

Durch die Einbringung axialer Kräfte in die Prüfkörper, entstehen in der Klebefuge bzw. den Fügebauteilen zusätzliche Kräfte rechtwinklig zur Stabachse. Diese sind oftmals für das frühzeitige Versagen infolge Aufspalten bzw. für die Verminderung der Ausziehtragfähigkeit verantwortlich. Deshalb sollte bei Holz-Stahl-Klebeverbindungen eine Quersugsicherung angeordnet werden [33]. Einige Maßnahmen, die schon erprobt wurden, werden im Folgenden vorgestellt.

Zu betonen wäre, dass es sich hier um eingeklebte stiftförmige Verbindungsmittel handelt und dass einige der vorgestellten Verstärkungsmethoden für eingeklebte Stahlbleche nicht wirksam sind, da es auf Grund des Einschlitzens zu einer deutlichen Verminderung des Bauteilnettoquerschnittes kommt.

- **verbundfreie Zone (größeres „Vorholz“)**

Zur Reduzierung von Spannungsspitzen und des Aufspaltens des Holzes kann am obersten Ende der Verankerung eine Absenkung mit größerem Durchmesser ausgeführt werden [71]. Diese Maßnahme hat jedoch sowohl positive, als auch negative Auswirkungen. Sie erhöht einerseits die Tragfähigkeit, vermindert aber auch einen Teil der Einbindelänge der Gewindestange, wodurch die übertragbare Kraft vermindert wird [33]. Es ist daher eine Optimierung anzustreben.

Broughton konnte in [19] einen Einfluss der Einbindetiefe auf die Bruchlast nachweisen. Als weiteres Resultat seiner Untersuchungen konnten kleinere Spannungsspitzen beobachtet werden. Ab einer Tiefe von 30 mm weist diese jedoch keine Auswirkungen mehr auf (Abbildung 4.19).

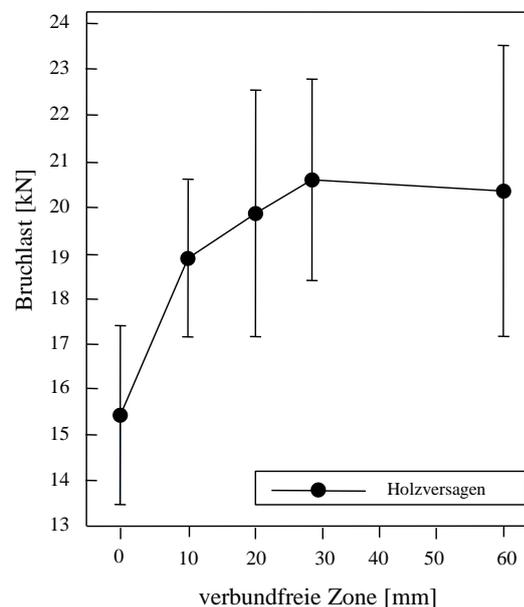


Abbildung 4.19: Einfluss der Einsinktiefe (verbundfreie Zone) auf die Bruchlast (bearbeitet) [19]

Eine weitere Forschungsarbeit zu diesem Thema wird in [58] vorgestellt. Bei Prüfungen von eingeklebten stiftförmigen faserverstärkten Kunststoffen ins Holz parallel zur Faser, zeigte die eingesenkte verbundfreie Zone von 30 mm eine Steigerung der Versagenslast von 15 %, wobei senkrecht zur Faser keine Steigerung zu bemerken war. Dennoch führte sie zu Erhöhung der Bruchverformung.

- **Ausreichender Holzquerschnitt**

Um das Aufspalten des Holzes auf Grund der Querzugspannungen zu verhindern, ist eine ausreichende (Seiten-) Holzstärke für die Aufnahme der Gewindestange erforderlich [39].

- **Ersatz durch leistungsfähigeres Holz bzw. Holzwerkstoffe**

Eine weitere Möglichkeit in diesem Zusammenhang wäre der Ersatz bzw. Substitution des Holzes mit einem geeigneteren Holzwerkstoff, der bessere Eigenschaften bei einer Querzugbeanspruchung aufweist. Wird das Holz nur im Anschlussbereich ersetzt, ist eine leistungsfähige Keilzinkenverbindung der Holzteile zu gewährleisten [66].

- **Aufgeklebtes Sperrholz**

Riberholt hat in [64] Birken-sperrholz um die mit PVA-Klebstoff eingeklebten Gewindestange aufgeklebt, um eine Querzugverstärkung zu gewährleisten. Dieses Vorgehen führte anstatt eines Aufspaltens zu einer um 15 % höheren Ausziehtragfähigkeit und einen Holzbruch im Querschnitt. Eine ähnliche Wirkung hätten auch aufgedruckte Nagelplatten [66].

- **Vollgewindeschrauben**

Enders-Comberg [33] hat nachgewiesen, dass nur die Vollgewindeschrauben, die am Zugstabende angeordnet sind, eine effiziente Verstärkung darstellen. Werden diese über die gesamte Länge der Gewindestange eingeschraubt, hat es keinen besseren oder sogar einen schlechteren Einfluss auf den Auszieh-widerstand. Die Spaltkraft wurde zuerst mittels Messschrauben an nicht verstärkten Prüfkörpern gemessen. Daraus konnte gefolgert werden, dass sich die Steigung der Spaltkraft nicht linear mit der Steigung der Axialkraft ergibt. Danach hat er die Ergebnisse der Querschnitte ohne Bewehrung und jenen mit Bewehrung (vier Vollgewindeschrauben und vier Furnierquerlagen) verglichen (Abbildung 4.20). Dabei zeigte sich eine Erhöhung der Tragfähigkeit von 30 % bis 40 % beim bewehrten Prüfkörper.

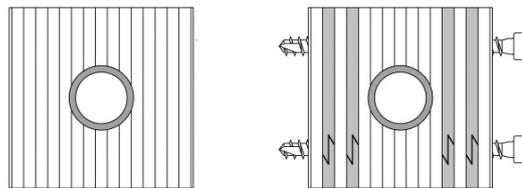


Abbildung 4.20: Querschnitt ohne und mit Querzugbewehrung [33]

Dieselbe Methode wurde auch in [58] angewendet. Hier wurden zur Vermeidung eines Aufspaltversagens des FSHs aus Kiefer mit eingeklebten Gewindestangen selbstbohrende Schrauben rechtwinklig zur Faserrichtung verwendet. Sie führten zu einer 25 %-gen Erhöhung der Tragfähigkeit.

Im Jahr 1991 haben Müller und Roth, im ähnlichen Sinne, Dübel aus Buchenholz quer zur Faserrichtung eingeklebt. Dies resultierte in einer Steigerung der Ausziehungskraft von 19 % bis 32 % [50].

KAPITEL 5: STAND DER TECHNIK – IN HOLZ EINGEKLEBTE STAHLBLECHE

Im Gegensatz zu eingeklebten Gewindestangen und Ankerstäben gibt es nicht viele Kenntnisse über axialbeanspruchte, eingeklebte Stahlbleche. Im folgenden Abschnitt wird näher auf bisherige Arbeiten dieser Holz-Stahl-Klebeverbindung eingegangen.

5-1 EMPA, CH 1956

[46] [76]

Strässler [76] und Kühne [46] berichten über erste Untersuchungen von Dr. Emil Staudacher, welche in weiterer Folge die LIGNUM (Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holz) veranlasste, die EMPA mit vertiefenden Untersuchungen zu eingeklebten Stahlblechen zu beauftragen.

Nach Strässler [76] beschäftigte sich Staudacher bereits in den 1950er Jahren mit der Entwicklung neuartiger Knotenausbildungen durch Einsatz von in Holz eingeklebten Metalllaschen. Auf Basis seiner Versuche gelang es ihm, eine derartige Bauteilverbindung herzustellen und in einem Bauwerk einzusetzen. Eine Realisierung seiner Idee erfolgte im Zuge des Baus einer Werkhalle in der Schweiz. Hierin bestand die Tragstruktur zum Teil aus Fachwerkträgern, deren Konstruktionsglieder an den Enden durch eingeklebte Metalllaschen und Bolzen verbunden wurden, wodurch sich in den Knotenpunkten gelenkige und leicht demontierbare Anschlüsse herstellen ließen [46].

Die Fertigung derartiger Verbindungen erwies sich jedoch als äußerst umständlich, da damals keine kalthärtenden Klebstoffe mit ausreichender Festigkeit zur Verfügung standen. Die Verklebung musste daher in zwei Stufen erfolgen. Zunächst wurden auf Metalllaschen dünne Furniere mittels warmhärtenden Epoxid-Klebstoff (Araldit) bei einer Temperatur von 40° C geklebt. Erst im zweiten Schritt konnten die beidseitig beschichteten Metalllamellen mittels Harnstoffharz bei 20° C mit den Fichtenholzstäben verbunden werden.

Als die chemische Industrie in den darauffolgenden Jahren erste kalthärtende Epoxidharze zur Verfügung stellen konnte, wurden im Auftrag der LIGNUM (Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holz) an der EMPA experimentelle Untersuchungen durchgeführt, welche vorrangig Einflüsse von Temperatur- und Feuchtewechsel, als auch unterschiedlicher Metalloberflächen (geschliffen, sandgestrahlt, beschichtet) auf die Beanspruchbarkeit in Holz eingeklebter Stahlbleche beinhalten. Auszüge aus den Ergebnissen sind in Abbildung 5.2 dargestellt.

Zur Verringerung auftretender Spannungen aus Schwinden und Quellen des Holzes, wurde das Furnierschichtholz im Bereich der Verklebung geschlitzt (Abbildung 5.1-links). Die Oberflächen der Metalllaschen wurden durch Schleifen und Sandstrahlen aufgeraut und anschließend mit Aceton gereinigt. Da diese Art der Vorbehandlung nicht ausreichte, wurden die Metalle mit sogenannten Primern beschichtet, wobei in [76] noch keine Versuchsergebnisse angeführt sind, da die Untersuchungen zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen waren.



Abbildung 5.1: geschlitztes Furnierschichtholz (links) und Fachwerk mit eingeklebten Stahllaschen (Mitte und rechts) [76]

Zur Eruiierung möglicher Einflüsse von Temperatur- und Feuchtewechsel wurden die Prüfkörper vor der Prüfung unterschiedlichen Klimabedingungen ausgesetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.2 dargestellt und zeigen, dass die Prüfkörper, die dem Temperaturwechsel (Frostraum – Ofen) ausgesetzt waren, geringere Tragfähigkeiten aufweisen als jene, die dem Feuchtewechsel (Wasserbad – Raumluft) ausgesetzt waren.

Verleimungen von Stahllaschen mit Fichte (Klebstoff: Epoxidharz)				
	Lagerung im Labor 20°C/65%	Wechsellagerungen		
		Wasser ↔ Raumluft	-20°C ↔ +80°C	Wasser ↔ +80°C
Scherfestigkeit [kp/cm ²]	3,62	3,43	0,98	1,17
Bruchanteil [%]	H	H	M/P H	M/P H
Scherfestigkeit in N/mm ² H = Bruch im Holz M/P = Bruch zwischen Metall und Primer				

Abbildung 5.2: Ergebnisse der Untersuchungen mit eingeklebten Stahllaschen [76] (bearbeitet)

5-2 FORSCHUNGS- UND MPA BADEN- WÜRTTEMBERG, 1988

[42]

Im Rahmen des Forschungsvorhabens, veröffentlicht in [42], wurde der Einfluss klimatischer Bedingungen (unterschiedliche Lagerungsart der Proben), der Klebstoffart, der Blechart, der Blechvorbehandlung, sowie der Einfluss des Winkels zwischen Krafrichtung und Holzfaser auf die Scherfestigkeit experimentell untersucht. Hierfür wurden Spalt-, Druckscher- und Zugscherversuche durchgeführt (Abbildung 5.3).

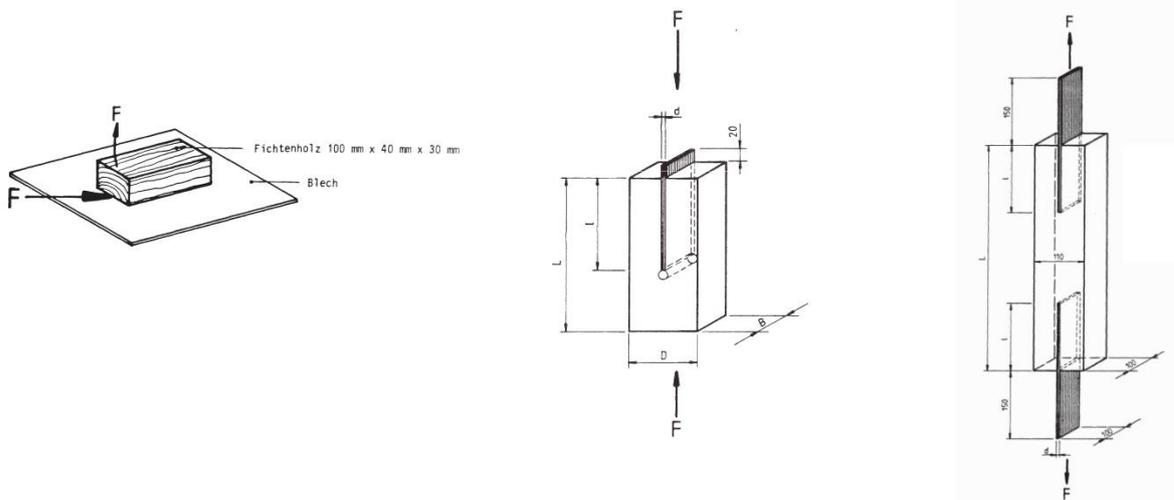


Abbildung 5.3: Prüfkongfiguration für Spalt- (links), Druckscher- (Mitte) und Zugscherversuche (rechts) [42]

Es wurden drei Klebstoffe auf Basis von Phenolresorcin (PR), Epoxid (EP) und Polyurethan (PU) verwendet. Untersucht wurden blanke (feuerverzinkte) Stahlbleche der Stahlgüte S 235 (damals St 37) und Edelstahlbleche des Typs V4-a. Eine Festlegung der Blechstärke erfolgte auf Basis der Streckgrenze des Bleches; dabei soll ein Versagen der Klebeverbindung noch vor Erreichen dieses Spannungsniveaus erfolgen. Die Blechstärken variierten zwischen $t_{\text{Blech}} = 5, 6$ und 8 mm. Für die Holzprüfkörper wurden Vollholz für Vorversuche und Brettschichtholz der Holzart Fichte für weitere Versuche mit einem mittleren Holzfeuchtegehalt von $u = 12\%$ und einer Rohdichte von $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ verwendet.

Metalloberfläche

Voruntersuchungen an Druckscherkörpern mit angerauter/entfetteter und sandgestrahlter/entfetteter Metalloberfläche und EP ergaben deutlich geringere Scherfestigkeiten bei angerauter Oberflächenvorbehandlung. Da zudem nach Durchführung von Spaltversuchen (siehe Abbildung 5.3 links) unter Variation des Stahlblechtyps (St 37 und V4-a), der Klebstoffart (PR, EP und PU) und der Aushärtetemperatur (20°C und 40°C) die sandgestrahlte im Gegensatz zur geschliffenen oder blanken Oberfläche zu großteils 100 % Holzfaserverbelag führte, erfolgten die weiterführenden Versuche an sandgestrahlten Blechen.

Einklebelänge

Um den Einfluss unterschiedlicher Einklebelängen auf die Schertragfähigkeit zu erfassen, wurden die Einklebelängen mit $l_{\text{kleb}} = 50 \text{ mm}$, 100 mm und 150 mm (mit konstanter Breite $b_{\text{kleb}} = 100 \text{ mm}$) variiert. Die Klebefuge wurde mit 1 mm konstant gehalten. Die Analyse der Versuchsdaten ergab einen deutlichen Abfall der rechnerischen Scherfestigkeiten mit zunehmender Einklebelänge (siehe Abbildung 5.7).

Belastungsart und Beanspruchungsrichtung

Hinsichtlich Belastungsart wurde zwischen Druck- und Zugscherprüfung unterschieden (siehe Abbildung 5.3 Mitte und rechts). Die Zugscherfestigkeiten lagen bei gleichen Randbedingungen (Klebefläche, Einklebelänge, Klebstoff, Stahlblech, Metalloberfläche) deutlich unter den Druckscherfestigkeiten (siehe Abbildung 5.7). Dieser Abfall in der rechnerischen Scherfestigkeit wurde auf quergerichtete Abtriebspannungen mit Schälwirkung infolge Exzentrizität bei Zugbeanspruchung zurückgeführt.

Untersuchungen zur Scherfestigkeit von Stahlblechen, die unter einem Winkel von 0° , 45° und 90° zur Holzfaserrichtung eingeklebt wurden ($b_{\text{kleb}} = 50 \text{ mm}$ und $l_{\text{kleb}} = 100 \text{ mm}$), ergaben nur geringe Unterschiede der Scherfestigkeiten, obwohl sich im Vergleich bei faserparalleler Anordnung des Bleches und vorliegendem Holzversagen deutlich höhere Tragfähigkeiten ergeben müssten (siehe Abbildung 5.5). Dies wird nach [42] auf Abweichungen in der Prüfkörpergeometrie (Anordnung und geringe Blechbreite) und das damit einhergehende Fehlen zusätzlicher Querszugbeanspruchungen bei den Proben mit 45° und 90° zurückgeführt, wobei aus den vorliegenden Unterlagen nicht eindeutig hervorgeht, wie die 0° -Prüfung erfolgte. Es wird angenommen, dass die Prüfungen bei 0° zur Faser mittels Pull-Pull (siehe Abbildung 5.3 rechts) und die Winkel 45° und 90° mittels Push-Pull-Prüfkonfiguration (siehe Abbildung 5.4) erfolgten.

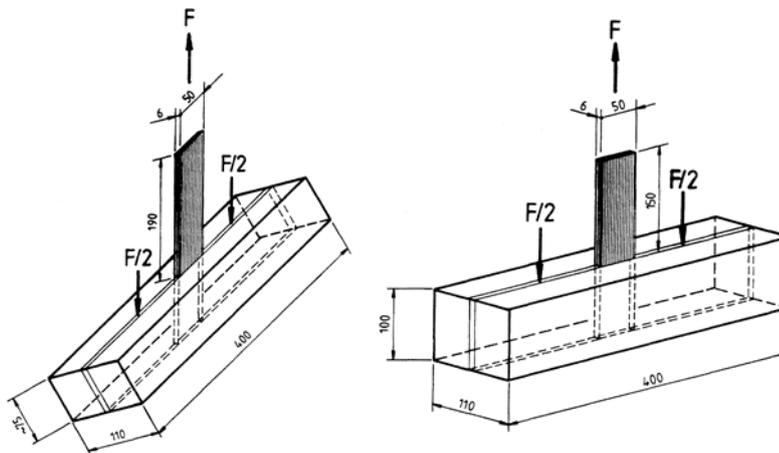


Abbildung 5.4: Zugscherversuche unter 45° (links) und 90° (rechts) Winkel zwischen Holzfaser- und Krafttrichtung [42]

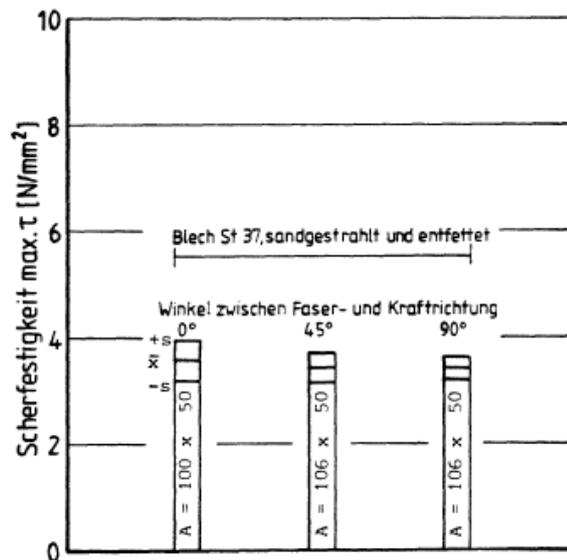


Abbildung 5.5: Mittlere Scherfestigkeit unter 0° (links), 45° (Mitte) und 90° Winkel zwischen Holzfaser- und Krafftrichtung (rechts) [42]

Klimawechsellagerung

Mit eingeklebten Stahlblechen wurde ebenfalls der Einfluss der Klimawechsellagerung überprüft. Dabei wurden 40 symmetrische Prüfkörper hergestellt, die bei Normalklima aushärteten. Danach wurden diese aufgetrennt (siehe Trennstelle in Abbildung 5.6), wobei die zweite Hälfte einer Klimawechsellagerung unterzogen wurde. Die andere Hälfte wurde weiterhin bis zur Prüfung unter Normalklima gelagert.

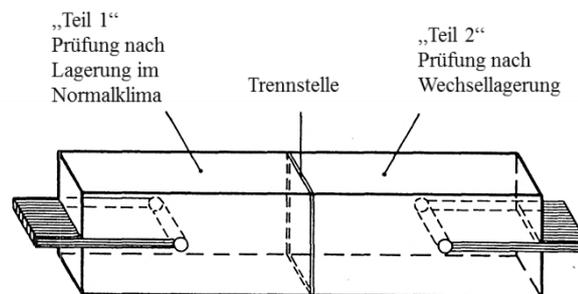


Abbildung 5.6: Prüfkörper zu Ermittlung des Einflusses der Klimawechsellagerung [42]

Die Klimawechsellagerung bestand aus drei Zyklen, wobei die Prüfkörper einer Wasserlagerung und Trocknung unterzogen wurden. Vor dem Prüfen wurden die Prüfkörper unter Normklima (20° C, rel. Luftfeuchte 65 %) klimatisiert. Die Druckscherprüfungen zeigten keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Scherfestigkeiten (Abbildung 5.7 – oben). Bei den Prüfkörpern mit EP-Klebstoff trat der Bruch im Holz bei 75 % der Prüfkörper und bei den Prüfkörpern mit dem PU-Klebstoff nur bei 50 % auf. Bei den verbleibenden Prüfkörpern trat beim EP-Klebstoff ein Adhäsionsversagen zwischen Blech und Klebstoff und beim PU-Klebstoff ein Kohäsionsversagen in der Klebstoffuge auf.

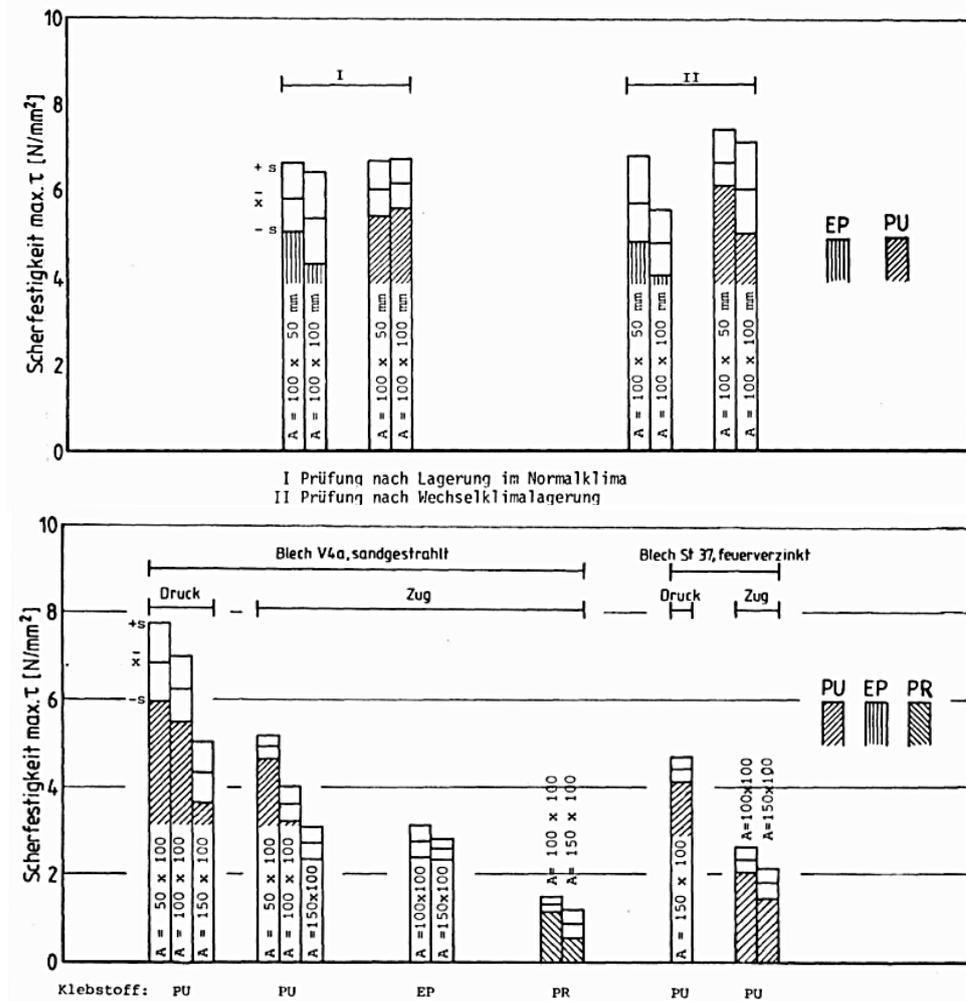


Abbildung 5.7: Einfluss des Wechselklimas (oben) und Unterschied zwischen der Druck- und Zugbelastung bei unterschiedlichen Klebstoffen, der Einklebelängen und der Blechart (unten) [42]

Bei einem Vergleich der in Abbildung 5.7 angeführten Ergebnisse zur Zugscherfestigkeit, wiesen die PU-Prüfkörper die höchsten Werte auf. Betrachtet man die zwei Stahlsorten lieferten die V4a-Bleche um 60 % höhere Werte, was nach [42] auf die mangelnde Oberflächenbehandlung des Baustahls S 235 zurückzuführen ist.

Für weiterführende Untersuchungen wurde empfohlen, Dauerstandsversuche sowie Versuche mit dynamischer Belastung durchzuführen.

5-3 FORSCHUNGS- UND MPA BADEN- WÜRTEMBERG, 1993

[1]

An der Forschungs- und Materialprüfanstalt Baden-Württemberg wurden weitere Untersuchungen bezüglich eingeklebter Stahlbleche durchgeführt, welche sich vorrangig dem Einfluss der Klebstofffugendicke, der Temperatur- und Langzeitbeanspruchung auf das Festigkeits- und Steifigkeitsverhalten geklebter Holz-Stahlblech-Verbindungen widmen. Zur Auslegung der Versuche und zur Interpretation der Ergebnisse wurden analytische und numerische Berechnungen durchgeführt, wobei in [1] nur Auszüge der Ergebnisse der theoretischen Betrachtungen enthalten sind (siehe Abbildung 5.8).

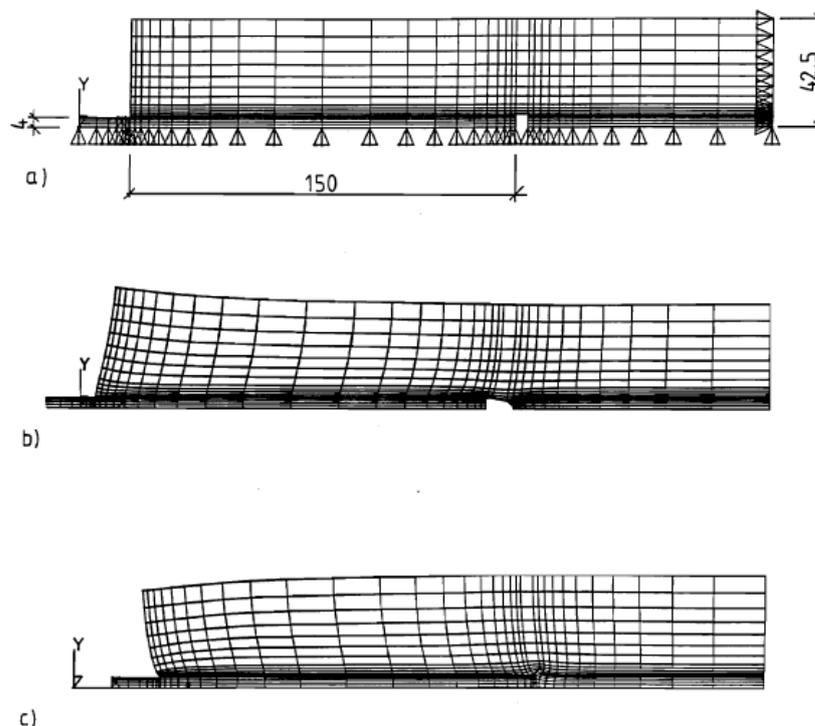


Abbildung 5.8: Finite Element Modell einer Holz-Stahl-Klebeverbindung: a) unverformt, b) verformt bei Zugbeanspruchung und c) verformt bei Druckbeanspruchung [1]

Der Schwerpunkt in [1] lag in der Analyse der Überlagerung der oben angeführten Einflussparameter und der Identifikation geeigneter, praxistauglicher Klebstoffsysteme bzw. -mischungen auf Epoxidharz-, Polyurethan- und Phenolresorcinharzbasis.

Die experimentellen Untersuchungen umfassten eine Vorversuchs- (Kurzzeitversuche bei 20°C) und eine Hauptversuchsreihe (Kurz- und Langzeitversuche bei unterschiedlichen Temperaturbeanspruchungen).

In der Vorversuchsreihe kam eine Vielzahl unterschiedlicher Klebstoffe zum Einsatz (fünf auf Epoxidharz-, vier auf Polyurethan- und einer auf Phenol-Resorcinharzbasis). Auf Basis der Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen, wurden daraus vier Klebstoffe ausgewählt, welche für die Hauptversuchsreihe verwendet wurden.

Die Vorversuchsreihe umfasste insgesamt 114 Druckscherversuche, in denen das Tragverhalten einer Vielzahl unterschiedlicher Klebstoffe unter gleichzeitiger Variation der Klebstofffugendicke (0,5 mm,

1 mm und 2 mm) bei konstanter Einklebelänge ($l_{\text{kleb}} = 100 \text{ mm}$), Stahlblechbreite ($b_{\text{kleb}} = 150 \text{ mm}$) und Temperatur analysiert wurde.

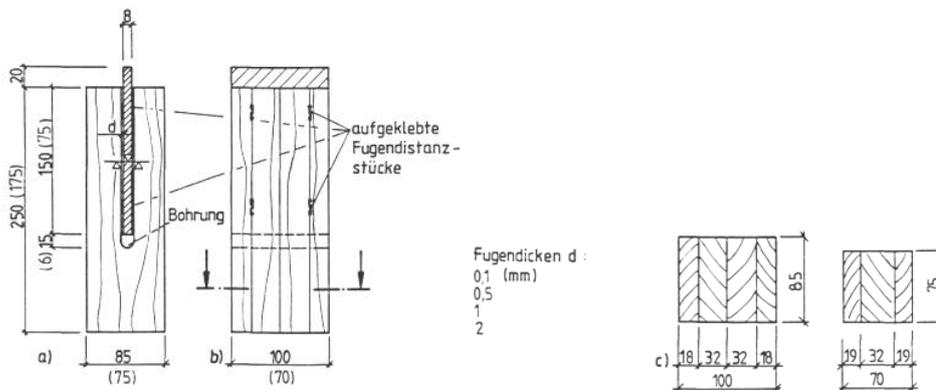


Abbildung 5.9: Druckscherprüfkörper für die Vorversuchsreihe I und Hauptversuchsreihe II [1]

Die Lastverschiebungskurven zeigen das Tragverhalten der Verbindungen bei Verwendung unterschiedlicher Klebstoffe. Bei den üblichen Epoxidharzklebstoffen zeigt sich ein nahezu linear-elastisches Verhalten, gefolgt von einem Sprödbbruch (EP1, EP3 und EP4). Ähnlich verhält sich auch der zweikomponentige Polyurethanklebstoff PU2. Die einkomponentigen Polyurethanklebstoffen sowie die flexibilisierten Epoxidharze verhalten sich gemäß den Kurven PU1, PU4 und EP2b. Ein ausgeprägt elastisches Verhalten verbunden mit großen Relativverschiebungen sowie ein plastisches Verhalten im Entfestigungsbereich zeigte die Polyurethan-Kleb-Dichtmasse (PU3).

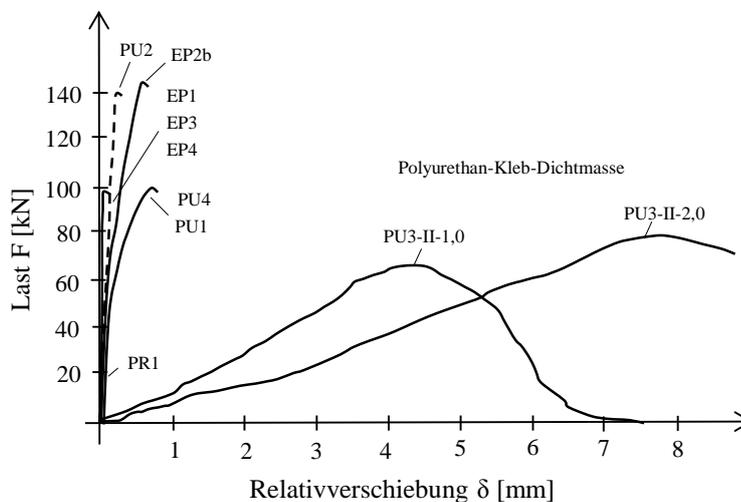


Abbildung 5.10: typische Last-Relativverschiebungskurven für die Klebstofffugendicke von 0,5 mm (ausgenommen PU3) (bearbeitet) [1]

Die höchste Druckscherfestigkeit zeigte der flexibilisierte Epoxidharzklebstoff EP2 bei 2 mm Klebstofffugendicke, und zwar lag diese bei $6,2 \text{ N/mm}^2$. Darauf folgt der zweikomponentige Polyurethanklebstoff PU2 bei 0,5 mm Klebstofffugendicke mit $4,6 \text{ N/mm}^2$ und danach der einkomponentige Polyurethanklebstoff PU4 mit $3,8 \text{ N/mm}^2$ bei 0,5 mm Klebstofffugendicke. Die Druckscherfestigkeiten anderer Epoxidharze schwankten im Bereich zwischen $2,5 \text{ N/mm}^2$ und $3,8 \text{ N/mm}^2$.

Die Prüfkörper mit dem Phenol-Resorcinarzklebstoff zeigten die geringsten Werte verbunden mit den größten Streuungen, wobei auch die Oberfläche des Stahlbleches während der Lagerung, also ohne mechanische Beanspruchung, durch den Klebstoff angegriffen wurde.

Der Einfluss der Klebstofffugendicke auf das Tragverhalten konnte nicht eindeutig geklärt werden, führte diese doch einmal zu einer Erhöhung (PU3, EP2b) und einmal zu einer Reduktion (PU1, PU2, PU4, EP1, EP3, EP4, PRF) der Scherfestigkeit.

Nach den Erkenntnissen aus der Vorversuchsreihe I wurden für die Hauptversuchsreihe II der zweikomponentige PU2, der einkomponentige PU4, der übliche EP1 und der flexibilisierte EP2b weiter verwendet. Außer den schon genannten Klebstofffugendicken wurden auch 0,1 mm dicke Fugen hergestellt. Diesmal wurden Prüfkörper auch auf Zug beansprucht. Die Einklebelänge betrug 75 mm bei den Temperaturversuchen und 50 mm bei den Langzeitversuchen. Die Breite betrug 70 mm.

Die Prüfkörper, die der Temperaturbelastung unterzogen wurden, wurden zuvor einer Wechsellagerung ausgesetzt. Sie wurden siebenmal aufgewärmt bzw. abgekühlt. Die Prüfkörper wurden im Anschluss an die Wechsellagerung bei 40° C und 70° C geprüft und mit den Referenzwerten bei 20° C verglichen.

Auszüge der Prüfergebnisse aus [1] bei Variation der Klebstofffugendicke, Klebstoff- und Belastungsarten sowie der Temperatur sind in folgenden Abbildungen grafisch dargestellt. Dabei ist zu betonen, dass der niedrige Wert bei EP1 (20 C, 2 mm Klebstofffugendicke unter Zugbelastung), welcher durch die Schrägstellung der Bleche verursacht wurde, bei einer Betrachtung und Bewertung der Ergebnisse zu vernachlässigen ist. Wie aus Abbildung 5.11 ersichtlich sind beim Klebstofftyp EP1 nur geringe Unterschiede bei einem Vergleich der Druck- und Zugscherfestigkeiten in Abhängigkeit der Prüftemperatur zu beobachten.

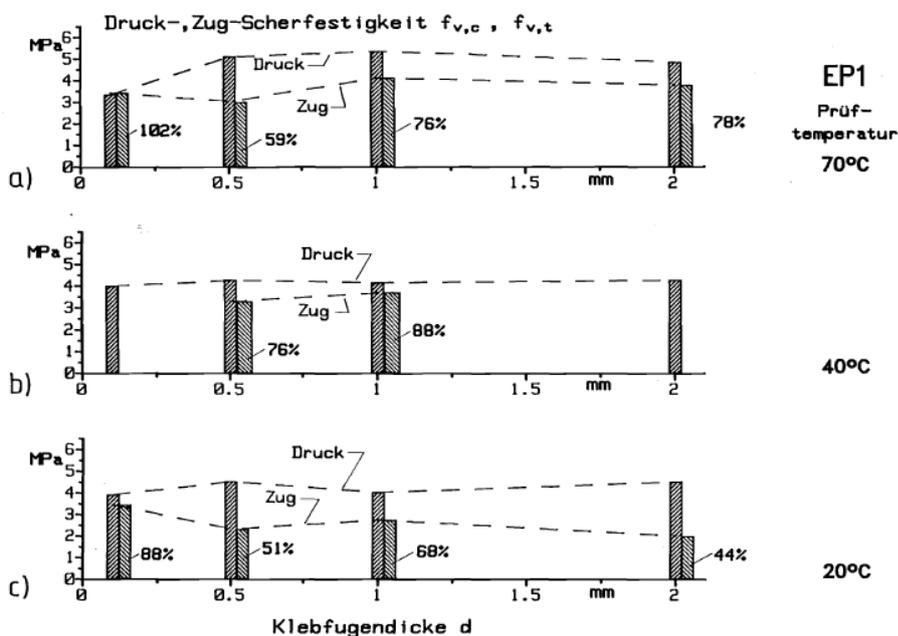
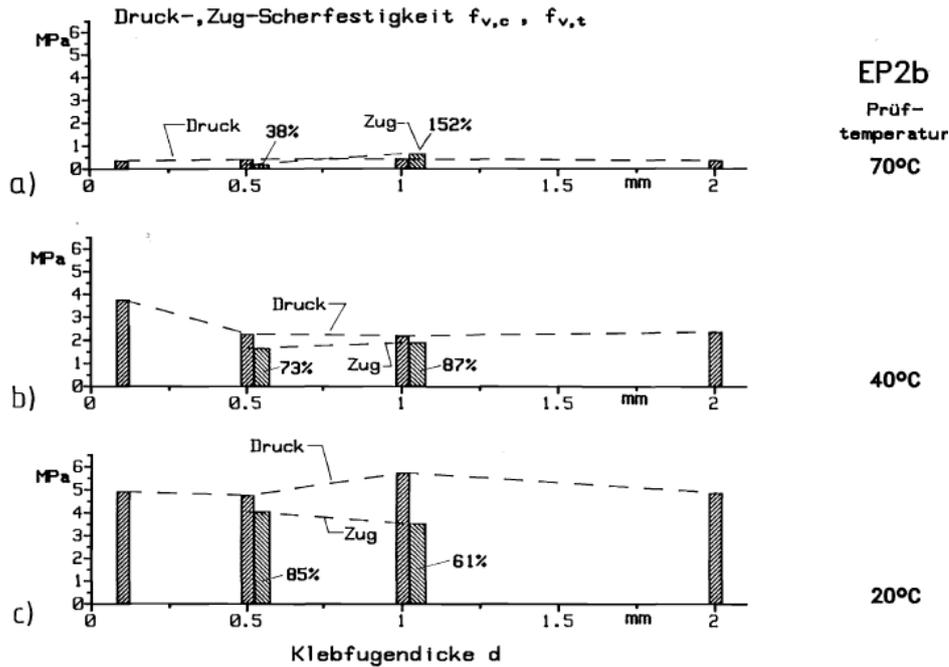
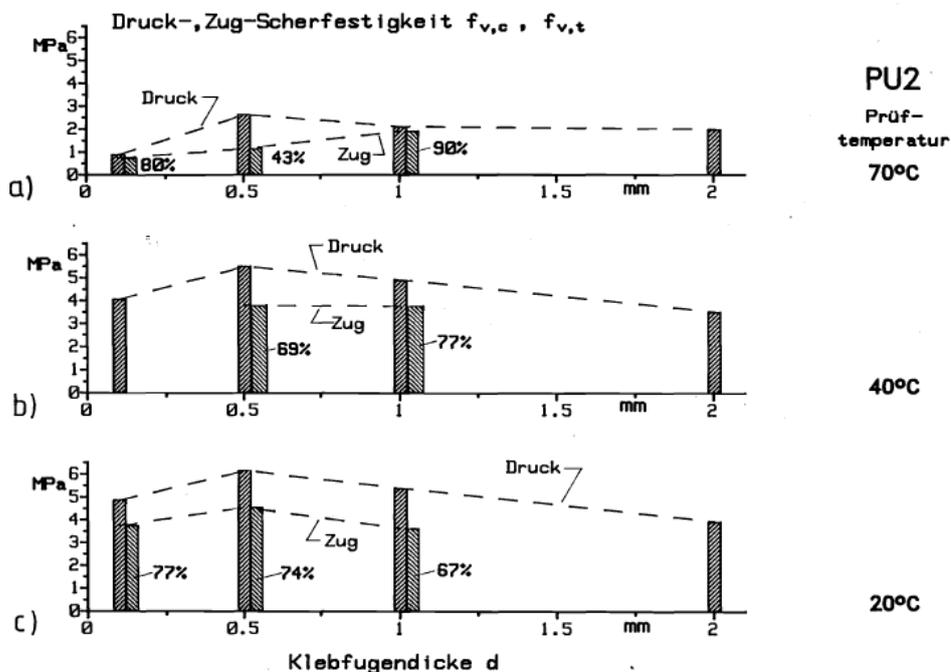


Abbildung 5.11: Ergebnisse der Hauptversuche mit EP1: a) Prüftemperatur 70° C, b) Prüftemperatur 40° C, c) Prüftemperatur 20° C [1]

Im Gegensatz zum EP1 ist beim EP2b eine ausgeprägte Reduktion der Festigkeiten mit steigender Temperatur ersichtlich (Abbildung 5.12). Die Ursache der abfallenden Scherfestigkeit mit ansteigendem Prüftemperaturniveau liegt am Anteil der im Klebstoff enthaltenen Silikonkautschukpartikel, welche zu einer Verringerung der Glasübergangstemperatur führten.



Der zweikomponentige Polyurethanklebstoff PU2 zeigt eine Reduktion der Festigkeiten bei Erhöhung der Temperatur (Abbildung 5.13). Der Einfluss der Temperatur ist beim einkomponentigen Polyurethanklebstoff PU4 gering (Abbildung 5.14). Auffallend ist, dass für PU4 eine Zunahme der Klebfugendicke zu einer deutlichen Abnahme erreichbarer Scherfestigkeiten führt.



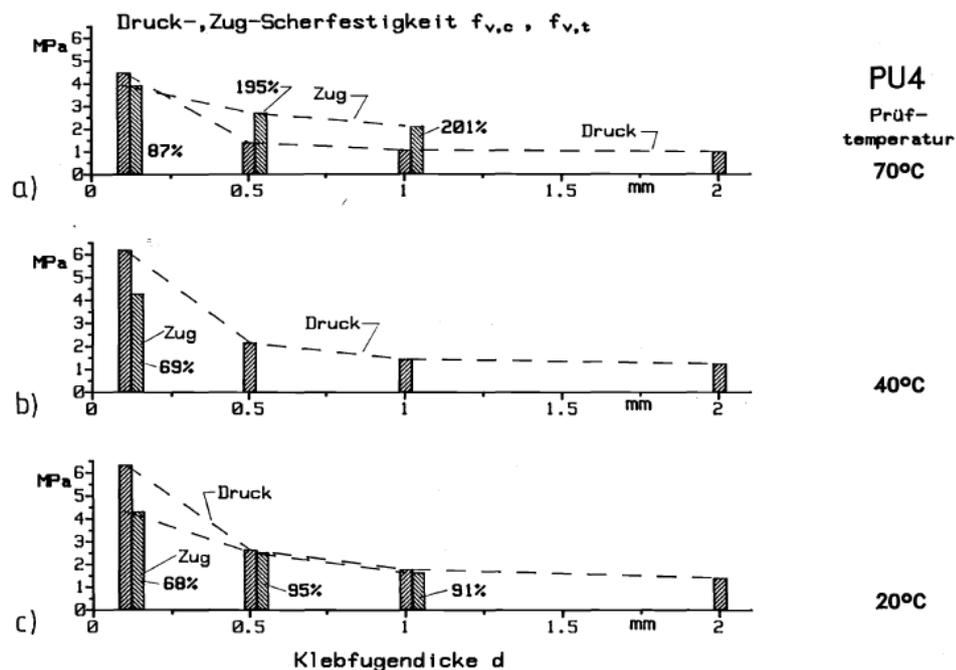


Abbildung 5.14: Ergebnisse der Hauptversuche und PU4: a) Prüftemperatur 70° C, b) Prüftemperatur 40° C, c) Prüftemperatur 20° C [1]

Anschließend wurden auch Dauerstand-Zugscherversuche unter Variation von vier Klebstoffen und zwei Klebstofffugendicken (0,5 mm und 1 mm) durchgeführt. Die Temperatur betrug 20° C und die relative Luftfeuchte schwankte im Bereich zwischen 40 % und 70 %. Das während der Dauerstandversuche aufgebrauchte Lastniveau wurde zwischen 11 % und 40 % der Kurzzeitfestigkeiten angesetzt.

Zum Zeitpunkt der Entstehung des MPA-Berichtes waren nicht alle Prüfungen abgeschlossen. Die zweikomponentigen Klebstoffe, EP1 und PU2, zeigten sehr geringe Verformungszunahmen; der Einfluss der Klebstofffugendicke auf das Kriehverhalten konnte zum Betrachtungszeitpunkt nicht erkannt werden. Die Prüfkörper mit den anderen beiden Klebstoffen zeigten Zeitstandbrüche nach 50 bis 60 Tagen.

Schlussfolgerungen aus diesen Untersuchungen nach [1]:

- Ausscheidung des PU2-Klebstoffes wegen seiner zu großen Nachgiebigkeit
- beim EP2 sinken die Festigkeiten sehr rasch mit der Erhöhung der Temperatur
- im Vergleich der zweikomponentigen Klebstoffe zeigt der PU2-Klebstoff bei der Temperatur zwischen 20° C und 40° C um 20 % höhere Festigkeiten (aufgrund des duktileren Verhaltens im oberen Bereich und der besseren Adhäsionseigenschaften), jedoch zeigt der EP1-Klebstoff höhere Festigkeiten bei 70° C.

5-4 MPA WIESBADEN DER HOCHSCHULE RHEINMAIN, 2009 – 2014

[4] [8] [9] [10] [13] [12] [14] [16] [17]

Die MPA Wiesbaden beschäftigt sich seit 1996 mit flächig eingeklebten Streckmetallen und seit 2007 mit eingeklebten Lochblechen [14]. Die in [9] und [12] angeführten Untersuchungen zum Tragverhalten eingeklebter Lochbleche bieten einen Überblick über eine Auswahl durchgeführter Versuche an der MPA Wiesbaden und werden in den folgenden Ausführungen kurz zusammengefasst. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die dargestellten Ergebnisse in [9] und [12] einen Auszug der experimentellen Untersuchungen darstellen und sich nur in geringem Maße zur Analyse eignen. Forschungsberichte, welche eine nähere Betrachtung erlauben würden, sind derzeit nicht zugänglich.

Bathon et al. berichtet in [9] über Untersuchungen an eingeklebten Lochblechen zur Temperaturbeständigkeit, Scherfestigkeit, Ermüdungsfestigkeit und über Bauteilversuche an Rahmenecken und Biegeträgern (siehe Abbildung 5.15). Als Ausgangsmaterial wurden bis zu 2,5 mm dicke Lochbleche mit Lochdurchmessern von 3 mm bis 12 mm verwendet. Zur Herstellung der Probekörper diente Fichtenholz in Form von Brettschichtholz und Brettsperrholz.



Abbildung 5.15: Zugversuche unter Temperaturbeanspruchung (links), Druckscherversuche (Mitte), Rahmeneckenversuche (rechts) [9]

Die Versuche unter Temperaturbelastung wurden wie folgt durchgeführt: zuerst wurde der Prüfkörper unter Normklima auf Zug belastet. Danach wurde um den Prüfkörper ein Klimaschrank aufgebaut, welcher eine graduelle Erhöhung der Temperatur erlaubte. Parallel dazu wurden die Lufttemperatur, die Klebefugentemperatur und die Verformungszunahmen gemessen. Als Endergebnis lag das Temperatur-Verformungs-Diagramm der Verbindung vor. Bei einer Haltephase auf einem Temperaturniveau von 60°C wurden bei dem in [9] und [12] angeführten Zugversuch keine signifikanten Verformungszunahmen festgestellt. Damit wurde für diesen Versuch die Anforderung für die Temperaturbeständigkeit der Holz-Stahl-Klebeverbindung nach DIN 1052:2008 erfüllt.

Aufgrund der Tatsache, dass in [9] und [12] nur ein Einzelergebnis gezeigt wird, und keine Informationen über das verwendete Klebstoffsystem und anderer Prüfungsergebnisse vorliegen, ist eine kritische Betrachtung der Aussage, dass „die Funktionsweise der Holz-Stahl-Klebeverbindung mit in Holz eingeklebten Lochblechen bei der gewählten Versuchskonstellation (Klebstoffsystem C) bei Klebefugentemperaturen von 60° C sichergestellt ist [9] und [12]“ nur schwer möglich.

Weiters werden in [9] und [12] Ergebnisse zu Druckscherversuchen dargelegt. Die Druckscherkörper bestanden aus zwei Fichtenholzteilen ($l/b/h = 118/16/16$ cm), die über zwei eingeklebte Lochbleche ($l/b/d = 100/6,5/0,25$ cm) verbunden wurden. Hierin ist zu beachten, dass die zwei Lochbleche gegenüberliegend und längs (entlang der Scherfuge) auf ein 10 mm dickes Stahlblech aufgeschweißt wurden. Das Versagen trat durch Erreichen der Stahlzugfestigkeit des Lochbleches ein und erwies sich, aufgrund des plastischen Verformungsvermögens (Fließen entlang der Lochreihe) als äußerst duktil. Aus den Arbeitslinien der Prüfungen in Abbildung 5.16 ist ein linearer Anstieg der Kraft bei zunehmender Relativverformung bis zu einer Last von rund 140 kN ersichtlich. Darauf folgt ein ausgeprägter plastischer Bereich (Fließen des Lochbleches) bis zum Erreichen einer mittleren Bruchlast von rund 305 kN. Die maximale Verschiebung betrug 7,76 mm und das errechnete mittlere Verschiebungsmodul aus lokaler Verschiebungsmessung lag bei rund 1370 kN/mm.

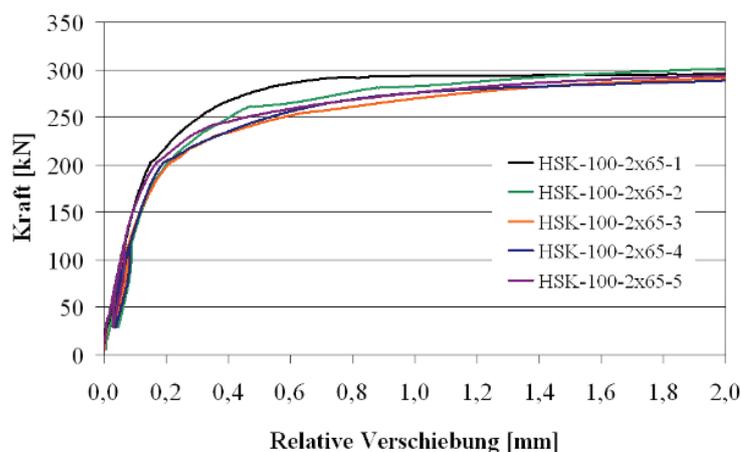


Abbildung 5.16: Ergebnisse der Druckscherversuche [9]

Auf Basis der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Druckscherversuchen wurden 15 Bauteilversuche an Rahmenecken durchgeführt. Verglichen wurden keilgezinkte Rahmenecken und Rahmenecken mit eingeklebten Lochblechen (Abbildung 5.17). Die keilgezinkten Rahmenecken versagten durch ein sprödes Holzversagen an der Zugseite, da durch das Plastifizieren der Druckseite der innere Hebelarm kleiner wird und die Zugkraft zunimmt. Im Vergleich zu den keilverzinkten zeigten die Rahmenecken mit eingeklebten Lochblechen eine um 15 % bis 30 % höhere Tragfähigkeit.

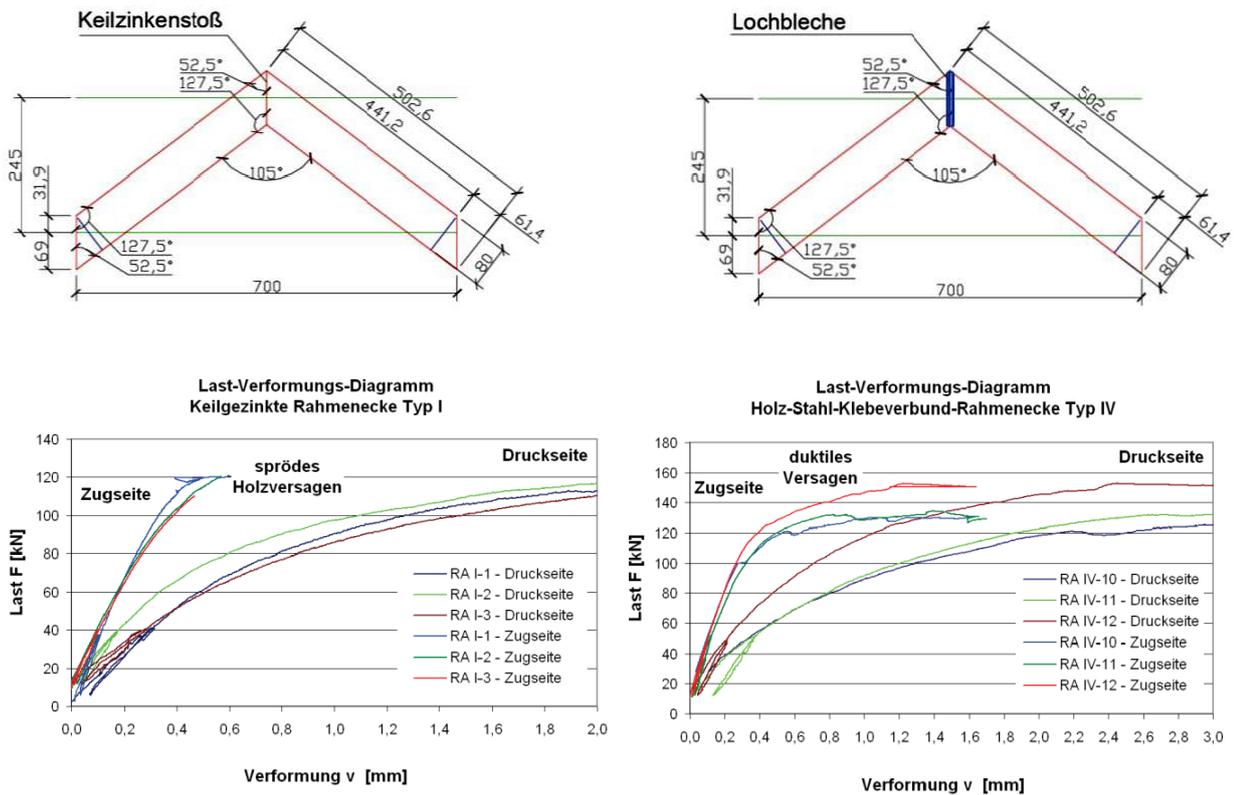


Abbildung 5.17: Rahmenecken ausgebildet mit einen Keilzinkenstoß (links oben und unten) und mit eingeklebten Lochblechen (rechts oben und unten) [9]

Zusätzlich dazu wurden Großversuche im Maßstab 1:1 für den „TimberTower“ in Hannover geprüft [10]. Dabei handelte es sich um Brettsperrholz aus Fichte und Lochbleche aus Stahl S 235 mit 2,5 mm Dicke. Es wurden Zugversuche an einer hydraulischen Prüfmaschine sowie Ermüdungsversuche an einer Hydropulsmaschine durchgeführt. Die Abbildung 5.18 zeigt den Prüfkörper und die Abbildung 5.19 die Ergebnisse eines Kurzzeitversuches. Daraus ist ein linearer Anstieg folgend mit einem sehr duktilen Verhalten, das mit einem Stahlbruch endet, ersichtlich.

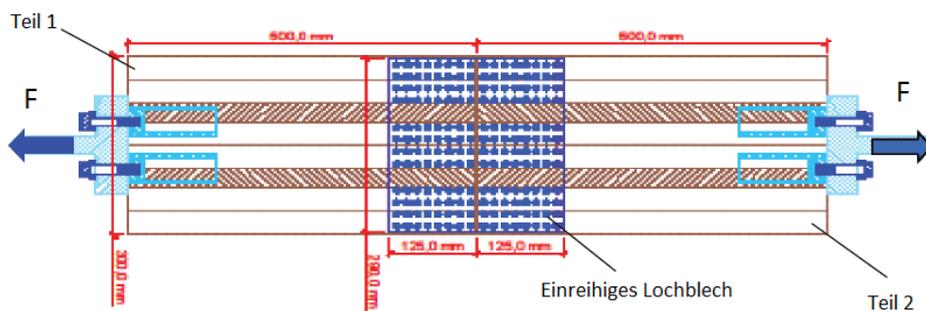


Abbildung 5.18: Prüfkörper für den Timber Tower [10]

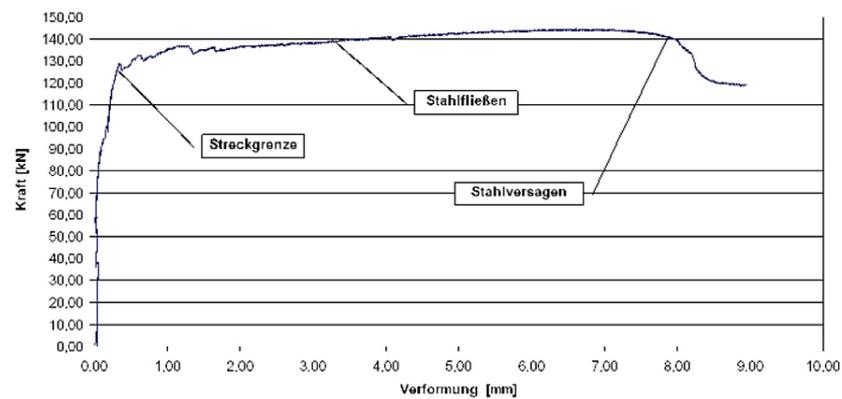


Abbildung 5.19: Ergebnis eines Kurzzeitversuches[10]

Von 2010 bis 2013 wurde an der Hochschule RheinMain vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ein Forschungsprojekt gefördert, welches sich mit Fachwerkträgern, deren Knotenpunkte mithilfe von Holz-Stahl-Klebeverbindungen ausgebildet sind, befasst [16] [17].

Das Untersuchungsprogramm enthält praktische und theoretische Fragestellungen. Im Rahmen der praktischen Untersuchungen wurden Delamierungsprüfungen und Traglastversuche unter statischen, zyklischen und klimatischen Randbedingungen durchgeführt. Insgesamt wurden 650 Prüfkörper aus Fichtenholz hergestellt. Zuletzt wurden 14 Großversuche unter Kurzzeitbeanspruchung und zwei unter Dauerbelastung durchgeführt. Als Klebstoffe kamen zweikomponentige Klebstoffe aus Epoxidharz- und Polyurethanbasis zur Anwendung. Im Rahmen der Kurzzeitversuche wurden ca. 70 unterschiedliche Variationen geprüft, wobei als Parameter die Materialart des Lochbleches, der Lochdurchmesser, die Lochanordnung, die Lochblechdicke, die Oberflächenbehandlung und anderes variiert wurden.

Für die Großversuche wurden Fachwerke in realen Dimensionen gebaut: einerseits mit vertikalen Druckstäben und Zugdiagonalen und andererseits mit Zug- und Druckdiagonalen. Die Fachwerkknoten wurden mit eingeklebten Lochblechen ausgebildet, wobei jeder Knoten einen Injektionsplan hatte. Als Klebstoffe dienten ein zweikomponentiges Epoxidharzsystem (WEVO Spezialharz EP 32 S mit WEVO Härter B 22 TS) und ein zweikomponentiger Polyurethanklebstoff (PURBOND CR 429). Die Lochbleche wurden aus Stahl der Güte S 355 mit Lochdurchmessern von 10 mm ausgebildet und in Fichten-Brettschichtholz GL24 eingeklebt.

Die Fachwerke wurden in einem 4-Punkt-Biegeversuch getestet. Während der Prüfung wurden mit induktiven Wegaufnehmern die Durchbiegung, die Lagersenkungen sowie die Relativverschiebungen an bestimmten Stellen gemessen. Die maximale Bruchlast lag bei 279,2 kN. Alle Prüfkörper wiesen ein duktileres Verhalten auf, das durch ein Stahlfließen gekennzeichnet war. Zu erwähnen wäre, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den zwei Klebstoffarten wahrgenommen wurden. Zuletzt wurden unter den praktischen Untersuchungen Dauerstandversuche durchgeführt. Zwei Fachwerke wurden mit einer Dachscheibe zum Wetterschutz und zur Aussteifung verbunden und mit 100 kN belastet. Die Messung der Durchbiegung in der Feldmitte, der Bauteil- und Luftfeuchtigkeit, der Lufttemperatur und eine optische Kontrolle der Knotenpunkte waren Bestandteile des Versuches. Die endgültigen Ergebnisse waren zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Artikels noch nicht bekannt.

5-5 VALEE ET AL., 2011

[84]

Motivation und Ziel dieses Artikels ist es, Architekten die Möglichkeit zu geben, ihre Vision mit neuen, geeigneteren Verbindungen zu realisieren und sich nicht aufgrund der bestehenden, traditionellen Verbindungstechnik im Entwurf einschränken zu müssen. Eine Lösung wären Holz-Stahl-Klebeverbindungen. Im Artikel sind numerische, sowie experimentelle Untersuchungen beschrieben und schließlich verglichen. Zuerst wurden Prüfungen an Kleinprobekörpern (Abbildung 5.20-links) durchgeführt, um die Materialkennwerte des Ausgangsmaterials, des Holzes, für die spätere FEM-Berechnung zu bestimmen sowie um den Spannungszustand in der Klebefuge beschreiben zu können.

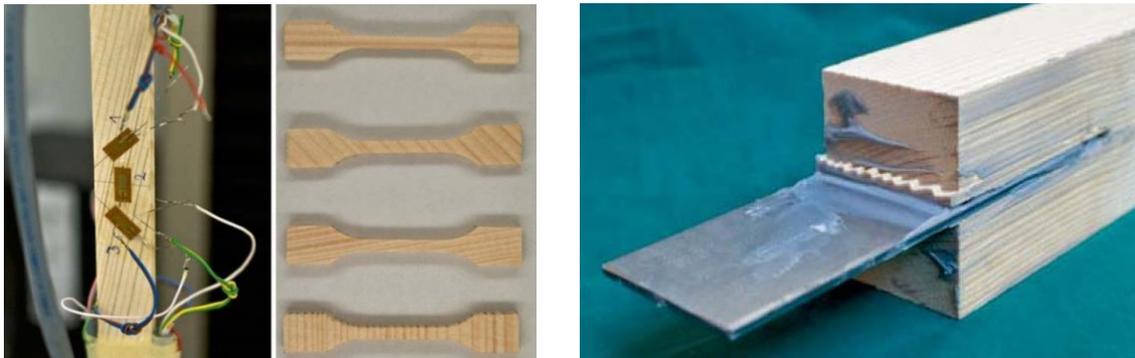


Abbildung 5.20: Kleinprobekörperprüfungen (links) und Prüfkörper mit eingeklebtem Stahlblech (rechts) [84]

Als Ausgangsmaterial für die Klebeverbindung wurden Holzprobekörper aus Fichte mit dem Querschnitt von 75 mm x 75 mm und 12 % Feuchtigkeit, Klebstoff auf Epoxidharzbasis (Sikadur 330) mit der Klebefugendicke von 1 mm und Baustahl S 235 verwendet (Abbildung 5.20 – rechts). Die Blechdicke betrug 5 mm. Die Einklebelänge variierte von 40 mm bis 160 mm mit einer Schrittweite von 40 mm.

Im Gegensatz dazu wurde die mechanische Verbindung mit Stabdübel 4.8 ausgeführt, um einen Vergleich zwischen einer duktilen und quasi starren Verbindung ziehen zu können. Es wurden jeweils fünf Prüfreiheiten gefertigt. Die Prüfungen erfolgten unter Normalbedingungen auf einer weggesteuerten Prüfmaschine mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min. Die eingeklebten Stahlbleche zeigten ein linear-elastisches Verhalten und sprödes Versagen, wobei die Stabdübelverbindung größere Verschiebungen und ein duktileres Versagen aufwies (Abbildung 5.21 – links).

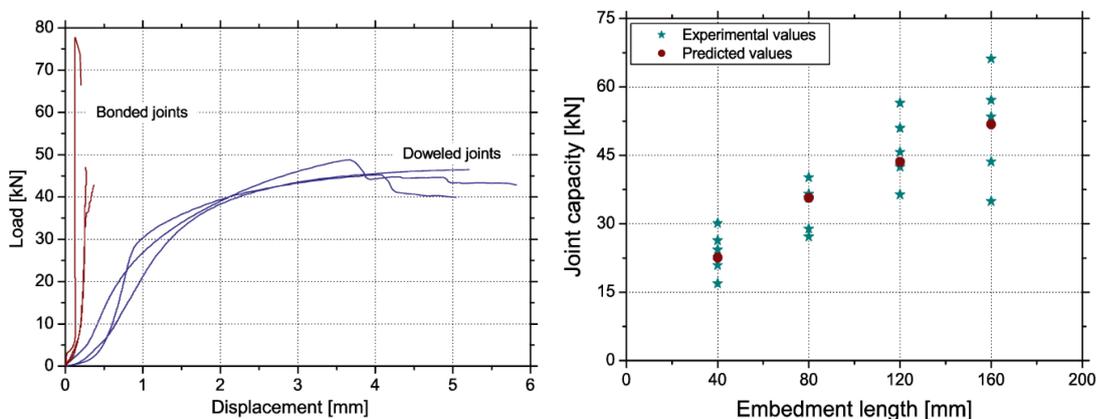


Abbildung 5.21: Vergleich der Arbeitslinien von mechanischen Verbindungen und Klebeverbindungen (links) und Einfluss der Einklebelänge auf die Tragfähigkeit (rechts) [84]

Die resultierende Maximalkraft stieg mit zunehmender Einklebelänge und es konnte eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten festgestellt werden (Abbildung 5.21 – rechts).

Danach wurden mit den zwei unterschiedlichen Verbindungsarten (Stabdübel, eingeklebtes Blech) Fachwerke mit einer Spannweite von 4,2 m und einer Höhe von 1,296 m gebaut. Geprüft wurden diese in einem 3-Punkt-Biege-Versuch mit einer Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/min.

Beide Bauteile wiesen ein sprödes Tragverhalten auf. Im Allgemeinen zeigte die mechanische Verbindung ein weicheres Verhalten, gekennzeichnet durch größere Verformungen bei gleicher Last. Die Klebeverbindung zeigte eine dreimal größere Steifigkeit bei einer 30-mal kleineren relativen Verschiebung als die mechanische. Gegenüber den gedübelten zeigten die geklebten Verbindungen eine rund 40 % höhere Festigkeit auf.

Anschließend wurde das Fachwerk mit dem FE-Programm ANSYS modelliert. Um den Aufwand zu reduzieren, wurden mehrere Vereinfachungen verwendet. Zuletzt wurde ein probabilistisches Bemessungsverfahren benutzt, welches eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen ergab.

5-6 ETH ZÜRICH + BERNER FACHHOCHSCHULE, CH, 2014

[91]

Um komplexe, räumliche Holztragstrukturen mithilfe von Industrierobotern und einfachen Elementen in kurzer Zeit und mit möglichst geringem Aufwand herstellen zu können, müssen die Verbindungen dazu geeignet sein. Die ETH Zürich forscht seit 2012 in Kooperation mit der Berner Fachhochschule, um geeignete Verbindungen für einen automatisierten Zusammenbau zu entwickeln. Um nicht vom Modell abzuweichen, müssen die Verformungen der Verbindung besonders klein sein. Dies erreicht man mit Verbindungen, die eine sehr hohe Steifigkeit aufweisen. Deswegen entschied man sich für Klebeverbindungen, wobei unter anderem auch eingeklebte Lochbleche in Betracht gezogen wurden.

Geprüft wurden 3 mm dicke Lochbleche mit einem Lochdurchmesser von 10 mm. Die Einklebelänge betrug 56 mm und die Holzfeuchte des Fichtenholzes lag im Bereich zwischen 12 % und 14 %. Die Prüfung wurde weggesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Die mittlere Bruchlast liegt bei 23,84 kN. Bezogen auf die Scherfläche betrug die mittlere Scherfestigkeit $3,0 \text{ N/mm}^2$, wobei bezogen auf die Scherfläche der Lochungen die mittlere Scherspannung $7,6 \text{ N/mm}^2$ betrug. Das Versagen der Verbindung erfolgte durch Erreichen der Stahlzugtragfähigkeit des Lochbleches im Bereich der vorderen Lochreihen. Die Anfangssteifigkeit lag bei rund 133 kN/mm.



Abbildung 5.22: Prüfkörper mit eingeklebten Lochblechen [91]

5-7 TU GRAZ, 2015

[52]

Am Institut für Holzbau und Holztechnologie an der TU Graz wurden im Rahmen einer Masterarbeit faserparallel eingeklebte Stahlbleche geprüft. Insgesamt wurden drei Zugversuche mit eingeklebten kreuzförmigen Stahlblechen durchgeführt. Die 5 mm dicken an einer Stirnplatte aufgeschweißten Stahlbleche aus Stahl S 355 wurden in Brettschichtholz aus Birke (100 mm x 100 mm x 1300 mm) mit Purbond CR 421 eingeklebt (Abbildung 5.23).

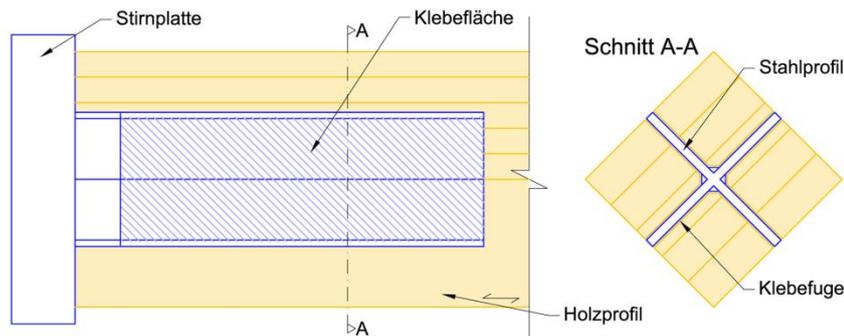


Abbildung 5.23: schematische Darstellung des Prüfkörpers mit eingeklebtem Kreuzblech [52]

Die ermittelte mittlere Scherfestigkeit der Klebefuge betrug $3,38 \text{ N/mm}^2$, was weniger als die Hälfte der angenommenen 7 N/mm^2 war. Die mittlere Bruchlast lag bei 251 kN. Der durch lokale Messung ermittelte Verschiebungsmodul betrug rund 1300 kN/mm . Der überwiegende Grund des Versagens war die unzureichende Haftung des Klebstoffes an der Stahloberfläche (Abbildung 5.24).



Abbildung 5.24: Versagen des Prüfkörpers durch unzureichende Haftung zwischen Klebstoff und Stahl [52]

KAPITEL 6: MECHANIK DER KLEBEVERBINDUNG

6-1 ALLGEMEIN

Um mit mechanischen Verbindungsmitteln konkurrieren zu können, müssen für die Holz-Stahl-Klebeverbindungen definierte, zuverlässige Bemessungsvorgaben vorliegen. Gründe, die eine verbreitete Anwendung dieser Verbindungstechnik erschweren, stellen neben der Palette an unterschiedlichen Einflussparameter, auch die Eigenschaften des Holzes wie Anisotropie, große Streuung und sprödes Verhalten bei vielen Beanspruchungen dar. Charakteristisch für die Spannungsverteilung in Holz-Stahl-Klebeverbindungen ist das Auftreten von Spannungsspitzen – insbesondere an den Enden – die eine Nachweisführung bzw. Modellierung mit den üblichen Methoden der technischen Biegelehre verhindern.

Seit den ersten Ansätzen zur Bemessung von Riberholt [64] bis heute werden unterschiedliche Modelle zur Berechnung der Ausziehtragfähigkeit von eingeklebten Gewindestangen in der Literatur angegeben. Zusammenfassend sind die wichtigsten Ansätze [72] zu entnehmen. Grundsätzlich hängen die Modelle von den gleichen Parametern ab, wie z. B. dem Durchmesser oder der Einklebelänge. Anzumerken ist, dass die verschiedenen Modelle zu, zum Teil stark unterschiedlichen, Tragfähigkeiten führen. Da die Mechanik von Holz-Stahl-Klebeverbindungen relativ komplex ist, konnte sich jetzt noch kein Modell als allgemein anerkannt durchsetzen.

Der Spannungsverlauf in geklebten Verbindungen kann analytisch oder numerisch gelöst werden. In Rahmen einer Masterarbeit an der TU Graz [62] wurde die Theorie der mechanischen Verklebung eingehend dargestellt. Dabei wurden die Grundlagen für analytischen Lösungen der Differenzialgleichungen des verschieblichen Verbundes bzw. der Scherspannungsverlauf nach der sog. Volkersen-Theorie (elastischer Ansatz) für spezielle Randbedingungen und Scherspannungsansätze angeführt und Lösungen dargestellt. Weiteres sind Rechenmodelle für (teil-) plastisches Verhalten der Verbindungen sowie bruchmechanische Ansätze beschrieben und es wurde auf die Problematik numerischer Berechnungen eingegangen.

In der genannten Arbeit wird grundsätzlich von der Theorie des elastischen Verbundes nach Volkersen [87] ausgegangen, die seit ihrer erstmaligen Publikation im Jahr 1938 kontinuierlich weiter detailliert wurde, um zu präziseren Vorhersagen zu gelangen.

6-2 ANALYTISCHE ERMITTLUNG DES SPANNUNGSZUSTANDES

Die Betrachtung der einschnittigen Verklebung in der Publikation von Volkersen 1938 [87] wurde 1944 von de Bruyne [24] auf eine zweischnittige Verbindung erweitert.

Im Gegensatz zu dem klassischen Model von Volkersen/de Bruyne für ein- bzw. zweischnittige Klebeverbindungen, bei dem sich die Fügeiteile nur in Längsrichtung deformieren, berücksichtigt die Theorie von Tsai et al. [82] (im Weiterem TOM-Theorie) auch die Schubverformung der Fügeiteile (Abbildung 6.1). Die Schubverformungen der Fügeiteile blieben auf Grund der auftretenden Schwierigkeiten in der mathematischen Beschreibung in den Anpassungen des Ansatzes von Volkersen oftmals unberücksichtigt, wohingegen die Scherverformung einen festen Teil dieses Ansatzes bildet. Beide angeführten Theorien gehen von einem elastischen Materialverhalten aus, d. h. das Hooke'sche Gesetz besitzt Gültigkeit.

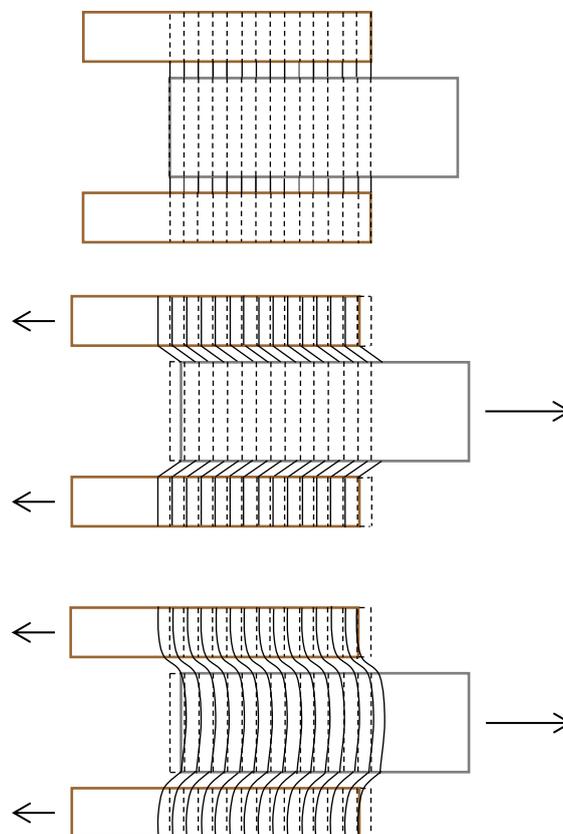


Abbildung 6.1: zweischnittige Klebeverbindung: unbelastet (oben), belastet und ohne Scherverformungen der Fügeiteile nach Volkersen 1938/de Bruyne 1944 (Mitte) sowie belastet und mit Scherverformungen der Fügeiteile nach Tsai et al 1997 [82]

In der Abbildung 6.2 sind die geometrischen Parameter sowie die Materialparameter der zweischnittigen Klebeverbindung dargestellt. Dabei sind E_o und E_i die Elastizitätsmoduln der äußeren bzw. der inneren Fügeiteile und dementsprechend sind G_o und G_i deren Schubmoduln. Die Dicken der Fügepartner werden mit t_o und t_i bezeichnet. Die Parameter der Klebefuge gehen mit dem Schubmodul G_c und der Dicke η in die Berechnung ein.

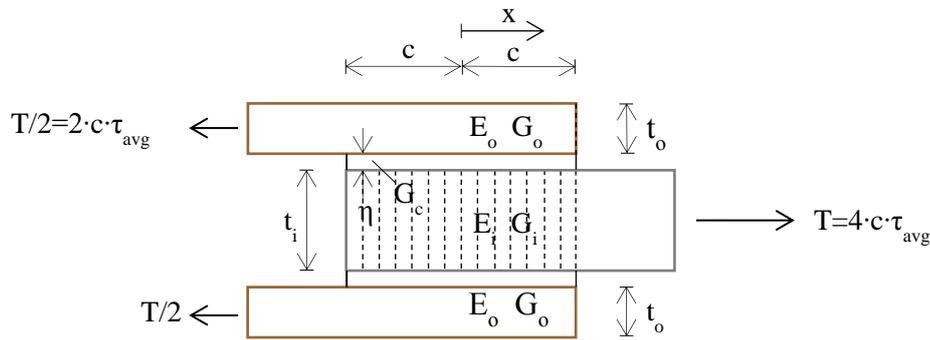


Abbildung 6.2: geometrische und Materialparameter einer zweischnittigen Klebeverbindung [82]

Für ein differenzielles Element dx und der Annahme einer konstanten Schubverformung über die Bauteilhöhe, die äußeren Oberflächen und die Symmetrieachse des Mittelholzes sind bei symmetrischer Anordnung dabei schubspannungsfrei (Abbildung 6.3) sowie der Einführung von zwei Koordinatensystemen (y' und y'') für die beteiligten Fügepartner kann die Gleichung für die Schubspannung in der Fuge formuliert werden. Weiters sind die Werkstoffgesetze und die kinematischen Beziehungen in den Gleichgewichtsbedingungen einbezogen [82].

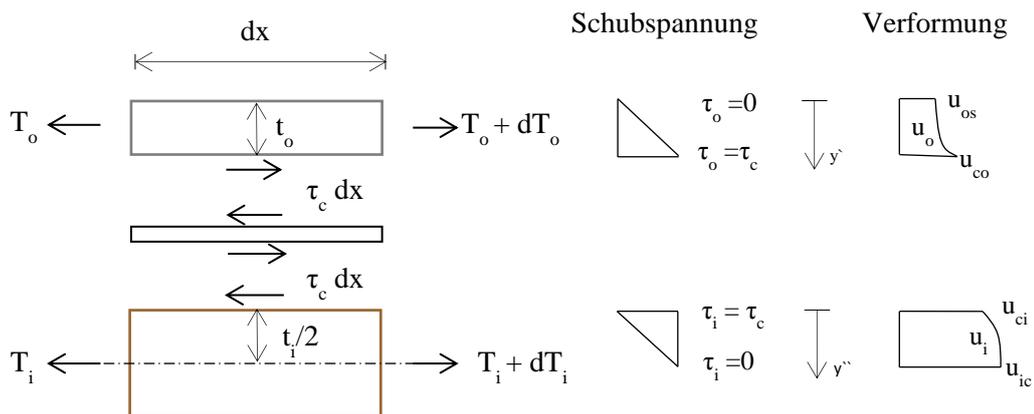


Abbildung 6.3: Verteilung der Schubspannung und der Verschiebung in den Fügepartnern [82]

T_o und T_i repräsentieren die Normalkräfte pro Breite der beiden Fügepartner und τ_c die Schubspannung in der Klebefuge, wobei τ_{avg} aus der Abbildung 6.2 die mittlere Schubspannung über der Klebelinie darstellt. Sie lässt sich als Integral der Schubspannung der Klebefuge über die Überlappungslänge ermitteln. Die Verteilung der Verformungen ist ebenfalls aus der Abbildung 6.3 zu entnehmen. Dabei ist u_{os} die Verformung an der oberen Fläche des äußeren Fügepartners und u_{ci} die Verformung die an der Grenzfläche zwischen Klebstoff und dem inneren Fügepartner.

Durch das Einsetzen der erwähnten Beziehungen, die detaillierter in [82] beschrieben sind, erhält man die Differenzialgleichung:

$$\frac{d^2\tau_c}{dx^2} - \beta^2 \cdot \tau_c = 0 \quad (6.1)$$

wobei β^2 wie folgt bedeutet:

$$\beta^2 = \alpha^2 \cdot \lambda^2 \quad (6.2)$$

mit

λ Parameter zur Berücksichtigung der Dehnsteifigkeiten

α Parameter zur Berücksichtigung der Schubsteifigkeiten.

Der Parameter zur Berücksichtigung der Dehnsteifigkeiten λ hängt von den Dicken der Bestandteile der Verbindung (t_o , t_i und η) sowie den Elastizitätsmoduln der Fügeiteile (E_i und E_o) und des Schubmoduls (G_c) des Klebstoffes ab und entspricht den bereits von Volkersen berücksichtigten Kenngrößen:

$$\lambda^2 = \frac{G_c}{\eta} \cdot \left(\frac{2}{E_i \cdot t_i} + \frac{1}{E_o \cdot t_o} \right) \quad (6.3)$$

Der Parameter zur Beschreibung der Scherverformung α hängt ebenfalls von den Dicken (t_o , t_i und η) ab und wird zusätzlich von den Schubmoduln (G_o , G_i und G_c) der Bestandteile der Verbindung beeinflusst. Er ist wie folgt definiert:

$$\alpha^2 = \left[1 + \frac{G_c}{\eta} \cdot \left(\frac{t_i}{6 \cdot G_i} + \frac{t_o}{3 \cdot G_o} \right) \right]^{-1} \quad (6.4)$$

Für den (Spezial-) Fall, dass die Schubsteifigkeit gegen unendlich strebt ergibt sich $\alpha = 1$ und damit entsprechend die beschreibenden Gleichungen.

Die allgemeine Lösung der Differenzialgleichung ergibt sich zu:

$$\tau_c = A \cdot \sinh(\beta \cdot x) + B \cdot \cosh(\beta \cdot x) \quad (6.5)$$

wobei durch die Randbedingungen:

$$\begin{aligned} T_o &= \frac{T}{2}, T_i = 0 \text{ bei } x = -c \\ T_o &= 0, T_i = T \text{ bei } x = -c \\ T &= 4 \cdot c \cdot \tau_{avg} \end{aligned} \quad (6.6)$$

sich die Konstanten A und B wie folgt ergeben:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\beta \cdot c \cdot \tau_{avg}}{\sinh(\beta \cdot c)} \\ A &= \frac{\beta \cdot c \cdot \tau_{avg}}{\cosh(\beta \cdot c)} \cdot \left[\frac{1 - \frac{E_i \cdot t_i}{2 \cdot E_o \cdot t_o}}{1 + \frac{E_i \cdot t_i}{2 \cdot E_o \cdot t_o}} \right] \end{aligned} \quad (6.7)$$

Ein direkter Vergleich der beiden genannten Theorien (Volkersen/de Bruyne und TOM) (aus [82]) ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Wie daraus ersichtlich wird, stimmen die dort experimentell ermittelten Werte den Schubverzerrungen mit dem analytischen Model TOM (Abbildung 6.4 –rechts) besser überein. Dies bedeutet, dass die Schubverformungen der Fügeteile einen wichtigen Einfluss auf die Schubspannungsverteilung bzw. auf die Schubspannungsspitzen haben und daher für die mechanische Betrachtung von Klebeverbindungen jedenfalls berücksichtigt werden sollten.

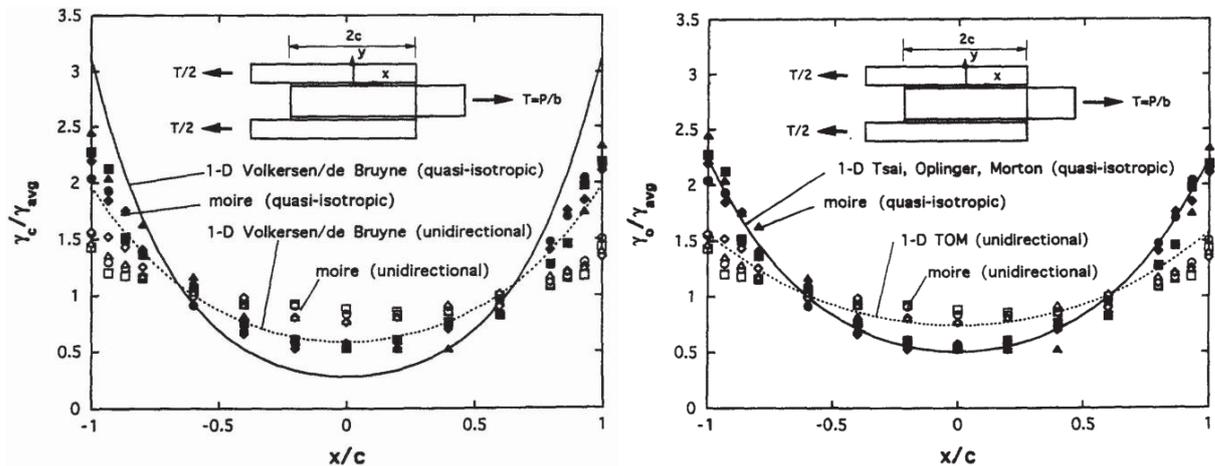


Abbildung 6.4: Vergleich von experimentell ermittelten Werten der Schubverzerrungen mit theoretisch Schubdehnungsverteilungen: Volkersen/de Bruyne (links) und TOM (rechts) [82]

Betrachtet man eine symmetrische Doppelüberlappung mit Fügeteilen gleicher Materialparameter ($E_i = E_o = E$, $G_i = G_o = E$, $t_i = 2t_o = t$), tritt der Unterschied zwischen den beiden Theorien am stärksten hervor. Infolge der selben Materialparameter, nehmen die beschreibenden Gleichungen eine einfachere Form an. Das Verhältnis der maximalen Schubspannungen ergibt sich zu:

$$\frac{\max \tau_c(\text{TOM})}{\max \tau_c(\text{Volkersen/de Bruyne})} = \frac{\alpha \cdot \coth(\alpha \cdot \lambda \cdot c)}{\coth(\lambda \cdot c)}. \quad (6.8)$$

Exemplarisch ist dieser Zusammenhang in der Abbildung 6.5 für einen Parametersatz ausgewertet. Je kleiner der Faktor α und $\lambda \cdot c$ ist, desto kleiner ist die maximale Schubspannung nach TOM. Dementsprechend wächst auch die maximale Schubspannung nach Volkersen/de Bruyne. Kleinere Werte des Schubmoduls der Fügeteile und größere Überlappungslängen resultieren durch kleinere Faktorenwerte α und $\lambda \cdot c$.

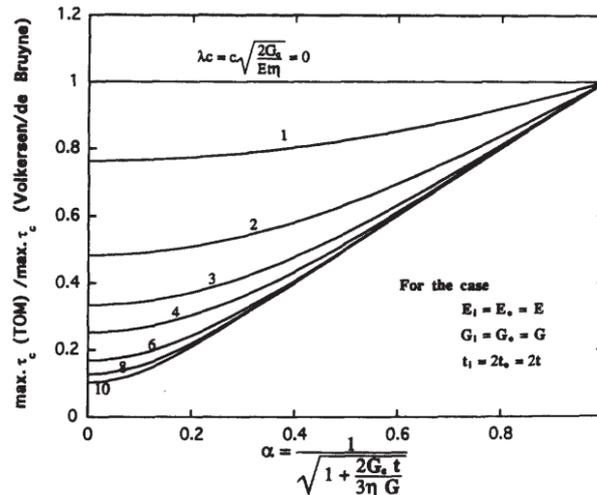


Abbildung 6.5: Abhängigkeit des Verhältnisses der maximalen Schubspannungen nach den beiden Theorien (TOM/Volkersen-de Bruyne) und den Faktoren $\lambda \cdot c$ und α [82]

Wird der Schubmodul des Fügeteils mit großen Werten und die Fügeteildicke als relativ klein angenommen, nähert sich der Faktor α dem Wert 1. Dann gleichen sich die Ergebnisse beider Theorien an und die Schubverformungen der Fügeteile haben einen geringeren Einfluss.

Zusammengefasst hängt die Schubspannungsverteilung in Holz-Stahl-Klebeverbindungen von der Dicken der Fügeteile und des Klebstoffes, dem Elastizitätsmodul und Schubmodul der Fügeteile und dem Schubmodul des Klebstoffes ab.

Zu erwähnen ist noch, dass diese analytische Berechnung speziell für eine Zug-Zug-Belastung definiert ist und dass sich für eine davon abweichende Belastungskonfiguration (z. B. „push-pull“) auf Grund der Randbedingungen davon signifikant abweichende Spannungsverläufe ergeben [62].

Abschließend soll noch angemerkt werden, dass Holz-Stahl-Klebeverbindungen auch mittels numerischer Methoden (z. B. FEM) berechnet werden können. Diese können sowohl als 2D-, als auch 3-D Berechnung durchgeführt werden. Besondere Beachtung sollte dabei auf die realistische Definition der Materialkennwerte finden; allenfalls wird die Durchführung von Parameterstudien zu empfehlen sein. Die Berechnungsergebnisse sollten – besonders bei elastischen Berechnungen – auf Grund der auftretenden Spannungsspitzen mit den damit verbundenen Gradienten mit kritischem Verstand auf ihre Plausibilität hin überprüft werden.

KAPITEL 7: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

7-1 ALLGEMEIN

Auf Basis der Literaturrecherche ergeben sich folgende offene Fragestellungen:

- Welche Zugtragfähigkeiten lassen sich durch in Buchen-Furnierschichtholz eingeklebte Bleche erreichen?
- Welche Unterschiede ergeben sich durch unterschiedliche Oberflächenvorbehandlungen?
- Kann durch die Perforation des Bleches eine Erhöhung der Tragfähigkeit erreicht werden?
- Wie groß ist das Tragvermögen bei Verwendung unterschiedlicher Klebstofftypen?
- Welche Normalspannungsverteilung stellt sich innerhalb der Klebeverbundzone ein?
- Stimmt diese mit theoretischen Ansätzen zur Ermittlung der Spannungsverteilung überein?
- Welche Verformungen treten an den Holzoberflächen (Hirnholz und Seitenholz) während einer Zugbeanspruchung auf?

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Untersuchung des Tragverhaltens von in Buchenfurnierschichtholz eingeklebten Blechen unter Zugbeanspruchung. In Anbetracht der Vielzahl möglicher Parametervariationen und Einflussfaktoren galt es, mittels weniger orientierender Tastversuche jene Parameter zu identifizieren, die das Tragvermögen einer derartigen Verbindung bestimmen.

Dieses Kapitel umfasst eine Darstellung des Prüfprogramms, der verwendeten Prüf- und Messkonfiguration und der Prüfdurchführung. Es beinhaltet Informationen zu den verwendeten Ausgangsmaterialien und der Prüfkörperfertigung. Zudem wird auf die Ermittlung der physikalischen und mechanischen Kenngrößen und auf die gewählten Auswertemethoden zur Analyse der Ergebnisse näher eingegangen.

7-2 VERSUCHSPROGRAMM

Die experimentellen Untersuchungen werden in Vorversuche und Hauptversuche unterteilt. Innerhalb der Vorversuchsreihe wurde bei sehr geringem Prüfumfang (größtenteils nur ein Versuch) eine Fülle von Materialkombinationen experimentell erfasst, um in weiterer Folge jene Parameter zu identifizieren, die maßgeblich die Tragfähigkeit und die Nachgiebigkeit der Verbindung beeinflussen. Diese spielerische Herangehensweise führte sehr schnell zu Ergebnissen und zu Erkenntnissen, auf Basis derer tiefergehende Untersuchungen innerhalb einer Hauptversuchsreihe durchgeführt werden konnten.

Die folgende Abbildung enthält einen groben Überblick über das Prüfprogramm und die verwendeten Materialien beider Versuchsreihen. Auf die verwendeten Materialien und die einzelnen Materialkombinationen wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

	Holz	Blech	Oberfläche des Bleches	Klebstoff	Sonstiges
Vorversuche	Buchen-Furnierschichtholz	Stahl Edelstahl 1.4751 Lochbleche S235 (2x)	Oberflächen- behandlung blank geschliffen sandgestrahlt	Epoxid- Klebstoff Toolcraft Epoxidharz L + Härter L Sikadur- 30 Normal Hilti HIT RE 500 Compono 100 + Compono 100 H	Querzug- verstärkung Zwinge aufgeklebte Furniere Anordnung des Blechtes in Bezug auf die Furnierlagen senkrecht parallel
		Aluminium Längslochblech CFK Sika-CarboDur S 614 Streckmetall			
	Holz	Blech	Oberfläche des Bleches	Klebstoff	Sonstiges
Hauptversuche	Buchen-Furnierschichtholz	Stahl S 760 MC	Oberflächen- behandlung sandgestrahlt Perforierung mit ohne	Epoxid- Klebstoff Compono 100 + Compono 100 H Polyurethan- Klebstoff Purbond CR 421 Purbond HB 110	-

Abbildung 7.1: Überblick über verwendete Materialien

7-3 PRÜFMATERIAL UND HERSTELLUNG

7-3.1 HOLZ

Das Ausgangsmaterial zur Fertigung der Prüfkörper stammte aus Buchenfurnierschichtholz-Trägern der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG mit einer QS-Breite von 100 mm und einer QS-Höhe von 200 mm. Die Träger wurden mittels Kreissäge aufgetrennt und auf die in Tabelle 7.1. angeführten Maße formatiert.

Danach wurden die Holzteile in einer Klimakammer bei einer Temperatur von 20° C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchtigkeit gelagert. In weiterer Folge wurden alle Teilsegmente abgemessen und abgewogen, um daraus die Rohdichte gemäß Abschnitt 7-7 zu bestimmen. Das Abmessen erfolgte mittels Rollmaßband und Schiebelehre. Es wurden jeweils zwei Werte der Breite, Höhe (Schiebelehre) und Länge (Rollmaßband) gemessen.

Im nächsten Schritt wurden die Holzteile (beidseitig) mittels Kreissäge mittig, vorwiegend senkrecht zu den Furnierlagen, geschlitzt. Um die entstandenen Holzspäne zu entfernen, wurden die Schlitzte mit Druckluft gereinigt. Anschließend wurden die Schlitzte mit Klebeband geschlossen, um so das Auslaufen des Klebstoffes und das gegenseitige Verkleben der Prüfkörper zu verhindern. Danach sind die Prüfkörper vertikal aufgestellt und mit Zwingen fixiert worden (Abbildung 7.2).

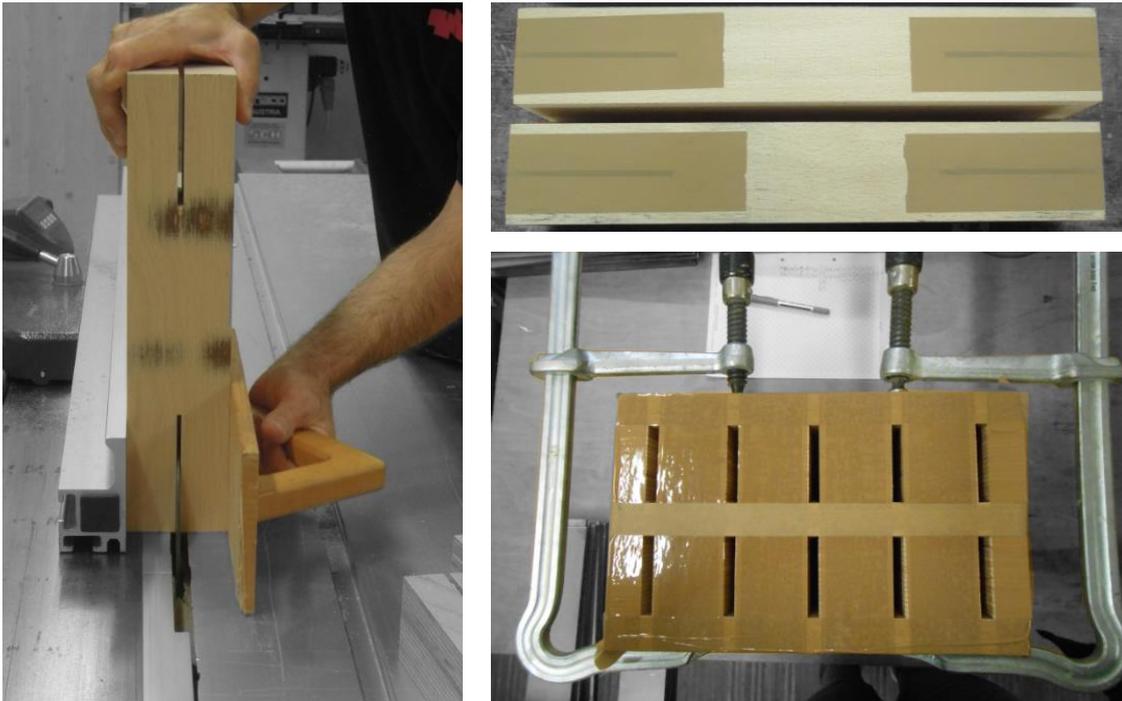


Abbildung 7.2: Einschlitzten des Holzes und dessen Vorbereitung für die Verklebung

Die verwendeten Dimensionen der Holzprüfkörper aller Prüfungen sind der Tabelle 7.1 zu entnehmen. Die Gesamtlänge des Holzprüfkörpers wurde zunächst mit 500 mm hergestellt (für die ersten zwei Prüfkörper – ES-PU-B-0X) und wurde dann mit 360 mm für alle weiteren Prüfungen konstant gehalten. Dementsprechend wurde auch das Mittelholz l_m , das heißt der Abstand zwischen den Schlitzenden an beiden Seiten, von 300 mm auf 160 mm verkleinert.

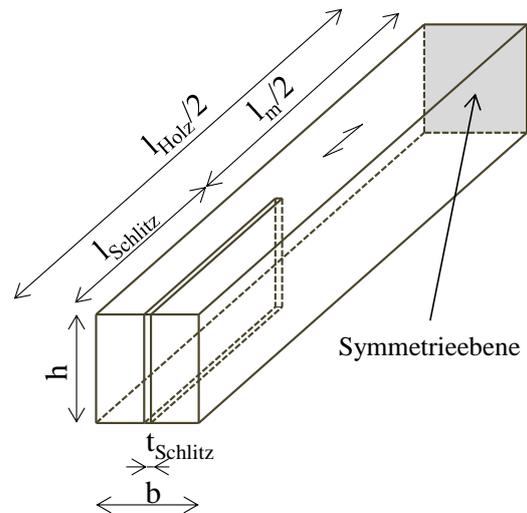
Die Breite und Höhe (b und h) betrug vorwiegend 60 mm mit Ausnahme von fünf Prüfkörpern, deren Breite und Höhe aufgrund der Stahlblechdimensionen mit 80 mm gewählt wurde.

Die Schlitzlänge l_{Schlitz} , die der Einklebelänge l_{kleb} entspricht, wurde stattdessen immer konstant über alle Prüfungen mit 100 mm gehalten. Nur bei einer Prüfung wurde eine Seite um 20 mm länger eingeklebt, um das Versagen auf der gegenüberliegenden Seite zu erzielen (Versuch mit den Dehnmessstreifen siehe Abschnitt 7-9.3).

Die gewählten Schlitzbreiten in Tabelle 7.1 ergaben sich aus der Dicke des einzuklebenden Bleches und der Verarbeitbarkeit (Fließfähigkeit) des jeweiligen Klebstoffes (siehe Abschnitte 7-3.2 und 7-3.3).

Tabelle 7.1: Holzgeometrie

Bezeichnung		Abmessung [mm]
Breite	b	60 / 80
Höhe	h	60 / 80
Gesamtlänge	l_{Holz}	500 / 360
Mittelholzlänge	l_m	300 / 160
Schlitzlänge	l_{Schlitz}	100
Schlitzbreite	t_{Schlitz}	3,5 / 4,5 / 5,5 / 6,5 / 8,0 / 5,0



7-3.2 BLECHE AUS STAHL, EDELSTAHL, ALLUMINIUM UND KOHLEFASER

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden insgesamt sieben unterschiedliche Bleche eingeklebt, auf welche in den folgenden Ausführungen näher eingegangen wird. Die Abkürzung s steht für Blechstärke und die Abkürzung d bezieht sich bei vorliegender Perforation auf den Lochdurchmesser.

- **Edelstahlblech ($s = 1,5 \text{ mm}$)**

Die verwendeten Edelstahlblechstreifen des Typs 1.4571 IIIc mit Dimensionen $1,5 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ wurden aus einer $1,5 \text{ mm}$ starken Blechtafel der Dimensionen $1,0 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$ mittels Schlagschere zugeschnitten.

Die Ermittlung der mechanischen Kenngrößen Zugfestigkeit, Streckgrenze und E-Modul erfolgten an drei Blechstreifen in Form von Zugprüfungen. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 7-10.2 angeführt.

Insgesamt wurden 12 Prüfkörper mit diesem Blechtyp unter Variation mechanischer Oberflächenvorbehandlung und Wahl unterschiedlicher Klebstoffe (siehe Abschnitt 7-3.3) geprüft.

Mechanische Oberflächenbehandlung

Um den Einfluss einer mechanischen Oberflächenbehandlung auf die Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung zu analysieren, wurde ein Teil der zur Verfügung stehenden Edelstahlbleche (i) ohne Oberflächenbehandlung, (ii) mit Sandpapier aufgerauhter und (iii) mit sandgestrahlter Oberfläche eingeklebt (siehe Abbildung 7.3).



Abbildung 7.3: Oberflächenbehandlungen des Edelstahl: blank, geschliffen und sandgestrahlt (von links nach rechts)

Die geschliffene Oberfläche wurde zuerst mit einer Bandschleifmaschine und im zweiten Schritt vor dem Kleben, händisch mit Sandpapier mittlerer Körnung senkrecht zur geplanten Krafteinleitungsrichtung hergestellt. Das Sandstrahlen wurde von der Firma Lenhardt Mossier GmbH mit einer Körnung von 0,25 mm bis 0,5 mm durchgeführt.

- **Lochblech (s = 1,5 mm und d = 4,5 mm)**

Um den Einfluss der Lochungen im Stahlblech zu untersuchen, wurden aus einer vorhandenen Lochblechtafel sechs Streifen mit den Dimensionen 1,5 mm x 60 mm x 400 mm mittels Tafelschere ausgeschnitten. Hierbei handelte es sich vermutlich um Stahl der Festigkeitsklasse S 235 mit Löchern (Durchmesser d = 4,5 mm). Die Anordnung und Abstände der Lochungen sind in Abbildung 7.4 ersichtlich, wobei die Perforation zu einer Querschnittsschwächung von rund 30 % führte.

Im eingeklebten Bereich befinden sich 7 Lochreihen zu je 4 Lochungen pro Reihe. Somit liegen innerhalb des Verbundbereichs 28 Lochungen vor, welche nach Klebstoffapplikation zu einer Klebschicht mit 28 sogenannten „Klebstoffdübeln“ resultiert (Abbildung 7.4 – rechts). Insgesamt wurden zwei Prüfkörper mit diesem Blech geprüft.

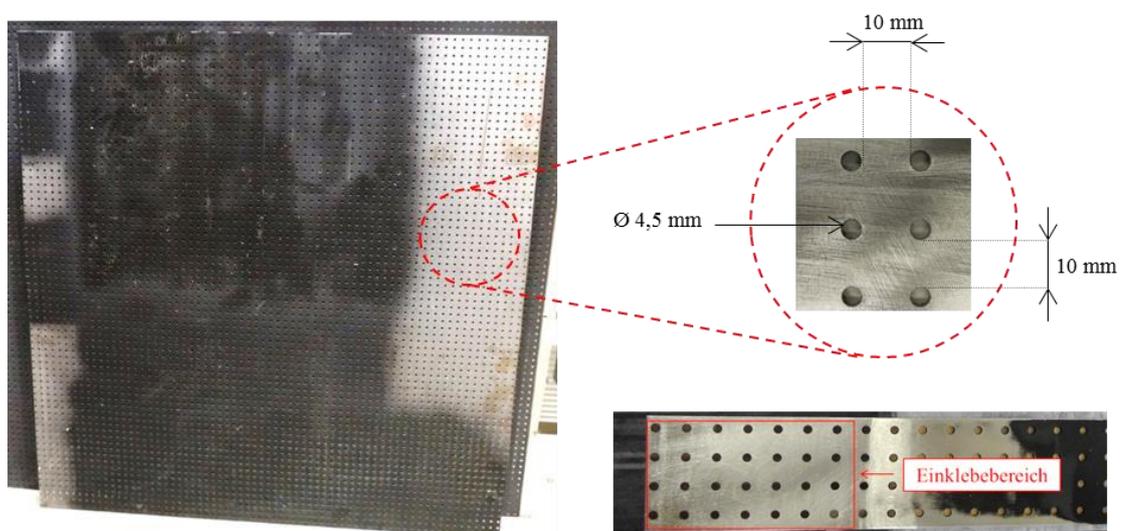


Abbildung 7.4: Ausgangsmaterial: Lochblechtafel (links); Lochblechstreifen und deren Einklebebereich (rechts)

Mechanische Oberflächenbehandlung

Wie in Abbildung 7.4 ersichtlich, wurde die Oberfläche der verwendeten Lochbleche mittels Sandpapier mittlerer Körnung aufgeraut.

- **Lochblech ($s = 2,5 \text{ mm}$ und $d = 10 \text{ mm}$)**

Da auch der Einfluss der Lochgröße interessant ist, wurde zusätzlich ein vorhandenes Lochblech mit Löchern des Durchmessers von 10 mm geprüft. Die Blechstärke betrug in diesem Fall 2,5 mm und der Lochabstand in beiden Richtungen 5,0 mm. Dies führte zur Reduktion der Querschnittsfläche von über 60 %. Die Festigkeitsklasse dieses Lochbleches entsprach S 235.

Die Dimensionen der Bleche betragen 2,5 mm x 80 mm x 290 mm. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Bleche mit 80 mm Breite um 20 mm breiter als die restlichen Blechquerschnitte sind, da ein Zuschnitt anhand der zur Verfügung stehenden Blechschere bei dieser Blechstärke nicht möglich war. Aus diesem Grund wurden die Querschnittsabmessungen des Holzteiles an die Blechbreite mit 80 mm x 80 mm angepasst.

Die Anordnung und Abstände der Lochungen sind in Abbildung 7.5 ersichtlich, wobei die Perforation zu einer Querschnittsschwächung von rund 60 % führte. Im eingeklebten Bereich befinden sich 6,5 Lochreihen zu je 5 Lochungen pro Reihe. Somit liegen innerhalb des Verbundbereichs 35 Lochungen vor, welche nach Klebstoffapplikation zu einer Klebschicht mit 30 ganzen „Klebstoffdübeln“ und aufgrund der Anordnung der obersten Lochreihe am Ende des Verbundbereichs 5 halben „Klebstoffdübeln“ resultiert (Abbildung 7.5 – rechts). Insgesamt wurden fünf Prüfkörper mit diesem Blech geprüft.

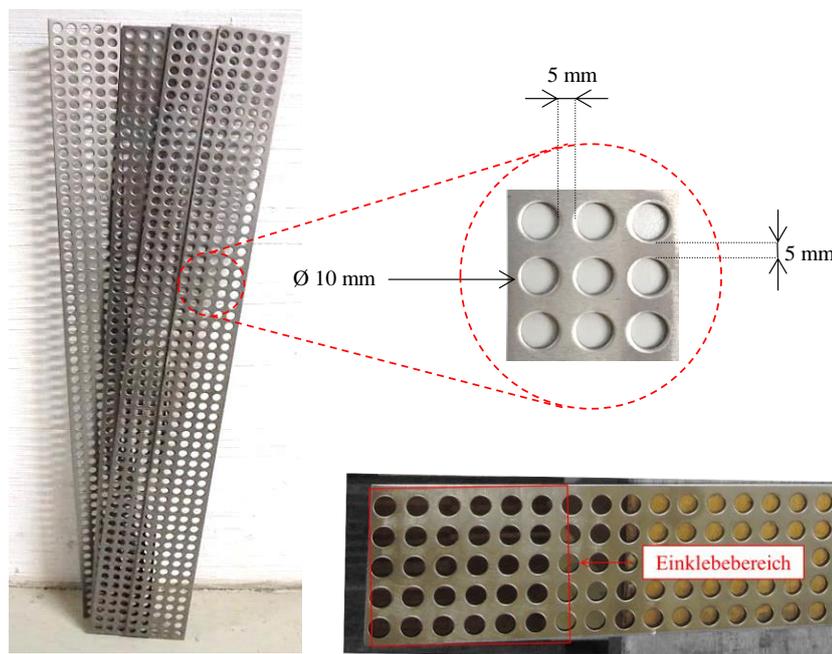


Abbildung 7.5: Ausgangsmaterial: Lochblechstreifen (10 mm) (links); Lochblechstreifen und deren Einklebbereich (rechts)

- **Kohlefaser (CFK) ($s = 1,4 \text{ mm}$)**

Neben metallischen Blechstreifen wurden zusätzlich Prüfungen mit eingeklebten CFK-Lamellen der Firma Sika des Typs CarboDur S614 [68] durchgeführt (Abbildung 7.6). Diese CFK-Lamellen werden üblicherweise zur Verstärkung von Stahl- und Spannbeton, Mauerwerk sowie Holzbauteilen eingesetzt und zeichnen sich durch ihr geringes Eigengewicht und hohe Festigkeit aus. Anzumerken ist auch die Korrosionsbeständigkeit dieses Materials. Neben dem Interesse für den Einfluss der unterschiedlichen Materialarten auf die Klebstoffhaftung, waren dies ebenfalls Gründe, warum die Entscheidung auf diese Lamellen fiel. Die Dimensionen der CFK-Lamellen betragen $1,4 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$.



Abbildung 7.6: Kohlefaserlamelle des Typs S614 vor dem Einkleben

- **Streckmetall ($s = 0,8 (1,0) \text{ mm}$) und Lochblech ($s = 1,0 \text{ mm}$) mit Längslochungen**

Um die Haftung des Klebstoffes anderer Blechstrukturen zu überprüfen, wurden zwei Musterbleche von der Firma ProMetall GmbH zur Verfügung gestellt. Dabei handelte es sich um ein Streckmetall und ein Längslochblech (siehe Abbildung 7.7).

Die Längslochungen des Längsbleches waren 20 mm lang und 5 mm breit und gegenseitig versetzt. Dabei handelte es sich um Aluminium mit einer Blechstärke von 1 mm .

Die Rautenmasche der Streckmetalle hatte folgende Dimensionen: Länge und Breite der Masche waren 8 mm bzw. 4 mm , die Breite und Dicke der Rippen betragen 8 mm und 1 mm .

Insgesamt wurden vier Prüfkörper (zwei pro Blechtyp) gefertigt (siehe Abbildung 7.7).

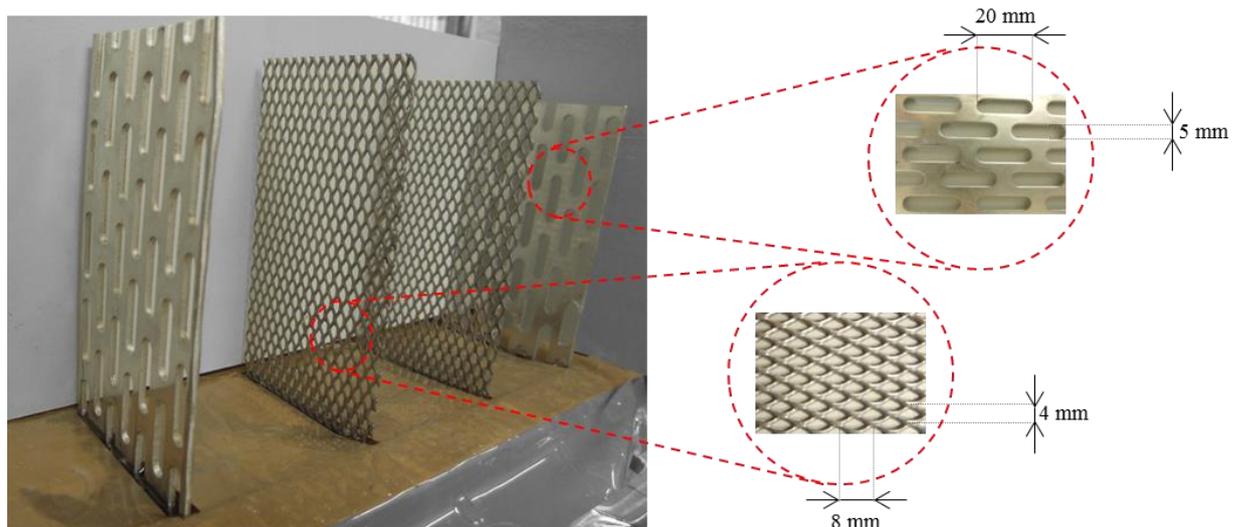


Abbildung 7.7: eingeklebte Streckmetalle und Längslochbleche

Mechanische Oberflächenbehandlung

Die Oberfläche der Längslochbleche aus Aluminium wurde vor Verklebung mittels Sandpapier mittlerer Körnung aufgeraut. Die Oberfläche der Streckmetalle blieb unbehandelt.

- **Stahlblech (s = 5,0 mm)**

Die verwendeten Stahlblechstreifen des Typs S 760 MC mit den Dimensionen 5 mm x 60 mm x 330 mm stammten aus einer 5 mm starken Blechtafel der Dimensionen 1,5 m x 3,0 m. Die Blechtafel wurde zunächst mittels Laser in Blechstreifen zu 60 mm x 1480 mm zugeschnitten und in weiterer Folge mittels Metallbandsäge auf die gewünschte Länge von 330 mm abgelängt (siehe Abbildung 7.8).

Die Wahl der Blechstärke ergab sich aus Überlegungen zum Steifigkeitsverhältnis der Füge­teile Holz und Stahlblech, welche auf Erfahrungen aus Studien zur eingeklebten Gewindestange beruhen, die auf eine Tragfähigkeitssteigerung bei ähnlichen Steifigkeitsverhältnissen der Füge­teile hinweisen.



Abbildung 7.8: Blechstreifen von Stahlblech S 760 MC (links) und Metallbandsäge (rechts)

Zudem wurde ein Teil der Blechstreifen mit elliptischen Löchern mittels nicht perforierte und einmal perforierte Stahlbleche benutzt. Die perforierten Stahlbleche enthielten eine Reihe von elliptischen Löchern, wobei die Länge und Breite der Ellipsen 14 mm und 7 mm betragen. Deren gegenseitiger Abstand war 2,7 mm. So betrug die Querschnittsschwächung in diesen Bereich 70 %. Die Lochreihe war in der Mitte der Einklebelänge positioniert.

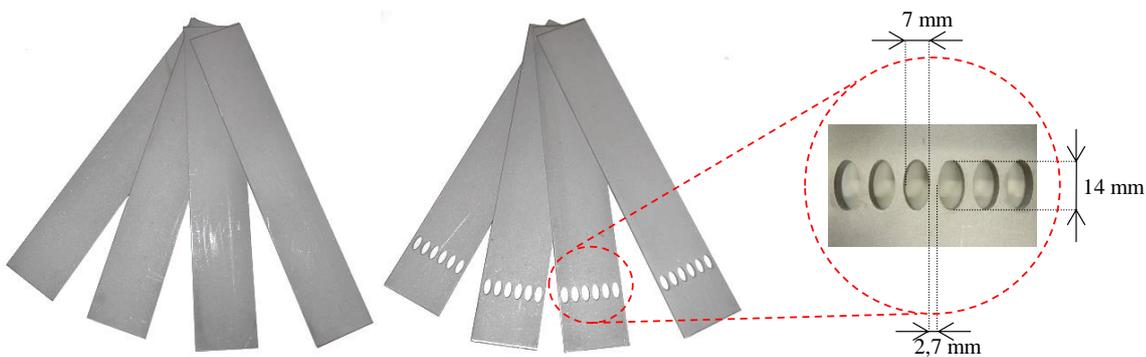


Abbildung 7.9: fertige Stahlbleche: nichtperforierte (links), perforierte (rechts)

Mechanische Oberflächenbehandlung

Die Oberflächen der Stahlblechstreifen mit den Dimensionen 60 mm x 1480 mm wurde von der Firma Lenhardt Mossier GmbH einer Sandstrahlung unterzogen (mit Korngröße von 0,25 – 0,5 mm).

• Reinigung der Oberflächen

Jedes Blech wurde vor dem Einkleben mit Aceton oder Isopropylalkohol gereinigt. Nach der Reinigung der Oberflächen wurden vier Abstandhalter (kleine Kunststoffstücke bzw. Furnierstücke) aufgeklebt, wodurch eine möglichst zentrische Positionierung innerhalb des Schlitzes und damit beidseitig eine gleichmäßige Klebschicht nach Verklebung gewährleistet werden soll. Tragfähigkeitsmindernde Exzentrizitäten, welche aufgrund von Abweichungen in der Fertigung nicht zu vermeiden sind, können somit auf ein Minimum reduziert werden (siehe Abbildung 7.10). Nach dem Aufkleben der Abstandhalter und erneuter Reinigung der Oberflächen erfolgte das Einkleben der Bleche (siehe Abschnitt 7-3.4).

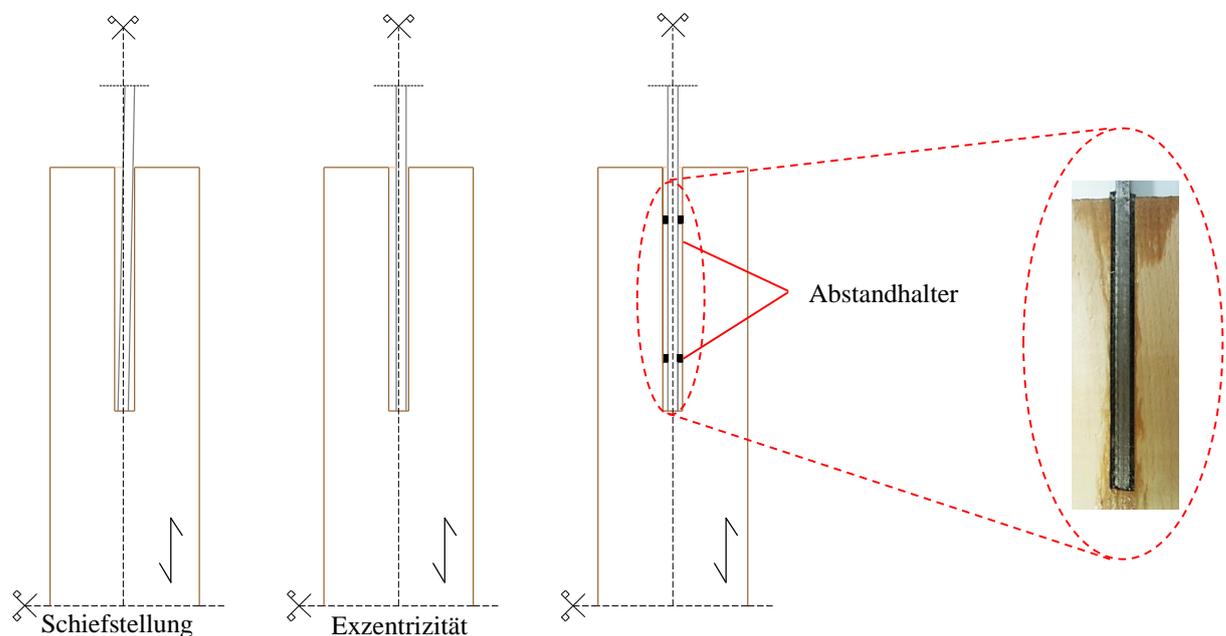


Abbildung 7.10: zentrisches Einbringen mithilfe von Abstandhaltern

7-3.3 VERWENDETE KLEBSTOFFE

Im Rahmen dieser Arbeit wurden sechs Klebstoffe (zwei Polyurethan- und vier Epoxid-Klebstoffe (siehe Abbildung 7.11) zur Fertigung der Prüfkörper verwendet, auf welche in weiterer Folge näher eingegangen wird.

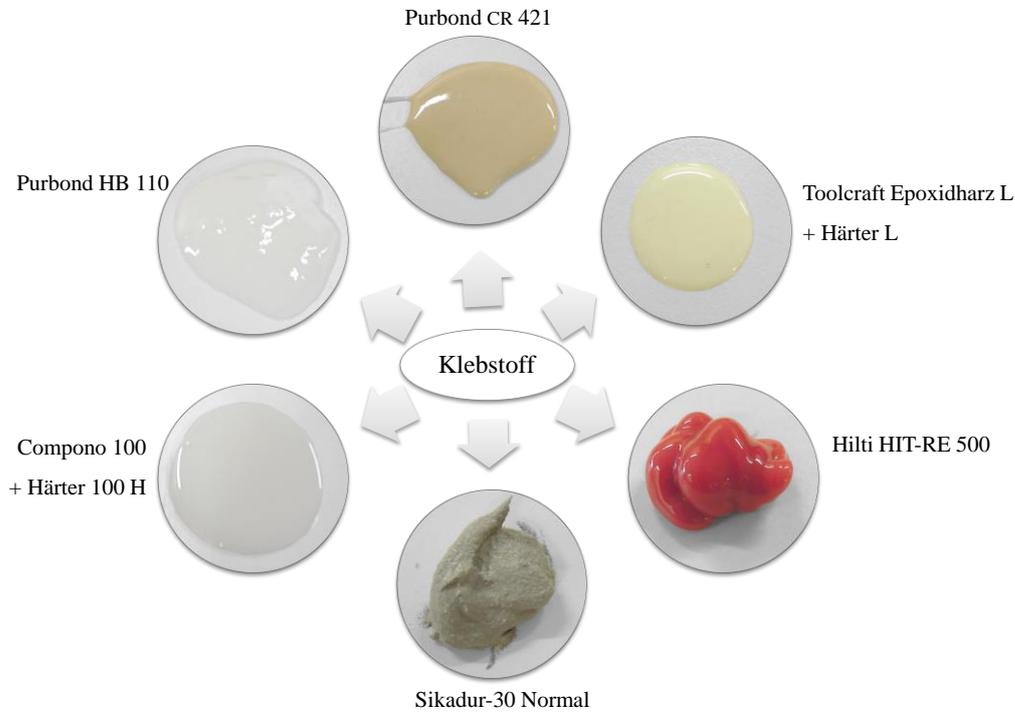


Abbildung 7.11: verwendete Klebstoffe

In Tabelle 7.2 sind Eigenschaften, wie: Mischverhältnis, Verarbeitungszeit, Viskosität, Dichte, E- Modul und Aushärtezeit der verwendeten Klebstoffe angeführt. Diese Parameter sind wichtig für die Berechnung der erforderlichen Klebstoffmenge (Dichte) und für die Verarbeitung des jeweiligen Klebstoffes (Verarbeitungszeit und Mischungsverhältnis). Der Kehrwert der Viskosität ergibt die Fließfähigkeit des Klebstoffes, die ebenfalls wertvolle Aussagen über die Verarbeitbarkeit des Klebstoffes liefert.

Als Eingangsgrößen für eine theoretische Betrachtung mittels in Abschnitt 6-2 angeführten analytischem Modell sind elasto-mechanische Kenngrößen, wie Elastizitätsmodul und Schubmodul erforderlich. Die in Tabelle 7.2 angeführten Materialparameter wurden aus den Datenblättern der Klebstoffhersteller und falls nicht vorhanden aus anderen Arbeiten entnommen (siehe Tabelle 7.2, Quelle).

Tabelle 7.2: Klebstoffeigenschaften

Kriterium	Purbond CR421	Toolcraft Epoxidharz L + Härter L	Hilti HIT RE 500	Sikadur-30 Normal	Compono 100 + Compono 100 H	Purbond HB 110
Quelle	[61]	[63]	[45][28]	[69]	[23]	[60][47]
Klebstofftyp	Polyurethan (2K)	Epoxid (2K)	Epoxid (2K)	Epoxid (2K)	Epoxid (2K)	Polyurethan (1K)
Harz : Härter [Gewichtsteile]	2,28:1	10:4	nicht bekannt	3:1	100:19	-
Verarbeitungszeit [min]	10	40	25	ca. 90	16	-
Dichte (Gemisch oder getrennt) [g/cm ³]	1,35	1,011	1,5 / 1,4	1,652	1,13 / 1,041	1,1
Viskosität [mPa.s]	9000	700 / 3203	50000	nicht bekannt	500	5000
E-Modul [N/mm ²]	15601	2650	nicht bekannt	112006	33004	470
G-Modul [N/mm ²]	1130	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt	180
Aushärtung [Tage]	101	15	17	7	4-6	
1 bei 20° C				4 aus Zugversuch nach ISO 527		
2 bei 23° C				(nach 14 Tagen bei 23°C)		
3 bei 25° C				5 aus Biegeversuch nach DIN 53455		
				6 für 1 mm Schichtstärke		
				7 bei 15-19°C Untergrundtemperatur		

Anschließend werden die verwendeten Klebstoffe einzeln beschrieben und zusätzlich die eigenen Erfahrungen betreffend Verarbeitung der jeweiligen Klebstoffe angeführt.

- **Purbond CR 421 (PU)**

Dieser Klebstoff ist ein zweikomponentiger Polyurethanklebstoff und eignet sich zur Verankerung und Einleitung von Zug- und Druckkräften mittels Gewindestangen und Betonrippenstählen in Holzbauteilen längs und quer zur Faserrichtung [30]. Außerdem wird dieser Klebstoff auch für das Einkleben von Rohrhülsen [48] und Lochblechen verwendet.

Das Einkleben der Bleche mittels Doppelkartuschenpistole erwies sich als einfach. Das Mischen des Harzes und Härter fand im dazugehörigen Statik-Mischer statt. Im Weiteren wird dieser Klebstoff mit PU bezeichnet.

- **Toolcraft Epoxidharz L + Härter L (EP)**

Dieses Harzsystem findet Anwendung im Flugzeugbau, im Sportgerätebau und in anderen Bereichen wie beispielsweise zur Herstellung von Faserverbundwerkstoffe. Des Weiteren können laut Hersteller auch andere Materialien wie Holz, Metall, Kunststoff usw. verklebt werden. Dieser Klebstoff weist eine sehr geringe Oberflächenspannung auf.

Nach den ersten Einklebeversuchen erwies sich dieser Klebstoff als ungeeignet. Während der Klebstoffapplikation wurde ein „Durchschlagen“ des Klebstoffes beobachtet, wodurch ein wiederholtes Nachfüllen zur Füllung der Klebstofffuge erforderlich war (siehe Abbildung 7.14). Zudem mussten Harz und Härter manuell angerührt werden. Im weiteren Teil dieser Arbeit wird der Klebstoff mit EP abgekürzt.

- **Hilti HIT RE 500 (HI)**

Dieser Klebstoff ist ein zwei-komponentiges Epoxidharzsystem, welches vorwiegend zur Befestigung von Betoneisen und Dübeln in Beton eingesetzt wird, wobei bereits Erfahrungen in [54] zur Verklebung von Gewindestangen in Holz vorliegen. Das Einkleben erfolgte mittels einer Doppelkartuschenpistole mit dazugehörigem Statikmischer. Für diesen Klebstoff wird die Abkürzung HI verwendet.

- **Sikadur- 30 Normal (SD)**

Sikadur 30 Normal ist ein zweikomponentiges Klebstoffsystem, welches für das Aufkleben von CFK-Lamellen auf Beton, Mauerwerk und Holz verwendet wird. Außerdem wird er für das Verkleben von Stahllamellen auf Beton benutzt.

Das Mischen des Harzes und Härter erfolgte manuell in einem Gefäß. Danach wurde der fertig gemischte Klebstoff aufgrund seiner pastösen Gestalt durch Spachteln in die Schlitzfuge eingedrückt (Abbildung 7.12). Die vollständige Verteilung des Klebstoffes in der Schlitzfuge wurde durch Nachdrücken mit einem Holzstück erreicht. Im Vergleich zu den anderen Klebstoffen war die Applikation aufwendig. Im Weiteren wird der Klebstoff mit SD abgekürzt.

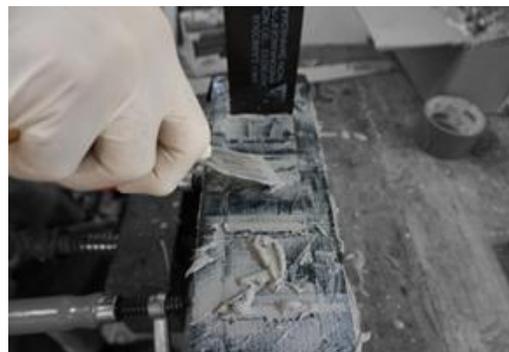


Abbildung 7.12: Einspachteln des Klebstoffes

• Compono 100 + Compono 100 H (CO)

Dieser Klebstoff wird als Bindemittel für mineralstoffhaltige Vergussysteme benutzt. Dabei gibt es sehr gute Erfahrungen mit dem Einkleben von Gewindestangen mittels eines Polymerbetons (Compono 100 S) in Holz. Im Rahmen dieser Arbeit wurde er jedoch „rein“ verwendet (nur Harz und Härter).

Das Mischen der zwei Komponenten erfolgte ebenfalls manuell in einen Glasgefäß. Danach traten die gleichen Probleme wie beidem EP Klebstoff auf: „Durchschlagen“ des Klebstoffes (Abbildung 7.14) durch die Furniere und mehrfaches Nachfüllen. Deswegen wurden experimentell Füllstoffe, die die Konsistenz des Klebstoffes für diesen Zweck verbessern sollten, eingearbeitet.

Zum Einsatz kamen folgende Füllmaterialien: Quarzsand, Mehl sowie Holzmehl. Benutzt wurde immer die gleiche Klebstoffmenge und der Füllstoff wurde bis zum Erreichen der gewünschten Konsistenz beigemischt. Die Endergebnisse sowie die Mischungsverhältnisse sind in der Abbildung 7.13 dargestellt. Während Mehl und Holzmehl eine zu hohe Reaktivität mit dem Klebstoff aufwiesen und deswegen sofort ausgeschlossen wurden, zeigte die Mischung des Klebstoffes mit dem Quarzsand direkt nach dem Anmischen befriedigende Resultate. Im Laufe der Zeit sank der Quarzsand auf den Boden des Gefäßes. Dennoch wurden einige Prüfkörper mit Quarzsand (Körnung von 0,1 mm bis 0,5 mm) als Füllstoff hergestellt.

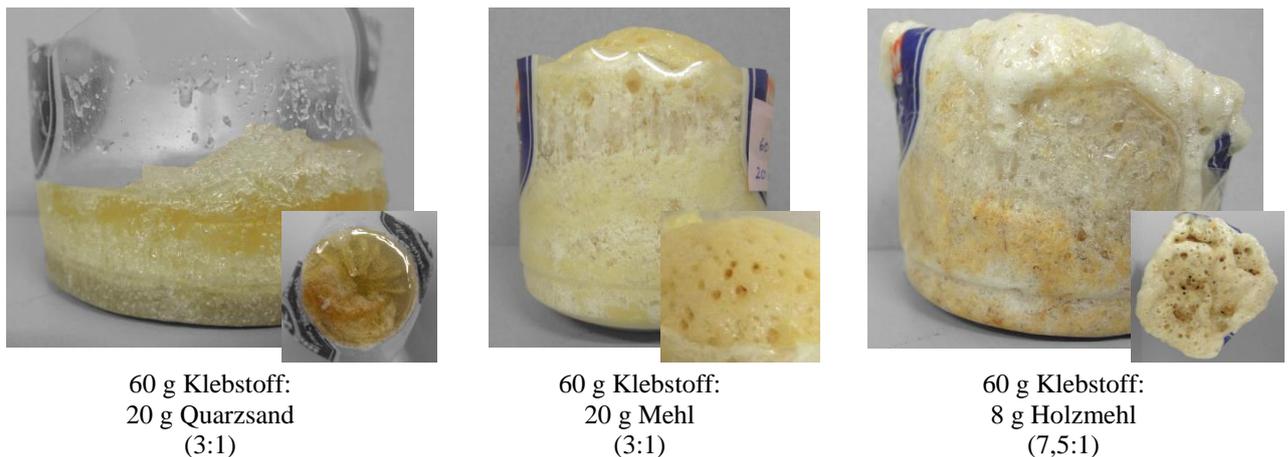


Abbildung 7.13: Mischen des Klebstoffes mit unterschiedlichen Füllstoffen

Nach der Aushärtung des Klebstoffes im Prüfkörper wurde wieder ein Absinken festgestellt. Auch das Problem mit dem „Durchschlagen“ des Klebstoffes wurde auf diese Art nicht gelöst (siehe Abbildung 7.14).

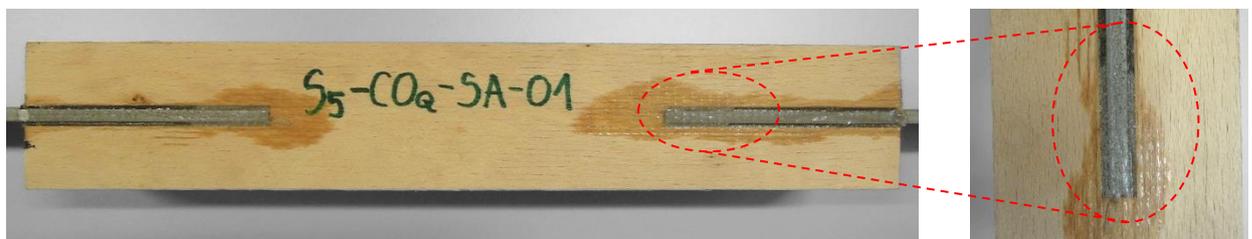


Abbildung 7.14: Auslaufen des Klebstoffes sowie Absenkung des Quarzsandes

Abgekürzt wird der Klebstoff mit CO, bzw. mit COQ, wenn er Quarzsand enthält.

• **Purbond HB 110**

Der Purbond HB 110 ist ein einkomponentiges Klebstoffsystem. Üblicherweise wird es für Keilzinken- sowie für Flächenverklebungen für Holz-Holz-Verbindungen verwendet. Die Entscheidung fiel dennoch auf diesen Klebstoff und zwar aufgrund seines zu erwartenden „duktilen“ Verhaltens.

Das Füllen der Schlitzes des Prüfkörpers erfolgte durch das Herauspressen des Klebstoffes aus der Klebstoffflasche, was an sich keine Schwierigkeiten verursachte. Davor wurden die Holz- sowie die Stahlflächen etwas angefeuchtet, da der Klebstoff unter Material- und Luftfeuchte aushärtet. Anstatt eines Tages brauchten die Prüfkörper viel länger bis zur endgültigen Aushärtung. Das hatte folgende Gründe: die notwendige Materialfeuchte erreichte nicht den inneren Teil der Klebefuge, da die Klebstofffugendicke mit 1,5 mm anstatt der maximal empfohlenen 0,3 mm ausgeführt war und wegen des harten Filmes, welcher sich an der Stirnoberfläche gebildet hatte und somit der Zutritt der Luftfeuchte verhindert wurde. Ein weiteres Problem war das Aufschäumen des Klebstoffes, welches Luftblasen innerhalb der Klebstofffuge verursachte. Dieser Klebstoff wird im Weiteren abgekürzt HB genannt.

7-3.4 VERKLEBEN DER PRÜFKÖRPER

Die Verklebung erfolgte im Labor. Während des Klebe- und Aushärteprozesses lag die Temperatur bei rund 20° C. Zum Einkleben der Bleche wurde der Klebstoff in die obere Öffnung gefüllt. Der Füllvorgang dauerte je Prüfkörper rund 20 bis 30 Sekunden. Anschließend wurden die vorbereiteten Bleche manuell in die mit Klebstoff gefüllten Öffnungen eingebracht. Durch das Austreten des Klebstoffes an der stirnseitigen Oberfläche nach Einbringen des Bleches konnte augenscheinlich festgestellt werden, dass eine ausreichende Menge Klebstoff eingebracht wurde. Nach einer ausreichenden Aushärtung des Klebstoffes wurden die Prüfkörper um 180° gedreht und es erfolgte das Verkleben der zweiten Seite.

Abschließend wurden die Prüfkörper beschriftet und bis zum Erreichen des endgültigen Aushärtegrades respektive bis zum Zeitpunkt der Prüfung in der Klimakammer bei Normklima gelagert. Die Beschriftung nimmt Bezug auf die verwendeten Materialien und deren Eigenschaften.

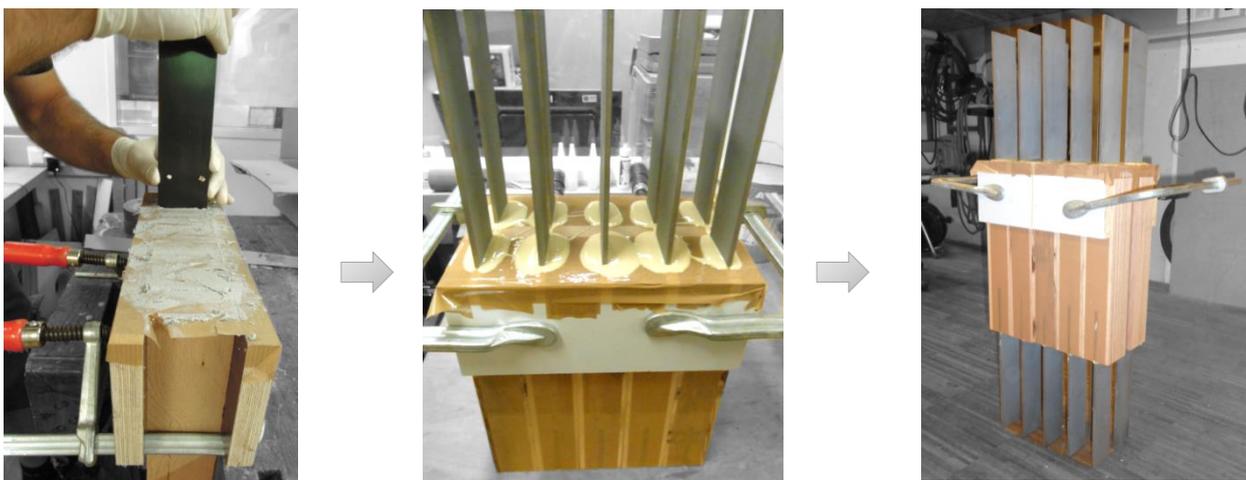


Abbildung 7.15: Phasen des Herstellungsprozesses der Prüfkörper

7-4 PRÜFKONFIGURATION

Die fertigen Prüfkörper wurden einer Zug-Zug-Belastung ausgesetzt. Diese erfolgte in der Zugprüfmaschine Zwick Universal der Firma Zwick GmbH & Co, welche die Probekörper mittels hydraulischen Klemmböcken fixiert. Durch den Pressdruck der Klemmböcken auf die Bleche wurde die Kraft in die Prüfkörper eingeleitet. In der Abbildung 7.16 ist die Prüfmaschine, der eingespannte Prüfkörper und die schematische Darstellung ersichtlich. Die Abmessungen der schematischen Darstellung entsprechen den Prüfkörperabmessungen der Hauptprüfungen. Wie bereits angedeutet, waren die Bleche nicht einheitlich gleich lang und dementsprechend variierte der Abstand zwischen Hirnholz und Klemmblocke.

Die Ausgabedaten der Prüfmaschine sind die aufgebrachte Kraft und der dazugehörige Traversenweg sowie die Prüfzeit.

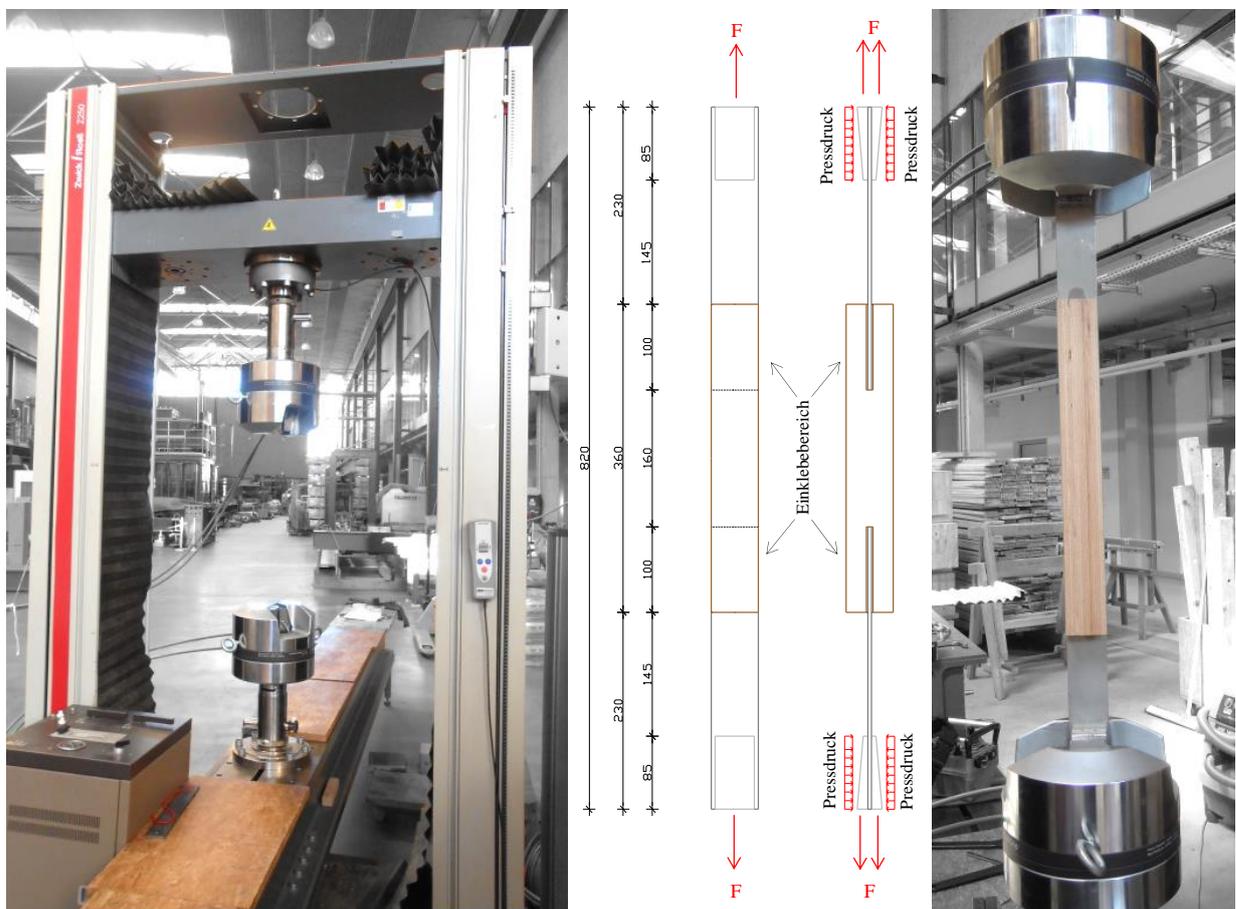


Abbildung 7.16: Prüfmaschine (links), schematische Darstellung der Prüfkonfiguration (Mitte), eingespannter Prüfkörper (rechts)

7-5 MESSEINRICHTUNG

Vor der Herstellung der Messeinrichtung wurde überlegt, welche möglichen Verformungen auftreten können. In der Literatur finden sich Anmerkungen zu Deformationen in Faserrichtungsrichtung, Verzerrungen, über Querverformungen sowie des daraus resultierenden Gesamtverformungsbildes. Hinsichtlich der sich einstellenden Bauteilverformungen bei Zugbeanspruchung sind nach Aufarbeitung der angeführten Literatur der Verfasserin keine experimentellen sondern nur theoretischen Untersuchungen bekannt. Um feststellen zu können, ob die aus theoretischen Modellen, z. B. in [1], abgeleitete Bauteilverformungen auch im Versuch vorliegen, wurden an definierten Stellen (Hirnholzoberfläche und Schmalseite) induktive Wegaufnehmer angebracht. Diese erlauben, obgleich zu erwarten ist, dass die gemessenen Verschiebungen aufgrund des geringen Lastniveaus und den geometrischen Randbedingungen sehr gering sein werden, eine qualitative Beurteilung der Bauteilverformung und können zu neuen Erkenntnissen hinsichtlich Modellbildung führen. (siehe Abschnitt 6-2).

Eine erwartete Gesamtverformung stellt die Skizze 4 in der folgenden Abbildung dar. Die Messeinrichtung wurde so angepasst, dass die Gesamtverformung so gut als möglich erfasst werden kann.

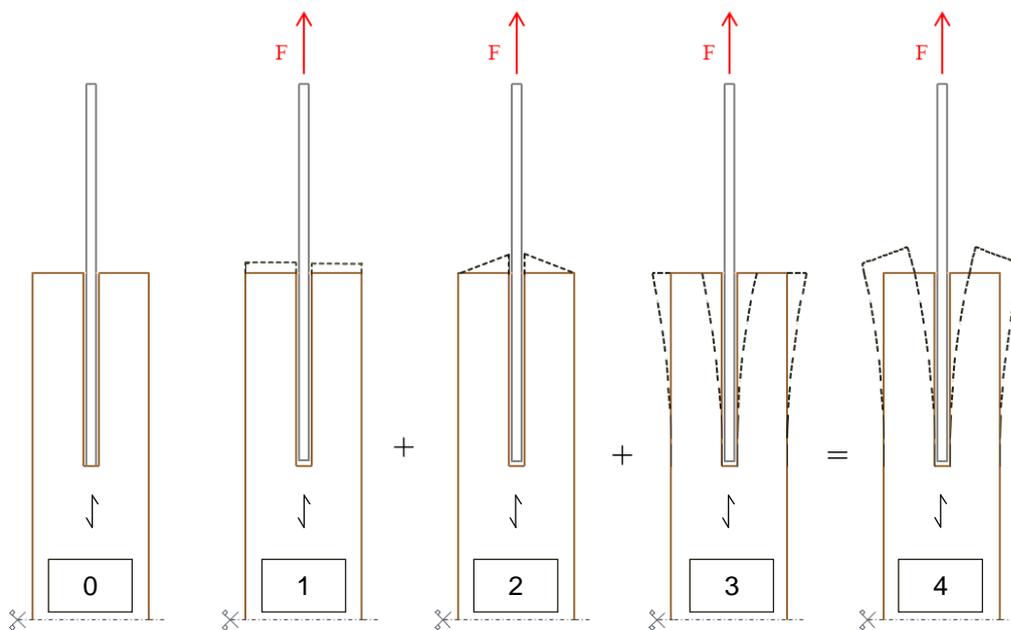


Abbildung 7.17: unbelasteter Prüfkörper (0), Deformationen des Holzes in Faserrichtung (1), Verzerrungen (2), Querverformungen (3) und die erwartete Gesamtverformung (4)

Dazu dienen die zehn angebrachten Wegaufnehmer aus der Abbildung 7.18. Dabei handelt es sich um induktive Wegaufnehmer der Genauigkeit von 1/100 mm.

Gemessen wurde Folgendes (vergleiche Abbildung 7.18, Abbildung 7.19 und Abbildung 7.20):

- vertikale Stirnholzverformung – Verzerrungen inklusiv Holzverformung in Faserrichtung (Knoten K1, K2 und K3)
- horizontale Abweichung des Holzes (HO – oben, HM – Mitte, HU – unten)
- vertikale Verformung der Verbindung in Verbindungsmittle (HI)
- vertikale Verformung der gesamten Verbindung (SR – Seite rechts, SL – Seite links)
- vertikale Holzverformung (H).

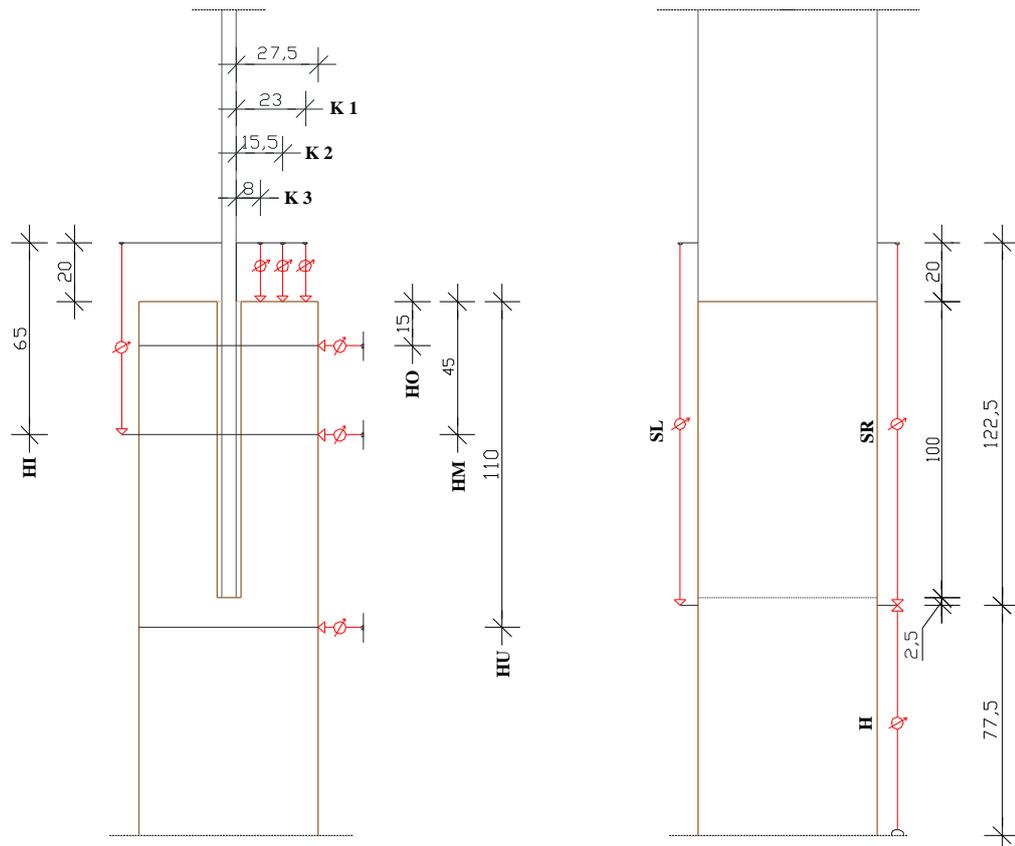


Abbildung 7.18: schematische Darstellung der Wegaufnehmer Positionen

Die Verbindungsverformungen (gemessen mit SL, SR und HI) werden mitgemessen, um den Verschiebungsmodul der Verbindung bestimmen zu können. Die Wegaufzeichnungen des Wegaufnehmers H dienen zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls des Holzes.

Die Halterung der Wegaufnehmer (Knoten K1, K2 und K3, sowie SR, SL und HI) wurde aus einer Kompaktplatte hergestellt und mittels Schrauben an das Stahlblech auf der Höhe von 20 mm vom Stirnholz fixiert (Abbildung 7.19). Dies ist wichtig zu erwähnen, da bei der Auswertung dieser Wege die dazugehörige Stahlverformung des Bleches über das Hirnholz abgezogen wurde.

Der Winkel bei der HI- Messung wurde durch eine Schraube befestigt. Im Gegensatz dazu wurden die Winkel für die SR- und SL- Messung auf aufgeklebte Glasplättchen mittels Superkleber angebracht, um Störungen in diesem empfindlichen Bereich zu vermeiden (Abbildung 7.20).

Für die Halterung der Wegaufnehmer HO, HM und HU sind quadratische Stahlhohlprofile gefertigt worden. Es wurde darauf geachtet, dass eine Berührung des unteren Stahlhohlprofiles mit dem geklebten Winkel vermieden wird.

Alle Wegaufnehmer waren an den Messverstärker Quantum X MX840A angeschlossen und mittels der Messtechnik-Software Catman der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH wurden die Daten aufgezeichnet. Zur Unterstützung der vereinfachten schematischen Darstellung der Wegaufnehmer Positionen dienen die folgenden Abbildungen.

Anzumerken ist, dass die Messeinrichtung nur an den Prüfkörpern der Hauptprüfungen verwendet wurde.

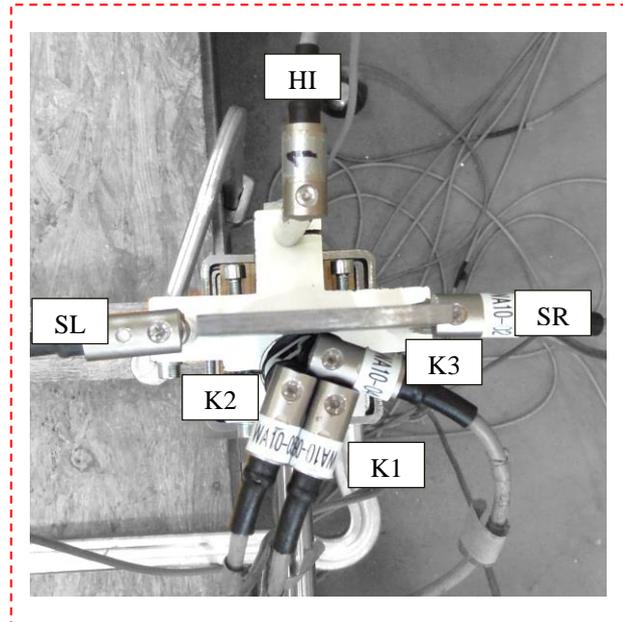
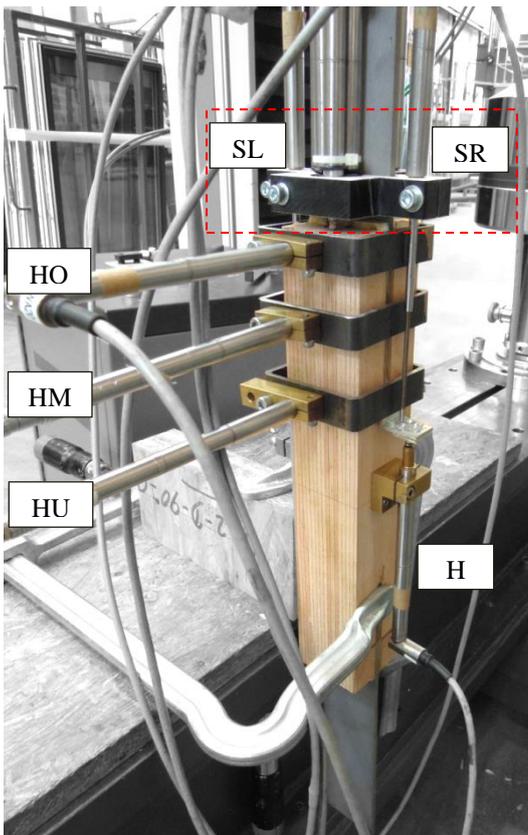


Abbildung 7.19: Messeinrichtung: Seitenansicht (links) und Ansicht von oben (rechts)

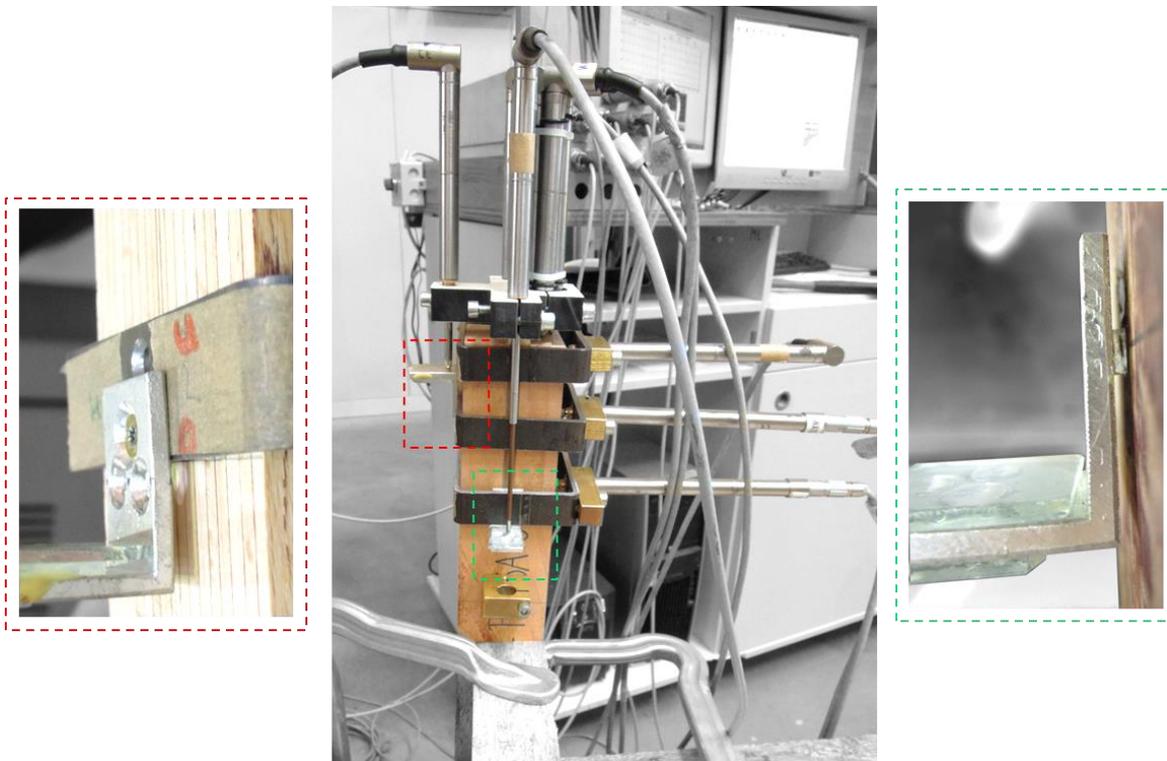


Abbildung 7.20: Messeinrichtungsdetails

7-6 PRÜFDURCHFÜHRUNG

Bei den Prüfkörpern der Hauptprüfungen wurde zuerst die Messeinrichtung auf die vorher aufgezeichneten Positionen angebracht. Dies entfiel bei den Vorversuchen. Danach wurden die Prüfkörper vertikal ausgerichtet und zwischen den Klemmbacken positioniert. Dabei wurde besonders darauf geachtet, eine mittige Positionierung zu gewährleisten, da die Bleche um 10 mm (bzw. 30 mm bei LB₁₀) breiter als die Klemmbacken waren.

Die Krafteinleitung erfolgte weggesteuert, ohne Hysterese bei den meisten Vorversuchen und mit Hysterese bei den Hauptprüfungen, ebenso wie beim Versuch mit den Dehnmessstreifen. Die Prüfgeschwindigkeiten der dazugehörigen Prüfungen sind in den Abschnitten 7-9 und 7-11 zu entnehmen. Diese wurde so bestimmt, dass das Versagen innerhalb von 300 s erfolgte. Bei manchem Prüfkörper wurde die Prüfgeschwindigkeit nach dem ersten Versuch adaptiert, um die Bruchlast innerhalb der gewünschten Zeit zu erreichen. Alle Prüfkörper wurden schließlich bis zum Bruch belastet.

Bei den Prüfungen mit der Messeinrichtung wurden die Messdaten parallel überwacht, um gewisse Unregelmäßigkeiten, wenn vorhanden, zu erkennen und die Prüfung zu stoppen. Wünschenswert war es, diese Unregelmäßigkeiten noch im elastischen Bereich einzusehen. Dies war jedoch nicht immer möglich. Nach der Beseitigung der Ursache wurde die Prüfung erneut gestartet.

Nach dem Erreichen der Bruchlast und Speicherung der Rohdaten wurde die Kraft manuell bis zum vollständigen Ausziehen des Bleches gesteigert. Während und nach der Prüfung wurde alles fotografisch dokumentiert. Zudem wurde ein Prüfprotokoll geführt, in dem die Kraft, die Bruchseite und andere Anmerkungen aufgezeichnet (wie zum Beispiel die Initialrisse, Ausfallen der Wegaufnehmer) wurden.

Im Anschluss der Prüfungen wurde an der Bruchseite (oben oder unten), direkt unter dem Schlitz, ein rund 27 mm (laut Norm EN 13183-1:2004 [75] minimal 20 mm) breiter Streifen zur Bestimmung der Holzfeuchte und der „lokalen“ Rohdichte herausgeschnitten. Diese wurden beschriftet, abgemessen sowie abgewogen und in den Darrschrank gegeben. Nach der Trocknung (gemäß EN 13183-1:2004) erfolgte ein erneutes Abwiegen und die Ermittlung der genannten Parameter.

Zuletzt wurden die Bruchflächen eingescannt, um einen besseren Überblick über die Versagensmechanismen zu bekommen.

7-7 PRÜFDATEN

7-7.1 ROHDICHTE

Wie im Abschnitt 7-3.1 schon erwähnt, wurde die Rohdichte der Holzprüfkörper gemäß ON ISO 3131:1996 [74] aus dem Quotient der Masse und des Volumens ermittelt (siehe Gleichung (7.1)).

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{b \cdot h \cdot l_{\text{Holz}}} \quad (7.1)$$

mit

ρ	Holzrohndichte [kg/m^3]
m	Masse des Prüfkörpers [kg]
V	Volumen des Prüfkörpers [m^3]
b	Breite des Prüfkörpers [m]
h	Höhe des Prüfkörpers [m]
l_{Holz}	Länge des Prüfkörpers [m].

7-7.2 HOLZFEUCHTE

Nach den Prüfungen wurde die Holzfeuchte an Darrproben nach der EN 13183-1:2004 [75] bestimmt. Das Entnehmen der Darrproben ist im Abschnitt 7-6 beschrieben. Die Holzfeuchte wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$u = \frac{m_1 - m_o}{m_o} \cdot 100 \quad (7.2)$$

mit

u	der Feuchtegehalt [%]
m_1	die Masse des Prüfkörpers vor dem Trocknen [g]
m_o	die Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand [g].

7-7.3 EINZELAUSWERTUNG DER VORVERSUCHE

Die Einzelauswertung jedes Prüfkörpers erfolgte mittels Computerprogramm Excel (2010). Zu Beginn wurden die Messdaten eingelesen (Kraft, Zeit, Traversenweg sowie die Verformungsdaten der DMS bei den Vorversuch 02) und die benötigten Material- und Geometriedaten der Prüfkörper eingegeben.

Mit diesen Eingangsdaten wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Darstellung der Kraft-Weg-Diagramme, woraus das Verhalten der Verbindung und der Unterschied im Versagensbild ersichtlich ist,
- Auslesung der maximalen Kraft,
- Berechnung der Bruttozugspannungen des Holzes,
- Berechnung der Brutto- und Nettozugspannungen des Stahles und
- Berechnung der Scherspannungen in der Klebefuge.

Die Werte der genannten Spannungen wurden durch den Quotient der maximal erreichbaren Kraft und der dazugehörigen belasteten Fläche ermittelt. Danach wurden sie mit den bekannten Materialfestigkeiten verglichen. Die Ermittlung erfolgte mit Gleichung (7.3) bis Gleichung (7.6):

$$\sigma_{b,H} = \frac{F_{\max}}{A_{\text{brutto}}} = \frac{F_{\max}}{b \cdot h} \quad (7.3)$$

mit

$\sigma_{b,H}$	Bruttozugspannung im Holz [N/mm ²]
F_{\max}	maximal erreichbare Kraft [N]
A_{brutto}	Bruttoquerschnittsfläche des Holzes [mm ²]
b	Breite des Holzprüfkörpers [mm]
h	Höhe des Holzprüfkörpers [mm]

$$\sigma_{b,B} = \frac{F_{\max}}{A_{\text{brutto}}} = \frac{F_{\max}}{b \cdot t} \quad (7.4)$$

mit

$\sigma_{b,B}$	Bruttozugspannung im Blech [N/mm ²]
F_{\max}	maximal erreichbare Kraft [N]
A_{brutto}	Bruttoquerschnittsfläche des Bleches [mm ²]
b	Breite des Bleches [mm]
t	Dicke des Bleches [mm]

$$\sigma_{n,B} = \frac{F_{\max}}{A_{\text{netto}}} = \frac{F_{\max}}{b_{\text{netto}} \cdot t} \quad (7.5)$$

mit

$\sigma_{n,B}$	Nettozugspannung im Blech [N/mm ²]
F_{\max}	maximal erreichbare Kraft [N]
A_{netto}	Nettoquerschnittsfläche des Bleches [mm ²]
b_{netto}	Nettobreite des Bleches (abzüglich der Lochbreiten) [mm]
t	Dicke des Bleches [mm]

$$\tau_{\text{Kleb}} = \frac{F_{\max}}{A_{\text{Kleb}}} = \frac{F_{\max}}{b \cdot l_{\text{Kleb}}} \quad (7.6)$$

mit

τ_{Kleb}	Scherspannung in der Klebefuge [N/mm ²]
F_{\max}	maximal erreichbare Kraft [N]
A_{Kleb}	Klebefläche [mm ²]
b	Breite des Bleches [mm]
l_{Kleb}	Einklebelänge [mm].

Für den Vorversuch 02 mit den Dehnmessstreifen wurde die Gleichung (7.7) für die Ermittlung der Stahlnormalspannung und die Gleichungen (7.8) bis (7.10) für die Ermittlung der Scherspannung verwendet. Die Berechnung der Stahlnormalspannung erfolgte unter Zugrundelegung des Hooke'schen Gesetzes, wobei die Dehnungsermittlung aus den Prüfdaten erfolgte. Mit den aus den Verformungsmessungen resultierenden Dehnungen an den Stellen i und j sowie dem bekannten Stahl-E-Modul können die Kräfte F_i und F_j ermittelt werden. Die Scherspannung ergibt sich in Folge aus der Differenz der beiden Kräfte geteilt durch die Scherfläche zwischen den beiden benachbarten Messstellen.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (7.7)$$

mit

σ	Stahlnormalspannung [N/mm ²]
E	E- Modul des Stahles [N/mm ²]
ε	ermittelte Dehnung aus den Prüfdaten [-]

$$F_i = E \cdot A_n \cdot \varepsilon_i \quad (7.8)$$

$$F_j = E \cdot A_n \cdot \varepsilon_j \quad (7.9)$$

$$\tau = \frac{F_i - F_j}{A_m} \quad (7.10)$$

mit

F_i, F_j	Kraft auf dem Stahlblech in den benachbarten Messstellen i und j [N]
E	E- Modul des Stahles [N/mm ²]
A_n	Stahlquerschnittsfläche [mm ²]
$\varepsilon_i, \varepsilon_j$	Dehnungen bezogen auf die Messstellen i und j [-]
A_m	Scherfläche zwischen zwei benachbarten Messstellen [mm ²].

7-7.4 EINZELAUSWERTUNG DER HAUPTPRÜFUNGEN

Wie bei den Vorversuchen, wurden alle Prüfkörper einzeln mit dem Computerprogramm Excel (2010) ausgewertet. Die Messdaten wurden eingelesen und die benötigten Parameter eingegeben.

Neben der Berechnung der oben erwähnten Spannungen und Kräfte, wird nachfolgend auf die Berechnung weiterer Kennwerte eingegangen:

- E- Modul des Holzes und
- Verschiebungsmodul der Verbindung.

Die Ermittlung des E-Moduls erfolgte nach folgender Gleichung (in Anlehnung an ÖNORM EN 408:2010):

$$E_{t,0} = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l}{(w_2 - w_1) \cdot A} \quad (7.11)$$

mit

$E_{t,0}$	E-Modul aus Zugprüfung parallel zur Faser [N/mm ²]
$F_2 - F_1$	Kraftdifferenz der Kraft zwischen 0,1 F_{\max} und 0,4 F_{\max} [N]
l	Länge des Messbereichs der lokalen Wegmessung [mm]
$w_2 - w_1$	Verformungszunahme entsprechend $F_2 - F_1$ [mm]
A	Querschnittsfläche in welcher die lokale Wegmessung stattfindet [mm ²].

Dabei wurde eine lineare Regressionsanalyse angewendet.

Die Berechnung des Verschiebungsmoduls der Verbindung erfolgte nach folgender Gleichung:

$$K_{ser} = \frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1} \quad (7.12)$$

mit

K_{ser}	Verschiebungsmodul der Verbindung [N/mm]
$F_2 - F_1$	Kraftdifferenz der Kraft zwischen 0,1 F_{max} und 0,4 F_{max} [N]
$w_2 - w_1$	Verformungszunahme entsprechend $F_2 - F_1$ [mm].

Zu betonen ist, dass der E-Modul und der Verschiebungsmodul jeweils für den Erstbelastungsast und den Zweitbelastungsast berechnet wurden.

7-7.5 STATISTISCHE AUSWERTUNG

Anschließend erfolgte eine statistische Auswertung der Einzelergebnisse mittels des Computerprogramms R (2014). Im Folgenden werden die benötigten statistischen Kenngrößen nach [65] kurz beschrieben und mit Gleichungen ergänzt.

Der arithmetische Mittelwert stellt den Quotient der Summe aller Betrachtungen und der Anzahl der Betrachtungen dar (7.13).

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{X}_i \quad (7.13)$$

Die Streuung einer Verteilung wird durch die Varianz gekennzeichnet. Diese ist wieder abhängig von den quadratischen Abweichungen vom Mittelwert und der Anzahl der Beobachtungen.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (7.14)$$

Die Standardabweichung ist die Wurzel aus der Varianz und stellt die Streubreite um den Mittelwert dar.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (7.15)$$

Zuletzt stellt der Variationskoeffizient den Quotient der Standardabweichung und des arithmetischen Mittelwertes dar.

$$V = \frac{s}{\bar{X}} \quad (7.16)$$

7-8 BERECHNUNG DER CHARAKTERISTISCHEN WERTE

Für die Berechnung der charakteristischen Werte nach ÖNORM EN 14358:2007 [53] sind der Mittelwert und die Standardabweichung notwendig. Diese werden nach folgenden Gleichungen ermittelt:

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (7.17)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{Y})^2} \quad (7.18)$$

wobei

y	der Mittelwert,
n	die Anzahl der Prüfergebnisse,
m _i	die Prüfergebnisse und
s _y	die Standardabweichung sind.

Der charakteristische Wert ist zudem vom k_s-Faktor abhängig, der abhängig von der Losgröße, welche aus der Tabelle 1 der oben erwähnten Norm zu entnehmen ist. Der charakteristische Wert wird definiert mit der Gleichung:

$$m_k = \exp(\bar{Y} - k_s \cdot s_y) \quad (7.19)$$

wobei

y	der Mittelwert,
k _s	der Faktor zur Berücksichtigung des Probenumfangs (für 5 Prüfkörper k _s = 2,46; für 10 Prüfkörper k _s = 2,10) und
s _y	die Standardabweichung sind.

7-9 VORVERSUCHE

Der Unterschied zwischen den Vorversuchen und den Hauptversuchen liegt in zwei Punkten begründet. Einer der Unterschiede zu jenen der Hauptprüfungen, wie bereits erwähnt, liegt in der Benutzung der Messeinrichtung. Ein weiterer Unterschied liegt in der größeren Anzahl der Variationen und zugleich in der geringeren Anzahl der Versuche pro Variation.

Trotz der geringen Anzahl an Versuchen pro Variation, konnten wichtige Einblicke aus experimenteller Sicht gewonnen werden, woraus die Schwerpunktsetzung für die weiteren Untersuchungen abgeleitet werden konnten. Aus den Versuchsergebnissen konnten Schlussfolgerungen sowie notwendige Verbesserungsmaßnahmen für die späteren Hauptprüfungen gezogen werden. Hinzuweisen ist, dass es sich um einen geringen Prüfkörperumfang handelt, der keine statistische Auswertung zulässt.

Aus den Vorversuchen sollten der Einfluss:

- des Klebstoffes,
- des Bleches,
- der Oberflächenbehandlung,
- der Lochungen,
- der Reduktion der Klebefläche,
- der Anordnung des Bleches in Hinblick auf die Furnierrichtung,
- der Quersugbewehrung und
- der Normalspannungsverteilung im Stahlblech geklärt werden.

7-9.1 VORVERSUCH 01

Der Vorversuch 01 umfasste die Variation von drei unterschiedlichen Stahlblechen mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen und vier Klebstoffen. Insgesamt wurden 18 Prüfkörper hergestellt, pro Variation ein bis maximal zwei Prüfkörper (siehe Tabelle 7.3). Eine Prüfung erfolgte unter Anbringung einer Zwinde zur Reduktion der Querbeanspruchung am Beginn des Verbundbereiches, wodurch sich möglicherweise eine Tragfähigkeitssteigerung erzielen lässt (siehe Abbildung 7.22 – links). Bei einer Prüfung wurde die Klebefläche durch Verringerung der Klebebreite mittels Klebeband reduziert (siehe Abbildung 7.22 – rechts). Dementsprechend ergaben sich folgende Prüfkörperbezeichnungen (Abbildung 7.21).

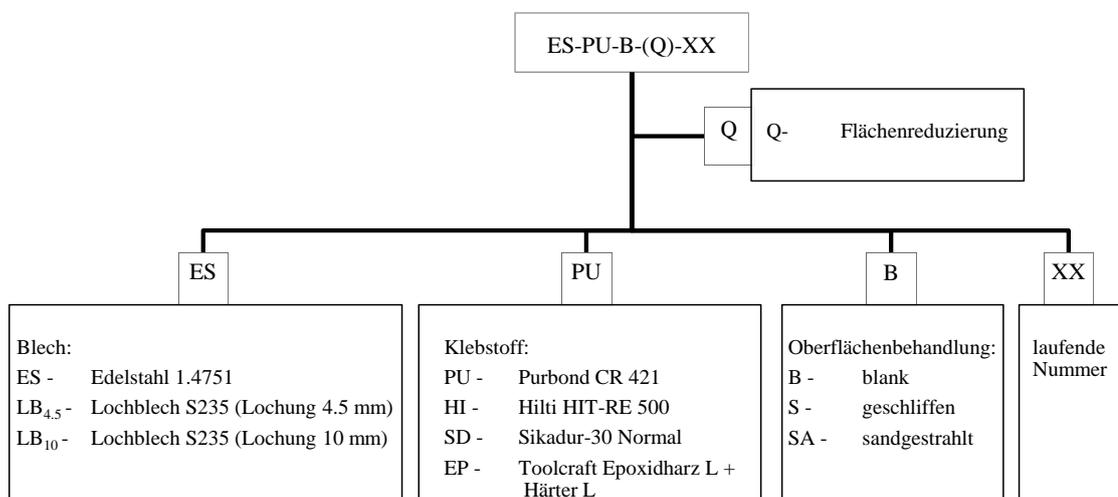


Abbildung 7.21: Prüfkörperbezeichnung des Vorversuches 01



Abbildung 7.22: Spezielserien: Zwinge (links), Flächenreduzierung (rechts)

Eine Zusammenfassung aller Prüfkörper aus der Gruppe Vorversuch 01 ist mit Parameterabkürzungen in der Tabelle 7.3 gegeben. Dabei ist auch die Aushärtezeit bis zum Zeitpunkt des Prüfens in Tagen angegeben. Anzumerken ist, dass einige Prüfkörper mit dem PU-Klebstoff kürzer ausgehärtet haben als empfohlen. Gemäß Datenblatt erreicht der PU nach sieben Tagen einen Aushärtegrad von über 90 %, was als zufriedenstellend anzusehen war.

Die Länge des Prüfkörpers betrug bei allen Prüfkörpern, außer den ES-PU-B-0X, 360 mm. Bei zwei Ausnahmen waren die Prüfkörper 500 mm lang (vergleiche Abschnitt 7-3.1). Aus der Summe der Klebstofffugendicke und den vorgestellten Stahlblechdicken ergab sich die endgültige Schlitzbreite.

Tabelle 7.3: Prüfkörperbeschreibung aus dem Vorversuch 01

Prüfkörper- bezeichnung	Blech	Oberflächen- behandlung	Klebstoff	Klebstoff- fugendicke [mm]	Anzahl	Aushärte- zeit [Tag]
ES-PU-B-0X	ES	blank	PU	1,0	2	13 (14)*
ES-PU-S-0X	ES	geschliffen	PU	1,0	2	19 (21)*
ES-PU-S-Q-01	ES	geschliffen	PU	1,0	1	7 (8)*
ES-PU-SA-01	ES	sandgestrahlt	PU	1,0	1	7 (8)*
ES-PU-SA-Q-01	ES	sandgestrahlt	PU	1,0	1	7 (8)*
ES-SD-S-01	ES	geschliffen	SD	1,5	1	19 (21)*
ES-EP-S-01	ES	geschliffen	EP	1,0	1	19 (21)*
ES-HI-S-01	ES	geschliffen	HI	1,5	1	19 (21)*
ES-HI-SA-01	ES	sandgestrahlt	HI	1,5	1	7 (8)*
LB4.5-PU-S-01	LB _{4,5}	geschliffen	PU	1,0	1	19 (21)*
LB4.5-EP-S-01	LB _{4,5}	geschliffen	EP	1,0	1	20 (22)*
LB10-EP-S-01	LB ₁₀	geschliffen	EP	1,5	1	20 (22)*
LB10-HI-S-01	LB ₁₀	geschliffen	HI	2,0	1	20 (22)*
LB10-SD-S-01	LB ₁₀	geschliffen	SD	2,0	1	20 (22)*
LB10-PU-S-01	LB ₁₀	geschliffen	PU	1,5	1	8 (9)*
LB10-PU-S-Q-01	LB ₁₀	geschliffen	PU	1,5	1	8 (9)*

* die Klammerwerte beziehen sich auf die zuerst eingeklebte Seite

Die Prüfgeschwindigkeit, abhängig vom benutzten Stahlblech, ist in der folgenden Tabelle angegeben. Dabei wurde die Prüfgeschwindigkeit beim ersten Prüfkörper mit dem Lochblech LB_{4,5}-s von 0,23 auf 1,0 und schließlich auf 5,0 mm/min gesteigert.

Tabelle 7.4: Prüfgeschwindigkeit ohne Hysterese für Vorversuch 01

	ES	LB _{4,5}	LB ₁₀
v [mm/min]	0,23	(0,23/1,0/5,0) 5,0	5,0

7-9.2 VORVERSUCH 02

Die Vorversuchsgruppe 02 umfasst eingeklebte Sika-CarboDur-Lamellen mittels des Klebstoffes Sikadur 30 Normal. Untersucht wurde die Haftung dieses Klebstoffes auf anderen Materialien, die ähnliche Geometrieverhältnisse wie die Edelstahlbleche haben.

Dabei wurde der Einfluss der Anordnung der Lamellen in Bezug auf die Furnierlagen (senkrecht und parallel) und die Auswirkung der Querkzugverstärkung auf die Tragfähigkeit untersucht. Unter der Querkzugverstärkung werden 3 mm dicke aufgeklebte Furniere mittels Purbond S 309 verstanden. Es wurde jeweils ein Prüfkörper pro Variation hergestellt und geprüft (Abbildung 7.23) – insgesamt vier Prüfkörper.

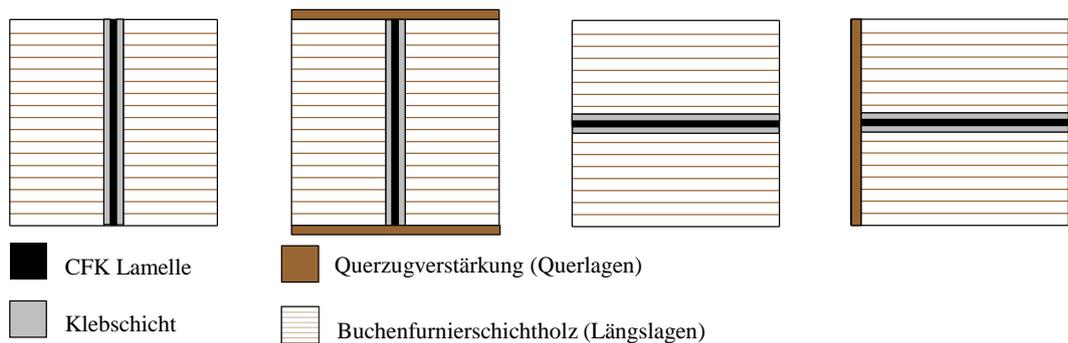


Abbildung 7.23: schematische Darstellung der Querschnitte der Prüfkörper der Vorversuchsgruppe 02

Die Prüfkörper haben mindestens 14 Tage ausgehärtet: drei davon 14 (15) und einer 18 (19) Tage. Die Klammerwerte beziehen sich auf die zuerst eingeklebte Seite. Beschriftet wurden sie gemäß Abbildung 7.24.

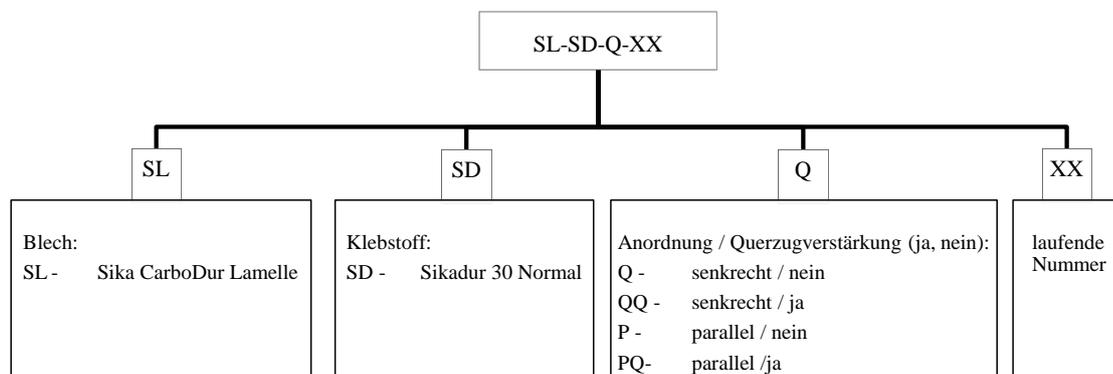


Abbildung 7.24: Prüfkörperbezeichnung des Vorversuches 02

Die Prüfgeschwindigkeit wurde für den ersten Prüfkörper mit 0,23 mm/min eingestellt und bei den übrigen drei ist sie auf 0,7 mm/min gesteigert worden (Tabelle 7.5).

Tabelle 7.5: Prüfgeschwindigkeit ohne Hysterese für den Vorversuch 02

SL

v [mm/min]

(0,23) 0,7

7-9.3 VORVERSUCH 03

Der Zweck des Vorversuchs 03 war die Ermittlung der Stahldehnungen entlang des eingeklebten Bleches, woraus sich Normalspannungen und Scherspannungen an definierten Messstellen errechnen lassen, welche in weiterer Folge zu Abschätzung des vorliegenden Normal- und Scherspannungsverlaufs entlang der Klebschicht dienen (siehe Abschnitt 7-7.3). Dafür wurden Dehnmessstreifen mittig auf die Stahloberfläche aufgeklebt. Die Positionen der Dehnmessstreifen sind in Abbildung 7.25 dargestellt.

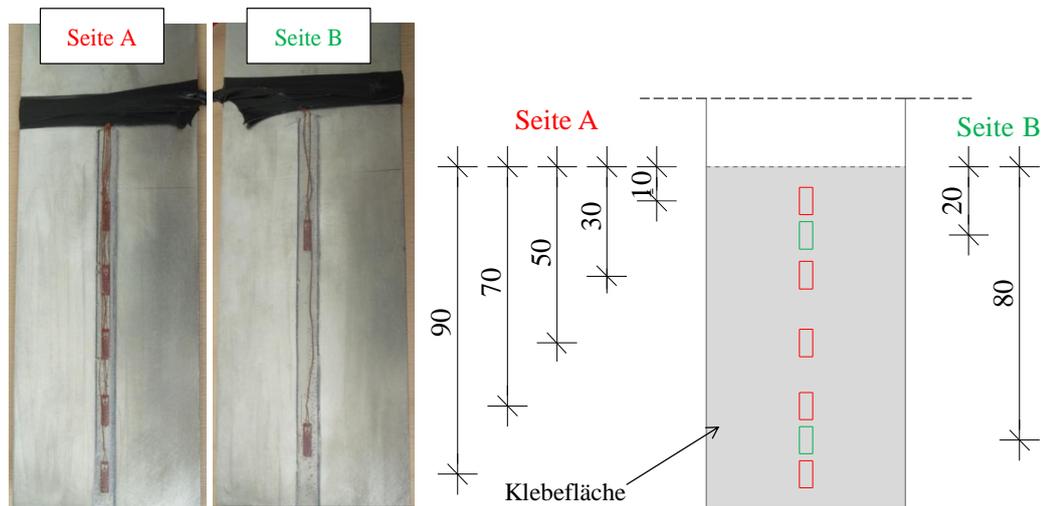


Abbildung 7.25: Positionen der Dehnmessstreifen für den Vorversuch 03

Der Prüfkörper wurde gemäß der Abbildung 7.26 beschriftet, wobei anzumerken ist, dass es sich um ein geschliffenes Stahlblech handelt. Die Mindestaushärtezeit des Prüfkörpers betrug 9 Tage.

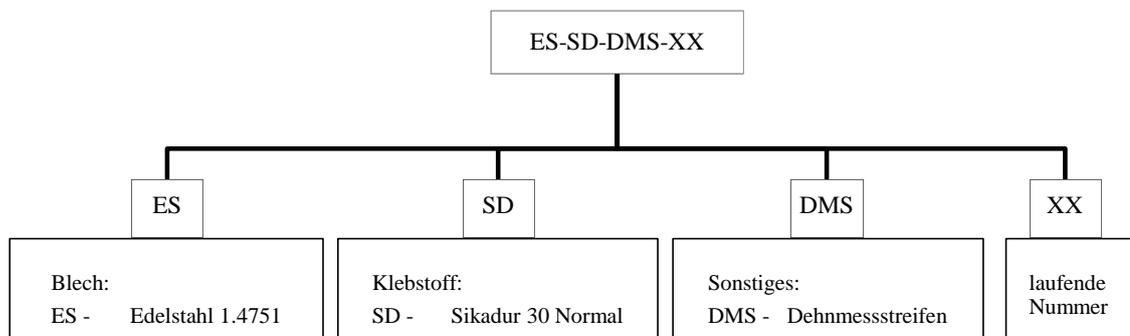


Abbildung 7.26: Prüfkörperbezeichnung des Vorversuches 03

In diesem Versuch erfolgte die Kraftaufbringung mit Hysterese in Anlehnung an ÖNORM EN 26891:1991 [34]. Die erwarteten Lasten und Prüfgeschwindigkeiten sind in der Tabelle 7.12 zusammengefasst und durch die dazugehörige Skizze ergänzt (siehe Abbildung 7.27).

Tabelle 7.6: Prüfgeschwindigkeit mit Hysterese für den Vorversuch 03

	ES – DMS
0,4 Fest [kN]	12
0,1 Fest [kN]	3
$v_{0,4} / v_{1,0}$ [mm/min]	0,24
$v_{0,1}$ [mm/min]	0,48

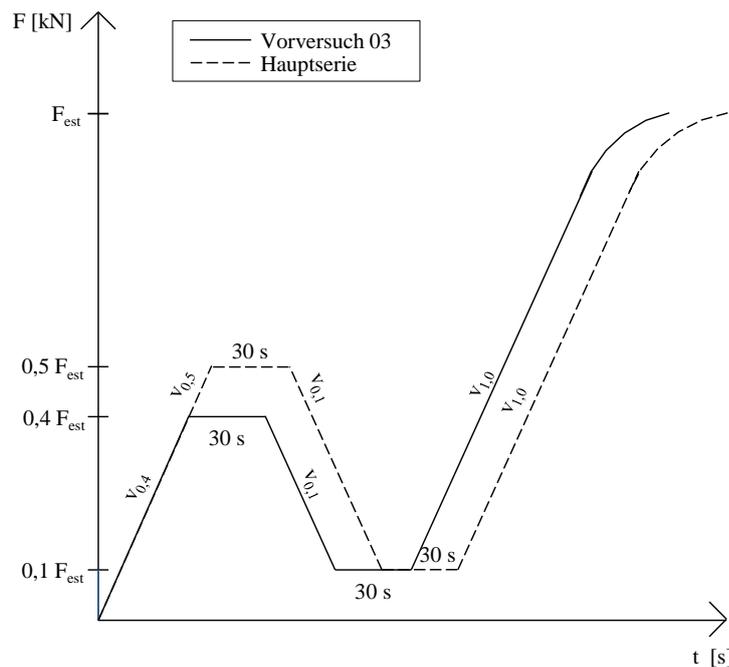


Abbildung 7.27: Lastaufbringung für den Vorversuch 03 und die Hauptserie

7-9.4 VORVERSUCH 04

Da sich herausstellte, dass die mechanische Verankerung des Klebstoffes mit dem Stahl ein wichtiger Faktor ist, wurden im Nachhinein zwei unterschiedliche Blecharten untersucht. Dabei handelt es sich um ein Streckmetall- und ein Lochblech mit Längslöchern aus Aluminium, die auf einer Seite des Prüfkörpers eingeklebt wurden. Auf der gegenüberliegenden Seite wurde ein geschliffenes Edelstahlblech eingeklebt. Das Einkleben erfolgte mit dem CO Klebstoff. Daraus ergibt sich die Prüfkörperbezeichnung, dargestellt in Abbildung 7.44.

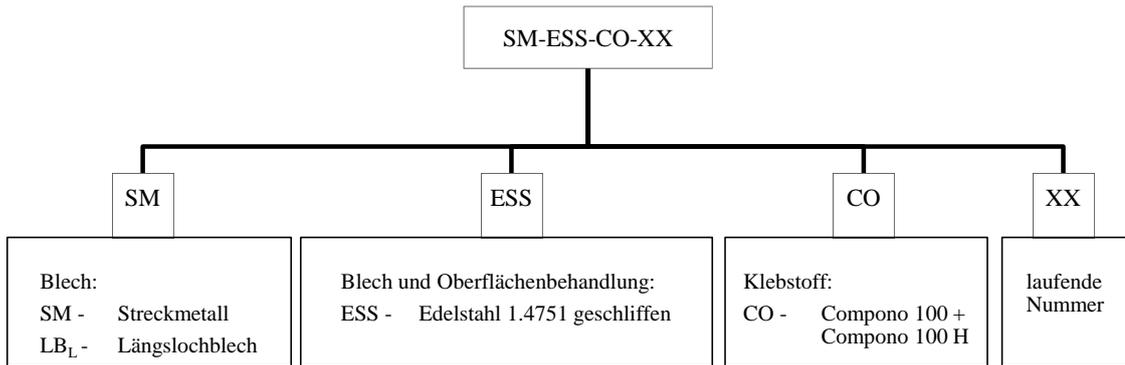


Abbildung 7.28: Prüfkörperbezeichnung des Vorversuchs 04

Die Prüfgeschwindigkeit wurde für den jeweils ersten Prüfkörper mit 1,0 mm/min angenommen und danach angepasst.

Tabelle 7.7: Prüfgeschwindigkeiten ohne Hysterese für die Nachversuche

	SM-ESS-CO-01	SM-ESS-CO-02	LBL-ESS-CO-01	LBL-ESS-CO-02
v [mm/min]	1,0	2,0	1,0	0,5

7-10 ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER VORVERSUCHE

7-10.1 ROHDICHTE UND HOLZFEUCHTE

Die mittlere Rohdichte aller Prüfkörper betrug $754,6 \text{ kg/m}^3$ und die mittlere Holzfeuchte lag bei 8,2%.

7-10.2 MATERIALKENNWERTE DES EDELSTAHLBLECHES

Zur Ermittlung der Materialkennwerte (Zugfestigkeit, Dehngrenze und E-Modul) des Edelstahlbleches wurden drei Zugprüfungen durchgeführt. Die Prüfungen erfolgten an der TVFA der TU Graz an der Prüfmaschine *Amsler UPM F29 (400kN)*. Angebracht wurde eine Vorspannung von 30 MPa. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 2 mm/min und die Verformungen wurden mit Extensometer Instron 50 mitgemessen. Die Mittelwerte aus den drei Versuchen sind in der Tabelle 7.8 zusammengefasst.

Tabelle 7.8: Materialkennwerte des Edelstahlbleches

Bezeichnung	Zugfestigkeit [N/mm ²]	0.2% Dehngrenze [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]
Probe 1	602,9	312,9	164.900
Probe 2	603,4	317,5	163.500
Probe 3	601,6	322,4	169.300
Mittelwert	602,6	317,6	166.900

7-10.3 TRAGVERHALTEN DER VORVERSUCHE

Den unterschiedlichen Tragverhalten der Prüfkörper aus den Vorversuchen wurde jeweils eine typische Kurve zugeordnet, die dann im Weiteren detaillierter beschrieben wird. Insgesamt sind acht Tragverhalten (bezeichnet von „a“ bis „h“) zu unterscheiden zwischen denen wieder Ähnlichkeiten vorhanden sind. Für einen groben Überblick (im gleichen Maßstab) sind sie in der Abbildung 7.29 zusammengefasst. Die dazugehörigen Bruchbilder und die Zuordnung der Kurven zu jedem Prüfkörper sind im Anhang zu entnehmen.

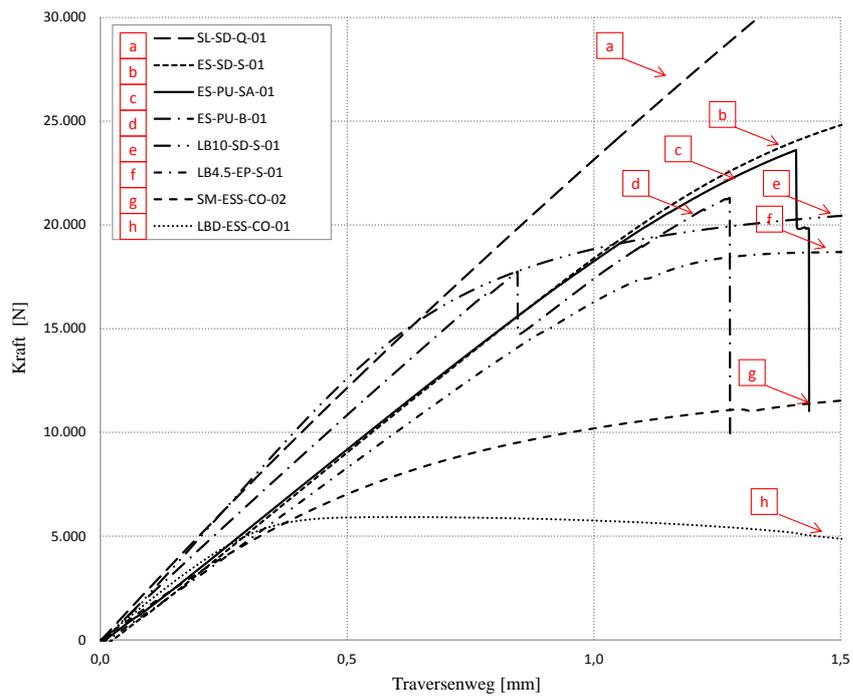
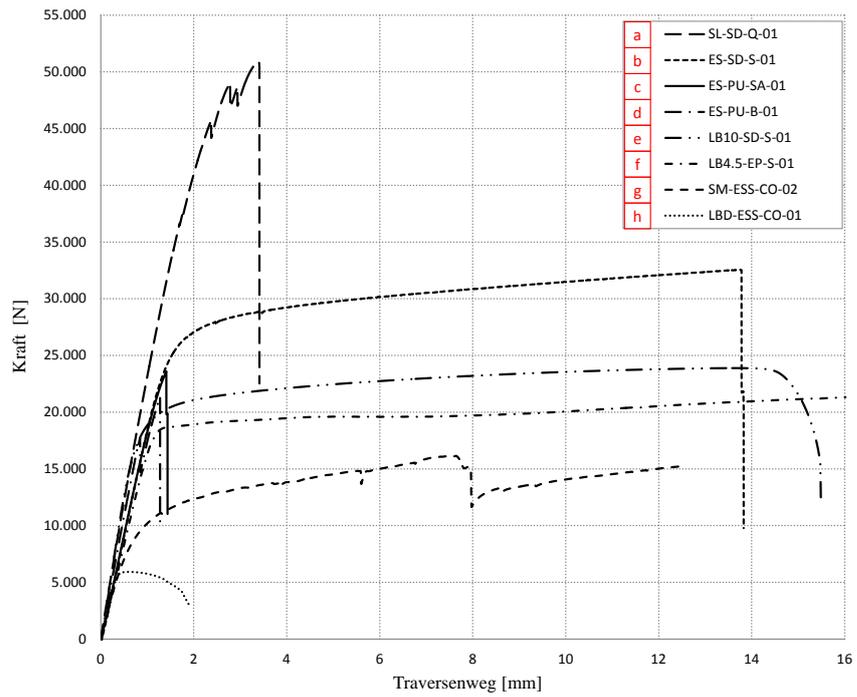


Abbildung 7.29: typische Kraft-Weg Diagramme der Vorversuche: grober Überblick (oben) und die vergrößerte Darstellung (unten)

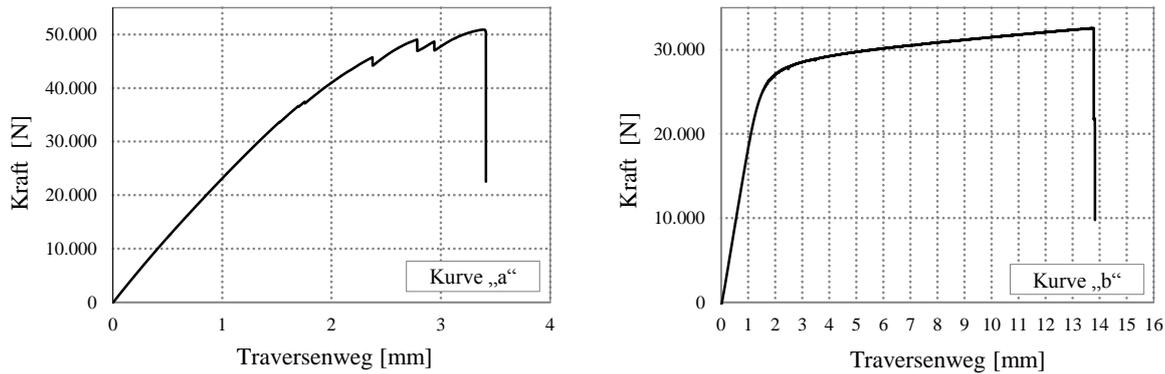


Abbildung 7.30: Veranschaulichung der Kurven „a“ und „b“ (unterschiedliche Maßstäbe)

Die Kurve „a“ stellt den üblichen Verlauf der Vorversuche 02 dar, das heißt der Prüfkörper mit eingeklebten Sika-CarboDur-Lamellen. Für die ersten Initialrisse ist das Versagen der Lamellen bei der Einspannvorrichtung (Klemmbacken) verantwortlich. Die Last war im Krafteinleitungsbereich, aufgrund der 10 mm breiteren Lamellen im Vergleich zu den Klemmbacken, nicht gleichmäßig verteilt. Dies führte zum Versagen der Lamellen in Längsrichtung zwischen der Einspannvorrichtung und den hervorstehenden Seiten der Lamellen. Der Riss ging bis zum Hirnholz bei einer Last von über 40 kN. Aus dem Bruchbild lässt sich auf eine Kombination von Scher- (Holz), Kohäsionsbruch (Klebstoff) und teils Bruch der Lamelle (Kohlefaser) schließen (siehe Anhang B).

Die Kurve „b“ charakterisiert das Verhalten einiger Prüfkörper aus dem Vorversuch 01 (Zuteilung der Kurven im Anhang B ersichtlich), die mit Edelstahlblechen und mit den Klebstoffen SD und HI hergestellt wurden. Dabei war die Haftung des Klebstoffes mit den Fügeteilen bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze des Edeldstahls ausreichend. Jedoch resultierte kein Prüfkörper mit einem Stahlbruch. Die Kurve zeigt zuerst einen linear-elastischen Anstieg und nach über 20 kN geht sie in einen kürzeren oder längeren plastischen Bereich über. Dementsprechend liegen die Bruchverformungen zwischen 3 mm und 15 mm. Ähnliches Verhalten zeigte auch der Prüfkörper mit der angebrachten Zwinge. Die vorwiegende Bruchursache in diesem Fall war die fehlende Haftung zwischen dem Stahlblech und dem Klebstoff begleitet von kleinen Rissen innerhalb der Klebstoffuge. Nebenbei konnten auch kleine Flächenanteile, die auf Holzschersbruch und Kohäsionsbruch im Klebstoff hindeuten, beobachtet werden. Große Stahlverformungen könnten erste Risse innerhalb der Klebstoffuge verursacht haben, die in weiterer Folge zu einem Versagen der gesamten Klebschicht führten.

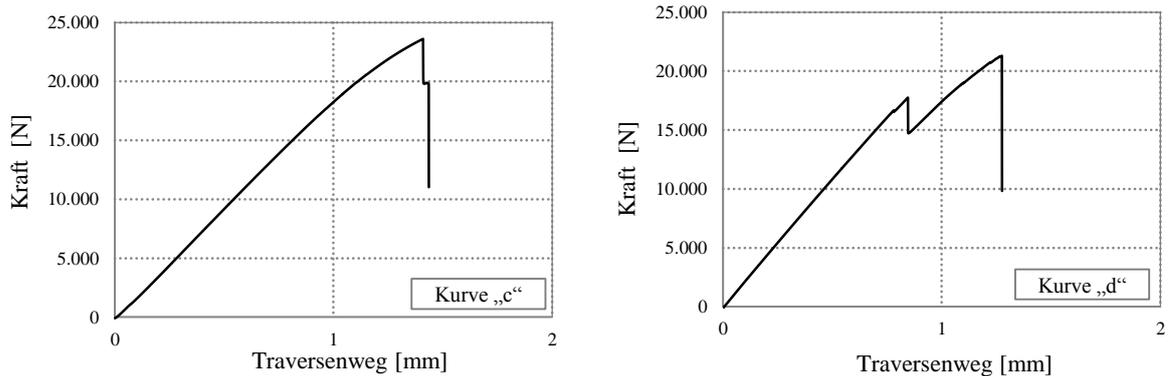


Abbildung 7.31: Veranschaulichung der Kurven „c“ und „d“ (unterschiedliche Maßstäbe)

Die Kurve „c“ bildet das Tragverhalten einiger Prüfkörper aus dem Vorversuch 01 ab. Sichtbar ist ein linear-elastisches Verhalten gefolgt mit einem spröden Bruch. Die Bruchverformungen reichten bis 2 mm. Ähnliches Verhalten hatten auch die Prüfkörper, die mit der Kurve „d“ gekennzeichnet werden.

Im Unterschied zu der Kurve „c“ kam vor dem Bruch eine „Ankündigung“ durch den ersten Initialriss. Da kam es zu Entfestigung einer Klebschichtseite. Die Last wurde auf die zweite Klebschicht umgelagert und wieder gesteigert (siehe Abbildung 7.32).



Abbildung 7.32: Umlagerung der Kräfte auf die linke Seite

Die Umlagerung der Kräfte führte zu Entstehung von Biegemomenten, die wiederum zu Komplexität des Spannungszustandes beitrugen.

Schließlich versagten die Prüfkörper spröde. Die Bruchbilder waren ähnlich den Bruchbildern der vorherigen Gruppe.

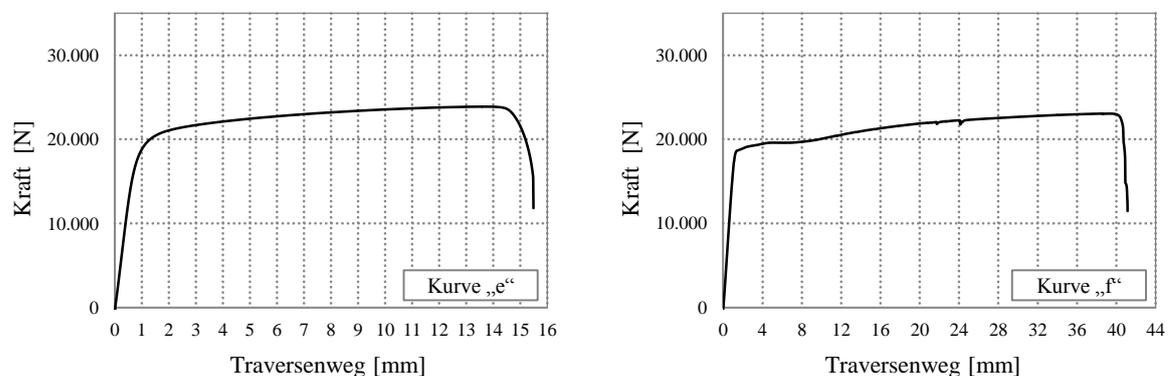


Abbildung 7.33: Veranschaulichung der Kurven „e“ und „f“ (unterschiedliche Maßstäbe)

Die Form der Kurven „e“ und „f“ veranschaulichen ein ausgeprägtes duktiles Verhalten, welchem ein linear-elastischer Anstieg vorausging. Die Kurve „e“ repräsentiert alle Prüfkörper mit den eingeklebten Lochblechen LB₁₀. Bei allen trat ein Stahlbruch im Nettoquerschnittsbereich nahe dem Anfang des Einklebbereiches auf, weswegen nicht näher darauf eingegangen wird.

Die Kurve „f“ stellt das Verhalten der eingeklebten Lochbleche LB_{4,5} mit einer Wiederverfestigung des Stahles dar. Hier kam es bei einem Prüfkörper zum Stahlversagen im Nettoquerschnittsbereich und andererseits zu einer Kombination von unterschiedlichen Versagensmechanismen, auf die später näher eingegangen wird.

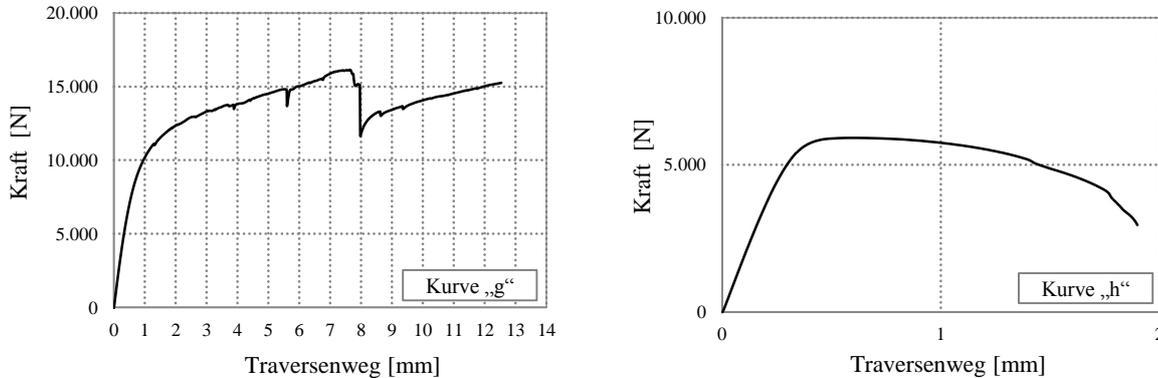


Abbildung 7.34: Veranschaulichung der Kurven „g“ und „h“ (unterschiedliche Maßstäbe)

Die Kurve „g“ bildet einen typischen Verlauf der Prüfkörper mit eingeklebten Streckmetallen (Vorversuch 03). Obwohl dieses Blech für diesen Einsatz nicht geeignet ist, zeigte er zufriedenstellende Ergebnisse. Hierbei sind wieder die zwei Bereiche ersichtlich – der anfangs lineare Anstieg und das spätere duktilere Verhalten. Der Letzte ist mit vielen Initialrissen begleitet, für die folgender Erklärungssatz vorliegt. Das Streckmetall hat sich zwischen den Klemmbacken und dem Hirnholz unter der Zuglast verjüngt, was auch Verformungen im Einklebebereich hervorruft. Diese verursachten Querdruck sowie Querkzug auf den Klebstoff innerhalb der Masche neben den schon erwähnten auftretenden Spannungen. Als Resultat kam es zu Initialrissen, Umlagerungen auf benachbarte Bereiche, weitere Laststeigerungen und schließlich zu einem Herausziehen des Bleches.

Im Gegensatz dazu zeigten die anderen Prüfkörper aus dem Vorversuch 03, genauer gesagt die Prüfkörper mit eingeklebten Längslochblechen, ein Tragverhalten gemäß der Kurve „h“. Hier kam es zum stufenförmigen Bruch des Metalls außerhalb des Einklebebereichs. Aus diesem Grund wird nicht näher darauf eingegangen.

7-10.4 TRAGFÄHIGKEIT

Unter Tragfähigkeit der Verbindung wird die erreichte Maximalkraft F_{\max} , die während der Zugprüfung aufgezeichnet und ausgewertet wurde, verstanden. Die einzelnen Prüfwerte sind in Abbildung 7.35 dargestellt.

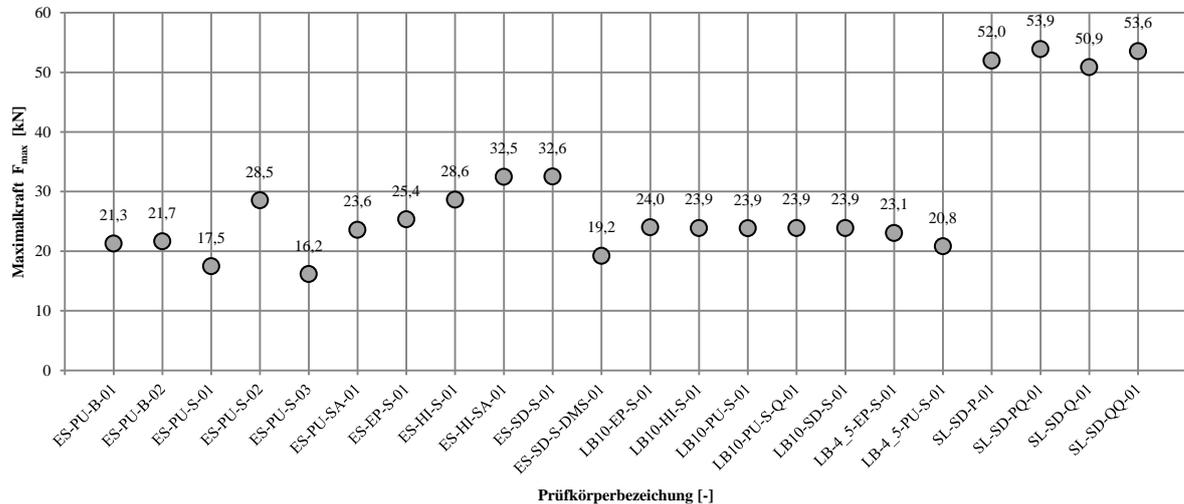


Abbildung 7.35: Zusammenstellung der Tragfähigkeiten bzw. Maximalkräfte der Vorversuche

Die niedrigsten Werte der Tragfähigkeit lagen bei $F_{\max} = 16,2$ kN und $F_{\max} = 17,5$ kN bei Verwendung des Polyurthanklebstoffes (Purbond CR 421) mit geschliffenem Edelstahlblech. Auffallend ist der im Vergleich zu ES-PU-S-01 und -03 höhere Wert von ES-PU-S-02 mit $F_{\max} = 28,5$ kN, der auf einen positiven Effekt durch Anbringung einer Zwinge im Krafteinleitungsbereich schließen lässt (siehe Abbildung 7.22). Die höchsten Maximalkräfte ergaben sich mit eingeklebten Kohlefaserlamellen, die mit einem darauf abgestimmten Klebstoff, zwischen 50,9 kN und 53,9 kN zu liegen kommen.

Bei Betrachtung der Prüfwerte der Lochbleche mit 10 mm Lochdurchmesser zeigen sich sehr geringe Unterschiede (Minimalwert 23,9 kN und Maximalwert 24,0 kN), welche auf das Versagen des Stahlbleches (Netto-Querschnitt) und auf die damit einhergehende geringe Streuung der Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials zurückzuführen sind.

• Vergleich unterschiedlicher Klebstoffe

Bei einem Vergleich der mittleren Tragfähigkeiten (wenn nur ein Prüfwert vorlag, entspricht der Wert in Tabelle 7.9 dem Einzelwert nach Abbildung 7.35) unter Verwendung unterschiedlicher Klebstoffe bei konstanter Einklebelänge und gleichem Ausgangsmaterial der Füge-teile (Edelstahlblech und Buchenurnierschichtholz) ergaben sich die in Tabelle 7.9 angeführten Maximalkräfte und Verhältniswerte $F_{\max, \text{mean}} / F_{\max, \text{mean, ref}}$ (siehe Abbildung 7.35). An dieser Stelle ist anzumerken, dass aufgrund der geringen Prüfan-zahl, weitere Prüfungen erfolgen sollten, um den beobachteten Einfluss der Klebstoffart besser erfassen zu können. Die vorliegenden Prüfdaten lassen auf eine Erhöhung der Tragfähigkeit bei Anpassung des Klebstoffsystems schließen. Dies äußert sich bei den verwendeten Klebstoffen (PU, EP, HI und SD) in einer nahezu Verdoppelung (siehe Tabelle 7.9, $F_{\max, \text{mean}} / F_{\max, \text{mean, ref}}$) der Tragfähigkeit bezogen auf den Kleinstwert (PU).

Tabelle 7.9: Vergleich der Tragfähigkeiten in Abhängigkeit des Klebstofftyps

Parameter	PU	EP	HI	SD
Klebstoff	Purbond CR421	Toolcraft Epoxidharz L + Härter L	Hilti HIT RE 500	Sikadur- 30 Normal
$F_{\max, \text{mean}}$ [kN]	16,8	25,4	28,6	32,6
$F_{\max, \text{mean}}/F_{\max, \text{mean, ref}}$ [-]	1,00	1,51	1,70	1,94

• Vergleich unterschiedlicher Stahloberflächen

Bei einem Vergleich der Tragfähigkeiten unter Verwendung unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten des Bleches bei konstanter Einklebelänge, gleichem Ausgangsmaterial der Fügeiteile (Edelstahlblech und Buchenfurnierschichtholz) und bei Verwendung des gleichen Klebstoffs (PU) ergaben sich die in Tabelle 7.10 angeführten Maximalkräfte und Verhältniswerte $F_{\max, \text{mean}} / F_{\max, \text{mean, ref}}$ (siehe Abbildung 7.35). An dieser Stelle ist anzumerken, dass aufgrund der geringen Prüfanzahl, weitere Prüfungen erfolgen sollten, um den beobachteten Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit besser erfassen zu können. Hierin sollte gleichzeitig das Klebstoffsystem variiert werden.

Die vorliegenden Prüfdaten lassen auf eine Erhöhung der Tragfähigkeit bei sandgestrahlter Oberfläche schließen. Dies äußert sich bei den verwendeten Oberflächenvorbehandlungen (B, S, SA) in einer 10 % igen (siehe Tabelle 7.9, $F_{\max, \text{mean}} / F_{\max, \text{mean, ref}}$) Erhöhung der Tragfähigkeit bezogen auf den Referenzwert (B). Bemerkenswert ist, dass die geschliffene Oberfläche (S) um 22 % geringere Tragfähigkeit aufweist als die blanke Oberfläche (B).

Eine Beurteilung der Bruchflächen unter Berücksichtigung der verwendeten Oberflächenvorbehandlungen (B, S, SA) zeigt, dass die Haftung zwischen Stahl und Klebstoff unzureichend war. Auf den Stahlblechen konnten nach durchgeführter Prüfung keine bzw. nur sehr geringe Anteile an Klebstoffresten und/oder Holzfaserbelag festgestellt werden (siehe ANHANG B).

Tabelle 7.10: Vergleich der Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der Oberfläche des Bleches

Parameter	B	S	SA
Oberfläche	blank	geschliffen	sandgestrahlt
$F_{\max, \text{mean}}$ [kN]	21,5	16,8	23,6
$F_{\max, \text{mean}}/F_{\max, \text{mean, ref}}$ [-]	1,00	0,78	1,10

7-10.5 SPANNUNGEN

• Zugnormalspannung im Brutto-Querschnitt

In Abbildung 7.36 sind die rechnerischen Zugnormalspannungen, die nach Abschnitt 7-7.3 und unter Annahme konstanter Verteilung über den Querschnitt ermittelt wurden, zusammenfassend dargestellt.

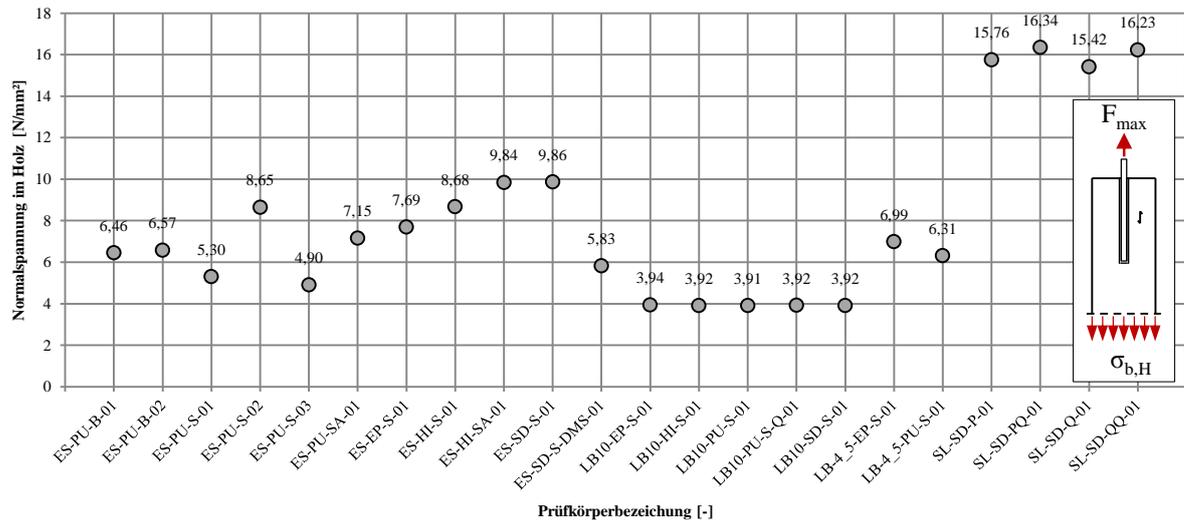


Abbildung 7.36: ermittelte Normalspannungen im Holzquerschnitt

Ein Vergleich der Werte im Diagramm in Abbildung 7.36 mit den Festigkeitseigenschaften aus Abschnitt 2-4 des verwendeten Ausgangsmaterials, zeigt sehr deutlich, dass die gewünschte Leistungsfähigkeit bei Weitem nicht erreicht wird, und hinsichtlich der gewählten Parameter noch großes Optimierungspotential vorliegt. Die relativ geringen Spannungsniveaus sind vor allem auf das großteils geringe Haftvermögen (Adhäsionsversagen) zwischen Klebstoff und Blech zurückzuführen.

• Rechnerische Scherspannung in der Klebschicht

Die mittlere Scherspannung bzw. -festigkeit nach Gleichung (7.6) wird oft für Vergleichszwecke zwischen unterschiedlichen Literaturquellen herangezogen. Dabei ist jedoch anzumerken, dass infolge der komplexen Zusammenhänge sich zum Teil überlagernder Einflussfaktoren, sich diese Vergleiche nur bedingt für eine Beurteilung und Bewertung eignen.

Die einzelnen Scherspannungswerte aus den Zugprüfungen sind in Abbildung 8.35 dargestellt.

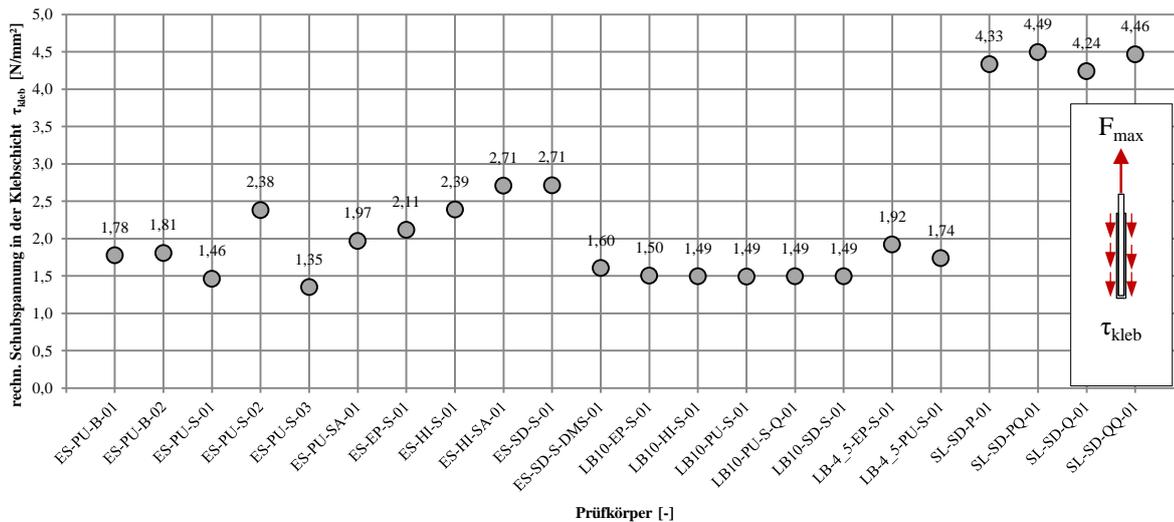


Abbildung 7.37: rechnerische Scherspannungen in der Klebschicht

Die rechnerischen Scherspannungen liegen zwischen 1,35 und 4,49 N/mm². Für den Polyurethanklebstoff mit Edelstahlblech ergeben sich Scherspannungswerte zwischen 1,35 und 1,97 N/mm² (ohne ES-PU-S-02, bei dem eine Zwinde angebracht wurde, siehe Abschnitt). Für Klebstoffe aus Epoxidharzbasis und Edelstahlblech ergeben sich Werte zwischen 2,11 und 2,71 N/mm². Auf eingeklebte Lochbleche und Kohlefaser wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da sich keine Literaturquellen für einen Vergleich unter Berücksichtigung entsprechender Randbedingungen fanden.

Aufgrund fehlender Literatur, hinsichtlich mittlerer Scherspannung/-festigkeit zugbeanspruchter eingeklebter Stahlbleche in Buchenurnierschichtholz, ist ein Vergleich nur mit in Fichtenholz eingeklebten Blechen aus [42] möglich. Hierbei wurden die in [42] angeführten Ergebnisse bei gleicher Einklebelänge und gleicher Klebstoffbasis (Epoxid und Polyurethan) verwendet. Ein Auszug statistischer Kenngrößen der errechneten Scherspannung/-festigkeit aus [42] ist in Tabelle 7.11 enthalten.

Tabelle 7.11: statistische Auswertung der rechn. Scherspannung (Klebefläche: 100 x 100 mm) [42]

Bezeichnung	Einheit	EP	PU
Anzahl	[-]	10	10
Min	[N/mm ²]	2,22	2,86
Max	[N/mm ²]	3,50	4,26
Mittelwert	[N/mm ²]	2,77	3,62
COV	[%]	13,4	11,0

Bei einer Einklebefläche von ($A = l \times b = 100 \times 100 \text{ mm}$) lagen die errechneten Scherfestigkeiten (Ergebnisse der Zugscherversuche an Fichtenholz, Edelstahlblech, sandgestrahlt und entfettet, Epoxidklebstoff) in [42] zwischen 2,22 und 3,50 N/mm² (siehe Tabelle x). Der Mittelwert der Klebstoffe auf Epoxidharz-Basis (EP, HI, SD) und Edelstahlblech ergibt sich zu 2,48 N/mm² und liegt um rund 10 % unter dem EP mit 2,77 N/mm² aus [42]. Betrachtet man die Polyurethan-Klebstoffe so ergeben sich noch größere Abweichungen 3,62 N/mm² aus [42] und 1,67 N/mm² (ohne ES-PU-S-02, bei dem eine Zwinde angebracht wurde, siehe Abschnitt).

Nach Darlegung der vorliegenden Scherspannungswerte ist davon auszugehen, dass das Potential der Verbindung in dieser Form noch unzureichend ausgenutzt wird.

• Zugspannungen im Blech

Die folgende graphische Darstellung zeigt die ermittelten Zugspannungen der Vorversuche mit eingeklebten Blechen zur Zeit der maximalen Last. Darüber hinaus sind die Dehngrenze und die Zugfestigkeit aus Tabelle 7.8 für das verwendete Edelstahlblech eingezeichnet. Wie aus der Abbildung 7.38 ersichtlich, kam bei vier Prüfkörpern der Stahl ins Fließen, was als eine Bestätigung für den Verlauf der Kurve „b“ diente.

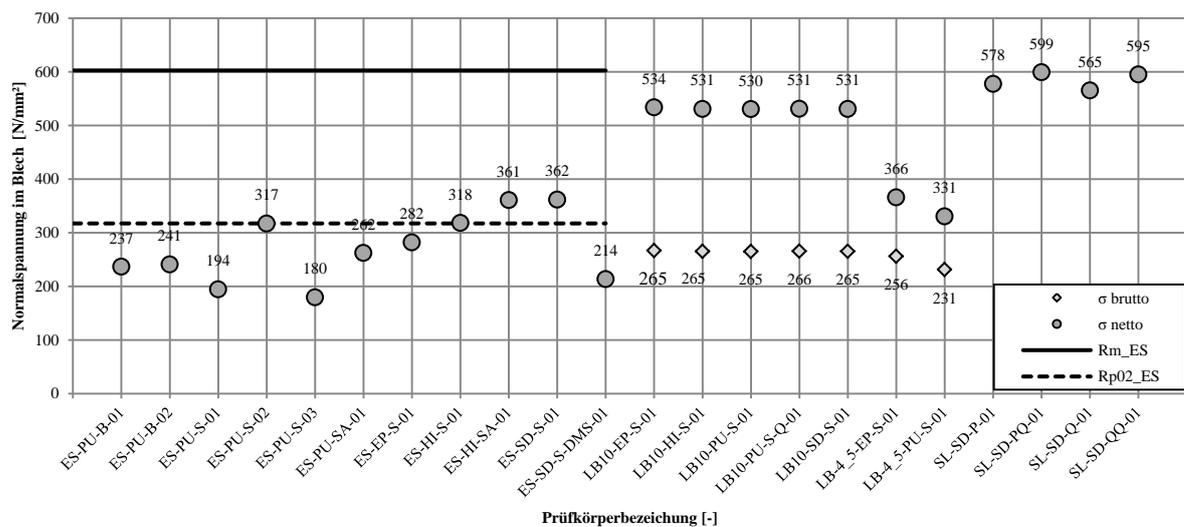


Abbildung 7.38: ermittelte Stahlspannungen der eingeklebten Edelstahlbleche

Da keine exakten Materialkennwerte für die verwendeten Lochbleche aus dem Vorversuch 01 vorliegen, ist eine gleichartige Darstellung der Ergebnisse nicht möglich. Die Lochbleche mit den Lochungen von 10 mm erreichten deren Zugfestigkeit. Bei den Lochblechen mit den Lochungen von 4,5 mm versagte die Verbindung einmal durch Erreichen der Stahlfestigkeit des Bleches (außerhalb des Verbundbereichs) und einmal durch Erreichen der Haftfestigkeit zwischen Klebstoff und Stahlblech (innerhalb des Verbundbereichs).

• Dehnungs- und Spannungsverhältnisse im Blech

Mithilfe der Gleichung (7.7) wurde die Normalspannung im Stahl bei Laststufen von jeweils 2 kN ermittelt und in den folgenden Abbildungen grafisch dargestellt. Aus denen ist ersichtlich, dass die Normalspannung mit fortgeschrittener Einklebelänge abfällt. Dies entspricht auch den ermittelten Spannungsverläufen anderer Forscher mit eingeklebten Gewindestangen.

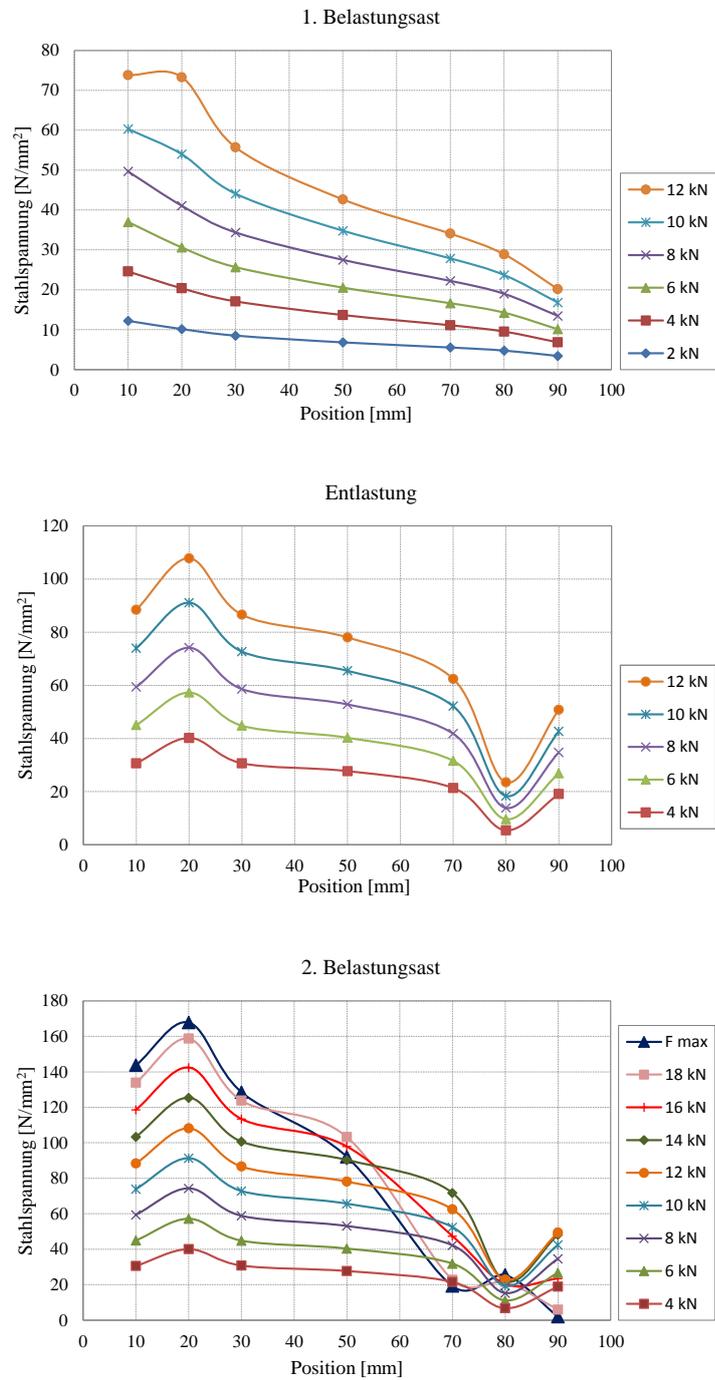
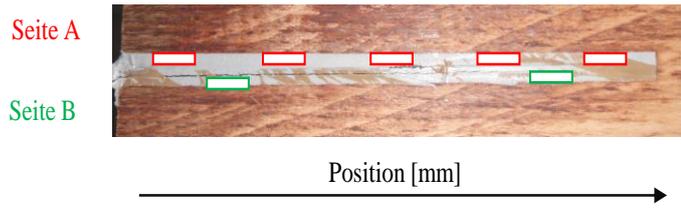


Abbildung 7.39: DMS-Positionen und ermittelte Stahlspannungen mittels DMS

Zu erkennen ist, dass ab 10 kN der Dehnmessstreifen an der Seite B (an der Position 20 mm) höhere Werte aufzeigt, was auf ein Lösen des Verbundes, an dieser Position, schließen lässt. In der Krafthaltephase bzw. während der Entlastung zeigt der untere Dehnmessstreifen an der gleichen Seite (Position 80 mm) niedrigere Werte auf. Dies könnte auf ein Verbundversagen der gesamten Seite B zurückzuführen sein, wobei sich durch lokale Versagensbereiche (beginnend am oberen Ende) sofort neue Gleichgewichtszustände einstellen. Aus statischer Sicht liegt keine „Doppellaschenverbindung“ sondern eine einfache Laschenverbindung mit exzentrischer Lasteinleitung vor, wodurch es zu einer deutlichen Erhöhung der Schälbeanspruchung der noch intakten Klebschicht und Biegebeanspruchung des Bleches kommt.

Da die Dehnmessstreifen nicht beidseitig an gleichen Positionen angebracht wurden, konnten keine Rückschlüsse auf eine vorliegende Biegebeanspruchung (vor und nach Initialriss) gezogen werden. Dies wäre für weitere Untersuchungen wünschenswert.

Aus der Abbildung 7.40 ist der Scherspannungsverlauf, ermittelt durch die Gleichungen (7.8) - (7.10), im ersten Belastungsast abgebildet. Analog zu den Stahlnormalspannungen sind ab 10 kN Sprünge im Spannungsverlauf ersichtlich. Die Scherspannungsverläufe stimmen qualitativ mit denen aus den analytischen Modellen überein [82].

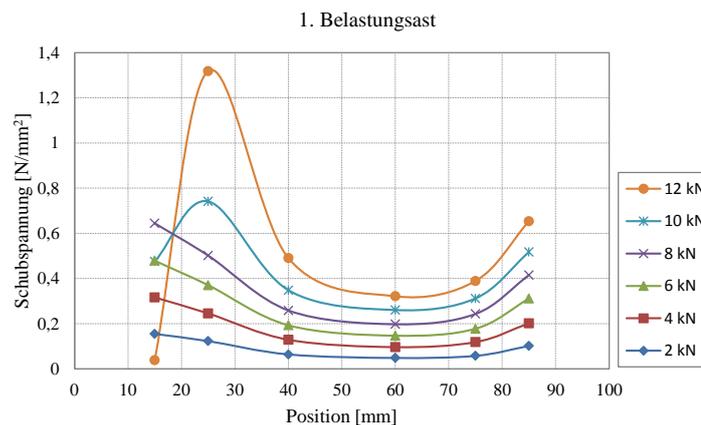


Abbildung 7.40: ermittelte Scherspannungen

Die Klebeverbindung versagte bei 19,2 kN und die Bruchbilder deuten auf einen ungenügenden Verbund zwischen Klebstoff und der Stahloberfläche hin.

7-10.6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

• Einfluss des Klebstoffes

Für einen Vergleich der verwendeten Klebstoffe dienen hier die Prüfkörper mit eingeklebten, geschliffenen Edelstahlblechen. Wobei bei den Klebstoffarten HI und SD das Tragverhalten „b“ hervorkam, zeichneten sich die Prüfkörper mit dem EP und PU Klebstoff mit den Kurventypen „g“ und „h“ aus, wobei zu betonen ist, dass bei dem EP-Klebstoff mehr Nichtlinearitäten vorhanden waren.

Auf Basis der Tragfähigkeiten und den dazugehörigen ermittelten Scherfestigkeiten ist offensichtlich, dass die Prüfkörper mit dem PU-Klebstoff die niedrigsten und der mit SD-Klebstoff die höchsten Werte ergaben.

• Einfluss des Bleches

Im Rahmen der Voruntersuchungen konnten zwei Blechtypen ohne Perforation (Edelstahlblech und Kohlefaser) auf Zug geprüft werden. Beide wurden mit dem SD-Klebstoff eingeklebt und hatten sehr ähnliche Geometrieverhältnisse. Der erste Unterschied liegt in dem Tragverhalten dieser zwei Prüfkörper der in der Abbildung 7.30 mit den Kurven „a“ und „b“ abgebildet ist. Bei dem Prüfkörper mit eingeklebter Kohlfaserlamelle ist ein steiferes Verhalten, höhere Tragfähigkeit, kleinere Verformungsfähigkeit und ein spröderes Versagen im Vergleich zu dem Prüfkörper mit dem Edelstahlblech ersichtlich. Die unterschiedlichen Bruchbilder sind ebenfalls hervorzuheben.

Nach der Prüfung war am Edelstahlblech nur ein feiner Klebstoffbelag mit sehr kleinen Klebstoffbrüchen vorhanden. Dies deutet auf unzureichende Adhäsion zwischen dem Stahlblech und dem Klebstoff sowie zu Kohäsionsbrüchen innerhalb des Klebstoffes, verursacht durch eine Kombination der auftretender Spannungen. Bei der Sika-CarboDur-Lamelle war das Bruchbild ganz anders. Auf einer Seite kam es zum Holzscherscherbruch (die Lamelle war komplett mit Holzfasern überdeckt) und an der anderen Seite lag eine Kombination von Holzscherscherbruch, Kohäsionsbruch des Klebstoffes und Versagen der Lamelle, die auf einen Scherbruch hindeutet (am Holzfügeteil waren Kohlefaser vorhanden) vor.

Daraus ist zu schließen, dass die Haftung des verwendeten Klebstoffes an der Sika-CarboDur-Lamelle besser ist. Dieser Klebstoff ist, nach Angabe der Hersteller, genau auf diese Lamellen abgestimmt. Die Kohlefasern sind in eine Epoxidmatrix eingebettet und der Klebstoff, wie bereits bekannt, ist ebenfalls auf Epoxidharzbasis.

• Einfluss des Oberflächenbehandlung

Die höchsten Tragfähigkeiten unter Verwendung von Edelstahlblechen konnten mittels sandgestrahlter Oberfläche erreicht werden. Diese Art der Oberflächenvorbehandlung äußerte sich in einer 10 % igen Erhöhung (siehe Tabelle 8.9, $F_{\max, \text{mean}} / F_{\max, \text{mean, ref}}$) der Tragfähigkeit bezogen auf den Referenzwert (blanke Oberfläche).

• Einfluss des Lochung

Generelle Rückschlüsse auf das Potenzial einer Perforation innerhalb des Verbundbereiches konnte bei den Lochblechen LB₁₀ nicht gezogen werden, da durchwegs ein Stahlversagen der Stahlbleche außerhalb des Verbundbereichs eintrat. Bei den Lochblechen LB_{4,5} war ein ähnliches Verhalten vorhanden – beide Stahlbleche kamen ins Fließen. Bei dem EP-Klebstoff versagte endgültig der Stahl und bei dem PU kam es zu einem Adhäsionsversagen zwischen Stahl und Klebstoff bei gleichzeitig großen Stahlverformungen, die vermutlich Risse innerhalb der Klebschicht verursachten. Das Letztere ist aus dem Bruchbild schön ersichtlich.

Bei visueller Begutachtung der perforierten Lochbleche auf Verformungen der Löcher im Verbundbereich, zeigt sich eine Verformungszunahme vom Einklebeende bis zum Einklebeanfang. Auf Basis der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ergeben sich folgende offene Fragestellungen hinsichtlich eingeklebter Lochbleche:

- Wirken die Klebstoffdübel als „innere Querzugbewehrung“?
- Inwieweit führt eine Perforation zur Verbesserung der mechanischen Verankerung, und welche Tragfähigkeitssteigerungen lassen sich erzielen?
- Wie wirken sich eine Perforation auf die Spannungsverteilung innerhalb des Verbundbereichs aus?
- Können Spannungsspitzen an den Enden des Verbundbereiches reduziert werden?

• Einfluss der Anordnung des Bleches innerhalb des Furnierschichtholzes

Ein Blech kann im Hirnholz des Furnierschichtholz-Prüfkörpers in unterschiedlichen Winkeln (bezogen auf die Flächennormale der Furnierschichten) angeordnet werden (Abbildung 7.41).

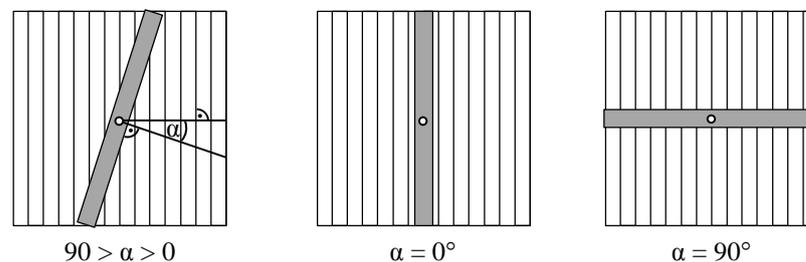


Abbildung 7.41: Anordnung des Bleches im Hirnholz des Furnierschichtholz-Prüfkörpers

Im Rahmen der Voruntersuchungen (Vorversuch 02) erfolgten zwei Prüfungen anhand der Grenzfälle bei $\alpha = 0^\circ$ und 90° , wobei bei einem Vergleich der Tragfähigkeiten kein Unterschied festgestellt werden konnte. Inwieweit sich Haftkräfte zwischen Klebeschicht des Holzwerkstoffes (Phenolresorcin) und Klebstoff der Stahlblech-Holz-Verbindung ausbilden können, die vor allem bei $\alpha = 0^\circ$ einen großen Teil der Klebefläche einnehmen könnten, bleibt fraglich. Im Zuge der Hauptversuche wurden die Bleche mit $\alpha = 90^\circ$ ins Furnierschichtholz eingeklebt.

• Einfluss einer Querzugbewehrung mittels aufgeklebter Furnierlagen

Das Aufkleben von Querlagen zur Querzugverstärkung (siehe Abschnitt 7-9.2) im Vorversuch 02 führte nicht zu einer Steigerung der Tragfähigkeit (siehe Abbildung 7.42).

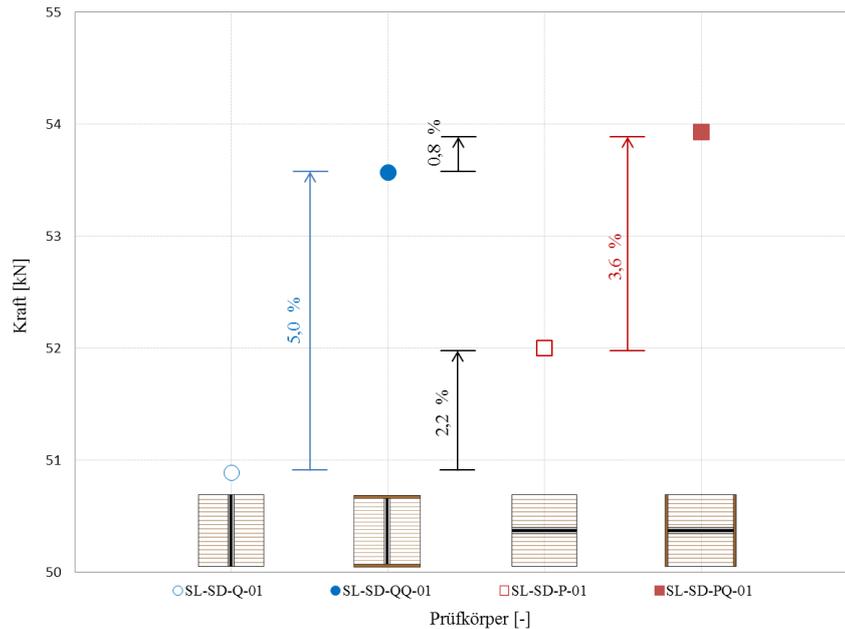


Abbildung 7.42: Vergleich der Prüfkörper aus den Vorversuch 02

7-11 HAUPTPRÜFUNGEN

Aus den Erkenntnissen der Vorversuche können einige Schlüsse für das weitere Vorgehen im Rahmen der Hauptprüfungen getroffen werden. Diese umfassen die

- Notwendigkeit der Steifigkeitsanpassung (über dickere und steifere Stahlbleche), die
- Notwendigkeit der mechanischen Verzahnung des Klebstoffes mit dem Blech (über eine Reihe elliptischer Lochungen) sowie das
- Sandstrahlen der Oberfläche.

Für die Hauptserien wurden folgende Klebstoffe verwendet:

- zweikomponentiger Polyurethanklebstoff (Purbond CR 421, aus den Vorversuchen)
- einkomponentiger Polyurethanklebstoff (Purbond HB 110)
- zweikomponentiger Epoxidharzklebstoff (Compono 100 + Compono 100 H)).

Der PU-Klebstoff wurde für zwei Serien, und zwar für die PU- und PUL-Serie, benutzt. Dabei wurde das Ziel verfolgt, den Einfluss der Lochungen abzuklären. Ein weiteres Ziel der Hauptserien lag in der Ermittlung des Verformungsverhaltens der Klebverbindungen.

Die folgende Abbildung zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Steifigkeiten zwischen dem Edelstahlblech und dem Stahlblech S_760_MC. Die Berechnung erfolgte nach der TOM-Theorie. Obwohl die mittleren Scherspannungslinien nur geringfügig voneinander abweichen (Vergleich ‚blau‘- mit ‚rot‘-strichlierter Linie), sind die Spannungsspitzen, die für das Anreißen der Klebefuge zwischen dem Klebstoff und dem Stahl verantwortlich sind, bei der Benutzung des dickeren und steiferen Stahlbleches weitaus geringer.

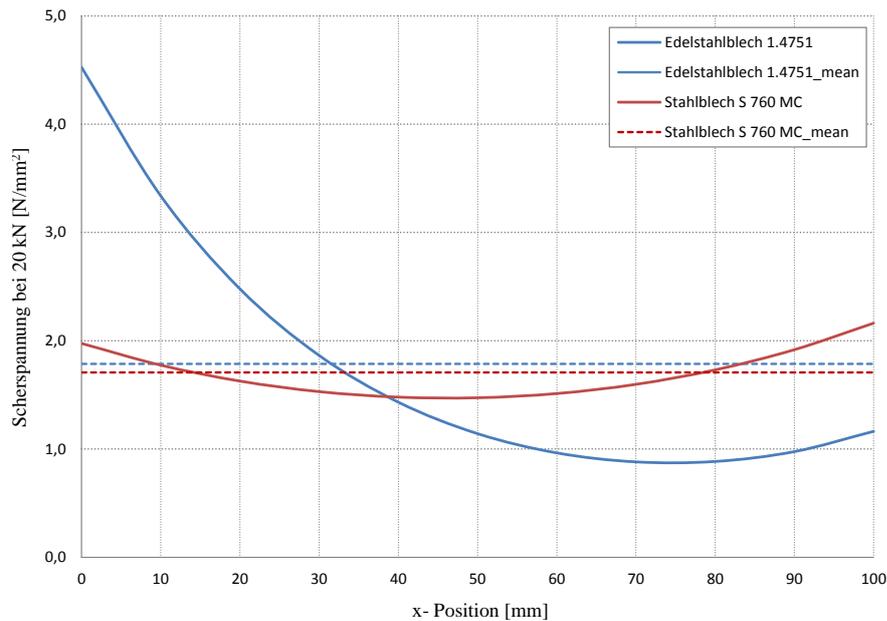


Abbildung 7.43: Scherspannungsverteilung nach der TOM-Theorie für unterschiedliche Stahlbleche

Die verwendeten Materialien können zusammenfassend aus der Prüfkörperbezeichnung herausgelesen werden (siehe Abbildung 7.44).

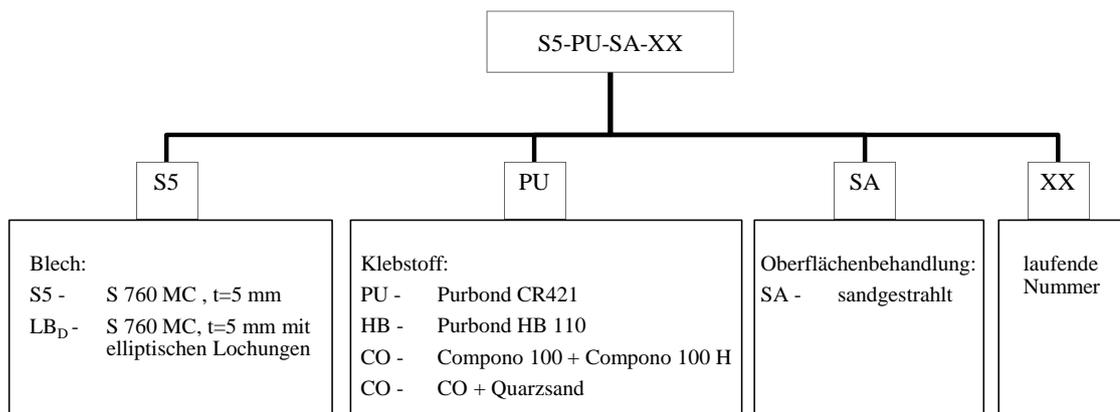


Abbildung 7.44: Prüfkörperbezeichnung der Hauptprüfungen

Insgesamt gab es, wie bereits angedeutet, fünf Prüfserien. Die Namen der Prüfserien ergeben sich aus den Klebstoffabkürzungen und, falls vorhanden, aus vom Standard abweichenden Ausführungsformen der Bleche (mit und ohne Lochungen) respektive Abweichungen hinsichtlich des Füllmaterials im Klebstoff (mit und ohne Quarzsand).

- PU – **P**urbond CR 421
- PUL – **P**urbond CR 421 mit Stahl mit **L**ochungen
- COQ – **C**ompono 100 + Compono 100 H mit **Q**uarzsand.

Die Zusammenfassung der Hauptprüfungen mit deren wichtigsten Parameter ist in der Tabelle 7.12 zu entnehmen.

Tabelle 7.12: Hauptprüfungen

Serien- bezeichnung	Flachkörper	Oberflächen- behandlung	Klebstoff	Klebstoff- fugendicke [mm]	Anzahl [-]	Aushärte- zeit [Tag]
HB	S 760 MC	sandgestrahlt	HB	1,5	10	20 (16)
PU	S 760 MC	sandgestrahlt	PU	1,5	10	15 (14)
PUL	S 760 MC mit elliptischen Lochungen	sandgestrahlt	PU	1,5	10	14 (13,10)
CO	S 760 MC	sandgestrahlt	CO	1,5	5	15 (14)
COQ	S 760 MC	sandgestrahlt	CO mit Quarzsand	1,5	5	15 (14)

Die Prüfgeschwindigkeiten sind in der Tabelle 7.13 angegeben (vergleiche Abbildung 7.27).

Tabelle 7.13: Prüfgeschwindigkeiten mit Hysterese für die Hauptprüfungen

Bezeichnung	HB	PU	PUL	CO	COQ
0,5 Fest [kN]	12,5	25	25	25	25
0,1 Fest [kN]	2 / 2,5	5	5	5	5
$v_{0,5} / v_{1,0}$ [mm/min]	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7
$v_{0,1}$ [mm/min]	0,6	1,4	1,4	1,4	1,4

7-12 ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER HAUPTPRÜFUNGEN

7-12.1 ALLGEMEIN

Dieser Abschnitt widmet sich der Auswertung der Hauptprüfungen. Zuerst werden die Holzparameter, Rohdichte und Holzfeuchte pro Prüfserie angegeben. Danach folgt die Darstellung der ermittelten Spannungen im Holz, im Stahl sowie in der Klebstofffuge gemäß den Gleichungen aus dem Abschnitt 7-7.3. Darauf folgend werden der errechnete E-Modul des Holzes und die Steifigkeit der Verbindungen mithilfe der Gleichungen aus dem Abschnitt 7-7.4 angegeben. Danach werden auch die Holzverformungen veranschaulicht. Abschließend wird auch der Einfluss der Klebstoffart sowie der Lochungen zur Diskussion gestellt.

Zur Vereinfachung der Darstellung und um einen besseren Vergleich zu ermöglichen, werden die Ergebnisse aus den Prüfungen zumeist durch Boxplots dargelegt. Für deren Darstellung wurden die Gleichungen aus dem Abschnitt 7-7.5 verwendet. Anschließend werden die charakteristischen Werte, ermittelt nach den Gleichungen gemäß Abschnitt 7-8, angegeben.

7-12.2 ROHDICHTE

Um die einzelnen Prüfserien vergleichen zu können, sollten sich die Rohdichteverteilungen der einzelnen Serien nicht voneinander unterscheiden, da auf Basis der Literaturrecherche ein Rohdichteinfluss auf die Tragfähigkeit nicht auszuschließen ist. Die Rohdichtewerte der Prüfserien aus den Hauptprüfungen und deren Mittelwerte pro Serie (markiert mit roten Kreisen) sind in Abbildung 7.45 ersichtlich. Dabei handelt es sich um die Rohdichte, die nach der Lagerung der Prüfkörper in der Klimakammer ermittelt wurde. Die rote Linie steht für den Mittelwert über alle Prüfkörper und beträgt rund 747 kg/m^3 .

Der minimale und maximale Wert entsprechen rund 714 kg/m^3 und 781 kg/m^3 . Aufgrund des nicht signifikanten Rohdichteunterschiedes zwischen den einzelnen Serien, ist anzunehmen, dass bei Vorliegen eines Einflusses der Rohdichte auf die Tragfähigkeit, die Ergebnisse sich nicht voneinander unterscheiden und somit die Ergebnisse zwischen den einzelnen Serien vergleichbar sind.

Tabelle 14: statistische Kenngrößen der Rohdichte

Bezeichnung	Einheit	HB	PU	PUL	CO	COQ
Anzahl	[-]	10	10	10	5	5
Min	[kg/m ³]	773,3	778,3	796,8	787,4	784,2
Max	[kg/m ³]	741,2	722,2	721,0	767,8	744,9
Mittelwert	[kg/m ³]	747,9	746,8	751,6	779,3	772,7
COV	[%]	1,3%	2,4%	3,0%	1,2%	2,2%

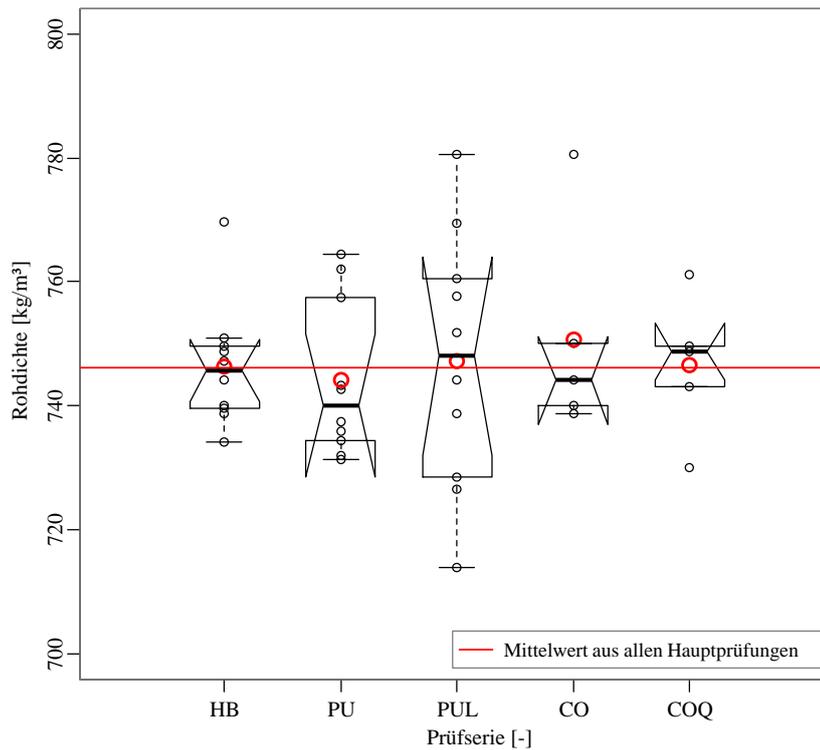


Abbildung 7.45: Rohdichte der Prüfkörper aus den Hauptprüfungen

7-12.3 HOLZFEUCHE

Der Holzfeuchtebereich zwischen den einzelnen Prüfserien reicht von 7,5 % bis 8,7 %, wobei der Mittelwert bei rund 8,1 % liegt und somit sehr gut mit den Angaben des Herstellers übereinstimmt. Aufgrund der geringen Unterschiede der Holzfeuchte kann auch ein Einfluss der Holzfeuchte auf die Tragfähigkeit bei einem Vergleich der einzelnen Prüfserien ausgeschlossen werden.

7-12.4 TRAGFÄHIGKEIT DER VERBINDUNG

In Abbildung 7.46 werden die Tragfähigkeiten mittels Boxplotserien, welche den einzelnen Tragfähigkeitsverteilungen der Prüfserien entsprechen, dargestellt.

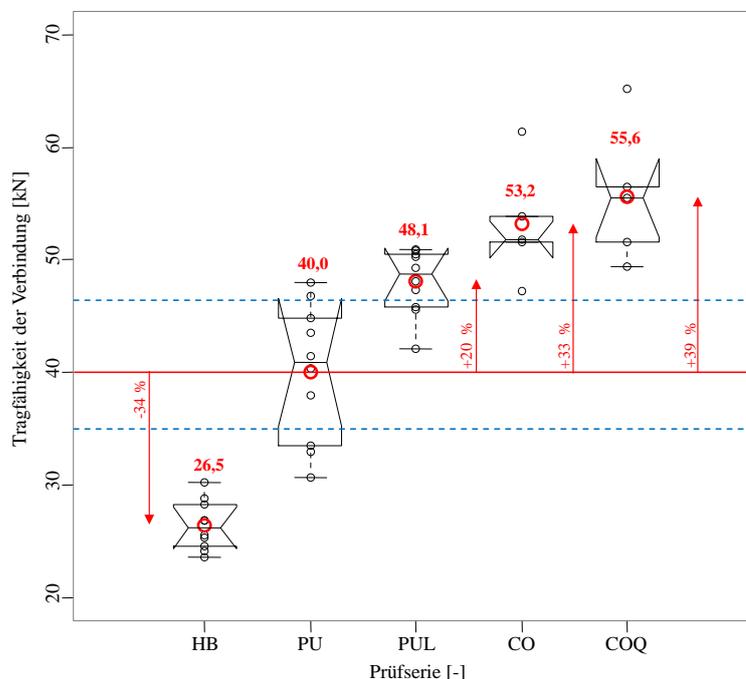


Abbildung 7.46: Tragfähigkeiten der Verbindung pro Prüfserie

Während zwischen den Prüfserien CO und COQ kein signifikanter Unterschied zwischen den Tragfähigkeitsverteilungen besteht, weisen die Prüfungen PU und PUL doch auf eine mögliche Tragfähigkeitssteigerung durch Anordnung einer Lochreihe hin. Wie aus den Vorversuchen zu erwarten war, erreicht der Epoxidharzklebstoff CO bzw. COQ die höchsten Tragfähigkeiten. Ein Beimengen von Quarzsand führte nicht zu geringeren Tragfähigkeiten.

Die geringsten Werte ergaben, wie zu erwarten war, die Prüfungen unter Verwendung von HB. Hierin ist anzumerken, dass der HB Klebstoff für Holz-Holz- und nicht für Holz-Stahl-Verklebungen verwendet wird. Folglich ist dieses Klebstoffsystem nicht auf das Verbinden von Holz und Stahl abgestimmt. Dennoch erreichte der HB-Klebstoff befriedigende Ergebnisse.

Vergleicht man nun die Tragfähigkeiten aus den Vorversuchen (siehe Abschnitt 7-10.4) bei Verwendung des Edelstahlbleches ($s = 1,5 \text{ mm}$), die zwischen 16,2 kN (PU) und 32,6 kN (SD) liegen, mit den Hauptprüfserien, so ergeben sich Tragfähigkeitssteigerungen im Bereich von 60 % bis 150 %, die auf eine Änderung des Blechtyps (Stahlgüte und Stahlblechstärke $s = 5 \text{ mm}$) zurückzuführen sind und sich auch aus theoretischen Überlegungen ergeben (siehe Abbildung 7.43).

7-12.5 SPANNUNGEN

• Zugspannung im Brutto-Querschnitt des Holzes

Wie auch bei den Vorversuchen ist die Kapazität der BauBuche unzureichend ausgenutzt. Die Ausnutzung (unter Zugrundelegung der charakteristischen Zugfestigkeit der BauBuche $f_{t,0,k} = 70 \text{ N/mm}^2$) liegt im Bereich zwischen 9 % und 17 % bei Bezugnahme auf die charakteristischen Werte der Brutto-Zugnormalspannungen nach Abschnitt 7-7.3 (siehe Tabelle 7.15, Verhältniswerte $f_{t,0,k}/\sigma_{b,H}$). Gemäß diesen Ergebnissen ist festzuhalten, dass weiteres Optimierungspotenzial vorliegt, um den Werkstoff BauBuche besser nutzen zu können.

Tabelle 7.15: statistische Auswertung und charakteristische Werte der Brutto-Zugspannungen

Bezeichnung	Einheit	HB	PU	PUL	CO	COQ
Anzahl	[-]	10	10	10	5	5
Max	[N/mm ²]	8,41	13,35	14,15	17,05	18,12
Min	[N/mm ²]	6,56	8,52	11,69	13,12	13,72
Mittelwert	[N/mm ²]	7,35	11,12	13,35	14,77	15,46
Standw.	[-]	0,60	1,68	0,81	1,44	1,69
COV	[%]	8,17	15,13	6,05	9,75	10,95
Charak.	[N/mm ²]	6,18	7,92	11,70	11,64	11,84
ft,0,k/σ_{b,H}	[%]	8,8	11,3	16,7	16,6	16,9

• Zugspannungen im Stahl

Bezugnehmend auf die 0,2 %-Dehngrenze des verwendeten Stahles, laut dem Produktdatenblatt 760 N/mm², zeigt sich auch für die nicht perforierten Stahlbleche nur ein geringer Ausnutzungsgrad. Der Stahl wurde nur zu maximal 24 % seiner Dehngrenze genutzt. Bei den perforierten Blechen lag der Ausnutzungsgrad bezogen auf den Nettoquerschnitt bei rund 75 %. Um ein duktilen Stahlversagen zu erreichen, müssten weitere Querschnittschwächungen vorgenommen werden.

• Scherspannungen/-festigkeiten in der Klebefläche

Die Berechnung der Scherspannungen erfolgte nach der Gleichung (7.6). Die Abbildung 7.47 zeigt die Unterschiede der rechnerischen Scherspannungen bei Verwendung unterschiedlicher Klebstoffe sowie bei Verwendung perforierter Stahlbleche. Daraus kann der Einfluss der Klebstoffart und der Lochungen dargelegt werden. Die mittleren Scherspannungen sind mit roten Kreisen hervorgehoben. Die statistischen Werte sowie die charakteristischen Scherspannungen sind in Tabelle 7.16 angegeben.

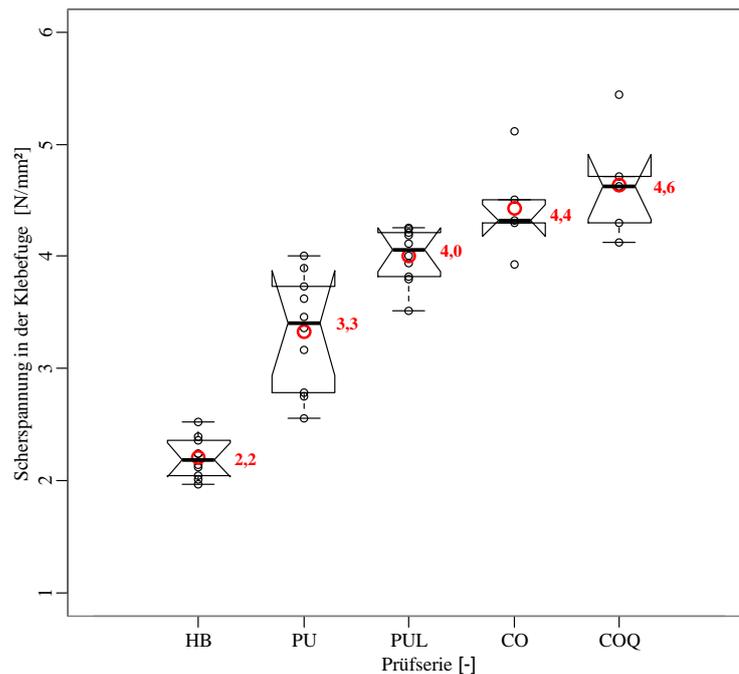


Abbildung 7.47: ermittelte Scherspannungen in der Klebefuge

Der niedrigste Wert der Scherspannung lag bei $2,0 \text{ N/mm}^2$ und ergab sich in der HB-Prüfserie; der höchste Wert lag bei $5,4 \text{ N/mm}^2$ und trat in der COQ-Prüfserie auf. Die größte Streuung ergab sich für die PU- und die niedrigste für die PUL-Prüfserie, wobei auf die Anzahl der Prüfkörper innert jeder Serie Rücksicht zu nehmen ist.

Tabelle 7.16: statistische Auswertung und die charakteristische Werte der Scherspannung in der Klebefuge

Bezeichnung	Einheit	HB	PU	PUL	CO	COQ
Anzahl	[-]	10	10	10	5	5
Max	[N/mm ²]	2,52	4,00	4,25	5,11	5,44
Min	[N/mm ²]	1,97	2,56	3,51	3,93	4,12
Mittelwert	[N/mm ²]	2,2	3,3	4,0	4,4	4,6
Median	[-]	2,20	3,33	4,01	4,43	4,64
Standw.	[-]	0,18	0,50	0,24	0,43	0,51
COV	[%]	8,17	15,13	6,05	9,75	10,95
Charak.	[N/mm ²]	1,85	2,38	3,51	3,49	3,55

7-12.6 E-MODUL DES HOLZES

Mit dem Wegaufnehmer H aus der Abbildung 7.18 wurde die Verformung für die Berechnung des E-Moduls des Holzes auf einer Messlänge von 77,5 mm mitgemessen. Die gemessenen Wege sind im linearen Bereich zwischen 10 % und 40 % der erwarteten maximalen Last entnommen worden. Dementsprechend wurden auch die dazugehörigen Lasten ausgelesen.

Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung zusammengefasst. Des Weiteren werden der E-Modul nach Herstellerangaben (blaue Linie) sowie der mittlere E-Modul aus den experimentellen Prüfungen (rote Linie) eingezeichnet. Zu betonen ist auch, dass der E-Modul aus dem zweiten Belastungsast entnommen wurde.

In dieser Abbildung sind zwei Werte (von den Prüfkörpern LBD-PU-SA-08 und S5-HB-SA-02) aufgrund deren extrem niedrigen oder hohen Werte, die in der Skala der Y-Koordinate nicht dazugehören und aufgrund deren Zeit-Wegs Verläufe sofort ausgeschlossen. Anzumerken ist auch, dass aus der PUL-Serie zwei weitere Prüfkörper fehlen, da an denen die Messeinrichtung nicht angebracht wurde.

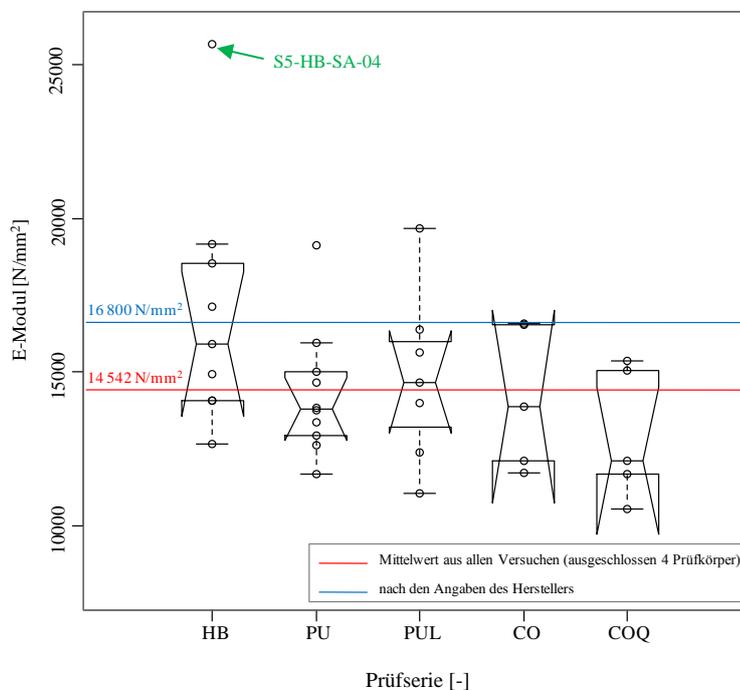


Abbildung 7.48: ermittelter E-Modul des Holzes

Wie schon erwähnt, sind alle Zeit-Weg-Diagramme angeschaut worden, um Unregelmäßigkeiten, die die Resultate verfälschen könnten, zu erkennen. Der einzige Wert, der bei Betrachtung der Prüfdaten stark heraussticht, ist S5-HB-SA-04, der folglich für die Ermittlung des Mittelwerts in Abbildung 7.18 vom Datensatz ausgeschlossen wurde. Somit beträgt der mittlere E-Modul des Holzes $14\,542\text{ N/mm}^2$ mit einem Variationskoeffizienten von 16 %.

Die vergleichsweise geringen Werte des E-Moduls sind vermutlich auf Abweichungen in der Messung zurückzuführen. Das verwendete Messequipment (Induktive Wegaufnehmer WA) und die gewählte Messkonfiguration (geringe Messlänge, Fixierung der WA und des Winkels, Messbereich ...), sowie die aufgrund des relativ geringen Lastniveaus entsprechend kleinen Verschiebungen (größtenteils unter der vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit des WA) führten vermutlich zu diesen Ergebnissen. Folglich können keine gesicherten Aussagen betreffend den elastischen Eigenschaften des Fügeteils Holz getroffen werden.

7-12.7 STEIFIGKEIT DER VERBINDUNG

Wie im vorherigen Abschnitt wurde die Steifigkeit der Verbindung im linearen Bereich zwischen 10% und 40% der erwarteten maximalen Last in beiden Belastungsästen ermittelt. Dabei sind zwei Steifigkeitsermittlungen aufgrund der unterschiedlichen Verformungsmessstellen zu unterscheiden. Einmal wurde die Verformung der Verbindung mit den Wegaufnehmern SR und SL gemessen (sogenannte „seitliche“ Verformung) und einmal in der Mitte der Verbindung mit dem Wegaufnehmer HI (sogenannte „mittige“ Verformung). Die Positionen der Wegaufnehmer sind in der Abbildung 7.18 dargestellt.

Der erste Schritt der „seitlichen“ Verformungsermittlung war das Mitteln der zwei gemessenen Verformungen, was bei der „mittiger“ ausgeschlossen war, da nur einseitig gemessen wurde. Im Weiteren wurde von den ausgelesenen Verformungen die erwartete Stahlverformung an den ausgelesenen Stellen, unter Berücksichtigung des E-Moduls vom Stahl ($210\,000\text{ N/mm}^2$), der Messlänge (20 mm), der Bruttoquerschnittsfläche des Stahles (300 mm^2) und der auftretenden Kraft abgezogen. Auf diese Weise können die Wegänderungen ermittelt und daraus die Verschiebungsmoduln der Verbindung berechnet werden. Die Holzverformung 2,5 mm, die unter der Klebeverbindung mitgemessen wurde, wurde bei der Ermittlung vernachlässigt.

Eine Ausreißerbereinigung erfolgte in zwei Schritten:

Zuerst wurden die Steifigkeiten der Verbindung je Prüfung auf Basis der Messaufzeichnungen berechnet. Danach erfolgte die Bereinigung der Daten durch Kontrolle der Weg-Zeit-Diagramme und Arbeitslinien auf Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf (Sprünge, ...).

Es wurden folgende Datensätze zur Ermittlung des Verschiebungsmoduls der Verbindung (je Prüfung und Messung) ausgeschlossen:

- aus der HB-Prüfserie:
 - seitlich: 03 und 09
- aus der PU-Prüfserie:
 - mittig: 04
 - seitlich: 04, 06 und 09
- aus der PUL-Prüfserie:
 - mittig: 04
 - seitlich: 02, 03, 04, 06 und 08
- aus der CO-Prüfserie:
 - mittig: 02 und 03
 - seitlich: 02, 03 und 05
- und aus der COQ-Prüfserie:
 - seitlich: 02 und 05.

Der Unterschied zwischen den berechneten Steifigkeiten mit und ohne Ausreißer (bezogen auf die Mittelwerte der einzelnen Serien), liegt im Bereich zwischen -16 % und +8 %. In weiterer Folge wurden die zwei bereinigten, ermittelten Verbindungssteifigkeiten, „seitliche“ und „mittige“, verglichen. Vergleicht man deren Mittelwerte innerhalb der gleichen Prüfserie, bekommt man die Prozentansätze aus der folgenden Tabelle. Die Prozente sind im Bezug auf die „seitliche“ Steifigkeit angegeben.

Tabelle 7.17: Vergleich der „mittigen“ Steifigkeit in Bezug auf die „seitlichen“

	HB	PU	PUL	CO	COQ
„mittige“ im Vergleich zu „seitlicher“ Steifigkeit im 1. Ast [%]	+5	+899	+700	-13	+8
„mittige“ im Vergleich zu „seitlicher“ Steifigkeit im 2. Ast [%]	+4	+957	+825	-4	-4

Die Unterschiede in der PU- und PUL-Serie stehen deutlich heraus (siehe Abbildung 7.49). Nach Überprüfung der Messeinstellungen, der Kalibrierung der benutzten Wegaufnehmer und der Auswertung, konnte die Ursache für den ca. Faktor zehn größere Steifigkeit der PU- und PUL-Serie nicht eruiert werden.

Im zweiten Schritt erfolgte eine statistische Ausreißerbereinigung auf Basis der Boxplot-Serien der ermittelten Verschiebungsmoduln (1. und 2. Ast). Extremwerte außerhalb der oberen und unteren „Whisker“ werden aus dem Datensatz ausgeschlossen. In den folgenden Abbildungen sind die berechneten Steifigkeiten pro Serie mittels Boxplots dargestellt.

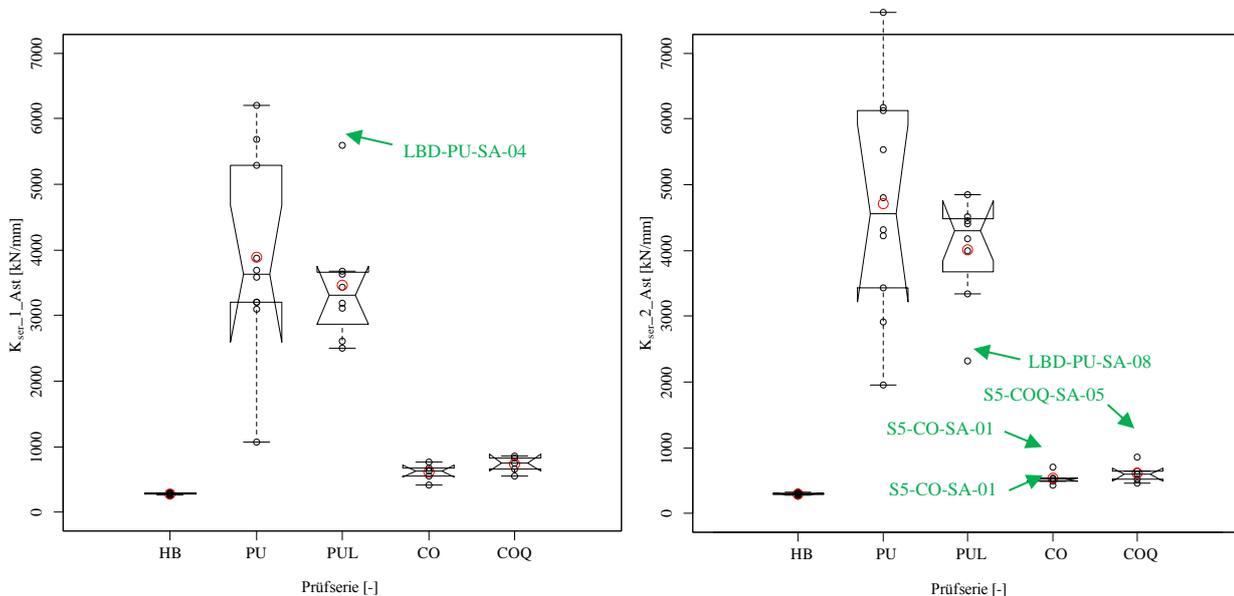


Abbildung 7.49: ermittelte „mittige“ Steifigkeiten der Verbindung

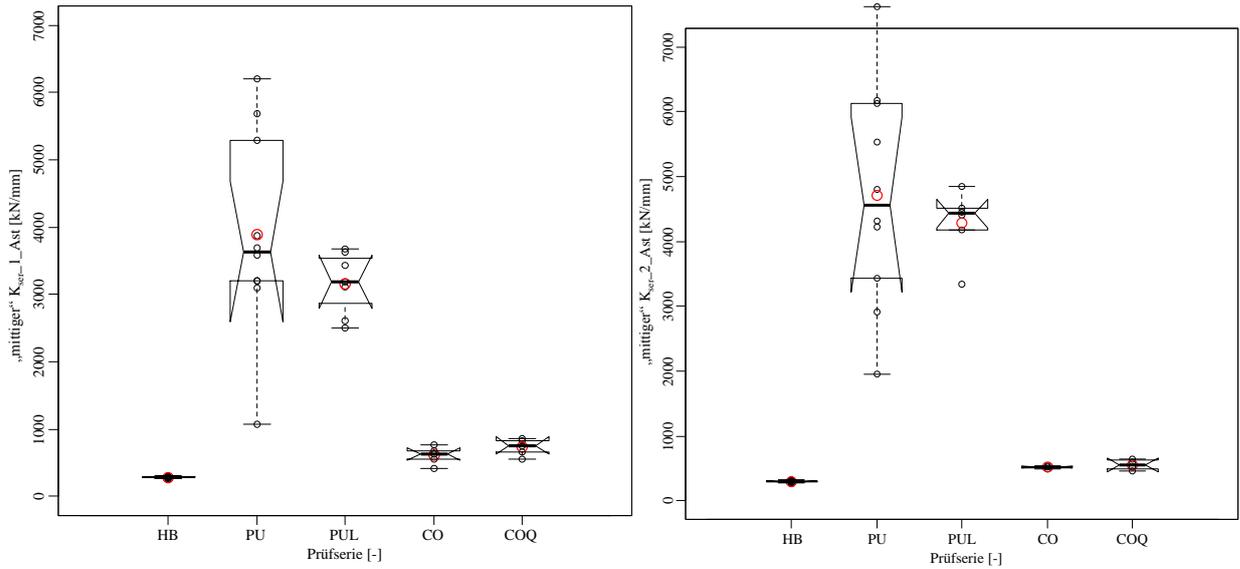


Abbildung 7.5: ermittelte „mittige“ Steifigkeiten der Verbindung – bereinigt

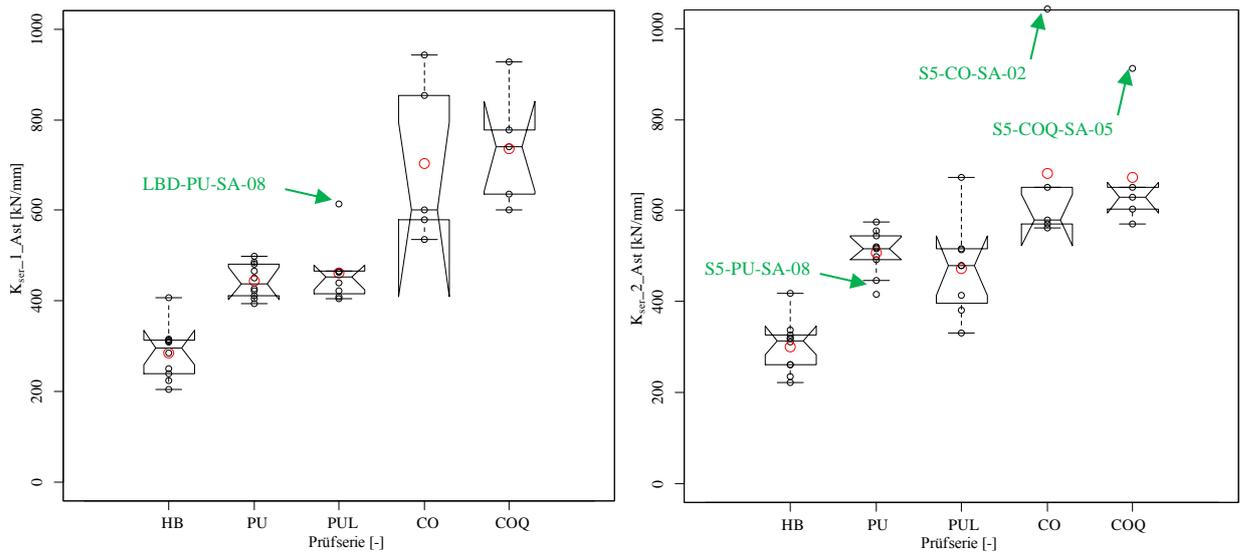


Abbildung 7.50: „seitliche“ Steifigkeiten der Verbindung

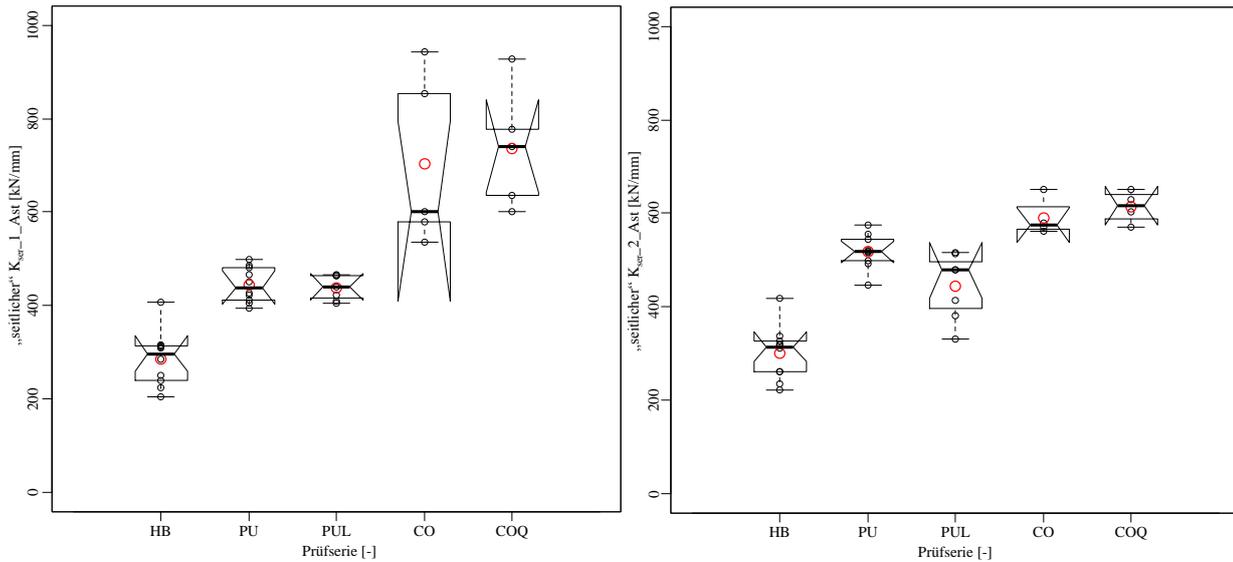


Abbildung 7.51: „seitliche“ Steifigkeiten der Verbindung – bereinigt

Es wurden folgende Datensätze zur Ermittlung des Verschiebungsmoduls der Verbindung (je Prüfung und Messung) ausgeschlossen:

- aus der PU-Prüfserie:
 - seitlich: 08 (2. Ast)
- aus der PUL-Prüfserie:
 - mittig: 04 (1. Ast) und 08 (2. Ast)
 - seitlich: 08 (1. Ast)
- aus der CO-Prüfserie:
 - mittig: 01, 05 (2. Ast)
 - seitlich: 02 (2. Ast)
- und aus der COQ-Prüfserie:
 - mittig: 05 (2. Ast)
 - seitlich: 05 (2. Ast).

Bei Betrachtung der resultierenden Verteilungen in Abbildung 7.51 der Verschiebungsmoduln aus „seitlicher“ Wegmessung zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Prüfserien. Während die mittleren Verschiebungsmoduln der HB-Serie für den ersten Ast rund 280 kN/mm und für den zweiten Ast rund 300 kN/mm betragen, liegen die PU-Serien (mit und ohne Lochreihe) bei rund 440 kN/mm und 520 kN/mm und somit um rund 60 bis 80 % höher. Die Verschiebungsmoduln der Epoxidharzklebstoffe (CO und COQ) weisen die höchsten Werte mit 720 kN/mm und 600 kN/mm auf. Daraus lässt sich auf eine Abhängigkeit des Verschiebungsmoduls und damit der Steifigkeit der Verbindung von der verwendeten Klebstoffart ableiten.

7-12.8 BAUTEILVERFORMUNGEN IM VERBUNDBEREICH

Neben der Bestimmung der Tragfähigkeit und des Verschiebungsmoduls der Verbindung, wurden während der Zugprüfung an definierten Punkten die Verschiebung gemessen, um diese qualitativ mit aus numerischen Modellen abgeleiteten Bauteilverformungen [1] zu vergleichen. Von eigenen numerischen Untersuchungen wurde aufgrund des begrenzten Zeitrahmens abgesehen.

Die im Folgenden dargestellten Werte stammen aus Messungen mittels induktiver Wegaufnehmer an den in Abbildung 7.18 ausgewiesenen Messstellen. Um die einzelnen Prüfserien (HB, PU, PUL, CO und COQ) vergleichen zu können und die ausgelesenen Daten für weitere Analysen zur Verfügung zu stellen, wurden die Messwerte den einzelnen Datensätze im linear-elastischen Bereich bei einem konstanten Lastniveau von 23 kN entnommen. Die daraus resultierenden Messwerte werden im Folgenden bildlich dargestellt (vergleiche Abbildung 7.18).

Um mögliche Ausreißer zu identifizieren wurden auf Basis der Messaufzeichnungen Weg-Zeit-Diagramme und Arbeitslinien erstellt und auf Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf (Sprünge, ...) untersucht. Jene Diagramme, welche auf eine fehlerhafte Messung schließen lassen, wurden aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Die einzelnen Messwerte (Lastniveau 23 kN) je Messung („seitlich“ und „mittig“) innerhalb der Prüfserie sind den folgenden Diagrammen zu entnehmen.

Anzumerken ist, dass die Stahlverformungen im Bereich von 20 mm über dem Hirnholz nicht abgezogen wurden.

7-12.8.1 „seitliche“ Verformung

Die seitlichen Verformungen wurden mit den Wegaufnehmern SL und SR gemessen und werden in den folgenden Diagrammen dargestellt (vergleiche Abbildung 7.18).

Unregelmäßigkeiten in den Weg-Zeit-Verläufen und Arbeitslinien wiesen folgende Messaufzeichnungen auf:

- aus der HB-Prüfserie:
 - SR: 01, 05 und 09
 - SL: 01
- aus der PUL-Prüfserie:
 - SR: 08
- aus der CO-Prüfserie:
 - SL: 02
- und aus der COQ-Prüfserie:
 - SR: 05.

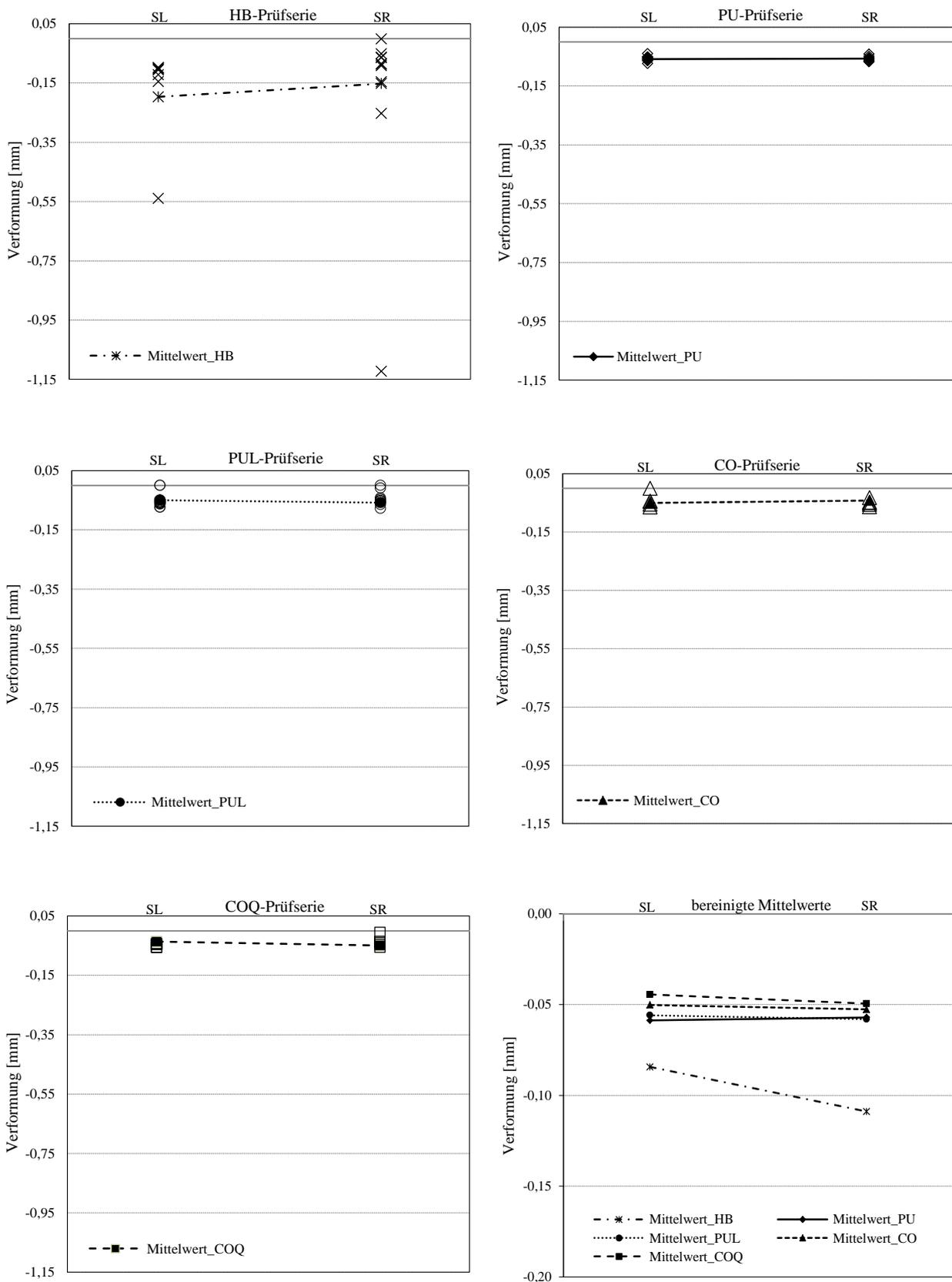


Abbildung 7.52: „seitliche“ Vervormungen pro Prüfserie (nicht bereinigt) und Mittelwerte der Vervormungen aller Prüfserien (bereinigt)

Die Mittelwerte der „seitlichen“ Verbindungswege sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Die größten Verformungen zeigen sich bei der HB-Prüfserie, die gleichzeitig auch die niedrigste Steifigkeit besitzt. Die PU- und PUL-Prüfserien sind nahezu ausgeglichen und die CO- und COQ-Prüfserien zeigen etwas geringere Verformungen.

Tabelle 7.18: Mittelwerte der „seitlichen“ Verformung pro Prüfserie

	HB	PU	PUL	CO	COQ
SL [mm]	0,109	0,057	0,058	0,053	0,049
SR [mm]	0,084	0,059	0,056	0,050	0,037

7-12.8.2 „mittige“ Verformung der Verbindung

Die „mittige“ Verformung wurde mit dem HI-Wegaufnehmer aufgezeichnet (vergleiche Abbildung 7.18). In der Abbildung 7.53 sind alle ausgelesenen Werte dargestellt. Berücksichtigt man die unregelmäßigen Messungen nicht, liegt die „mittige“ Verformung der Verbindung zwischen 0,014 mm und 0,095 mm.

Unregelmäßigkeiten in den Weg-Zeit-Verläufen und Arbeitslinien wiesen folgende Messaufzeichnungen auf:

- aus der HB-Prüfserie: 01 und 05.

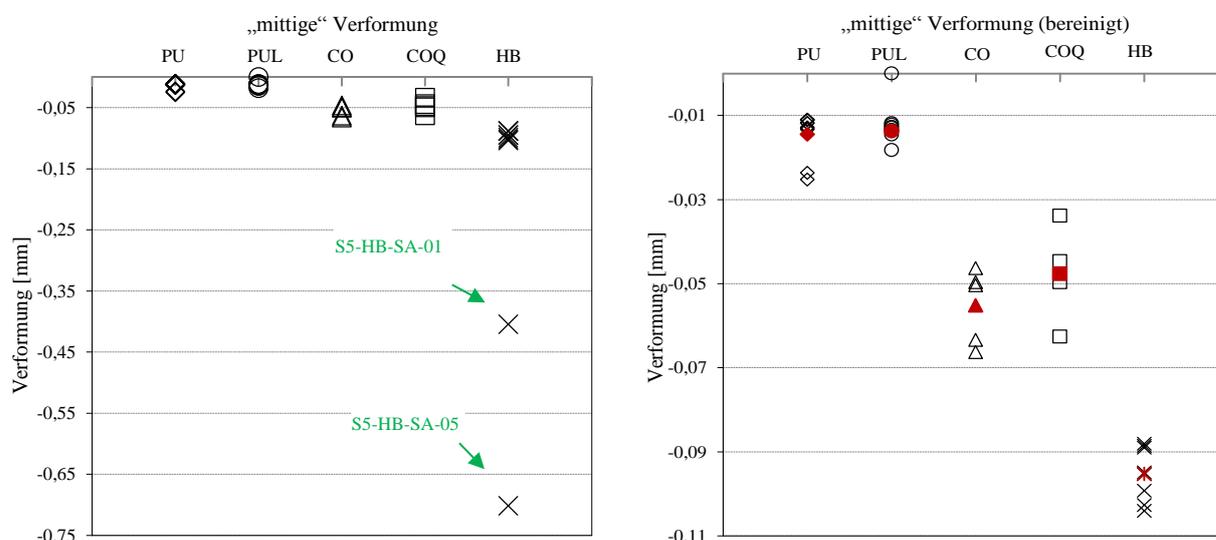


Abbildung 7.53: „mittige“ Vervormungen pro Prüfserie: nicht bereinigt (links) und bereinigt (rechts – Mittelwerte sind rot markiert)

Die Mittelwerte aus der folgenden Tabelle deuten wieder auf den großen Unterschied zwischen der PU- und PUL-Serie zu den allen anderen. Daraus folgen die zehnfach größeren, schon beschriebenen, Steifigkeiten.

Tabelle 7.19: Mittelwerte der „mittigen“ Verformung pro Prüfsrie

	HB	PU	PUL	CO	COQ
HI [mm]	0,095	0,015	0,014	0,055	0,048

7-12.8.3 Verformung an der Hirholzoberfläche

Hier wurden die vertikalen Verformungen des Stahles und des Holzes mitgemessen. Wegen der Position der Wegaufnehmer K1, K2 und K3 (vergleiche Abbildung 7.18) konnte eine Schubverformung des Hirnholzes beobachtet werden. Daraus folgt, dass die Schubverformungen des Holzes bei einer realitätsnahen Abbildung mittels theoretischer Modellansätze berücksichtigt werden sollten. In der TOM-Theorie ist dieser Parameter eingebettet.

Unregelmäßigkeiten in den Weg-Zeit Verläufen und Arbeitslinien wiesen folgende Messaufzeichnungen auf:

- aus der HB-Prüfsrie:
 - K3: 08
- aus der PU-Prüfsrie:
 - K3: 04
 - K2: 04
 - K1: 04 und 05
- aus der PUL-Prüfsrie:
 - K3: 08
 - K2: 08
 - K1: 08 und 06
- aus der CO-Prüfsrie:
 - K3: 01, 02, 03 und 05.

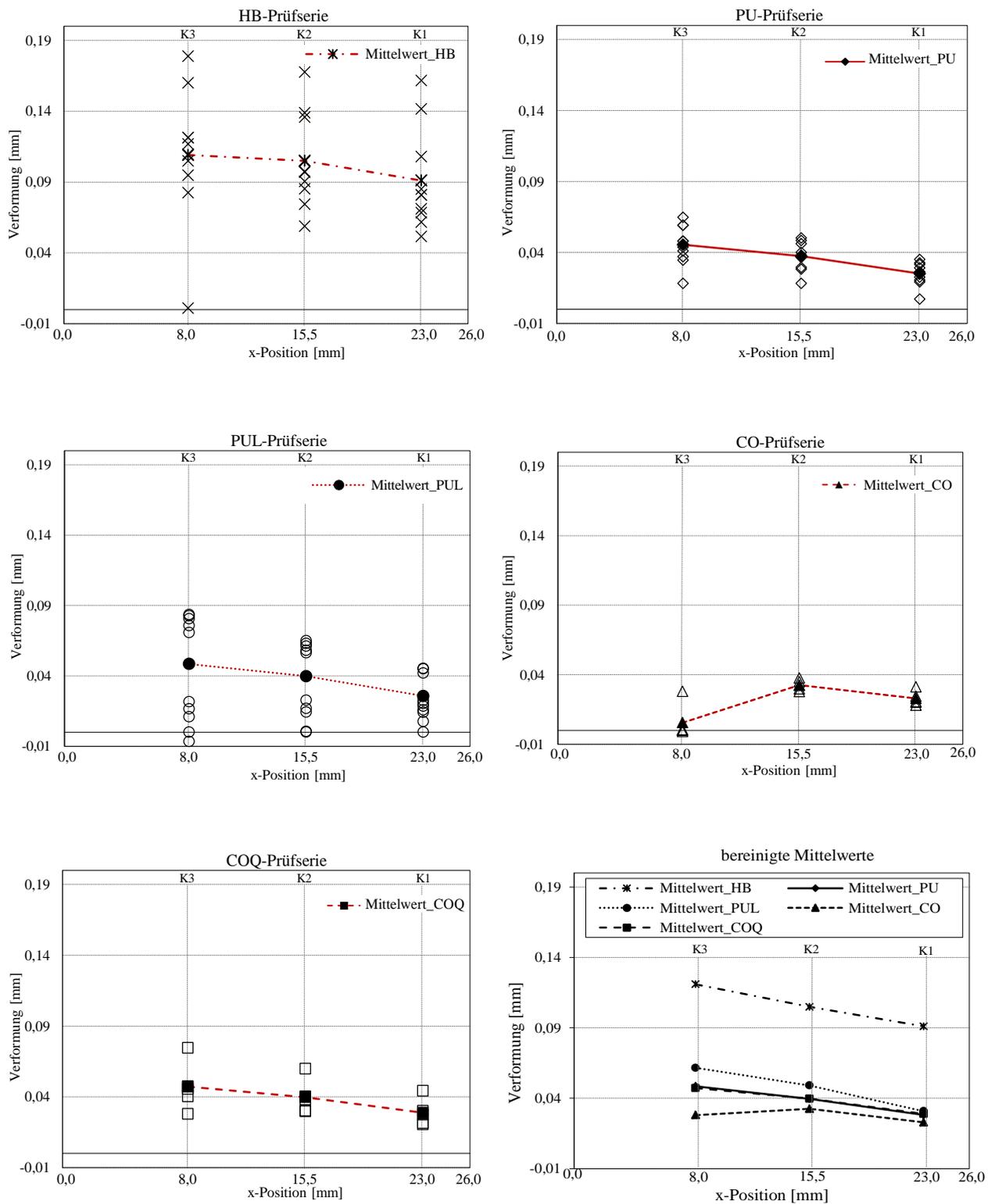


Abbildung 7.54: Vervormungen an der Hirnholzoberfläche pro Prüfserie mit Mittelwerten (nicht bereinigt) und Mittelwerte der Vervormungen aller Prüfserien (bereinigt)

Tabelle 7.20: Mittelwerte der Verformung an der Hirnholzoberfläche pro Prüfserie

	HB	PU	PUL	CO	COQ
K3 [mm]	0,121	0,049	0,055	0,028 ¹	0,047
K2 [mm]	0,105	0,040	0,045	0,032	0,040
K1 [mm]	0,091	0,028	0,029	0,023	0,029

¹ dieser Wert ist der einzige Wert der nicht verworfen wurde und wegen des niedrigerem Wertes im Vergleich zu dem von K2 ist er ebenfalls zu hinterfragen

7-12.8.4 Horizontale Bauteilverformungen

Diese Verformungen wurden mittels der Wegaufnehmer HO, HM und HU gemessen (vergleiche Abbildung 7.18). Die Werte weisen auf Querdruck, Querkzug und Biegebeanspruchungen hin, jedoch werden diese nicht im analytischen TOM-Modell berücksichtigt.

Unregelmäßigkeiten in den Weg-Zeit Verläufen und Arbeitslinien wiesen folgende Messaufzeichnungen auf:

- aus der PU-Prüfserie:
 - HU: 07, 09 und 10
- aus der PUL-Prüfserie:
 - HO: 01, 02, 03, 07 und 08
- aus der CO-Prüfserie:
 - HO: 03
 - HU: 01, 03, 04 und 05
- und aus der-COQ Prüfserie:
 - HO: 02 und 04
 - HU: 02 und 04.

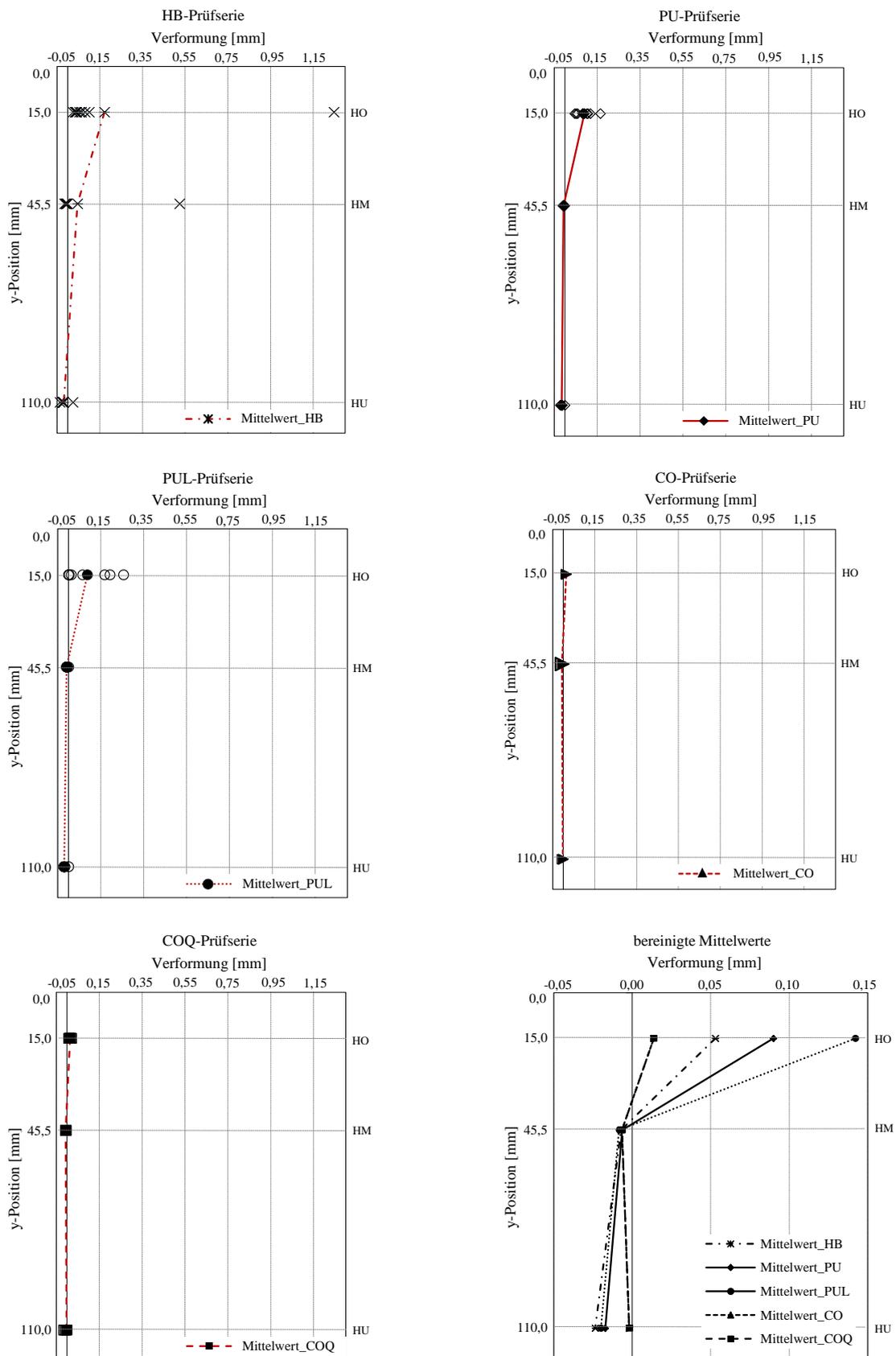


Abbildung 7.55: horizontales Abweichen des Holzes pro Prüfserie mit Mittelwerten (nicht bereinigt) und Mittelwerte der Vervormungen aller Prüfserien (bereinigt)

Aus der Tabelle 7.21 sowie aus der Abbildung 7.55 ist ersichtlich, dass am Messpunkt HO durchwegs positive Messwerte vorliegen. Dies entspricht einem beidseitigen Ausweichen bzw. „Aufweiten“ des Holzes quer zur Klebschicht im Kraffteinleitungsbereich (vom Stahlblech auf den Verbundquerschnitt), d.h. der Abstand des Messpunktes HO bezogen auf die Bauteiloberflächen (Seite A, Seite B), an denen die Messungen angebracht wurden, wird mit steigender Zugbeanspruchung der Verbindung größer und entspricht einer Verformung quer zur Belastungsrichtung. In den Messpunkten HM und HU ergeben sich negative und vergleichsweise kleine Messwerte. Dies entspricht einer Verringerung der Abstände der Messpunkte HM und HU bezogen auf die Bauteiloberflächen (Seite A, Seite B), an denen diese Messungen angebracht wurden, mit steigender Zugbeanspruchung der Verbindung. Die Bauteilverformungen entsprechen somit qualitativ den in Abbildung 5.8 (b) gezeigten Ergebnissen aus einer FE-Studie [1].

Tabelle 7.21: Mittelwerte der Verformung an der Schmalseite des Prüfkörpers pro Prüfserie

	HB	PU	PUL	CO	COQ
HO [mm]	0,053	0,090	0,142	0,014	0,015
HM [mm]	-0,007	-0,006	-0,008	-0,006	-0,006
HU [mm]	-0,024	-0,017	-0,020	-0,002	-0,012

7-12.9 BRUCHBILDER

Wie bei der Prüfdurchführung im Abschnitt 7-6 erwähnt, wurden nach erfolgter Prüfung die Prüfkörper aufgetrennt, um die Bruchflächen der versagten Fügebauteile visuell begutachten zu können. Die einzelnen Bruchflächen wurden eingescannt bzw. fotografiert. Daraus wurde der Holz- bzw. Klebstoffbelag an der Stahloberfläche ermittelt, der Aussagen über die Haftung zwischen dem Klebstoff und dem Holz bzw. dem Stahlblech liefert. Die dazugehörigen Abbildungen mit den erreichten Tragfähigkeiten sind im Anhang zu entnehmen.

In der HB-Prüfserie war anteilig ein Klebstoffbelag an der Stahlblechoberfläche bei fast jedem Prüfkörper vorhanden, jedoch war der größte Flächenanteil des Stahlbleches frei vom Klebstoff. Zu erkennen waren auch Luftblasen, die durch das Schäumen des Klebstoffes verursacht wurden.

Die PU-Prüfserie wies maximal 3 % von der gesamten Klebefläche (beide Seiten) Holzfaserverbelag auf. Falls vorhanden befand sich dieser durchwegs im oberen Bereich der Klebefuge (nah dem Hirnholz). Auffällig sind auch Risse innerhalb der Klebefuge, jedoch kann keine genaue Aussage getroffen werden, ob sie während des Versagens der Verbindung oder während dem manuellen Ausziehen des Stahlbleches entstanden.

Die PUL-Prüfserie wies bis zu 41 % der gesamten Klebefläche Holzfaserverbelag auf dem Stahlblech auf, was eine große Steigerung im Vergleich zu der vorherigen Prüfserie ist. Wie bei der PU-Prüfserie sind Risse innerhalb der Klebefuge und zusätzlich Klebstoffdübel Versagen ersichtlich, jedoch erlaubt die visuelle Begutachtung der Bruchflächen keine Rückschlüsse auf die Versagensursache und den Versagenszeitpunkt.

In der CO-Prüfserie konnte ein Kohäsionsbruch in der Klebefuge sowie Klebstoffbelag am Stahlblech im oberen Teil der Klebefuge beobachtet werden. Der größte Teil des Stahlbleches war frei vom Klebstoff.

Ähnlich war es auch bei der COQ-Prüfserie, wobei zusätzlich das Absinken des Quarzsandes zu sehen war.

Wie schon angedeutet, dürfte die unzureichende Haftung zwischen Klebstoff und Stahl für die geringen Ausnutzungsgrade (bezogen auf Holz und Stahlblech) verantwortlich sein. Untersuchungen an perforierten Blechen (eine Lochreihe), wodurch sich ein mechanischer Verbund zwischen Klebstoff und Stahlblech (Klebstoffdübel) erreichen lässt, führten zu höheren Tragfähigkeiten. Anzumerken ist auch, dass bei allen Prüfserien, außer der HB, keine Luftblasen zu erkennen waren.

KAPITEL 8: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

8-1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Literaturstudie über Klebeverbindungen im Holzbau und über Parameter, die das Tragverhalten von eingeklebten Verbindungsmitteln in Holz (Anker- und Gewindestangen, Stahlbleche) beeinflussen, durchgeführt. Darauf aufbauend erfolgten experimentelle Untersuchungen an zugbeanspruchten eingeklebten Blechen unter Variation der Oberflächenbeschaffenheit des Bleches, der Klebstoffart und des Blechtyps, mit dem Ziel, offene Fragen zum Tragverhalten derartiger Verbindungen zu klären.

Das Versuchsprogramm gliederte sich in Vorversuche und Hauptversuche. Innerhalb der Voruntersuchungen galt es, mittels weniger orientierender Tastversuche jene Parameter zu identifizieren, die das Tragvermögen einer derartigen Verbindung bestimmen, wobei 23 unterschiedliche Parameterausprägungen untersucht wurden. Ferner wurden mittels Applikation von Dehnmessstreifen im Verbundbereich Erkenntnisse über den sich einstellenden Spannungszustand bei Zugbeanspruchung der Verbindung gewonnen.

Im Zuge der Hauptversuche, die insgesamt 5 Prüfserien mit jeweils 5 bis 10 Prüfkörpern umfassten, erfolgte eine Variation des Klebstofftyps und der Perforierung des Bleches. Die wesentlichsten Erkenntnisse aus den Hauptuntersuchungen hinsichtlich Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung wird im Folgenden kurz zusammengefasst:

Die Unterschiede in der Tragfähigkeit bei Verwendung unterschiedlicher Klebstoffe sind signifikant. Die geringste mittlere Scherspannung bei Erreichen der maximalen Traglast liegt bei $2,2 \text{ N/mm}^2$ (HB-Prüfserie) und die höchste beträgt $4,6 \text{ N/mm}^2$ (COQ-Prüfserie). Der Einfluss des Klebstoffes auf die Steifigkeit der Verbindung ist ebenfalls ausgeprägt. Der berechnete mittlere Verschiebungsmodul K_{ser} liegt im Bereich zwischen 270 kN/mm (HB-Prüfserie) und 670 kN/mm (COQ-Prüfserie). Außerdem zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen, dass die Perforation innerhalb des Verbundbereichs zu einer Tragfähigkeitsteigerung führt (Steigerung um 20 %), wohingegen nur geringe Auswirkungen auf die Steifigkeit der Verbindung (Minderung um -2%) festzustellen sind.

Die Bruchbilder lassen auf ungenügenden Verbund zwischen Klebstoff und Stahl schließen, was ein grundsätzliches Problem darstellte. Nur bei einer geringen Anzahl der Prüfkörper befanden sich Holzfasern auf der Blechoberfläche. Ein weiteres Problem stellte die Konsistenz einiger Klebstoffe dar, die zu dick- oder dünnflüssig waren, was deren Verarbeitung während des Einklebevorganges erschwerte.

Die Brutto- und Nettozugspannungen im Stahl und im Holz erwiesen sich als sehr klein, da die gewünschte Leistungsfähigkeit dieser Werkstoffe meistens aufgrund des Adhäsionsversagens zwischen Stahlblech und Klebstoff nicht erreicht wurde.

Neben der Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung lag ein Hauptaugenmerk auf der Bestimmung der sich einstellenden globalen Bauteilverformungen, die wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich einer Entwicklung eines realitätsnahen Tragmodells liefern.

Die Messungen zeigten, dass neben Schubverformungen des Holzes am Hirnholz, auch messbare Querverformungen im Krafteinleitungsbereich auftreten. Daraus lässt sich schließen, dass insbesondere die Querverformung und die damit einhergehende Schälbeanspruchung im Krafteinleitungsbereich das Tragvermögen derartiger Verbindungen unter Zugbeanspruchung maßgeblich beeinflussen.

8-2 AUSBLICK

In weiterführenden Studien sollte der Fokus in erster Linie auf die Optimierung tragfähigkeitsbestimmender Parameter liegen, die es derart zu verändern gilt, dass ein Holzversagen maßgebend wird, wodurch das maximale Tragpotential hinsichtlich Ausnutzung des Fügepartners Holz erreicht wäre.

Da sich herausstellte, dass vermutlich der Verbund zwischen Klebstoff und Stahl maßgebend für ein Versagen war, könnte eine Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit des Stahlbleches zum Beispiel: durch Vertiefungen im Stahl (siehe Abbildung 8.1, Abbildung 8.2) zur Verbesserung des mechanischen Verbundes und damit zu einer Erhöhung der Tragkapazität der Verbindung führen. Ferner könnten in Zusammenarbeit mit Klebstoffherstellern neue und auf die Anwendung angepasste Klebstoffsysteme entwickelt werden.

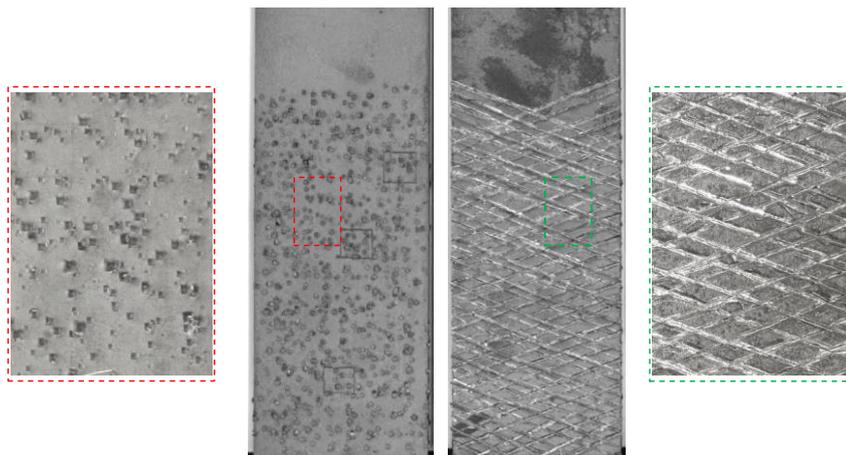


Abbildung 8.1: mechanische Bearbeitung des Stahlbleches in Form vom Raspelhiebl (links) und Kreuzhiebl (rechts)

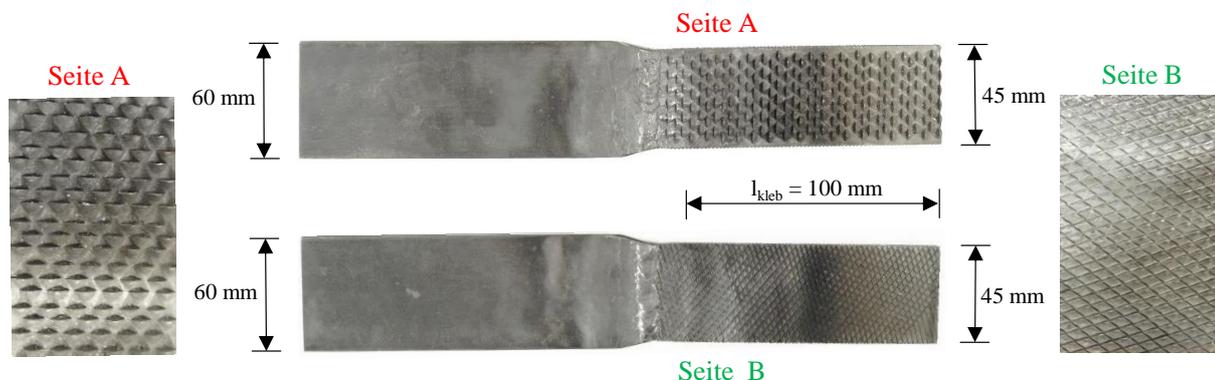


Abbildung 8.2: Feile: Raspelhiebl (Seite A) und Kreuzhiebl (Seite B)

Nach Eruierung der Tragfähigkeit bei maßgebendem Holzversagen ließe sich in weiterer Folge eine untere Schranke definieren, bei der bei Eintritt eines Versagens der Verbindung, die Tragkapazität des Stahlbleches oder Stahlanschlusses erreicht wird. Durch Anpassung der Querschnittsgeometrie beispielsweise durch Anordnung von Löchern außerhalb des Verbundbereichs oder durch entsprechende Ausbildung des Stahlanschlusses könnte zudem ein duktiles Versagen der Verbindung erreicht werden.

Um sich einstellende Spannungszustände besser abbilden und diese mit Modellansätzen vergleichen zu können, sollten weitere Untersuchungen mittels applizierter Dehnmessstreifen erfolgen. Diese sollten gegenüberliegend und in größerer Anzahl auf beiden Seiten des Stahlbleches angeordnet werden. (siehe Abbildung 8.3).

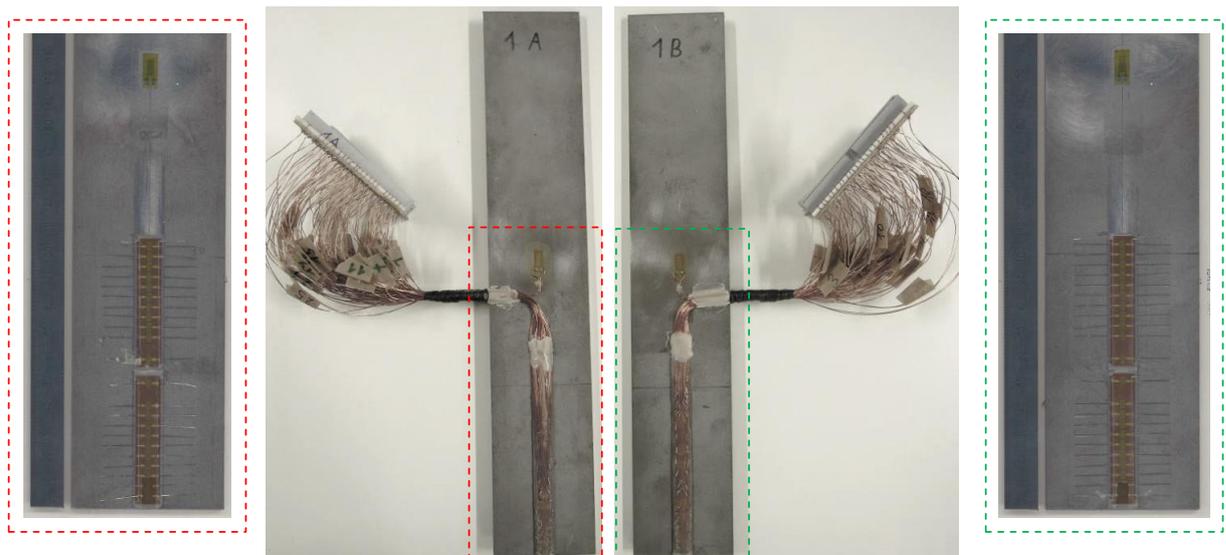


Abbildung 8.3: Applikation der DMS

Zusätzlich sollte eine Analyse und Bewertung der Prüfdaten mittels numerischer Methoden erfolgen. Es wäre sicher noch sinnvoll weiterführende Untersuchungen im Bereich der Holz-Stahl-Klebeverbindungen durchzuführen, da diese Arbeit nur als Grundlage dienen kann und sich durch die Literaturrecherche noch weitere zu Untersuchungen zu Parametern ergeben.

ANHANG A VERZEICHNISSE

A-1 Literaturverzeichnis

- [1] Aicher, S. (1993), Kostensparende Holzverbindungen durch eingeleimte Metallbleche unter Verwendung neuartiger Kleber mit erhöhter Leimfugendicke, Technical report, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg.
- [2] Aicher, S. & Dill (2000), Influence of moisture, temperature and load duration on performance of glued-in rods, in 'International RILEM Symposium on Joints in Timber Structures', pp. 383–392.
- [3] Aicher, S. & Herr, J. (1997), 'Bonded glulam-steel rod connections with long anchorage length', *Otto-Graf-Journal* **8**, 232–254.
- [4] Bahmer, R. (2010), Geklebte Stahl/Holz/Verbindungen - starre Verbindungen mit geringer Querschnittsschwächung, in '1. Internationale Holzbrückentage'.
- [5] Bahmer, R. (2011), 'Geklebte Stahl-Holz-Verbindungen / Tragfähig, steif und duktil', *Adhäsion* (12), 34 – 41.
- [6] Bainbridge, R., Mettem, C., Harvey, K. & Ansell, M. (2002), 'Bonded-in rod connections for timber structures - development of design methods and test observations', *International Journal of Adhesion & Adhesives* **22**, 47–59.
- [7] Bathon, L. & Bletz-Mühldorfer, O. (2002), 'Verbundbau in neuer Dimension', *HOL* **2**, 44–47.
- [8] Bathon, L. & Bletz-Mühldorfer, O. (2008), 'In Holz eingeklebte Verbindungsmittel aus Metall', *HOLZBAU die neue Quadriga* **2**.
- [9] Bathon, L., Bletz-Mühldorfer, O., Diehl, F., Manger, P., Schmidt, J. & Weil, M. (2011), Effiziente Holz-Stahl-Klebeverbindung / Entwicklungen und Anwendung, in 'Holzbautag Biel'.
- [10] Bathon, L., Bletz-Mühldorfer, O., Diehl, F., Schmidt, J. & Weil, M. (2012), 'Grüner Strom aus Windkraftanlagen aus Holz', *VDI Rheingau-Regional-Magazin* **2**, 12–16.
- [11] Bathon, L., Bletz-Mühldorfer, O. & Schmidt, J. (2008), 'Berghalle bei St. Moritz', *HOLZBAU die neue Quadriga* **3**, 26–29.
- [12] 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'.
- [13] Bathon, L., Bletz-Mühldorfer, O., Schmidt, J., Weber, M. & Weil, M. (2010), 'Zur Temperaturbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit von in Holz eingeklebten Gewindestangen und Lochblechen', *HOLZBAU die neue Quadriga* **2**, 45–49.
- [14] Bathon, L., Bletz-Mühldorfer, O., Schmidt, J., Weil, M., Diehl, F. & Wagner, A. (2014), Entwicklung von leistungsstarken Fachwerkstrukturen aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz unter Verwendung innovativer Holz-Metall-Klebeverbindungen, Technical report, Hochschule RheinMain.
- [15] Bernasconi, A. (2014), Eingeleimte Gewindestangen und Lochbleche, in 'Tagungsband- 46. Fortbildungskurs- Holzverbindungen mit Klebstoffen für die Bauanwendung'.
- [16] 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.

- [17] Bletz-Mühldorfer, O., Bathon, L., Diehl, F., Schmidt, J., Weil, M. & Wagner, A. (2014), 'Warum nicht mal kleben? Fachwerkträger mit eingeklebten Lochblechen / Teil 2: Bemessung, Herstellung und Großversuche', *HOLZBAU die neue Quadriga* **5**, 45–52.
- [18] Broughton, J. & Hutchinson, A. (2001a), 'Adhesive systems for structural connections in timber', *International Journal of Adhesion & Adhesives* **21**, 177–186.
- [19] Broughton, J. & Hutchinson, A. (2001b), 'Pull-out behaviour of steel rods bonded into timber', *Materials and Structures* **34**, 100–109.
- [20] Chans, O. M., Cimadevila, J. E. & Gutierrez, E. M. (2008), 'Glud joint in hardwood timber', *International Journal of Adhesion and Adhesives* **28**, 457–463.
- [21] Cimadevila, J. E., Vazquez Rodriguez, J. & Chans Otero, M. (2007), 'Experimental behaviour of threaded steel rods glued into high-density hardwood', *International Journal of Adhesion and Adhesives* **27**, 136–144.
- [22] Colling, F. (2012), Tragfähigkeit von in Furnierschichtholz eingeklebten Gewindestangen: Bauvorhaben "Parasols" in Sevilla, Technical report, Hochschule Augsburg, Fakultät für Architektur und Bauwesen.
- [23] Compono (n.d.), Technische Information / Gießharzsystem COMPONO 100 - COMPONO 100H, Technical report.
- [24] de Bruyne, N. (1944), 'The strength of glued joints', *Aircraft Engineering* **16**, 115–118.
- [25] Deutsches Institut für Bautechnik (2012a), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z -9.1-557, TiComTec GmbH, Holz-Beton-Verbundsystem mit eingeklebten HBV-Schubverbindern, Technical report.
- [26] Deutsches Institut für Bautechnik (2012b), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-778, neue Holzbau AG, 2K-EP-Klebstoff GSA-harz und GSA-Härter für das Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe, Technical report.
- [27] Deutsches Institut für Bautechnik (2013a), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-838, Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke – „Buchen- FSH längslagig“ / „Buchen- FSH querlagig“, Technical report.
- [28] Deutsches Institut für Bautechnik (2013b), Europäische Technische Zulassung ETA-04/0027 - Verbunddübel in den Größen phi 8 mm bis phi 32 mm zur Verankerung im ungerissenen Beton, Technical report.
- [29] Deutsches Institut für Bautechnik (2014), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-705, WEVO-CHEMIE GmbH, 2K-EP-Klebstoff WEVO-Spezialharz EP 32 S mit WEVO-Härter B 22 TS zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe, Technical report.
- [30] Deutsches Institut für Bautechnik (2015), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-707, Purbond AG, 2K-PUR-Klebstoff LOCTITE CR 421 PURBOND zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe, Technical report.
- [31] Ehlbeck, J. & Siebert, W. (1987), Praktikable Einleimmethoden und Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von großen Kräften und bei Aufnahme von Querkraften in Biegeträgern / Teil 1: Einleimmethoden, Messverfahren, Haftspannungsverlauf, Technical report, Universität Fridericiana Karlsruhe - Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine.
- [32] Ehlbeck, J., Belchior-Gaspard, P. & Gerold, M. (1994), Eingeleimte Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von großen Kräften und bei Aufnahme von Querkraften in Biegeträgern / Teil 2: Einfluß von Klimaeinwirkung und Langzeitbelastung, Technical report.
- [33] 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.

- [34] Europäisches Komitee für Normung (1991), Holzbauwerke / Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln / Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983), Technical report.
- [35] Feligioni, L., Lavischi, 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).
- [36] Frihart, C. R. (2005), *Handbook of wood Chemistry and wood composites*.
- [37] Frihart, C. R. (2006), *Characterization of the Cellulosic Cell Wall / Wood Structures and Adhesive Bond Strenght*.
- [38] Fritzen, K. (2006), 'Ein bisschen Spaß muss sein', *Bauen mit Holz* **6**.
- [39] Gardelle, V. & Morlier, P. (2007), 'Geometric parameters which affect the short term resistance of an axially loaded glued-in rod', *Materials and Structures* **40**, 127–138.
- [40] Gehri, E. (1983), 'Entwicklung des ingenieurmässigen Holzbaus seit Grubenmann. Teil II: 20. Jahrhundert und künftige Möglichkeiten', *Schweizer Ingenieur und Architekt* **101**(33/34), 808–815.
- [41] Gehri, E. (2009), Eingeklebte Anker – Anforderungen und Umsetzungen, in '15. Internationales Holzbau-Forum'.
- [42] Gruber, R., Radovic, B. & Werner, G. (1988), Kostensparende Holzverbindungen durch eingeleimte Metallbleche, Technical report, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg.
- [43] Gustafsson, P.J. & Serrano, E. (2001), Glued-in rods for timber structures-development of a calculation model, Technical report, Lund University, Division of Strucctural Mechanics, Lund.
- [44] Habenicht, G. (2006), *Kleben – erfolgreich und fehlerfrei*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag & GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- [45] Hilti Entwicklungsgesellschaft GmbH (2014), Sicherheitsdatenblatt - Hilti HIT-RE 500, Technical report.
- [46] Kühne, Helmut (1979), '70 Jahre geleimte Holz-Tragwerke in der Schweiz', *Schweizer Ingenieur und Architekt* pp. 577–593.
- [47] Konnerth, J., Gindl, W. & Müller, U. (2007), 'Elastic properties of adhesive polymers. part i. polymer films by means of electronic speckle pattern interferometry', *Journal of Applied Polymer Science* pp. 49–53.
- [48] Lehringer, C. (2012), Purbond 2c-adhesives, in 'Cost Action FP 1004'.
- [49] Mischler, A. & Frangi, A. (2001), Pull-out test on glued-in rods at high temperatures, in 'International council for research and innovation in building and construction / Working commission W18 - Timber structures'.
- [50] Müller, J. & von Roth, W. (1991), 'Untersuchungen zum Tragverhalten von parallel zur Faser in Nadelholz eingeleimten Stäben aus unterschiedlichen Materialien', *Holz als Roh- und Werkstoff* **49**, 85–90.
- [51] Moers, F. (1981), 'Anschluß mit eingeleimten Gewindestäben', *Bauen mit Holz* **4**(81), 228–231.
- [52] Obermayr, I. (2014), Leistungsfähige Hirnholz-Schrauben- und Klebeverbindungen für schlanke Birken-Laubholzkonstruktionen, Master's thesis, TU Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [53] ON Österreichisches Normungsinstitut (2007), ÖNORM EN 14358 / Holzbauwerke - Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben, Technical report.

- [54] Otero Chans, M. D., Estevez Cimadevila, J., Martin Gutierrez, E. & Vazquez Rodriguez, J. A. (2010), 'Influence of timber density on the axial strength of joints made with glued-in steel rods: An experimental approach', *International Journal of Adhesion & Adhesives* **30**, 380 – 385.
- [55] Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG (2015). www.pollmeier.com
- [56] Pollmeier, R. (2014a), BauBuche - Der kostengünstige Hochleistungswerkstoff, in 'Tagungsband Karlsruher Tage 2014'.
- [57] Pollmeier, R. (2014b), Ingenious hardwood - BauBuche - Informationen, Technical report, Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG.
- [58] Pörtner, C. & Seim, W. (2008), 'In Holz eingeklebte stiftförmige faserverstärkte Kunststoffe / Experimentelle Untersuchungen und mechanische Modellierung', *Bautechnik* **85**(4), 219–232.
- [59] Purbond-AG (2005), Kurzzeitverhalten und Dauerstandverhalten unter wechselnder klimatischer Beanspruchung von faserparallel in Brettschichtholz eingeklebten Gewindestangen nach DIN 976-1 und Betonrippenstählen nach DIN 488-1 unter Variation des Stangen- und des Bohrlochdurchmessers, der Einbindelänge sowie der Oberflächenbeschaffenheit der Stangen, Technical report, Materialprüfungsanstalt Stuttgart, Otto-Graf-Institut.
- [60] Purbond AG (2010), PURBOND HB 110 / 1K- Polyurethanklebstoff für tragende Holzkonstruktionen nach DIN 1052 einschliesslich Sonderbauweisen, Technical report.
- [61] Purbond AG (2013), PURBOND CR 421 / 2K- Polyurethan-System zum Einkleben von Gewindestangen und Betonrippenstählen in tragende Holzbauteilen, Technical report.
- [62] Purgstaller, T. (2010), Das mechanische Verhalten von Klebeverbindungen im Holzbau, Master's thesis, TU Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [63] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH (2009), Technische Daten Epoxydharz L, Technical report.
- [64] Riberholt, H. (1986), Glued bolts in glulam, in 'International council for building research studies and dokumentation / Working commission W18 - timber structures'.
- [65] Sachs, L. & Jürgen, H. (2006), *Angewandete Statistik / Methodensammlung mit R*.
- [66] Schickhofer, G. (2009), Holzbau- Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz, Technical report, TU Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie.
- [67] Schreyer, A., Lam, F., Prion, H. G. L. & Bathon, L. (2001), 'Strenght capacities and behavior of new composite timber-steel connector', *Journal of structural engineering* pp. 888–893.
- [68] Sika Österreich GmbH (2011), Sika CarboDur Lamellen / Pultrudierte CFK-Lamellen für die Bauteilverstärkung, Technical report.
- [69] Sika Österreich GmbH (2013), Sikadur- 30 Normal, Technical report.
- [70] Steiger, R. & Gehri, E. . W. R. (2006), 'Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain', *Materials and Structures* **40**, 69–78.
- [71] Steiger, R. & Strahm, T. (2013), 'Geklebt statt gedreht', *Hoch hinaus mit Holz* **23**, 23–25.
- [72] Stepinac, M. (2012), Joints in beech-LVL timber frames, in 'COST Action FP1004'.
- [73] Stepinac, M., Rajcic, V., Funger, F., van de Kuilen, J.-W., Tomasi, R. & Serrano, E. (2013), Comparasion 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'.
- [74] Österreichisches Normungsinstitut (1996), ON ISO 3131:1996 / Holz Bestimmung der Dichte für physikalische und mechanische Prüfungen, Technical report.

- [75] Österreichisches Normungsinstitut (2004), ÖNORM EN 13183-1 / Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren / Ausgabe: 2004-02-01, Technical report.
- [76] Strässler, H. (1975), 'Kombination von Holz mit anderen Materialien', *Holz aktuell*.
- [77] Tannert, T., Hehl, S. & Vallee, T. (2010), 'Probabilistische Bemessung von geklebten Anschlüssen im Holzbau', *Bautechnik* **87**(10), 623–629.
- [78] Tannert, T., Vallee, T. & Hehl, S. (2012), 'Experimental and numerical investigations on adhesive bonded hardwood joints', *International Journal of Adhesion & Adhesives* **37**, 65–69.
- [79] TiComTec (2010a), Eingeklebte HSK - Rohrverbinder / Technisches Dossier, Technical report, TiComTec GmbH.
- [80] TiComTec (2010b), Eingeklebte stahlstäbe / technisches dossier, Technical report, TiComTec GmbH.
- [81] Thustochowicz, G., Serrano, E. & Steiger, R. (2011), 'State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods', *Materials and Structures* **44**, 997–1020.
- [82] 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.
- [83] Valenta ZT s.r.o. (2015). <http://www.valentazt.de/>
- [84] Vallee, T., Tannert, T. & Hehl, S. (2011), 'Experimental and numerical investigations on full-scale adhesive bonded timber trusses', *Materials and Structures* **44**, 1745–1758.
- [85] Vallee, Till & Correia, J. R. . K. T. (2006), 'Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded gfrp profiles part i: Experimental and numerical investigations', *Composites Science and Technology* **66**, 1903–1914.
- [86] van Houtte, A., Buchanan, A. & Moss, P. (n.d.), Moment-resisting connections in laminated veneer lumber (lvl) frames, Technical report, University of Canterbury Christchurch, New Zealand.
- [87] Volkersen, O. (1943), Die Schubkraftverteilung auf die Verbindungselemente langer Laschenverbindungen, PhD thesis, Technische Hochschule Wien, Wien.
- [88] Widmann, R. (2014), Bonded-in rods, in 'COST FP1101 Training School'.
- [89] Widmann, R. & Steiger, R. . G. E. (2007), 'Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam perpendicular to the grain', *Materials and Structures* **40**, 827–838.
- [90] Widmann, R. & Steiger, R. (2011), Eingeklebte profilierte stahlstäbe / grundlagen, einflussgrößen, bemessungsansätze, qualitätssicherung, in 'Holzbautag Biel'.
- [91] 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 2.1: Produktionsweg der BauBuche [57]	3
Abbildung 2.2: Einsatz der BauBuche im konstruktiven Bereich: Dachkonstruktion für eine Hallenerneuerung in Herschbach (oben links); Tischlerei "Anton Mohr" in Andelsbuch (oben rechts); Produktionshalle in Vorarlberg (unten links) und Hummelkaserne in Graz (unten rechts) [55]	5
Abbildung 2.3: mechanische Eigenschaften von BauBuche S/Q [27]	6
Abbildung 2.4: zugelassene Verbindungsmittel – BauBuche S/Q (links) und Flächenbezeichnungen (rechts) [27]	7
Abbildung 2.5: Gewindestangen [83] (links), Betonrippenstäbe [80] (Mitte) und unter Verwendung von eingeklebten Gewindestangen errichtetes Bauwerk („Parasol“ in Sevilla) [22] (rechts)	8
Abbildung 2.6: unterschiedliche Rohrhülsen [5] (links), gelochte Rohrhülse [79] (Mitte), unter Verwendung von eingeklebten Rohrhülsen errichtetes Bauwerk (Fußball – Fa. Haas) [79] (rechts)	9
Abbildung 2.7: Hohlkastenträger mit Streckmetallen [8] (links), Streckmetall [4] (Mitte), unter Verwendung von eingeklebten Streckmetallen errichtetes Bauwerk (Brücke in Luxemburg) [4] (rechts)	10
Abbildung 2.8: Lochblech [11] (links), unter Verwendung von eingeklebten Lochblechen errichtete Bauwerke (Berghalle bei St. Moritz [11] (Mitte) und freitragende Treppe im Atrium einer Universität im kanadischen Vancouver [7] (rechts))	11
Abbildung 3.1: Ketten-Analogie für die Verbundfestigkeit nach Marra [37] (links) und rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Klebeverbindung [36] (rechts – bearbeitet)	14
Abbildung 3.2: Bindungskräfte zwischen zwei Fügeanteilen [44] (bearbeitet)	14
Abbildung 3.3: Benetzung unterschiedlicher Klebstoffe [44] (bearbeitet)	15
Abbildung 3.4: Benetzungswinkel (bearbeitet) [44]	15
Abbildung 3.5: Holz-Stahl-Klebeverbindung	17
Abbildung 4.1: Einfluss der Einklebelänge auf die Tragfähigkeit (links) und auf die Scherfestigkeit (rechts) [19] (bearbeitet)	20
Zu den selben Aussagen gelangt auch eine Untersuchung, die in einem umfangreichen Prüfbericht der MPA Stuttgart [59] zu eingeklebten Gewindestangen und Betonrippenstäben mit dem Klebstoff Purbond CR 421 beschrieben wird. Der festgestellte Sachverhalt wird aus den folgenden Abbildung 4.2 ersichtlich.	21
Abbildung 4.3: Einfluss der Einklebelänge auf die Scherfestigkeit bei Gewindestangen (links) und Betonrippenstäben (rechts) [59]	21
Abbildung 4.4: Einfluss der Einklebelänge auf die Bruchlast: links [21] (bearbeitet) und rechts [20].	21
Abbildung 4.5: Größeneinfluss	22
Abbildung 4.6: Einfluss der Klebstoffugendicke auf die Tragfähigkeit (links) und auf die Scherfestigkeit (rechts) von eingeklebten Gewindestangen [19] (bearbeitet)	23
Abbildung 4.7: Einfluss der Klebstoffugendicke auf die Scherfestigkeit (links) [59]	23
Abbildung 4.8: Einfluss der Klebstoffugendicke auf die Tragfähigkeit (oben) und auf die Duktilität der Verbindung (unten) (bearbeitet) [21]	24
Abbildung 4.9: Prüfkfigurationen: unsymmetrisch („push-pull“) (links) und symmetrisch („pull-pull“) (rechts) [18]	25
Abbildung 4.10: Einfluss der Rohdichte des Holzes auf die Scherfestigkeit bei parallel zur Faser eingeklebten Gewindestangen [70] (bearbeitet)	28

Abbildung 4.11: Einfluss der Rohdichte des Holzes auf die Scherfestigkeit bei parallel und senkrecht zu Faser eingeklebten Gewindestangen (ND ... niedrige Rohdichte; HD ... hohe Rohdichte) [88] (bearbeitet) 28

Abbildung 4.12: Einfluss des Feuchtegehalts auf die Ausziehungskraft [18] 29

Abbildung 4.13: Einfluss des Winkels auf die übertragbare Scherfestigkeit (links) und auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung (rechts) [43] (bearbeitet) 30

Abbildung 4.14 Verbindung des Fügeteils mit der Klebeschicht [44] 31

Abbildung 4.15: Einfluss der Klebstoffart auf die Ausziehtragfähigkeit [18] (bearbeitet) 33

Abbildung 4.16: Scherfestigkeit der Klebeverbindung in Abhängigkeit von der Temperatur [49] 34

Abbildung 4.17: Spannungs-Dehnungs-Kurven unterschiedlicher Klebstoffarten (bearbeitet) [35] 35

Abbildung 4.18: einige Brucharten bei eingeklebten Gewindestangen [71] 36

Abbildung 4.19: Einfluss der Einsinktiefen (verbundfreie Zone) auf die Bruchlast (bearbeitet) [19] 37

Abbildung 4.20: Querschnitt ohne und mit Querzugbewehrung [33] 38

Abbildung 5.1: geschlitztes Furnierschichtholz (links) und Fachwerk mit eingeklebten Stahllaschen (Mitte und rechts) [76] 40

Abbildung 5.2: Ergebnisse der Untersuchungen mit eingeklebten Stahllaschen [76] (bearbeitet) 40

Abbildung 5.3: Prüfkonfiguration für Spalt- (links), Druckscher- (Mitte) und Zugscherversuche (rechts) [42] 41

Abbildung 5.4: Zugscherversuche unter 45° (links) und 90° (rechts) Winkel zwischen Holzfasern- und Krafrichtung [42]..... 42

Abbildung 5.5: Mittlere Scherfestigkeit unter 0° (links), 45° (Mitte) und 90° Winkel zwischen Holzfasern- und Krafrichtung (rechts) [42]..... 43

Abbildung 5.6: Prüfkörper zur Ermittlung des Einflusses der Klimawechsellaagerung [42] 43

Abbildung 5.7: Einfluss des Wechselklimas (oben) und Unterschied zwischen der Druck- und Zugbelastung bei unterschiedlichen Klebstoffen, der Einklebelängen und der Blechart (unten) [42].. 44

Abbildung 5.8: Finite Element Modell einer Holz-Stahl-Klebeverbindung: a) unverformt, b) verformt bei Zugbeanspruchung und c) verformt bei Druckbeanspruchung [1] 45

Abbildung 5.9: Druckscherprüfkörper für die Vorversuchsreihe I und Hauptversuchsreihe II [1] 46

Abbildung 5.10: typische Last-Relativverschiebungskurven für die Klebstoffgugendicke von 0,5 mm (ausgenommen PU3) (bearbeitet) [1] 46

Abbildung 5.11: Ergebnisse der Hauptversuche mit EP1: a) Prüftemperatur 70° C, b) Prüftemperatur 40° C, c) Prüftemperatur 20° C [1]..... 47

Abbildung 5.12: Ergebnisse der Hauptversuche EP2b: a) Prüftemperatur 70° C, b) Prüftemperatur 40° C, c) Prüftemperatur 20° C [1]..... 48

Abbildung 5.13: Ergebnisse der Hauptversuche mit PU2: a) Prüftemperatur 70° C, b) Prüftemperatur 40° C, c) Prüftemperatur 20° C [1]..... 48

Abbildung 5.14: Ergebnisse der Hauptversuche und PU4: a) Prüftemperatur 70° C, b) Prüftemperatur 40° C, c) Prüftemperatur 20° C [1]..... 49

Abbildung 5.15: Zugversuche unter Temperaturbeanspruchung (links), Druckscherversuche (Mitte), Rahmeneckenversuche (rechts) [9] 50

Abbildung 5.16: Ergebnisse der Druckscherversuche [9] 51

Abbildung 5.17: Rahmenecken ausgebildet mit einem Keilzinkenstoß (links oben und unten) und mit eingeklebten Lochblechen (rechts oben und unten) [9]..... 52

Abbildung 5.18: Prüfkörper für den Timber Tower [10]	52
Abbildung 5.19: Ergebnis eines Kurzzeitversuches[10]	53
Abbildung 5.20: Kleinprobekörperprüfungen (links) und Prüfkörper mit eingeklebtem Stahlblech (rechts) [84]	54
Abbildung 5.21: Vergleich der Arbeitslinien von mechanischen Verbindungen und Klebeverbindungen (links) und Einfluss der Einklebelänge auf die Tragfähigkeit (rechts) [84].....	54
Abbildung 5.22: Prüfkörper mit eingeklebten Lochblechen [91].....	55
Abbildung 5.23: schematische Darstellung des Prüfkörpers mit eingeklebtem Kreuzblech [52]	56
Abbildung 5.24: Versagen des Prüfkörpers durch unzureichende Haftung zwischen Klebstoff und Stahl [52]	56
Abbildung 6.1: zweischnittige Klebeverbindung: unbelastet (oben), belastet und ohne Scherverformungen der Füge­teile nach Volkersen 1938/de Bruyne 1944 (Mitte) sowie belastet und mit Scherverformungen der Füge­teile nach Tsai et al 1997 [82].....	58
Abbildung 6.2: geometrische und Materialparameter einer zweischnittigen Klebeverbindung [82]....	59
Abbildung 6.3: Verteilung der Schubspannung und der Verschiebung in den Füge­teilen [82].....	59
Abbildung 6.4: Vergleich von experimentell ermittelten Werten der Schubverzerrungen mit theoretisch Schubdehnungsverteilungen: Volkersen/de Bruyne (links) und TOM (rechts) [82]	61
Abbildung 6.5: Abhängigkeit des Verhältnisses der maximalen Schubspannungen nach den beiden Theorien (TOM/Volkersen-de Bruyne) und den Faktoren $\lambda \cdot c$ und α [82]	62
Abbildung 7.1: Überblick über verwendete Materialien	64
Abbildung 7.2: Einschlitzen des Holzes und dessen Vorbereitung für die Verklebung	65
Abbildung 7.3: Oberflächenbehandlungen des Edelstahls: blank, geschliffen und sandgestrahlt (von links nach rechts).....	67
Abbildung 7.4: Ausgangsmaterial: Lochblechtafel (links); Lochblechstreifen und deren Einklebebereich (rechts).....	67
Abbildung 7.5: Ausgangsmaterial: Lochblechstreifen (10 mm) (links); Lochblechstreifen und deren Einklebebereich (rechts).....	68
Abbildung 7.6: Kohlefaserlamelle des Typs S612 vor dem Einkleben.....	69
Abbildung 7.7: eingeklebte Streckmetalle und Längslochbleche	69
Abbildung 7.8: Blechstreifen von Stahlblech S 760 MC (links) und Metallbandsäge (rechts)	70
Abbildung 7.9: fertige Stahlbleche: nichtperforierte (links), perforierte (rechts)	70
Abbildung 7.10: zentrisches Einbringen mithilfe von Abstandhaltern	71
Abbildung 7.11: verwendete Klebstoffe.....	72
Abbildung 7.12: Einspachteln des Klebstoffes	74
Abbildung 7.13: Mischen des Klebstoffes mit unterschiedlichen Füllstoffen	75
Abbildung 7.14: Auslaufen des Klebstoffes sowie Absenkung des Quarzsandes.....	75
Abbildung 7.15: Phasen des Herstellungsprozesses der Prüfkörper	76
Abbildung 7.16: Prüfmaschine (links), schematische Darstellung der Prüfkonfiguration (Mitte), eingespannter Prüfkörper (rechts)	77
Abbildung 7.17: unbelasteter Prüfkörper (0), Deformationen des Holzes in Faserrichtung (1), Verzerrungen (2), Querverformungen (3) und die erwartete Gesamtverformung (4).....	78
Abbildung 7.18: schematische Darstellung der Wegaufnehmer Positionen	79

Abbildung 7.19: Messeinrichtung: Seitenansicht (links) und Ansicht von oben (rechts)	80
Abbildung 7.20: Messeinrichtungsdetails	80
Abbildung 7.21: Prüfkörperbezeichnung des Vorversuches 01	87
Abbildung 7.22: Spezielserien: Zwingen (links), Flächenreduzierung (rechts)	88
Abbildung 7.23: schematische Darstellung der Querschnitte der Prüfkörper der Vorversuchsgruppe	02 90
Abbildung 7.24: Prüfkörperbezeichnung des Vorversuches 02	90
Abbildung 7.25: Positionen der Dehnungsmessstreifen für den Vorversuch 03	91
Abbildung 7.26: Prüfkörperbezeichnung des Vorversuches 03	91
Abbildung 7.27: Lastaufbringung für den Vorversuch 03 und die Hauptserie	92
Abbildung 7.28: Prüfkörperbezeichnung des Vorversuchs 04	93
Abbildung 7.29: typische Kraft-Weg Diagramme der Vorversuche: grober Überblick (oben) und die vergrößerte Darstellung (unten)	95
Abbildung 7.30: Veranschaulichung der Kurven „a“ und „b“ (unterschiedliche Maßstäbe)	96
Abbildung 7.31: Veranschaulichung der Kurven „c“ und „d“ (unterschiedliche Maßstäbe)	97
Abbildung 7.32: Umlagerung der Kräfte auf die linke Seite	97
Abbildung 7.33: Veranschaulichung der Kurven „e“ und „f“ (unterschiedliche Maßstäbe)	97
Abbildung 7.34: Veranschaulichung der Kurven „g“ und „h“ (unterschiedliche Maßstäbe)	98
Abbildung 7.35: Zusammenstellung der Tragfähigkeiten bzw. Maximalkräfte der Vorversuche	99
Abbildung 7.36: ermittelte Normalspannungen im Holzquerschnitt	101
Abbildung 7.37: rechnerische Scherspannungen in der Klebschicht	102
Abbildung 7.38: ermittelte Stahlspannungen der eingeklebten Edelstahlbleche	103
Abbildung 7.39: DMS-Positionen und ermittelte Stahlspannungen mittels DMS	104
Abbildung 7.40: ermittelte Scherspannungen	105
Abbildung 7.41: Anordnung des Bleches im Hirnholz des Furnierschichtholz-Prüfkörpers	107
Abbildung 7.42: Vergleich der Prüfkörper aus den Vorversuch 02	108
Abbildung 7.43: Scherspannungsverteilung nach der TOM-Theorie für unterschiedliche Stahlbleche	109
Abbildung 7.44: Prüfkörperbezeichnung der Hauptprüfungen	109
Abbildung 7.45: Rohdichte der Prüfkörper aus den Hauptprüfungen	112
Abbildung 7.46: Tragfähigkeiten der Verbindung pro Prüfserie	113
Abbildung 7.47: ermittelte Scherspannungen in der Klebefuge	115
Abbildung 7.48: ermittelter E-Modul des Holzes	116
Abbildung 7.49: ermittelte „mittige“ Steifigkeiten der Verbindung	118
Abbildung 7.50: „seitliche“ Steifigkeiten der Verbindung	119
Abbildung 7.51: „seitliche“ Steifigkeiten der Verbindung – bereinigt	120
Abbildung 7.52: „seitliche“ Vervormungen pro Prüfserie (nicht bereinigt) und Mittelwerte der Vervormungen aller Prüfserien (bereinigt)	122
Abbildung 7.53: „mittige“ Vervormungen pro Prüfserie: nicht bereinigt (links) und bereinigt (rechts – Mittelwerte sind rot markiert)	123

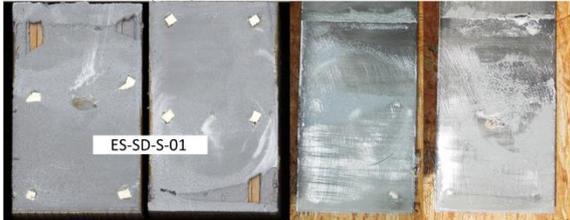
Abbildung 7.54: Vervormungen an der Hirnholzoberfläche pro Prüfserie mit Mittelwerten (nicht bereinigt) und Mittelwerte der Vervormungen aller Prüfserien (bereinigt)	125
Abbildung 7.55: horizontales Abweichen des Holzes pro Prüfserie mit Mittelwerten (nicht bereinigt) und Mittelwerte der Vervormungen aller Prüfserien (bereinigt).....	127
Abbildung 8.1: mechanische Bearbeitung des Stahlbleches in Form vom RaspelhieB (links) und KreuzhieB (rechts)	132
Abbildung 8.2: Feile: RaspelhieB (Seite A) und KreuzhieB (Seite B).....	132
Abbildung 8.3: Applikation der DMS	133

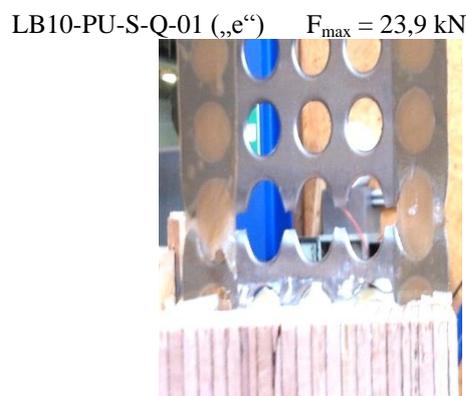
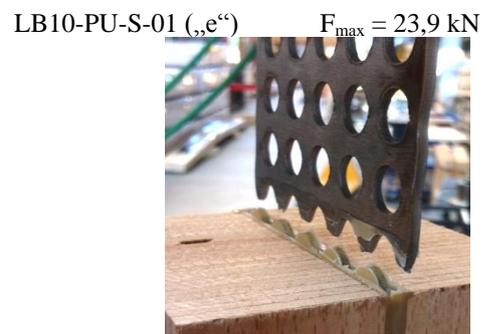
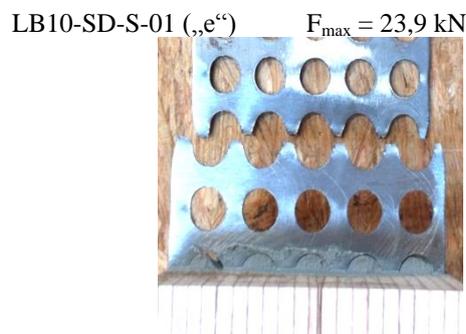
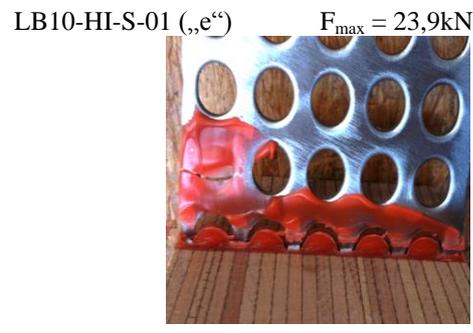
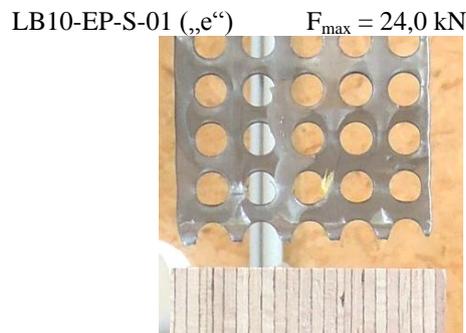
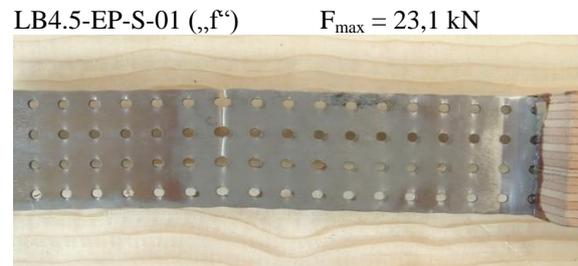
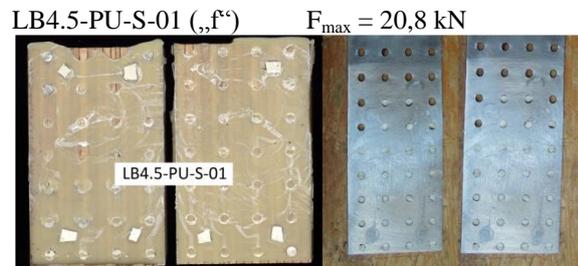
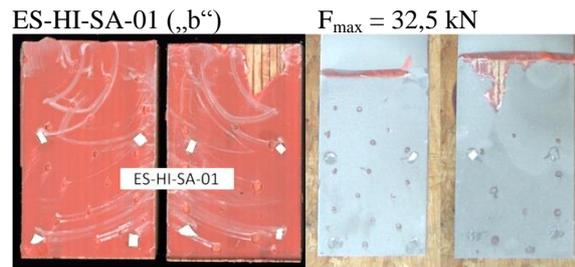
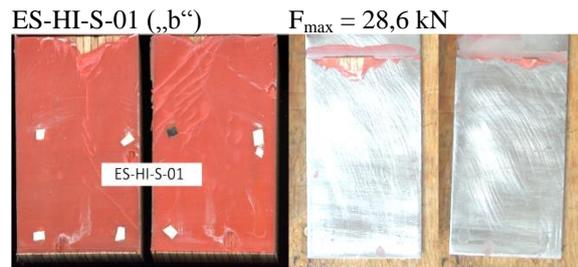
A-3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: BauBuche Produkte [56]	4
Tabelle 3.1: Vergleich wesentlicher Parameter und Eigenschaften der zugelassenen Klebstoffe für Holz-Stahl-Klebeverbindungen.....	18
Tabelle 7.1: Holzgeometrie	66
Tabelle 7.2: Klebstoffeigenschaften.....	73
Tabelle 7.3: Prüfkörperbeschreibung aus dem Vorversuch 01.....	89
Tabelle 7.4: Prüfgeschwindigkeit ohne Hysterese für Vorversuch 01	89
Tabelle 7.5: Prüfgeschwindigkeit ohne Hysterese für den Vorversuch 02	90
Tabelle 7.6: Prüfgeschwindigkeit mit Hysterese für den Vorversuch 03	92
Tabelle 7.7: Prüfgeschwindigkeiten ohne Hysterese für die Nachversuche.....	93
Tabelle 7.8: Materialkennwerte des Edelstahlbleches.....	94
Tabelle 7.9: Vergleich der Tragfähigkeiten in Abhängigkeit des Klebstofftyps.....	100
Tabelle 7.10: Vergleich der Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der Oberfläche des Bleches	100
Tabelle 7.11: statistische Auswertung der rechn. Scherspannung (Klebefläche: 100 x 100 mm) [42]	102
Tabelle 7.12: Hauptprüfungen.....	110
Tabelle 7.13: Prüfgeschwindigkeiten mit Hysterese für die Hauptprüfungen	110
Tabelle 14: statistische Kenngrößen der Rohdichte	111
Tabelle 7.15: statistische Auswertung und charakteristische Werte der Brutto-Zugspannungen	114
Tabelle 7.16: statistische Auswertung und die charakteristische Werte der Scherspannung in der Klebefuge	115
Tabelle 7.17: Vergleich der „mittigen“ Steifigkeit in Bezug auf die „seitlichen“	118
Tabelle 7.18: Mittelwerte der „seitlichen“ Verformung pro Prüfserie	123
Tabelle 7.19: Mittelwerte der „mittigen“ Verformung pro Prüfserie	124
Tabelle 7.20: Mittelwerte der Verformung an der Hirnholzoberfläche pro Prüfserie	126
Tabelle 7.21: Mittelwerte der Verformung an der Schmalseite des Prüfkörpers pro Prüfserie.....	128

ANHANG B BRUCHBILDER

Vorversuch 01

ES-PU-B-01 („d“) $F_{\max} = 21,3 \text{ kN}$ ES-PU-B-02 („d“) $F_{\max} = 21,7 \text{ kN}$ ES-PU-S-01 („d“) $F_{\max} = 17,5 \text{ kN}$ ES-PU-S-03 („c“) $F_{\max} = 16,2 \text{ kN}$ ES-PU-S-Z-01 („b“) $F_{\max} = 28,5 \text{ kN}$ ES-PU-S-Q-01 („d“) $F_{\max} = 6,8 \text{ kN}$ ES-PU-SA-01 („c“) $F_{\max} = 23,6 \text{ kN}$ ES-PU-SA-Q-01 („c“) $F_{\max} = 22,6 \text{ kN}$ ES-SD-S-01 („b“) $F_{\max} = 32,6 \text{ kN}$ ES-EP-S-01 („d“) $F_{\max} = 25,4 \text{ kN}$ 



Vorversuch 02

SL-SD-P-01 („a“) $F_{\max} = 52,0 \text{ kN}$



SL-SD-PQ-01 („a“) $F_{\max} = 53,9 \text{ kN}$



SL-SD-Q-01 („a“) $F_{\max} = 50,9 \text{ kN}$



SL-SD-QQ-01 („a“) $F_{\max} = 53,9 \text{ kN}$



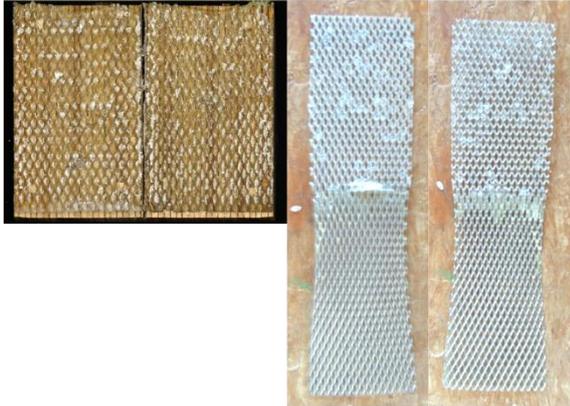
Vorversuch 03

ES-SD-DMS-01 $F_{\max} = 19,2 \text{ kN}$



Vorversuch 04

SM-ESS-CO-01 („g“) $F_{\max} = 16,3 \text{ kN}$



SM-ESS-CO-02 („g“) $F_{\max} = 16,3 \text{ kN}$



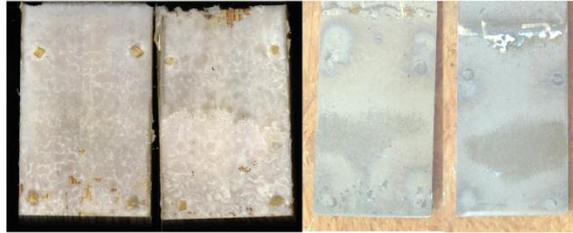
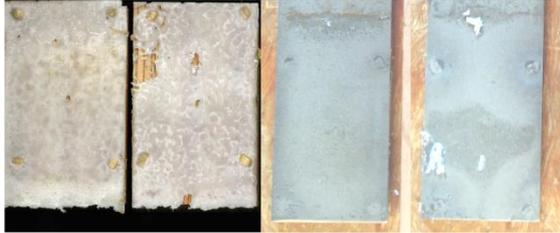
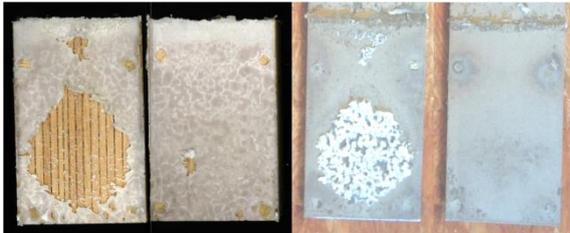
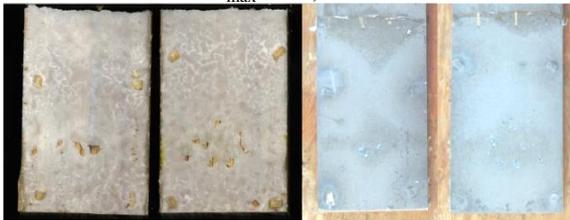
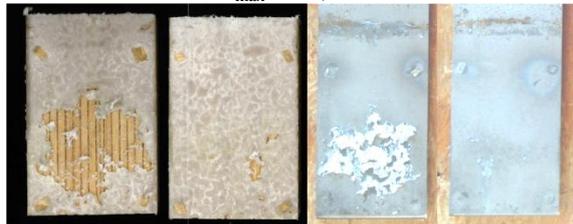
LBL-ESS-CO-01 („h“) $F_{\max} = 5,9 \text{ kN}$

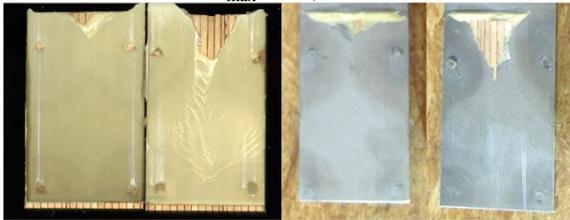
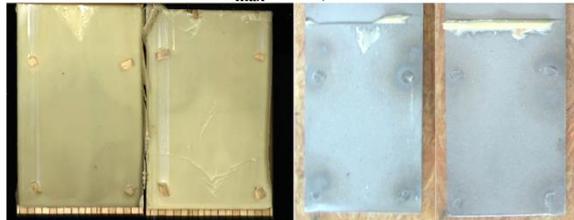
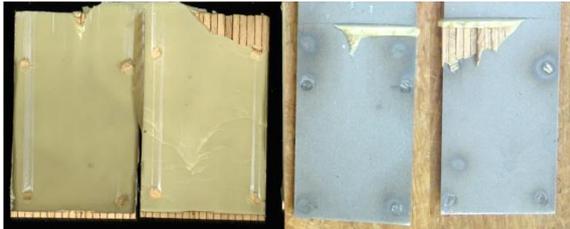


LBL-ESS-CO-02 („h“) $F_{\max} = 5,8 \text{ kN}$



Prüfserie HB

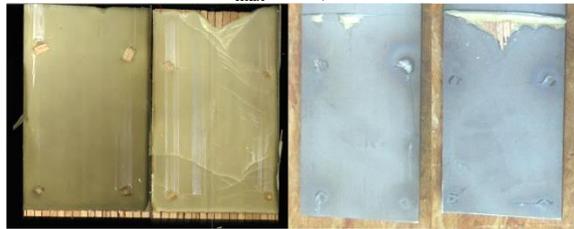
S5-HB-SA-01 $F_{\max} = 24,2 \text{ kN}$ Bruch = obenS5-HB-SA-02 $F_{\max} = 24,6 \text{ kN}$ Bruch = obenS5-HB-SA-03 $F_{\max} = 30,3 \text{ kN}$ Bruch = obenS5-HB-SA-04 $F_{\max} = 26,9 \text{ kN}$ Bruch = untenS5-HB-SA-05 $F_{\max} = 26,9 \text{ kN}$ Bruch = untenS5-HB-SA-06 $F_{\max} = 25,4 \text{ kN}$ Bruch = untenS5-HB-SA-07 $F_{\max} = 28,8 \text{ kN}$ Bruch = obenS5-HB-SA-08 $F_{\max} = 28,3 \text{ kN}$ Bruch = untenS5-HB-SA-09 $F_{\max} = 25,6 \text{ kN}$ Bruch = untenS5D-HB-SA-10 $F_{\max} = 23,6 \text{ kN}$ Bruch = oben

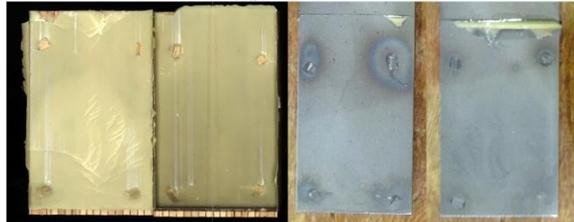
Prüfserie PU
S5-PU-SA-01 $F_{\max} = 46,8 \text{ kN}$ Bruch = oben

S5-PU-SA-02 $F_{\max} = 43,5 \text{ kN}$ Bruch = unten

S5-PU-SA-03 $F_{\max} = 41,5 \text{ kN}$ Bruch = unten

S5-PU-SA-04 $F_{\max} = 33,0 \text{ kN}$ Bruch = oben

S5-PU-SA-05 $F_{\max} = 38,0 \text{ kN}$ Bruch = unten

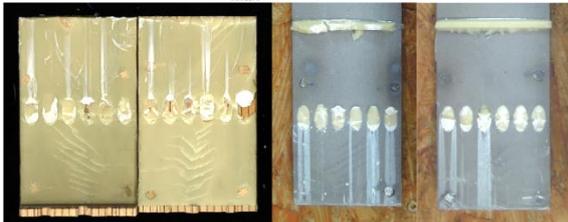
S5-PU-SA-06 $F_{\max} = 33,5 \text{ kN}$ Bruch = oben

S5-PU-SA-07 $F_{\max} = 44,8 \text{ kN}$ Bruch = unten

S5-PU-SA-08 $F_{\max} = 30,7 \text{ kN}$ Bruch = oben

S5-PU-SA-09 $F_{\max} = 40,4 \text{ kN}$ Bruch = unten

S5D-PU-SA-10 $F_{\max} = 48,0 \text{ kN}$ Bruch = unten


Prüfserie PUL

LBD-PU-SA-01 $F_{\max} = 45,8 \text{ kN}$ Bruch = obenLBD-PU-SA-02 $F_{\max} = 42,1 \text{ kN}$ Bruch = untenLBD-PU-SA-03 $F_{\max} = 50,9 \text{ kN}$ Bruch = untenLBD-PU-SA-04 $F_{\max} = 50,3 \text{ kN}$ Bruch = obenLBD-PU-SA-05 $F_{\max} = 50,5 \text{ kN}$ Bruch = obenLBD-PU-SA-06 $F_{\max} = 47,3 \text{ kN}$ Bruch = obenLBD-PU-SA-07 $F_{\max} = 48,1 \text{ kN}$ Bruch = obenLBD-PU-SA-08 $F_{\max} = 50,8 \text{ kN}$ Bruch = untenLBD-PU-SA-09 $F_{\max} = 49,3 \text{ kN}$ Bruch = untenLBD-PU-SA-10 $F_{\max} = 45,6 \text{ kN}$ Bruch = unten

Prüfserie CO

 S5-CO-SA-01 $F_{\max} = 53,9 \text{ kN}$ Bruch = unten

 S5-CO-SA-02 $F_{\max} = 51,8 \text{ kN}$ Bruch = oben

 S5- CO-SA-03 $F_{\max} = 61,4 \text{ kN}$ Bruch = unten

 S5- CO-SA-04 $F_{\max} = 51,6 \text{ kN}$ Bruch = unten

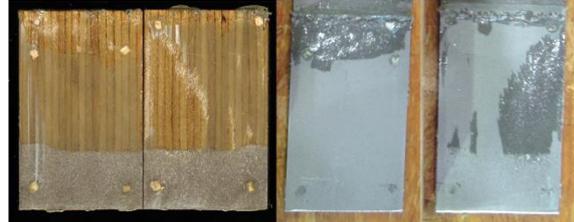
 S5-CO-SA-05 $F_{\max} = 47,2 \text{ kN}$ Bruch = oben

Prüfserie COQ

 S5-COQ-SA-01 $F_{\max} = 65,2 \text{ kN}$ Bruch = unten

 S5- COQ -SA-02 $F_{\max} = 55,5 \text{ kN}$ Bruch = oben

 S5- COQ -SA-03 $F_{\max} = 49,4 \text{ kN}$ Bruch = oben

 S5- COQ -SA-04 $F_{\max} = 51,6 \text{ kN}$ Bruch = unten

 S5- COQ -SA-05 $F_{\max} = 56,5 \text{ kN}$ Bruch = unten


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

Institutskennzahl:

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