

Martin Trautz, Christoph Koj, Andrija Pranjic

# **Fügung und Verstärkung von Brettschichtholzbauteilen mit ab initio eingeklebten Stahlblechlamellen**

F 3037

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung – BBSR – im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-7388-0041-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

## Ergebnisbericht zum Forschungsprojekt

### „Fügung und Verstärkung von Brettschichtholzbauteilen mit ab initio eingeklebten Stahlblechlamellen“

Forschende Stelle:

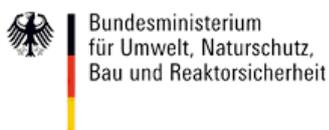
Lehrstuhl für Tragkonstruktionen  
RWTH Aachen  
Schinkelstraße 1  
52062 Aachen

Weitere beteiligte Forschungseinrichtung:

Institut für Bauforschung Aachen (ibac)  
RWTH Aachen  
Schinkelstraße 2  
52062 Aachen

Februar 2017

Gefördert mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit

FORSCHUNGSINITIATIVE  
**Zukunft BAU**



Bundesinstitut  
für Bau-, Stadt- und  
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung



## Inhalt

1	Anlass und Ausgangslage	2
2	Gegenstand und Zielsetzung des Forschungsprojekts	4
3	Durchgeführte Untersuchungen	5
3.1	AP 0: Evaluation geeigneter Klebstoffe und Stahlblechsorten für die Verklebung von Holzlamellen und Stahlblechen	5
3.2	AP 1: Kurzzeitversuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Klebeverbindung Holz-Stahlblech an Kleinproben	11
3.2.1	Versuchsreihe 1A	13
3.2.2	Versuchsreihe 1B	22
3.2.3	Versuchsreihe 1C	28
3.2.4	Versuchsreihe 1D	30
3.2.5	Versuchsreihe 1E	31
3.3	AP 2: Langzeitversuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Klebeverbindung Holz-Stahlblech unter Dauerlast und Klimabeanspruchung	34
3.3.1	Langzeitbelastung im Wechselklima	34
3.3.2	Ermittlung der Resttragfähigkeit nach der Langzeitbelastung	38
3.4	AP 3: Versuche zur Prozeßintegration im Herstellwerk	40
3.4.1	Analyse des Herstellungsprozesses und Evaluation lokaler und zeitlicher Positionen zum Einbau der Bleche	41
3.4.2	Probenvorbereitung im Herstellwerk	44
3.5	AP 4: Bauteilversuche in baupraktischen Dimensionen	50
3.5.1	Versuchsreihe 4V	53
3.5.2	Versuchsreihe 4A	60
3.5.3	Versuchsreihe 4B	67
4	Zusammenfassung und Ausblick	74
5	Mittelgeber	78
6	Literatur	79

# 1 Anlass und Ausgangslage

Im Ingenieurholzbau sind die Verbindungen der einzelnen Bauteile in der Regel maßgeblich für die Querschnittsdimensionierung, da die Tragfähigkeit besonders bei Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln, wie Nägeln, Stabdübeln oder Dübeln besonderer Bauart, deutlich unter der Tragfähigkeit des Holz- oder Brettschichtholzquerschnitts liegt. Darüber hinaus weisen mechanische Verbindungsmittel meist relativ geringe Verschiebungssteifigkeiten auf, die ein weiches Verformungsverhalten der Verbindungen bewirken, das teilweise sogar noch durch einen Anfangsschlupf des Verbindungsmittels verstärkt wird.

Eine deutlich steifere Fügung wird durch geklebte Verbindungen erzielt, die auch eine höhere Auslastung des Querschnitts ermöglichen. Seit langem bewährte Fügungstechniken mittels Klebung sind Schäftungen, beispielsweise zur Verbindung der Furniere innerhalb einer Lage beim Furniersperrholz oder Furnierschichtholz, und Keilzinkenstöße, zur Herstellung von Endloslamellen in der Brettschichtholzproduktion oder als Universalkeilzinkenstoß zur Verbindung von Stäben und Herstellung von biegesteifen Rahmenecken. Auch die Verklebung von Holzlamellen zu Brettschichtholz oder Brettsperrholz und von Kantholzquerschnitten zu Balkenschichtholz sind Standardverfahren zur Herstellung leistungsfähiger Bauelemente für den Ingenieurholzbau. Für diese Holz-Holz-Verklebungen werden seit langem Polykondensationsklebstoffe auf Basis von Harnstoff-, Phenol-, Resorcin- oder Melaminharzen verwendet.

Darüber hinaus wurde seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts vermehrt versucht, Holz- und Brettschichtholzbauteile durch eingeklebte Elemente aus Stahl oder später auch aus faserverstärkten Kunststoffen zu verstärken und zu fügen. Eine intensive und langjährige Forschungstätigkeit gab es zum Themenbereich der eingeklebten Gewindestangen, die vor allem der lokalen Verstärkung von Brettschichtholzbauteilen im Bereich von Querkzugspannungen, zum Beispiel bei gekrümmten Balken oder Satteldachträgern, an ausgeklinkten Auflagern oder bei Trägerdurchbrüchen, eingesetzt werden. Weiterhin werden eingeklebte Gewindestangen als Fügungselemente für leistungsfähige Holz-Holz- oder Holz-Stahl-Verbindungen eingesetzt. Bemessungsansätze für die genannten Konstruktionen haben auch in die aktuelle Holzbaunormung Eingang gefunden. Eingeklebte Stahlbleche waren zwar wiederholt Gegenstand von Forschungsprojekten und wurden auch in geringem Umfang als Verstärkungs- und Fügungselemente genutzt, erlangten jedoch keine größere Verbreitung in der baupraktischen Anwendung. Für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen wurden eingeklebte perforierte Stahlbleche als Verbundelemente entwickelt, um die Schubkräfte in der Verbundfuge zwischen Holz und Beton zu übertragen. Diese Bleche sind auch zur Herstellung leistungsfähiger Holz-Stahl- und Holz-Holz-Verbindungen geeignet. Erste Pilotprojekte mit dieser Fügungsmethode wurde bereits umgesetzt ([1], [2]). Bei fast allen bisher entwickelten Verfahren zum Einkleben von Stahlelementen in Holz- oder Brettschichtholzbauteile erfolgt sowohl die Herstellung der Bohrungen, Ausfräsungen oder Sägeschnitte zur Aufnahme der Stahlelemente als auch die Verklebung selbst im Rahmen des Abbunds im Werk oder ggf. auf der Baustelle. Dies stellt einen zusätzlichen Arbeitsgang dar, bei dem auch die verarbeitungstechnischen Randbedingungen der jeweiligen Klebstoffe eingehalten werden müssen. In der Regel werden die Aussparungen für die Stahlteile mit Übermaß hergestellt, einerseits damit der Einbau der Stahlelemente ohne größeren Kraftaufwand erfolgen kann, andererseits damit durch ein Austreten

des Klebstoffs aus der Fuge oder dem Bohrloch die vollflächige Verklebung von Holz und Stahl einfach visuell geprüft werden kann. Daher müssen die verwendeten Klebstoffe fugenfüllende Eigenschaften besitzen und ohne Preßdruck aushärten. In den bisher durchgeführten Untersuchungen zum Einkleben von stählernen Verstärkungselementen in Holz wurde eine große Zahl unterschiedlicher Klebstoffe verwendet. In der aktuellen Baupraxis haben sich kalthärtende Zweikomponentensysteme auf Basis von Polyurethan (PUR) oder Epoxid (EP) durchgesetzt.

## 2 Gegenstand und Zielsetzung des Forschungsprojekts

Das Forschungsvorhaben ist der Untersuchung der produktionstechnischen Bedingungen und der Festigkeitseigenschaften von mit Stahlblechlamellen gefügten, verstärkten Brettschichtholzbauteilen gewidmet. Entscheidend ist dabei, dass die Stahlblechlamellen nicht nachträglich, sondern beim Herstell-/Laminierprozess im Leimholzbetrieb bereits eingebracht werden (,ab initio'). Auf diese Art und Weise wird sowohl eine produktionstechnische Synergie genutzt, indem Anschluss- und Verstärkungselemente, verbunden mittels hochfester Leimverbindung, in die Herstellung von Brettschichtholzelementen mit einbezogen werden. Darüber hinaus weisen Bleche im Hinblick auf die Kraftübertragung und Festigkeitseigenschaften und auch die konstruktive Durchbildung gegenüber eingeklebten Gewindestangen deutliche Vorzüge auf, so dass die Technik mit ,ab initio' in BSH eingeklebten Stahlblechlamellen hervorragende zukünftige Einsatzchancen im Ingenieurholzbau verspricht.

### 3 Durchgeführte Untersuchungen

Das Forschungsprojekt wurde in fünf Arbeitspakete aufgeteilt, die die wesentlichen Entwicklungsschritte zur Herstellung von Verstärkungen und Verbindungen mit Stahlblechen nach der ‚ab initio‘-Methode umfassten.

#### 3.1 AP 0: Evaluation geeigneter Klebstoffe und Stahlblechsorten für die Verklebung von Holzlamellen und Stahlblechen

Das Arbeitspaket 0 beinhaltete evaluierende Voruntersuchungen zu geeigneten Klebstoffen, die durch den Projektpartner Jowat SE bereitgestellt wurden. Es wurden drei Klebstoffe ausgewählt, die eine gute Eignung zum Verkleben von Holz und Stahl besitzen:

- Einkomponenten-Polyurethanklebstoff Typ Jowapur 686.60 (PUR):

Es handelt sich um einen fugenfüllenden, faserverstärkten Einkomponentenklebstoff, der durch Aufnahme von Wasser aus dem Holz oder der Luft aushärtet. Die Holzfeuchte muss für eine ausreichende Härtung mindestens 8 % betragen; anderenfalls ist die Holzoberfläche zu befeuchten. Die Aushärtung erfolgt durch Reaktion von freien Isocyanatgruppen mit Wassermolekülen, wobei Kohlendioxid abgespalten wird. Infolgedessen schäumt der Klebstoff auf, wenn kein ausreichender Pressdruck auf die Klebung aufgebracht wird. Für tragende Anwendungen wird ein Pressdruck von 0,6 – 1,0 N/mm<sup>2</sup> empfohlen. Die erforderlichen Presszeiten liegen je nach Holzfeuchte und Klebfugendicke zwischen drei und vier Stunden. Weiterhin darf die Klebfugendicke einen Wert von 0,3 mm nicht überschreiten. Die sich ergebende Fugendicke ist unter anderem von der Wartezeit zwischen Klebstoffauftrag und Beginn des Pressens abhängig. Bis 30 Minuten Wartezeit ergibt sich eine Fugendicke von 0,1 mm, bei 30 bis 45 Minuten Wartezeit von 0,2 – 0,3 mm. Die maximale Wartezeit von 45 Minuten gilt für eine Holztemperatur von 20 °C, eine relative Luftfeuchte von 65 % und eine Holzfeuchte von 12 %. Höhere Holzfeuchten reduzieren die Wartezeit (offene Zeit). Nach dem Ende der Presszeit können die Bauteile weiter bearbeitet werden; die vollständige Aushärtung benötigt 24 Stunden. Der Klebstoff besitzt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung [3] für die Herstellung verklebter tragender Holzbauteile und ist nach der Klebstoffliste II der MPA Universität Stuttgart [4] auch zur Verklebung von Brettschichtholz nach DIN EN 14080 geeignet. Auch auf Metallen zeigt dieser Klebstoff eine gute Haftung, sodass er zur Herstellung einer Verstärkung von Brettschichtholz mit Stahlblechen sehr gut geeignet ist. Hier kann die Verklebung der Bleche und des Brettschichtholzes mit demselben Klebstoff erfolgen, wodurch der Synergieeffekt der ‚ab initio‘-Verklebung besonders hervortritt. Zu beachten ist der Isocyanatgehalt (> 50 % Diphenylmethandiisocyanat) des Klebstoffs, der aufgrund der Gesundheitsgefahren (Einstufung als gesundheitsschädlich und potentiell krebserregend) besondere Arbeitsschutzvorkehrungen bei der Verarbeitung erfordert. Die Verwendung des Polyurethanklebstoffs ist relativ kostengünstig.

- Zweikomponenten-Epoxidharzklebstoff Typ Jowat® 692.30 (EP):

Der Zweikomponentenklebstoff besteht aus einem Epoxidharz und einem Aminhärter und ist vom Hersteller als hochbelastbarer, dauerhafter Konstruktionsklebstoff zur Einklebung von Stahlstäben, für Reparaturarbeiten und zur Verfüllung von Spalten und Rissen im Holz ausgewiesen. Er kann auch zur Klebung vieler anderer Materialien, wie z. B. Metalle, Beton, Stein und verschiedener Kunststoffe eingesetzt werden. Bei sachgemäßer Verarbeitung erreichen mit Jowat® 692.30 eingeklebte Stahlstäbe die in der DIN EN 1995-1-1/NA geforderten Mindestwerte für den Auszieh Widerstand. Die Wärmefestigkeit ist mit ca. 100 °C angegeben. Der Klebstoff ist für Innen- und Außenanwendungen geeignet. Die Verarbeitungszeit bei 20 °C Raumtemperatur beträgt ca. 25 – 35 Minuten. Da der Klebstoff wie eine Vergussmasse wirkt, ist zur kompakten Aushärtung kein Pressdruck erforderlich. Die vollständige Aushärtung benötigt bei Raumtemperatur von 20 °C etwa 24 Stunden, wobei bereits nach drei bis vier Stunden eine ausreichende Handlingfestigkeit gegeben ist. Durch Temperaturerhöhung wird die Aushärtung des Klebstoffs deutlich beschleunigt (z. B. auf eine Stunde bei 50 °C). Die Verarbeitung des Epoxidharzklebstoffs ist aus arbeitsschutztechnischen Gesichtspunkten relativ unproblematisch, da nur ein sehr geringes Gefährdungspotential besteht. Hinsichtlich der Kosten ist der Epoxidharzklebstoff die teuerste der untersuchten Alternativen.

- Copolymere Dispersion Typ Jowacoll® EPI 102.49 und Vernetzer Typ Jowat® 195.60 (EPI):

Dieses Zweikomponentensystem besteht aus einer copolymeren Dispersion und einem Vernetzer auf Basis von Isocyanat (MDI). Als Anwendungsbereich des Klebstoffs ist vom Hersteller die Verleimung von Harthölzern (z. B. Eiche, Buche), Hölzern mit hohem Harzanteil (z. B. Kiefer), tropischen und modifizierten Hölzern (z. B. Teak, Meranti, Akkoya®) angegeben. Die maximale Holzfeuchte für die Verleimung beträgt ca. 15 %. Weiterhin wird angegeben, dass Wasserfestigkeit, Temperaturbeständigkeit und mechanische Festigkeit sehr hoch sind und ein ausgezeichnetes Dauerstandverhalten erreicht wird. Das Standardmischungsverhältnis des Klebstoffs beträgt 100 Gew.-% Dispersion und 15 Gew.-% Vernetzer. Mit steigendem Vernetzeranteil nimmt die Steifigkeit und Festigkeit des Klebstoffs zu. Um eine höhere Elastizität der Klebfuge zu erreichen wurde vom Projektpartner Jowat SE ein Vernetzeranteil von 7,5 Gew.-% auf 100 Gew.-% Dispersion empfohlen. Zum Vergleich wurde auch eine Variante mit einem höheren Vernetzeranteil von 20 Gew.-% getestet. Darüber hinaus wurde die Verbesserung der Adhäsion auf den Stahlblechen durch einen Primer (Typ 409.12) untersucht. Die maximale Verarbeitungszeit des angemischten Klebstoffs beträgt, abhängig von der Rührintensität, ca. zwei Stunden. Die offene Zeit zwischen Klebstoffauftrag und Aufbringen des Pressdrucks liegt bei 10 Minuten. Es wird ein Pressdruck von mindestens 0,5 N/mm<sup>2</sup> und eine Mindestpresszeit von 25 Minuten empfohlen. Durch längere Presszeiten kann die Festigkeit der Verklebung erhöht werden. Die Aushärtungs- bzw. Vernetzungsreaktion findet ähnlich wie beim Polyurethanklebstoff durch eine Reaktion des Isocyanatvernetzers mit Wasser statt. In der Polymerdispersion ist ein Wasserüberschuss enthalten, sodass die Aushärtung auch bei sehr geringer Holzfeuchte stattfindet. Das Holz muss beim Aushärten auch Teile des Wassers aus der Dispersion aufnehmen; eine Verklebung zweier nicht poröser Werkstücke (z. B. Stahl-Stahl-Verklebung) ist somit nicht möglich. Wie beim Polyurethanklebstoff

entsteht auch beim EPI-Klebstoff Kohlendioxid als Reaktionsprodukt, wobei das Aufschäumen aufgrund des relativ kleinen Vernetzeranteils deutlich geringer ist. Der Vernetzer ist aufgrund seines sehr hohen Gehalts an Isocyanat (hier: Diphenylmethandiisocyanat) als stark gesundheitsschädlich und potentiell krebserregend eingestuft, sodass entsprechend strenge Arbeitsschutzmaßnahmen beim Umgang mit dem Klebstoff zu beachten sind. Der EPI-Klebstoff liegt kostenmäßig geringfügig unter dem Polyurethanklebstoff.

- Melamin-Harnstoff-Formaldehydharzklebstoff BASF Kauramin® Leim 690 flüssig mit Kauramin® Härter 1690 flüssig (MUF)

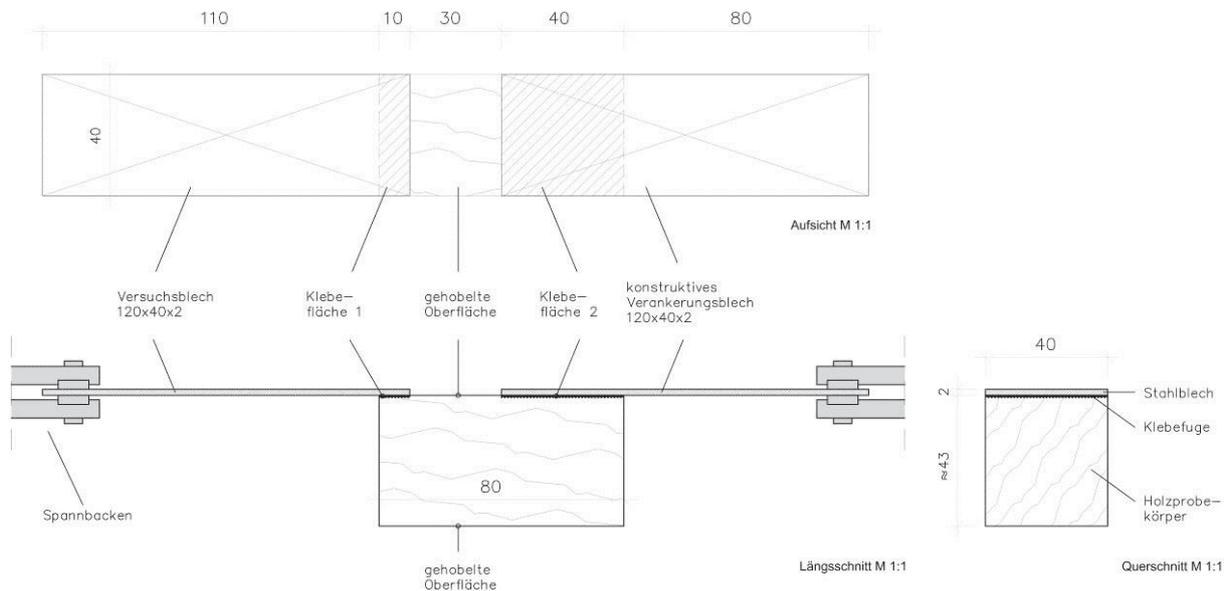
Vom Projektpartner Hüttemann Holz GmbH & Co. KG wurde der in der Brettschichtholzproduktion verwendete zweikomponentige Melamin-Harnstoff-Formaldehydharzklebstoff für Vergleichszwecke zur Verfügung gestellt. Die Leimkomponente enthält ein Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsprodukt in wässriger Lösung. Die Härtingsreaktion wird durch eine Senkung des pH-Werts mittels des stark säurehaltigen Härters induziert. Bei der dann ablaufenden Polykondensationsreaktion vernetzen die im Leim enthaltenen MUF-Prepolymere unter Abspaltung von Wasser. Das mögliche Mischungsverhältnis von Leim zu Härter liegt entsprechend dem Technischen Merkblatt des Herstellers zwischen 100:10 Gew.-% und 100:100 Gew.-%, wobei ein höherer Härteranteil eine schnellere Aushärtung bewirkt. Der Projektpartner Hüttemann empfiehlt das von ihm in Brettschichtholzherstellung meist verwendete Mischungsverhältnis von 100 Gew.-% Leim und 20 Gew.-% Härter, das in den durchgeführten Versuchen benutzt wurde. Die Klebfuge des MUF-Klebstoffs ist, wie bei Aminoplasten üblich, relativ hart und spröde. Beim Aushärtungsvorgang tritt eine geringe Schrumpfung auf. Daher liegen die zu erwartenden Klebefestigkeiten auf Metalloberflächen deutlich unter den Werten der drei anderen untersuchten Klebstoffe. Hinsichtlich der Arbeitssicherheit ist besonders das stark ätzende Verhalten des Härters (enthält 38 % Ameisensäure) zu beachten.

In den Voruntersuchungen kam eine große Bandbreite von Stahlblechen aus verschiedenen Materialien und mit verschiedenen Oberflächen zum Einsatz. Die Bleche wurden vom Projektpartner Pollmann & Sohn GmbH & Co. KG hergestellt und geliefert. Die Bleche hatten bei einer Größe von 120 mm x 40 mm eine Dicke von 2 mm. Die folgenden Varianten wurden geprüft:

- Nichtrostender Stahl Typ V2A mit glatter Oberfläche (in unbearbeitetem Walzzustand)
- Nichtrostender Stahl Typ V2A mit sandgestrahlter Oberfläche
- Baustahl S235, mit roher Oberfläche (unbearbeiteter Walzzustand)
- Baustahl S235, mit sandgestrahlter Oberfläche
- Baustahl S235, galvanisch verzinkt und passiviert
- Baustahl S235, bandverzinkt (Sendzimirverfahren)

Für den Zuschnitt der Holzprobekörper wurden vom Projektpartner Hüttemann Holz GmbH & Co. KG speziell sortierte Brettlamellen aus Fichte geliefert. Die Lamellen wurden maschinell auf eine mittlere Rohdichte von 415 kg/m<sup>3</sup> sortiert und auf eine Dicke von 43 mm gehobelt. In der Holzwerkstatt des Lehrstuhls für Tragkonstruktionen wurden die Probekörper mit den Abmessungen 80 mm x 40 mm x 43 mm zugeschnitten und so selektiert, dass die Klebeflächen frei von Holzfehlern waren.

Die Rohdichten der im Innenraumklima gelagerten Proben wurden ermittelt und die Probekörper an den Projektpartner Jowat SE versandt. Im Technikum von Jowat wurden die Holzproben mit den Stahlblechen zu den in Abbildung 1 dargestellten Zugscherversuchskörpern verklebt.



**Abbildung 1: Probekörper der Vorversuche im AP 0**

Die Stahlbleche wurden vor dem Verkleben mit Ethylacetat gereinigt und entfettet. Anschließend wurde der Klebstoff auf die Holzkörper aufgetragen, die Bleche positioniert und mit Schraubzwingen der erforderliche Pressdruck aufgebracht. Nach der geforderten Presszeit wurden die Versuchskörper im Normalklima (20 °C / 65 % rel. LF) klimatisiert und anschließend in einer Zugprüfmaschine bis zum Bruch belastet.

**Tabelle 1: Blech-Klebstoff-Kombinationen der Vorversuche im AP 0 mit Anzahl der Probekörper (PK)**

Klebstoff	Blech								
	EP 692.30	PUR 686.60	EPI 102.49 7,5 % 195.60	EPI 102.49 20 % 195.60	EPI 102.49 7,5 % 195.60 Primer	EPI 102.49 20 % 195.60 Primer	MUF 690 /1690	MUF 690 /1690+ PUR 686.60	
V2A glatt	4 PK	5 PK	4 PK	-	-	5 PK	5 PK	-	-
V2A gestrahlt	5 PK	5 PK	5 PK	-	-	5 PK	5 PK	-	-
S235 roh	5 PK	5 PK	4 PK	-	-	5 PK	5 PK	-	-
S235 gestrahlt	5 PK	5 PK	5 PK	-	-	5 PK	5 PK	-	-
S235 galvanisch verz.	11 PK	10 PK	10 PK	5 PK	5 PK	5 PK	5 PK	5 PK	5 PK
S235 sendzimir-verz.	9 PK	9 PK	10 PK	5 PK	5 PK	5 PK	5 PK	5 PK	5 PK
Summe	39 PK	39 PK	38 PK	10 PK	10 PK	30 PK	30 PK	10 PK	

Die geprüften Stahl-Klebstoff-Kombinationen sind in Tabelle 1 dargestellt. Bei den Proben in der ganz rechten Spalte sollte eine mögliche Reaktion des Polyurethan-Klebstoffs zum Einkleben der Stahlbleche mit dem MUF-Klebstoff zur Verklebung der Brettschichtholzlamellen bei der Produktion der verstärkten Bauteile im Werk untersucht werden, da sich ein Kontakt der Klebstoffe im Herstellprozess ggf. nicht ausschließen lässt. Bei allen Proben wurde die Bruchlast aufgezeichnet und die Scherfestigkeit der Klebung berechnet. Darüber hinaus wurde das Bruchbild der Klebefläche hinsichtlich des Versagensmodus protokolliert. Abbildung 2 gibt die

ermittelten mittleren Scherfestigkeiten der einzelnen Blech-Klebstoff-Kombinationen mit der Streuung der Werte wieder.

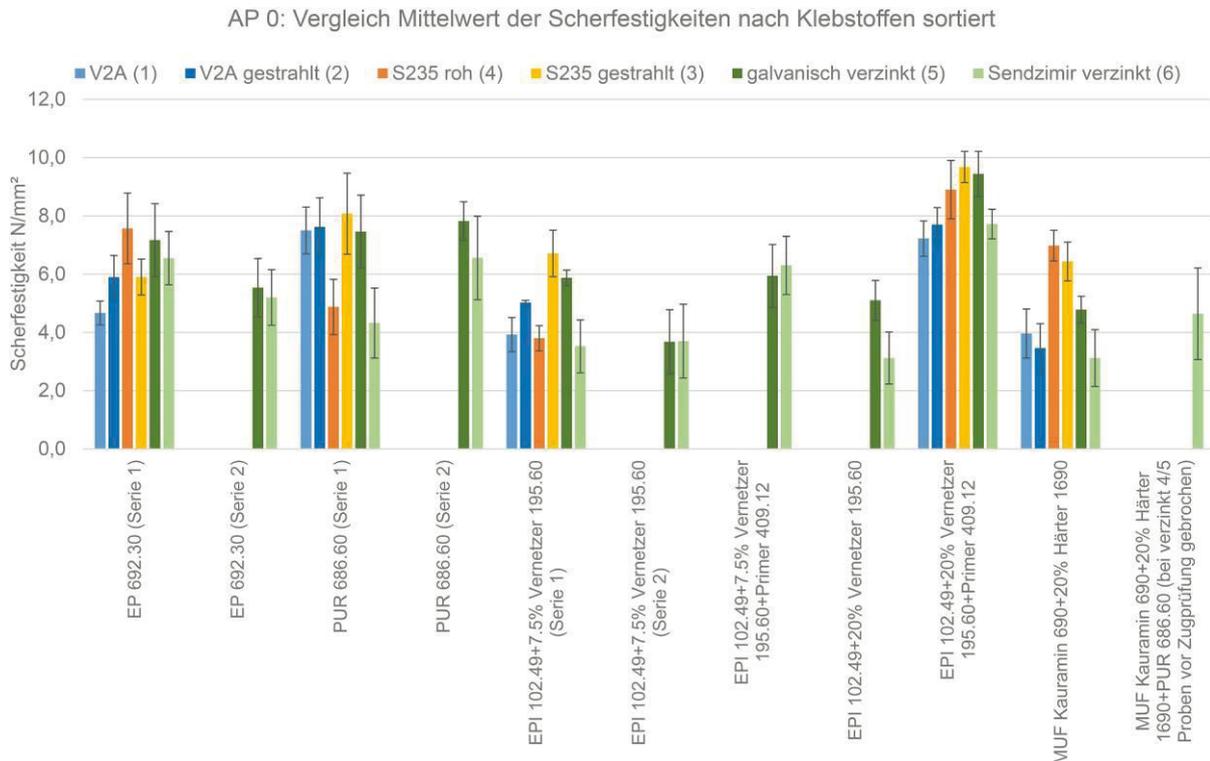


Abbildung 2: Mittelwerte der Scherfestigkeiten der Blech-Klebstoff-Kombinationen in AP 0

Hohe Werte der Scherfestigkeit wurden ohne zusätzliche Vorbehandlung der Blechoberfläche mit einem Primer vom Epoxidharzklebstoff und Polyurethanklebstoff erreicht, während der EPI-Klebstoff sowohl mit 7,5 % als auch mit 20 % Vernetzer deutlich geringere Scherfestigkeiten erzielte. Die Scherfestigkeit ließ sich jedoch durch das Primern der Bleche deutlich erhöhen, sodass die Kombination aus geprimerten Blechen und EPI mit 20 % Vernetzer die höchsten Werte im Test erzielten, bei gleichzeitig sehr geringer Streuung. Allerdings erforderte der Primer eine Trockenzeit von 24 Stunden unter kontrollierten Klimabedingungen, was einen zusätzlichen Bearbeitungsaufwand in der Herstellung darstellt. Ergänzend zu den erzielten Scherfestigkeit bildet auch die Versagensart eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für die Wahl der geeigneten Blech-Klebstoff-Kombinationen. In Abbildung 3 sind die Versagensarten aller Kombinationen als mittlere prozentuale Verteilung dargestellt, wobei zwischen Holzbruch (HB), holznahem Bruch (HnB: Adhäsions- / Klebschichtversagen) und adhäsivem Versagen auf der Metalloberfläche (adMeB) unterschieden wurde.

AP 0: Verteilung der Versagensarten der Blech-Klebstoff-Kombinationen



**Abbildung 3: Verteilung der Versagensarten für die einzelnen Blech-Klebstoff-Kombinationen und zugehörige Scherfestigkeiten, jeweils als Mittelwerte**

Es zeigt sich, dass eine schlechte Adhäsion auf dem Blech mit einer niedrigen mittleren Scherfestigkeit korreliert. Die beste Haftung auf dem Blech wurde vom Epoxidharzklebstoff und dem EPI-Klebstoff in Verbindung mit einer Primer-Vorbehandlung erreicht, wobei der Anteil des adhäsiven Metallversagens unter 20 % lag. Eine sehr gute Adhäsion mit ebenfalls unter 20 % adhäsivem Metallversagen zeigte auch der PUR-Klebstoff in Kombination mit galvanisch verzinkten Blechen.

### 3.2 AP 1: Kurzeitversuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Klebeverbindung Holz-Stahlblech an Kleinproben

Im Arbeitspaket 1 wurden die Eigenschaften der Stahlblech-Holz-Verklebung für die ausgewählten Blech-Klebstoff-Kombinationen aus dem Arbeitspaket 0 in Kurzzeitversuchen ermittelt. Dabei wurden die Probekörper so ausgebildet, dass die Stahlbleche vergleichbar dem Produktionsprozess im Herstellwerk ins Holz eingebaut wurden. Die Holzlamellen für die Probekörper wurden einer speziellen Sortierung unterzogen. Durch den Projektpartner Hüttemann wurden Lamellen mit einer mittleren Rohdichte von  $415 \text{ kg/m}^3$  und geringer Streuung sortiert, gehobelt, durch Keilzinkung verbunden und nochmals auf die endgültige Dicke von 40 mm gehobelt. In der Holzwerkstatt des Lehrstuhls für Tragkonstruktionen erfolgte daraus der Zuschnitt der Probekörper, wobei die einzelnen Zuschnitte so sortiert wurden, dass die Klebefläche für die Blech-Holz-Verklebung frei von Fehlstellen (Äste, Keilzinken, Risse, Harzkanäle, Markröhre) war. Kurz vor der Verklebung wurde am Ende der unteren Holzlamelle auf der Abrichte eine Aussparung mit einer der Blechdicke entsprechenden Tiefe ausgehobelt. Die Verklebung erfolgte dann in zwei Arbeitsschritten: zunächst wurde das Stahlblech mit dem jeweiligen Klebstoff (PUR, EP, EPI) in die Aussparung der unteren Holzlamelle eingeklebt und mittels Schraubzwingen gepresst (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5); anschließend erfolgte das Aufkleben der oberen Holzlamelle mit dem in der Brett-schichtholzherstellung standardmäßig verwendeten MUF-Klebstoff und anschließendem Pressen der Probekörper (siehe Abbildung 6). Alternativ kann dieser zweite Arbeitsschritt auch mit einem anderen zur Holz-Holz-Verklebung mit automatischer Beleimung geeignetem Klebstoff (z. B. PUR) erfolgen.

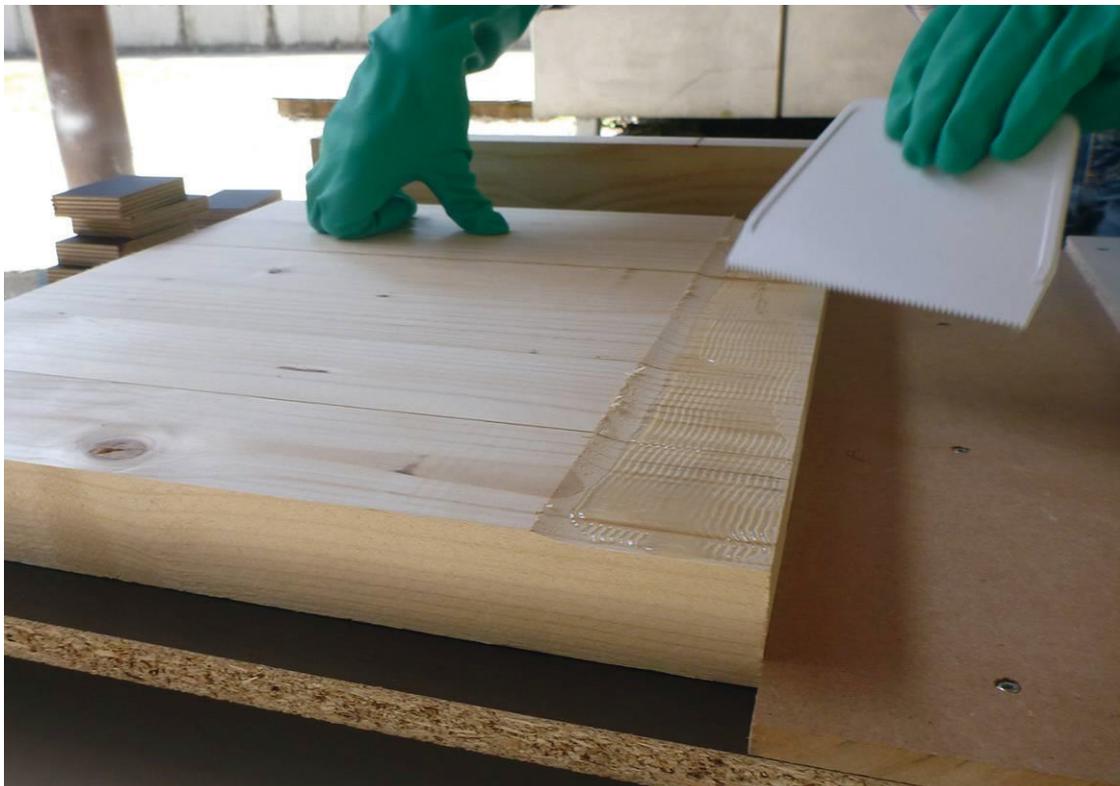


Abbildung 4: Versuchsreihe 1A - Leimauftrag auf abgerichteten Holzlamellen



Abbildung 5: Versuchsreihe 1A – Pressen der Blech-Holz-Verklebung (hier PUR und galvanisch verzinktes Blech)

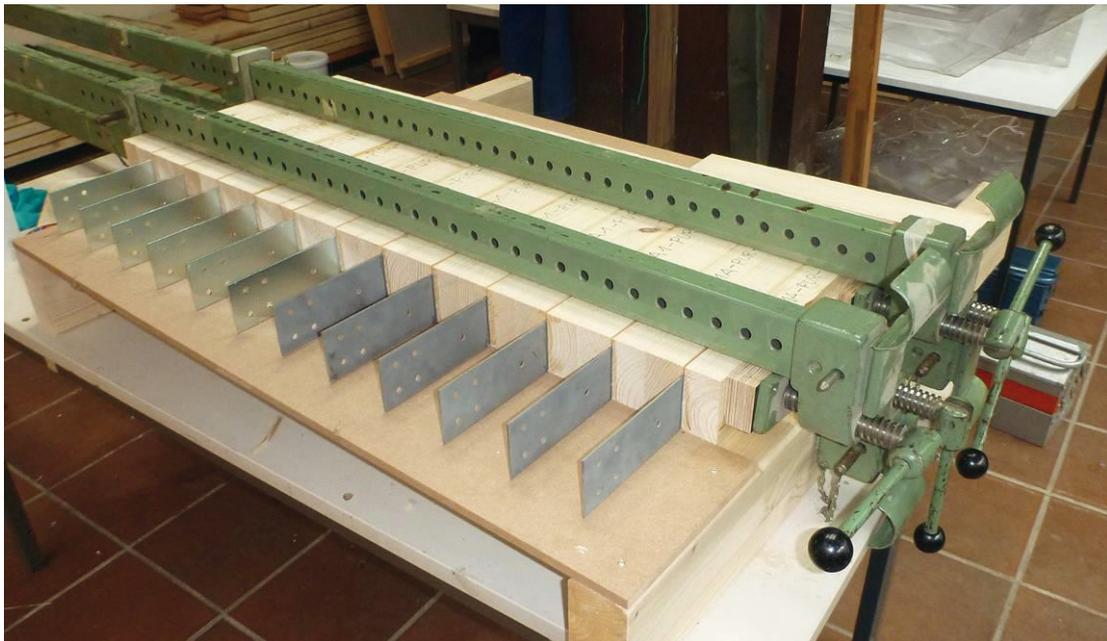


Abbildung 6: Versuchsreihe 1A – Pressen der MUF-Verklebung der Probekörper

In den einzelnen Versuchsreihen wurde der Einfluss unterschiedlicher Blech-Klebstoff-Kombinationen, Einbindelängen, klimatischer Vorbehandlungen und Blechgeometrien untersucht.

### 3.2.1 Versuchsreihe 1A

In der Versuchsreihe 1A wurden Zugversuche an Kleinproben mit dem in Abbildung 7 gezeigten Versuchsaufbau zur Ermittlung der Zugscherfestigkeit bei kombinierter Verklebung (eine Seite PUR, EP oder EPI, zweite Seite MUF) durchgeführt. Dabei kam eine elektromechanische Prüfmaschine zum Einsatz, wobei die Belastung weggesteuert mit einem Traversenvorschub von 0,7 mm/min aufgebracht wurde.

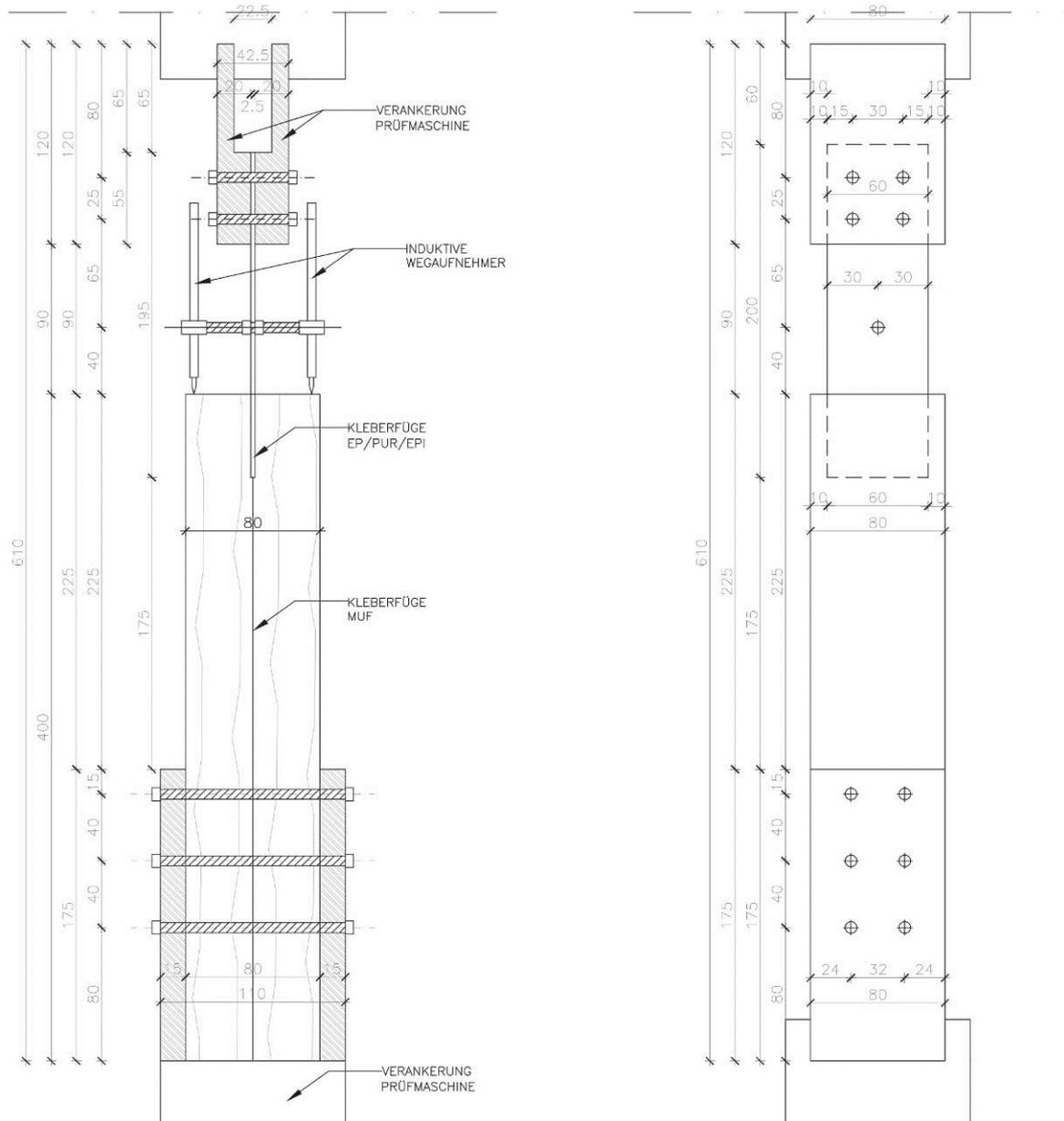


Abbildung 7: Versuchsaufbau der Zugversuche in Versuchsreihe 1A

Die Verankerung des Stahlblechs erfolgte über vier Bolzen M6, auf der Holzseite war zunächst eine Verbindung mit sechs Bolzen M8 vorgesehen. Diese wies jedoch in den Versuchen, bedingt durch das Lochspiel der Bohrungen, erhebliche Verformungen auf, die sich auch in der Last-Verschiebungs-Kurve an der Traverse zeigten. Daher wurde für die weiteren Versuche eine Verbindung mit Holzschrauben mit 10 mm Durchmesser verwendet.

Für die ausgewählten Blechtypen wurden zunächst die in Tabelle 2 dargestellten Blech-Klebstoff-Kombinationen in Zugversuchen miteinander verglichen.

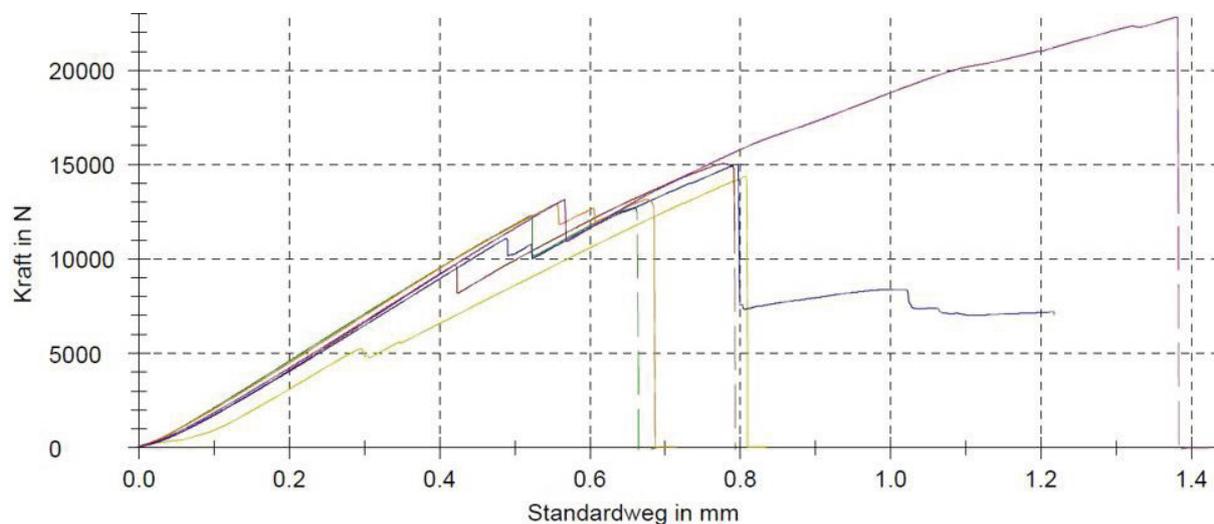
**Tabelle 2: Stahlblech-Klebstoff-Kombinationen der Zugversuche in Versuchsreihe 1A mit einseitiger MUF-Fuge**

Klebstoff \ Material	S235 schwarz gestrahlt (RG)	S235 galv. verzinkt (GV)	S235 Sendzimir-verzinkt (SZ)	Summe
EP 692.30	6 Proben	6 Proben	-	12 Proben
PUR 686.60	6 Proben	6 Proben	6 Proben	18 Proben
EPI 102.49	-	6 Proben	-	6 Proben
Summe	12 Proben	18 Proben	6 Proben	<b>36 Proben</b>

Die mittleren Bruchlasten der Blech-Klebstoff-Kombinationen sowie die statistische Auswertung der Variationskoeffizienten und 5%- bzw. 95%-Quantilwerte sind in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Versuchsreihe 1A: Statistische Auswertung der Bruchlasten der Zugversuche mit unterschiedlichen Stahlblech-Klebstoff-Kombinationen (incl. Rohdichte der Holzlamellen)**

Klebstoff	Blech	$F_{u,m}$ [N]	COV [%]	$q_{0,05}$ [N]	$q_{0,95}$ [N]	$\rho_{\text{mean,ges}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PUR	GV	14326	21,71%	9211	19440	418
PUR	RG	15515	23,93%	9408	21622	413
PUR	SZ	16410	15,95%	12104	20716	445
EPI7,5	GV	13883	10,39%	11510	16257	440
EP	GV	15318	18,92%	10550	20085	428
EP	RG	15937	19,68%	10778	21095	511

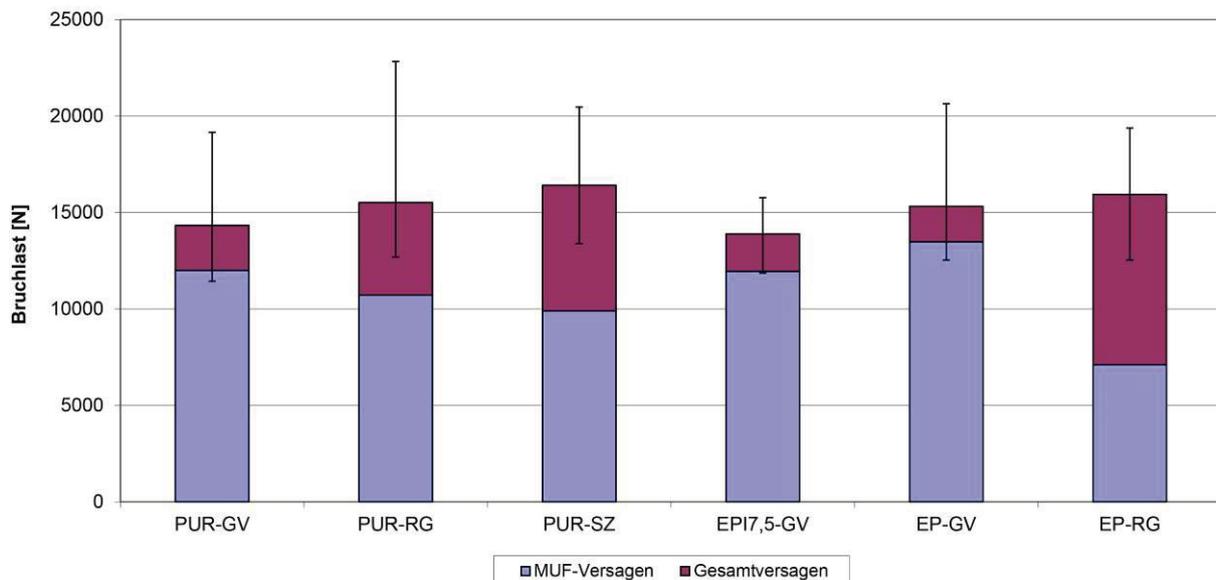


**Abbildung 8: Versuchsreihe 1A, Kraft-Verformungs-Kurven der Kombination PUR-RG**

Aufgrund der relativ schlechten Adhäsion des MUF-Klebstoffs auf der Blechoberfläche zeigte sich in den Versuchen ein zweistufiges Versagen. Zunächst kam es zum Bruch der MUF-Fuge, wobei adhäsives Versagen des Klebstoffs auf der Metalloberfläche auftrat. Anschließend versagte die Klebefuge in der Aussparung, die mit PUR-, EP- bzw. EPI-Klebstoff geklebt war. Hier trat vorwiegend ein Schubversagen im Holz, lokal aber auch Adhäsionsbruch auf der Metalloberfläche auf. Die Kraft-Verformungs-Kurven aller Stahlblech-Klebstoff-Kombinationen sind im Anhang dargestellt. Abbildung 8 zeigt exemplarisch das Last-Verformungs-Diagramm der Kombination PUR-RG.

In Abbildung 9 sind die Mittelwerte der Bruchlasten der MUF-Fuge und der unteren Klebefuge (PUR, EP oder EPI), d. h. die Gesamtbruchlast, für die geprüften Blech-Klebstoff-Kombinationen einander gegenübergestellt. Linienzeiger geben die jeweiligen Maximal- und Minimalwerte der Gesamtbruchlasten wieder. Es zeigt sich deutlich, dass bei frühzeitigem Versagen der MUF-Fuge eine höhere Gesamtbruchlast erreicht wird. Je höher die Bruchlast der MUF-Fuge ist, umso größer ist auch die Kraft, die bei ihrem Bruch schlagartig in die verbleibende Klebfuge (PUR, EP oder EPI) umgelagert wird und zu einer geringeren Gesamtbruchlast führt.

**VR 1A: Tragfähigkeit Probekörper mit oberseitiger MUF-Verklebung**



**Abbildung 9: Mittelwerte der Bruchlasten der Probekörper der VR 1A für unterschiedliche Blech-Klebstoff-Kombinationen jeweils mit Darstellung der Last beim Versagen der MUF-Fuge; Max- und Min-Werte der Bruchlasten über Zeiger im Diagramm dargestellt**

Für die praktische Anwendung ist mit Bruch der MUF-Fuge der Grenzzustand der Tragfähigkeit erreicht, da er einer Delamination des Bauteils im Anschlussbereich, verbunden mit einem Verlust der Schubtragfähigkeit entspricht. Daher erscheinen in dieser Versuchsreihe die Kombinationen mit galvanisch verzinkten Stahlblechen hinsichtlich der praktischen Anwendung am geeignetsten, obwohl ihre Gesamttragfähigkeiten am geringsten sind.

Als Alternative wurde die beidseitige Verklebung der Stahlbleche mit den drei gewählten Polyadditionklebstoffen, also ohne MUF-Fuge untersucht, um die maximale Tragfähigkeit des Verbundes zu ermitteln. Produktionstechnisch ist diese Verklebungsart mit einem erhöhten Aufwand verbunden, sofern die Brettschichtholzherstellung im Werk mit Melamin- oder Resorcinharzklebstoffen und vollautomatischem Klebstoffauftrag erfolgt, da dann ein Auftrag des MUF- bzw. RF-Klebstoffs auf die Stahlbleche verhindert werden muss. Wird zur Verklebung des Brettschichtholzes Polyurethanklebstoff verwendet, ist die Integration der Verklebung der Stahlbleche in den Produktionsprozess dagegen problemlos möglich. Aktuell wird jedoch nur ein sehr geringer Anteil des in Deutschland hergestellten Brettschichtholzes mit PUR-Klebstoffen verklebt. Die für die Versuchsreihen gewählten Blech-Klebstoff-Kombinationen und die geprüfte Probenanzahl sind in Tabelle 4 aufgelistet.

**Tabelle 4: Versuchsreihe 1A: Stahlblech-Klebstoff-Kombinationen mit beidseitiger EP-/PUR-/EPI-Verklebung der Stahlbleche (ohne MUF)**

Klebstoff \ Material	S235 schwarz Gestrahlt (RG)	S235 galv. verzinkt (GV)	S235 galv. verzinkt rau (GVrauh)	S235 bandverzinkt (SZ)	Summe
EP 692.30	-	5 Proben	-	-	5 Proben
PUR 686.60	-	5 Proben	4 Proben	5 Proben	14 Proben
EPI 102.49	-	5 Proben	-	-	5 Proben
Summe	0 Proben	15 Proben	4 Proben	5 Proben	<b>24 Proben</b>

Erwartungsgemäß erreichten alle Serien in den Zugversuchen deutlich höhere Bruchlasten als die entsprechenden Originalserien mit einseitiger MUF-Fuge. In Tabelle 5 sind die Mittelwerte der jeweiligen Bruchlasten sowie die Variationskoeffizienten, 5%- und 95%-Quantilwerte und mittleren Rohdichten angegeben. Es ergibt sich eine Steigerung der mittleren Bruchlasten zwischen ca. 50 % bis 115 %, bei gleichzeitig deutlich geringerer Streuung (ausgenommen Typ PUR-PUR-SZ). Bei allen Probekörpern war das Schubversagen des Holzes maßgeblich; adhäsives Versagen des Klebstoffs auf der Metalloberfläche trat nur in geringem Umfang auf, mit Ausnahme wieder des Typs PUR-PUR-SZ, wo einzelne Klebfugen über 80 % Adhäsionsversagen zeigten. Die bestätigt noch einmal die schlechtere Haftung der Klebstoffe auf dem bandverzinkten Blech gegenüber dem galvanisch verzinkten Blech, die bereits in den Vorversuchen des AP 0 beobachtet wurde. Aufgrund des in den Langzeitklimaversuchen des AP 2 beobachteten frühzeitigen Adhäsionsversagens der PUR-GV-Verklebung wurde eine zusätzliche Versuchsreihe mit Polyurethanklebstoff und galvanisch verzinkten Blechen, die durch Sandstrahlen vor der Verzinkung eine höhere Rauigkeit besaßen, durchgeführt. Die mittlere Bruchlast lag leicht über den Werten der entsprechenden Kombination ohne Sandstrahlbehandlung.

**Tabelle 5: Versuchsreihe 1A: Statistische Auswertung der Bruchlasten der Zugversuche mit beidseitiger EP-/PUR-/EPI-Verklebung (incl. Rohdichte der Holzlamellen) und Erhöhung der Tragfähigkeit gegenüber einseitiger MUF-Verklebung**

Typ	$F_{u,m}$ [N]	COV [%]	$q_{0,05}$ [N]	$q_{0,95}$ [N]	$\rho_{mean}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{u,m}/F_{u,m,1S-MUF}$
EP-EP-GV	23271	3,95%	21759	24784	433	152%
EPI-EPI-GV	23681	7,12%	20909	26454	460	171%
PUR-PUR-GV	28068	2,51%	26908	29229	400	196%
PUR-PUR-SZ	24268	23,68%	14816	33720	420	148%
PUR-PUR-GVrauh	30957	4,19%	28822	33091	-	216%

Für die Anwendung der Stahlblechverstärkung in der Brettschichtholzherstellung mit Melaminharzverklebung ist zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit der eingeklebten Bleche eine Verbesserung der Adhäsion des MUF-Klebstoffs erforderlich. Aus der Literatur sind Untersuchungen bekannt (vgl. [5]), in denen die Haftung eines Polykondensationsharzes, in diesem Falle ein kalthärtender Phenolharzklebstoff, auf einem Verstärkungsblech durch Beschichtung des Blechs mit einem warmhärtenden Epoxidharzklebstoff deutlich verbessert werden konnte. Daher wurde in einer zusätzlichen Versuchsreihe geprüft, ob sich durch den Auftrag einer Epoxidschicht die Haftung des verwendeten MUF-Klebstoffs auf den verschiedenen Blechoberflächen verbessern lässt. Der Auftrag des Epoxidharzklebstoffs als Primer lässt sich dabei in einem Arbeitsschritt mit dem Verkleben des Stahlblechs auf der unteren Brettlamelle durchführen. Da der Epoxidharzklebstoff zur Aushärtung keinen Pressdruck benötigt, genügt eine einfache Fixierung des Blechs, die mit Holzschrauben erfolgen kann.

Zunächst erfolgte ein probeweiser Auftrag des Klebstoffs auf Blechproben, um die Aushärtung und die Strukturierung der Klebstoffoberfläche zu testen (siehe Abbildung 10). Dazu wurde der Klebstoff in unterschiedlicher Schichtdicke aufgetragen und teilweise mit verschiedenen Werkzeugen (Zahnpachtel, Drahtbürste) strukturiert.

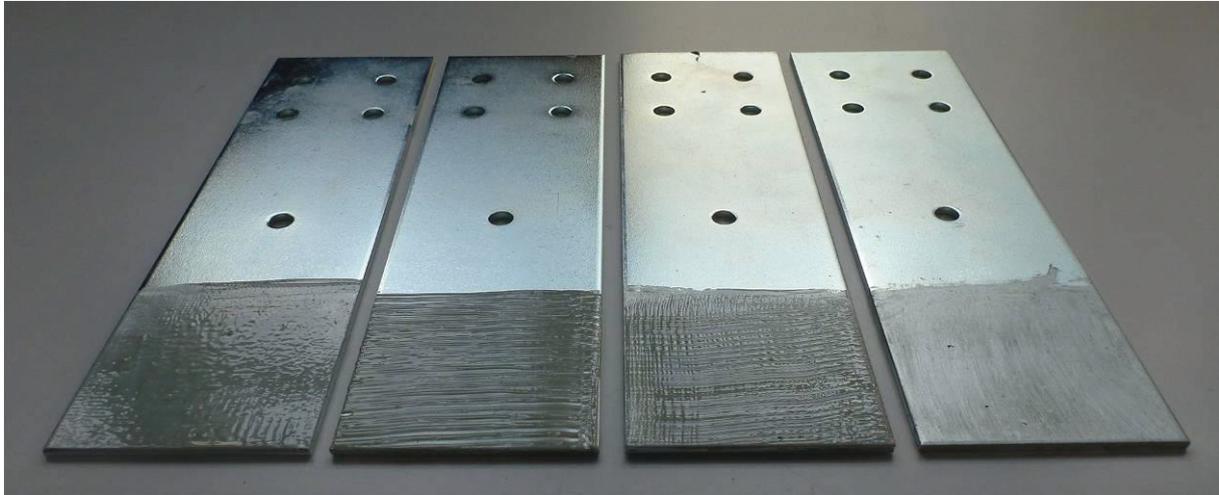


Abbildung 10: Proben zur Beschichtung der Stahlbleche mit Epoxidharzklebstoff

Es zeigte sich, dass der verwendete Epoxidharzklebstoff beim Aushärten eine sehr glatte Oberfläche bildet und die eingepprägten Strukturen teilweise wieder verlaufen (vgl. die beiden mittleren Bleche in Abbildung 10). Als Alternative wurde ein sehr dünner Klebstoffauftrag (Abbildung 10, rechts) untersucht, bei dem noch Oberflächenstrukturen des Blechs bzw. der Verzinkung erhalten bleiben.

Anschließend wurden Probekörper mit der in Abbildung 7 dargestellten Geometrie hergestellt und geprüft. Die Probenanzahl, die gewählten Blechtypen und die Dicke der Epoxidharzschicht sind in Tabelle 6 aufgelistet.

**Tabelle 6: Versuchsreihe 1A: Stahlblech-Klebstoff-Kombinationen mit EP als Primer auf dem Blech in der MUF-Klebefuge (A=dünne Primerschicht, B=dicke Primerschicht)**

Klebstoff	Material	S235 schwarz gestrahlt (RG)	S235 galv. verzinkt (GV)	Summe
EP 692.30 A (dünn)		3 Proben	3 Proben	6 Proben
EP 692.30 B (dick)		3 Proben	3 Proben	6 Proben
Summe		6 Proben	6 Proben	<b>12 Proben</b>

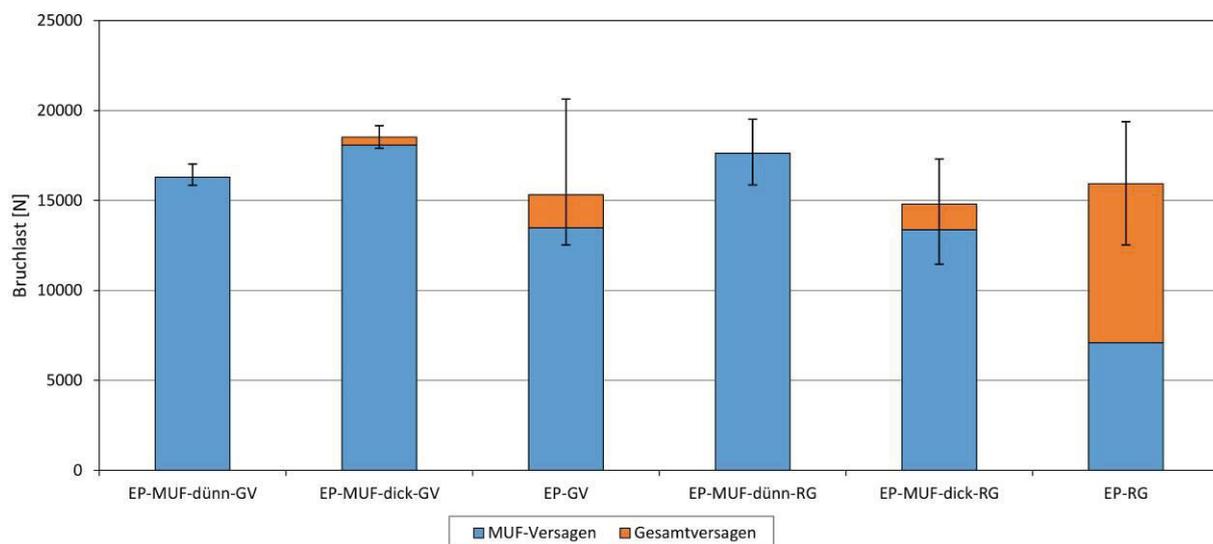
In den Bruchversuchen zeigte sich, dass bei der Mehrzahl der Probekörper das Versagen mit gleichzeitigem Bruch beider Klebefugen auftrat. Die Haftung des MUF-Klebstoffs auf der Epoxidschicht war entsprechend besser als auf der jeweiligen Metalloberfläche. Die Mittelwerte, Variationskoeffizienten sowie die 5%- und 95%-Quantilwerte der Bruchlasten sind in Tabelle 7 wiedergegeben.

**Tabelle 7: Versuchsreihe 1A: Statistische Auswertung der Bruchlasten der Zugversuche mit EP als Primer auf dem Blech in der MUF-Klebefuge (incl. Rohdichte der Holzlamellen)**

Typ	$F_{u,m,EP}$ [N]	COV [%]	$q_{0,05}$ [N]	$q_{0,95}$ [N]	$\rho_{mean,EP}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
EP-MUF-dünn-GV	16296	3,93%	15243	17348	386
EP-MUF-dünn-RG	17630	10,37%	14624	20637	499
EP-MUF-dick-GV	18523	3,40%	17489	19558	504
EP-MUF-dick-RG	14797	20,37%	9840	19753	454

In Abbildung 11 erkennt man, dass die Bruchlast der MUF-Fuge für alle Kombinationen bis auf Typ EP-MUF-dick-RG mit Werten über 16 kN deutlich höher ist als ohne Vorbeschichtung mit dem EP-Klebstoff (Serien EP-GV und EP-RG). Insbesondere die geringe Adhäsion der MUF-Klebung auf dem rohen gestrahlten Blech (RG), die durch die korrosive Wirkung des Säurehärters bedingt ist, konnte durch Auftrag der Epoxidharzschicht deutlich verbessert werden. Weiterhin ist die Streuung der Bruchlasten bei den Serien mit EP als Primer wesentlich geringer als bei den Serien mit direkter MUF-Verklebung. Ein dünner Epoxidharzauftrag erscheint für weitere Untersuchungen besser geeignet als ein dicker, da hier bei keiner Probe ein vorzeitiger Bruch der MUF-Fuge auftrat.

VR 1A: Tragfähigkeit Probekörper mit oberseitiger MUF-Verklebung und EP-Schicht als "Primer"



**Abbildung 11: Mittelwerte der Bruchlasten der Probekörper der VR 1A für Kombinationen mit und ohne EP-Klebstoff als „Primer“ unter der MUF-Fuge, jeweils mit Darstellung der Last beim Versagen der MUF-Fuge; Max- und Min-Werte der Bruchlasten über Zeiger im Diagramm dargestellt**

Angesichts der positiven Ergebnisse mit der Nutzung des Epoxidharzklebstoffs als Primer wurde in Abstimmung mit der Firma Jowat ein alternativer Primer (Typ 409.12) ausgewählt. Dieser Primer hatte in AP 0 in Kombination mit der EPI-Verklebung bereits sehr gute Ergebnisse gebracht. Entgegen den Schlussfolgerungen aus AP0 erscheint eine Primervorbehandlung der Stahlbleche trotz des zusätzlichen Arbeitsaufwandes sinnvoll, um die Adhäsion des im Herstellungsprozess des Brettschichtholzes genutzten MUF-Klebstoffs zu verbessern.

Der Primer Typ 409.12 ist eine wasserbasierte Dispersion zur Verbesserung der Adhäsion zwischen der Werkstückoberfläche und dem Klebstoff und ist für die Vorbehandlung verschiedener Kunststoffe und Metalle geeignet. Der Auftrag des Primers auf die gereinigten Bleche erfolgte manuell mit Schaumstoff- bzw. Fellrollen. Die maximale Auftragsmenge wird vom Hersteller mit 10 g/m<sup>2</sup> angegeben. Vor der Verklebung muss der Primer vollständig durchgetrocknet sein. Für die Versuche betragen die Trockenzeiten zwischen 12 und 24 Stunden, wobei die Primeroberfläche bei Temperaturen um die 25 °C bereits nach wenigen Minuten handtrocken war. In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Stahlblech-Klebstoff-Kombinationen mit einer Vorbehandlung mit dem Primer Typ 409.12 dargestellt:

**Tabelle 8: Versuchsreihe 1A: Stahlblech-Klebstoff-Kombinationen mit Vorbehandlung der Bleche mit Polyurethanprimer Jowat Typ 409.12**

Material Klebstoff	S235 schwarz Gestrahlt (RGP)	S235 galv. verzinkt (GVP)	Summe
EP 692.30	5 Proben	-	5 Proben
PUR 686.60	-	5 Proben	10 Proben
MUF 690/1690	5 Proben	5 Proben	5 Proben
Summe	10 Proben	15 Proben	<b>20 Proben</b>

Der PUR- und MUF-Klebstoff wurde jeweils beidseitig eingesetzt, wogegen die Kombination EP-RGP einseitig mit Epoxidharz und einseitig mit MUF-Klebstoff verklebt war. Die Ergebnisse der Versuchsreihe sind in Tabelle 9 dargestellt.

**Tabelle 9: Versuchsreihe 1A: Statistische Auswertung der Bruchlasten der Zugversuche mit Primer Typ 409.12**

Typ	$F_{u,m}$ [N]	COV [%]	$q_{0,05}$ [N]	$q_{0,95}$ [N]	$F_{u,m}/F_{u,m,ohne Primer}$
EP-RGP	24151	8,12%	20927	27374	152 %
PUR-PUR-GVP	31230	6,38%	27955	34505	111 %
MUF-MUF-GVP	20911	14,46%	15937	25885	-
MUF-MUF-RGP	23487	5,22%	21470	25504	-

Der Primer bewirkte eine deutliche Verbesserung der Adhäsion des Klebstoffs auf der Blechoberfläche bei allen geprüften Kombinationen. In der Kombination aus rohem gestrahltem Blech mit einseitiger Epoxidharz- und einseitiger MUF-Verklebung ergab sich gegenüber der mit Epoxidharz „geprimerten“ Variante eine höhere Tragfähigkeit. Beim wasserbasierten Primer Typ 409.12 ist eine sehr schnelle Trocknung erforderlich, um die Gefahr von Korrosion auf der rohen gestrahlten Blechoberfläche auszuschließen. Bei der Probenvorbereitung wurde keine Korrosion beobachtet. Durch die sehr dünne Primerschicht kam es aber bei den Serien mit MUF-Verklebung (EP-RGP und MUF-MUF-RGP) zu einem korrosiven Angriff durch den aggressiven säurehaltigen Härter des MUF-Klebstoffs (Abbildung 12). Hier waren offenbar feine Poren oder Fehlstellen in der Primerschicht vorhanden, durch die hindurch der korrosive Angriff stattfinden konnte. In Verbindung mit einer MUF-Verklebung ist daher eine größere Schichtdicke des Primers, ggf. durch mehrfachen Auftrag erforderlich, um die Korrosion der Blechoberfläche zu verhindern.

Die Adhäsion des MUF-Klebstoffs auf der Blechoberfläche konnte durch den Einsatz des Primers deutlich verbessert werden. Die mittleren Bruchlasten von 20,91 kN (Serie MUF-MUF-GVP) und 23,49 kN (Serie MUF-MUF-RGP) liegen nur geringfügig unter den Werten einer beidseitigen Verklebung mit Epoxid- oder Polyurethanklebstoff ohne Primer. Die Primerbehandlung der Bleche ermöglicht somit die direkte Verklebung der Stahlbleche mit dem in der Brettschichtholzherstellung verwendeten MUF-Klebstoff. Für eine beidseitige Verklebung mit MUF sind jedoch noch zusätzliche Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit und dem Langzeitverhalten der Verklebung erforderlich.

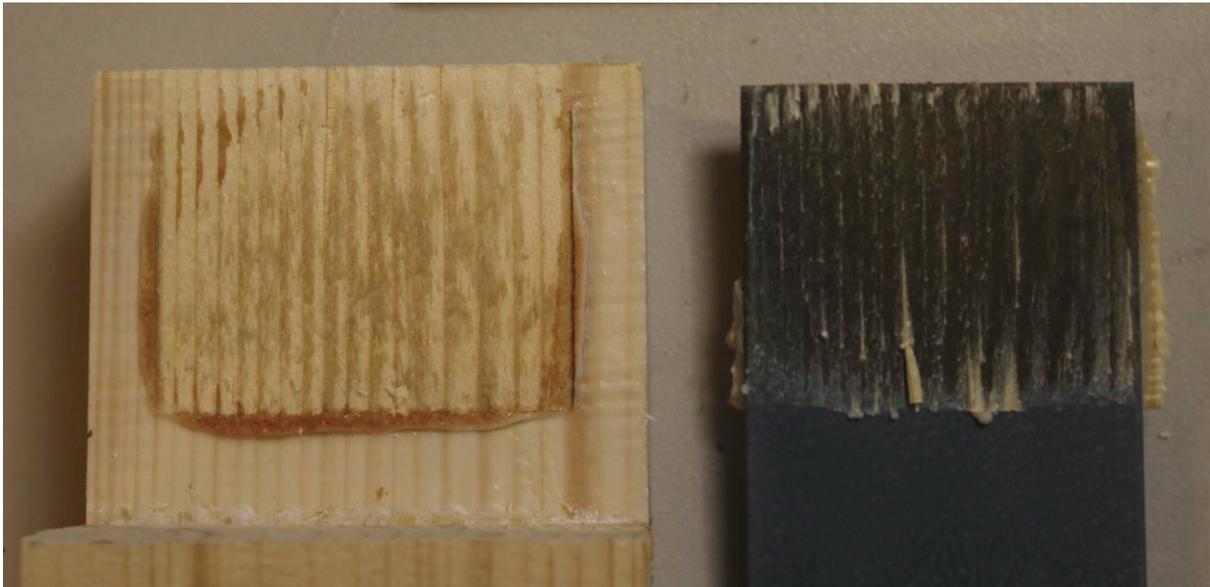


Abbildung 12: VR 1A, Serie EP-RGP, Probe 4: Korrosion der rohen gestrahlten und mit Jowat Primer Typ 409.12 vorbehandelten Blechoberfläche durch den säurehaltigen Härter bei der einseitigen MUF-Verklebung

Gegenüber der Serie MUF-MUF-GVP zeigte die Serie MUF-MUF-RGP eine höhere Bruchlast und geringere Streuung der Bruchlasten. In den Bruchflächen kam es nur zu einem sehr geringen Anteil adhäsiven Versagens auf der Blechoberfläche; der überwiegende Teil der Bruchflächen zeigte Holzversagen oder holznahen Bruch (Abbildung 13). Das adhäsive Versagen trat in Bereichen auf, in denen eine Korrosion des Blechs durch den Säurehärter des MUF-Klebstoffs erfolgt war.

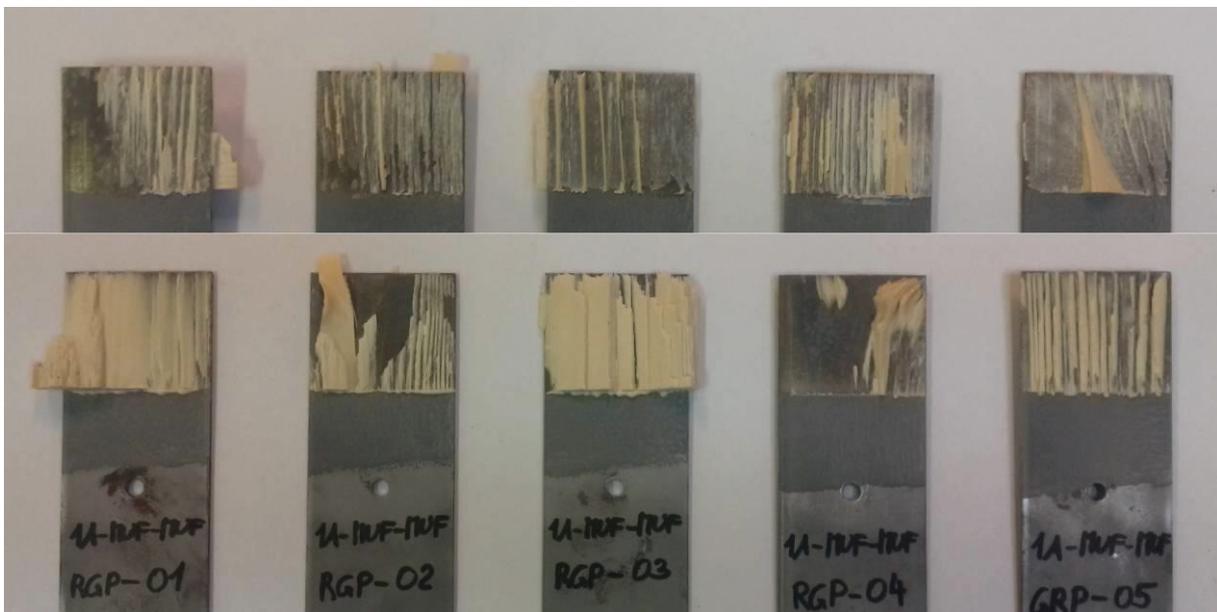


Abbildung 13: VR 1A, Serie MUF-MUF-RGP: Bruchflächen mit überwiegender Holzversagen

Demgegenüber trat bei der Serie MUF-MUF-GVP auf über 50 % der Bruchfläche ein adhäsives Versagen auf der Metalloberfläche auf (Abbildung 14). Eine genaue Ursache dieser Versagensart ist nicht erkennbar, zumal bei der mit den auf gleiche Weise geprimerten galvanisch verzinkten Blechen der Kombination PUR-PUR-GVP trotz höherer Bruchlasten nur ein sehr geringer Anteil an Adhäsionsversagen auftrat. Die Ergebnisse dieser Serie zeigen jedoch die möglichen Streuungen in der Adhäsion bei manueller Probenherstellung. Die Reinigung der Bleche und der Auftrag des Primers sollten daher bei der Integration in den Brettschichtholzherstellungsprozess möglichst durch maschinelle Verfahren erfolgen (vgl. Arbeitspaket 3).

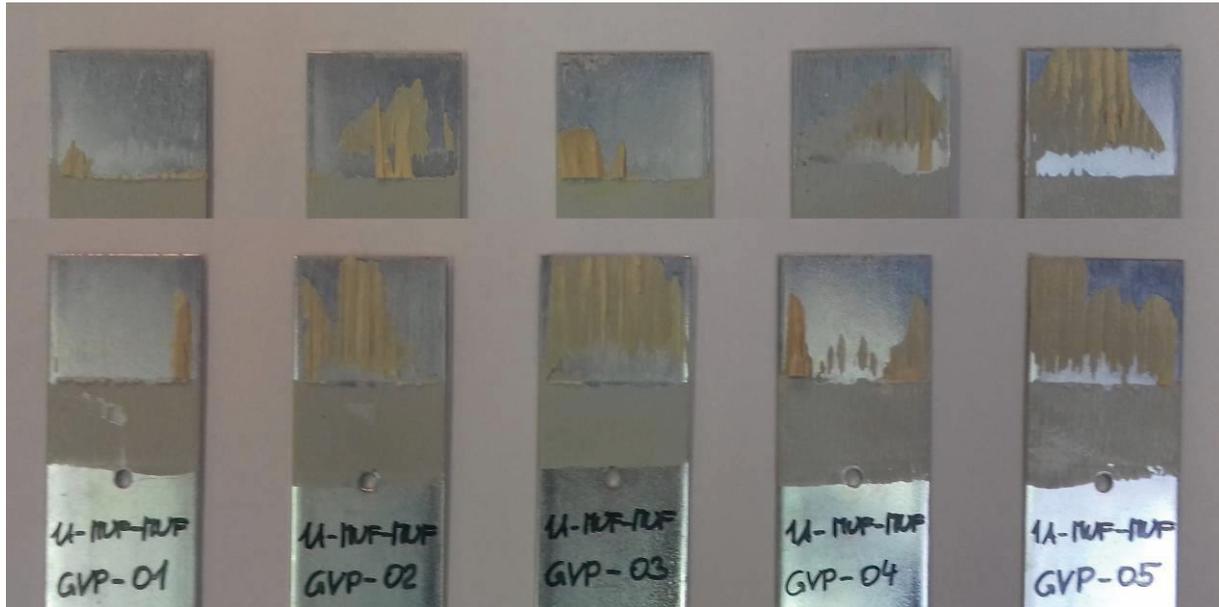


Abbildung 14: VR 1A, Serie MUF-MUF-GVP: Bruchflächen mit über 50 % adhäsivem Versagen des Primers/Klebstoff auf der verzinkten Blechoberfläche

### 3.2.2 Versuchsreihe 1B

In Versuchsreihe 1B sollte die Beständigkeit der Verbindung gegenüber Alterung und Temperaturbelastung untersucht werden. Es waren Zugversuche mit der Probekörperkonfiguration aus Versuchsreihe 1A (s. Abbildung 7) und einer Vorbehandlung entsprechend DIN EN 302-1, Behandlungsart A5 und A7 geplant, die einer Anwendung der Klebeverbindung in Nutzungsklasse 2 und 3 entsprechen (Klebstofftyp I nach DIN EN 15425 für PUR-Klebstoffe). Die größere Klebfugenlänge gegenüber dem Versuchsaufbau nach DIN EN 302-1 führt zu Spitzenspannungen an den Enden der Klebfuge, sodass, wie auch in Versuchsreihe 1A gegenüber den Vorversuchen beobachtet, die mittlere Zugscherfestigkeit unter den geforderten Werten der DIN EN 301 und DIN EN 15425 liegen wird. Ein weiterer begrenzender Faktor ist die Scherfestigkeit des verwendeten Nadelholzes, die geringer ist als die des normalerweise bei Versuchen nach DIN EN 302-1 verwendeten Buchenholzes.

Zu berücksichtigen sind auch die Zwängungsspannungen, die bei Durchfeuchtung und Austrocknung der Probekörper infolge der Quell- und Schwindverformungen des Holzes auftreten. Insbesondere quer zur Faser ergeben sich zwischen dem Blech und dem Holz erhebliche Dehnungsunterschiede, die über Zwangsspannungen in der Klebefuge ausgeglichen werden müssen. Die Verkrümmung des Holzes in tangentialer Ebene erzeugt darüber hinaus auch Zugspannungen bzw. eine Schälbelastung der Klebfuge.

Es wurde entschieden, zunächst Quell- und Schwindversuche an Probekörpern mit unterschiedlichen Blechbreiten und Klebstoffen durchzuführen, um das Verhalten der Blech-Holz-Verklebung bei wiederholter Durchfeuchtung und Austrocknung zu untersuchen. In Tabelle 10 sind die Konfigurationen der Probekörper angegeben. Die Probekörper hatten in Faserrichtung eine einheitliche Länge von 60 mm und waren jeweils aus zwei 40 mm dicken Holzlamellen mit einem dazwischen liegenden galvanisch verzinkten Stahlblech (GV) mit 2,5 mm Dicke zusammengesetzt. Die Breite der Probekörper quer zur Holzfaserrichtung wurde in drei Schritten variiert: 40 mm, 80 mm und 160 mm.

**Tabelle 10: Versuchsreihe 1B: Probenkonfigurationen für Wasserlagerung und Austrocknung**

Probenbreite	40 mm	80 mm	160 mm	Summe
Klebstoff				
EP 692.30 mit GV-Blech	3 Proben	3 Proben	-	6 Proben
PUR 686.60 mit GV-Blech	3 Proben	3 Proben	3 Proben	9 Proben
Summe	6 Proben	6 Proben	3 Proben	<b>15 Proben</b>

Die Probekörper wurden im Innenraumklima verklebt und nach dem Aushärten des Klebstoffs für 24 Std. unter Wasser gelagert. Anschließend erfolgte eine Trocknung über mehrere Tage im Innenraumklima bis zum Erreichen der Ausgangsmasse, wobei die Austrocknung durch wiederholte Wägungen aufgezeichnet wurde. Gleichzeitig wurde das Delaminieren der Klebefugen beobachtet. Dieser Zyklus aus Durchfeuchtung und Austrocknung wurde so lange wiederholt, bis eine Delamination der Klebstofffugen auftrat.

Bei den 160 mm breiten, mit PUR geklebten Probekörpern versagte die erste Probe bereits in der ersten Trocknungsphase. Wie in Abbildung 15 links erkennbar, versagte die Klebefuge infolge der Verkrümmung der Holzlamellen beim Quellen und der in Probenmitte entstehenden Zugspannungen. Die Verklebung jeweils der beiden

rechten bzw. linken Seiten der Holzlamellen mit dem Blech stellt ebenso wie die Holzfeuchteänderung zwischen Wasserlagerung und Innenraumklima eine Extrembelastung dar, die bei einem Brettschichtholzträger selbst in Nutzungsklasse 3 nicht auftritt. Auf der rechten Seite von Abbildung 15 zeigt sich jedoch, dass auf etwa 70 % der Klebefläche ein Adhäsionsversagen auf der Blechoberfläche auftrat, während bei den übrigen 30 % der Verbund auf Holzseite versagte. Im Vergleich dazu wurde bei den Zugscherversuchen in Versuchsreihe 1A mit galvanisch verzinkten Blechen und PUR-Klebstoff praktisch kein Adhäsionsversagen sondern fast auf der gesamten Klebefläche ein Holzbruch beobachtet. Offenbar wird die Adhäsion des PUR-Klebstoffs auf der Blech- und der Holzoberfläche durch Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklen deutlich geschwächt.



**Abbildung 15: Versuchsreihe 1B: Versagen eines 160 mm breiten Probekörpers in der Trocknungsphase nach der ersten Wasserlagerung**

Die beiden anderen Probekörper mit 160 mm Breite versagten nach der dritten bzw. vierten Wasserlagerung. Bei einer Breite von 80 mm versagte die erste Probe (mit PUR-Verklebung) nach der dritten Wasserlagerung und drei weitere (eine mit PUR-, zwei mit EP-Verklebung) nach der vierten Wasserlagerung. Von den 40 mm breiten Probekörpern traten bei zwei Proben nach der dritten und bei zwei weiteren nach der vierten Wasserlagerung Delaminationen der Klebfuge auf (s. Abbildung 16). Hier wurden alle drei mit Epoxidharz und eine mit Polyurethanklebstoff verklebte Probe zerstört. Das Holz „arbeitet“ durch die wiederholten Quell- und Schwindvorgänge so stark, dass selbst bei einer Probekörperbreite von nur 40 mm der Verbund der Klebfuge zerstört wird. Eine Übersicht der Versagenszeitpunkte mit Auftreten von Delamination der Klebefuge ist in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 16: Versuchsreihe 1B: Versagen eines 40 mm breiten Probekörpers in der Trocknungsphase nach der dritten Wasserlagerung

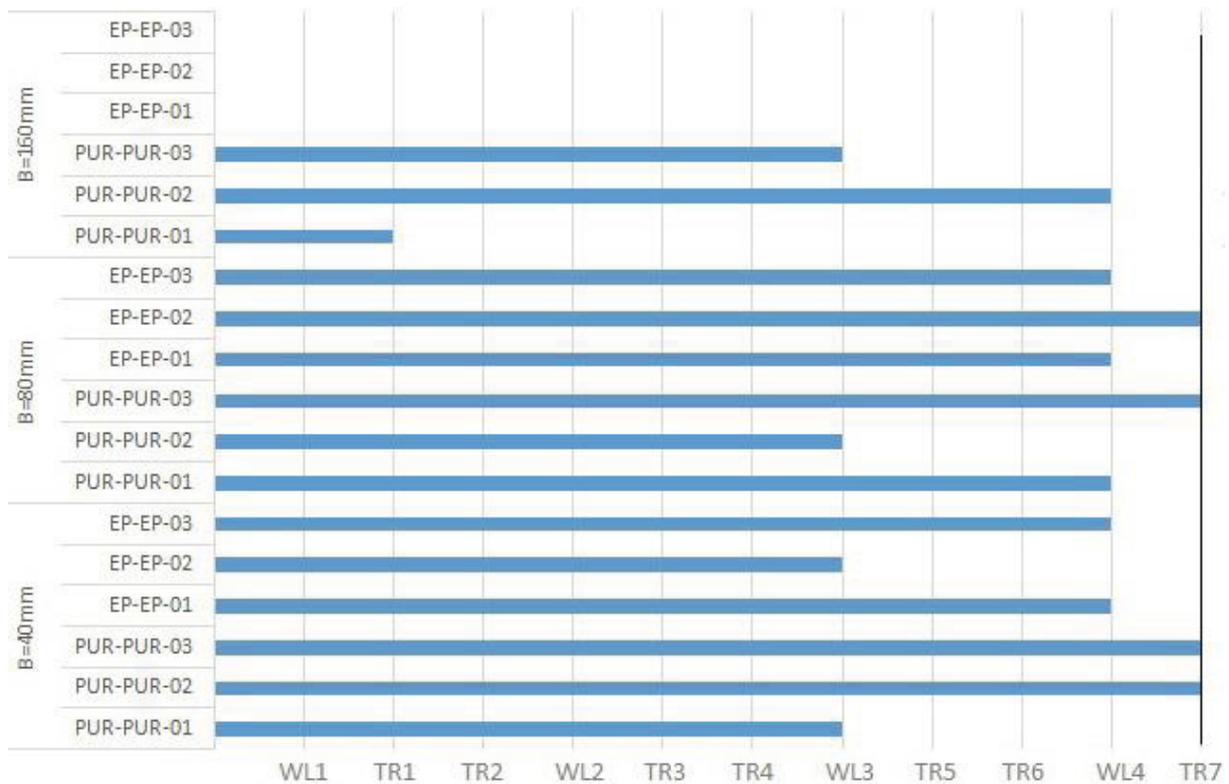


Abbildung 17: Versuchsreihe 1B: Quell-/Schwindversuche: Versagenszeitpunkte der Probekörper bei zyklischer Wasserlagerung (WL) und Trocknung (TR), vier Proben bei Versuchsende noch nicht zerstört

Die Versuchsreihe wurde in einem zweiten Durchgang durch weitere Kombinationen ergänzt. Es standen nun auch galvanisch verzinkte Bleche mit einer größeren Oberflächenrauigkeit, erzielt durch zusätzliches Sandstrahlen vor dem Verzinken, zur Verfügung. Somit wurden drei verschiedene Blecharten geprüft: rohe gestrahlte Bleche (Typ RG), galvanisch verzinkte und passivierte Bleche (Typ GV) und raue, galvanisch verzinkte und passivierte Bleche (Typ GVrauh). Diese Blechtypen wurden mit der folgenden Klebstoffen kombiniert: beidseitig 1K-Polyurethanklebstoff (PUR-PUR), beidseitig 1K- Polyurethanklebstoff und Vorbehandlung mit Primer Typ 409.12 (PUR-PUR-P), beidseitig Melamin-Harnstoff-Formaldehydharzklebstoff mit Primer Typ 409.12 (MUF-MUF-P) sowie einseitig 2K-Epoxidharzklebstoff und einseitig Melamin-Harnstoff-Formaldehydharzklebstoff mit dünn aufgetragenem Epoxidharzklebstoff als Primer (EP-EP-MUF). Es wurden von jeder Kombination jeweils drei Probekörper in den Breiten (quer zur Holzfaserrichtung) von 40 mm, 80 mm und 160 mm unter der oben beschriebenen zyklischen Quell-/Schwindbeanspruchung (Durchfeuchtung und Austrocknung) geprüft. Eine Zusammenfassung der Kombinationen ist in Tabelle 11 dargestellt.

**Tabelle 11: Versuchsreihe 1B: Probenkonfigurationen für Wasserlagerung und Austrocknung**

Klebstoff	Primer	Stahlblech	B = 40 mm	B = 80 mm	B = 160 mm
PUR-PUR	ohne	RG	3 Proben	3 Proben	3 Proben
PUR-PUR	ohne	GV	3 Proben	3 Proben	3 Proben
PUR-PUR	ohne	RGrauh	3 Proben	3 Proben	3 Proben
PUR-PUR	Typ 409.12 (beidseitig)	RG	3 Proben	3 Proben	3 Proben
PUR-PUR	Typ 409.12 (beidseitig)	GV	3 Proben	3 Proben	3 Proben
PUR-PUR	Typ 409.12 (beidseitig)	GVrauh	3 Proben	3 Proben	3 Proben
MUF-MUF	Typ 409.12 (beidseitig)	RG	3 Proben	3 Proben	3 Proben
MUF-MUF	Typ 409.12 (beidseitig)	GV	3 Proben	3 Proben	3 Proben
MUF-MUF	Typ 409.12 (beidseitig)	GVrauh	3 Proben	3 Proben	3 Proben
EP-MUF	EP 692.30 (MUF-Seite)	RG	3 Proben	3 Proben	3 Proben
EP-MUF	EP 692.30 (MUF-Seite)	GV	3 Proben	3 Proben	3 Proben
EP-MUF	EP 692.30 (MUF-Seite)	GVrauh	3 Proben	3 Proben	3 Proben

In dieser Versuchsreihe wurde eine größere Anzahl an Zyklen durchgeführt, da einige Kombinationen eine gute Dauerhaftigkeit aufwiesen. In Abbildung 18 sind die aus drei Probekörpern gemittelten Versagenszeitpunkte dargestellt. Bei allen Blech-Klebstoff-Kombinationen ist deutlich der Einfluss der Verbundlänge quer zur Holzfaserrichtung zu erkennen. Zuerst versagten die 160 mm breiten Probekörper, gefolgt von den 80 mm breiten Proben. Am längsten hielten erwartungsgemäß die Probekörper mit der geringsten Breite von 40 mm der Wechselbelastung stand. Hier waren bei den Kombinationen mit PUR-Klebstoff und Jowat Primer Typ 409.12 sowie bei der Kombination EP-EP-MUF-RG auch nach neun Durchfeuchtungs-Austrocknungs-Zyklen noch alle Proben intakt. Die gute Beständigkeit der Kombination EP-EP-MUF-RG wurde auch durch die bereits in der Klimakammer laufenden Versuche des Arbeitspakets 2 bestätigt. Bei den 80 mm und 160 mm breiten Proben erreichten ebenfalls die Kombinationen mit PUR-Klebstoff und Jowat Primer im Mittel die höchste Anzahl von Zyklen.

## Versuchsreihe 1B: Quell-/Schwindversuche: Mittlere Versagenszeitpunkte der Probekörper

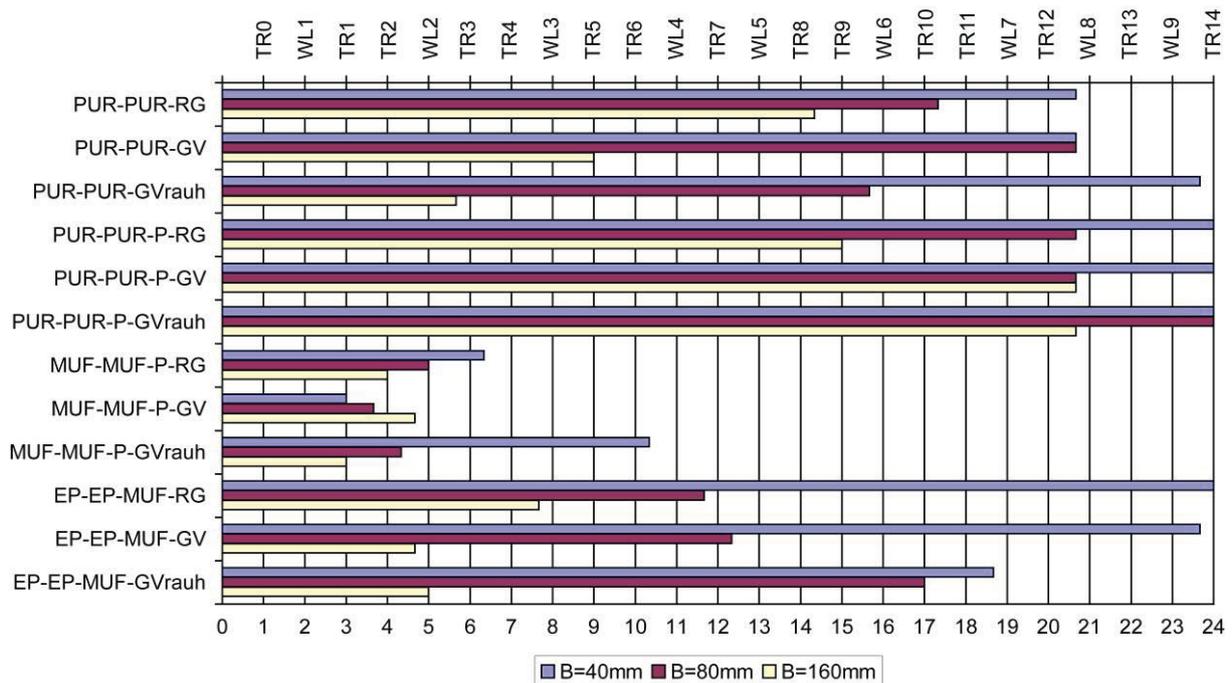


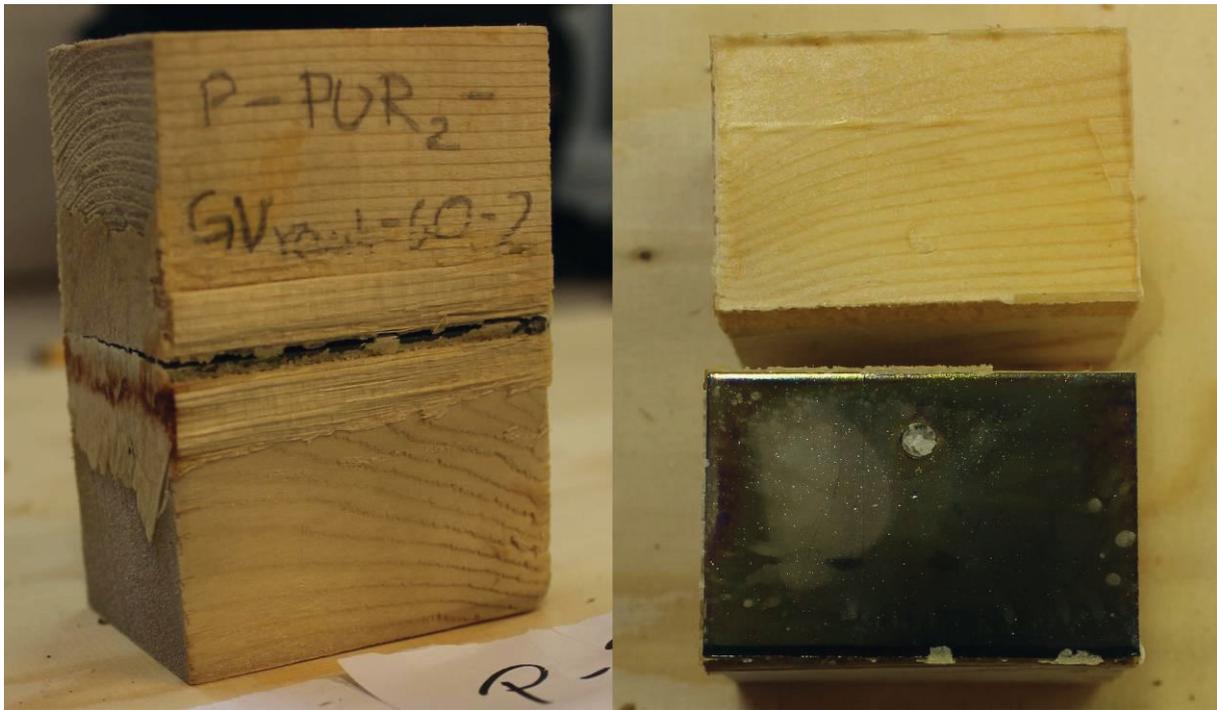
Abbildung 18: Versuchsreihe 1B: Quell-/Schwindversuche: Gemittelte Versagenszeitpunkte der Probekörper bei zyklischer Wasserlagerung (WL) und Trocknung (TR)

Mit den drei Stahlblech-Klebstoff-Kombinationen, die in den Durchfeuchtungs- und Austrocknungsversuchen die höchste Beständigkeit gezeigt hatten, wurde eine Heißwasserlagerung entsprechend Behandlungsart A5 nach DIN EN 302-1 durchgeführt. Dabei werden die im Normklima konditionierten Proben zunächst für sechs Stunden in kochendem Wasser untergetaucht, danach für zwei Stunden in kaltem Wasser ( $20 \pm 5$  °C) gelagert und anschließend wieder im Normklima bis zur Ausgangsfeuchte getrocknet. Die geprüften Kombinationen sind in Tabelle 11 gelb unterlegt. Es wurden von jeder Kombination neun Probekörper geprüft (3 x 40 mm, 3 x 80 mm, 3 x 160 mm Breite).

Die Heißwasserlagerung wurde in einem Kunststoffbehälter durchgeführt, wobei die Temperatur von 100 °C durch einen elektrischen Heizstab erzeugt wurde.

Es zeigte sich, dass nach der Heißwasserlagerung bereits alle Probekörper soweit zerstört waren, dass eine Weiterführung des Behandlungszyklus A5 nach DIN EN 302-1 (Kaltwasserlagerung und Austrocknung) nicht sinnvoll war. Die Klebefuge wurde auch hier bei den mit Polyurethanklebstoff verklebten Proben mit geprimerten galvanisch verzinkten Blechen durch adhäsives Versagen auf der Stahloberfläche zerstört. Exemplarisch ist ein 80 mm breiter Probekörper nach der Heißwasserlagerung in Abbildung 19 dargestellt. Offenbar sinkt die Adhäsion des PUR-Klebstoffs bzw. des Primers auf der galvanisch verzinkten Blechoberfläche unter Einwirkung von erhöhter Temperatur deutlich ab. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen der Dauerbelastung im Wechselklima im Arbeitspaket 2. Der Einsatz der PUR-Verklebung, auch in Verbindung mit dem Primer Typ 409.12, sollte daher zunächst auf die Nutzung im Innenraumklima (Nutzungsstufe 1) beschränkt bleiben. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die durchgeführten Versuche Extrembelastungen darstellen, die an Bauteilen und Verbindungen in baupraktischen Dimensionen kaum auftreten. Hier werden zusätzliche Untersuchungen zur Evaluation des

temperaturabhängigen Festigkeitsabfalls des getesteten PUR-Klebstoffs erforderlich, da die Ergebnisse der Kleinproben nicht ohne weiteres auf baupraktische Abmessungen skaliert werden können.



**Abbildung 19: Versuchsreihe 1B: Behandlung nach DIN EN 302-1, durch adhäsives Versagen zerstörter Probekörper Typ PUR-PUR-P-GVrauh (B = 80 mm) nach der Heißwasserlagerung**

Bei den mit Epoxidharzklebstoff verklebten bzw. ‚geprimerten‘ Proben des Typs EP-EP-MUF-RG versagten sowohl der Verbund zwischen der EP-Primerschicht und der MUF-Klebstoffschicht als auch teilweise die Adhäsion der EP-Primerschicht auf der Blechoberfläche (siehe Abbildung 20). Der Epoxidharzklebstoff weist eine höhere Temperaturbeständigkeit als der Polyurethanklebstoff auf. Für die Verbindung ist jedoch, wie auch in den Kurzzeitversuchen, die MUF-Klebefuge die primäre Schwachstelle. Die Langzeitversuche in Arbeitspaket 2 bestätigen jedoch die gute Dauerhaftigkeit dieser Blech-Klebstoff-Kombination im Wechselklima.



**Abbildung 20: Versuchsreihe 1B: Behandlung nach DIN EN 302-1, durch adhäsives Versagen auf der Blechoberfläche und Verbundversagen zwischen EP- und MUF-Klebstoff zerstörter Probekörper Typ EP-EP-MUF-RG (B =160 mm) nach der Heißwasserlagerung**

Aufgrund des Versagens der Kleinproben wurden die ursprünglich vorgesehenen Versuche mit den Probekörperabmessungen aus Versuchsreihe 1A mit den Behandlungsarten A5 und A7 nicht durchgeführt.

### 3.2.3 Versuchsreihe 1C

Die Versuchsreihe 1C diente der Untersuchung des Einflusses größerer Verbundlängen auf die Verbundfestigkeit der Verklebung. Größere Blech- und damit Verbundlängen führen zur Erhöhung der Spannungsspitzen an den Blechenden, und somit einer Abnahme der mittleren Zugscherfestigkeiten.

Der Einfluss der Verbundlänge auf die Zugscherfestigkeit wurde mit einem Versuchsaufbau entsprechend Abbildung 7, jedoch mit größeren Einbindelängen der Bleche von 100 mm und 200 mm untersucht. Als Blech-Klebstoff-Kombination wurden galvanisch verzinkte Bleche (GV), einseitige Verklebung mit Polyurethan-Klebstoff (PUR 686.60) und oberseitigen Verklebung mit Melamin-Harnstoff-Formaldehydharz (Kauramin® 690+1690) verwendet. Die Mittelwerte, Variationskoeffizienten, 5%- und 95%-Quantile der Bruchlasten sowie die mittlere Rohdichte der Proben sind für die durchgeführten Versuchsreihen in Tabelle 12 aufgelistet. Die Kraft-Verformungskurven aller Probekörper sind im Anhang dargestellt.

**Tabelle 12: Versuchsreihe 1C: Statistische Auswertung der Bruchlasten der Zugversuche mit Verbundlängen der Bleche von 100 mm und 200 mm (incl. Rohdichte der Holzlamellen)**

Typ	$F_{u,m}$ [N]	COV [%]	$q_{0,05}$ [N]	$q_{0,95}$ [N]	$\rho_{\text{mean,ges}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PUR-GV-100	23969	25,02%	14105	33833	478
PUR-GV-200	40565	16,66%	29449	51681	518

Auch bei diesen Versuchen zeigte sich der bereits in Versuchsreihe 1A beobachtete zweistufige Versagensmodus, bei dem zuerst die MUF-Fuge (durch Adhäsionsversagen auf der Blechoberfläche) und anschließend die PUR-Fuge (durch Schub- oder Zugbruch des Holzes) versagte. In Abbildung 21 sind die typischen Bruchbilder der PUR- und der MUF-Fuge exemplarisch für einen Probekörper dargestellt.



**Abbildung 21: Versuchsreihe 1C: Bruchbild des Probekörpers PUR-GV-100-06 mit 100 mm Klebfugenlänge; links PUR-Fuge, rechts MUF-Fuge**

Die ungleichmäßige Spannungsverteilung in der Klebfuge, die bei zunehmender Verbundlänge zu Spannungsspitzen insbesondere an der Stirnseite der Probekörper führt, lässt sich gut über den Vergleich der mittleren Schubspannung in der Klebfuge erkennen. In Abbildung 22 ist die Abnahme der mittleren Schubspannungen für die

Blech-Klebstoff-Kombination PUR-GV mit den Verbundlängen aus Arbeitspaket 0 (10 mm), Arbeitspaket 1, VR 1A (50 mm) und VR 1C (100 mm und 200 mm) grafisch aufgetragen.

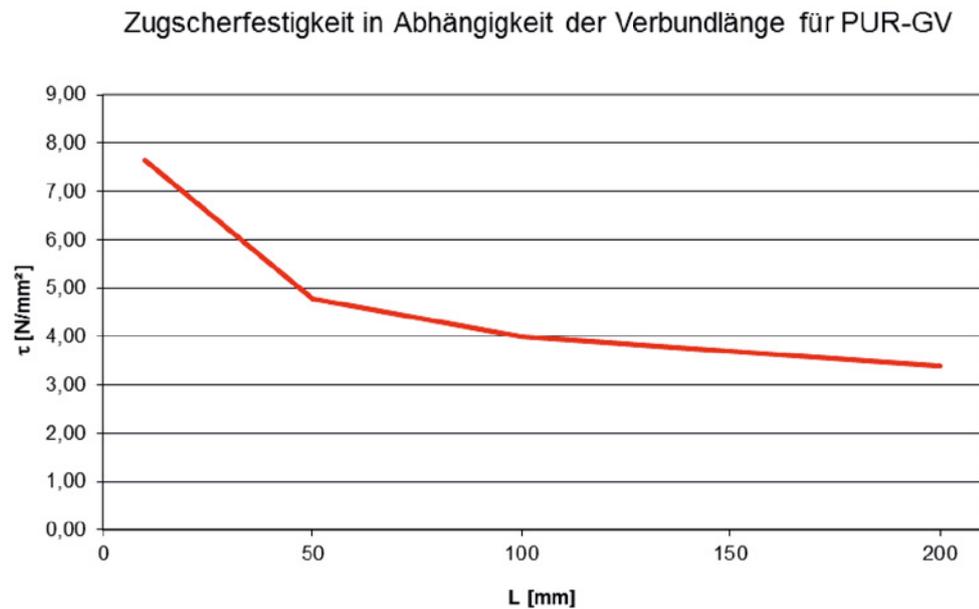


Abbildung 22: Zugscherfestigkeit der Stahlblech-Klebstoff-Kombination PUR-GV in Abhängigkeit von der Verbundlänge L (für einseitige PUR-Klebefuge, da MUF-Fuge immer vorzeitig versagte)

Eine Reduktion der Spannungsspitzen ist angesichts des deutlichen Einflusses der ungleichmäßigen Spannungsverteilung sehr sinnvoll und wurde in den weiteren Versuchen (s. Versuchsreihe 1D und 4V) geprüft.

Für die vorgesehene Verbindungsmethodik wirkt sich jedoch positiv aus, dass die Lasteinleitung nicht extern am Blechende, sondern punktuell verteilt über die Blechfläche durch die Verbindungsmittel (Stabdübel oder Passbolzen) eingeleitet wird. Dadurch ist eine merkliche Reduzierung der Spannungsspitzen und eine gleichmäßigere Spannungsverteilung in der Klebfuge zu erwarten.

### 3.2.4 Versuchsreihe 1D

Die Spannungsspitzen an den Enden der Verbundfuge können ggf. durch Modifikationen der Blechgeometrie reduziert werden. In Versuchsreihe 1D sollte die Wirkung einer Voutung, also Verringerung der Breite an den Blechenden, untersucht werden. Durch Lochung der Bleche kann zusätzlich eine Dübelwirkung des Klebstoffs in den Löchern erzielt werden. Mit entsprechend gelochten Blechen wurden in an der MPA Wiesbaden durchgeführten Versuchen bei nachträglicher Verklebung mit dicker Klebfuge sehr gute Verbundeigenschaften beobachtet ([1] und [2]). Für die hier untersuchte Verbindungstechnik mit ‚ab initio‘ verklebten Stahlblechen lässt sich eine durchgehende Lochung der Bleche nicht realisieren, da zur Herstellung der Anschlüsse ein nachträgliches Durchbohren des Brettschichtholzbauteils einschließlich der eingebetteten Bleche erforderlich ist. Eine Überschneidung von vorgestanzten und nachträglich gebohrten Löchern muss zur Sicherstellung der Tragfähigkeit der Verbindungsmittel (Stabdübel oder Passbolzen) verhindert werden. Eine Lochung der Bleche kommt daher nur außerhalb der direkten Anschlussflächen in Frage. Sie kann jedoch, ebenso wie die Voutung, an den Blechenden zum Abbau von Spannungsspitzen und einer Erhöhung der Verbundfestigkeit beitragen. Eine Konfiguration mit Eintrag der Zugkraft über aus dem Probekörper herausstehende Bleche ist jedoch nicht zielführend, da hierbei immer die Spannungsspitzen am Austrittspunkt der Bleche aus dem Holz maßgeblich werden, sodass der Effekt der Voutung bzw. Lochung am im Holz eingebetteten Blechende nicht messbar ist. Es erfolgte daher eine Untersuchung im Rahmen der Vorversuche für die baupraktischen Anschlüsse in Versuchsreihe 4V.

### 3.2.5 Versuchsreihe 1E

Da in Versuchsreihe 1A und 1C der Polyurethan-, Epoxid- und EPI-Klebstoff eine sehr gute Adhäsion auf den verwendeten Blechen zeigte und infolgedessen das Versagen bei diesen Klebungen fast ausschließlich durch Bruch in den Holzlamellen stattfand, wurde eine zusätzliche Versuchsreihe 1E mit Blech-Blech-Verklebungen durchgeführt, um die maximale Zugscherfestigkeit der verschiedenen Blech-Klebstoff-Kombinationen zu ermitteln. Als Versagensarten kommt dabei ein Adhäsionsbruch oder ein Bruch in der Klebschicht in Frage. Letzterer ist jedoch aufgrund der verwendeten sehr geringen Klebschichtdicke von ca. 0,1 mm weniger wahrscheinlich.

Der verwendete Epoxidharzklebstoff lässt sich als Zweikomponentensystem problemlos zur Verklebung zweier Bleche einsetzen. Der genutzte Polyurethanklebstoff benötigt als Einkomponentensystem jedoch Wasser zur Aushärtung / Vernetzung, das im Falle einer Holz-Holz- oder Blech-Holz-Verklebung durch die Holzfeuchte zur Verfügung steht. Bei einer Blech-Blech-Verklebung muss die erforderliche Wassermenge jedoch auf andere Weise eingebracht werden, da sonst keine Aushärtung des Klebstoffs erfolgen kann. In den Versuchen wurde das Wasser als Kondensat sehr fein verteilt auf die Blechoberfläche aufgedampft und unmittelbar darauf die Verklebung durchgeführt. Eine quantitative Messung der aufgetragenen Wassermenge war dabei nicht möglich, sodass das optimale stöchiometrische Verhältnis von PUR-Klebstoff und Wasser nicht garantiert werden konnte. Der EPI-Klebstoff ist für die Blech-Blech-Verklebung ungeeignet, da in der Dispersion ein Wasserüberschuss vorhanden ist, der normalerweise vom Holz aufgenommen wird bzw. verdunstet. Eine EPI-Klebfuge härtet zwischen zwei Blechen nicht aus und konnte daher in dieser Versuchsreihe nicht geprüft werden.

Um eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung in der Klebfuge zu gewährleisten wurde die Klebfugenlänge mit 10 mm gewählt. Dadurch ist auch eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Vorversuche aus Arbeitspaket 0 gegeben. Der Versuchsaufbau wurde gemäß Abbildung 23 ausgeführt.

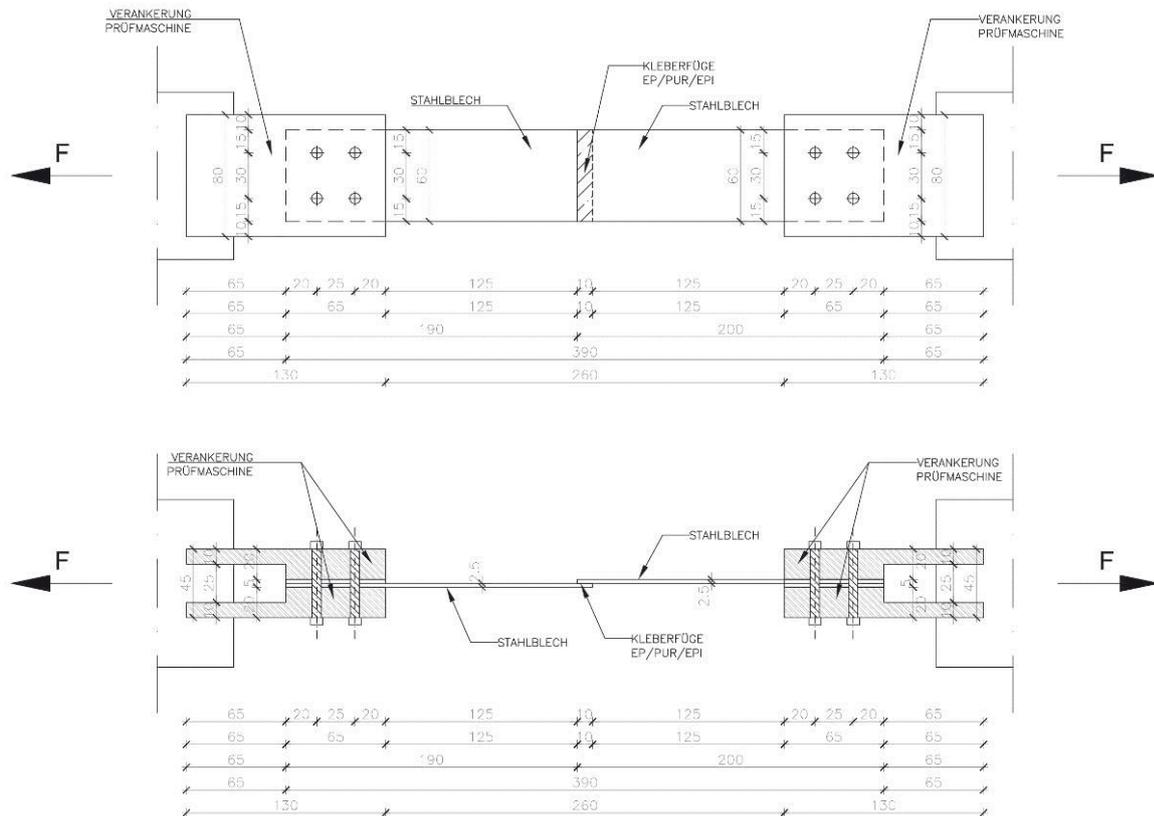


Abbildung 23: Versuchsreihe 1E: Versuchsaufbau der Blech-Blech-Verklebungen

Eine exzentrische Belastung wurde durch Beilagen in der Verankerung weitgehend ausgeschlossen. Dennoch tritt unter Belastung, wie bei allen einschnittigen ungestützten Verbindungen, eine Verdrehung und somit eine zusätzliche Zugbelastung rechtwinklig zur Klebfuge auf. Es wurden die in Tabelle 13 aufgeführten Blech-Klebstoff-Kombinationen geprüft.

Tabelle 13: Versuchsreihe 1E: Stahlblech-Klebstoff-Konfigurationen für die Blech-Blech-Verklebung

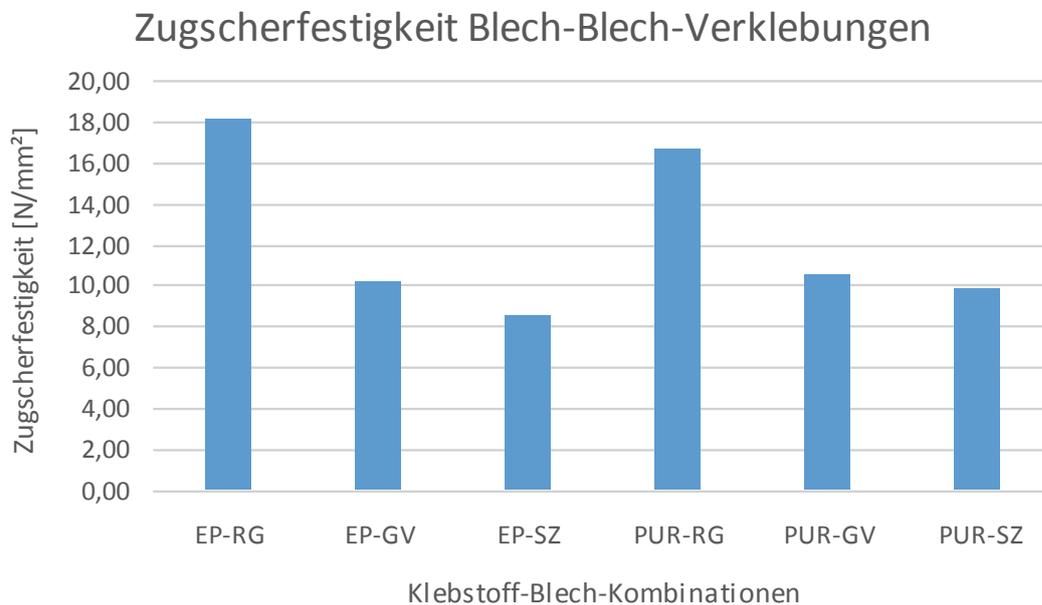
Material	S235 roh gestrahlt (RG)	S235 galv. verzinkt (GV)	S235 bandverzinkt (SZ)	Summe
Klebstoff				
EP 692.30	5 Proben	5 Proben	5 Proben	15 Proben
PUR 686.60	5 Proben	5 Proben	5 Proben	15 Proben
EPI 102.49	-	-	-	0 Proben
Summe	10 Proben	10 Proben	10 Proben	<b>30 Proben</b>

In Tabelle 14 sind die Mittelwerte, die Variationskoeffizienten sowie die 5%- und 95%-Quantile der Bruchlasten aufgelistet. Man erkennt, dass die beiden verwendeten Klebstoffe eine vergleichbare Zugscherfestigkeit besitzen. Die beste Haftung wurde auf dem rohen gestrahlten Blech erzielt, das die größte Oberflächenrauigkeit aufweist. Die verzinkten Bleche erreichten nur etwa 47 % bis 63 % der Bruchlasten des gestrahlten Blechs. Die galvanisch verzinkten Bleche zeigten wiederum eine etwas höhere Bruchlast als die bandverzinkten. Zur Verbesserung der Adhäsion wurden für die Versuche der Versuchsreihen 1A und 2 galvanisch verzinkte Bleche mit größerer Oberflächenrauigkeit hergestellt. Dies wurde durch zusätzliches Sandstrahlen der Bleche vor der Verzinkung erreicht.

**Tabelle 14: Versuchsreihe 1E: statistische Auswertung der Bruchlasten**

Typ	$F_{u,m}$ [N]	COV [%]	$q_{0,05}$ [N]	$q_{0,95}$ [N]
EP-RG	10880	6,53%	9711	12049
EP-GV	6091	17,78%	4310	7873
EP-SZ	5078	13,22%	3974	6182
PUR-RG	9957	16,39%	7272	12643
PUR-GV	6295	15,66%	4673	7916
PUR-SZ	5907	20,12%	3952	7863

Errechnet man aus den Bruchlasten die Zugscherfestigkeiten ergibt sich das in Abbildung 24 dargestellte Diagramm. Alle Werte liegen über den für die jeweilige Blech-Klebstoff-Kombination in Arbeitspaket 0 ermittelten Zugscherfestigkeiten, bei denen ja Holzbruch oder holznaher Bruch als maßgebliche Versagensart festgestellt wurde.

**Abbildung 24: Versuchsreihe 1E: Mittelwerte der Zugscherfestigkeit der geprüften Blech-Klebstoff-Kombinationen**

Im Anhang sind die Kraft-Verschiebungs-Diagramme aller Probekörper sowie Mikroskopaufnahmen einzelner Bruchflächen dargestellt. Man erkennt dort im Wesentlichen adhäsives Versagen auf der Blechoberfläche, bei den gestrahlten Blechen jedoch lokal auch kohäsives Versagen innerhalb der Klebstoffschicht.

### **3.3 AP 2: Langzeitversuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Klebeverbindung Holz-Stahlblech unter Dauerlast und Klimabeanspruchung**

Das Arbeitspaket 2 diente der Untersuchung der Einflüsse von wechselnder klimatischer Beanspruchung und Dauerlast auf die Tragfähigkeit und Verformung der Klebfugen. Im Holzbau werden im Allgemeinen die Abminderung der Tragfähigkeit und die Kriechverformung infolge einer Langzeitbelastung getrennt untersucht, da hier jeweils andere Belastungsgrade erforderlich sind. Die Ermittlung der Tragfähigkeit unter einem bestimmten Belastungsgrad und einer zugeordneten Belastungsdauer (duration-of-load-Effekt) ist sehr aufwendig, da hierbei normalerweise für eine Vielzahl von Belastungsgraden die Zeit bis zum Versagen ermittelt werden muss. Für die Ermittlung des Kriechverhaltens müssen deutlich geringere Belastungsgrade auf dem Niveau der Gebrauchslasten angesetzt werden, da sonst die gemessenen Kriechverformungen deutlich über den in der praktischen Anwendung zu erwartenden Kriechverformungen liegen. Aus Zeit- und Kostengründen wurde in diesem Forschungsprojekt eine Mischung aus beiden Versuchsarten gewählt. Zunächst erfolgte eine Langzeitbelastung im Wechselklima. Anschließend wurde die Resttragfähigkeit der Probekörper im Kurzzeitversuch mit der Versuchskonfiguration aus Arbeitspaket 1 ermittelt.

#### **3.3.1 Langzeitbelastung im Wechselklima**

Unter Dauerlast liegt die Linearitätsgrenze des Kriechens, also die Belastung unterhalb derer die Kriechverformung einem Endwert entgegenstrebt, für Nadelholz und Brettschichtholz bei etwa 40 % der Kurzzeitfestigkeit. Dauerlasten oberhalb dieser Grenze führen zu einer fortgesetzten Zunahme der Kriechverformungen und schließlich zum Versagen des Holzes. Für die im Rahmen des Arbeitspakets 2 durchgeführten Langzeitversuche erhielten die Proben eine Dauerlast von ca. 35 % der mittleren Kurzzeitbruchlast und wurden zusätzlich mit einem Wechselklima entsprechend DIN EN 15416-3 belastet. Diese Klimabelastung wird eigentlich für Kriechversuche an mit PUR-Klebstoff geklebten Brettschichtholzbiegeträgern genutzt und besteht aus einem feuchten Klima (20 °C/85 % rel.LF) und einem warmen trockenen Klima (45 °C/40 % rel.LF), die im wöchentlichen Rhythmus über ein halbes Jahr wechseln. Dieses Wechselklima liegt im Rahmen der bei einem natürlichen Außenklima der Nutzungsklasse 2 nach DIN EN 1995-1-1 auftretenden klimatischen Extremwerte und entspricht somit der Anwendung der ‚ab initio‘-Technik in offenen Hallenbauten. Das Wechselklima wurde in einer automatisch geregelten Klimakammer am Institut für Bautechnik erzeugt.

Der Versuchsaufbau bestand aus Stahlrahmen, in denen jeweils zwei Probekörper übereinander angeordnet waren und gemeinsam über einen Hebelarm mit einer Totlast (Stahlplatten) belastet wurden (s. Abbildung 25). Die Verschiebung der Stahlbleche gegenüber dem Holzkörper wurde mittels mechanischer Messuhren mit einer Genauigkeit von 1/1000 mm gemessen und händisch protokolliert.



Abbildung 25: Arbeitspaket 2: Versuchsaufbau der Langzeitversuche im Wechselklima

Die Holzfeuchteänderung der Proben wurde indirekt über die Ermittlung der Masse eines Referenzprobekörpers ohne Blech beobachtet, da an den eingebauten Proben keine Messungen möglich waren.

Die Probekörper waren wie beim AP 1, Versuchsreihe 1A ausgebildet, jedoch wurde aufgrund der begrenzten Höhe in der Klimakammer die Länge der Holzlamellen um 10 cm verkürzt. Für die Langzeitversuche wurden die unter Kurzzeitbelastung leistungsfähigsten Stahlblech-Klebstoff-Kombinationen gewählt, die gleichzeitig im Rahmen eines prozessintegrierten Einbaus der Bleche eine gute Verarbeitung ermöglichen. Hier wurde einmal die beidseitige Verklebung der Bleche (wie auch des gesamten Brettschichtholzbauteils) mit Polyurethanklebstoff in Kombination mit galvanisch verzinkten Blechen gewählt. Als zweite Variante kam die Primerung der Bleche mit Epoxidharz entsprechend dem Probentyp EP-MUF-dünn-RG mit einseitiger EP-Verklebung, MUF-Verklebung der zweiten Blechseite und des übrigen Querschnitts und rohen gestrahlten Blechen zum Einsatz. Nachträglich wurden noch zwei weitere Serien, bei denen die Stahlbleche mit dem Primer Typ 409.12 der Firma Jowat vorbehandelt waren, geprüft. Hierfür wurden die Kombinationen PUR-PUR-GVP und EP-RGP ausgewählt, die unter der Kurzzeitbelastung in der Versuchsreihe 1A des Arbeitspakets 1 sehr hohe Bruchlasten erzielt hatten. In Verbindung mit dem PUR-Klebstoff wurden zur weiteren Verbesserung der Tragfähigkeit die galvanisch verzinkten Bleche mit erhöhter Oberflächenrauigkeit verwendet. Bei der Serie PUR-PUR-P-GVrauh wurden also raue galvanisch verzinkte Bleche beidseitig geprimert und beidseitig mit PUR-Klebstoff verklebt. Die rohen gestrahlten Bleche der Serie

EP-RGP wurde ebenfalls beidseitig mit dem Primer Typ 409.12 behandelt. Die Verklebung erfolgte anschließend auf einer Seite mit Epoxidharzklebstoff und auf der anderen mit MUF-Klebstoff. Eine Übersicht der Versuchsreihen ist in Tabelle 15 aufgelistet.

**Tabelle 15: Versuchsreihe 2: Konfiguration der Langzeitproben mit Dauerlast  $F_{\text{lang}}$  und Belastungsgrad**

Typ	Anzahl	$F_{u,m,kurz}$ [N]	$F_{\text{lang}}$ [N]	$F_{\text{lang}} / F_{u,m,kurz}$
PUR-PUR-GV	4 PK	28068	10000	35 %
EP-MUF-dünn-RG	4 PK	17630	6000	34 %
PUR-PUR-P-GVrauh	4 PK	30960	10600	34 %
EP-RGP	4 PK	24150	8500	35 %

Die Klimabelastung begann mit einer Befeuchtungsphase (20 °C/85 % rel. LF). Es zeigte sich, dass mit der gewählten Belastung die Probekörper des Typs PUR-PUR-GV bereits in der ersten Trocknungsphase (45 °C/40 % rel. LF) versagten. Dabei kam es, wie bei den Versuchen mit Wasserlagerung (Versuchsreihe 1B), zu großflächigem Adhäsionsversagen des Klebstoffs auf der Blechoberfläche. Möglicherweise wurde mit der im Kurzzeitversuch (s. Versuchsreihe 1A) ermittelten mittleren Bruchlast für diese Stahl-Klebstoff-Kombination die Tragfähigkeit überschätzt und folglich die Dauerlast zu hoch gewählt. Gleichzeitig reduziert die wechselnde Feuchte in Verbindung mit der erhöhten Temperatur offenbar die Adhäsion des PUR-Klebstoffs. Daher wurde diese Versuchsreihe mit galvanisch verzinkten Blechen mit erhöhter Rauigkeit und einer Vorbehandlung mit dem Primer Typ 409.12 wiederholt. Obwohl diese Kombination bei den Wasserlagerungsversuchen in AP 1 eine sehr gute Beständigkeit zeigte, trat unter Last bereits im ersten Klimazyklus ein Versagen von 2 Probekörpern und im zweiten Zyklus das Versagen eines weiteren Probekörpers auf. Das Versagen setzte sich hier aus einem kombinierten Adhäsionsversagen des Klebstoffs und Holzversagen zusammen.

Bei den Proben des Typs EP-MUF-dünn-RG bildete sich einem Probekörper (Probe 3) eine Delamination in der MUF-Fuge aus, die jedoch nicht zum Gesamtversagen führte. Alle Probekörper hielten über die gesamte Belastungsdauer von 294 Tagen, was 21 14-tägigen Zyklen mit den beiden unterschiedlichen Klimata entspricht.

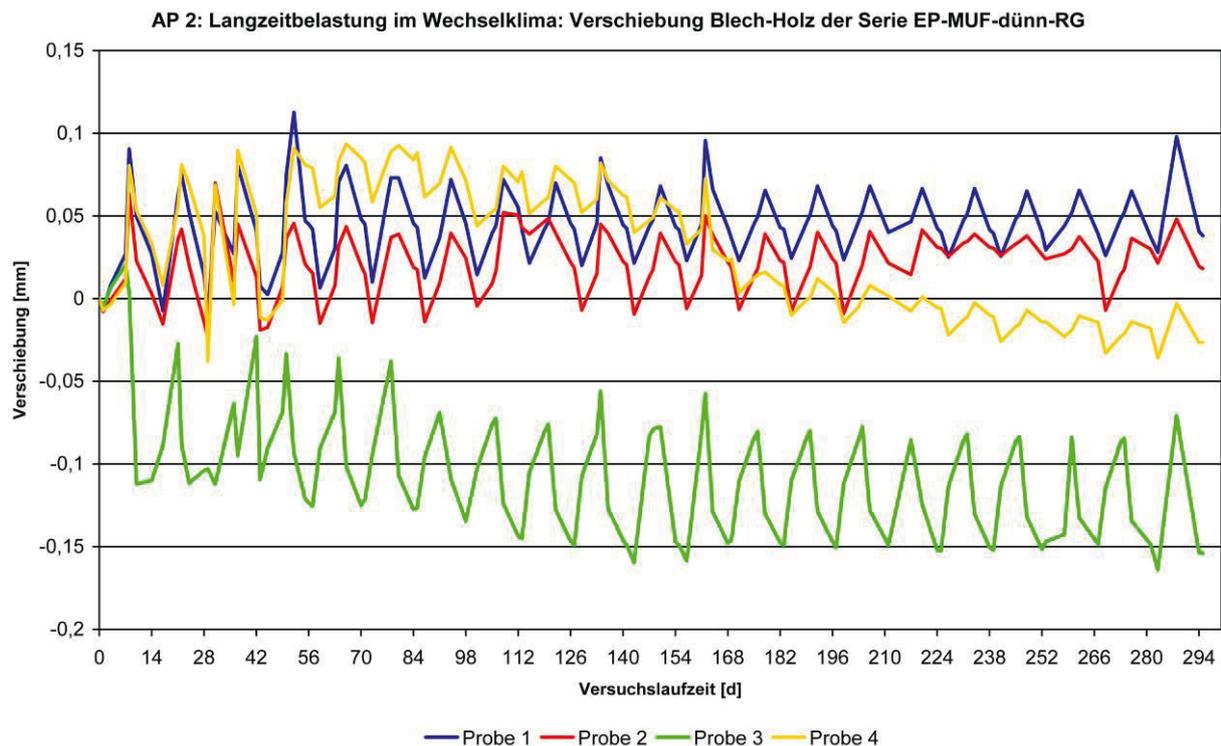
Auch hier wurde eine zusätzliche Versuchsreihe mit rohen gestrahlten Blechen, die mit dem Primer Typ 409.12 behandelt wurden, durchgeführt. Entsprechend der deutlich höheren Bruchlast dieser Kombination im Kurzzeitversuch wurde auch eine höhere Dauerlast aufgebracht, die wieder 35 % der Kurzzeitbruchlast betrug. Die Proben wurden unter der heiss-trockenen Klimabeanspruchung eingebaut und versagten bereits kurz nach dem Aufbringen der Belastung.

Für die nicht versagten Probekörper des Typs EP-MUF-dünn-RG sind in Abbildung 26 die Verschiebungskurven über die Versuchslaufzeit dargestellt. Der gezackte Verlauf der Kurve rührt vom Quellen und Schwinden des Holzes infolge der wechselnden Holzfeuchte und zu einem kleinen Teil von der Temperaturdehnung der Metallteile (Blech, Befestigung, Messuhr) her. Positive Verformungswerte der Messuhren bedeuten ein Quellen des Holzes und somit eine Verringerung der Messlänge, negative eine Vergrößerung der Messlänge infolge von Schwinden des Holzes und Herausziehen des Blechs aus dem Probekörper.

Die im Innenraumklima konditionierten Proben wurden in der ersten Belastungswoche dem feuchten Klima (20 °C / 85 % rel. LF) ausgesetzt. Dabei quoll das Holz und die Messwerte der Verschiebung wuchsen an. In der anschließenden Austrock-

nungsphase im heiß-trockenen Klima (45 °C/40 % rel. LF) bewegten sich die Messwerte wieder in den negativen Bereich. Bei den nachfolgenden Zyklen wiederholte sich dieses Verhalten.

Über die gesamte Versuchslaufzeit trat nach Abzug der zyklischen Verformung nur eine sehr geringe Verschiebung zwischen den eingeklebten Blechen und dem Holz auf. Bei den Probekörpern 1 und 2 lag diese Verschiebung unter 0,05 mm. Eine eindeutige Verschiebung in Lastrichtung war nicht erkennbar. Bei der Probe 3 ist eine deutliche Zunahme der Verschiebung im ersten Trocknungszyklus zu erkennen. Hier trat das einseitige Versagen der MUF-Fuge auf, was zu einer Lastumlagerung auf die EP-Fuge und somit zu einer Verformungszunahme führte. Über die restliche Versuchslaufzeit summierte sich eine zusätzliche Verschiebung von etwa 0,05 mm auf, die sich jedoch zum Großteil in der ersten Hälfte der Belastungsdauer einstellte. Der Probekörper 4 zeigte demgegenüber zunächst eine der Last entgegengesetzte Verformung, die offenbar aus permanenten Deformationen der Holzlamellen herrührt. Auch in den Wasserlagerungsversuchen des Arbeitspakets 1, Versuchsreihe 1B wurden solche irreversiblen Deformationen der Holzkörper beobachtet. Nach etwa einem Drittel der Versuchslaufzeit begann jedoch eine Verschiebungszunahme in Lastrichtung, die bis zum Ende der Langzeitbelastung ca. 0,09 mm betrug. Auch hier ist zum Ende der Versuchslaufzeit eine geringere Verschiebungszunahme zu beobachten.



**Abbildung 26: Arbeitspaket 2: Langzeitbelastung im Wechselklima 20 °C/85 %RF und 45 °C/40 %RF, Verschiebung zwischen Holz und Blech der Serie EP-MUF-dünn-RG, Probe drei MUF-seitig gerissen**

Die Verschiebungskurven zeigen, dass für die ‚ab initio‘ eingeklebten Bleche aufgrund der sehr dünnen Klebefuge nur ein minimales Kriechen unter Dauerlast auftritt. Für die Dimensionierung von Anschlüssen und Verbindungen können die Kriechverformungen zwischen Stahlblech und Holz daher vernachlässigt werden. Ungünstig wirkt sich die dünne Klebefuge jedoch auf den Abbau von Zwängungsspannungen bei wechselnder Temperatur und Holzfeuchte aus.

### 3.3.2 Ermittlung der Resttragfähigkeit nach der Langzeitbelastung

Nach Ende der Langzeitbelastung wurden die noch intakten Probekörper der Serie EP-MUF-dünn-RG im Kurzzeitversuch bis zum Bruch belastet, um die Resttragfähigkeit der Verklebung zu ermitteln. Der Versuchsaufbau und die Belastungsgeschwindigkeit entsprachen den Kurzzeitversuchen in Arbeitspaket 1. Die folgende Abbildung 27 zeigt die Kraft-Verformungs-Kurven der Probekörper bezogen auf den Traversenweg. Der gezackte Verlauf der Kurven ist durch ein Rutschen der Verankerungskonstruktion bedingt.

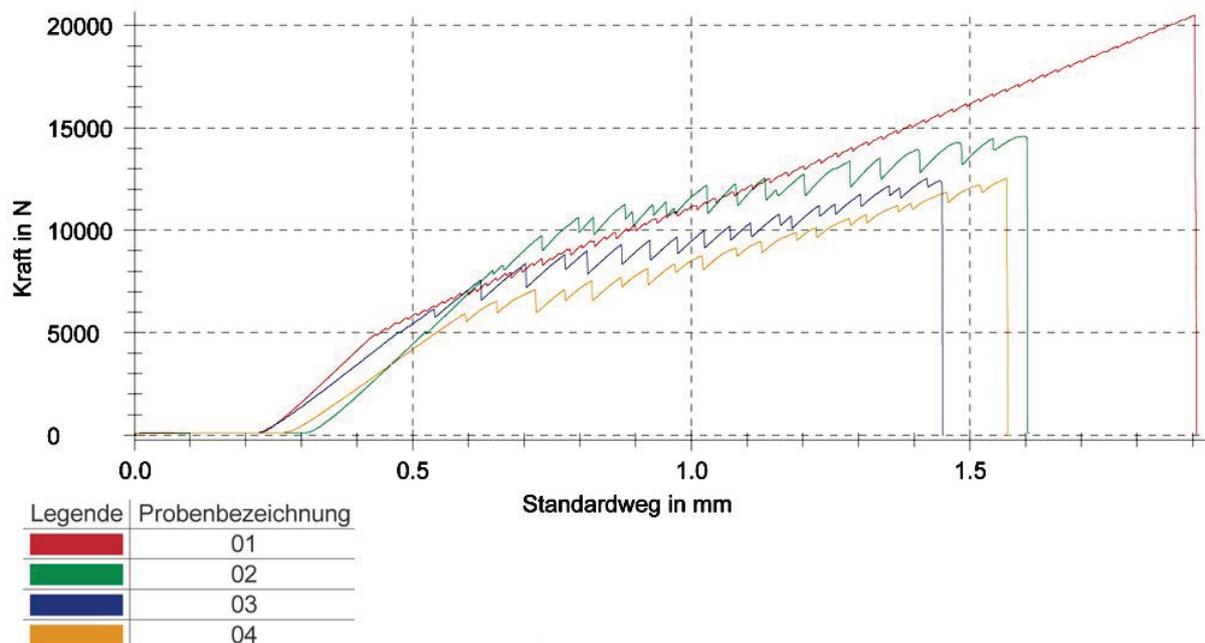


Abbildung 27: Arbeitspaket 2: Resttragfähigkeit der Proben nach Langzeitbelastung im Wechselklima, Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Kombination EP-MUF-dünn-RG

Es kam bei dieser Blech-Klebstoff-Kombination wie auch in den Kurzzeitversuchen ohne Vorbelastung zu einem gemeinsamen Versagen der EP- und der MUF-Fuge. Die Bruchflächen zeigen, wie in Abbildung 28 zu erkennen, sowohl auf der mit Epoxidharz als auch auf der mit Epoxidharz geprimerten und MUF-Klebstoff verklebten Blechseite einen Bruch im Holz oder der obersten Holzschicht (holznaher Bruch). Adhäsives Versagen auf der Blechoberfläche trat nur in minimalem Umfang auf. Lediglich Probekörper 3, bei dem die MUF-Klebefuge bereits nach dem ersten Klimawechsel versagte, zeigt auf der MUF-Seite größere Bereiche mit Adhäsionsversagen. Ursache könnte hier jedoch auch eine Verschmutzung der rohen gestrahlten Blechoberfläche sein. Die erforderliche Sorgfalt und Gründlichkeit bei der Reinigung der Bleche ist daher noch einmal hervorzuheben (vgl. auch Arbeitspaket 3).

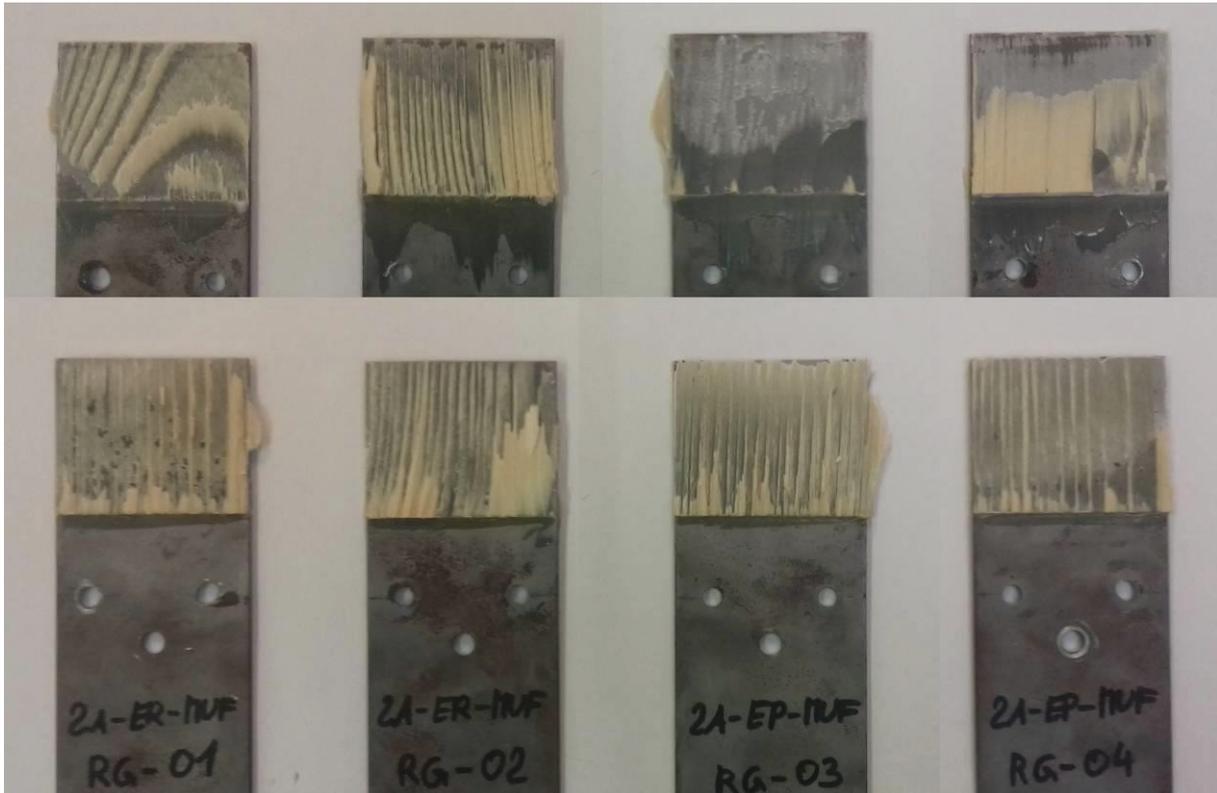


Abbildung 28: Arbeitspaket 2: Resttragfähigkeit der Proben nach Langzeitbelastung im Wechselklima, Bruchflächen der Kombination EP-MUF-dünn-RG (oben: MUF-Seite, unten: EP-Seite)

Die mittlere Bruchlast der Probekörper lag mit 15,0 kN um knapp 15 % unterhalb der Werte ohne vorherige Langzeitbelastung ( $F_{u,kurz} = 17,6$  kN). Allerdings gab es eine relativ hohe Streuung der Bruchlasten zwischen dem Minimalwert von 12,5 kN (Probe 3 und 4) und 20,5 kN (Probe 1). Es zeigte sich, dass die beiden Probekörper mit der höchsten gemessenen Kriechverformung auch die niedrigsten Bruchlasten erreichten. Die statistischen Kenngrößen der Versuchsreihe sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Versuchsreihe 2: Resttragfähigkeit der Probekörper Serie EP-MUF-dünn-RG nach Langzeitbelastung im Wechselklima

Typ	$F_{u,m}$ [N]	COV [%]	$q_{0,05}$ [N]	$q_{0,95}$ [N]	$F_{u,lang} / F_{u,kurz}$
EP-MUF-dünn-RG	15035	25,09%	8830	21239	85 %

Mit der relativ hoch angesetzten Dauerlast und der zusätzlichen Wechselklimabelastung gibt die ermittelte Resttragfähigkeit einen Anhaltspunkt für die aufnehmbare Dauerlast im Gebrauchszustand. Eine genauere Quantifizierung des DOL-Effekts ist aufgrund des geringen Probenumfangs und der fehlenden Variation des Belastungsniveaus nicht möglich. Hierzu sind weitere Versuche mit einer größeren Probenanzahl und unterschiedlichen Lastniveaus erforderlich. Zur Vereinfachung könnten diese Versuche auch in konstantem Klima erfolgen.

### **3.4 AP 3: Versuche zur Prozeßintegration im Herstellwerk**

Die Integration der ‚ab initio‘-Verklebung von Stahlblechen in den automatisierten Produktionsprozess des Brettschichtholzes stellt den wesentlichen Unterschied zum bisher üblichen nachträglichen Einkleben von stählernen Verstärkungs- und Verbindungselementen in Brettschichtholzbauteile dar. Das Innovationspotential liegt hierbei in der möglichen Automatisierung der zum Einkleben erforderlichen Arbeitsschritte und der Nutzung des Pressdrucks bei der Herstellung der Blech-Holz-Verklebung. Dadurch sind produktions- und kostentechnische Synergieeffekte möglich.

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 wurde zunächst der Produktionsprozess des Projektpartners Hüttemann Holz hinsichtlich der Prozessintegration des Einbaus der Stahlbleche analysiert.

Anschließend erfolgte die versuchsweise Herstellung von Bauteilen als Probekörper mit unterschiedlichen Blech-Klebstoff-Konfigurationen, um die praktischen Randbedingungen der Herstellung zu untersuchen. Dabei wurde auch die anschließende Bearbeitung der verklebten Bauteile auf CNC-gesteuerten Abbundanlagen erprobt.

### 3.4.1 Analyse des Herstellungsprozesses und Evaluation lokaler und zeitlicher Positionen zum Einbau der Bleche

In Kooperation mit dem Projektpartner Hüttemann Holz wurde der Prozess der Brettschichtholzherstellung im Werk in Olsberg analysiert, um geeignete Methoden zur Integration der ‚ab-initio‘-Verklebung der Stahlbleche in die Produktion zu entwickeln. Der Herstellungsprozess ist wie folgt organisiert:

- *Sortierung der getrockneten Rohlamellen:*  
Die Rohlamellen werden in einem mehrstufigen vollautomatisierten Prozess nach Festigkeitsklassen sortiert. Dabei können auch spezielle Sortieranforderungen (z.B. ein bestimmte Rohdichtebereiche oder Ästigkeiten) programmiert werden. Das Heraustrennen von Fehlstellen erfolgt automatisiert durch exakte EDV-seitige Lokalisation jeder einzelnen Lamelle. Dadurch ist theoretisch ein Tracking jeder Lamelle im gesamten Herstellungsprozess möglich. Zusätzlich ist eine optische Markierung einzelner Lamellen oder Lamellenabschnitte möglich.
- *Zwischenpufferung/Lagerung/Kombination der Lamellen:*  
Die sortierten und von Fehlstellen befreiten Lamellen werden in der Regel direkt ins Pufferlager weiterbefördert, wo sie nach Festigkeitsklassen sortiert zwischengelagert oder direkt zu einzelnen Bauteilen zusammengestellt werden. Eine Entnahme von sortierten Lamellen aus dem Prozess zur externen Lagerung ist ebenso möglich wie die gezielte Zuführung bereits sortierter Lamellen.
- *Keilzinkung:*  
Die aus dem Pufferlager zusammengestellten Lamellen werden paketweise von der Keilzinkungsanlage gefräst und beleimt, anschließend separiert und im Durchlaufverfahren zu einer Endloslamelle zusammengepresst.
- *Hobeln/Zuschnitt:*  
Direkt im Anschluss an die Keilzinkung werden die Lamellen beidseitig auf die endgültige Dicke gehobelt und von der Endloslamelle die benötigten Längen abgeschnitten.
- *Zwischenlagerung im Lamellenlager:*  
Nach dem Zuschnitt werden die Lamellen im Lamellenlager bauteilweise zwischengelagert. Hier erfolgt auch die Aushärtung der Keilzinkenklebung.
- *Beleimung:*  
Die Lamellen durchlaufen anschließend eine automatische Beleimungsanlage. Mit der Anlage können zweikomponentige Melamin- oder Resorcinharzklebstoffe aufgebracht werden, in der aktuellen Konfiguration jedoch keine Polyurethanklebstoffe.

- *Stapeln/Pressen:*  
Nach der Beleimung werden die Bauteile im Pressbett gestapelt und mit dem erforderlichen Pressdruck belastet. Es stehen sowohl automatisierte Pressbetten zur Herstellung gerader Standardquerschnitte, als auch individuell anpassbare Pressbetten zur Herstellung von gekrümmten und/oder gevouteten Trägern zur Verfügung.
- *Abrichten/Abbund:*  
Nach Ablauf der erforderlichen Presszeiten werden die Seitenflächen der Bauteile gehobelt und die Bauteilenden plan geschnitten. Anschließend erfolgt der weitere Abbund individuell für das jeweilige Bauteil. Dabei werden erforderliche Aussparungen, Bohrungen, Schlitze und Ausfräsungen hergestellt, Satteldachträger besäumt, Verbindungsmittel vormontiert und Beschichtungen aufgetragen.

Zeitlich und räumlich erscheint das Lamellenlager vor der automatischen Beleimung am besten für eine erste Montage der Stahlbleche geeignet. Die Holzlamellen sind hier bereits gehobelt und auf Länge geschnitten. Die Herstellung der Aussparungen für die Stahlbleche kann zunächst manuell erfolgen. Die spätere Integration eines oder mehrerer verstellbarer Hobel bzw. Abblattköpfe zur Herstellung der Aussparungen in den automatisierten Prozess ist möglich. Es ist eine relativ hohe Präzision hinsichtlich der Tiefe der Aussparung einzuhalten, damit die erforderliche Klebfugendicke sichergestellt wird. Anschließend kann der Klebstoffauftrag in die gehobelte Aussparung und der Einbau der Stahlbleche erfolgen. Die Stahlbleche sind in ihrer Position durch geeignete Maßnahmen zu fixieren. Hierzu können Holzschrauben verwendet werden. Abhängig von der verwendeten Klebstoffsorte und dem zeitlichen Puffer bis zum Aufbringen des Pressdrucks muss ggf. über die Fixierung hinaus auch bereits ein Pressdruck aufgebracht werden. Die Eignung von Holzschrauben für diese Aufgabe und die erforderlichen Schraubenabstände sind noch zu ermitteln. Allgemein erscheint das Prinzip der Schraubenpressklebung auch bei Stahlblechen möglich, jedoch ist bei sehr dünnen Blechen die geringe Biegesteifigkeit zu berücksichtigen. Nachteilig ist auch die erforderliche hohe Schraubenanzahl. Beim manuellen Verschrauben entsteht hier ein relativ hoher Arbeitsaufwand, der sich nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens auswirkt.

Durch die automatisierte Beleimung erfolgt auf der Oberseite der in die Holzlamellen eingeklebten Bleche der gleiche Auftrag des zur Brettschichtholzverklebung verwendeten Klebstoffs (MUF) wie auf der übrigen Lamellenoberfläche. Im Sinne einer einfachen Herstellung mit Minimierung der zusätzlichen Arbeitsschritte zum Einkleben der Stahlbleche ist eine oberseitige Verklebung der Bleche mit MUF-Klebstoff wünschenswert. Die in den bisher durchgeführten Versuchen gezeigte geringe Adhäsion des MUF-Klebstoffs auf der Blechoberfläche, teilweise verbunden mit korrosivem Angriff durch den Säurehärter, reduziert in diesem Fall jedoch die Tragfähigkeit der Gesamtsystems. Es sollte daher vorzugsweise die in AP 1 untersuchte Beschichtung der Bleche mit Epoxidharz oder die Vorbehandlung der Bleche mit einem geeigneten Primer (z. B. Jowat Typ 409.12) erfolgen, um die Tragfähigkeit der MUF-Fuge zu verbessern. Alternativ muss die Blechoberfläche bei der automatischen Beleimung abgedeckt werden und anschließend der gleiche Klebstoff wie zur Verklebung der Blechunterseite aufgetragen werden. Für diese Arbeiten stehen jedoch nur ein sehr kurzes Zeitfenster zwischen Beleimung und Aufbringen des Pressdrucks sowie beengte räumliche Verhältnisse zur Verfügung. Dies erhöht sowohl die Fehleranfälligkeit des Verfahrens, als auch den personellen

Aufwand. Vorteilhaft ist die gleichmäßige Tragfähigkeit der oberen und unteren Klebefuge des Blechs.

In den folgenden Produktionsversuchen wurde das Verfahren mit Fixierung der Bleche in den Aussparungen und direkt folgendem automatischen Klebstoffauftrag und Aufbringen des Pressdrucks im Pressbett ausgewählt. Hier ergibt sich der geringste manuelle Bearbeitungsaufwand und das geringste Fehlerrisiko aufgrund der Minimierung der erforderlichen Arbeitsschritte. Die kritische Variable ist die Verarbeitungszeit der zum Einkleben der Stahlbleche verwendeten Klebstoffe (PUR bzw. Epoxidharz).

Die Bearbeitung der Bauteile nach dem Aushärten des Klebstoffs darf durch die eingeklebten Verstärkungsbleche nicht behindert werden. Es sind daher an die Position der Bleche und die Verarbeitungsgenauigkeit entsprechende Anforderungen zu stellen. Das erforderliche Hobeln der Seitenflächen und Kappen der Stirnflächen bedingt einen Versatz der Stahlbleche ins Bauteilinnere („Holzdeckung“), die eine Beschädigung der Bearbeitungswerkzeuge sicher ausschließt. Hier können ca. 2 cm Abstand zu den Seitenflächen und ca. 4 cm zur Stirnfläche als sinnvolle Größen angesetzt werden. Für das Durchbohren der Bauteile einschließlich der eingeklebten Bleche sind geeignete Bohrwerkzeuge bereitzustellen. Dafür müssen ggf. Änderungen an der automatischen Abbundanlage vorgenommen werden.

### 3.4.2 Probenvorbereitung im Herstellwerk

Als Vorbereitung für die Herstellung der Bauteilprobekörper des AP 4 wurden geeignete Verfahren zur Herstellung der Aussparungen für die Stahlbleche erprobt. Die Anwendung eines Abblattkopfes erwies sich als weniger praktikabel, sodass die Aussparungen mittels einer Oberfräse erstellt wurden. Mit Hilfe einer Schablone war das Ausfräsen schnell und lagesicher durchzuführen (Abbildung 29).



Abbildung 29: Herstellung der Aussparungen für die Bleche mit der Oberfräse

Die sich ergebende gefräste Oberfläche wies jedoch eine deutlich höhere Rauigkeit auf, als die in der Holzwerkstatt am Lehrstuhl für Tragkonstruktionen auf der Abriechte gehobelten Oberflächen. Sowohl bei der Herstellung der Aussparungen mit einem Abblattkopf/Hobel als auch mit einer Oberfräse ergibt sich ein Überstand der Aussparung über die Blechlänge hinaus. Dieser Überstand füllt sich mit Klebstoff, der jedoch nicht wirksam an der Kraftübertragung beteiligt ist. Die Länge des Überstands ergibt sich aus dem Durchmesser des Abblattkopfes oder des Fräskopfes der Oberfräse. Je kleiner der jeweilige Durchmesser ist, desto kleiner wird auch der Überstand der Aussparung und somit die Fehlfläche innerhalb des Brettschichtholzbauwerks. Gleichzeitig erhöht ein kleiner Fräskopfdurchmesser jedoch die benötigte Zeit zur Herstellung der Aussparungen.

Für eine automatisierte Herstellung der Aussparungen wäre ein Hobel/Abblattkopf die schnellere und effizientere Herstellungsmethode. Damit ließen sich die Aussparungen direkt an den laufenden Lamellen herstellen, wofür jedoch ggf. eine dem Lamellenvorschub angepaßte Mitführung des Hobels erforderlich wäre. Aufgrund der hohen, hinter der Keilzinkendurchlaufpresse nicht völlig gleichmäßigen Lamellenvorschubgeschwindigkeit reduziert sich die Präzision bei der Positionierung der Aussparungen. Daher erscheint hier zunächst eine Bearbeitung der ruhenden Holzlamellen vorteilhaft, um die erforderlichen Einbaugenauigkeiten einzuhalten.

Im Anschluss an das Ausfräsen erfolgte eine manuelle Säuberung der Aussparungen von Staub und losen Spänen mittels Handbürste. Als Alternative wurde das

Ausblasen mit Druckluft getestet. Dieses Verfahren ist ebenfalls sehr effektiv und lässt sich auch im automatisierten Prozeß anwenden.

Nach der Reinigung erfolgte der eigentliche Einbau der Stahlbleche in die Aussparungen der Holzlamellen. Zunächst wurde der Klebstoff (Polyurethan oder Epoxidharz) auf die Holzoberfläche aufgetragen und mittels Zahnspachtel gleichmäßig verteilt, sodass im Bereich der Klebefuge eine vollständige Benetzung der Holzoberfläche gegeben war. Dann wurden die Stahlbleche in die Aussparungen eingesetzt und mittels Schrauben fixiert.



**Abbildung 30: Fixierung der eingeklebten Stahlbleche mit Schrauben (hier: Zugstäbe VR 4A mit PUR-Verklebung)**

Aus Gründen der Zeitersparnis wurde je Blech nur eine Schraube eingesetzt. Es zeigte sich, dass im ungünstigen Fall eine leichte Verdrehung bzw. ein Verkanten der Bleche auftrat, sodass die Bleche beim Pressen der Bauteile nicht vollständig ins Holz eingedrückt wurden. Daher empfiehlt sich die Fixierung mit mindestens zwei Schrauben. Ein Versenken der Schraubenköpfe in die Bleche ist vorteilhaft, um eine problemlose Vereinzelung der Holzlamellen bei der automatischen Zuführung zur Beleimungsanlage zu gewährleisten. Ein leichtes Überstehen der Schraubenköpfe hatte jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Funktion der Anlagentechnik. Für die automatisierte Weiterbearbeitung der Brettschichtholzelemente in CNC-gesteuerten Abbundanlagen sollten zur Fixierung der Bleche Schrauben aus einem mit den üblichen Holzbearbeitungswerkzeugen bearbeitbarem Material, wie Aluminium, verwendet werden. Handelsübliche gehärtete Schnellbauschrauben können hier zu einer Beschädigung der Werkzeuge, besonders beim Fräsen von Schlitzern, führen.

Unmittelbar nach dem Einkleben und Fixieren der Stahlbleche wurden die Holzlamellen der automatischen Beleimungsanlage zugeführt. Die Beleimung erfolgte mit dem standardmäßig in der Produktion des Projektpartners verwendeten Melamin-

Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffs (BASF Kauramin® Leim 690 flüssig mit Kauramin® Härter 1690 flüssig) im Mischungsverhältnis 100:20 (Massenverhältnis), wobei Leim und Härter getrennt aufgetragen werden und sich beim Stapeln und Verpressen der Lamellen mischen. Anschließend wurden die Bauteile in einer horizontalen hydraulischen Presse zusammengefügt und mit einem Druck von  $1,2 \text{ N/mm}^2$  gepresst.

Die Zeit zwischen dem Beginn des Klebstoffauftrags für den Einbau der Stahlbleche und dem Aufbringen des Pressdrucks kann als kritisches Element für die Herstellung der ‚ab initio‘ verstärkten Brettschichtholzbauteile betrachtet werden. Die verwendeten Klebstoffe wiesen eine Verarbeitungszeit von 45 Minuten (Jowapur 686.60 bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 65 % rel. LF und 12 % Holzfeuchte) bzw. 30 Minuten (2K-Epoxidharz Jowat® 692.30 bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) auf. Die für die Herstellung von jeweils drei Biegebalken ( $b/h = 16/32 \text{ cm}$ ) und einem Zugstab ( $b/h = 16/16 \text{ cm}$ ) praktisch erreichten Zeiten betragen ca. 30 Minuten, sodass für den Epoxidharzklebstoff die maximale Verarbeitungszeit bereits voll ausgenutzt war. Daher ist eine gute Arbeitsvorbereitung und Koordination vor allem für den Prozessschritt des Einklebens der Stahlbleche erforderlich. Die Arbeitsschritte beim Einbau der Bleche (Klebstoffauftrag, Positionierung und Fixierung der Bleche) wurden dafür auf einzelne Arbeitskräfte verteilt.

Beim Aufbringen des Pressdrucks wurde bei den Fugen der Lamellen, in die Stahlbleche eingeklebt waren, ein Austreten von Polyurethan- bzw. Epoxidharzklebstoff beobachtet.



Abbildung 31: Verpressen der Probekörper des AP 4 mit PUR-verklebten Stahlblechen, lokaler Austritt von PUR-Klebstoff aus den Fugen



**Abbildung 32: Verpressen der Probekörper des AP 4 mit EP-verklebten Stahlblechen, lokaler Austritt von EP-Klebstoff aus den Fugen**

Der Austritt des zum Einkleben der Stahlbleche verwendeten Klebstoffs an der Bauteiloberfläche belegt den ausreichenden Klebstoffauftrag in den gefrästen Aussparungen. Hier wäre noch eine Optimierung der aufgetragenen Klebstoffmenge möglich, um den Klebstoffaustritt zu minimieren. Hierfür wäre eine automatische Dosierung des Klebstoffs sinnvoll, um gegenüber dem manuellen Auftrag eine gleichmäßigere Verteilung des Klebstoffs zu erzielen.

In den Holzfasern zwischen den eingeklebten Blechen und der Bauteiloberfläche kommt es durch das Herausquellen des Klebstoffs zu einer Vermischung von EP- bzw. PUR-Klebstoff mit dem zur Holzverklebung verwendeten MUF-Klebstoff. Während in den Vorversuchen des Arbeitspakets 0 eine sehr schlechte Adhäsion einer Mischung aus PUR- und MUF-Klebstoff auf der Stahloberfläche beobachtet wurde, konnte in den Randfugen der hergestellten Probekörper in den Bruchversuchen kein vorzeitiges Versagen bzw. Delaminieren beobachtet werden. Eine zusätzliche Untersuchung des Delaminationsverhaltens dieser Fugenbereiche wäre sinnvoll, um die Dauerhaftigkeit der Bauteile sicherzustellen.

Nach dem Aushärten des Klebstoffs in der Presse wurden die Bauteile zwischengelagert und anschließend die Seitenflächen gehobelt. Aufgrund der ausreichenden Überdeckung der Stahlbleche von 20 mm waren hierbei keine besonderen Vorsichtsmaßnahmen erforderlich. Im Folgenden wurden die Stirnflächen der Bauteile begradigt und die erforderlichen Längen zugeschnitten. Hierbei besteht besonders die Gefahr der Beschädigung des Schneidwerkzeugs durch die eingeklebten Bleche, da deren Position durch unvermeidliche Ungenauigkeiten beim Stapeln der Lamellen in der Presse nicht genau definiert ist. Daher ist eine Markierung oder eine nachträgliche Ortung der Blechposition erforderlich. Eine einfache Farbmarkierung auf der Lamellenoberfläche ist nicht geeignet, da sie durch das Hobeln der Seitenflächen wieder entfernt wird. Die Markierung der Blechenden

erfolgte daher bei der Herstellung der Probekörper durch manuelles Einbringen einer Bohrung in die jeweilige Holzlamelle. Die Koordination dieses Arbeitsschrittes in der Herstellung ist von besonderer Bedeutung, da eine nachträgliche Ortung der Blechpositionen im Brettschichtholzträger relativ aufwendig ist. An den fertigen Versuchskörpern wurden die genauen Blechpositionen mechanisch geortet, indem von den Stirnflächen aus jeweils in Höhe der Klebefugen mit einem HSS-Bohrer mit 5 mm Durchmesser bis zum Kontakt mit den Stahlblechen gebohrt und anschließend die Bohrlochtiefe gemessen wurde. In der Regel lagen die ermittelten Schwankungen der Blechposition deutlich unter 10 mm. Beim Bohren muss auf ein exakt senkrechtes Ansetzen des Bohrers zur Holzoberfläche geachtet werden, da sonst das eingeklebte Stahlblech leicht verfehlt werden kann.

Alternativ zum Anbohren der Brettschichtholzelemente wurde die zerstörungsfreie Ortung der Bleche mit einem handelsüblichen Messgerät zur Ortung von Bewehrungsstählen in Beton (Typ Hilti Ferroskan) erprobt. Die Ortung erfolgt dabei über Magnetfelder. Das Vorhandensein eines Stahlblechs in der Klebefuge des jeweiligen Brettschichtholzbauteils ließ sich mit diesem Gerät problemlos verifizieren. Da das Messgerät jedoch auf die Ortung runder Bewehrungsstähle ausgelegt und kalibriert ist, ließen sich für die eingeklebten Bleche weder die genaue Tiefe (Holzüberdeckung) an den Seitenflächen bestimmen, noch das jeweilige Blechende orten. Hierfür wären zusätzliche Untersuchungen in Verbindung mit einer entsprechenden Kalibrierung des Messgeräts erforderlich. Die Genauigkeit der zerstörungsfreien Ortung wird jedoch immer geringer sein, als bei direkter physischer Ortung mittels zerstörender Verfahren.

Die weitere Bearbeitung der Brettschichtholzelemente erfolgte auf einer CNC-gesteuerten Abbundanlage. Hier wurden die Schlitze für die Verbindungsbleche geschnitten und die Bohrungen für die Verbindungsbolzen hergestellt. Beim Schneiden der Schlitze sind die verfügbaren Abmessungen der Sägeblätter zu beachten. Für die maximale Schlitztiefe von 200 mm war mit einer Schlitzbreite von 6 mm die untere Grenze der Herstellbarkeit erreicht. Tiefere Schlitze lassen sich nur in größeren Breiten herstellen. Für die Bohrungen war ein spezieller Bohrer erforderlich der zum Bohren von Stahlblechen geeignet ist. Mit dem in Abbildung 33, links abgebildeten Bohrer war ein Durchbohren von Holz und Stahl möglich; es kam jedoch zwangsläufig zur Mischung der feinen Holzspäne mit den heißen Stahlspänen (Abbildung 33, rechts). Da hier eine Brandentwicklung nicht ausgeschlossen werden konnte und die Abbundanlage weder über eine direkte Absaugung, noch über eine Möglichkeit zur Brandbekämpfung verfügte, wurde entschieden, die Bohrungen nur bis in die Tiefe des ersten eingeklebten Blechs (= 40 mm) zu führen. Für eine zukünftige reguläre Bearbeitung von Brettschichtholzbauteilen mit eingeklebten Stahlblechen in der automatischen Abbundanlage sind geeignete Zusatzmaßnahmen zu treffen, die eine Brandentstehung zuverlässig verhindern können, um das Risiko einer Beschädigung der Anlage zu minimieren. Ausgehend von den kurzen Pilotbohrungen wurde nachträglich in der Werkstatt des Instituts für Bautechnik auf einer Ständerbohrmaschine manuell durch den gesamten Querschnitt durchgebohrt. Der Zeitaufwand für das manuelle Bohren lag über dem des maschinellen Abbunds.



**Abbildung 33: Bearbeitung der Brett-schichtholz-elemente mit eingeklebten Stahlblechen in der automatischen Abbundanlage: verwendeter Bohrer (links) und Stahl-/Holzspangemisch (rechts)**

Die durchgeführten Herstellungs- und Abbundversuche von Brett-schichtholzbauteilen mit ‚ab initio‘ eingeklebten Stahlblechen zeigen die Randbedingungen und Anforderungen für eine Integration des Verfahrens in die automatisierte Brett-schichtholzproduktion.

Eine solche Integration ist bereits ohne größeren technischen Aufwand möglich, wenn das Vorbereiten und Einkleben der Stahlbleche als manuelle Arbeitsschritte an den geeigneten örtlichen und zeitlichen Positionen im Herstellungsprozess erfolgt. Dafür ist jedoch eine gute Arbeitsvorbereitung sowie eine genaue Einweisung und Koordination des beteiligten Personals unabdingbar, da die Verarbeitungsdauer der verwendeten Klebstoffe (hier Polyurethan 45 Min. und Epoxidharz 30 Min.) nur ein kurzes Zeitfenster für den Einbau der Bleche erlaubt und eine Korrektur von Fehlern beim Einbau kaum möglich ist.

Die Automatisierung der in den Produktionsversuchen manuell durchgeführten Arbeitsschritte erscheint technologisch möglich. Eine Abschätzung des kostenmäßigen Aufwandes konnte in diesem Forschungsprojekt noch nicht erfolgen, da die optimale technische Konfiguration der automatisierten Bearbeitung schrittweise entwickelt und erprobt werden muss. Die möglichen Optionen und die zu stellenden Anforderungen wurden im Zusammenhang mit den jeweiligen Herstellungsschritten in diesem Abschnitt erörtert.

### 3.5 AP 4: Bauteilversuche in baupraktischen Dimensionen

In den Bauteilversuchen des Arbeitspakets 4 wurden Verbindungstechniken für die mit ‚ab initio‘ eingeklebten Stahlblechen verstärkten Brettschichtholzbauteile entwickelt und untersucht. Die Verstärkungen wurden zunächst nur an den Bauteilenden angeordnet; eine spätere Erweiterung der Verstärkung über die gesamte Bauteillänge bleibt als zusätzliche Option offen.

Aus den unter AP 3 beschriebenen technologischen Randbedingungen bei der Brettschichtholzherstellung, maßgeblich der erforderlichen Bearbeitung der Stirnflächen ist eine Verbindungsmethode mit aus dem Holz herausstehenden eingeklebten Blechen, wie sie beim nachträglichen Einkleben von Stahlelementen (Gewindestangen oder Lochbleche) üblich ist, nicht möglich. Wird eine Kraft in ein solches herausstehendes Stahlelement eingeleitet, entstehen darüber hinaus die in Versuchsreihe 1A und 1C beobachteten Spannungsspitzen an den Enden der Verbundfuge. Während eine dicke Klebfuge bei Verwendung eines geeigneten Klebstoffs diese Spannungsspitzen reduziert, erlaubt die bei ‚ab initio‘ eingeklebten Blechen entstehende dünne Klebfuge keine Umlagerung von Spannungsspitzen. Es ist daher sinnvoll, die Anschlusskräfte indirekt durch zusätzliche Verbindungsmittel über die Blechfläche verteilt einzuleiten.

Als Verbindungsmittel sind Stabdübel, Passbolzen oder Bolzen geeignet, die die Anschlusskräfte in außenliegende oder eingeschlitzte dickere Stahlbleche übertragen. Das Prinzip ist in Abbildung 34 und Abbildung 35 zu erkennen.

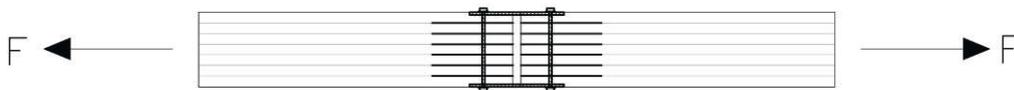


Abbildung 34: Versuchsreihe 4A: Prinzipskizze Aufbau Zugstoß mit außenliegenden Blechen

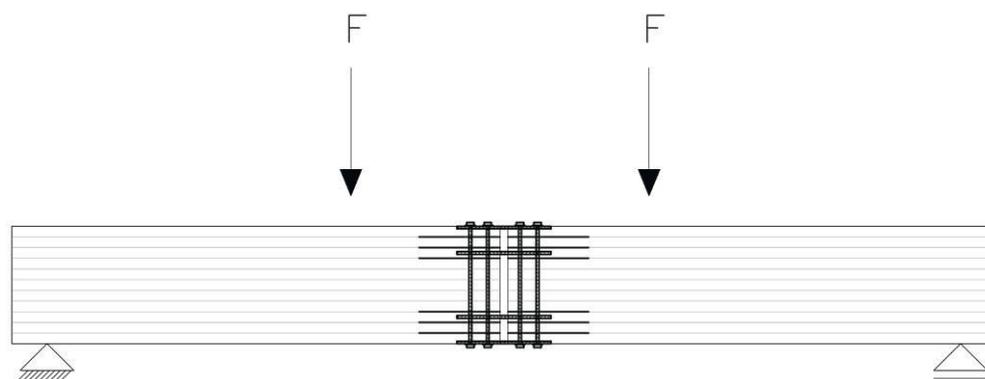
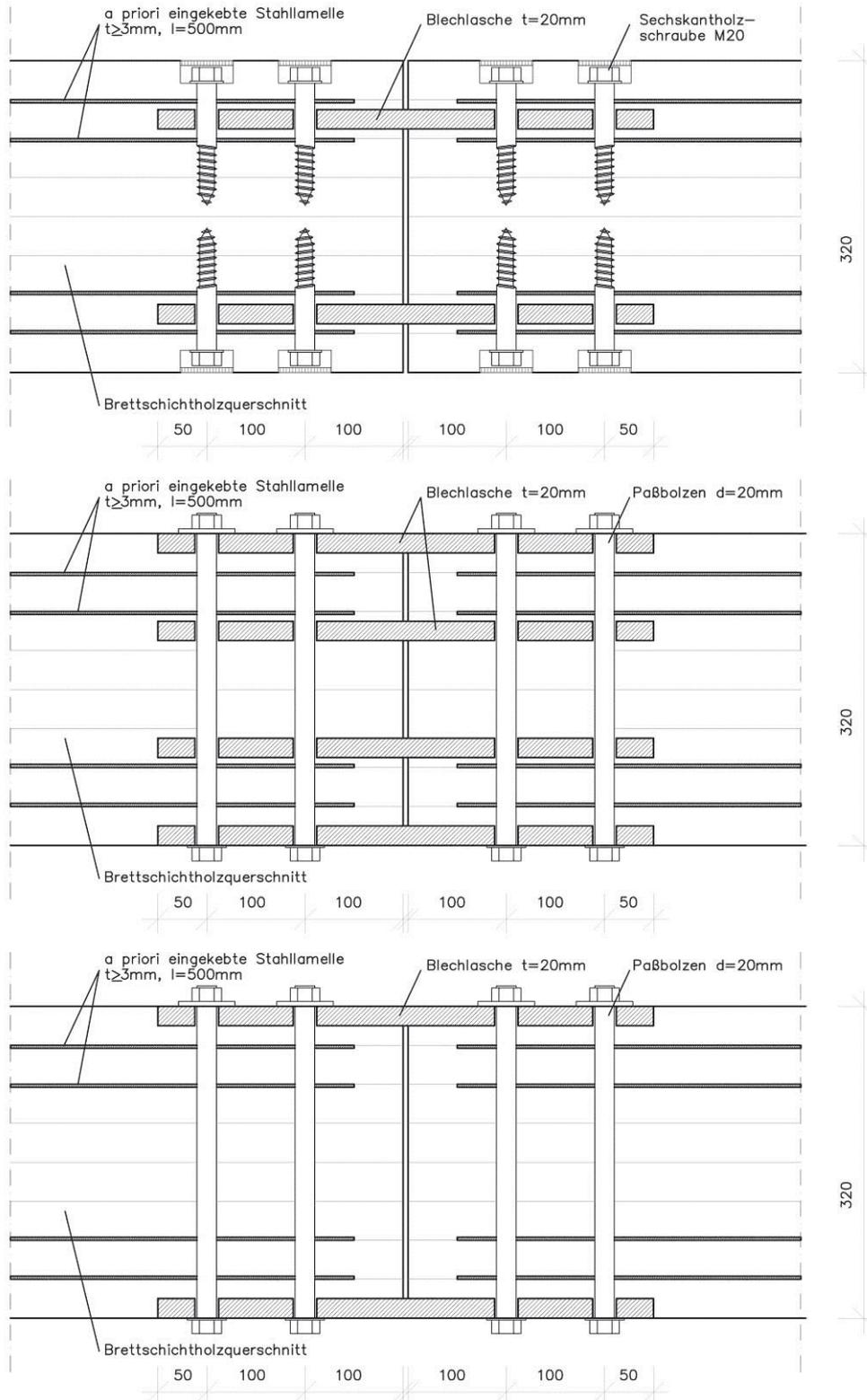


Abbildung 35: Versuchsreihe 4B: Prinzipskizze biegesteifer Trägerstoß mit außenliegenden und eingeschlitzten Verbindungsblechen

Die im Holz eingeklebten dünnen Bleche bilden dann eine lokale Lochleibungsverstärkung im Holz. Beim Nachgeben der Bettung der Dübel im Holz wird ein Großteil der Scherkraft der Dübel direkt in die eingeklebten Bleche eingeleitet, die die Kräfte dann über die große Klebefläche relativ gleichmäßig ins Holz übertragen. Abhängig von der Biegesteifigkeit der Dübel kann die Steifigkeit und das Last-Verformungsverhalten der Verbindung angepasst werden. Bei dünnen Dübeln ist als Versagensmodus ein elastisch-plastisches Verhalten mit Fließen der Dübel zu erwarten,

während bei sehr dicken, steifen Dübeln eher ein elastisches Verhalten mit sprödem Bruch in der Klebfuge auftreten wird. Weitere Varianten zur Anordnung der Verbindungsbleche und möglicher Verbindungsmittel sind in Abbildung 36 dargestellt.



**Abbildung 36: Varianten für Verbindungen mit ‚ab initio‘ eingeklebten Stahlblechen, Paßbolzen bzw. Sechskantholzschrauben und außenliegenden und/oder eingeschlitzten Verbindungsblechen**

Die Bohrungen für die Verbindungsmittel erfordern einen geeigneten Bohrer, der sowohl das Holz als auch die eingeklebten Stahlbleche durchdringen kann. Die Herstellung der Bohrungen kann dann auch mit automatisierten Abbundanlagen erfolgen. Eine Alternative stellen selbstbohrende Stabdübel vom Typ WS-T der Firma SFS Intec dar, die mit einer speziellen Bohrspitze aus gehärtetem Stahl in der Lage sind, Bleche der Festigkeit S235 von bis zu 10 mm Dicke (oder 3 x 5 mm) zu durchbohren. Mit diesen Stabdübeln hat auch der Projektpartner Hüttemann Holz bei konventionellen Anschlüssen bereits positive Erfahrungen gesammelt.

Im Rahmen des AP 4 wurden Zuganschlüsse (vgl. Abbildung 34) und biegesteife Trägerstöße (vgl. Abbildung 35) in baupraktischen Dimensionen geprüft. Die Abmessungen wurden entsprechend der zu erwartenden Bruchlasten und der verfügbaren Prüfeinrichtungen gewählt und orientierten sich an den bereits vom Lehrstuhl für Tragkonstruktionen und dem Institut für Bauforschung durchgeführten Bauteilversuche mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben [6].

Den eigentlichen großformatigen Bauteilversuchen ging eine Reihe von kleinformati- gen Vorversuchen mit Zuganschlüssen voraus (Versuchsreihe 4V), um unterschiedli- che Anschlusskonfigurationen hinsichtlich ihres Tragverhaltens zu untersuchen und die zu erwartenden Bruchlasten für die Bauteilversuche abzuschätzen.

### 3.5.1 Versuchsreihe 4V

Um das Trag- und Verformungsverhalten von Anschlüssen mit unterschiedlichen Blech-Klebstoff-Konfigurationen und Verbindungsmitteln zu untersuchen, wurden kleinformative Bauteilversuche mit Zuganschlüssen als Vorversuche durchgeführt.

Die Probekörper besaßen Abmessungen von 400 mm x 120 mm x 80 mm mit zwei eingeklebten Blechen mit einer Länge vom 200 mm, einer Breite von 60 mm und einer Dicke von 2,5 mm. Die Proben bestanden also gegenüber Versuchsreihe 1A aus drei Holzlamellen, wobei in die mittlere ein 6 mm dickes Anschlussblech 100 mm tief eingeschlitzt wurde. Die Verankerungskonstruktion in der Prüfmaschine wurde von Versuchsreihe 1A übernommen. Abbildung 37 zeigt den Versuchsaufbau mit eingebautem Probekörper. Die untersuchten Konfigurationen der Verbindungsmittel, Stahlbleche und Klebstoffe sind im Folgenden erläutert. Je Anschlusskonfiguration wurden drei Probekörper geprüft.

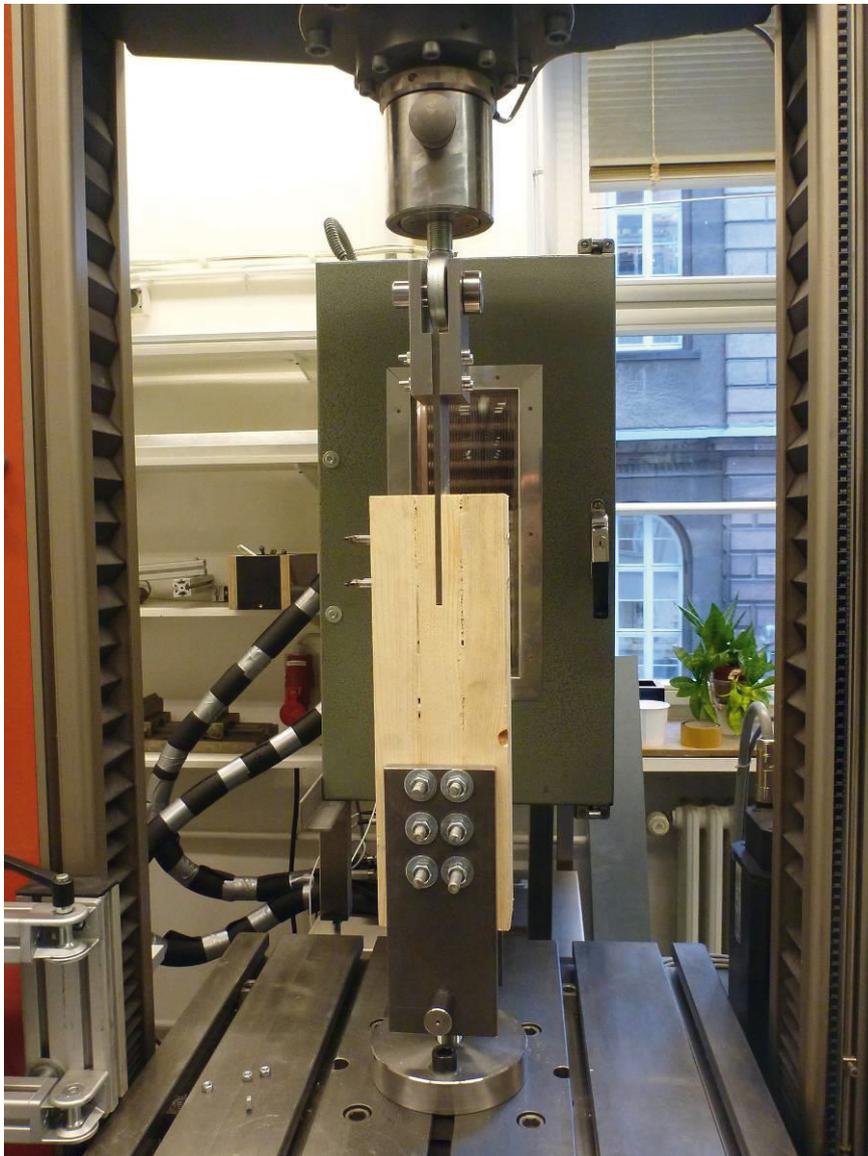


Abbildung 37: Versuchsreihe 4A: Versuchsaufbau Zuganschluss mit vier selbstbohrenden Stabdübeln Typ SFS WS-T 7x153 und eingeschlitztem Stahlblech

Als Verbindungsmittel kamen selbstbohrende Stabdübel Typ WS-T der Firma SFS Intec sowie Bolzen M24, Festigkeitsklasse 4.6 zum Einsatz.

Die Stabdübelverbindung erfolgte mit vier Stabdübeln Typ WS-T 7x153. Entgegen der normalen Anwendung treten diese Dübel aufgrund ihrer Länge auf der Rückseite der Probekörper aus, sodass sich die Positionierung im Holz genauer prüfen lässt. Die Dübelabstände wurden gegenüber den vom Hersteller angegebenen Mindestabständen reduziert, da durch die eingeklebten Bleche ein Aufspalten des Holzes weitgehend verhindert wird. Die in den Versuchen verwendeten Abstände sind in Tabelle 17 den Mindestabständen beim Einbau der Stabdübel ohne Blechverstärkung gegenübergestellt. Zum Vergleich der Tragfähigkeit und des Versagensmodus wurde auch eine Serie mit Stabdübeln ohne eingeklebte Bleche, jedoch mit reduzierten Dübelabständen geprüft.

**Tabelle 17: Versuchsreihe 4V: Rand- und Achsabstände der selbstbohrenden Stabdübel Typ SFS WS-T7**

Abstand	Mindestabstand	Abstand 1	Abstand 2
Achsabstand $\parallel$ ( $a_1$ )	50 mm	40 mm	25 mm
Achsabstand $\perp$ ( $a_2$ )	20 mm	32 mm	32 mm
Randabstand $\parallel$ Zug ( $a_{3,t}$ )	80 mm	40 mm	40 mm
Randabstand $\perp$ ( $a_{4,c/t}$ )	20 mm	24 mm	24 mm

Die Bolzenverbindung wurde mit jeweils einem Bolzen M24, Festigkeit 4.6 ausgeführt. Die Herstellung der Bohrungen in den fertig verklebten Probekörpern erfolgte auf einer Ständerbohrmaschine mit einem Metallbohrer mit 25 mm Durchmesser. Hiermit war ein problemloses Durchbohren des Holzes und der eingeklebten Bleche in einem Arbeitsgang möglich.

Als Stahlblech-Klebstoff-Kombinationen wurden die beidseitige Verklebung eines galvanisch verzinkten Blechs mit Polyurethanklebstoff (Typ PUR-PUR-GV) und zusätzlich die gleiche Kombination jedoch mit einseitiger MUF-Verklebung (Typ PUR-MUF-GV) gewählt. Die Probekörper ohne Bleche wurden komplett mit MUF-Klebstoff verklebt.

Weiterhin wurde hier der ursprünglich als Versuchsreihe 1D geplante Einfluss der Blechgeometrie untersucht. Dazu wurde an den Blechenden beidseitig eine Lochung oder eine Zahnung bzw. Voutung angeordnet, die den Blechquerschnitt zum Ende hin reduzierte. Dadurch sollte eine Verringerung der Spannungsspitzen in der Klebfuge an den Blechenden erzielt und somit die Tragfähigkeit erhöht werden. Bei der Lochung tritt darüber hinaus eine zusätzliche mechanische Verzahnung des Blechs mit dem die Löcher ausfüllenden Klebstoff auf. Die Wirksamkeit dieser ‚Klebstoffdübel‘ ist aus den in [1] und [2] beschriebenen Untersuchungen mit nachträglich eingeklebten Lochblechen bekannt. Die Geometrie der gelochten und gezahnten Blechenden ist in Abbildung 38 dargestellt.

Bleche mit Bohrungen

Bleche mit Vouten/Zahnungen

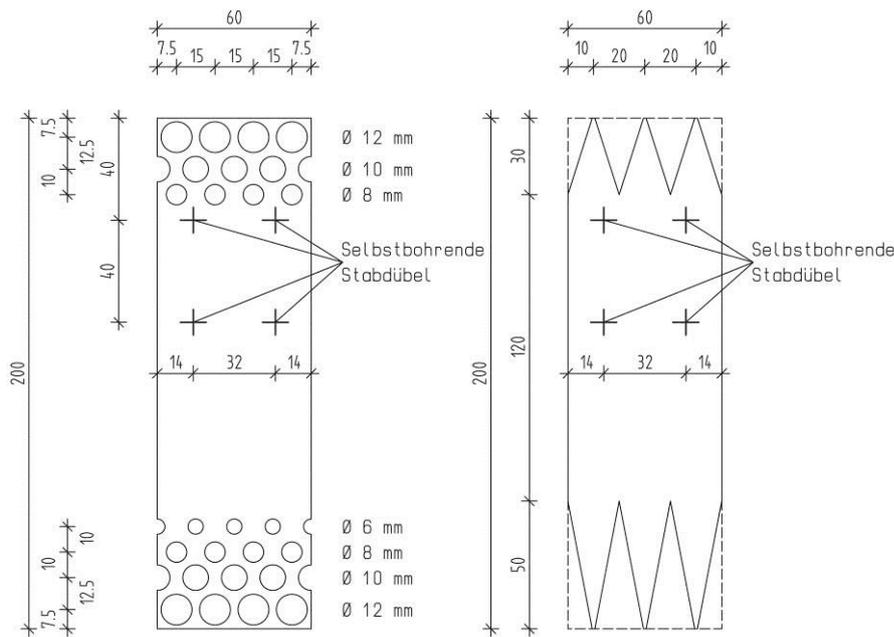


Abbildung 38: Versuchsreihe 4V: Geometrie der gelochten und gezahnten/gevouteten Bleche

Für die geprüften Anschlusskonfigurationen sind in Tabelle 18 die mittleren Bruchlasten und Variationskoeffizienten dargestellt.

Tabelle 18: Versuchsreihe 4V: mittlere Bruchlasten und Variationskoeffizienten der Vorversuche

Verbindungsmittel	Blech	Klebstoff	$F_{u,m}$ [N]	COV [%]
4 x WS-T 7x153 A1	GV	PUR-PUR	71700	15,16%
4 x WS-T 7x153 A1	GV	PUR-MUF	75600	9,36%
4 x WS-T 7x153 A2	GV	PUR-MUF	75225	10,27%
4 x WS-T 7x153 A1	GV-Loch	PUR-MUF	51540	1,83%
4 x WS-T 7x153 A1	GV-Voute	PUR-MUF	49208	1,65%
4 x WS-T 7x153 A1	ohne	MUF	49538	3,95%
1 x M24, 4.6	GV	PUR-PUR	84606	20,34%

Der Referenzanschluss Typ PUR-MUF-GV mit einseitiger MUF-Verklebung erreichte eine mittlere Bruchlast von 75,6 kN und versagte durch Adhäsionsbruch der MUF-Klebefuge. Bei einer Probe wurde der Bruch durch einen Längsriss, ausgehend vom Ende des Schlitzes für das Anschlussblech, ausgelöst. Eine Verringerung der Dübelabstände in Faserrichtung (Typ PUR-GV-RA) führte nicht zu einer reduzierten Tragfähigkeit der Anschlüsse. Die mittlere Bruchlast betrug hier 75,2 kN. Die Bruchursache war auch hier das Versagen der Klebefuge. Allerdings kam es vermehrt zum Aufspalten des Holzes in Dübelachse. Die Risse und die resultierende Zusatzbelastung der Klebefuge lösten hier aber wahrscheinlich das Versagen der Klebefuge aus.

Der Mittelwert der Bruchlast von Typ PUR-PUR-GV war mit 71,7 kN geringer als beim Typ PUR-GV, da bei einer Probe die Bohrspitze eines Stabdübels vor dem Durchdringen des zweiten eingeklebten Blechs versagte und somit nur drei Dübel voll zur Lastübertragung zur Verfügung standen. Hier versagten die Stabdübel auf Zug. Eine weitere Probe wurde nicht bis zum endgültigen Bruch der Stabdübel belastet, da eine Beschädigung der Verankerungskonstruktion vermieden werden sollte.

Die Anschlüsse mit geometrisch modifizierten Blechen erreichten relativ geringe Bruchlasten von 51,5 kN bei den gelochten Blechen (Typ PUR-MUF-GV-L) und

49,2 kN bei den gevouteten Blechen (Typ PUR-MUF-GV-V). In den Versuchen trat fast immer ein mittiges Aufspalten des Probekörpers, ausgehend vom eingeschnittenen Schlitz, auf. In der Folge kam es zum Bruch in der Klebfuge der eingeklebten Bleche oder zum Holzversagen in der unteren Verankerung. An den versagten Proben wurde festgestellt, dass die Lochungen nicht komplett mit Klebstoff gefüllt waren und sich somit keine Klebstoffdübel ausbilden konnten. Die Verringerung der Klebefläche durch die Lochung bzw. Zahnung der Bleche wirkte sich offenbar stärker aus, als die laststeigernde Wirkung durch Reduktion von Spannungsspitzen. Aufgrund der verteilten Lasteinleitung über eine größere Fläche durch die einzelnen Stabdübel wurden die Spannungsspitzen bereits wirkungsvoll reduziert.

Die Vergleichsproben ohne eingeklebte Bleche (MUF-MUF-OB) erreichten nur eine mittlere Bruchlast von 49,5 kN und lagen damit um knapp 35 % unter den Werten der vergleichbaren Anschlüsse mit ‚ab initio‘ eingeklebten Blechen. Die Probekörper versagten alle durch Aufspalten des Holzes in Achse der Stabdübel.

Die höchste mittlere Bruchlast von 84,6 kN erreichten die Anschlüsse mit Bolzen M24 als Verbindungsmittel (Typ PUR-PUR-GV-B). Bei zwei Probekörpern kam es zum Zugbruch des eingeschlitzten Anschlussblechs an der Lochschwächung. Die Bruchlasten dieser Proben betragen 93,3 kN und 95,7 kN. Die dritte Probe brach in der unteren Verankerung durch Blockscherversagen bei einer Last von nur 64,8 kN.

In Abbildung 39 sind exemplarisch typische Last-Verschiebungs-Kurven der geprüften Anschlüsse dargestellt. Die Kraft-Verschiebungs-Linien aller Proben sind im Anhang enthalten. Da die Wegaufnehmer an den Blechen vor Erreichen der Bruchlast entfernt wurden, ist die Kraft über den Traversenweg aufgetragen. Der Traversenweg beinhaltet auch die Verformungen in den Probekörperverankerungen.

VR 4V: Typische Last-Verschiebungs-Diagramme der Anschlussvarianten

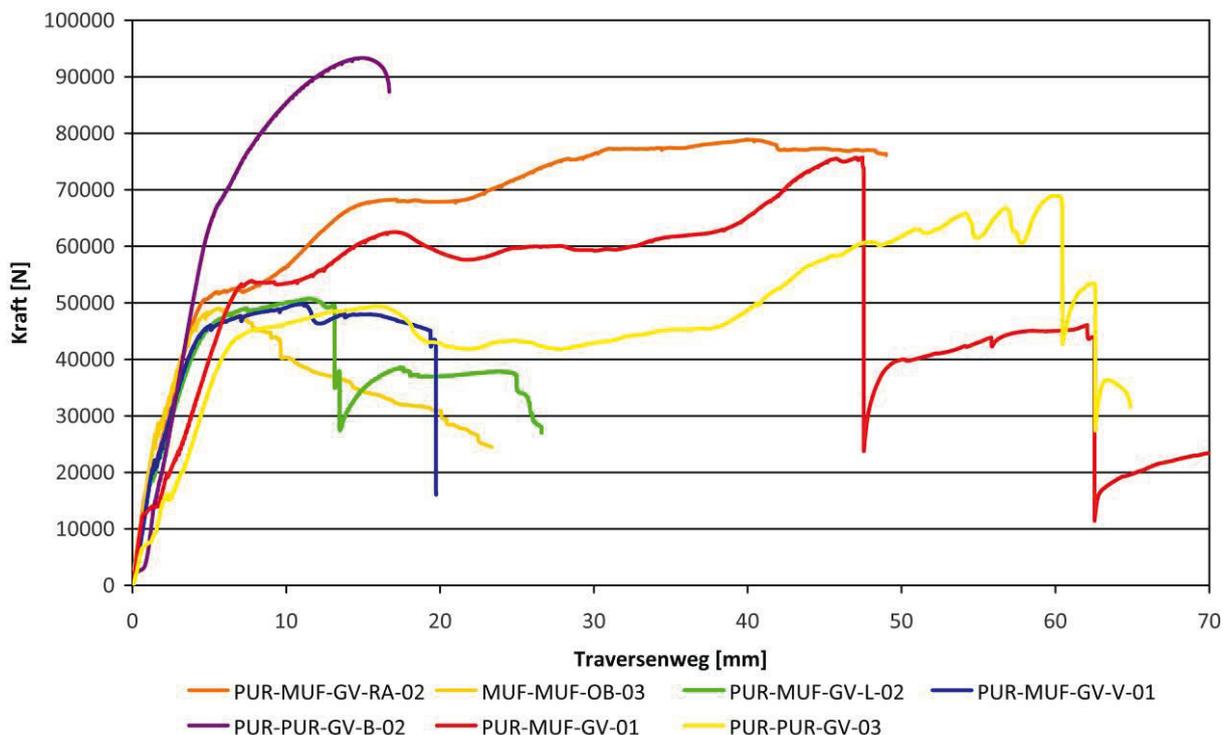


Abbildung 39: Versuchsreihe 4V: Exemplarische Last-Verschiebungs-Diagramme der geprüften Anschlussvarianten an kleinformatigen Probekörpern

Die Dübelanschlüsse mit Polyurethan- und MUF-verklebten galvanisch verzinkten Blechen (PUR-MUF-GV) versagten durch Bruch der MUF-Klebefuge. Die Last-Verschiebungs-Kurve der Probe 1 zeigt zunächst einen steilen Lastanstieg auf etwa 50 kN, gefolgt von einem Plateau mit plastischer Verformung der Stabdübel. Die Stabdübel wurden dabei in den Holzquerschnitt hineingezogen. Es bildete sich in der Folge eine Seilwirkung der Stabdübel aus, die zu einem weiteren Lastanstieg bis zur Maximallast führte. Es folgte der Bruch mit zwei Lastabfällen, die jeweils das Versagen der Klebfugen eines eingeklebten Blechs darstellen. Der Bruch ging jeweils von der weniger festen MUF-Klebefuge aus, führte jedoch infolge der Lastumlagerung zum fast gleichzeitigen Bruch auf der mit Polyurethan geklebten Blechseite. Das Bruchbild des Probekörpers nach Versuchsende ist in Abbildung 40 zu sehen. Man erkennt das Adhäsionsversagen auf der MUF-Seite (linke Blechseite) und das Holzversagen auf der PUR-Seite (rechte Blechseite).



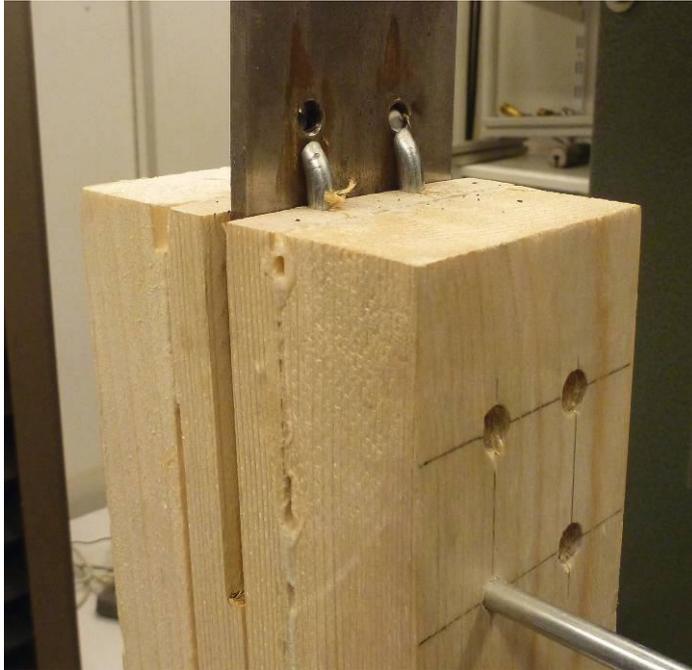
**Abbildung 40: Versuchsreihe 4V: Versagen des Probekörpers PUR-MUF-GV-03 durch Bruch der Klebfuge**

Bei beidseitiger Verklebung der Bleche mit PUR-Klebstoff (PUR-PUR-GV) kam es bei keiner Probe zum Versagen der Klebfugen. Bei einer Probe wurde die Belastung bei etwa 84 kN abgebrochen, um die Verankerungskonstruktion nicht zu beschädigen. Eine Probe versagte durch Aufspalten des Holzes, ausgehend vom eingeschnittenen Schlitz für das Anschlussblech, was zum Bruch in der unteren Verankerung führte. Die in Abbildung 39 dargestellte Probe 3 versagte durch einen Zugbruch der Stabdübel. Hier hatte ein Stabdübel die Bleche nicht durchdrungen, sodass nur drei Dübel wirksam waren. Dadurch ergibt sich die geringere Bruchlast von 68,9 kN. In der Last-Verschiebungs-Kurve erkennt man das Versagen der Stabdübel als drei kurz aufeinander folgende Lastabfälle. Die gebrochenen Stabdübel sind in Abbildung 41 zu erkennen.

Die Anschlüsse mit gelochten und gezahnten Blechen verhielten sich zunächst vergleichbar zu den Proben mit unbearbeiteten Blechen. Nach einer relativ geringen plastischen Verformung der Stabdübel trat jedoch der Bruch durch kombiniertes

Aufreißen vom Ende des Schlitzes und Versagen der Klebefuge auf. Die Kraft-Verschiebungs-Kurven der Probekörper PUR-MUF-GV-L-01 und PUR-MUF-GV-V-01 in Abbildung 39 zeigen exemplarisch dieses Tragverhalten.

Die Probekörper ohne eingeklebte Verstärkungsbleche zeigen bis zum Erreichen der Streckgrenze der Stabdübel das gleiche Last-Verschiebungs-Verhalten wie die verstärkten Proben. Durch die plastische Verformung der Stabdübel wird jedoch ein faserparalleles Aufreißen des Holzquerschnitts in Dübelachse ausgelöst. Es kommt also nicht zu dem oben beschriebenen Fließbereich des Anschlusses, sondern zu einem sofortigen Lastabfall mit fortschreitendem Aufspalten des Holzquerschnitts. Ohne die eingeklebten Verstärkungsbleche tritt also ein sprödes Versagen auf.



**Abbildung 41: Versuchsreihe 4V: Versagen des Probekörpers PUR-PUR-GV-03 durch Zugbruch der Stabdübel**

Die Kraft-Verschiebungs-Kurve der Anschlüsse mit einem Bolzen M24 als Verbindungsmittel entsprach angenähert dem Verhalten eines zugbelasteten Stahls, da hier das eingeschlitzte Anschlussblech das schwächste Glied der Verbindung war. Es kommt jedoch im Diagramm zu einer Überlagerung mit der Verschiebung in den Verankerungen und der Deformation des Bolzens. Daher stellt sich der Fließbereich des Anschlussblechs in der Last-Verschiebungs-Kurve nicht deutlich dar, bedingt auch durch die geringe plastische Verformung bis zum Bruch. Das gerissene Anschlussblech ist in Abbildung 42 zu erkennen.



**Abbildung 42: Versuchsreihe 4V: Versagen des Probekörpers PUR-PUR-GV-B-02 durch Zugbruch des eingeschlitzten Anschlussblechs**

Die Vorversuche mit verschiedenen Anschlusstypen an Kleinproben zeigen die Abhängigkeit des Tragverhaltens der Anschlüsse von den verwendeten Klebstoffen, Blechgeometrien und Verbindungsmitteln. Das Versagen trat in unterschiedlichen Elementen der Anschlüsse auf. Bei unverstärkten Anschlüssen trat der Bruch im Holzquerschnitt durch Aufspalten auf. Die eingeklebten Verstärkungsbleche konnten diese Versagensart weitgehend ausschließen. Dies gilt mit gewissen Einschränkungen sogar für stark reduzierte Achsabstände der Verbindungsmittel (Stabdübel). Bei den Stabdübelverbindungen trat zunächst eine Biegeverformung und im Folgenden teilweise ein Zugversagen auf. Das Tragverhalten der Verbindung entspricht somit dem elastisch-plastischen Tragverhalten des Stahls. Gleiches gilt auch für die Bolzenanschlüsse, wo das eingeschlitzte Anschlussblech das schwächste Glied der Verbindung darstellte. Da das Anschlussblech zugbelastet ist, trat jedoch keine so ausgeprägte plastische Deformation wie bei den Stabdübelanschlüssen auf. Ein Stahlversagen ist vorteilhaft, da es ein duktileres Tragverhalten des Anschlusses bewirkt und die Stahlfestigkeit sehr geringen Streuungen unterworfen ist. Demgegenüber treten bei der Festigkeit des Holzes und der Klebefuge deutlich größere Schwankungen und auch eine zeit- und klimaabhängige Abnahme auf. Das Versagen der Klebefuge, wie bei den einseitig mit MUF-Klebstoff verklebten Verstärkungsblechen, sollte als Versagensart in der Praxis vermieden werden, da der Bruch dabei ohne Vorankündigung auftritt. Bei Nutzung von MUF-Klebstoff in der automatischen Beileimung bei der Brettschichtholzherstellung sollte daher eine Vorbehandlung der Bleche mit einem Primer erfolgen, um die Festigkeit der Klebefuge zu erhöhen.

### 3.5.2 Versuchsreihe 4A

Die Versuchsreihe 4A umfasste Zuganschlüsse an Brettschichtholzstäben mit quadratischem Querschnitt 16/16 cm. Die Randbedingungen bei der Herstellung der Probekörper im Werk des Projektpartners Hüttemann in sind unter Arbeitspaket 3 detailliert dargestellt.

Die Probekörper besaßen eine Länge von 1,50 m. An einen Ende wurde ein Zuganschluss mit jeweils zwei eingeschlizten Lasteinleitungsblechen hergestellt. In den aus vier 40 mm dicken Holzlamellen bestehenden Querschnitten waren in den drei Fugen jeweils zwei Stahlbleche mit den Abmessungen 500 x 60 x 2,5 mm eingeklebt. Aufgrund der Ergebnisse der Quell-/Schwindversuche im Arbeitspaket 1, Versuchsreihe 1B wurden zwei 60 mm breite Bleche anstelle eines 120 mm breiten Blechs verwendet, um die Zwängungsspannungen zwischen Blech und Holz quer zur Faserrichtung möglichst gering zu halten. Entsprechende Empfehlungen sind auch aus den Untersuchungen von Granholm [5] bekannt. Die Aufteilung in zwei parallele, schmale Blechstreifen reduziert außerdem den Einfluss möglicher geometrischer Imperfektionen der Bleche durch Verkrümmung oder Verwölbung. Die genaue Geometrie der Probekörper ist in den Werkplänen im Anhang dargestellt.

Es kamen die nach Versuchsreihe 1A besonders leistungsfähigen und nach den Untersuchungen des Arbeitspakets 3 als besonders gut für die Integration in den Produktionsprozess geeigneten Blech-Klebstoff-Kombinationen zum Einsatz. Die erste Kombination bestand aus galvanisch verzinkten Blechen mit Jowat® Primer Typ 409.12, die unterseitig mit dem 1K-PUR-Klebstoff (Jowapur® 686.60) und oberseitig mit MUF-Klebstoff (Kauramin® Leim 690 flüssig mit Kauramin® Härter 1690 flüssig im Mischungsverhältnis 100:20) eingeklebt wurden. Bei der zweiten Kombination wurden rohe gestrahlte Bleche unterseitig mit 2K-EP-Klebstoff (Jowat® 692.30) verklebt. Oberseitig erfolgte ein dünner Auftrag des Epoxidharzes als Primer und anschließend eine Verklebung mit MUF-Klebstoff (wie bei Typ PUR-GVP).

Die Krafteinleitung in die Brettschichtholzzugstäbe erfolgte über zwei unterschiedliche Anschlussvarianten. Bei der ersten Variante wurden zwei eingeschlizten Anschlussbleche mit einem Querschnitt 120 x 6 mm über 12 selbstbohrende Stabdübel Typ SFS WS-T 7x173 mit dem durch die eingeklebten Bleche verstärkten Ende des Brettschichtholzquerschnitts verbunden. In der zweiten Variante waren zwei eingeschlitzte Anschlussbleche mit einem Querschnitt 120 x 12 mm über vier Bolzen mit 20 mm Durchmesser an den Brettschichtholzquerschnitt angeschlossen. Eine Übersicht der geprüften Anschlusstypen in Tabelle 19 gegeben.

**Tabelle 19: Versuchsreihe 4A: Blech-, Klebstoff und Anschlusskonfigurationen der Zugversuche**

Verbindungsmittel	Blech	Klebstoff	Anzahl
12 x WS-T 7x173	GVP	PUR-MUF	2 Proben
12 x WS-T 7x173	RG	EP-MUF	2 Proben
4 x M20	GVP	PUR-MUF	2 Proben
4 x M20	RG	EP-MUF	2 Proben

Bei beiden Anschlusstypen wurden die Anschlussbleche über einen Bolzen mit einem stählernem Anschlussblock verschraubt, der in die Spannbacken der Prüfmaschine eingespannt war. Durch den Bolzen war in einer Achse eine gelenkige Lagerung der Proben gegeben. Der Probekörper war so in die Prüfmaschine eingebaut, dass der zu prüfende Anschluss unten lag und somit während des

Versuchs gut zu beobachten war. Die untere Verankerung in der Prüfmaschine ist in Abbildung 43 zu erkennen.



Abbildung 43: Versuchsreihe 4A: untere Verankerung der Probekörper

Am nicht mit eingeklebten Blechen bewehrten Holzende erfolgte die Verankerung der Probekörper mit unter einem Winkel von  $45^\circ$  geneigten Vollgewindeschrauben (Typ SPAX<sup>®</sup>-S). Je Seite kamen 15 Schrauben (3 x 5) mit 10 mm Gewindedurchmesser zum Einsatz, die die Zugkraft über einen speziellen Verankerungsklotz in zwei außenliegende Bleche einleiteten. Die Einspannung in die Prüfmaschine erfolgte auch hier über einen Anschlussblock und einen Stahlstab mit Kalottenlager, sodass ein gelenkiger Anschluss der Probekörper erzielt wurde. Abbildung 44 zeigt die Konstruktion des Anschlusses.

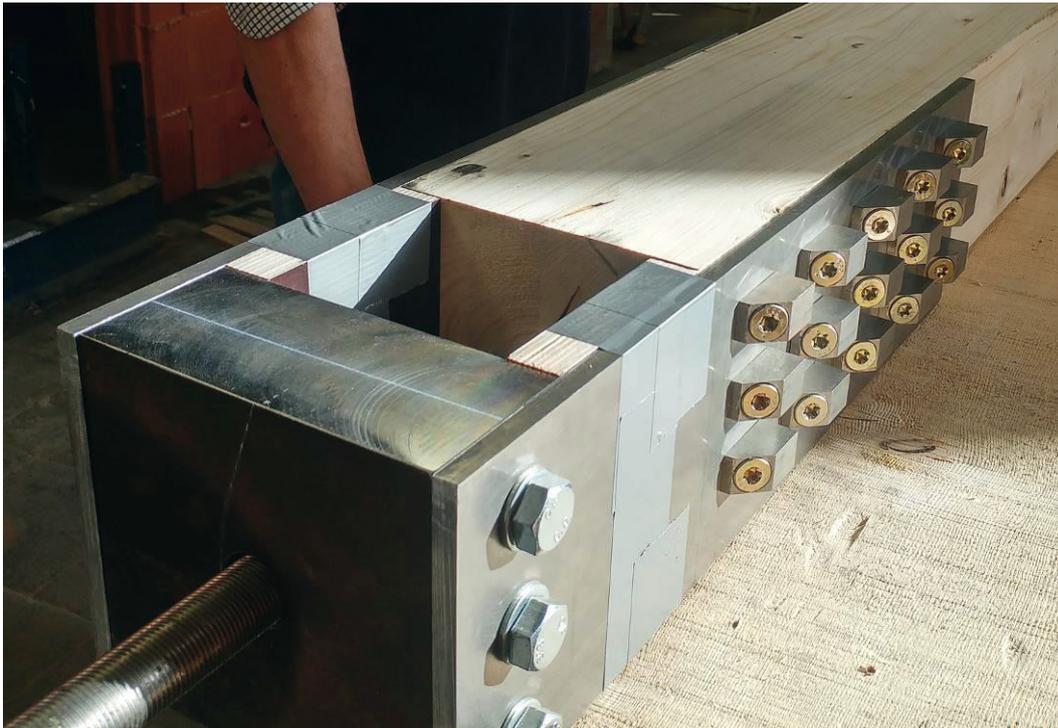


Abbildung 44: Versuchsreihe 4A: obere Verankerung der Probekörper mit Vollgewindeschrauben

Die Verschiebung der Anschlussbleche gegenüber dem Holzquerschnitt wurde mit vier induktiven Wegaufnehmern gemessen. Die Halterungen der Wegaufnehmer waren auf die eingeschlitzten Anschlussbleche geklebt und maßen gegen Metallwinkel, die seitlich am Holz aufgeschraubt waren (siehe Abbildung 43).

Die Belastung erfolgte weggesteuert mit einem Kolbenvorschub von 1 mm/min. Lediglich beim ersten geprüften Probekörper EP-B-1 betrug die Geschwindigkeit nur 0,5 mm/min. Nach Erreichen der Maximallast wurde die Vorschubgeschwindigkeit auf 5 mm/min erhöht.

Die Kraft-Verschiebungs-Diagramme der Bolzenanschlüsse sind in Abbildung 45 dargestellt. Beim zuerst geprüften Probekörper EP-B-1 erkennt man zunächst einen sehr steilen Lastanstieg bis etwa 50 kN, dem ein horizontaler Kurvenbereich mit etwa gleich bleibender Last und einem Verschiebungszuwachs von ca. 1 mm folgt. Ursache ist hier das sehr feste Anziehen der Bolzen vor Versuchsbeginn. Bis zu einer Last von 50 kN wurde die Kraft im Anschluss durch Reibung zwischen den eingeschlitzten Anschlussblechen und der Holzoberfläche übertragen. Nach Überschreiten der Reibung rutschten die Bleche mit rhythmischer Geräusentwicklung durch, bis der Kontakt zwischen den Bohrungen und den Bolzen hergestellt war. Für die weiteren Versuche wurden die Bolzen nur leicht festgedreht, sodass der Schlupf bereits beim Einbau oder bei sehr geringer Last aus der Verbindung gezogen wurde.

Es folgte ein steiler Lastanstieg mit geringen Verformungen bis zum Erreichen der Bruchlast. Die Verschiebungssteifigkeit im elastischen Bereich, hier als Sekantenmodul zwischen 100 kN und 120 kN ermittelt, betrug dabei über alle Probekörper gemittelt 289,6 kN/mm mit dem geringsten Wert bei Probe EP-B-1 (191,4 kN/mm) und dem höchsten bei Probe PUR-B-1 (347,8 kN/mm). Bereits vor dem Erreichen der maximalen Last traten teilweise lokale Rissbildungen auf, die sich durch Stufen in den Last-Verschiebungs-Kurven zeigen. Die sichtbaren Risse bildeten sich meist in

den äußeren Holzlamellen in Achse der Bolzen. Durch die Klemmwirkung der Bolzen traten kaum Risse an den Enden der eingefrästen Schlitzte auf, die zu einem Delaminieren des Holzquerschnitts und einem Herausziehen der eingeklebten Stahlbleche führen könnten.

#### VR 4A: Kraft-Verschiebungs-Diagramm Bolzenanschlüsse

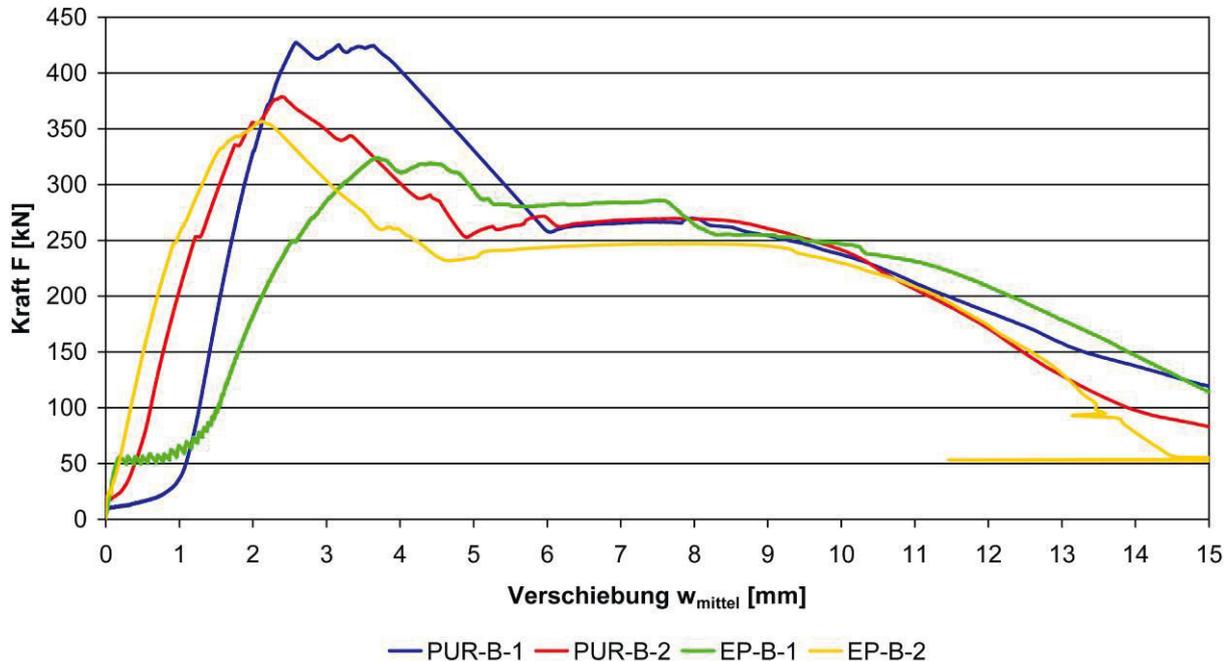


Abbildung 45: Versuchsreihe 4A: Kraft-Verschiebungs-Kurven der Zuganschlüsse mit Bolzenverbindung

Bei allen Probekörpern ging das Versagen vom Holzquerschnitt zwischen den eingeschlitzten Anschlussblechen aus. Dabei traten im mittleren eingeklebten Blech im Bereich der Lochschwächungen bei Erreichen der Streckgrenze plastische Deformationen auf. In der Folge kam es zu einer verstärkten Lasteinleitung in den das Blech umgebenden Holzquerschnitt, der schließlich durch ein mehr oder weniger ausgeprägtes Blockscher-versagen riss. Dabei wurde auch das eingeklebte Blech abgerissen. Gegenüber den Kleinproben der Versuchsreihe 4V erfolgte trotz lokalen Fließens der eingeklebten Bleche weder ein Versagen der Klebefuge noch eine Delamination des Holzes im blechnahen Bereich. In Abbildung 46 ist ein typisches Bruchbild des Bolzenanschlusses dargestellt. Gut zu erkennen sind das Blockscher-versagen und die abgerissenen eingeklebten Stahlbleche im Holzquerschnitt.



Abbildung 46: Versuchsreihe 4A: Bruchbild Probe PUR-B-1

Die mit Stabdübeln hergestellten Anschlüsse zeigten erwartungsgemäß ein von den Bolzenverbindungen abweichendes Last-Verformungs-Verhalten. Die Kraft-Verschiebungs-Kurven der geprüften Probekörper zeigt Abbildung 47. Am Anfang der Belastung trat nur ein minimaler Schlupf auf, der im geringfügig größeren Durchmesser der Bohrspitze der Stabdübel gegenüber dem eigentlichen Dübelschaft begründet liegt. Es folgte ein steiler Lastanstieg mit einer mittleren Verschiebungssteifigkeit von 277,9 kN/mm, auch hier als Sekantenmodul zwischen 100 kN und 120 kN Last ermittelt. Die Verschiebungssteifigkeit im elastischen Bereich ist somit etwas geringer als bei den Bolzenanschlüssen.

#### VR 4A: Kraft-Verschiebungs-Diagramm Stabdübelanschlüsse

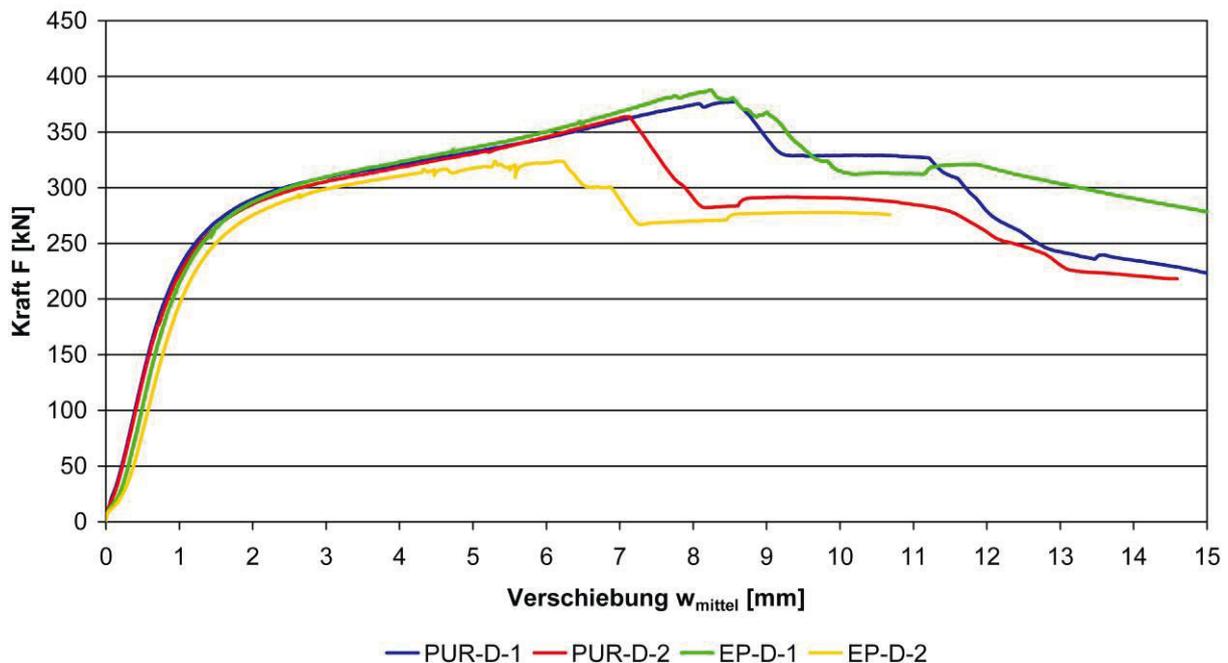


Abbildung 47: Versuchsreihe 4A: Kraft-Verschiebungs-Kurven der Zuganschlüsse mit Stabdübelverbindung

Bei einer Kraft von etwa 250 kN wurde das Fließmoment der Stabdübel erreicht und die Steigung der Kraft-Verschiebungskurven nahm stark ab. Im folgenden Fließbereich der Stabdübel betrug die mittlere Verschiebungssteifigkeit nur noch 12,6 kN/mm, ermittelt als Sekantenmodul zwischen 310 kN und 315 kN. Da die Stabdübel keine Klemmwirkung wie die Bolzen hatten, bildeten sich in dieser Belastungsphase am Ende der eingeschnittenen Schlitze teilweise Längsrisse aus. Mit zunehmender Deformation der Stabdübel verstärkte sich dieser Effekt, da die verformten Dübel eine gewisse Spreizwirkung entfalten. Durch die Verformung im Inneren des Zugstabs wurden die Enden der Stabdübel in den Querschnitt hineingezogen.

Das Versagen wurde auch hier durch das Fließen der eingeklebten Stahlbleche im Bereich der Lochschwächungen an der innersten Dübelreihe ausgelöst. Es folgte ein Blockscherversagen des Holzquerschnitts zwischen den eingeschlitzten Anschlussblechen. Dabei wurden auch hier die eingeklebten Bleche abgerissen, ohne dass ein Versagen der Klebefuge auftrat. In Gegensatz zu den Bolzenanschlüssen bildeten sich jedoch teilweise lange Längsrisse an den Schlitzen für die Anschlussbleche aus. Bei den geprüften Probekörpern hatten diese Risse jedoch offenbar keinen wesentlichen Einfluss auf das Versagen der Probekörper. Exemplarisch ist das charakteristische Bruchbild der Probe PUR-D-1 in Abbildung 48 gezeigt.

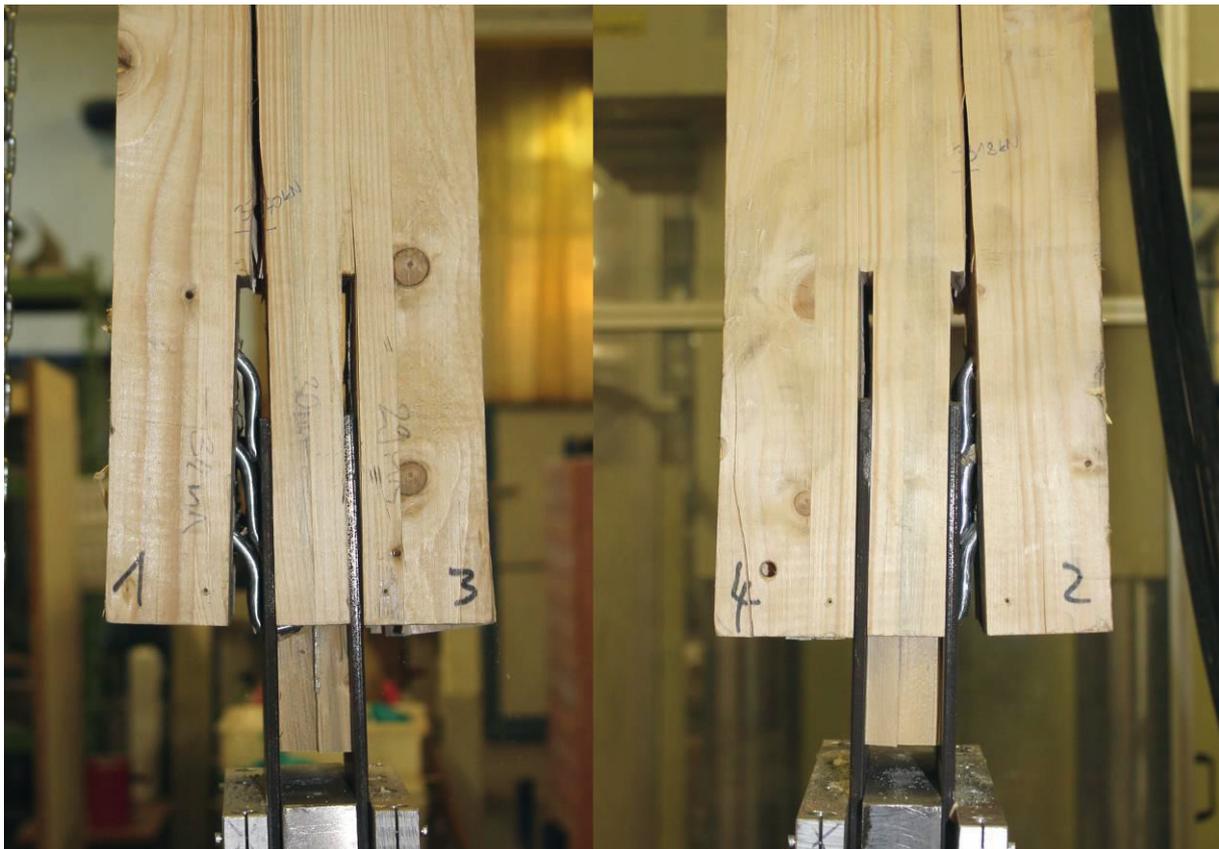


Abbildung 48: Versuchsreihe 4A: Bruchbild Probe PUR-D-1

Tabelle 20 zeigt die Auswertung der Bruchlasten und Verschiebungssteifigkeiten der Zuganschlüsse. Die höchste Bruchlast erreichte mit 427,4 kN der Probekörper PUR-B-1, die niedrigste mit 323,8 kN der Probekörper EP-D-2. Der Mittelwert der Bruchlasten der Bolzenanschlüsse lag bei 371,8 kN und somit etwas über dem Mittelwert der Stabdübelanschlüsse mit 363,3 kN. Die mit Polyurethanklebstoff verklebten Proben erreichten höhere Bruchlasten als die mit Epoxidharzklebstoff

verklebten Proben. Aufgrund der geringen Probenanzahl von zwei Probekörpern je Blech-Klebstoff- und Verbindungsmittelkombination sind diese beiden Feststellungen statistisch nicht ausreichend zu belegen.

**Tabelle 20: Versuchsreihe 4A: Bruchlasten und zugehörige Verschiebungen sowie Verschiebungssteifigkeiten der Zuganschlüsse**

Probe	max F [kN]	zug $w_{\text{mittel}}$ [mm]	$C_{100-120}$ [kN/mm]
EP-B-1	324,2	3,66	191,39
EP-B-2	356,6	2,11	303,03
<i>EP-B-m</i>	<i>340,4</i>	<i>2,9</i>	<i>247,2</i>
PUR-B-1	427,4	2,58	347,83
PUR-B-2	378,8	2,39	316,21
<i>PUR-B-m</i>	<i>403,1</i>	<i>2,5</i>	<i>332,0</i>
<b>B-m</b>	<b>371,8</b>	<b>2,7</b>	<b>289,6</b>
EP-D-1	387,8	8,25	281,69
EP-D-2	323,8	6,15	260,59
<i>EP-D-m</i>	<i>355,8</i>	<i>7,2</i>	<i>271,1</i>
PUR-D-1	377,6	8,57	286,74
PUR-D-2	364,0	7,08	282,69
<i>PUR-D-m</i>	<i>370,8</i>	<i>7,8</i>	<i>284,7</i>
<b>D-m</b>	<b>363,3</b>	<b>7,5</b>	<b>277,9</b>

Die geprüften Zuganschlüsse mit ‚ab initio‘ eingeklebten Stahlblechen erreichten somit eine mittlere Bruchlast, die etwa 86 % der charakteristischen Tragfähigkeit des reinen Brettschichtholzquerschnitts (16/16 cm, GL 24h,  $F_{Rk} = 422,4$  kN) entspricht. Durch das Stahlversagen des mittleren eingeklebten Blechs war bei den untersuchten Probekörpern ein definierter und rechnerisch zu erfassender Versagensmodus gegeben. Im Kurzzeitversuch war eine ausreichende Sicherheit gegen ein Versagen der Klebefuge gegeben. Durch die Wahl der Verbindungsmittel lässt sich das Tragverhalten des Anschlusses anpassen. Während die sehr steifen Bolzen M20 ein elastisches Verhalten mit sprödem Bruch bewirken, bildet sich bei den biegeweicheren Stabdübeln ein elastisch-plastisches Tragverhalten aus, bei dem der Bruch durch anwachsende Deformationen des Anschlusses angekündigt wird.

Die Tragfähigkeit der Anschlüsse lässt sich durch die Erhöhung der Dicke oder der Festigkeit der eingeklebten Bleche noch weiter steigern. Dabei wird jedoch ab einer gewissen Blechdicke bzw. Festigkeit wieder das Versagen der Klebefuge oder das blechnahe Schubversagen des Holzes als Versagensmodus maßgeblich werden. Bei einer Erhöhung der Stahlfestigkeit müssen die Verbindungsmittel zwingend vorgebohrt werden, da die selbstbohrenden Stabdübel bei Festigkeiten über S 235 nicht mehr zuverlässig eingesetzt werden können. Allerdings war bei der geprüften Anschlussgeometrie mit 3 x 2,5 mm und 2 x 6 mm zu durchbohrendem Blech bereits die Grenze der Anwendbarkeit erreicht (laut Hersteller 1 x 10 mm oder 3 x 5 mm).

### 3.5.3 Versuchsreihe 4B

In Versuchsreihe 4B wurden biegebeanspruchte Trägerstöße im Vierpunktbiegeversuch nach DIN EN 408 geprüft. Die Stützweite betrug 5,76 m und der Querschnitt der Biegeträger 16/32 cm. Für diese Randbedingungen lagen aus den am Lehrstuhl für Tragkonstruktionen durchgeführten Forschungsprojekten mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben Referenzwerte für die Bruchlasten bzw. Biegefestigkeiten von Brettschichtholzträgern der Festigkeitsklasse GL 24h vor und es konnte auf einen erprobten Versuchsaufbau zurückgegriffen werden. Die Gesamtlänge der Probekörper betrug 6,10 m und wurde mittels der zu prüfenden Verbindung aus zwei 3,05 m langen Einzelquerschnitten zusammengesetzt. Abbildung 49 zeigt den Versuchsaufbau beispielhaft für Probe PUR-D-2 nach Belastungsende.

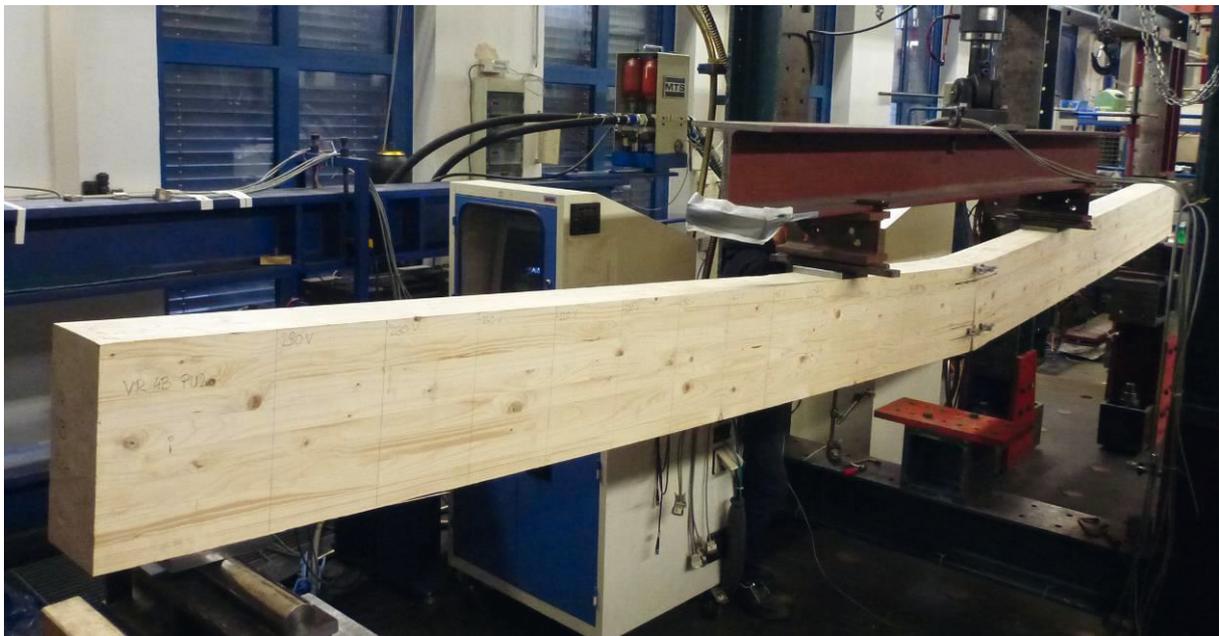


Abbildung 49: Versuchsreihe 4B: Übersicht Versuchsaufbau

Es kamen zwei Anschlussstypen zum Einsatz. Die erste Anschlussvariante wurde mit eingeschlitzten Verbindungsblechen und selbstbohrenden Stabdübeln, Typ SFS WS-T 7x153 hergestellt. Die Stabdübel wurden sowohl von der Ober- als auch von der Unterseite des Querschnitts eingebohrt und endeten im Querschnittsinneren hinter dem innersten eingeklebten Stahlblech. Je Verbindungsseite kamen auf der Trägerober- und Unterseite 12 Stabdübel zum Einsatz, d. h. 48 Stück für den gesamten biegesteifen Stoß. Auf der Zugseite des Querschnitts waren in die drei äußersten Lamellenfugen jeweils zwei Stahlbleche der Güte S 235 mit den Abmessungen 600 x 60 x 2,5 mm eingeklebt. Wie bei Versuchsreihe 4A kamen beidseitig mit Jowat Primer Typ 409.12 vorbehandelte, galvanisch verzinkte Bleche in Kombination mit Polyurethanklebstoff Jowapur® 686.60 bzw. rohe gestrahlte Bleche mit Epoxidharzklebstoff Jowat® 692.30, der einseitig als Primer aufgetragen wurde. Oberseitig erfolgte jeweils die Verklebung mit MUF-Klebstoff. Die Verbindungsbleche lagen mittig zwischen den eingeklebten Blechen und waren jeweils 200 mm in den Holzquerschnitt eingeschlitzt. Die Abmessungen der Bleche betrug 400 x 120 x 6 mm. Es wurden warmgewalzte Bleche der Stahlgüte S 235 ohne weitere Bearbeitung verwendet. Für die baupraktische Anwendung sollte ein geeigneter Korrosionsschutz z. B. durch Verzinken hergestellt werden. Auf der

Zugseite des Querschnitts waren zwei, auf der Druckseite ein Verbindungsblech angeordnet. Die geometrische Anordnung der Stabdübel entsprach den Zuganschlüssen der Versuchsreihe 4A. Je Blech-Klebstoff-Kombination wurden zwei Probekörper geprüft. Die genaue Geometrie der Probekörper ist im Anhang dargestellt.

Der zweite Verbindungstyp war ein Stoß mit außenliegenden Blechen und durchgehenden Bolzen M20 als Verbindungsmittel, jeweils mit der Stahlfestigkeit S 235. Die Verbindungsbleche hatten die Abmessungen 400 x 120 x 12 mm und waren im walzrauen Zustand. Für den Korrosionsschutz in der Praxis gelten die obigen Anmerkungen. Die Löcher für die Bolzen wurden sowohl im Brettschichtholzquerschnitt, als auch in den Verbindungsblechen mit einem Durchmesser von 21 mm auf einer Ständerbohrmaschine vorgebohrt. Je Anschlussseite wurden vier Bolzen angeordnet. Die in den Trägerquerschnitt eingeklebten Bleche und die verwendeten Klebstoffe und Primer waren identisch zur Anschlussvariante mit Stabdübeln. Es wurde jedoch nur ein Probekörper je Blech-Klebstoff-Kombination hergestellt. Die Werkpläne der Probekörper sind im Anhang enthalten. Eine Übersicht der geprüften Anschlusstypen zeigt Tabelle 21.

**Tabelle 21: Versuchsreihe 4B: Blech-, Klebstoff und Anschlusskonfigurationen der Biegeversuche**

Verbindungsmittel	Blech	Klebstoff	Anzahl
12 x WS-T 7x173 je Seite	GVP	PUR-MUF	2 Proben
12 x WS-T 7x173 je Seite	RG	EP-MUF	2 Proben
4 x M20 je Seite	GVP	PUR-MUF	1 Probe
4 x M20 je Seite	RG	EP-MUF	1 Probe

Bei Versuch wurden die Balken in den Drittelpunkten über eine gelenkig gelagerte Traverse gleichmäßig auf der Oberseite belastet. Die Belastung erfolgte weggesteuert mit einem Kolbenvorschub von 5 mm/min. Neben der Kolbenkraft wurde der Kolbenweg aufgezeichnet, der somit der mittleren Verformung in den Drittelpunkten entspricht. Die vertikale Verformung in Trägermitte wurde über zwei induktive Wegaufnehmer mit 20 mm Messweg aufgezeichnet. Da die Gesamtverformung bis zum Bruch deutlich mehr als 20 mm betrug, wurde kurz vor Erreichen des Messbereichsendes der Kolbenvorschub kurz gestoppt und die Wegaufnehmer auf den Anfang des Messbereichs zurückgeschoben. Anschließend wurde der Kolbenvorschub fortgesetzt. Bei hohen Lasten im Bereich der plastischen Verformung des Anschlusses ging die Last durch Relaxation und Fließen im Anschluss während des Nachjustierens der Wegaufnehmer jeweils leicht zurück. Die Unterbrechungen des Kolbenvorschubs bedingen also gegenüber einem kontinuierlichen Vorschub ein minimal stärkeres Fließen der Verbindung und eine minimal geringere Bruchlast. Neben der vertikalen Verformung wurden auch die gegenseitigen horizontalen Verschiebungen der Ränder der Stoßfuge mittels induktiver Wegaufnehmer gemessen. Die Anordnung dieser Wegaufnehmer erfolgte bei den Stabdübelverbindungen in Höhe des Schwerpunkts der eingeklebten Bleche auf der Zugseite (80 mm oberhalb der Trägerunterkante) und bei den Bolzenverbindungen 20 mm oberhalb der Trägerunterkante sowie bei beiden Varianten auf der Druckseite 20 mm unterhalb der Trägeroberkante. Die Wegaufnehmer waren auf beiden Seiten des Querschnitts angebracht. Die Messeinrichtungen am biegesteifen Trägerstoß sind in Abbildung 50 zu erkennen.



Abbildung 50: Versuchsreihe 4B: Anordnung Wegaufnehmer am Stoß

Die Last-Verformungs-Kurven der biegesteifen Trägerstöße mit Stabdübelverbindung sind in Abbildung 51 dargestellt. Da die Wegaufnehmer in Trägermitte vor Erreichen der Bruchlast entfernt werden mussten, um Beschädigungen beim Bruch zu vermeiden, ist im Diagramm die Kraft über den Kolbenweg dargestellt. Die Verformungen in Trägermitte betragen ca. 15 mm bis 20 mm mehr als der zugehörige Kolbenweg. Zunächst erfolgte ein vollständiges Zusammendrücken der Stoßfuge auf der Trägeroberseite. Sobald der Druckkontakt (bei einer Last von ca. 5 kN) hergestellt war, erfolgte ein steiler Anstieg der Kraft-Verformungs-Kurven. Dabei begann sich die Stoßfuge auf der zugbelasteten Trägerunterseite langsam zu öffnen. Ab einer Last von 50 kN begannen die Kurven deutlich abzuflachen. Hier trat ein Fließen der Stabdübel im Trägerinneren ein. Bei weiterer Lastzunahme wurde die Steigung der Kurven immer geringer. Der Fließbereich der Verbindung stellt sich in den Kurven jedoch deutlich weniger ausgeprägt dar als bei den Zuganschlüssen in Versuchsreihe 4A. Da durch das Öffnen der Verbindungsfuge an der Trägerunterseite die Druckspannungen auf der Oberseite nur über einen kleinen Querschnittsbereich durch Kontaktpressung übertragen werden konnten, kam es hier nach dem Erreichen der Druckfestigkeit ebenfalls zu plastischen Verformungen durch Stauchung der Holzfasern und Ausbildung von Druckfalten (siehe Abbildung 52). Mit zunehmender Verformung übten die deformierten Stabdübel wie bei den Zugversuchen eine Spreizwirkung im Querschnitt aus, sodass sich vor dem Bruch von den Enden der Schlitze ausgehende Längsrisse bildeten. Die Hebelwirkung der eingeschlitzten Verbindungsbleche verstärkte diesen Effekt. Die Risse führten jedoch zu keiner größeren Delamination des Querschnitts oder der Verklebung der Verstärkungsbleche. Nach dem Erreichen der Bruchlast war ein stufenweiser Lastabfall auf etwa 75 % der Maximalkraft zu beobachten. Dieses Lastniveau wurde bei minimalem Lastabfall noch bis zur doppelten Bruchverformung gehalten, worauf die Versuche beendet wurden.

## VR 4B: Biegesteifer Trägerstoß mit Stabdübelanschluss

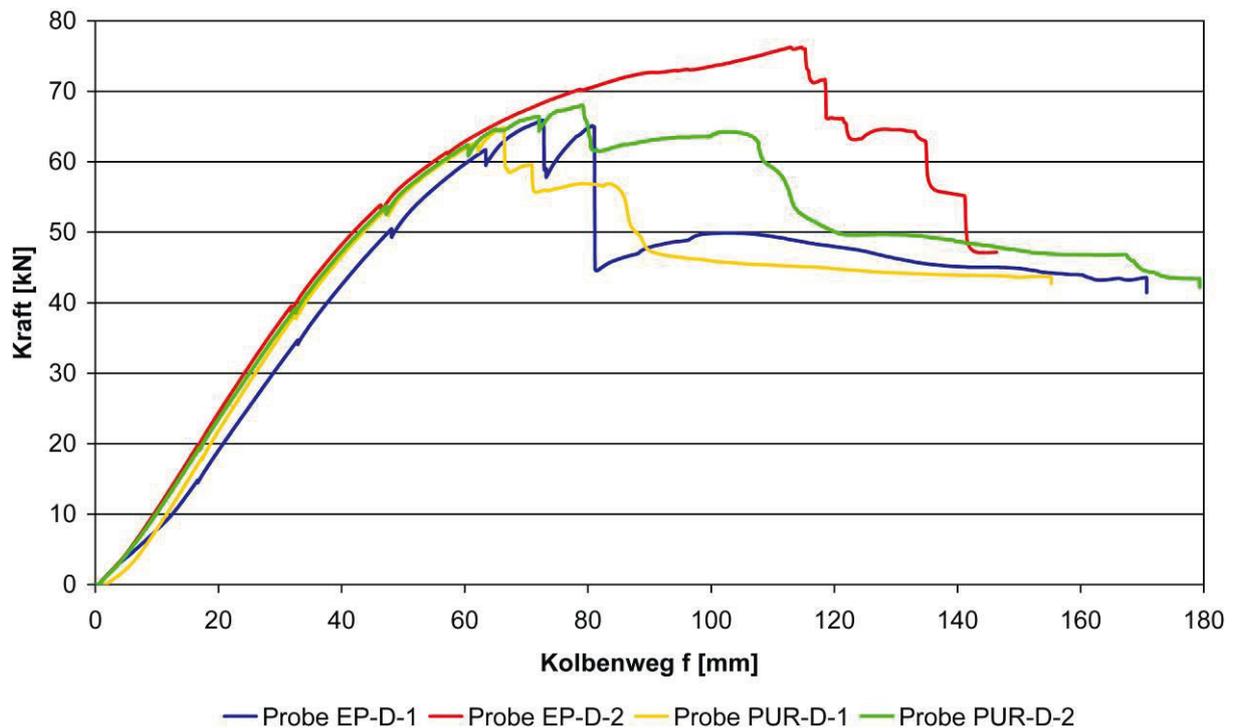


Abbildung 51: Versuchsreihe 4B: Biegesteife Trägerstöße mit Stabdübelverbindung, Last-Verformungsdiagramme über Kolbenweg



Abbildung 52: Versuchsreihe 4B: Biegesteife Trägerstöße mit Stabdübelverbindung, Bruchzustand Probekörper PUR-D-2

Der Bruch wurde, vergleichbar den Zuganschlüssen in Versuchsreihe 4A, durch ein Fließen des maximal belasteten eingeklebten Stahlblechs in der zweiten Lamellenfuge von unten ausgelöst. Auch hier kam es zu einer Lastumlagerung vom eingeklebten Blech auf den Holzquerschnitt und in der Folge zu einem Blockscherversagen des Holzquerschnitts zwischen den eingeschlitzten Verbindungsblechen mit gleichzeitigem Zugbruch der eingeklebten Bleche im Bereich der Lochschwächung.

gen. Durch die Lastumlagerung auf die Querschnittsbereiche ober- und unterhalb der Verbindungsbleche war noch eine Resttragfähigkeit von etwa  $\frac{3}{4}$  der maximalen Last vorhanden. Ein charakteristisches Bruchbild mit herausgezogenem Holz-Blech-Querschnitt zwischen den Verbindungsblechen und Druckfalten auf der Trägeroberseite zeigt Abbildung 52.

Die mittlere Bruchlast der Stabdübelverbindung betrug 68,8 kN, was einem Biegemoment von 66,0 kNm entspricht. Als Maximalwert der Bruchlast wurde 76,3 kN (Probe PUR-D-1) gemessen und als Minimalwert 64,9 kN (Probe EP-D-1). Wie bei den Zuganschlüssen erreichten auch hier die mit PUR-Klebstoff hergestellten Probekörper etwas höhere Werte als die mit Epoxidharz geklebten. Die mittlere Rotationssteifigkeit des Anschlusses, ermittelt als Sekantenmodul im elastischen Verformungsbereich zwischen 20 kN und 25 kN, betrug 6112 kNm/rad. Hier lagen die Werte der mit Epoxidharz geklebten Proben etwas höher als bei den mit PUR geklebten.

Der zweite Anschlusstyp mit außenliegenden Verbindungsblechen und Bolzen zeigte ein elastisch-plastisches Tragverhalten. Die Last-Verformungskurven, auch hier über den Kolbenweg angetragen, sind in Abbildung 53 dargestellt. Beim Probekörper EP-B-1 wurde das horizontale Kräftepaar in der Verbindung zunächst durch Reibung zwischen den außenliegenden Blechen und dem Brettschichtholzquerschnitt übertragen. Nach Überschreiten der Reibung kam es zu einem Rutschen der Bleche bis zum Anliegen der Bolzen in den vorgebohrten Löchern. Zur Vermeidung dieses Anfangsschlupfes musste nach dem Einbau der Bolzen eine druckfeste Verfüllung der Fuge mit einem geeigneten Material erfolgen. Alternativ könnte auch mit Passbolzen gearbeitet werden, was jedoch eine sehr hohe Präzision bei der Herstellung der Bohrungen erfordert. Sobald die Bolzen vollen Druckkontakt hatten, erfolgte ein linearer Anstieg der Kraft bis auf 75 % bis 80 % der Bruchlast. Ab diesem Lastniveau traten offenbar plastische Deformationen der Bolzen auf, die mit lokaler Rissbildung im Holz einhergingen. Die Kraft-Verformungs-Kurven verliefen anschließend annähernd horizontal, wobei durch lokale Brüche im Holz wiederholte kurzzeitige Lastabfälle auftraten.

Bei Probekörper PUR-B-1 kam es am Ende des plastischen Verformungsbereichs zu einem sukzessiven Blockscherversagen der unteren Lamellen des Querschnitts. Dabei versagte zunächst die unterste Holzlamelle gefolgt vom eingeklebten Blech in der ersten Fuge, verbunden mit einem Lastabfall. Anschließend nahm die Last jedoch bis zum Erreichen der Bruchlast wieder zu. Dann versagten auch die darüberliegende Holzlamelle und das zweite eingeklebte Blech. Den Bruchzustand zeigt Abbildung 54. Deutlich ist dabei auch die Deformation der Bolzen zu erkennen. Die Bruchlast betrug 57,1 kN, das daraus folgende Bruchmoment 58,2 kN.

## VR 4B: Biegesteifer Trägerstoß mit Bolzenanschluss

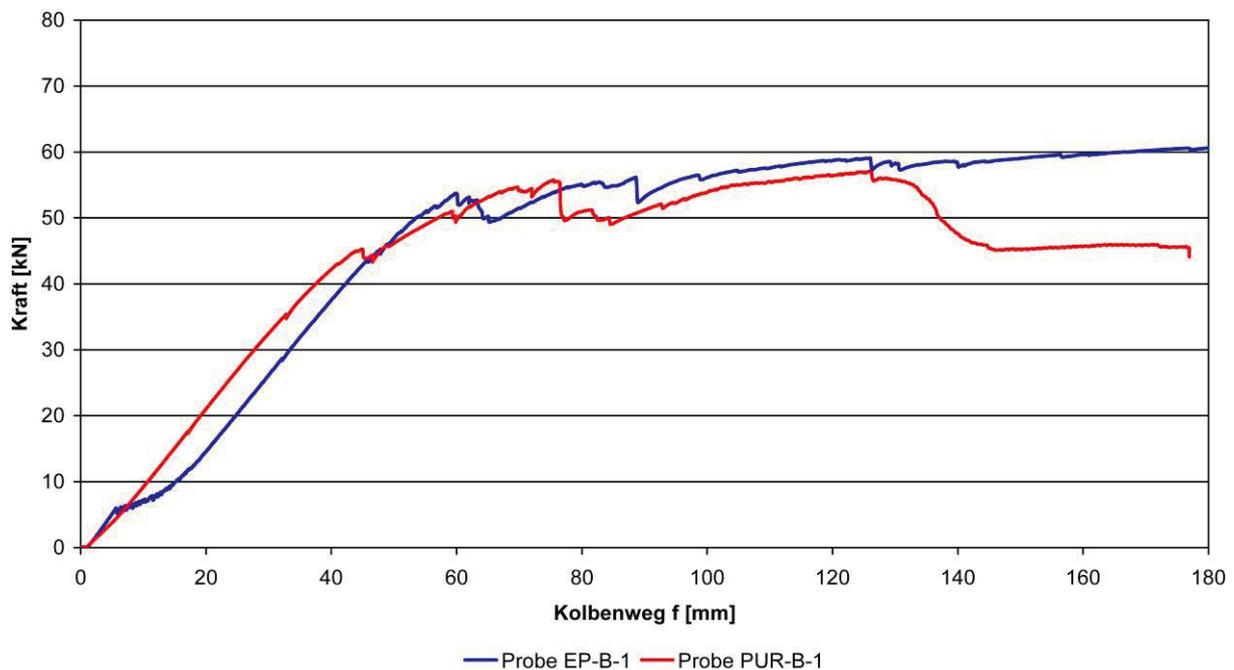


Abbildung 53: Versuchsreihe 4B: Biegesteife Trägerstöße mit Bolzenverbindung, Last-Verformungsdiagramme über Kolbenweg



Abbildung 54: Versuchsreihe 4B: Biegesteife Trägerstöße mit Bolzenverbindung, Bruchzustand Probe PUR-B-1

Beim Probekörper EP-B-1 war bis zum Versuchsende ein kontinuierlicher Lastanstieg zu beobachten. Beim Bruch versagte die unterste Holzlamelle und das darüberliegende eingeklebte Verstärkungsblech, durch Blockscher- bzw. Zugbruch. Die maximale Last betrug 60,6 kN, was einem Biegemoment von 58,2 kNm entspricht. Aus den zwei getesteten Probekörpern ergibt sich eine mittlere Bruchlast von 58,8 kN und ein mittleres Bruchmoment von 56,5 kNm. Die Werte liegen somit um 15 % unter den Mittelwerten der Stabdübelverbindungen. Die mittlere Rotationssteifigkeit der Bolzenanschlüsse war mit 2997 kNm/rad jedoch nur halb so groß wie bei den Stabdübelanschlüssen. Offenbar tritt hier trotz der hohen Biegesteifigkeit der Bolzen aufgrund des großen Abstands von 40 mm zwischen der Trägersoberfläche und dem ersten eingeklebten Stahlblech eine entsprechend große Verformung der Bolzen auf. Eine Optimierung ließe sich hier durch Platzierung der Verbindungsbleche in einer

Ausfräsung erzielen, sodass der Abstand zwischen den außenliegenden und den eingeklebten Blechen reduziert wird.

In Tabelle 22 sind die Bruchlasten, die sich daraus ergebenden Bruchmomente und zugehörigen Verformungen (Kolbenweg) sowie die Rotationssteifigkeiten als Sekantenmodul zwischen 20 kN und 25 kN aufgelistet. Aufgrund der geringen Probenzahl liefern die Versuche nur Anhaltswerte zu den aufnehmbaren Biegemomenten der geprüften biegesteifen Stöße. Besonders zur Ermittlung der Serienstreuung zur Abschätzung einer charakteristischen Tragfähigkeit sind zusätzliche Versuche oder Simulationen erforderlich.

**Tabelle 22: Versuchsreihe 4B: Bruchlasten, Bruchmomente und zugehöriger Kolbenweg der biegesteifen Trägerstöße**

Probe	max F [kN]	max M [kNm]	zug $w_{\text{mittel}}$ [mm]	$C_{20-25}$ [kNm/rad]
EP-D-1	65,92	63,28	72,65	5975,37
EP-D-2	76,27	73,22	112,95	6952,88
<i>EP-D-m</i>	<i>71,10</i>	<i>68,25</i>	<i>92,80</i>	<i>6464,13</i>
PUR-D-1	64,86	62,27	66,31	5883,27
PUR-D-2	67,99	65,27	79,03	5637,51
<i>PUR-D-m</i>	<i>66,43</i>	<i>63,77</i>	<i>72,67</i>	<i>5760,39</i>
<b>D-m</b>	<b>68,76</b>	<b>66,01</b>	<b>82,73</b>	<b>6112,26</b>
EP-B-1	60,61	58,19	179,65	3286,60
PUR-B-1	57,05	54,77	125,91	2707,15
<b>B-m</b>	<b>58,83</b>	<b>56,48</b>	<b>152,78</b>	<b>2996,87</b>

Die entwickelten biegesteifen Trägerstöße mit ‚ab initio‘ eingeklebten Stahlblechen ermöglichen eine hoch tragfähige Fügung von Brettschichtholzbauteilen. Je nach Konstruktion des Anschlusses lässt sich ein ausgeprägt elastisch-plastisches Tragverhalten erzielen. Dafür stehen unterschiedlich steife Verbindungsmittel wie Stabdübel oder Bolzen zur Verfügung. Bei den geprüften Probekörpern trat kein Versagen in der Klebefuge oder Delamination des Holzquerschnitts auf. Die Gesamttragfähigkeit der Anschlüsse war durch die Tragfähigkeiten der eingeklebten Bleche und der Verbindungsmittel bestimmt und lässt sich somit gut rechnerisch erfassen. Die mittlere Bruchlast der untersuchten Stabdübelverbindung betrug 74 % der mittleren Bruchlast eines ungestoßenen Referenzträgers gleicher Abmessung und Festigkeit (Versuchsreihe 1 aus [6]). Betrachtet man jedoch das rechnerische charakteristische Bruchmoment des Brettschichtholzes GL 24h von 65,54 kNm, so liegt der Mittelwert der Stabdübelstöße mit 66,01 kNm sogar darüber. Die Bolzenverbindungen erreichten im Mittel 86 % der charakteristischen Tragfähigkeit des ungestoßenen Brettschichtholzträgers.

Durch die Verstärkung der eingeklebten Bleche lässt sich die Tragfähigkeit der Verbindungen nochmals steigern, bis wieder die Tragfähigkeit der Verklebung für das Versagen maßgeblich wird (vgl. Kleinproben VR 4V). Hierzu sollten noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um die maximale Leistungsfähigkeit von Verbindungen mit ‚ab initio‘ eingeklebten Blechen auszuloten.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Versuche belegen die Anwendbarkeit von ‚ab initio‘ im Herstellungsprozess des Brettschichtholzes eingeklebten Stahlblechen als Verstärkungselemente und zur Herstellung leistungsfähiger Verbindungen.

Die vom Projektpartner Jowat SE zur Verfügung gestellten Klebstoffe (PUR, EP, EPI) zeigten bei der Stahlblech-Holz-Verklebung gute Verarbeitungseigenschaften und Tragfähigkeiten. Die beste Adhäsion wurde bei rohen gestrahlten Blechen aus Baustahl S235 erreicht. Bei verzinkten Blechen zeigte die galvanisch verzinkte Variante bessere Tragfähigkeiten der Klebefugen als die bandverzinkte. Durch Erhöhung der Rauigkeit der Blechoberflächen konnte beim galvanisch verzinkten Blech in Verbindung mit dem PUR-Klebstoff eine Verbesserung der Tragfähigkeit erzielt werden. Der Polyurethanklebstoff und der Epoxidharzklebstoff erreichten in den Kurzzeitversuchen beide vergleichbar hohe Tragfähigkeiten; der EPI-Klebstoff lag teilweise leicht darunter (außer bei Vorbehandlung der Bleche mit einem Primer). Der für die Brettschichtholzverklebung verwendete Melamin-Harnstoff-Formaldehydharzklebstoff (MUF) zeigte erwartungsgemäß eine schlechte Adhäsion auf den verschiedenen Blechoberflächen. Durch Beschichtung der Bleche mit dem Epoxidharzklebstoff oder einem Primer der Firma Jowat konnte die Tragfähigkeit der MUF-Klebefuge verbessert werden. Insbesondere bei einer Vorbehandlung mit dem Jowat Primer zeigten die MUF-Verklebungen im Kurzzeitversuch eine gute Adhäsion, sodass auch hier das Versagen überwiegend im Holzquerschnitt auftrat. Dennoch ist die Festigkeit der MUF-Fuge noch geringer als die mit den Polyadditionsklebstoffen (PUR und EP) erreichten Festigkeiten.

In den Ausziehversuchen an eingeklebten Blechen zeigte sich auch der große Einfluss von Spannungsspitzen auf die mittlere Verbundfestigkeit der Klebefuge. Beim verwendeten Versuchsaufbau, bei dem die Zugkraft auf ein aus dem Holzprobekörper herausstehendes Stahlblech aufgebracht wurde, ließen sich durch Erhöhung der Einbindelänge der Bleche im Holz nur geringfügig größere Bruchlasten erzielen. Maßgeblich für das Versagen waren die am Probekörpertrand auftretenden Spitzenspannungen. Ein Adhäsions- oder Holzbruch setzte sich von dort aus unverzüglich bis zum eingeklebten Blechende fort. Für die Konstruktion von Anschlüssen und Verbindungen mit ‚ab initio‘ eingeklebten Stahlblechen ergibt sich daraus die Forderung nach einer möglichst gleichmäßig über eine größere Fläche verteilten Lasteinleitung, um die Ausbildung von Spannungsspitzen zu vermeiden. Die entwickelten Stabdübelanschlüsse erfüllen diese Anforderung. Auch bei den Bolzenanschlüssen mit relativ konzentrierter Lasteinleitung konnte kein von Spannungsspitzen ausgelöstes Versagen beobachtet werden. Spezielle geometrische Ausbildungen der Blechenden mit Lochungen oder Zahnungen ergaben im Versuch zunächst keine Verbesserung der Traglast. Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen sinnvoll, um die Anschlussgeometrie zu optimieren.

Die durchgeführten Versuche mit wiederholter Durchfeuchtung und Austrocknung zeigen Probleme durch Zwängungsspannungen aus dem Quellen und Schwinden (bzw. „Arbeiten“) des Holzes auf, die bereits nach wenigen Zyklen zur Zerstörung der Klebefuge (Adhäsion) führen. Ohne zusätzliche Temperatureinwirkung besaßen die Kombinationen aus galvanisch verzinkten Blechen und PUR-Klebstoff, vor allem in Verbindung mit dem Jowat Primer die beste Beständigkeit. Auch der Epoxidharz-

klebstoff in Kombination mit rohen gestrahlten Blechen widerstand der Wechselbelastung relativ gut. Schwachpunkte waren auch hier die MUF-Verklebungen. Bei Einwirkung höherer Temperaturen zeigte sich jedoch eine deutliche reduzierte Beständigkeit der Verklebungen. Durch eine Heisswasserlagerung bei 100 °C nach DIN EN 302-1, Behandlungsart A5 wurden alle geprüften Probekörper zerstört. Daher konnte keine Restfestigkeit der Verklebungen ermittelt werden. Die Temperaturbeständigkeit der Klebstoffe sollte daher noch einmal mit einem anderen Versuchsaufbau untersucht werden. Gegebenenfalls muss dazu die Probekörpergröße deutlich reduziert werden, um den negativen Einfluss von Quellen und Schwinden des Holzes zu minimieren. Alternativ könnte auch eine Blech-Blech-Verklebung geprüft werden, jedoch treten hier die beschriebenen Probleme beim Aushärten des 1K-PUR-Klebstoffs auf.

Die Versuchsreihe 2 mit Langzeitversuchen im Wechselklima bestätigt weitgehend die bei den Durchfeuchtungs- und Austrocknungsversuchen beobachteten Effekte. Allerdings verloren die im Kurzzeitversuch sehr leistungsfähigen Kombinationen von PUR-Klebstoff mit galvanisch verzinkten Blechen (mit und ohne Primer) bei den aufgetragenen Belastungsgraden von 35 % der Kurzzeitbruchlast oft bereits in der ersten Austrocknungsphase ihre Tragfähigkeit. Dabei trat im Gegensatz zu den Kurzzeitversuchen ohne Klimabeanspruchung vorwiegend Adhäsionsversagen an der Metalloberfläche auf, und zwar sowohl ohne als auch mit Vorbehandlung der Bleche durch den Jowat Primer. Auch die Erhöhung der Oberflächenrauigkeit bewirkte keine signifikante Verbesserung der Dauerhaftigkeit. Einzig die Kombination aus einseitiger EP-Verklebung und einseitiger MUF-Verklebung mit EP-Primerung und rohen gestrahlten Blechen hielt dem gesamten Belastungszyklus stand. Hier betrug die Restfestigkeit nach 21 Wechselklimazyklen noch 85 % der Bruchlast im Kurzzeitversuch. Angesichts des mit 35 % relativ hohen Lastniveaus liegt die Reduktion der Tragfähigkeit um 15 % im Rahmen vergleichbarer Versuche. Weitere Untersuchungen zum DOL-Effekt mit verschiedenen Lastniveaus wären sinnvoll. Um eine größere Probenanzahl realisieren zu können, müsste ggf. die Größe der Probekörper reduziert werden. Dadurch nimmt jedoch auch die Vergleichbarkeit der Labormessungen mit Verbindungen in baupraktischen Abmessungen ab.

Die im Langzeitversuch gemessenen Kriechverformungen der Klebeverbindung sind sehr klein. Dies liegt an der sehr geringen Klebfugendicke, die durch den Einbau der Bleche unter Pressdruck entsteht. Für die Bemessung von Anschlüssen und Verbindungen kann das Kriechen der Blechverklebung vernachlässigt werden. Ungünstig wirkt sich das fehlende Relaxationsvermögen jedoch auf den Abbau von Spannungsspitzen in der Klebefuge aus.

Aufgrund der Klimaversuche erscheint eine Anwendung der ‚ab initio‘ eingeklebten Bleche im Außenluftklima der Nutzungsklasse (NKL) 2 oder 3 nach DIN EN 1995-1-1 zunächst nicht möglich, da die in der Klimakammer erzeugten Klimata (20 °C/85 % rel. LF und 45 °C/40 % rel. LF) bei Brettschichtholzkonstruktionen in Nutzungsklasse 2 relativ häufig auftreten können. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Proben in der Klimakammer deutlich kleiner als in der baupraktischen Anwendung waren und die eingeklebten Bleche nicht durch eine Holzüberdeckung, wie bei den Bauteilversuchen der Arbeitspakets 4, geschützt waren. In Verbindung mit dem schnellen Wechsel zwischen den beiden Klimata tritt hier eine schnelle und vollständige Anpassung der Holzfeuchte und Temperatur im gesamten Probekörper ein. Bei einem Träger in baupraktischen Abmessungen, bei dem die eingeklebten Bleche durch eine Holzüberdeckung geschützt sind, und einem natürlichen Außenluftklima, bei dem Temperatur- und Feuchtigkeitsextrema meist nur kurzzeitig

aufzutreten, wird der Klimaeinfluss im Bauteilinneren deutlich abgemildert. Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse aus der Klimakammer auf großformatige Bauteile und natürliches Klima ist also nicht gegeben. Um eine Ausweitung der Anwendbarkeit der eingeklebten Bleche auf die Nutzungsklasse 2 zu ermöglichen, sollten zusätzliche Dauerlastversuche im natürlichen Außenluftklima mit Zuganschlüssen oder Biegeträgerstößen in den Abmessungen aus Arbeitspaket 4 durchgeführt werden. Eine Eignung für Nutzungsklasse 2 würde die wirtschaftliche Anwendung der entwickelten Verstärkungs- und Fügungsmethodik deutlich verbessern.

Die Bauteilversuche mit Zuganschlüssen und biegesteifen Trägerstößen erreichten sehr hohe Tragfähigkeiten, da die eingeklebten Bleche eine wirksame Kraftübertragung durch Lochleibung ermöglichen und ein Aufspalten des Holzes verhindern. Die Anschlüsse und Verbindungen können über eingeschlitzte Anschlussbleche hergestellt werden. Auch außenliegende Anschlussbleche sind möglich; jedoch ist hierbei die Krafteinleitung in die eingeklebten Verstärkungsbleche ungünstiger als bei der eingeschlitzten Variante. Als Verbindungsmittel eignen sich sowohl Bolzen bzw. Passbolzen als auch Stabdübel. Der Einsatz von selbstbohrenden Stabdübeln reduziert dabei deutlich den Bearbeitungsaufwand der Bauteile, da die eingeklebten Bleche nicht in der Abbundanlage durchbohrt werden müssen. Je nach (Biege-)Steifigkeit der gewählten Verbindungsmittel lässt sich ein mehr oder weniger ausgeprägtes elastisch-plastisches Last-Verformungs-Verhalten einstellen. Die Anzahl und Steifigkeit der Verbindungsmittel bestimmen auch die Verschiebungssteifigkeit der Anschlüsse.

Die geprüften Zuganschlüsse besaßen mittlere Bruchlasten von etwa 86 % der charakteristischen Querschnittstragfähigkeit. Das Versagen der Anschlüsse ging dabei vom maximal belasteten, mittleren eingeklebten Verstärkungsblech aus, das im Bereich der Lochschwächungen durch die Verbindungsmittel ins Fließen geriet. Es folgte ein gemeinsamer Bruch des Verstärkungsblechs und der umgebenden Holzlamelle. Dabei trat kein Versagen in der Klebefuge auf, sodass eine Bemessung der Anschlüsse über die Dübel und die eingeklebten Bleche erfolgen kann. Durch eine Erhöhung der Blechdicken oder Stahlfestigkeiten der Verstärkungsbleche lässt sich die Bruchlast der Anschlüsse nochmals steigern, bis ein Versagen der Verklebung maßgeblich wird. Dabei sind jedoch die höhere Streuung der Klebfugenfestigkeit und der Langzeiteffekt zu berücksichtigen. Die weitere Leistungssteigerung der Anschlüsse ist für nachfolgende Untersuchungen geplant.

Die mittleren Bruchmomente der biegesteifen Trägerstöße mit Stabdübelverbindung und eingeschlitzten Verbindungsblechen erreichten das charakteristische Bruchmoment des Brettchichtholzbalkens. Der Bruch der Verbindung trat in der Zugzone zwischen den beiden eingeschlitzten Verbindungsblechen auf und entsprach vom Versagensmodus den Zuganschlüssen. Der Bereich plastischer Verformungen vor dem Erreichen der Bruchlast war bei diesem Verbindungstyp relativ klein. Bei den Bolzenverbindungen mit außenliegenden Verbindungsblechen betrugen die mittleren Bruchlasten etwa 86 % der rechnerischen charakteristischen Bruchlasten der Träger. Die Bolzenverbindung war jedoch deutlich biegeweicher und erreichte nur die Hälfte der Rotationssteifigkeit der Stabdübelverbindung. Die Verbindungen besaßen jedoch einen sehr ausgeprägten plastischen Bereich vor Erreichen der Bruchlast. Da die Anschlusskräfte hier in die unterste Holzlamelle und das unterste eingeklebte Blech eingeleitet wurden, trat dort das Versagen der Probekörper ein. Wie bei den Zuganschlüssen lässt sich auch bei den biegesteifen Trägerstößen durch den Einbau dickerer oder höherfester Verstärkungsbleche die Tragfähigkeit der Verbindungen steigern. Hinsichtlich Langzeitbeanspruchung gilt das dort Gesagte.

Das Forschungsprojekt weist die Anwendbarkeit der ‚ab initio‘-Technik zur Verstärkung von Brett-schichtholzbauteilen mit im Produktionsprozess eingeklebten Stahlblechen nach. Für die Integration der Verklebung in den automatisierten Herstellungsprozess werden geeignete Methoden und erforderliche Randbedingungen definiert. Aus nach diesen Vorgaben produzierten Bauteilproben wurden sehr leistungsfähige Zuganschlüsse und biegesteife Stöße gefügt, die mögliche Verbindungstechniken für Fügungen mit ‚ab initio‘ eingeklebten Stahlblechen aufzeigen. Während eine Anwendung dieser Verbindungen im beheizten Innenraumklima (NKL 1) aufgrund der Versuchsergebnisse möglich scheint, sind für eine Nutzung im überdachten Außenbereich (NKL 2) zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Ebenso ist eine Optimierung und weitere Leistungssteigerung der Fügungen vorgesehen. Für die baupraktische Anwendung erschließt die neu entwickelte Verstärkungs- und Fügungsmethodik ein breites Anwendungsgebiet im Ingenieurholzbau und bietet bei entsprechender Prozessintegration in die Herstellung auch großes wirtschaftliches Synergiepotential.

## 5 Mittelgeber

Die Verfasser danken für die Förderung des Forschungsprojekts mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“.

Darüber hinaus danken wir unseren Projektpartnern

Hüttemann Holz GmbH & Co. KG  
Industriestraße  
59939 Olsberg  
Herr Dipl.-Ing. Reinhold Höhmann  
Herr Dipl.-Ing. Michael Niggemann

Jowat SE  
Ernst-Hilker-Straße 10-14  
32758 Detmold  
Herr Dr. Hartmut Henneken  
Frau Dr. Daniela Klein

Pollmann & Sohn GmbH & Co. KG  
Hagener Straße 63  
58566 Kierspe  
Frau Frauke Brader-Vollmerhaus, MBA  
Herr Axel Görtz

für die Unterstützung des Projektes durch Bereitstellung von Material, Herstellung von Probekörpern sowie Bereitstellung von Produktionsanlagen, Prüfeinrichtungen und Personal.

Besonderer Dank für die gute Zusammenarbeit gilt den genannten Ansprechpartnern bei diesen Firmen, die durch qualifizierte fachliche Begleitung, viele praxisrelevante Ideen und Flexibilität bei der Durchführung zum Gelingen des Projekts beigetragen haben.

## 6 Literatur

- [1] Bathon, L. et al.: Holz-Stahl-Klebeverbindungen mit Flachkörpern – Entwicklungen und Anwendungen. In *15. Internationales Holzbau-Forum (IHF 2009)*, Band I, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2009.
- [2] Bathon, L. et al.: Fatigue design of adhesive connections using perforated steel plates. In: Salenikovich, A., editor, *WCTE 2014, Proceedings*, Quebec, Canada, 2014.
- [3] Z-9.1-636 PUR-Klebstoff „Jowapur 868.60“ für die Herstellung tragender Holzbauteile, Zulassungsbescheid vom 31.08.2010, 6 Seiten, DIBt, 2010.
- [4] Klebstoffliste II der MPA Universität Stuttgart betreffend Brettschichtholz nach EN 14080, Stand: 05.02.2014 Ai/Rk, MPA Stuttgart, 2014.
- [5] Granholm, H.: Armerat trä – Reinforced Timber. Transactions of Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden. Nr. 154, 1954
- [6] Trautz, M. et al.: Mit Schrauben bewehren - Selbstbohrende Vollgewindeschrauben als Verstärkung von Brettschichtholzträgern und zur Ausbildung von hochleistungsfähigen Verbindungen, Forschungsbericht 01/2007 des Lehrstuhls für Tragkonstruktionen der RWTH Aachen; Aachen, 2007
- [7] Brüninghoff, H.: Ertüchtigung von BS-Holz-Tragwerken; in Tagungsband: Ingenieurholzbau - Karlsruher Tage 2007, Karlsruhe, 2007
- [8] Tlustochowicz, G.; Serrano, E.; Steiger, R.: State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Materials and Structures*, 44(5):997-1020, 2011.
- [9] Patentanmeldung Nr. DE4100044A1 'Verbindungstechnik mit längengestuftten Lamellen' (9.7.1992)
- [10] Patentanmeldung Nr. DE 3923471A1 'Holzverbindungstechnik mittels Lamellen' (24.1.1991)
- [11] Trautz, M.; Koj, C.: Mit Schrauben Bewehren. In: *Die Bautechnik* 85 (2008), Heft 3, S. 190-196.
- [12] Trautz, M.; Koj, C.: Mit Schrauben Bewehren – Neue Ergebnisse. In: *Die Bautechnik* 86 (2009), Heft 4, S. 228-238.
- [13] Trautz, M.; Koj, C.: Mit Schrauben bewehrtes Holz. In: *Zukunft Holz - Statusbericht um aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen*, Hrsg. Hochschule Biberach Institut für Holzbau, 5/2009.
- [14] Trautz, M.; Koj, C.: Mit Schrauben bewehrtes Holz. In: *Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage 2008, Forschung für die Praxis*, Karlsruhe 2008. Tagungsband, Bruderverlag, Köln, 2008.
- [15] DIN EN 408 (2010-12): Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften.

- [16] Möhler, K.; Hemmer, K.: Versuche mit eingeleimten Gewindestangen. Forschungsarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion, Universität Karlsruhe, 1981.
- [17] Lippert, P.: Rahmenecken aus Holz mit eingeklebten Gewindestangen. Dissertation, Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart 2002.
- [18] Gruber, Rolf; Radovic, Borimir; Werner, Gerhard: Kostensparende Holzverbindung durch eingeleimte Metallbleche. Verringerung der Anschlussfläche, Abschlußbericht. Stuttgart, 1988
- [19] Aicher, Simon: Kostensparende Holzverbindungen durch eingeleimte Metallbleche unter Verwendung neuartiger Kleber mit erhöhter Leimfugendicke. Tl.1. Text, Kurzfassung. Tl.2. Beilagen und Anhang. Abschlußbericht. Stuttgart, 1993.



## **Anhang**

## Inhaltsverzeichnis

<b>A1 Vorversuche AP0</b> .....	<b>1</b>
A1.1 Vorversuche Versuchsaufbau.....	1
A1.2 Geprüfte Probekörper (exemplarisch) .....	2
A1.3 Ergebnisse der geprüfte Probekörper.....	8
<b>A2 Kurzzeitversuche AP 1</b> .....	<b>10</b>
A2.1 Versuchsaufbau Versuchsreihe 1A.....	10
A2.2 Versuchsreihe 1A - Einfluss von Stahlsorte und Oberflächenbehandlung.....	12
A2.2.1 Zugversuche einseitig (Oberseite) MUF, kurze Verbundlänge.....	12
A2.2.2 Ergebnisse von A2.2.1 .....	15
A2.2.3 Zugversuche - beidseitige PUR-, EP-, EPI-Verklebung .....	18
A2.2.4 Ergebnisse von A2.2.3 .....	21
A2.2.5 Zugversuche - einseitige MUF-Verklebung mit EP als Primer .....	23
A2.2.6 Ergebnisse von A2.2.5 .....	25
A2.2.7 Zugversuche – Vorbehandlung der Bleche mit Primer Jowat Typ 409.12 .....	27
A2.2.7 Ergebnisse von A2.2.7 .....	29
A2.3 Versuchsreihe 1B – Wasserlagerung I.....	32
A2.4 Versuchsreihe 1B – Wasserlagerung II.....	34
A2.5 Versuchsreihe 1B – Heißwasserlagerung.....	39
A2.6 Versuchsreihe 1C – Zugversuche mit unterschiedlichen Verbundlängen.....	41
A2.6.1 Ergebnisse - Versuchsreihe 1C .....	42
A2.7 Versuchsreihe E – Zugscherfestigkeit – Blech-Blech Verklebung.....	43
A2.7.1 Ergebnisse - Versuchsreihe 1E .....	45
<b>A3 Langzeitversuche AP2 - Klebeverbindung unter Dauerlast und Klimabeanspruchung</b> .....	<b>54</b>
A3.1 Versuchsstandaufbau und Probekörper .....	54
A3.2 Langzeitversuch.....	56
A3.3 Bruchversuche zur Ermittlung der Resttragfähigkeit.....	60
A3.3.1 Ergebnisse der Bruchversuche zur Ermittlung der Resttragfähigkeit .....	63
<b>A4 Produktionsversuche AP 3 - Prozessintegration im Herstellwerk</b> .....	<b>64</b>

<b>A5 Bauteilversuche AP 4 in baupraktischen Dimensionen .....</b>	<b>65</b>
A5.1 Versuchsreihe 4V: Zugkraftanschluss Vorversuch I .....	65
A5.1.1 Ergebnisse der geprüften Probekörper: Zugkraftanschluss Vorversuch I .....	67
A5.2 Versuchsreihe 4V: Zugkraftanschluss Vorversuch II .....	68
A5.2.1 Ergebnisse der geprüften Probekörper: Zugkraftanschluss Vorversuch II.....	71
A5.3 Versuchsreihe 4A: Zugkraftanschluss.....	74
A5.4 Versuchsreihe 4B: Biegeträger mit biegesteifem Stoß .....	79

# A1 Vorversuche AP 0

## A1.1 Vorversuche Versuchsaufbau

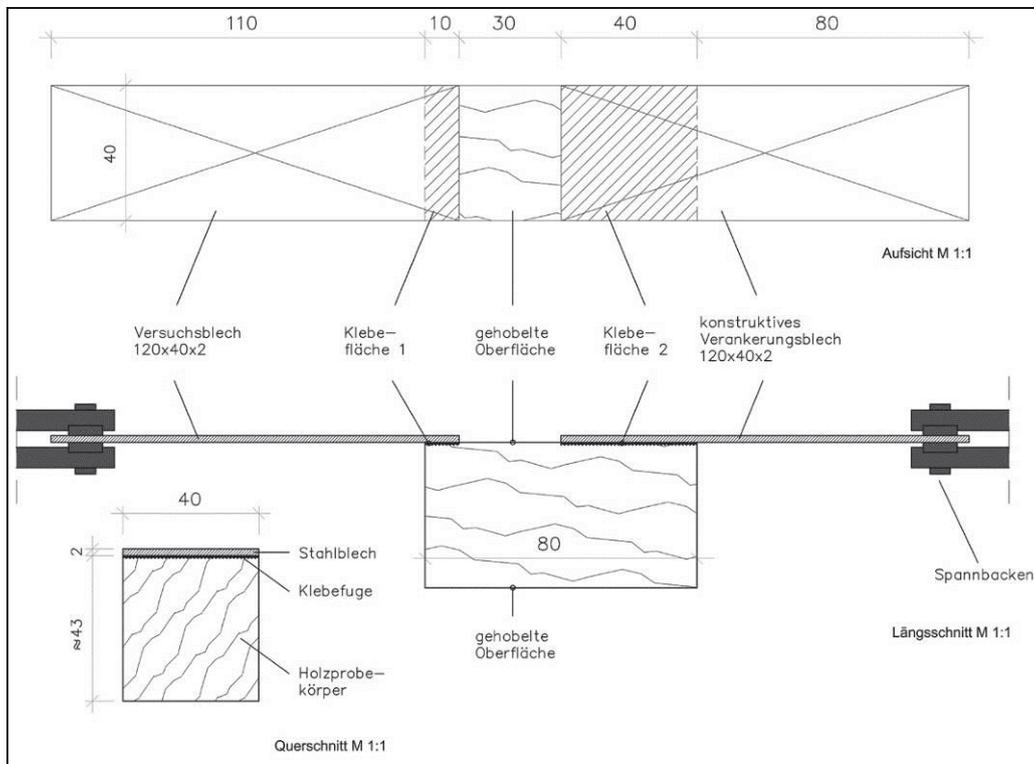


Bild 1-1: AP0 Vorversuch Skizze



Bild 1-2: AP0 Vorversuch Aufbau

## A1.2 Geprüfte Probekörper (exemplarisch)

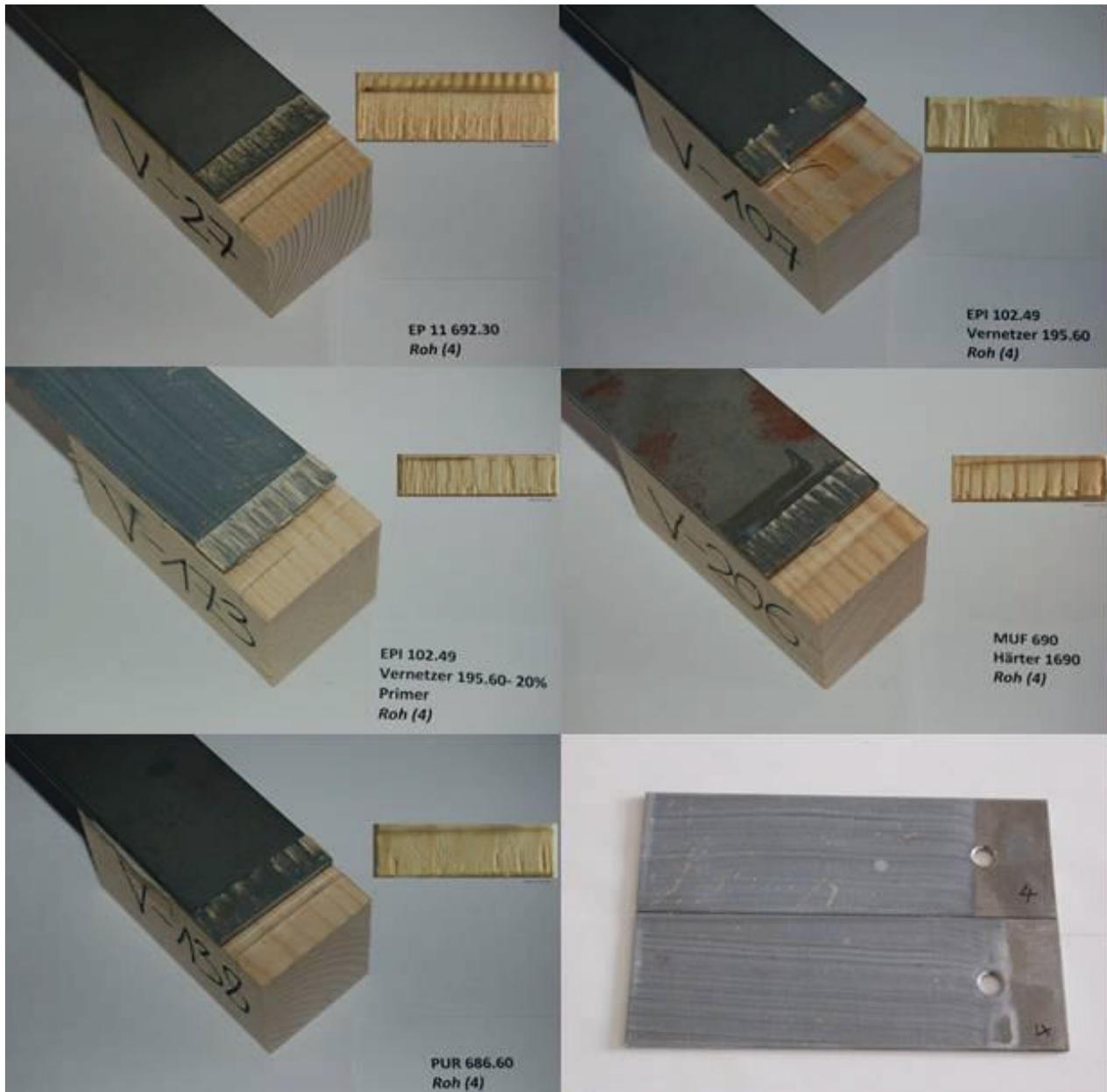


Bild 1-3: Probekörper mit rohen S235-Blechen und: a) EP, b) EPI+Vernetzer, c) EPI+Vernetzer(20%)+Primer, d) MUF+Härter, e) PUR, f) Primer

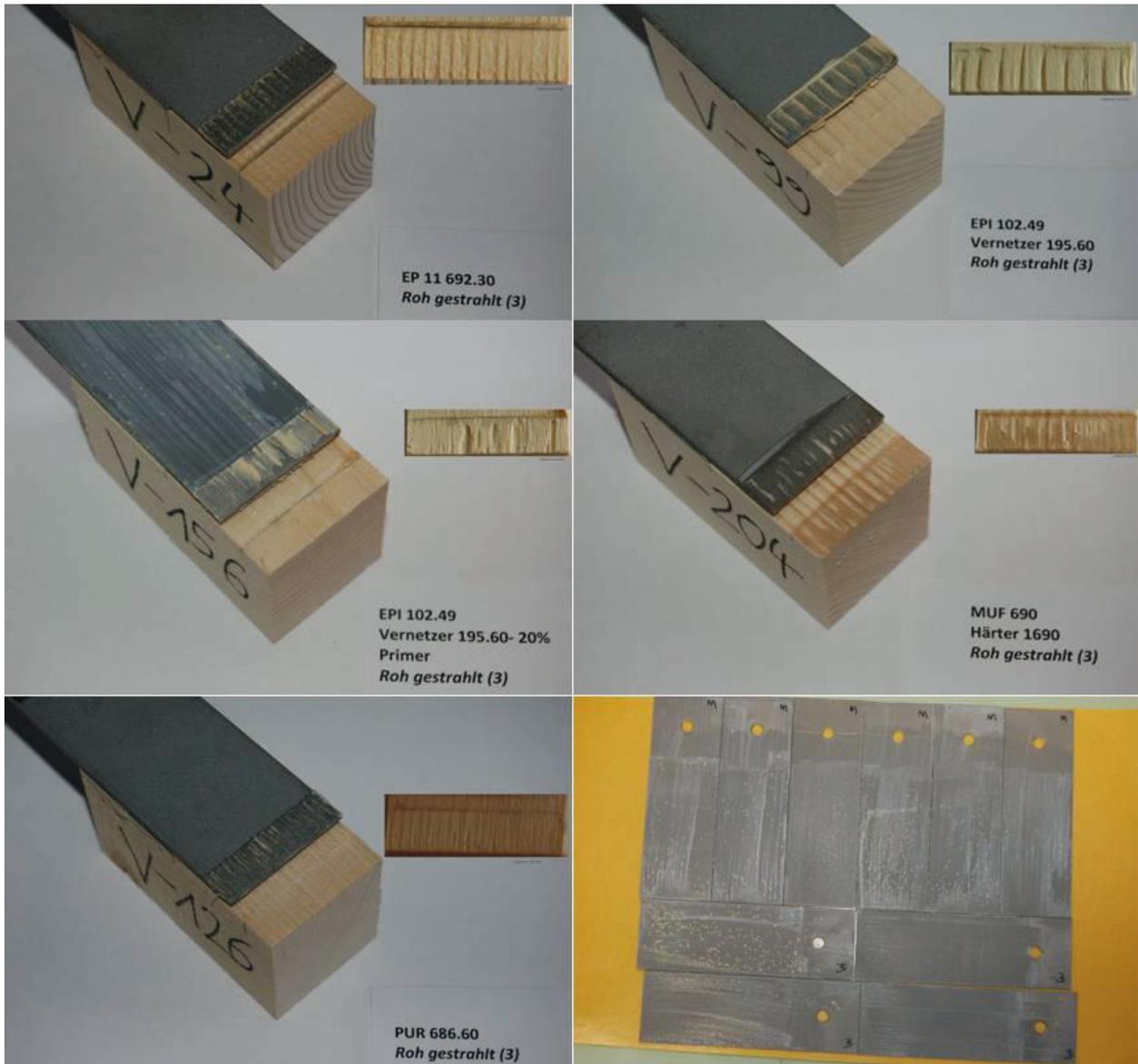


Bild 1-4: Probekörper mit gestrahlten S235-Blechen und: a) EP, b) EPI+Vernetzer, c) EPI+Vernetzer(20%)+Primer,d)MUF+Härter, e) PUR, f) Primer

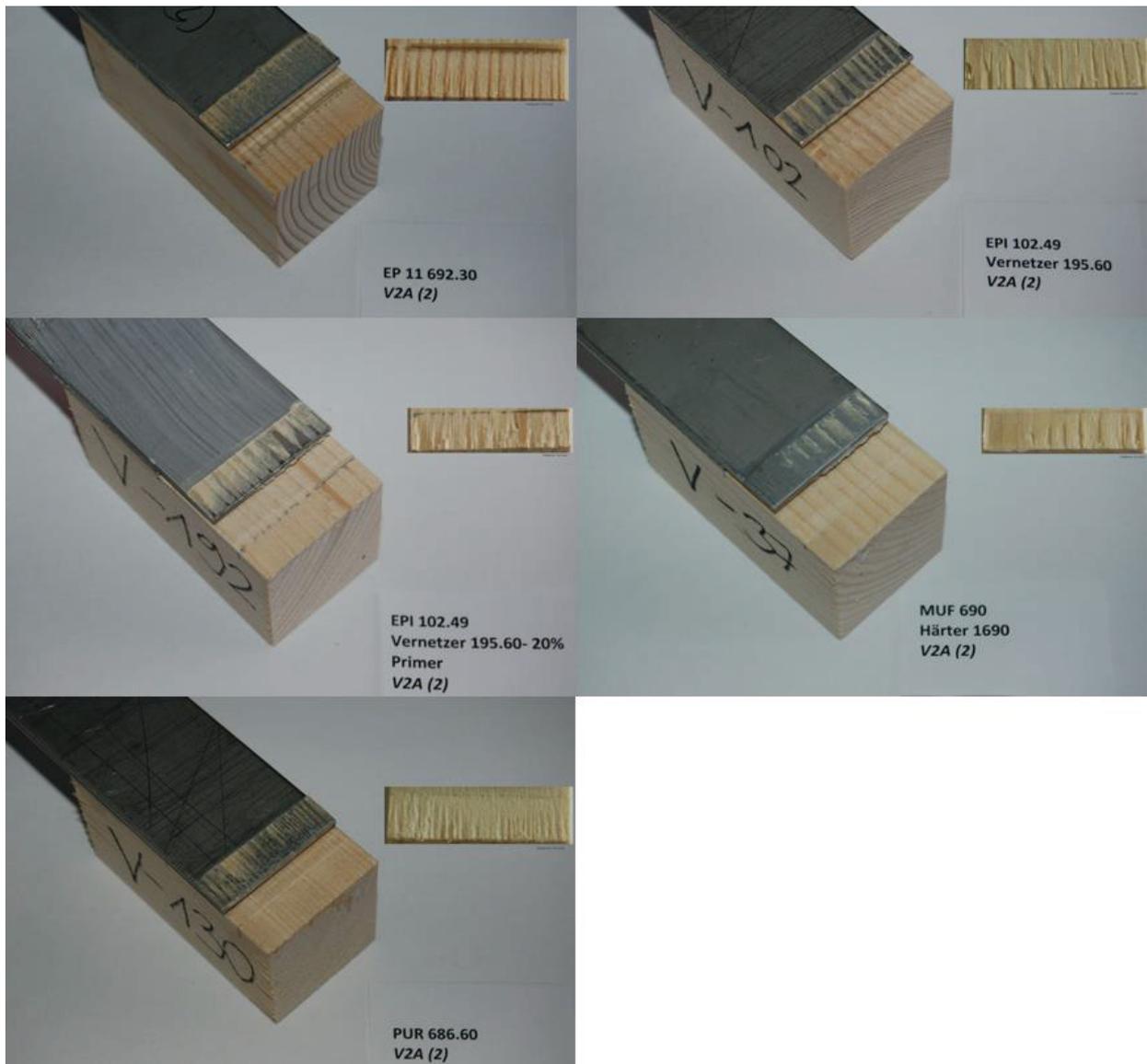


Bild 1-5: Probekörper mit glatten V2A-Blechen und: a) EP, b) EPI+Vernetzer, c) EPI+Vernetzer(20%)+Primer, d) MUF+Härter, e) PUR

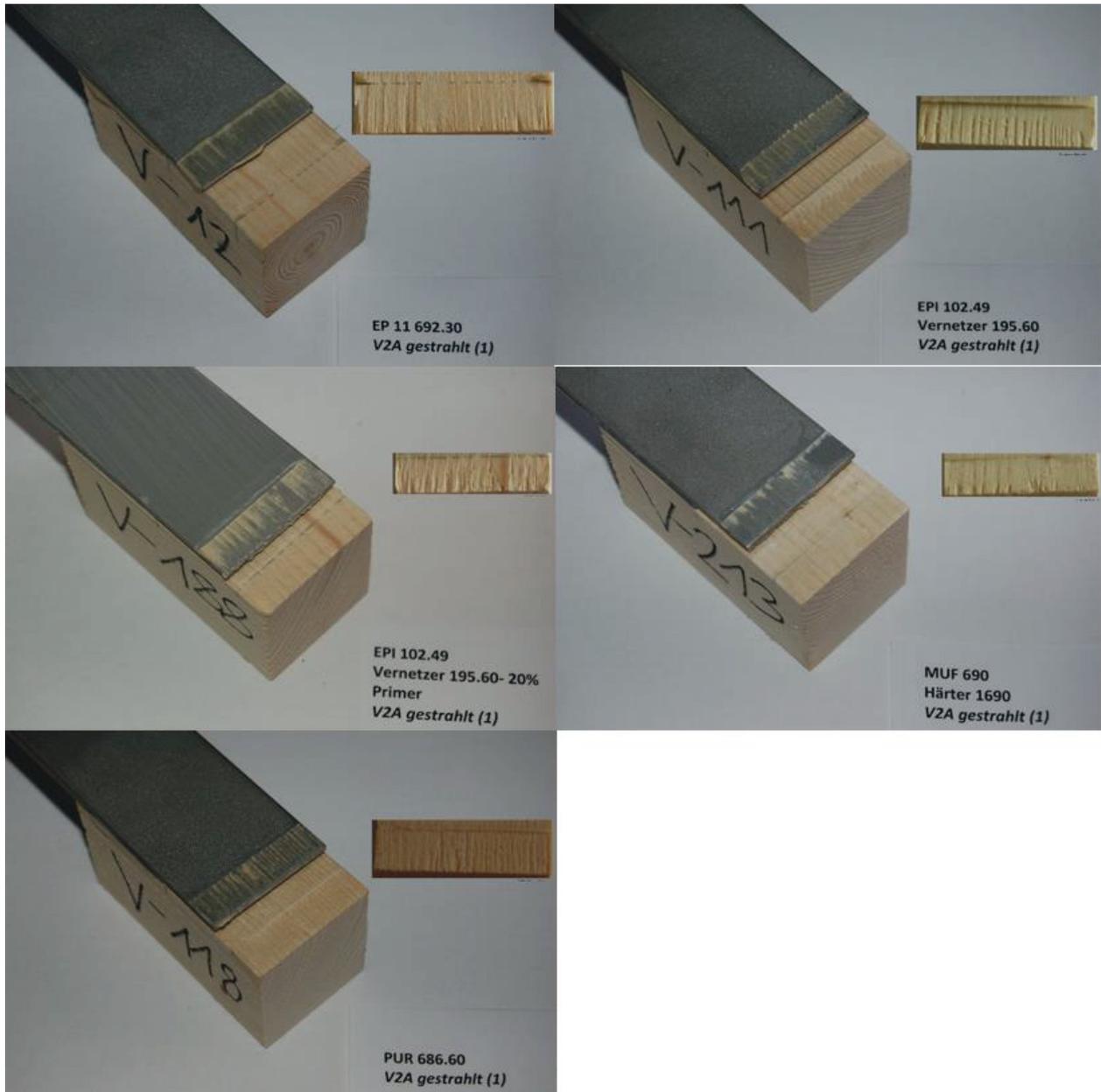


Bild 1-6: Probekörper mit gestrahlten V2A-Blechen und: a) EP, b) EPI+Vernetzer, c) EPI+Vernetzer(20%)+Primer, d) MUF+Härter, e) PUR

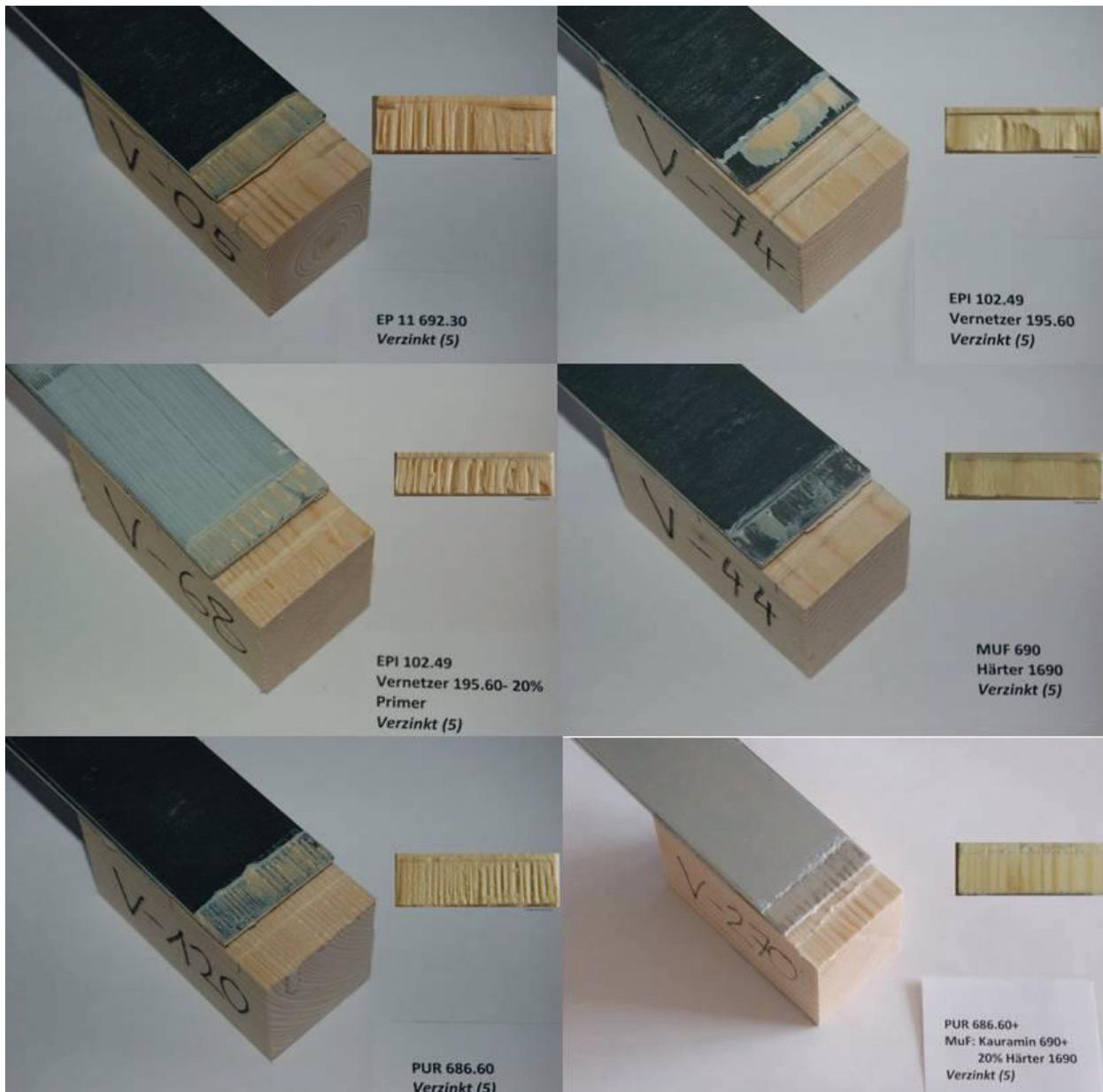


Bild 1-7: Probekörper mit galvanisch verzinkten Blechen und: a) EP, b) EPI+Vernetzer, c) EPI+Vernetzer(20%)+Primer, d) MUF+Härter, e) PUR, f) PUR+MUF+Härter(20%)

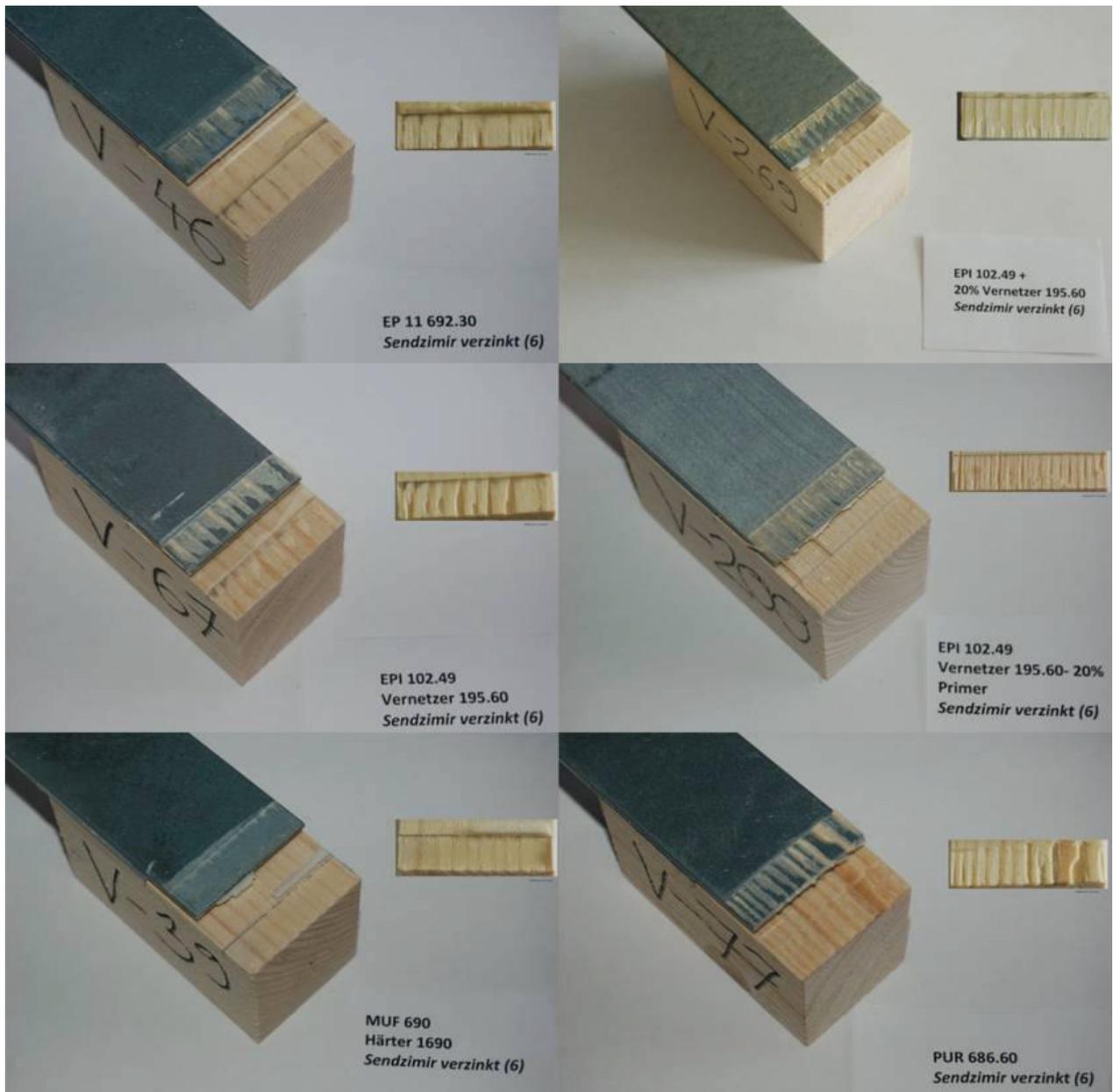


Bild 1-8: Probekörper mit sendzimir-verzinkten Blechen und: a) EP, b) EPI+Vernetzer (20%), c) EPI+Vernetzer d) EPI+Vernetzer(20%)+Primer, e) MUF+Härter, f) PUR

### A1.3 Ergebnisse der geprüften Probekörper

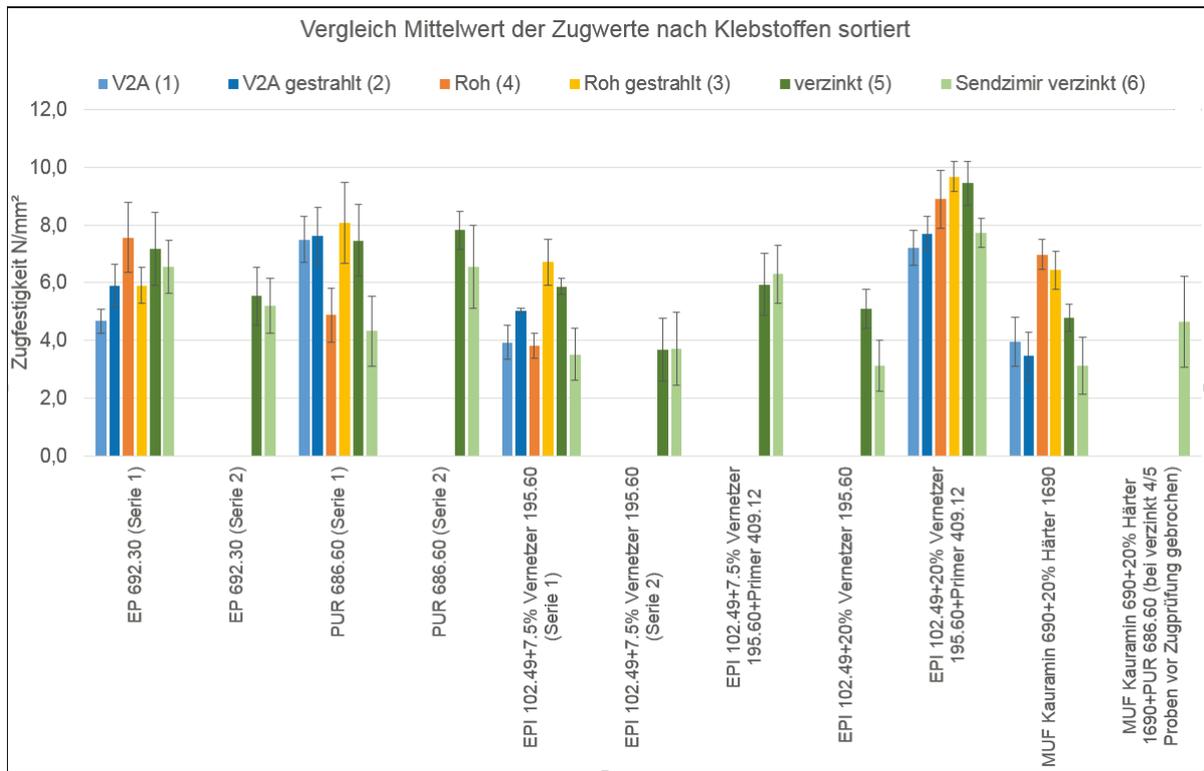


Bild 1-9: Zugscherfestigkeiten nach Klebstoffen sortiert

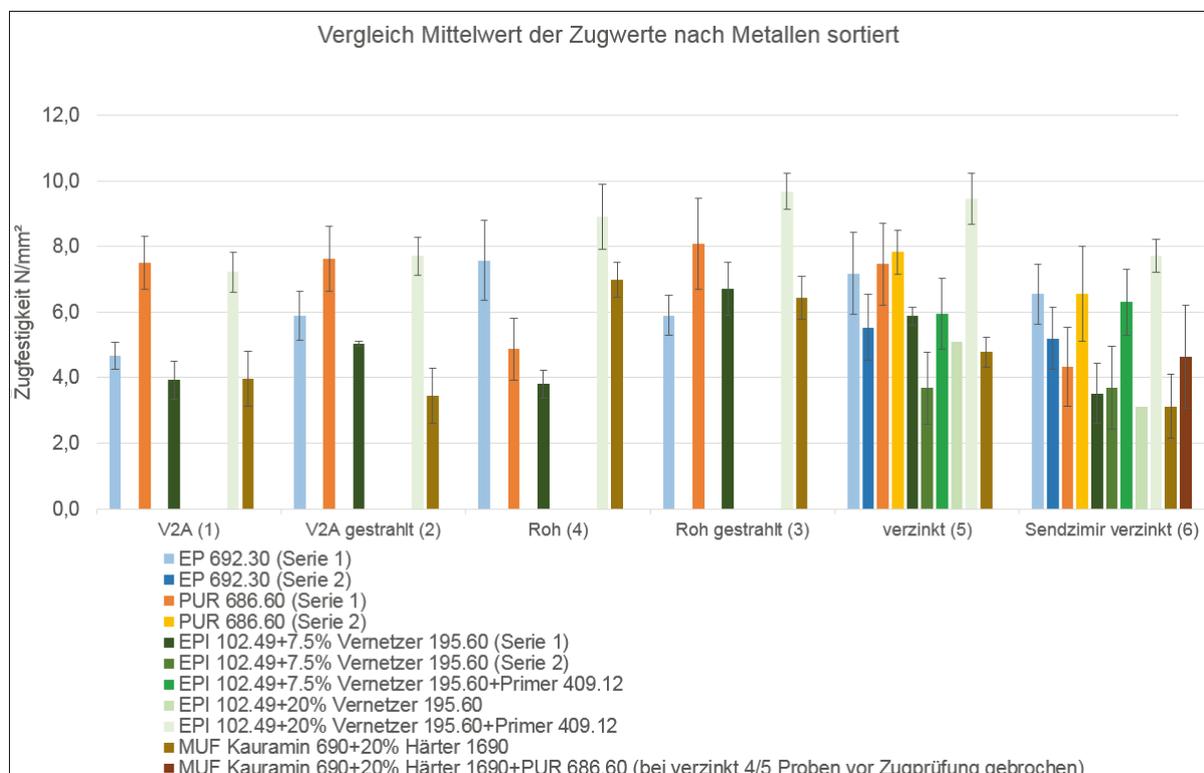


Bild 1-10: Zugscherfestigkeiten nach Blechtypen sortiert

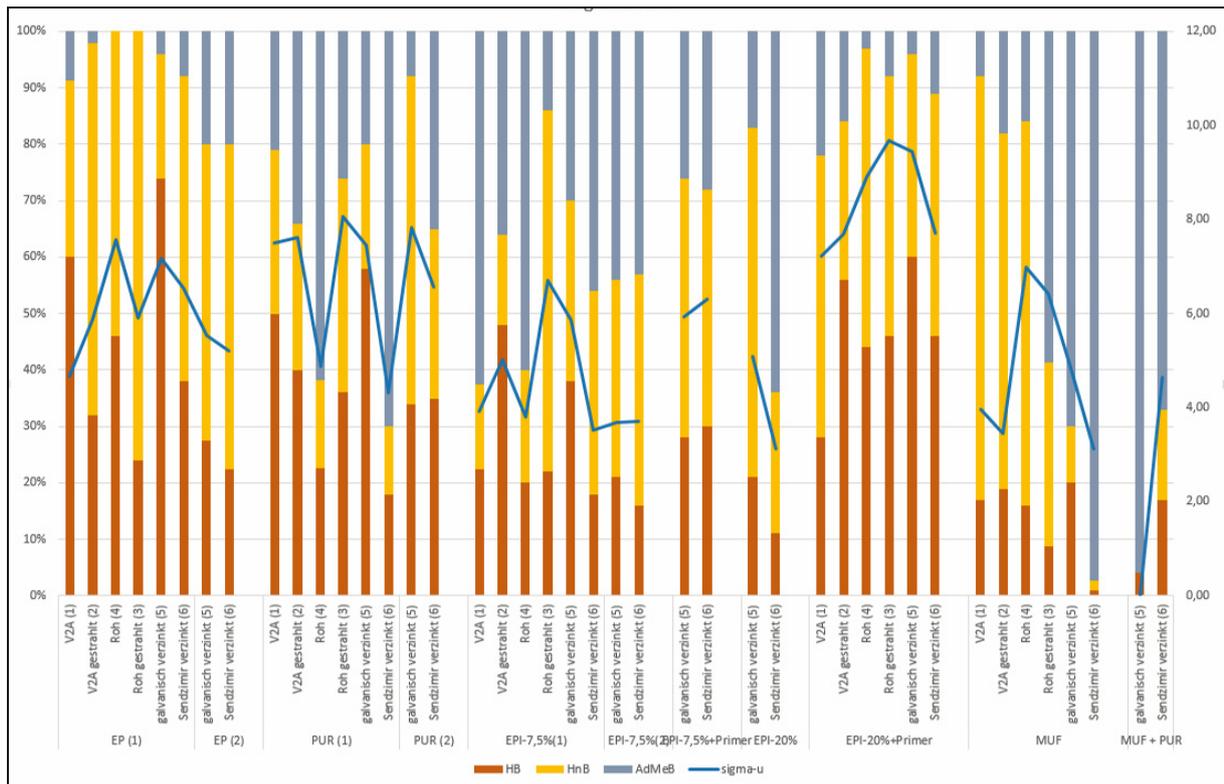


Bild 1-11: Versagensarten nach Klebstoffen sortiert

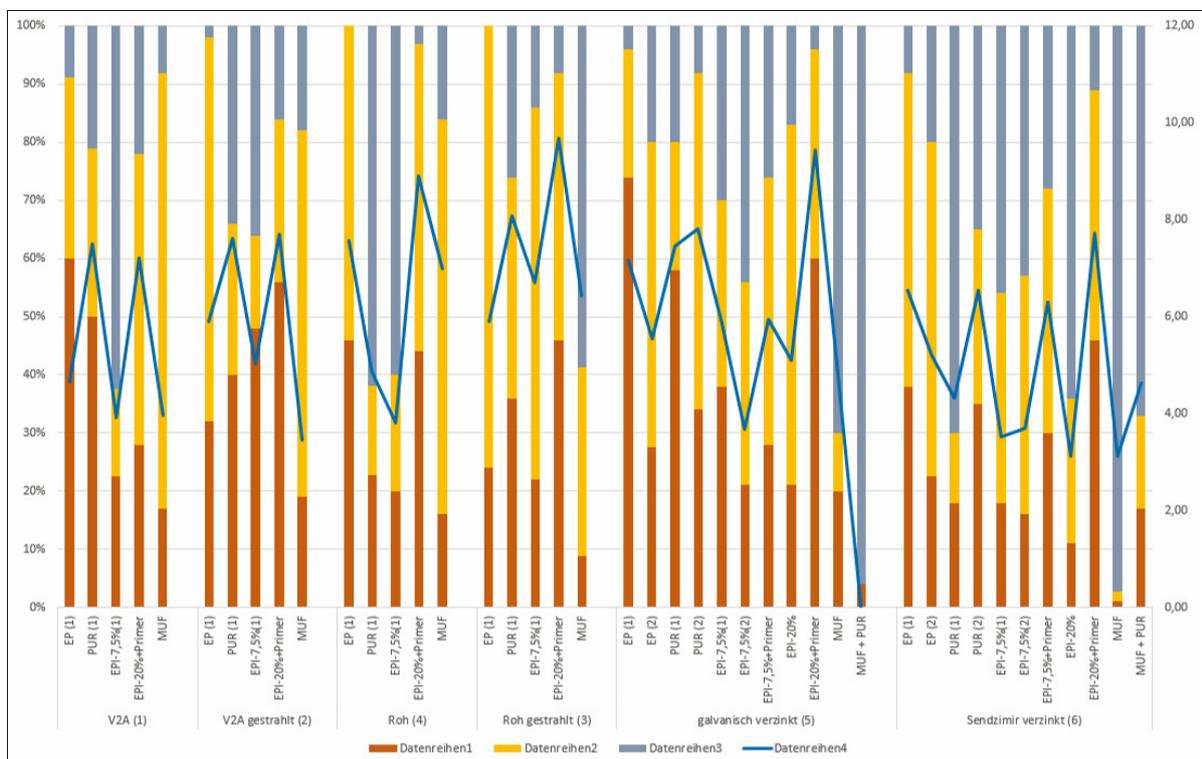


Bild 1-12: Versagensarten nach Blechtypen sortiert

## A2 Kurzzeitversuche AP 1

### A2.1 Versuchsreihe 1A - Versuchsaufbau

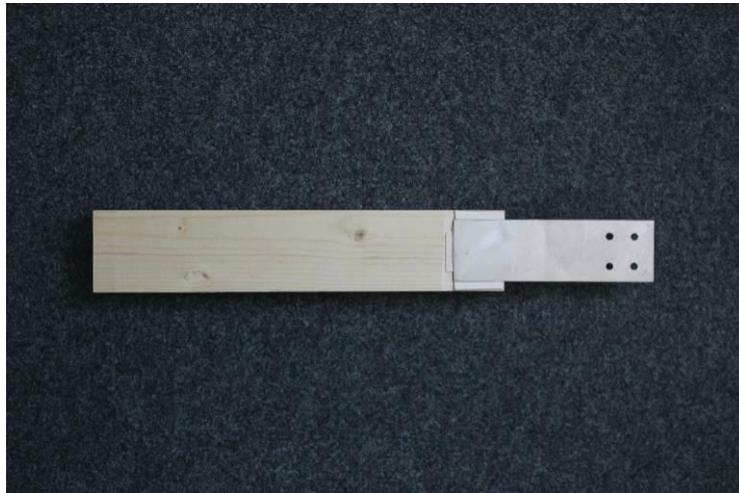


Bild 2-1: Vorbereitung der Probekörper VR 1A



Bild 2-2: Versuchsaufbau VR 1A

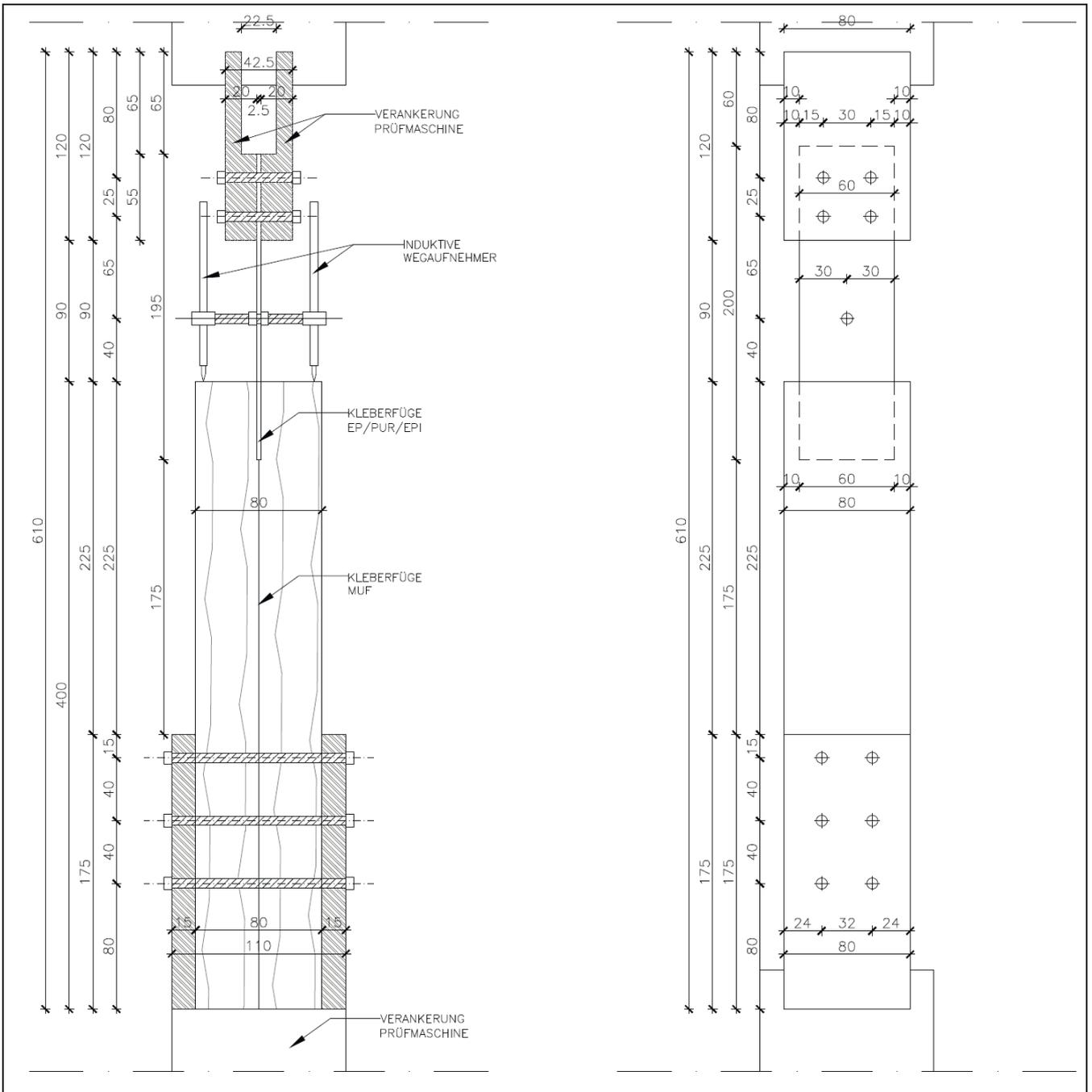


Bild 2-3: Versuchsaufbau VR 1A – Skizze Probekörper, Verankerung und Messeinrichtungen

## A2.2 Versuchsreihe 1A - Einfluss von Stahlorte und Oberflächenbehandlung

### A2.2.1 Zugversuche , einseitig MUF-Verklebung, 50 mm Verbundlänge

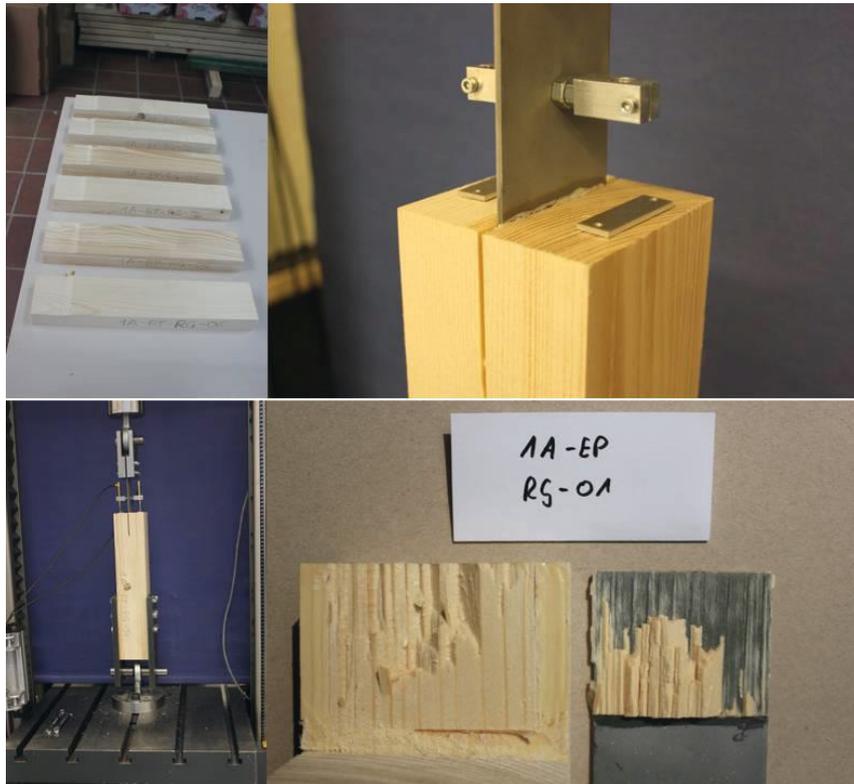


Bild 2-4: VR 1A, Probekörper EP-RG-01, Versagen EP-Fuge

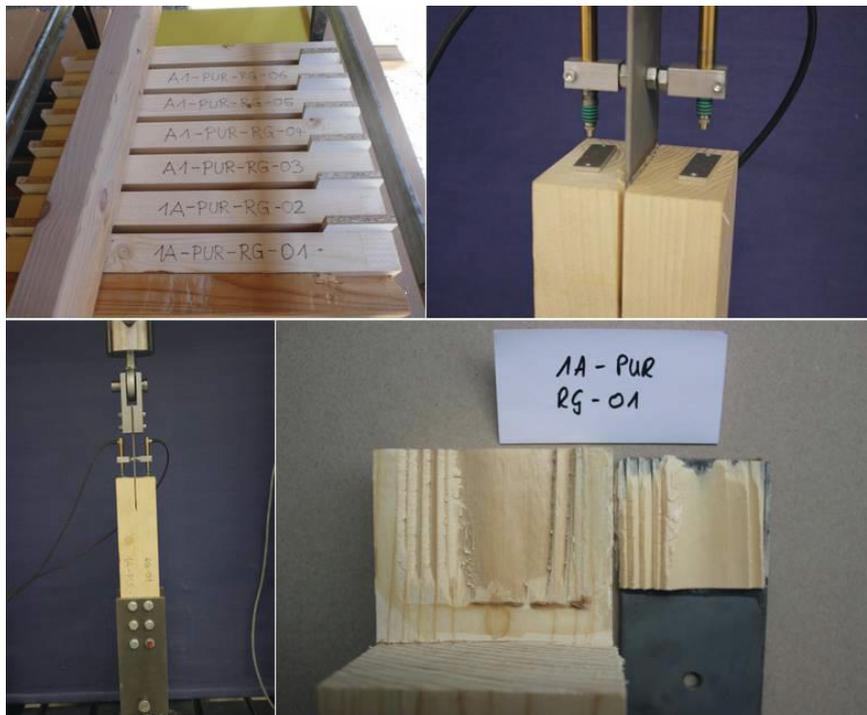


Bild 2-5: VR 1A, Probekörper PUR-RG-01, Versagen PUR-Fuge

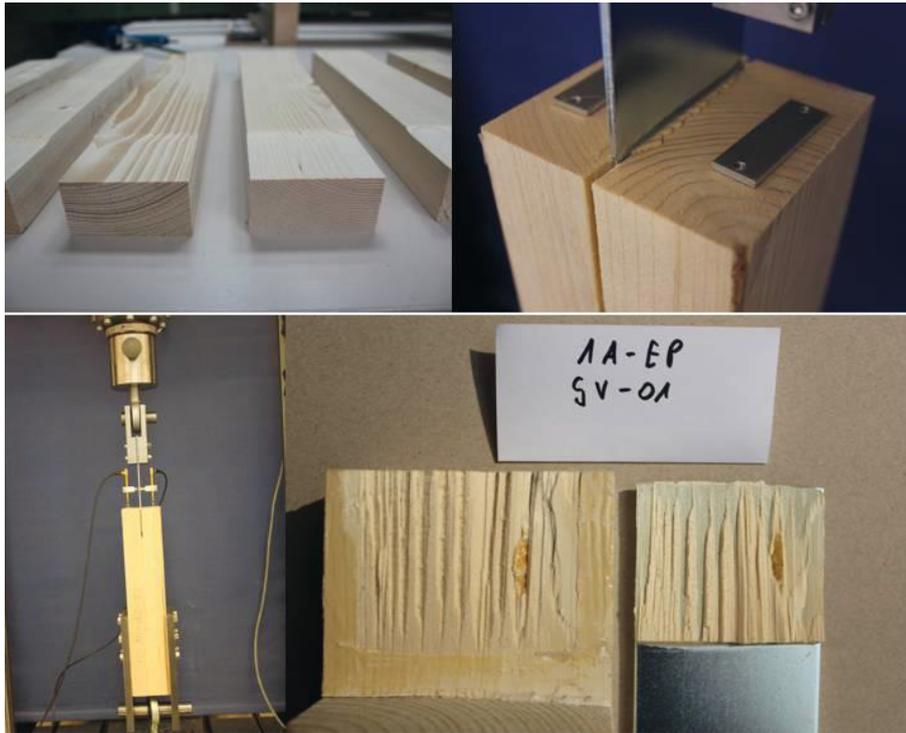


Bild 2-6: VR 1A, Probekörper EP-GV-01, Versagen EP-Fuge

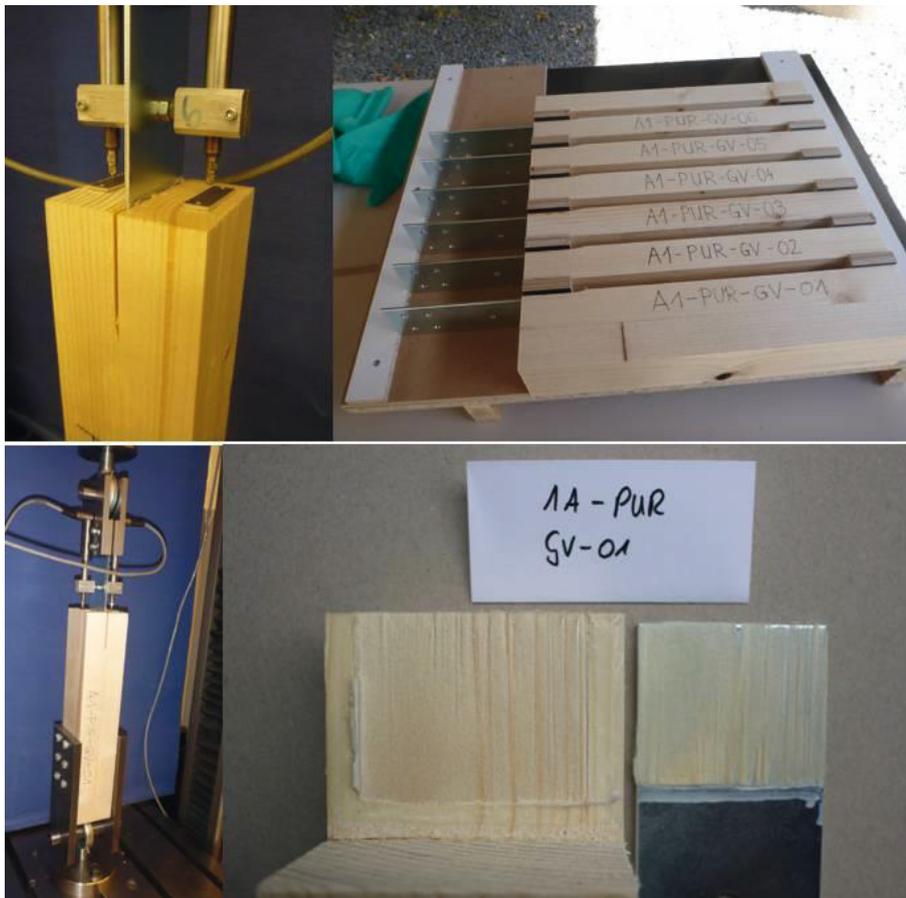


Bild 2-7: VR 1A, Probekörper PUR-GV-01, Versagen PUR-Fuge



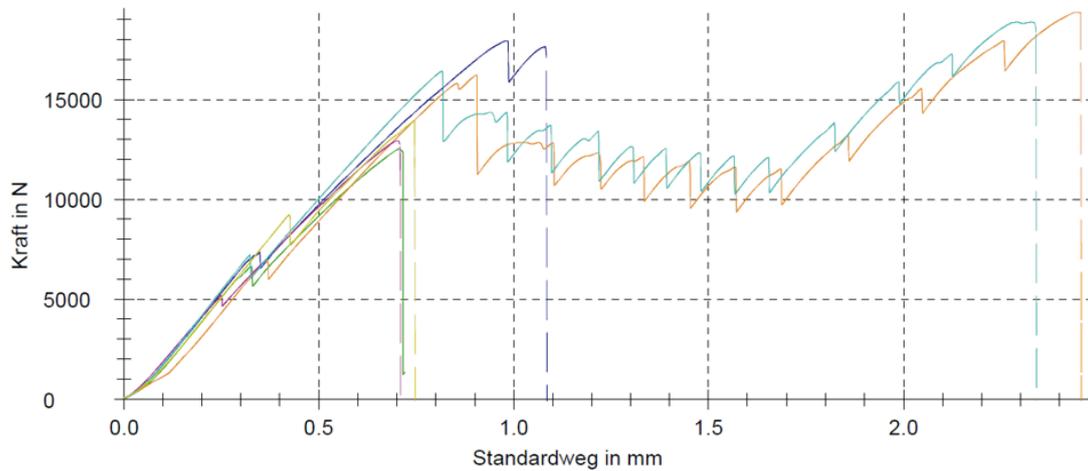
Bild 2-8: VR 1A, Probekörper EPI7,5-GV-04, Versagen EPI-Fuge



Bild 2-9: VR 1A, Probekörper PUR-SZ-05, Versagen PUR-Fuge

## A2.2.2 Ergebnisse von A2.2.1

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

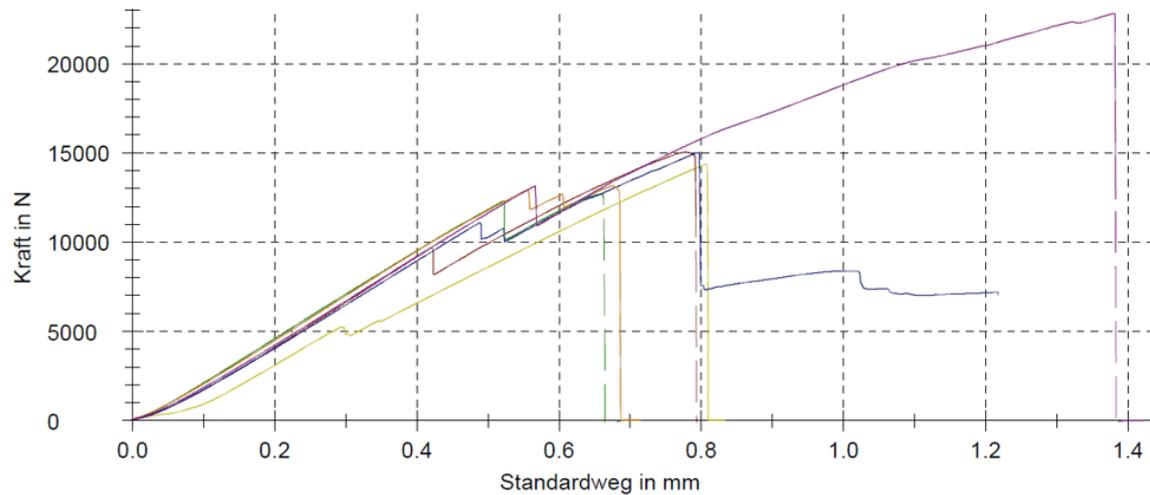
Legende	Probenbezeichnung	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
01	01	12,5	0,7	0,021	5000
02	02	18,0	1,0	0,020	
03	03	19,4	2,5	0,021	
04	04	12,9	0,7	0,033	
05	05	18,9	2,3	0,022	
06	06	13,9	0,7	0,019	

### Statistik:

1A-EP-RG	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm	MW-Weta(XXXX N) mm
$n = 6$			
$\bar{x}$	15,9	1,3	0,023
$s$	3,14	0,8	0,005
$v$ [%]	19,68	63,07	23,91

Bild 2-10: Bruchlasten VR 1A: RG-EP

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

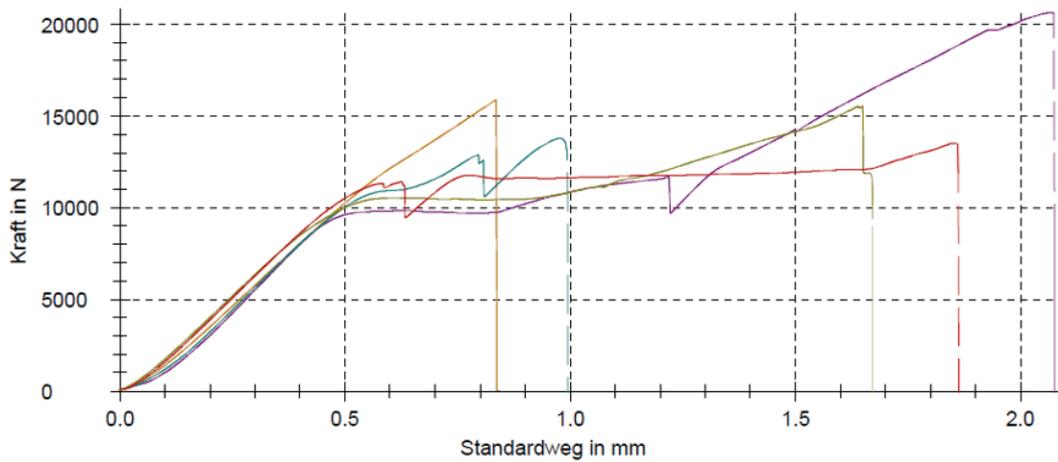
Legende	Probenbezeichnung	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
01	01	14,4	0,8	0,027	5000
02	02	15,0	0,8	0,024	
03	03	12,7	0,7	0,021	
04	04	15,0	0,8	0,020	
05	05	13,1	0,7	0,023	
06	06	22,8	1,4	0,022	

### Statistik:

1A-PUR-RG	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm	MW-Weta(XXXX N) mm
$n = 6$			
$\bar{x}$	15,5	0,9	0,023
$s$	3,71	0,3	0,003
$v$ [%]	23,93	31,56	11,29

Bild 2-11: Bruchlasten VR 1A: RG-PUR

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

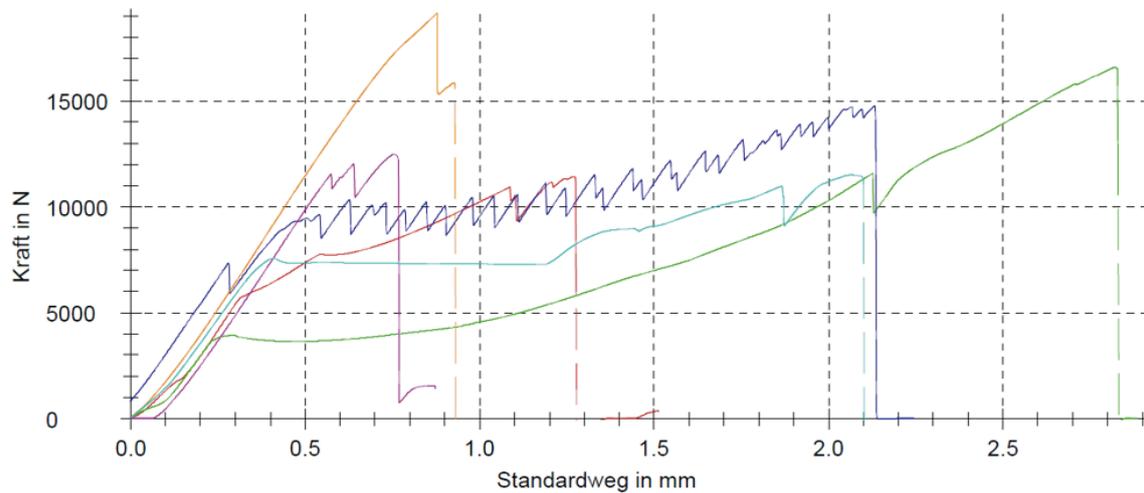
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
	01	15,9	0,8	0,023	5000
	02	13,0	2,5	0,000	
	03	20,6	2,1	0,019	
	04	13,8	1,0	0,021	
	05	15,5	1,6	0,023	
	06	13,5	1,9	0,023	

### Statistik:

1A-EP-GV n = 5	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
$\bar{x}$	15,9	1,5	0,022
s	2,86	0,5	0,002
v [%]	18,00	36,79	7,90

Bild 2-12: Bruchlasten VR 1A: GV-EP

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

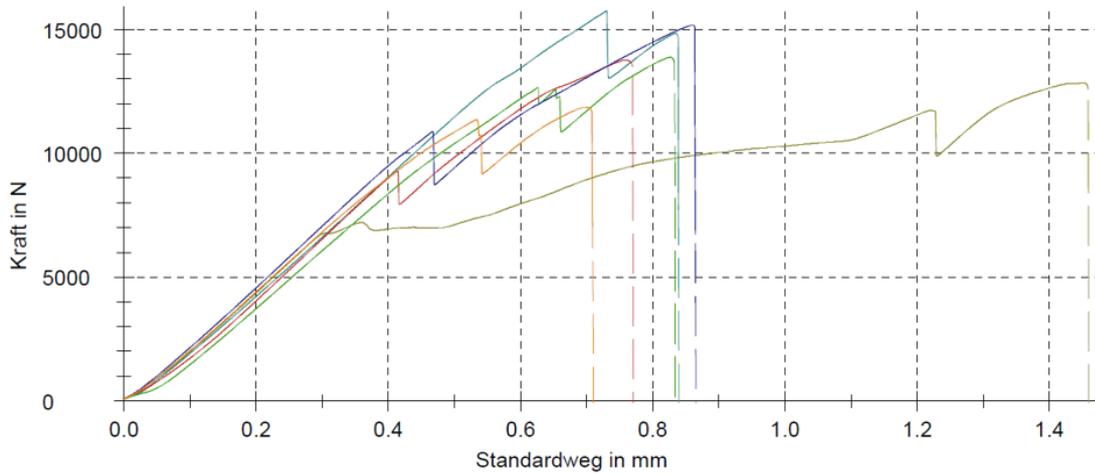
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
	01	11,4	1,3	-0,000	5000
	02	16,6	2,8	-0,023	
	03	14,8	2,1	0,020	
	04	19,2	0,9	0,021	
	05	12,5	0,8	0,022	
	06	11,5	2,1	0,024	

### Statistik:

1A-PUR-GV n = 6	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
$\bar{x}$	14,3	1,7	0,011
s	3,11	0,8	0,019
v [%]	21,71	49,24	-

Bild 2-13: Bruchlasten VR 1A: GV-PUR

**Seriengrafik:**



**Prüfergebnisse:**

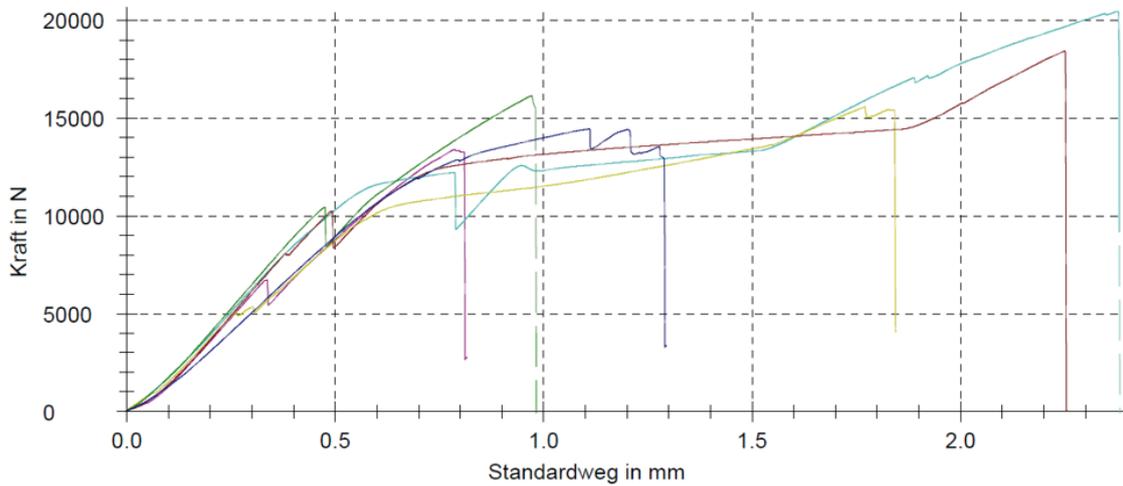
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
<span style="color: red;">■</span>	01	15,8	0,7	0,026	5000
<span style="color: green;">■</span>	02	12,8	1,4	0,021	
<span style="color: blue;">■</span>	03	13,8	0,8	0,022	
<span style="color: orange;">■</span>	04	13,9	0,8	0,021	
<span style="color: purple;">■</span>	05	15,2	0,9	0,021	
<span style="color: brown;">■</span>	06	11,9	0,7	0,022	

**Statistik:**

1A-EPI7,5-GV	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
n = 6			
$\bar{x}$	13,9	0,9	0,022
s	1,44	0,3	0,002
v [%]	10,39	31,76	9,25

Bild 2-14: Bruchlasten VR 1A: GV-EPI

**Seriengrafik:**



**Prüfergebnisse:**

Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
<span style="color: red;">■</span>	01	13,4	0,8	0,023	5000
<span style="color: green;">■</span>	02	20,5	2,4	0,023	
<span style="color: blue;">■</span>	03	15,6	1,8	0,026	
<span style="color: orange;">■</span>	04	18,4	2,2	0,021	
<span style="color: purple;">■</span>	05	16,1	1,0	0,023	
<span style="color: brown;">■</span>	06	14,5	1,1	0,069	

**Statistik:**

1A-PUR-SZ	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
n = 6			
$\bar{x}$	16,4	1,5	0,031
s	2,62	0,7	0,019
v [%]	15,95	44,22	61,11

Bild 2-15: Bruchlasten VR 1A: SZ-PUR

### A2.2.3 Zugversuche, beidseitig PUR/EP/EPI-Verklebung, 50 mm Verbundlänge

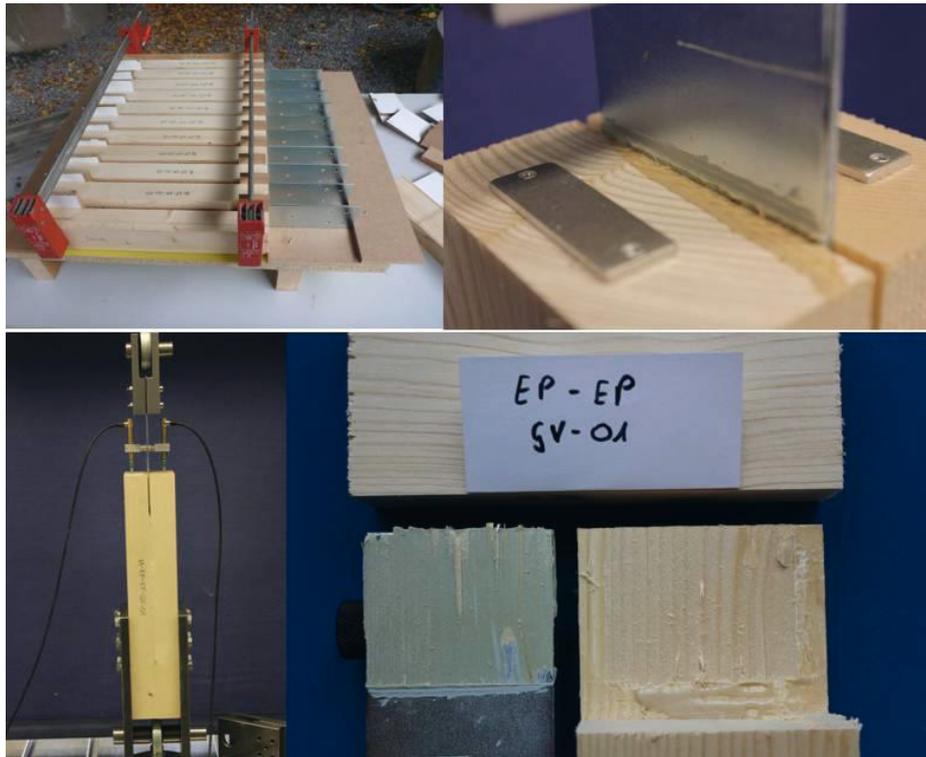


Bild 2-16: VR 1A, Probekörper EP-EP-GV-01, Versagen EP-Fuge unten



Bild 2-17: VR 1A, Probekörper PUR-PUR-GV-04, Versagen PUR-Fuge unten



Bild 2-18: VR 1A, Probekörper EPI-EPI-GV-05, Versagen EPI-Fuge unten



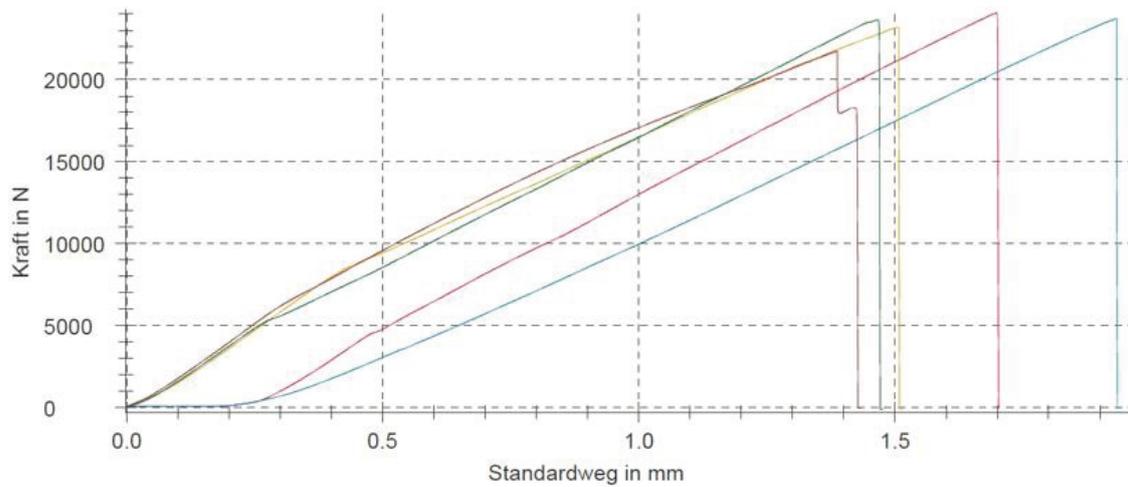
Bild 2-19: VR 1A, Probekörper PUR-PUR-SZ-02, Versagen PUR-Fuge unten



Bild 2-20: VR 1A, Probekörper PUR-PUR-GVrauh-05

## A2.2.4 Ergebnisse von A2.2.3

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

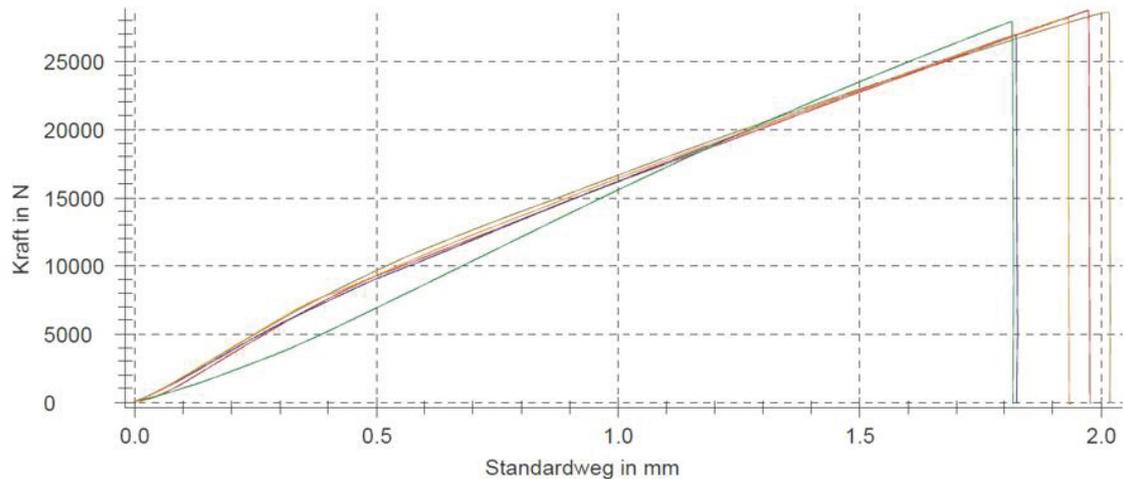
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
	01	24,1	1,7	-0,021	5000
	02	23,7	1,9	-0,019	
	03	23,2	1,5	-0,020	
	04	21,7	1,4	-0,020	
	05	23,6	1,5	-0,019	

### Statistik:

1A-EP-EP--GV n = 5	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
$\bar{x}$	23,3	1,6	-0,020
s	0,919	0,2	0,001
v [%]	3,95	13,74	-4,36

Bild 2-21: Bruchlasten VR 1A: GV-EP-EP

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

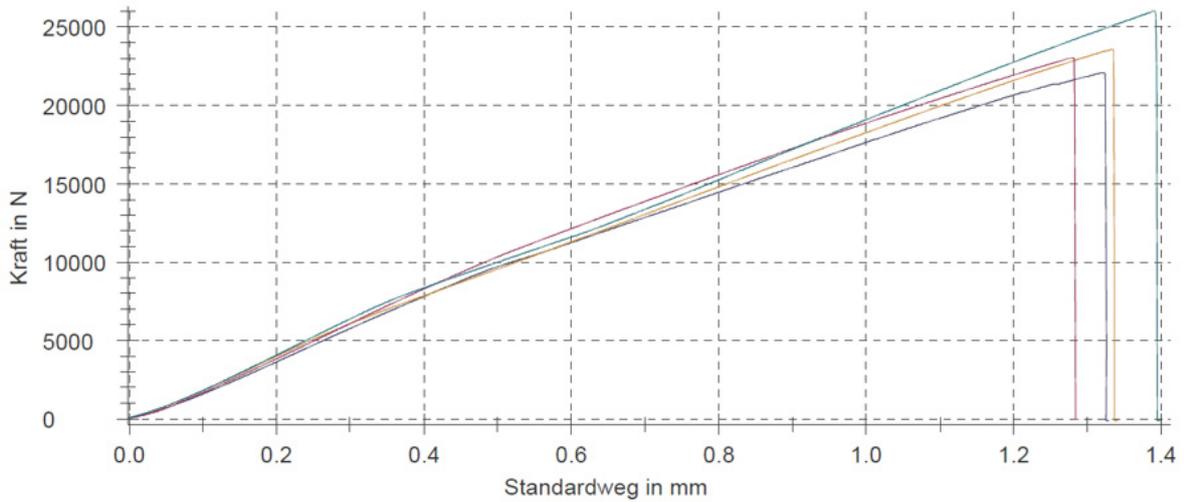
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
	01	28,6	2,0	-0,022	5000
	02	28,7	2,0	-0,024	
	03	27,9	1,8	-0,023	
	04	27,0	1,8	-0,021	
	05	28,1	1,9	-0,022	

### Statistik:

1A-PUR-PUR-GV n = 5	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
$\bar{x}$	28,1	1,9	-0,022
s	0,706	0,1	0,001
v [%]	2,51	4,64	-4,54

Bild 2-22: Bruchlasten VR 1A: GV-PUR-PUR

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
■	01	22,1	1,3	-0,019
■	02	23,6	1,3	-0,022
■	04	23,0	1,3	-0,020
■	05	26,0	1,4	-0,021

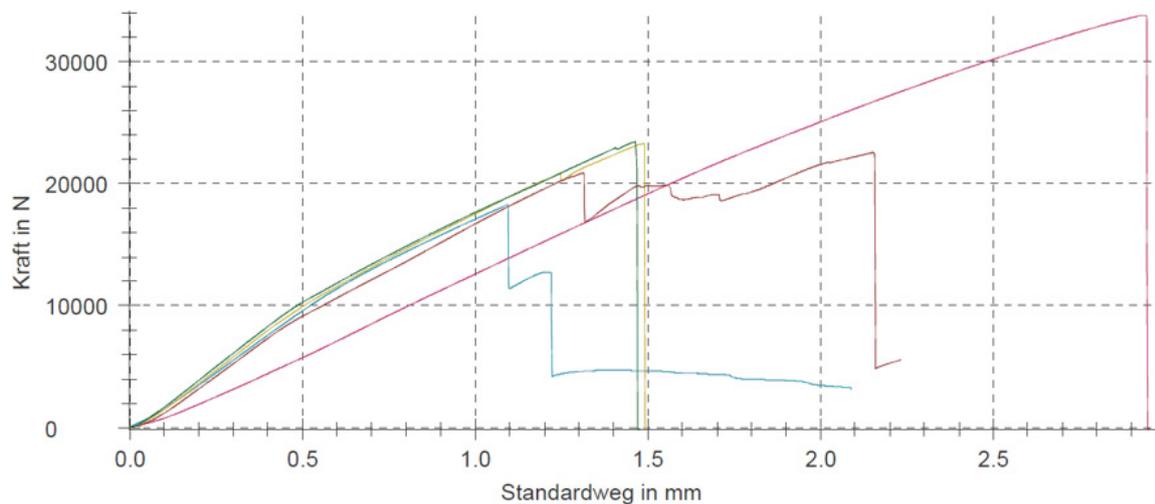
### Statistik:

Vorgabe Kraft N	1A-EPI-EPI-GV n = 4	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
5000	$\bar{x}$	23,7	1,3	-0,020
	s	1,69	0,0	0,001
	v [%]	7,12	3,41	-7,02

Bil

Bild 2-23: Bruchlasten VR 1A: GV-EPI-EPI

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
■	01	33,8	2,9	-0,019
■	02	18,2	1,1	-0,022
■	03	23,3	1,5	-0,020
■	04	22,6	2,2	-0,020
■	05	23,4	1,5	-0,022

### Statistik:

Vorgabe Kraft N	1A-PUR-PUR-SZ n = 5	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
5000	$\bar{x}$	24,3	1,8	-0,021
	s	5,75	0,7	0,001
	v [%]	23,68	39,85	-5,97

Bil

Bild 2-24: Bruchlasten VR 1A: SZ-PUR-PUR

### A2.2.5 Zugversuche – einseitige MUF-Verklebung mit EP als Primer, 50 mm Verbundlänge

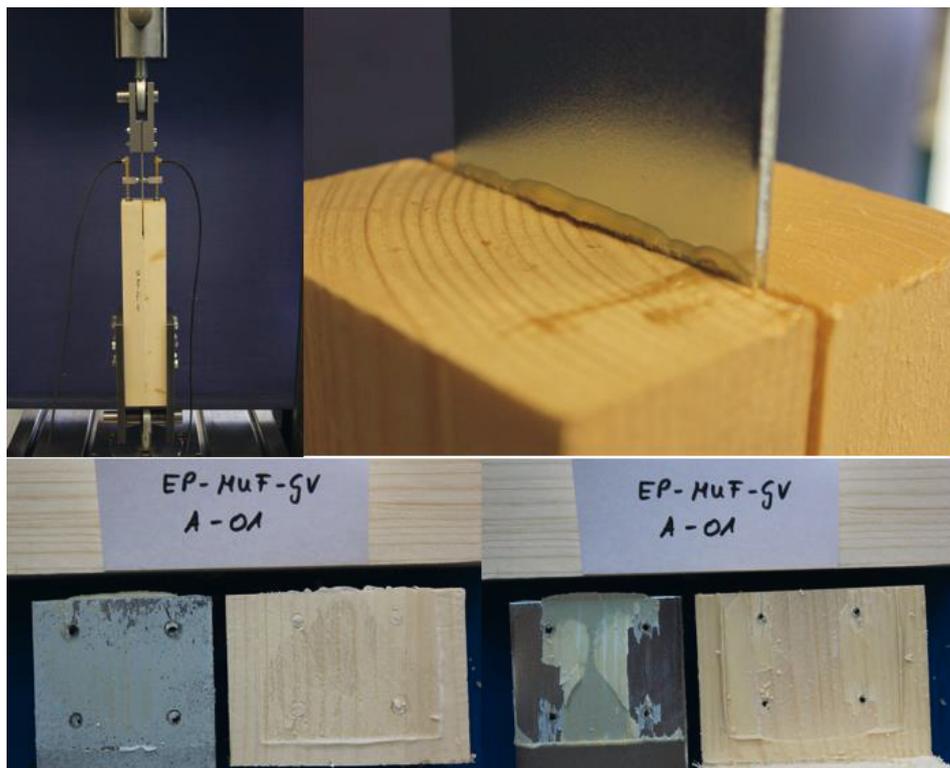


Bild 2-25: VR 1A, Probekörper EP-MUF-GV-A-01 (dünne Primerschicht), links: Versagen MUF-Fuge, rechts: Versagen EP-Fuge

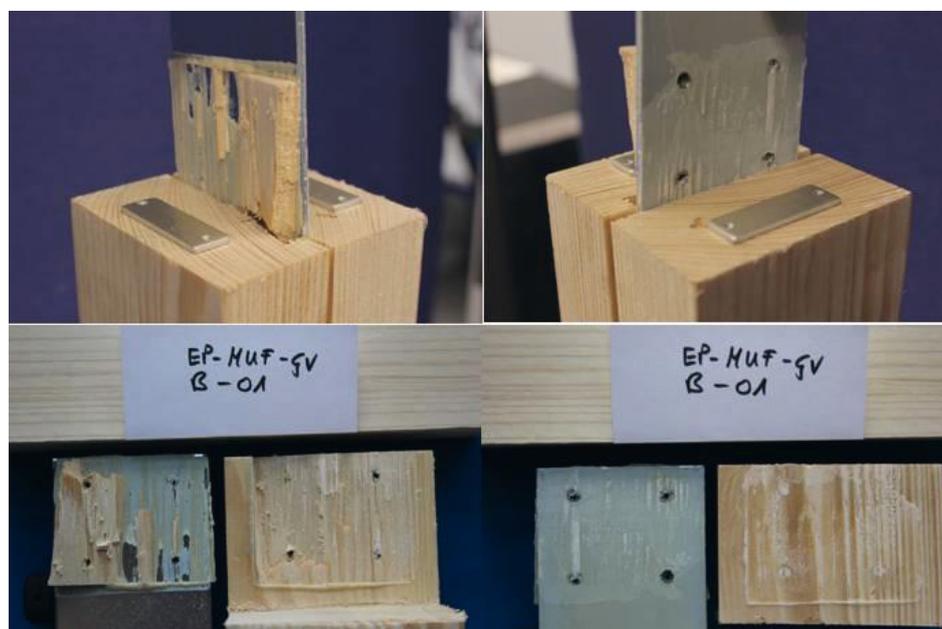


Bild 2-26: VR 1A, Probekörper EP-MUF-GV-B-01 (dicke Primerschicht), links: Versagen EP-Fuge, rechts: Versagen MUF-Fuge

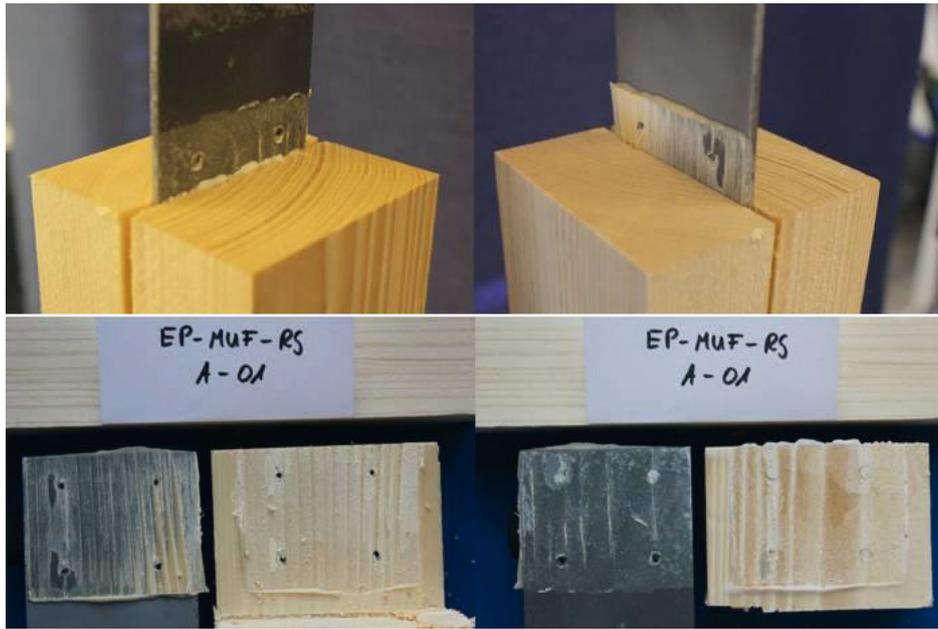


Bild 2-27: VR 1A, Probekörper EP-MUF-RG-A-01 (dünne Primerschicht), links: Versagen EP-Fuge, rechts: Versagen MUF-Fuge

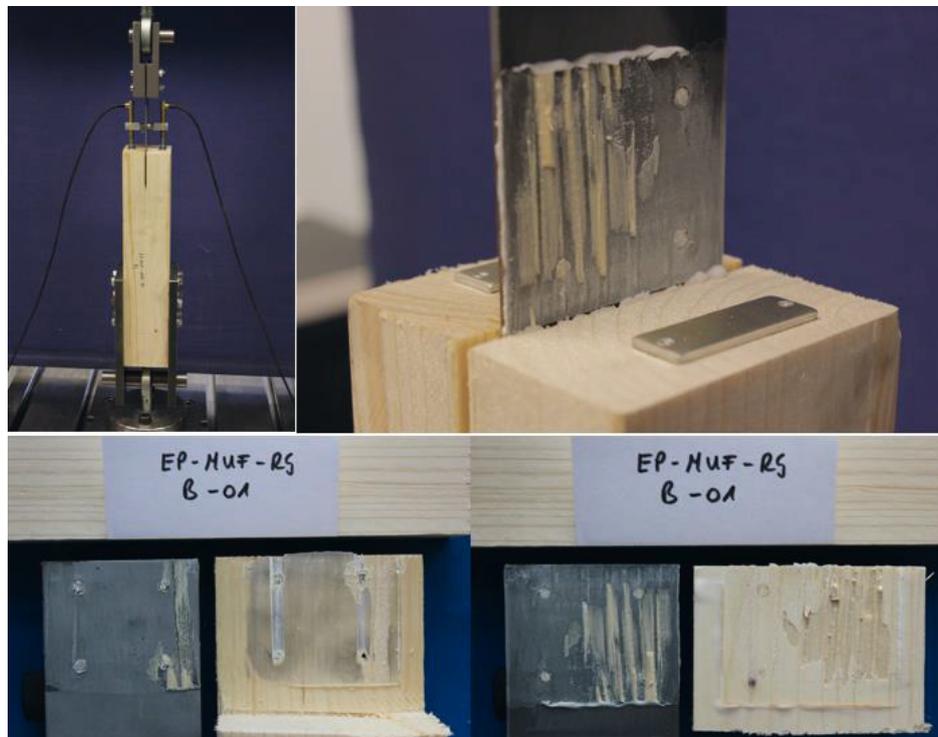
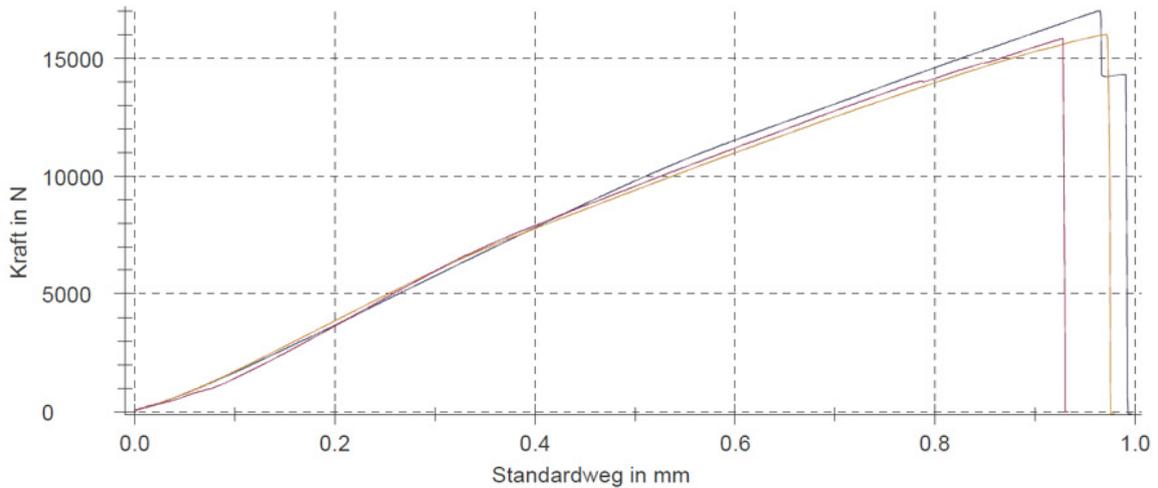


Bild 2-28: VR 1A, Probekörper EP-MUF-RG-B-01 (dicke Primerschicht), links: Versagen EP-Fuge, rechts: Versagen MUF-Fuge

## A2.2.6 Ergebnisse von A2.2.5

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

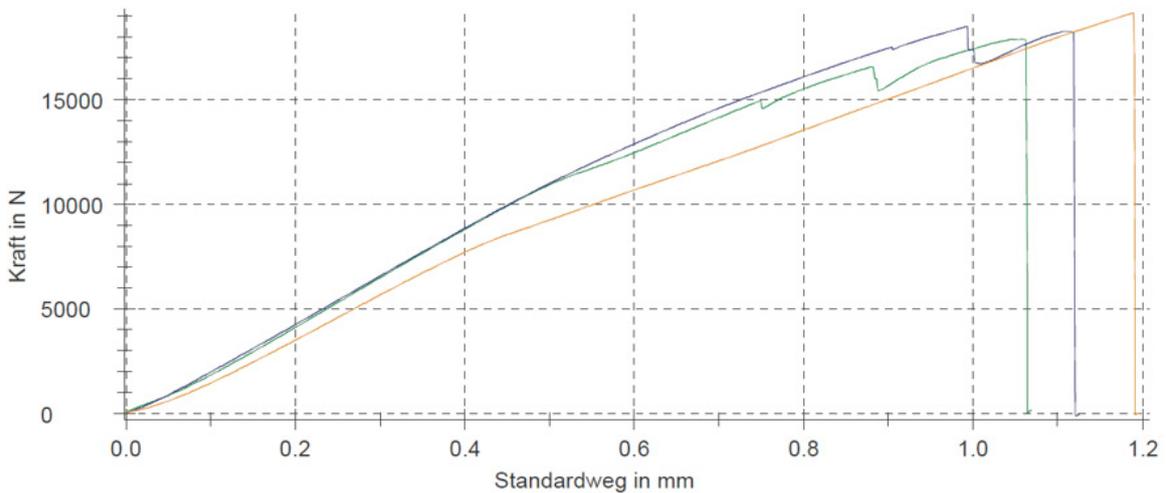
Legende	Probenbezeichnung	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
■	01	17,0	1,0	-0,021	5000
■	02	16,0	1,0	-0,020	
■	03	15,8	0,9	-0,023	

### Statistik:

EP-MUF-GV-A	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm	MW-Weta(XXXX N) mm
n = 3			
$\bar{x}$	16,3	1,0	-0,021
s	0,640	0,0	0,001
v [%]	3,93	2,46	-6,95

Bild 2-29: Bruchlasten VR 1A: GV-EP-MUF-dünn

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

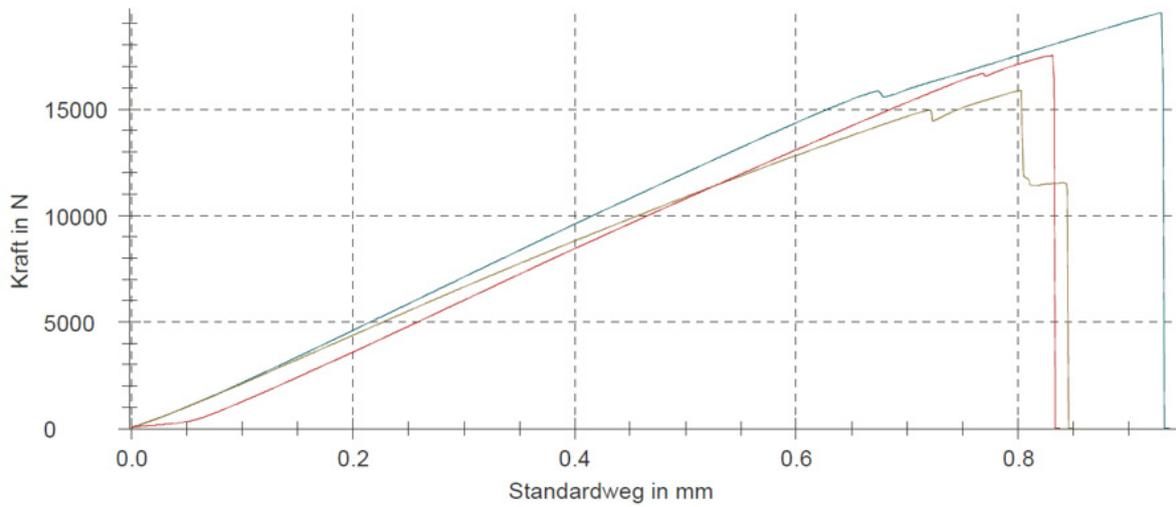
Legende	Probenbezeichnung	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
■	01	17,9	1,0	-0,019	5000
■	02	18,5	1,0	-0,021	
■	03	19,2	1,2	-0,023	

### Statistik:

EP-MUF-GV-B	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm	MW-Weta(XXXX N) mm
n = 3			
$\bar{x}$	18,5	1,1	-0,021
s	0,629	0,1	0,002
v [%]	3,40	9,46	-9,03

Bild 2-30: Bruchlasten VR 1A: GV-EP-MUF-dick

### Seriengrafik:



### Statistik:

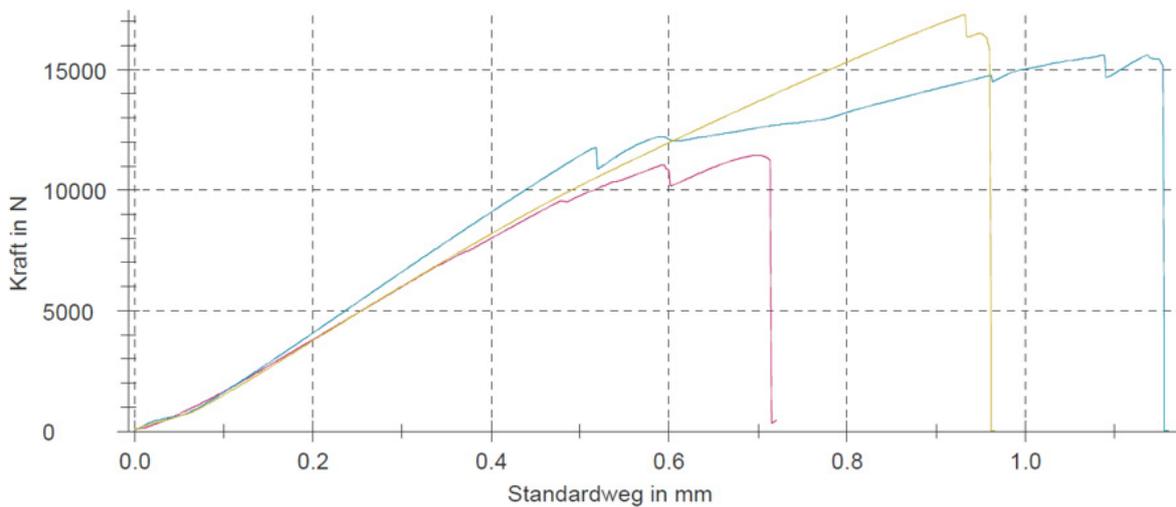
#### Prüfergebnisse:

Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
<span style="color: blue;">■</span>	01	19,5	0,9	-0,019	5000
<span style="color: yellow;">■</span>	02	15,9	0,8	-0,021	
<span style="color: red;">■</span>	03	17,5	0,8	-0,019	

EP-MUF-RG-A	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
n = 3			
$\bar{x}$	17,6	0,9	-0,020
s	1,83	0,1	0,001
v [%]	10,37	7,79	-6,20

Bild 2-31: Bruchlasten VR 1A: RG-EP-MUF-dünn

### Seriengrafik:



### Statistik:

#### Prüfergebnisse:

Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
<span style="color: magenta;">■</span>	01	11,5	0,7	-0,025	5000
<span style="color: blue;">■</span>	02	15,6	1,1	-0,014	
<span style="color: yellow;">■</span>	03	17,3	0,9	-0,020	

EP-MUF-RG-B	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
n = 3			
$\bar{x}$	14,8	0,9	-0,020
s	3,01	0,2	0,005
v [%]	20,37	23,76	-26,74

Bild 2-32: Bruchlasten VR 1A: RG-EP-MUF-dick

A2.2.7 Zugversuche – Vorbehandlung der Bleche mit Primer Jowat Typ 409.12



Bild 2-33: VR 1A, Probekörper EP-RG-P-01

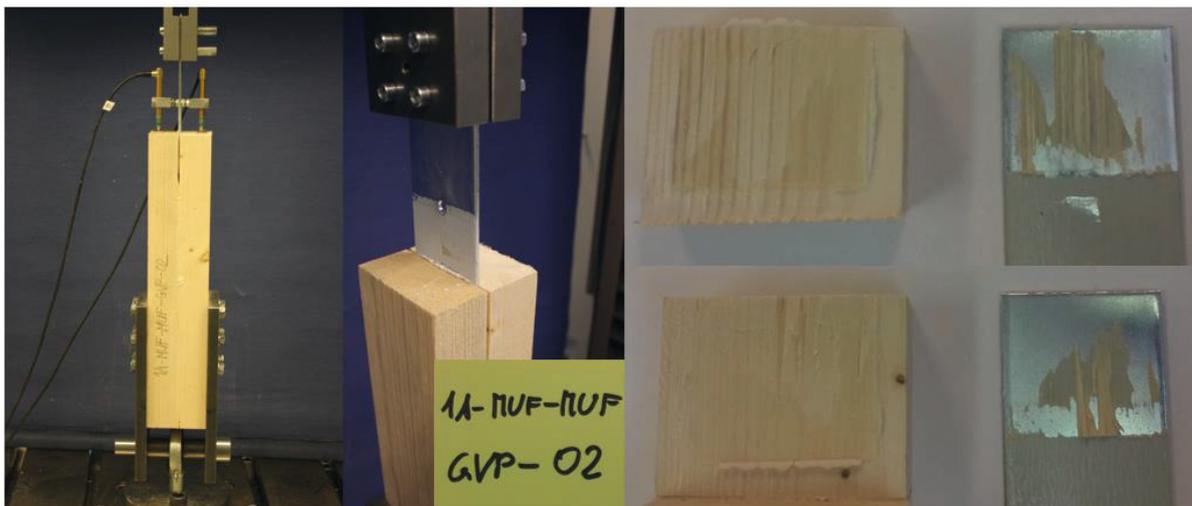


Bild 2-34: VR 1A, Probekörper MUF-MUF-GV-P-02

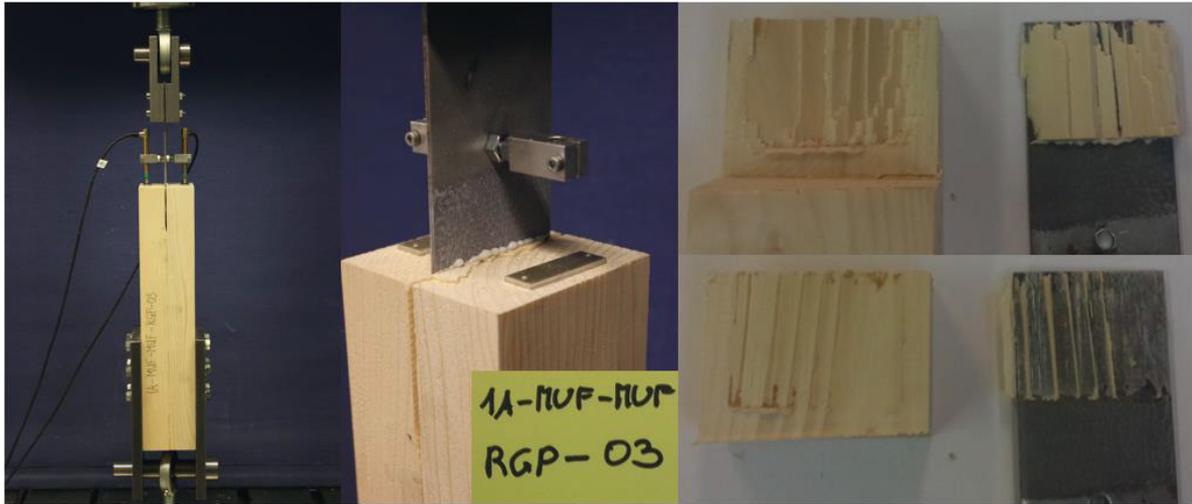


Bild 2-35: VR 1A, Probekörper MUF-MUF-RG-P-03

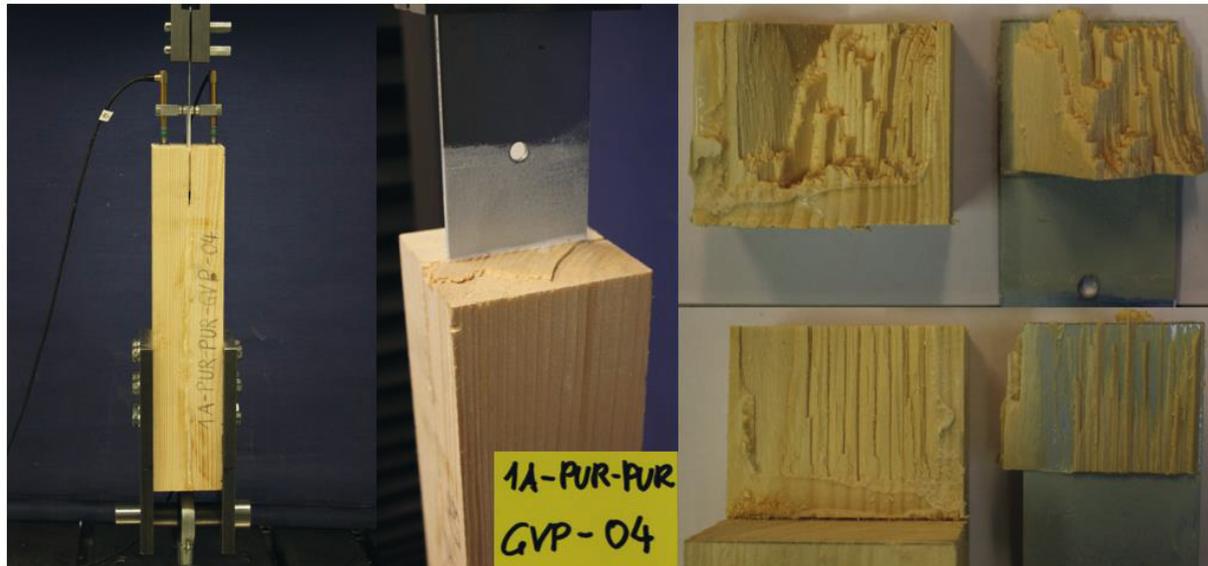
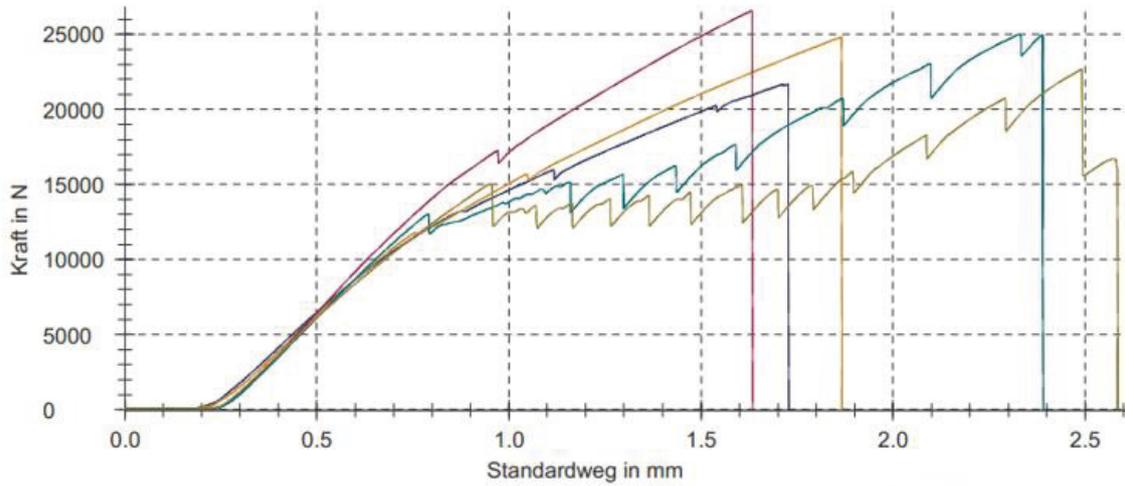


Bild 2-36: VR 1A, Probekörper PUR-PUR-GV-P-04

## A2.2.8 Ergebnisse von A2.2.7

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

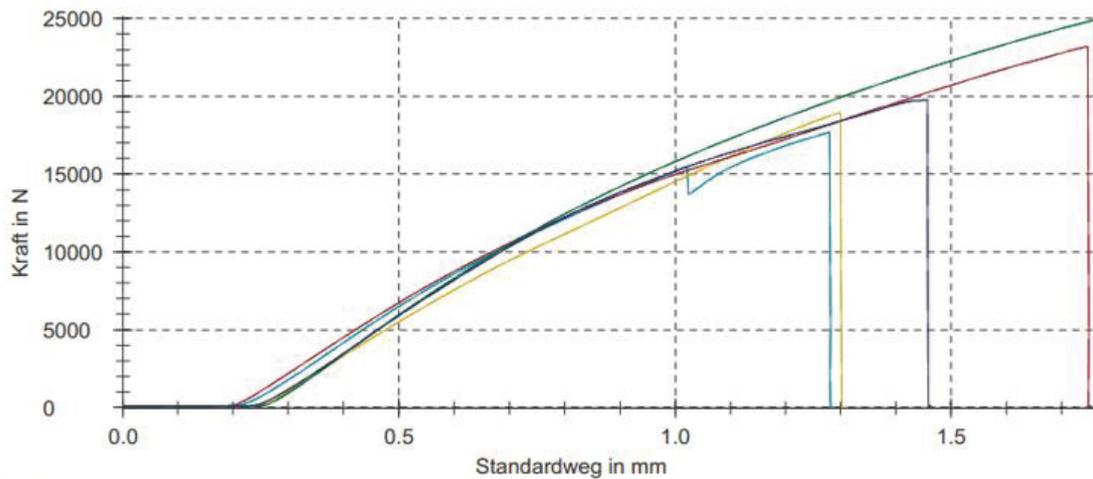
Legende	Probenbezeichnung	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm	Kommentar
	01	21,7	1,7	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
	02	24,8	1,9	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
	03	26,6	1,6	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
	04	25,0	2,3	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
	05	22,7	2,5	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min

### Statistik:

MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm	1A-EP-RGP n = 5	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm
5000	-	$\bar{x}$	24,2	2,0
-	-	s	1,96	0,4
-	-	v [%]	8,12	19,04

Bild 2-37: Bruchlasten VR 1A: EP-RG-P

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

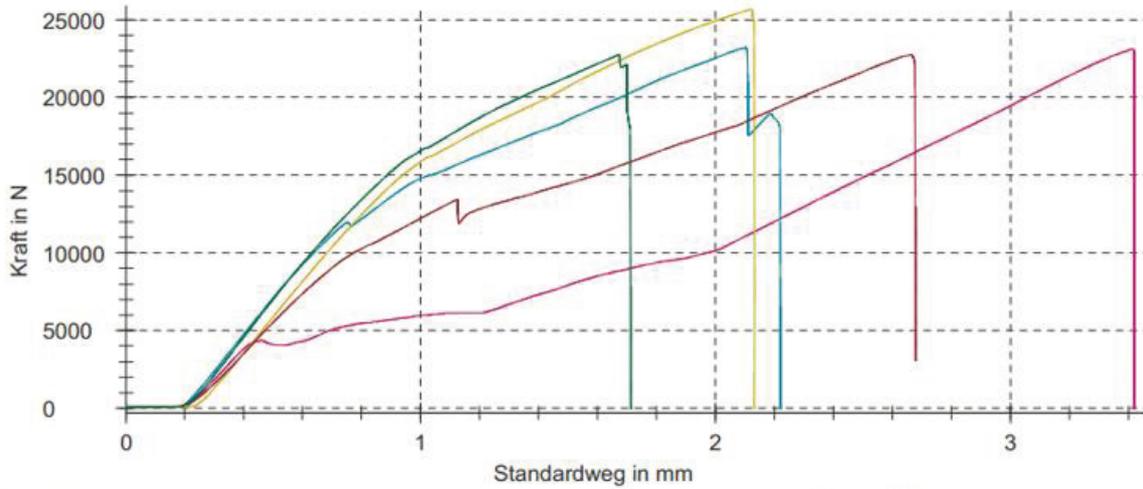
Legende	Probenbezeichnung	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm	Kommentar
	01	17,7	1,3	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
	02	19,0	1,3	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
	03	23,2	1,7	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
	04	24,9	1,8	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
	05	19,8	1,5	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min

### Statistik:

MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm	1A-MUF-MUF-GVP n = 5	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm
5000	-	$\bar{x}$	20,9	1,5
-	-	s	3,02	0,2
-	-	v [%]	14,46	15,50

Bild 2-38: Bruchlasten VR 1A: MUF-MUF-GV-P

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

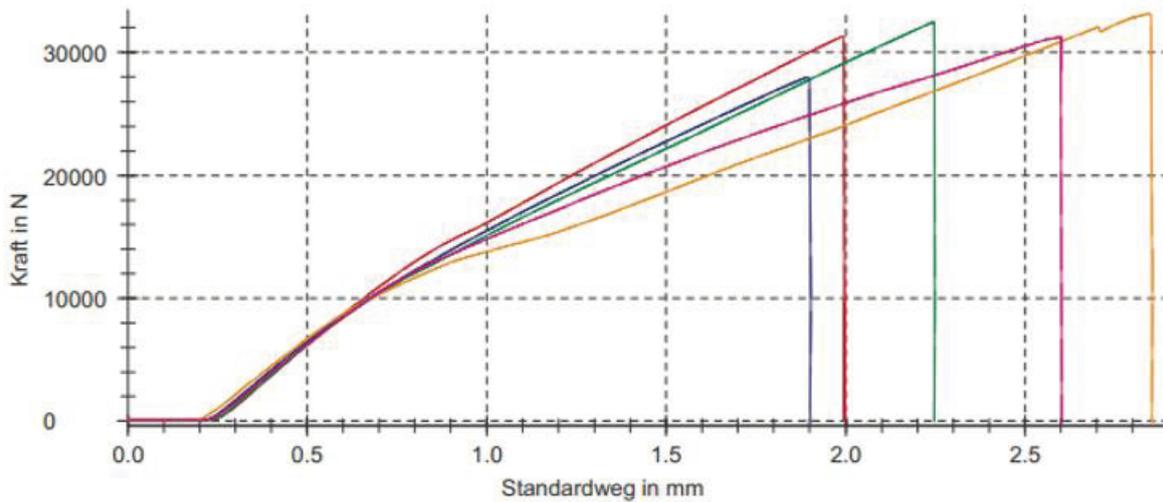
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	Kommentar
01	01	23,1	3,4	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
02	02	23,2	2,1	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
03	03	25,6	2,1	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
04	04	22,7	2,7	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
05	05	22,8	1,7	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min

### Statistik:

MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm	1A-MUF-MUF-RGP n = 5	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm
5000	-	x	23,5	2,4
-	-	s	1,23	0,7
-	-	v [%]	5,22	27,89

Bild 2-39: Bruchlasten VR 1A: MUF-MUF-RG-P

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

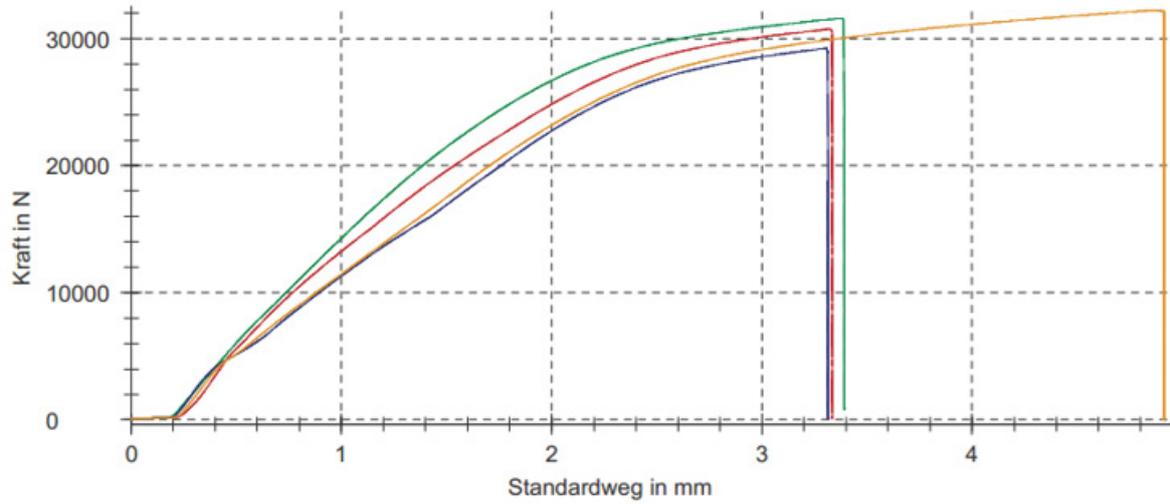
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	Kommentar
01	01	31,3	2,0	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
02	02	32,5	2,2	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
03	03	28,0	1,9	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
04	04	33,2	2,8	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
05	05	31,2	2,6	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min

### Statistik:

MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm	1A-PUR-PUR-GVP n = 5	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm
5000	-	x	31,2	2,3
-	-	s	1,99	0,4
-	-	v [%]	6,38	17,32

Bild 2-40: Bruchlasten VR 1A: PUR-PUR-GV-P

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	Kommentar
<span style="color: red;">■</span>	02	30,8	3,3	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
<span style="color: green;">■</span>	03	31,6	3,4	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
<span style="color: blue;">■</span>	04	29,2	3,3	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
<span style="color: orange;">■</span>	05	32,2	4,9	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min

### Statistik:

MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm	A1-PUR-PUR-GVrau n = 4	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm
5/12/2017 11:42:09 AM	Optionen -	$\bar{x}$	31,0	3,7
Probekörper 01 Fmax 31,8 kN Prüfgeschwindigkeit: 50 mm/min		s	1,30	0,8
		v [%]	4,19	20,76

Bild 2-41: Bruchlasten VR 1A: PUR-PUR-GVrau

### A2.3 Versuchsreihe 1B – Wasserlagerung I



Bild 2-42: Probekörper (B=40 mm) nach dritter Wasserlagerung

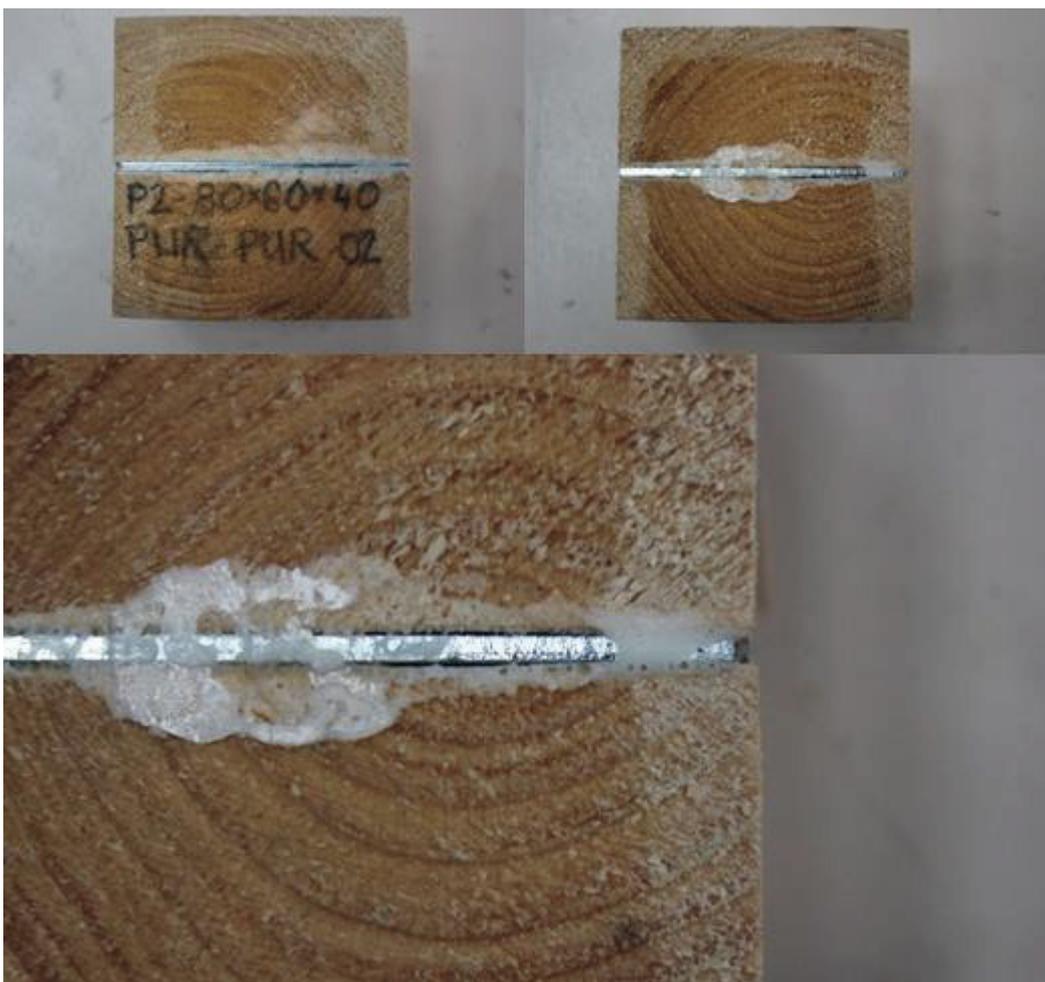


Bild 2-43: Probekörper (B=80 mm) nach dritter Wasserlagerung



Bild 2-44: Probekörper (B=160 mm) nach erster Trocknung

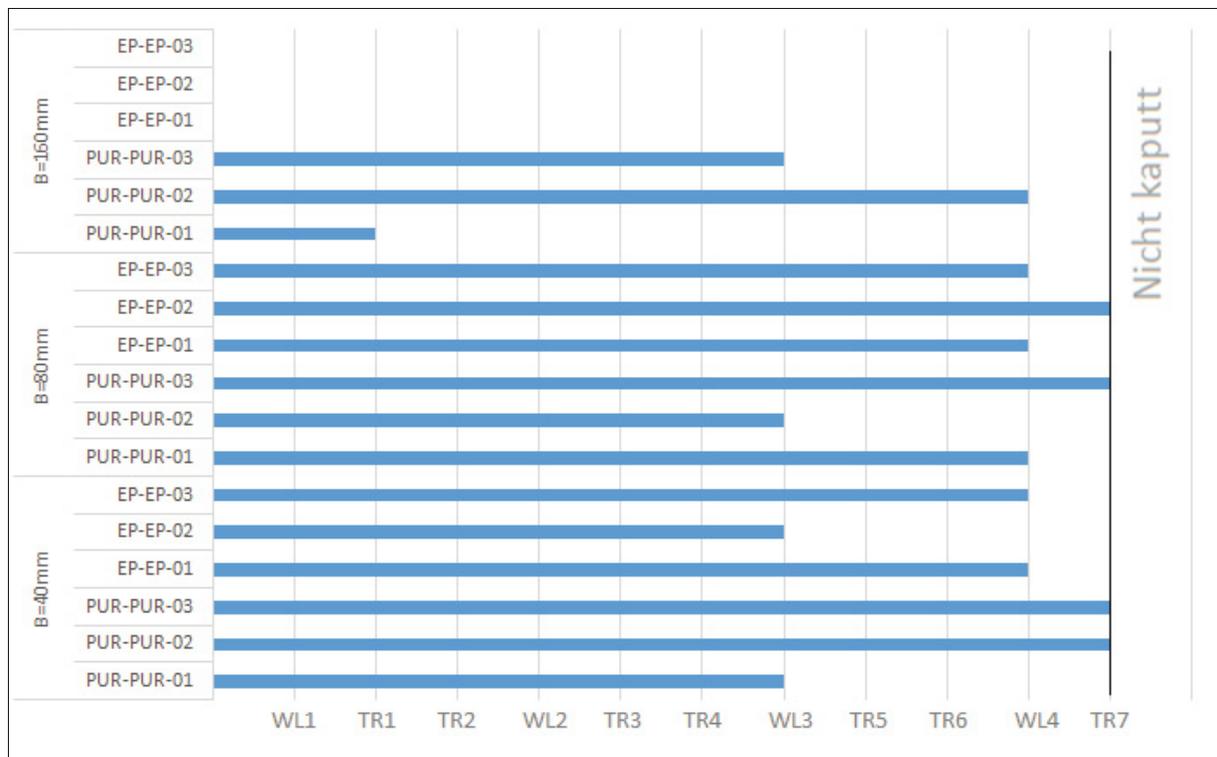


Bild 2-45: Ergebnisse der Wasserlagerung I

## A2.4 Versuchsreihe 1B – Wasserlagerung II



Bild 2-46: Vorbereitung der Proben für Wasserlagerung II



Bild 2-47: MUF-MUF-P-RG (B=40 mm) nach Wasserlagerung II (kaputt nach zweite Zyklus)



Bild 2-48: PUR-PUR-GVrau (B=40 mm) nach Wasserlagerung II (kaputt nach neunten Zyklus)

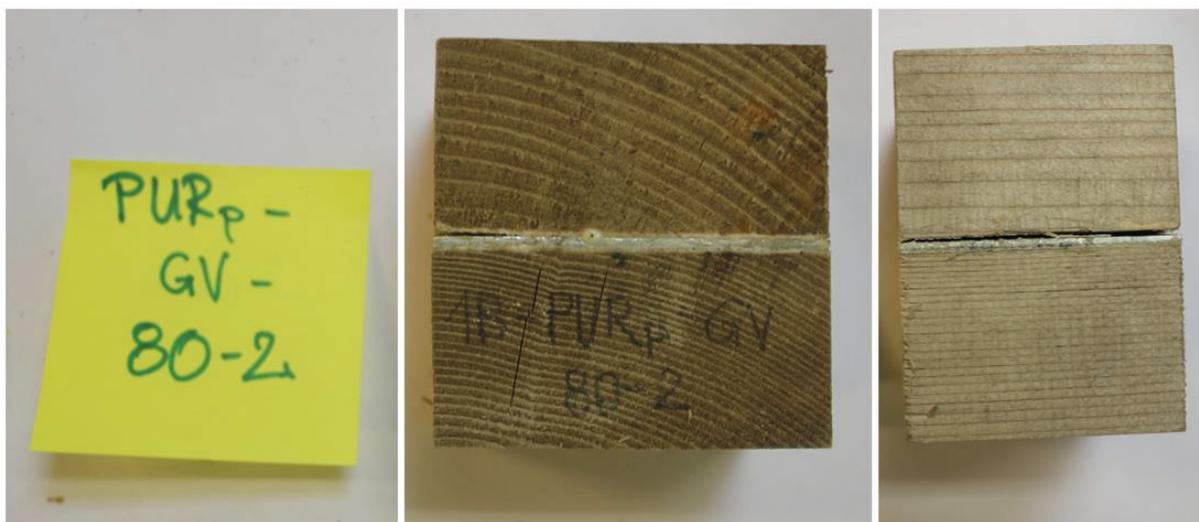


Bild 2-49: PUR-PUR-P-GV (B=80 mm) nach Wasserlagerung II (kaputt nach neunten Zyklus)

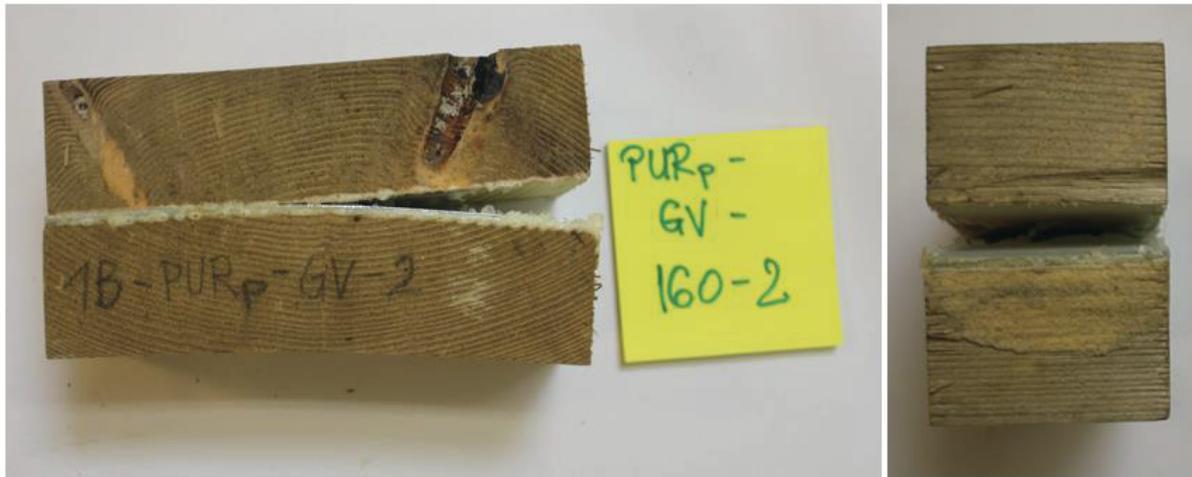


Bild 2-50: PUR-PUR-P-GV (B=160 mm) nach Wasserlagerung II (kaputt nach neunten Zyklus)



Bild 2-51: MUF-MUF-P-RG (B=160 mm) nach Wasserlagerung II (kaputt nach zweiten Zyklus)



Bild 2-52: MUF-MUF-P-GVrau (B=160 mm) nach Wasserlagerung II (kaputt nach zweiten Zyklus)

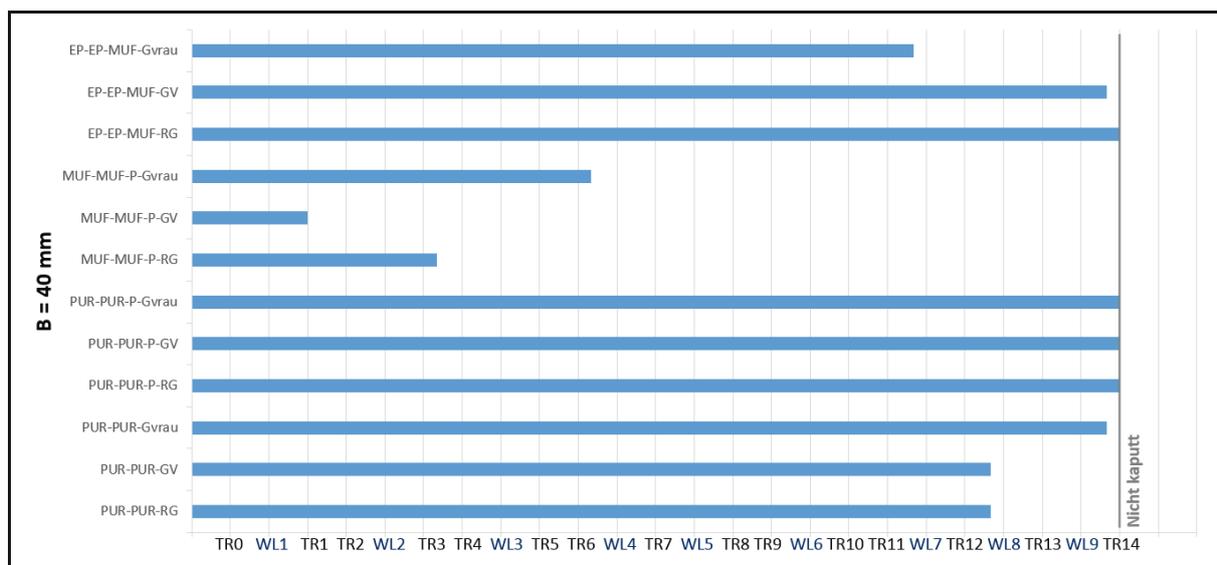


Bild 2-53: Ergebnisse der Wasserlagerung II für B = 40 mm



A2.5 Versuchsreihe 1B – Heißwasserlagerung Nach DIN EN 302-1, Behandlungsart A5



Bild 2-56: Vorbereitung und Prüfung der Proben für Heißwasserlagerung

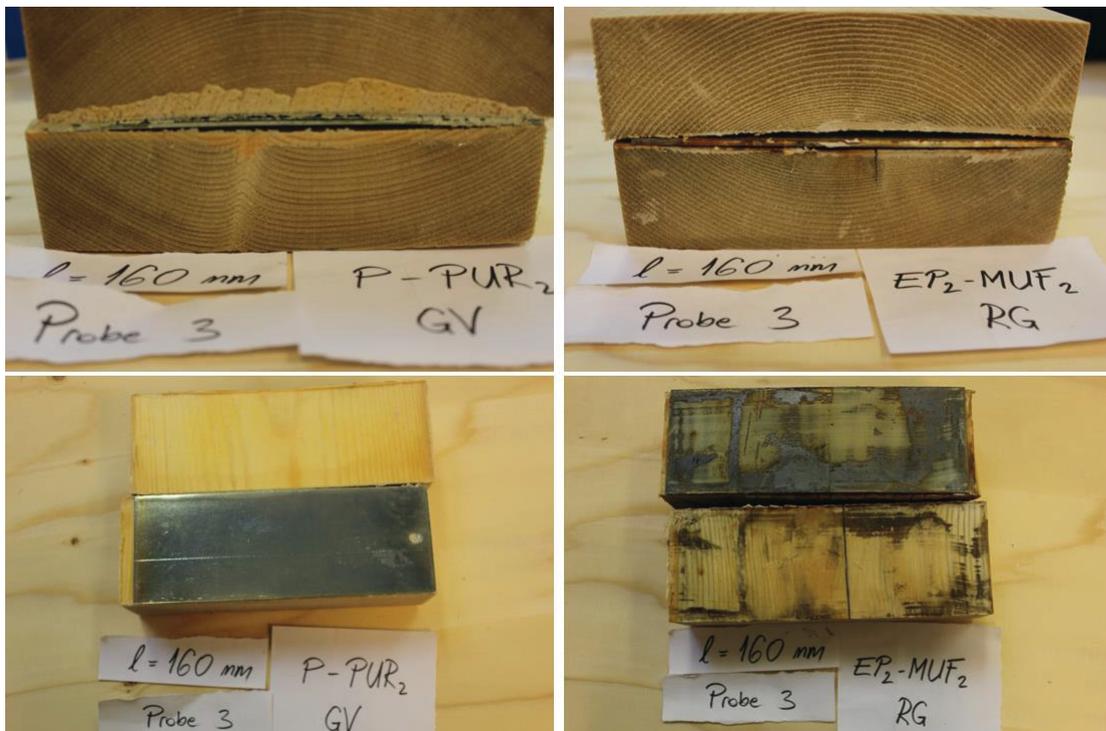


Bild 2-57: Probekörper (B=160 mm) nach Heißwasserlagerung

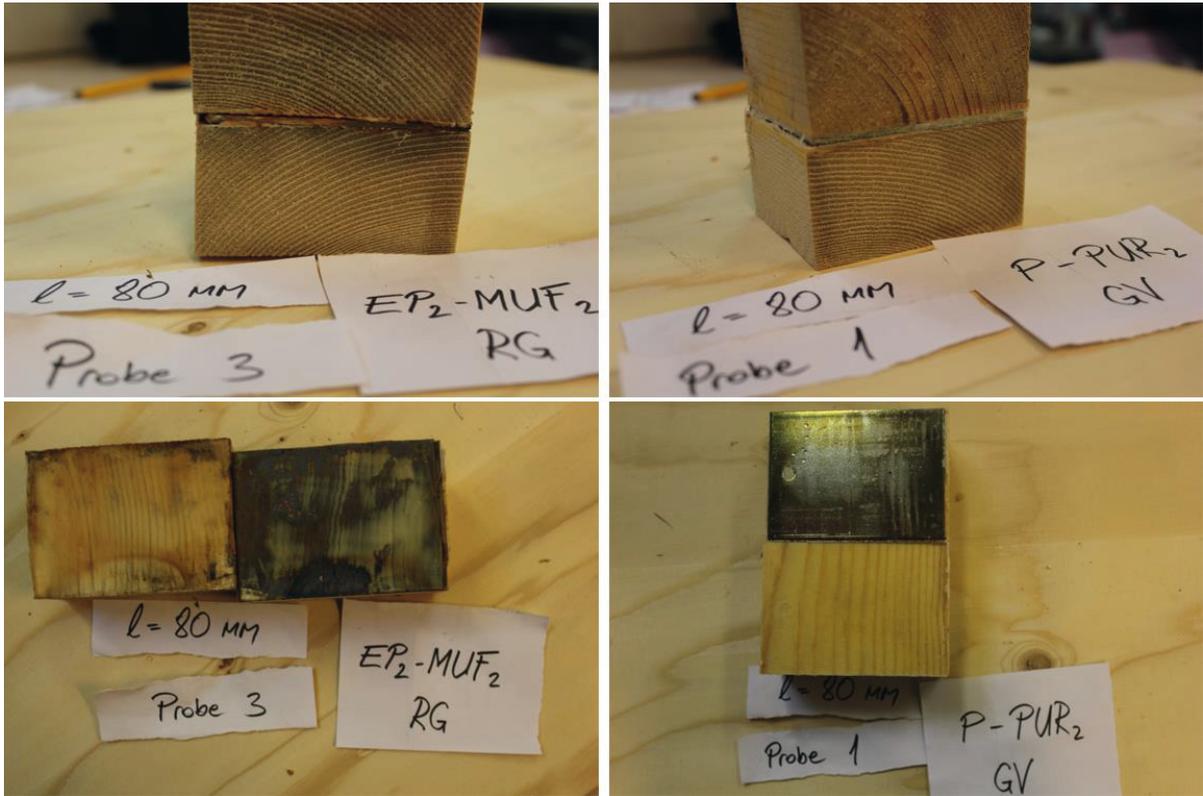


Bild 2-58: Probekörper (B=80 mm) nach Heißwasserlagerung

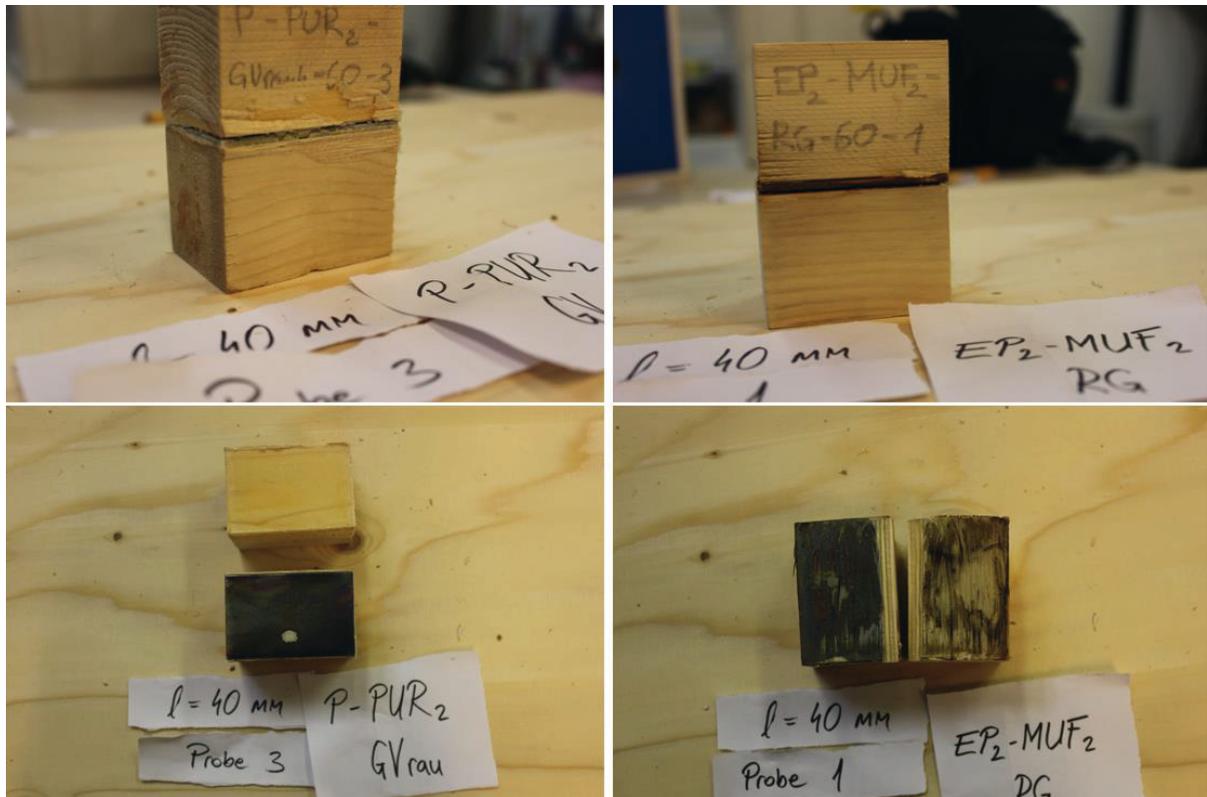


Bild 2-59: Probekörper (B=40 mm) nach Heißwasserlagerung

## A2.6 Versuchsreihe 1C – Zugversuche mit unterschiedlichen Verbundlängen



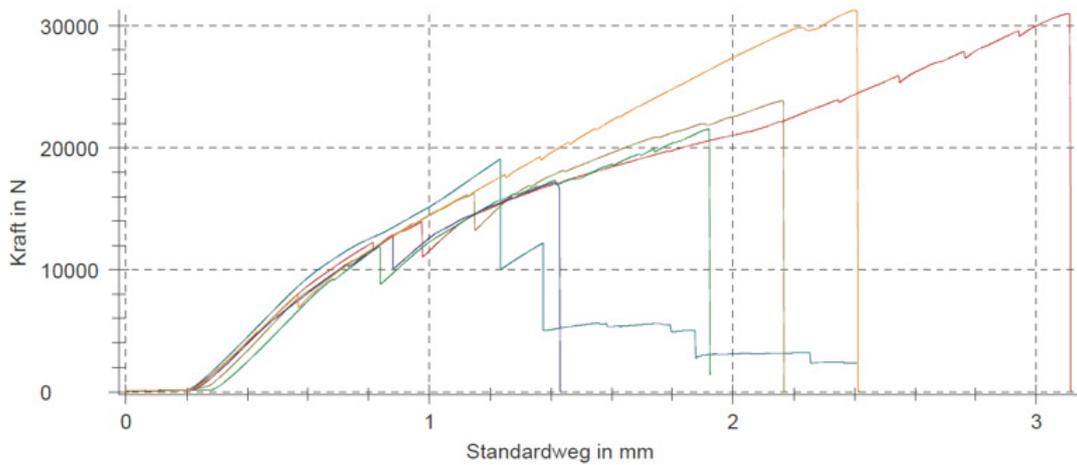
Bild 2-60: PUR-GV-100 mm Verbundlänge



Bild 2-61: PUR-GV-200 mm Verbundlänge

## A2.6.1 Ergebnisse von Versuchsreihe 1C

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

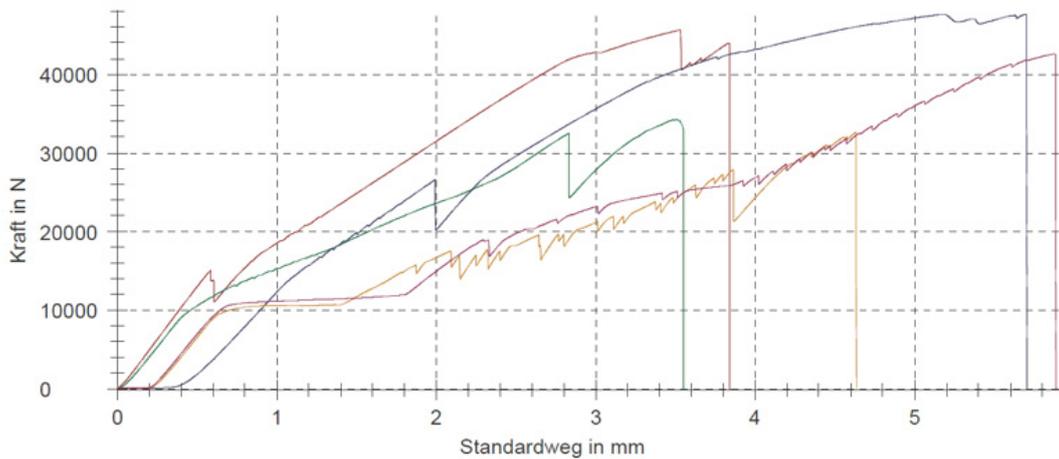
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
	01	19,1	1,2	0,017
	02	23,9	2,2	0,017
	03	31,0	3,1	0,017
	04	21,5	1,9	0,016
	05	17,1	1,4	0,019
	06	31,3	2,4	0,026

### Statistik:

Vorgabe Kraft N	1C-PUR-GV-100	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
5000	n = 6			
	x	24,0	2,0	0,019
	s	6,00	0,7	0,004
	v [%]	25,02	33,59	19,84

Bild 2-62: Bruchlasten VR 1C: PUR-GV-100 mm Verbundlänge

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
	01	24,8	4,6	0,016
	05	45,7	3,5	0,015
	03	34,3	3,5	0,016
	04	47,7	5,2	0,015
	02	32,7	4,6	0,016
	06	42,6	5,9	0,019

### Statistik:

Vorgabe Kraft N	1C-PUR-GV-200	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
5000	n = 5			
	x	40,6	4,5	0,016
	s	6,76	1,0	0,002
	v [%]	16,66	22,76	10,52

Bild 2-63: Bruchlasten VR 1C: PUR-GV-200 mm Verbundlänge

## A2.7 Versuchsreihe 1E – Zugscherfestigkeit Blech-Blech-Verklebung



Bild 2-64: Probekörper RG-EP



Bild 2-65: Probekörper RG-PUR



Bild 2-66: ProbekörperGV-EP



Bild 2-67: Probekörper GV-PUR

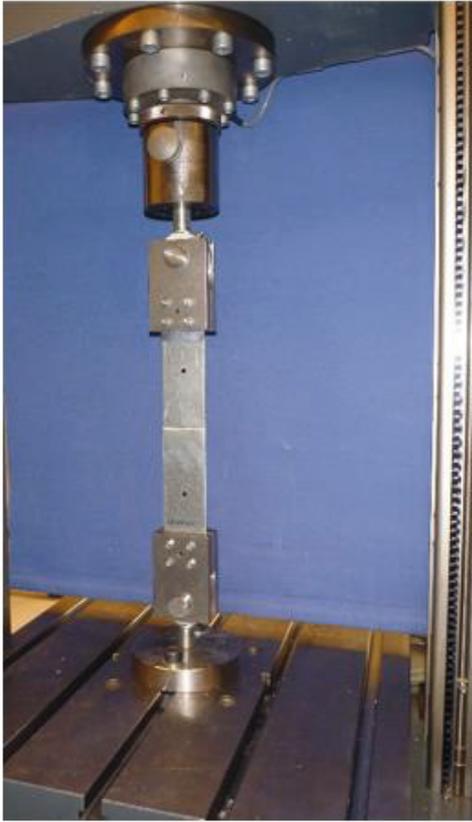


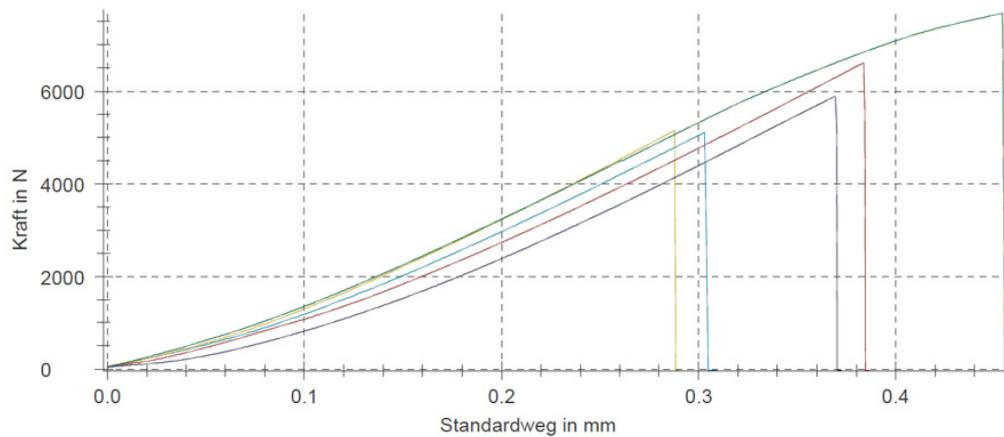
Bild 2-68: Probekörper SZ-EP



Bild 2-69: Probekörper SZ-PUR

## A2.7.1 Ergebnisse von Versuchsreihe 1E

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

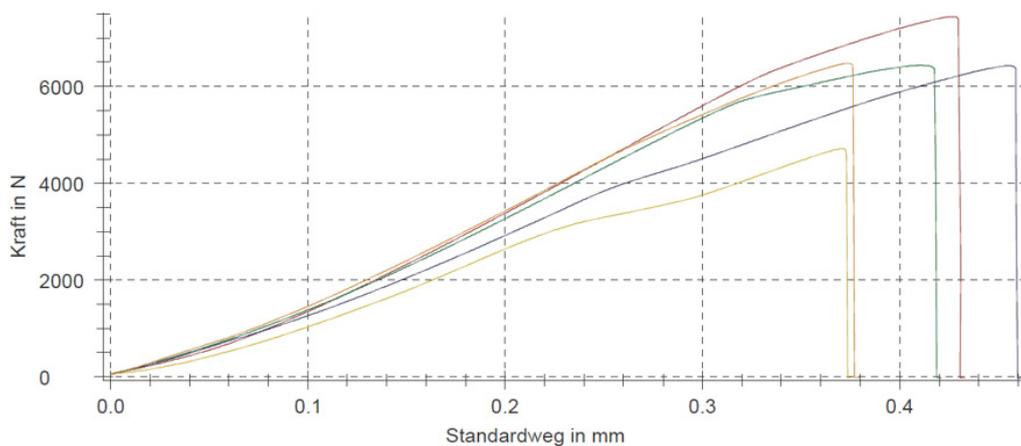
Legende	Probenbezeichnung	$F_{\max}$ kN	$dL(F_{\max})$ mm
<span style="color: blue;">■</span>	GV-EP-01	5,11	0,3
<span style="color: yellow;">■</span>	GV-EP-02	5,15	0,3
<span style="color: red;">■</span>	GV-EP-03	6,62	0,4
<span style="color: green;">■</span>	GV-EP-04	7,68	0,5
<span style="color: darkblue;">■</span>	GV-EP-05	5,89	0,4

### Statistik:

GV-EP n = 5	$F_{\max}$ kN	$dL(F_{\max})$ mm
$\bar{x}$	6,09	0,4
s	1,08	0,1
v [%]	17,78	18,63

Bild 2-70: Bruchlasten VR 1E: GV-EP

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

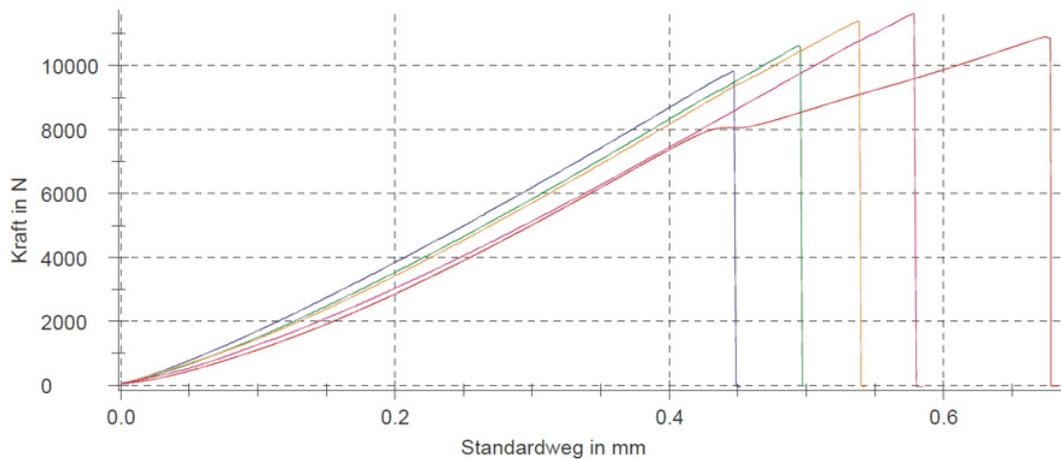
Legende	Probenbezeichnung	$F_{\max}$ kN	$dL(F_{\max})$ mm
<span style="color: yellow;">■</span>	GV-PUR-01	4,71	0,4
<span style="color: red;">■</span>	GV-PUR-02	7,44	0,4
<span style="color: green;">■</span>	GV-PUR-03	6,43	0,4
<span style="color: blue;">■</span>	GV-PUR-04	6,42	0,5
<span style="color: orange;">■</span>	GV-PUR-05	6,47	0,4

### Statistik:

GV-PUR n = 5	$F_{\max}$ kN	$dL(F_{\max})$ mm
$\bar{x}$	6,29	0,4
s	0,986	0,0
v [%]	15,66	8,78

Bild 2-71: Bruchlasten VR 1E: GV-PUR

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

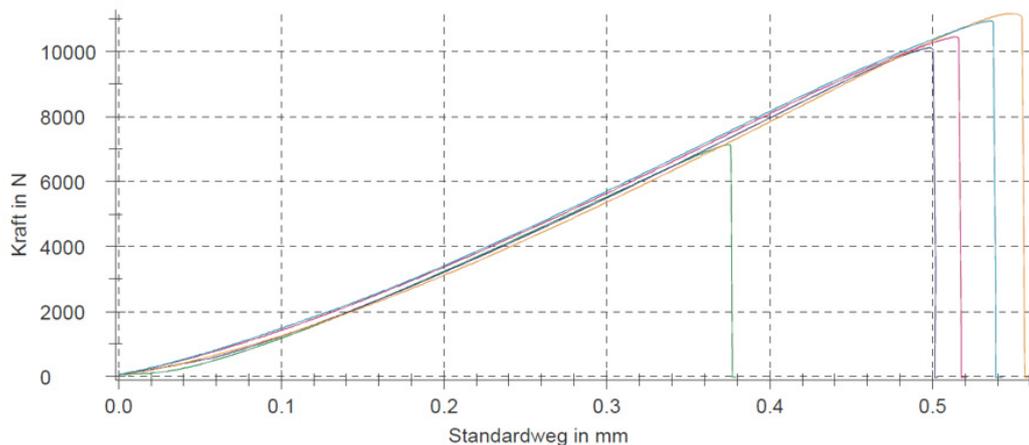
Legende	Probenbezeichnung	$F_{\max}$ kN	$dL(F_{\max})$ mm
<span style="color: red;">■</span>	RG-EP-01	10,9	0,7
<span style="color: green;">■</span>	RG-EP-02	10,6	0,5
<span style="color: blue;">■</span>	RG-EP-03	9,82	0,4
<span style="color: orange;">■</span>	RG-EP-04	11,4	0,5
<span style="color: magenta;">■</span>	RG-EP-05	11,6	0,6

### Statistik:

RG-EP n = 5	$F_{\max}$ kN	$dL(F_{\max})$ mm
$\bar{x}$	10,9	0,5
s	0,711	0,1
v [%]	6,53	15,84

Bild 2-72: Bruchlasten VR 1E: RG-EP

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

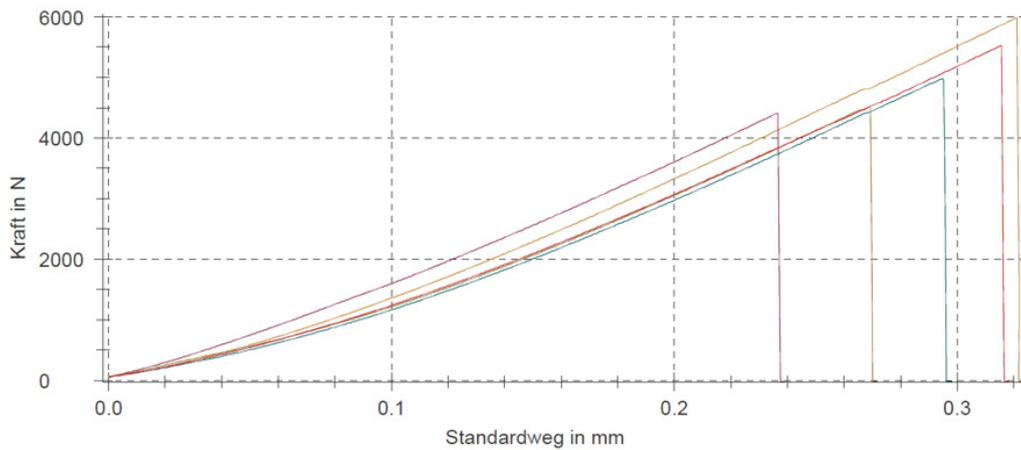
Legende	Probenbezeichnung	$F_{\max}$ kN	$dL(F_{\max})$ mm
<span style="color: green;">■</span>	RG-PUR-01	7,13	0,4
<span style="color: blue;">■</span>	RG-PUR-02	10,1	0,5
<span style="color: orange;">■</span>	RG-PUR-03	11,2	0,5
<span style="color: magenta;">■</span>	RG-PUR-04	10,4	0,5
<span style="color: cyan;">■</span>	RG-PUR-05	10,9	0,5

### Statistik:

RG-PUR n = 5	$F_{\max}$ kN	$dL(F_{\max})$ mm
$\bar{x}$	9,96	0,5
s	1,63	0,1
v [%]	16,39	14,10

Bild 2-73: Bruchlasten VR 1E: RG-PUR

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

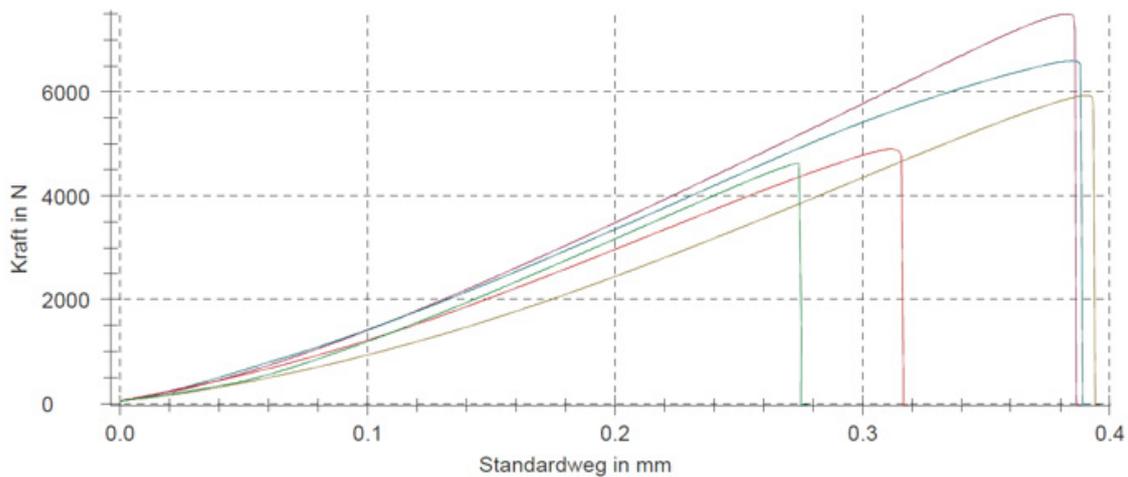
Legende	Probenbezeichnung	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm
<span style="color: #C8513E;">■</span>	SZ-EP-01	5,98	0,3
<span style="color: #800080;">■</span>	SZ-EP-02	4,40	0,2
<span style="color: #008080;">■</span>	SZ-EP-03	4,97	0,3
<span style="color: #808000;">■</span>	SZ-EP-04	4,51	0,3
<span style="color: #D62728;">■</span>	SZ-EP-05	5,52	0,3

### Statistik:

SZ-EP n = 5	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm
$\bar{x}$	5,08	0,3
s	0,671	0,0
v [%]	13,22	12,17

Bild 2-74: Bruchlasten VR 1E: SZ-EP

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

Legende	Probenbezeichnung	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm
<span style="color: #800080;">■</span>	SZ-PUR-01	7,49	0,4
<span style="color: #008080;">■</span>	SZ-PUR-02	6,59	0,4
<span style="color: #808000;">■</span>	SZ-PUR-03	5,93	0,4
<span style="color: #D62728;">■</span>	SZ-PUR-04	4,90	0,3
<span style="color: #008000;">■</span>	SZ-PUR-05	4,63	0,3

### Statistik:

SZ-PUR n = 5	$F_{max}$ kN	$dL(F_{max})$ mm
$\bar{x}$	5,91	0,3
s	1,19	0,1
v [%]	20,12	15,17

Bild 2-75: Bruchlasten VR 1E: SZ-PUR

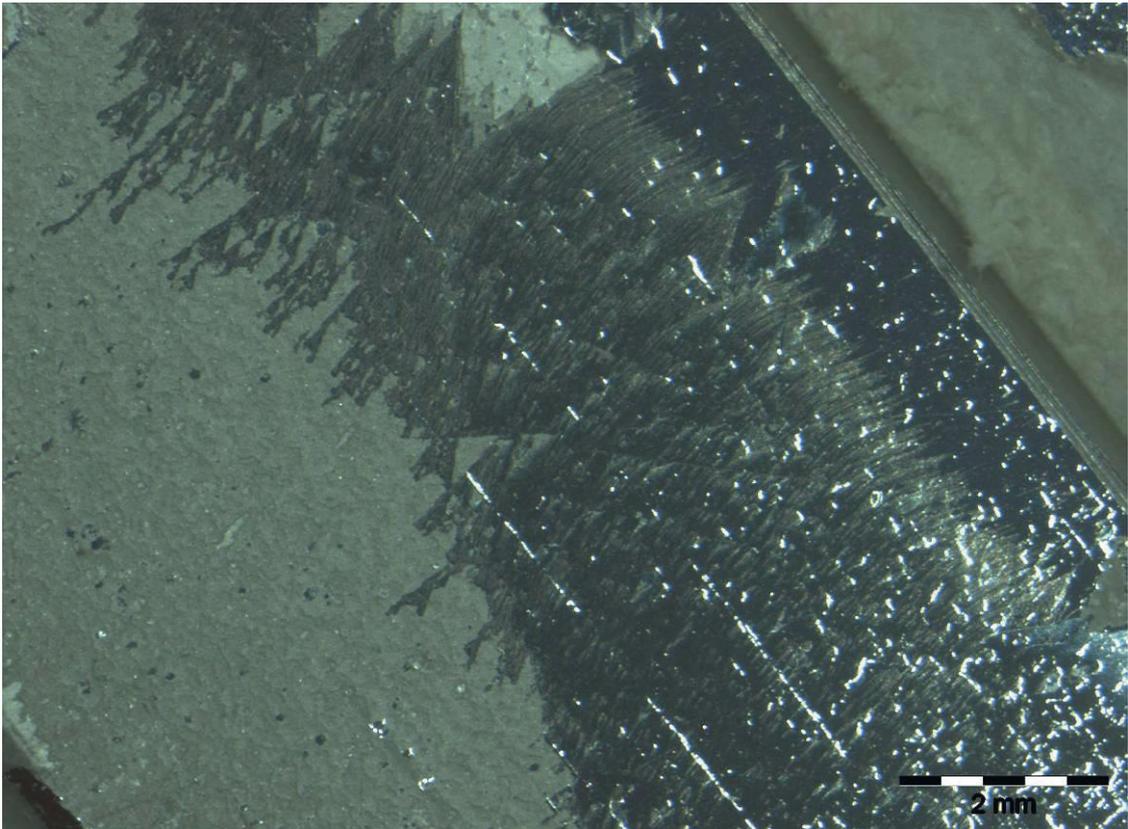


Bild 2-76: Mikroskopaufnahme VR 1E: EP-GV-01 A-Seite

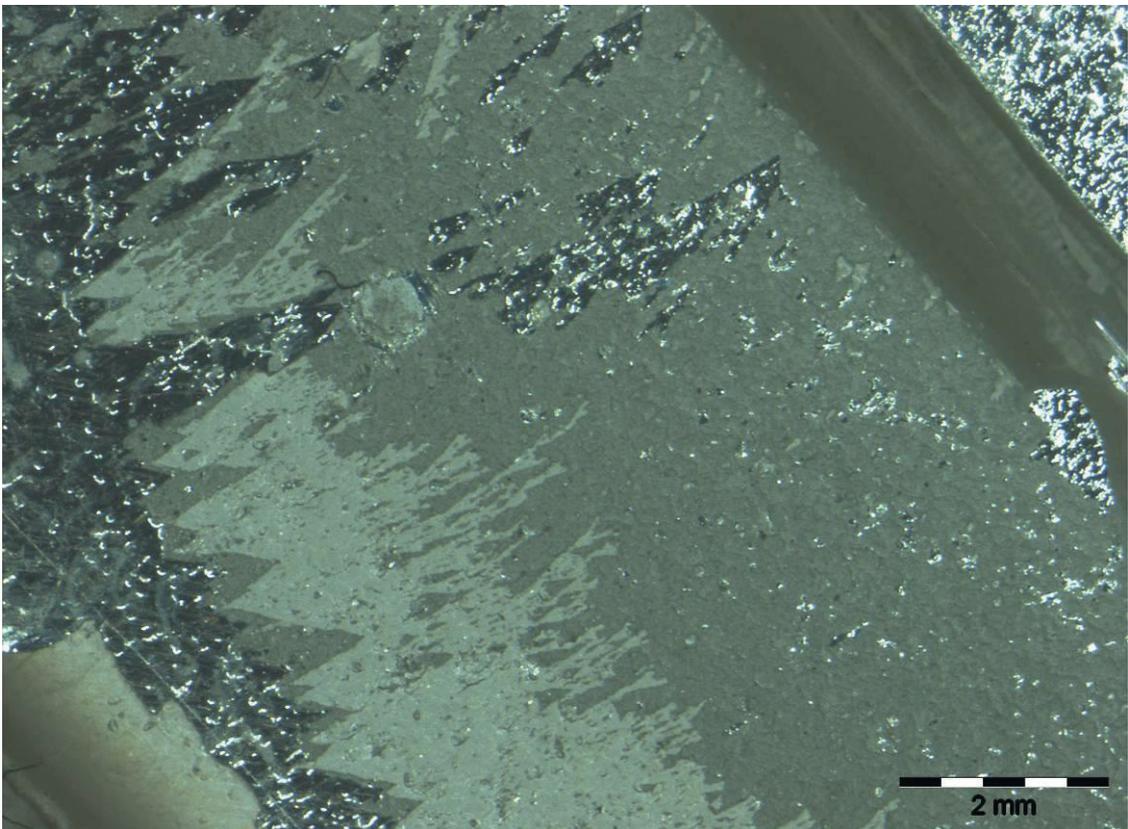


Bild 2-77: Mikroskopaufnahme VR 1E: EP-GV-01 B-Seite

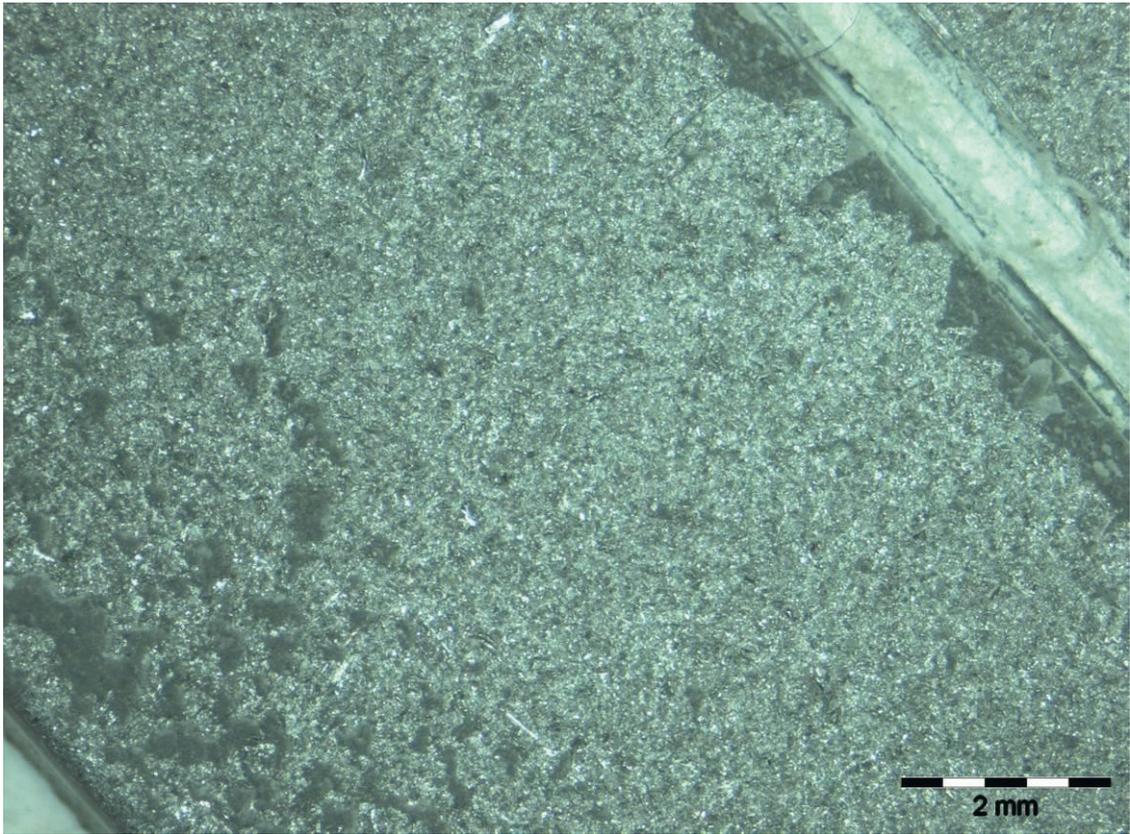


Bild 2-78: Mikroskopaufnahme VR 1E: EP-RG-01 A-Seite

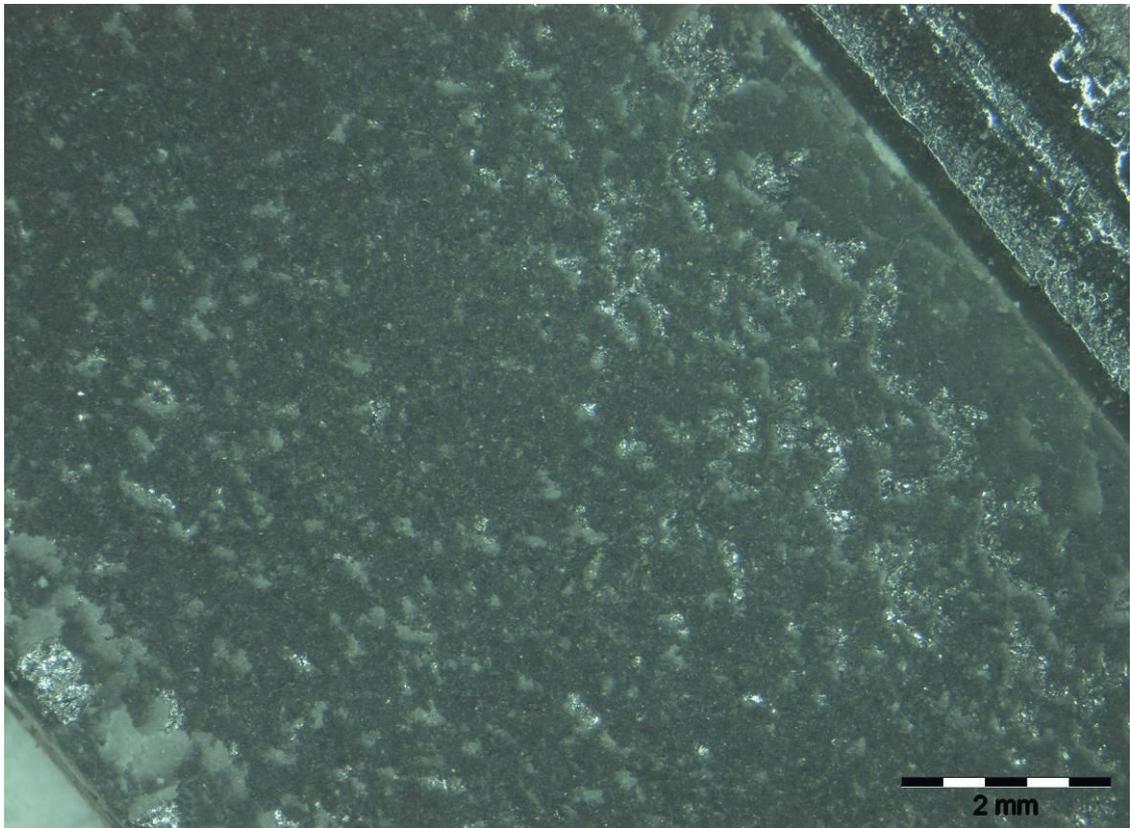


Bild 2-79: Mikroskopaufnahme VR 1E: EP-RG-01 B-Seite

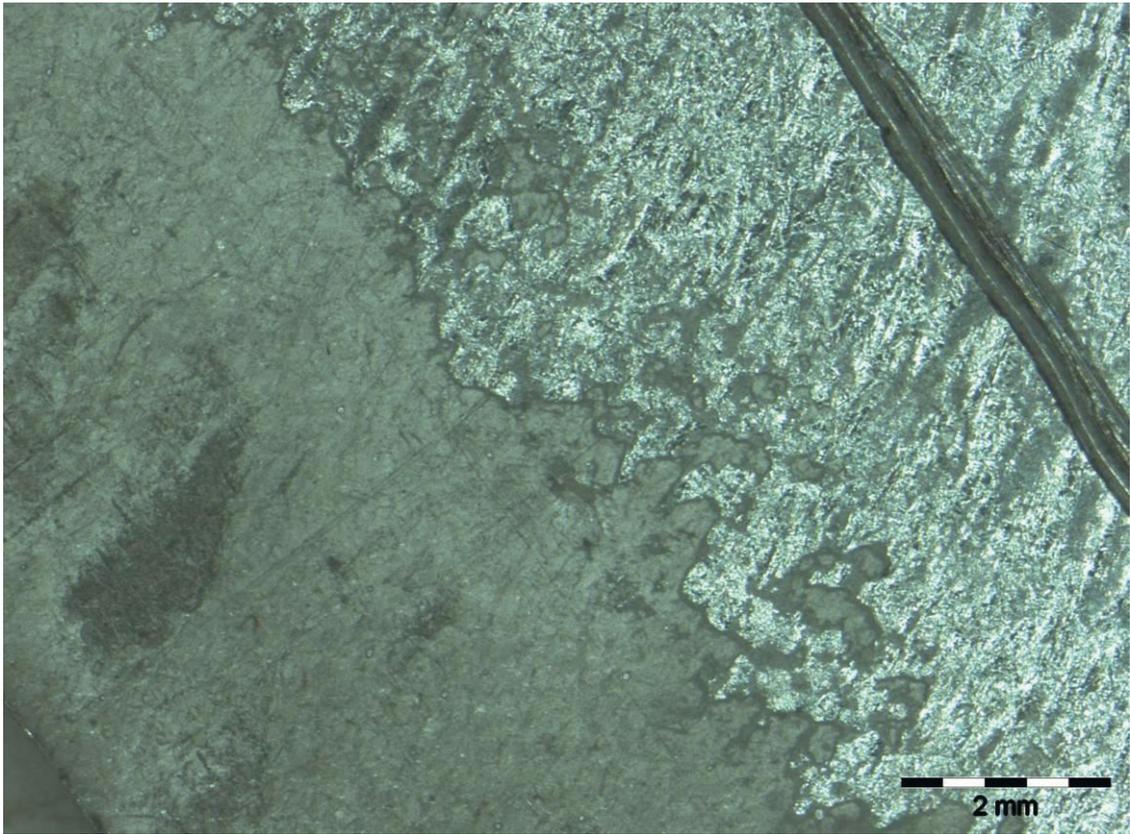


Bild 2-80: Mikroskopaufnahme VR 1E: EP-SZ-01 A-Seite

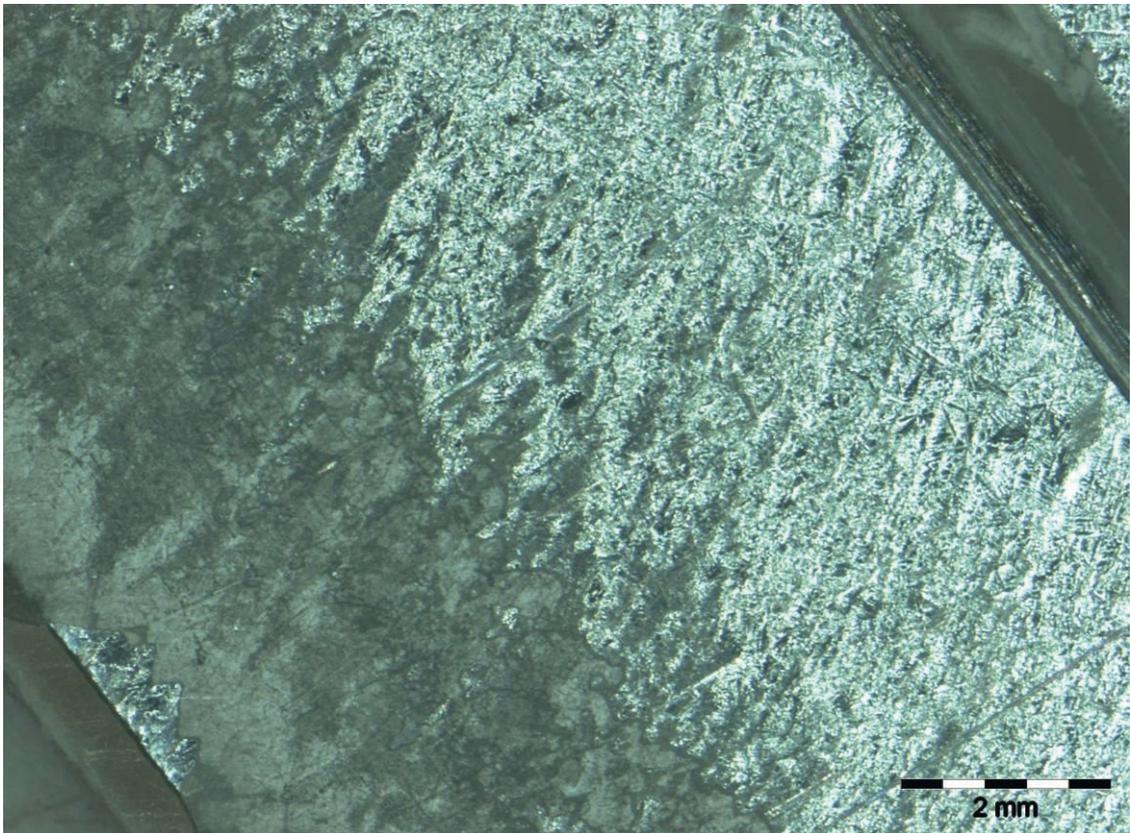


Bild 2-81: Mikroskopaufnahme VR 1E: EP-SZ-01 B-Seite

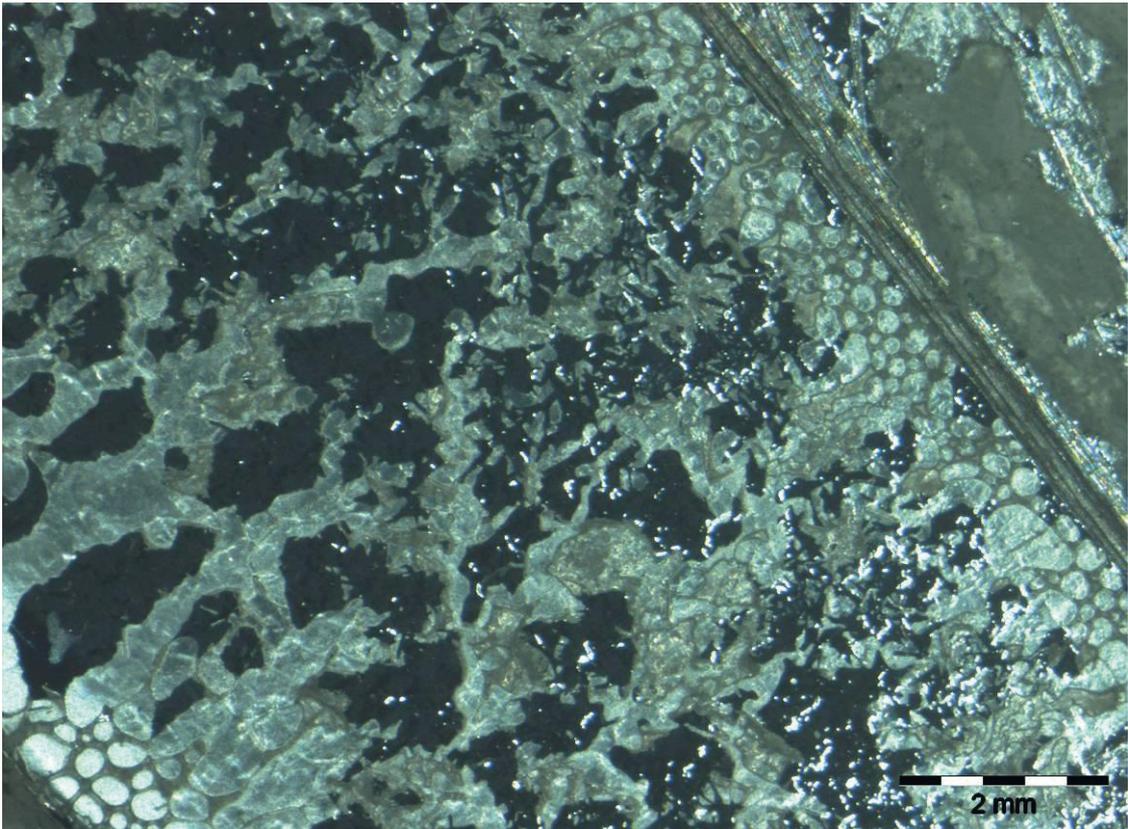


Bild 2-82: Mikroskopaufnahme VR 1E: PUR-GV-05 A-Seite

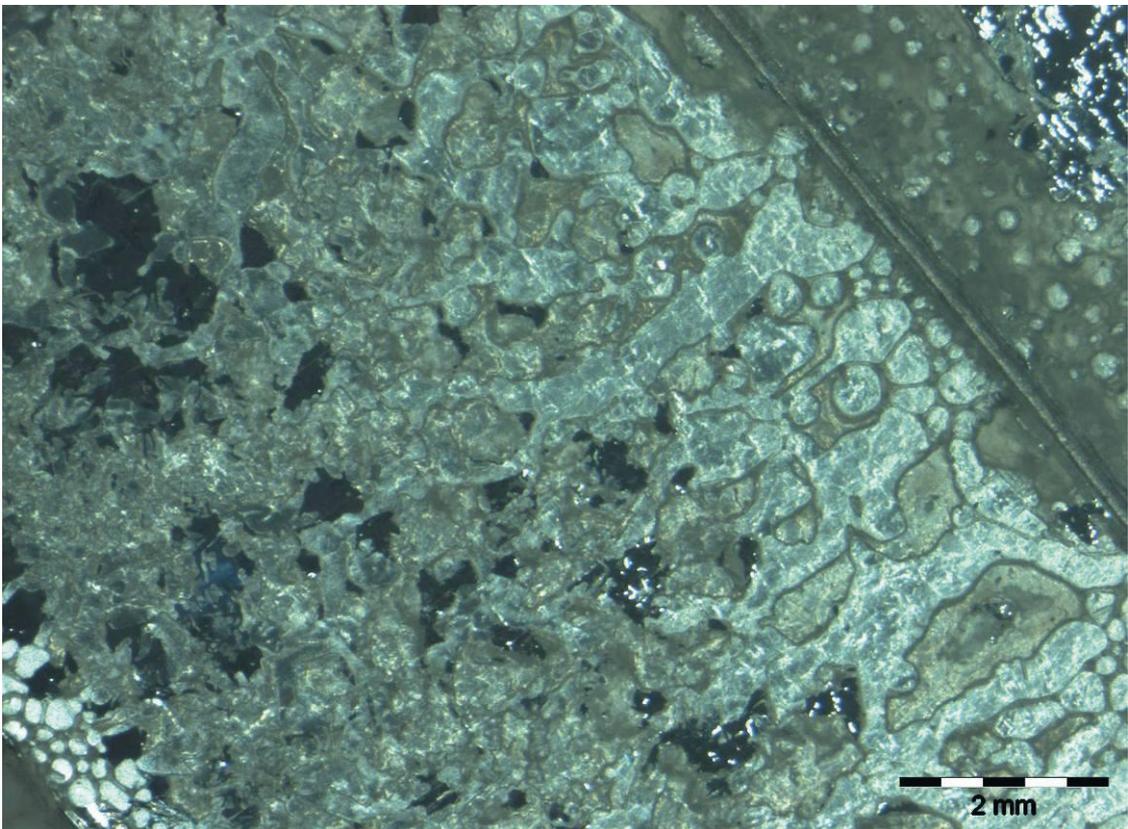


Bild 2-83: Mikroskopaufnahme VR 1E: PUR-GV-05 B-Seite

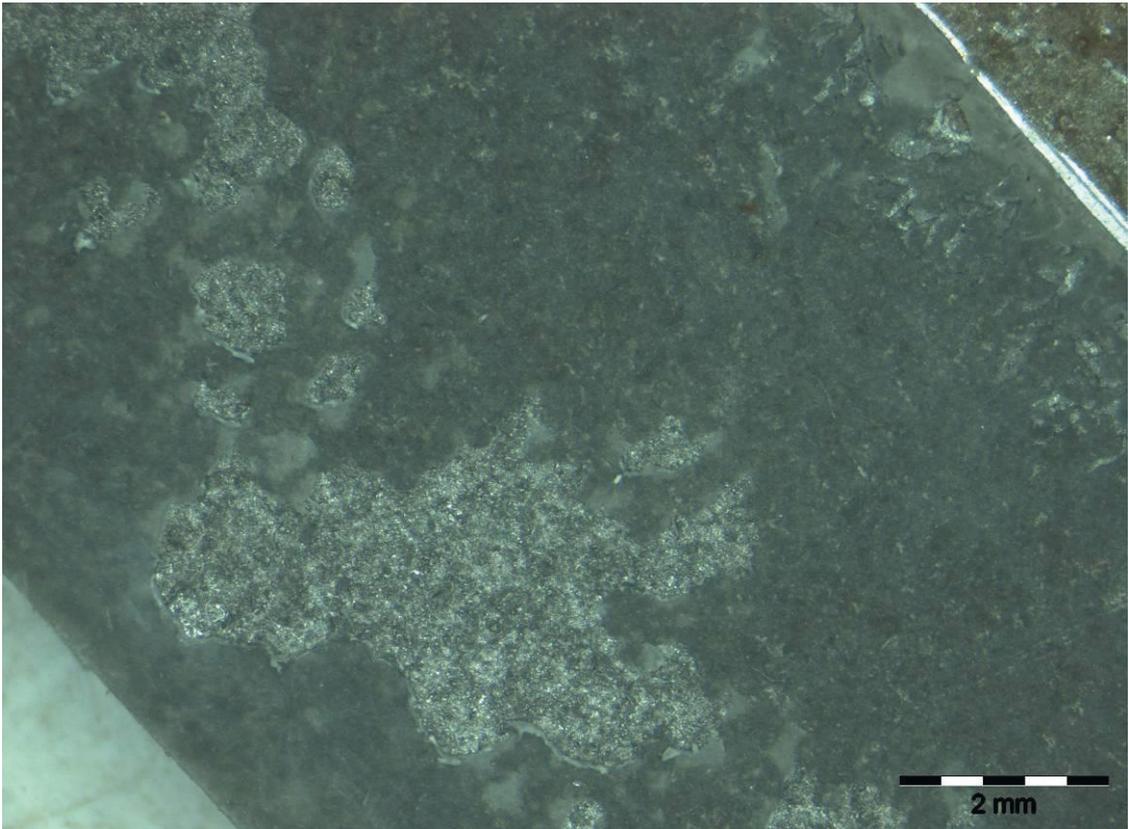


Bild 2-84: Mikroskopaufnahme VR 1E: PUR-RG-03 A-Seite

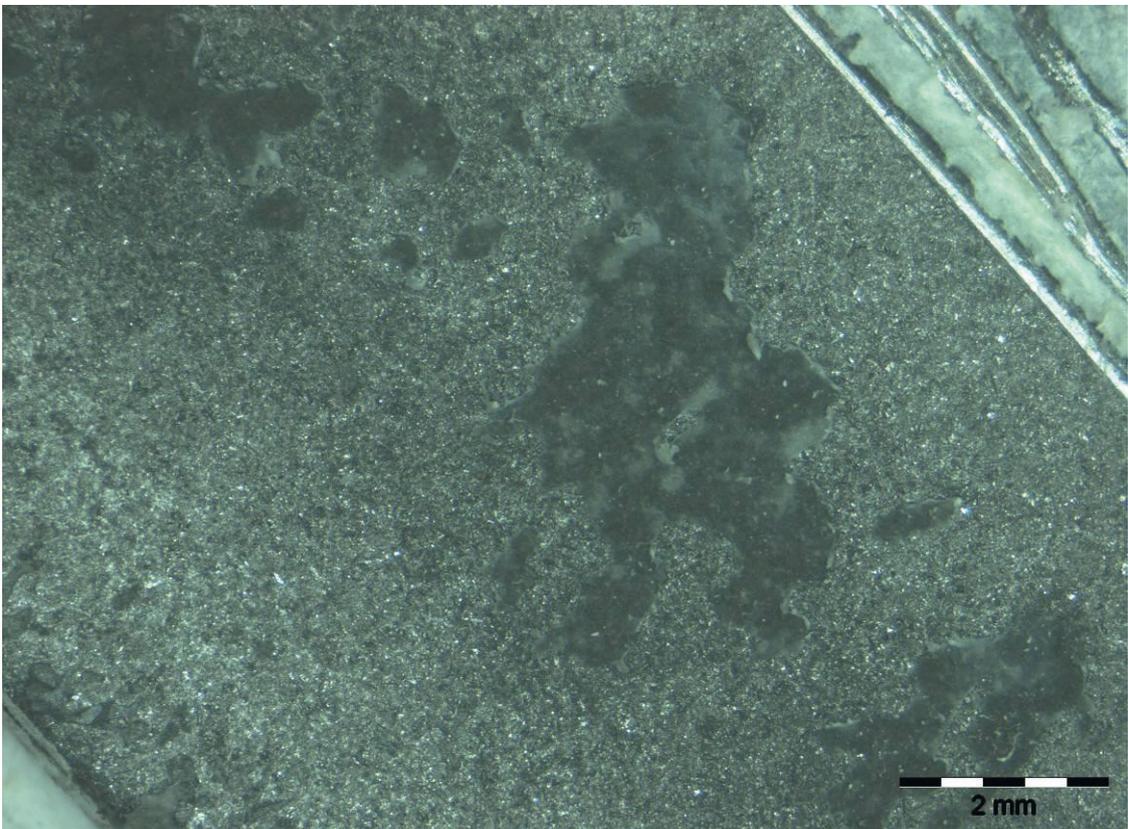


Bild 2-85: Mikroskopaufnahme VR 1E: PUR-RG-03 B-Seite

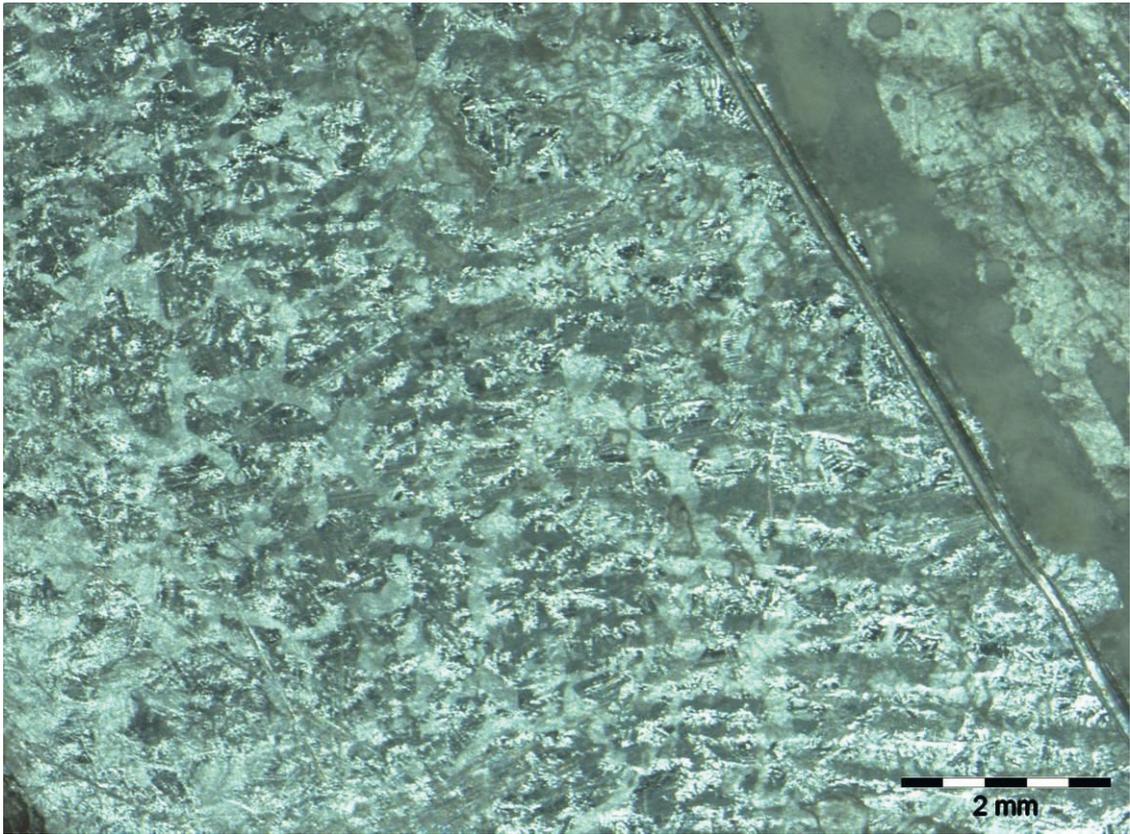


Bild 2-86: Mikroskopaufnahme VR 1E: PUR-SZ-03 A-Seite

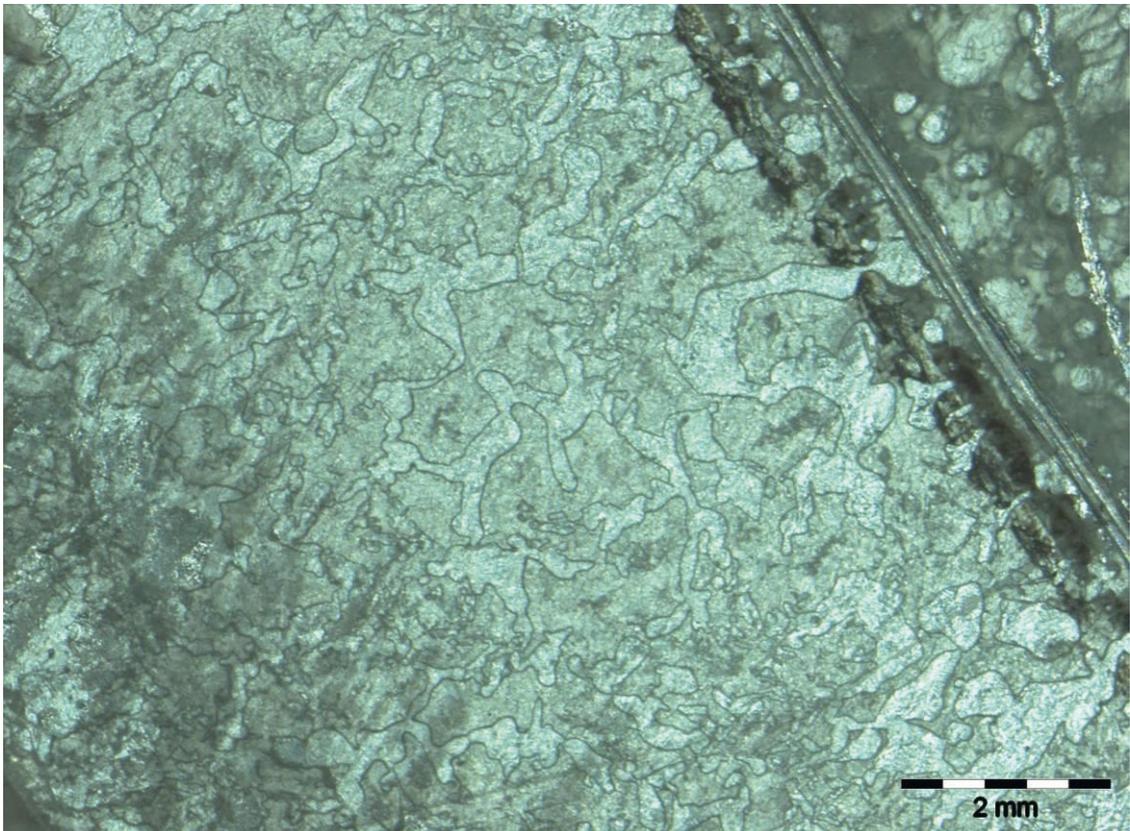


Bild 2-87: Mikroskopaufnahme VR 1E: PUR-SZ-03 B-Seite

# A3 Langzeitversuche AP 2 - Klebeverbindung unter Dauerlast und Klimabeanspruchung

## A3.1 Versuchsstandaufbau und Probekörper

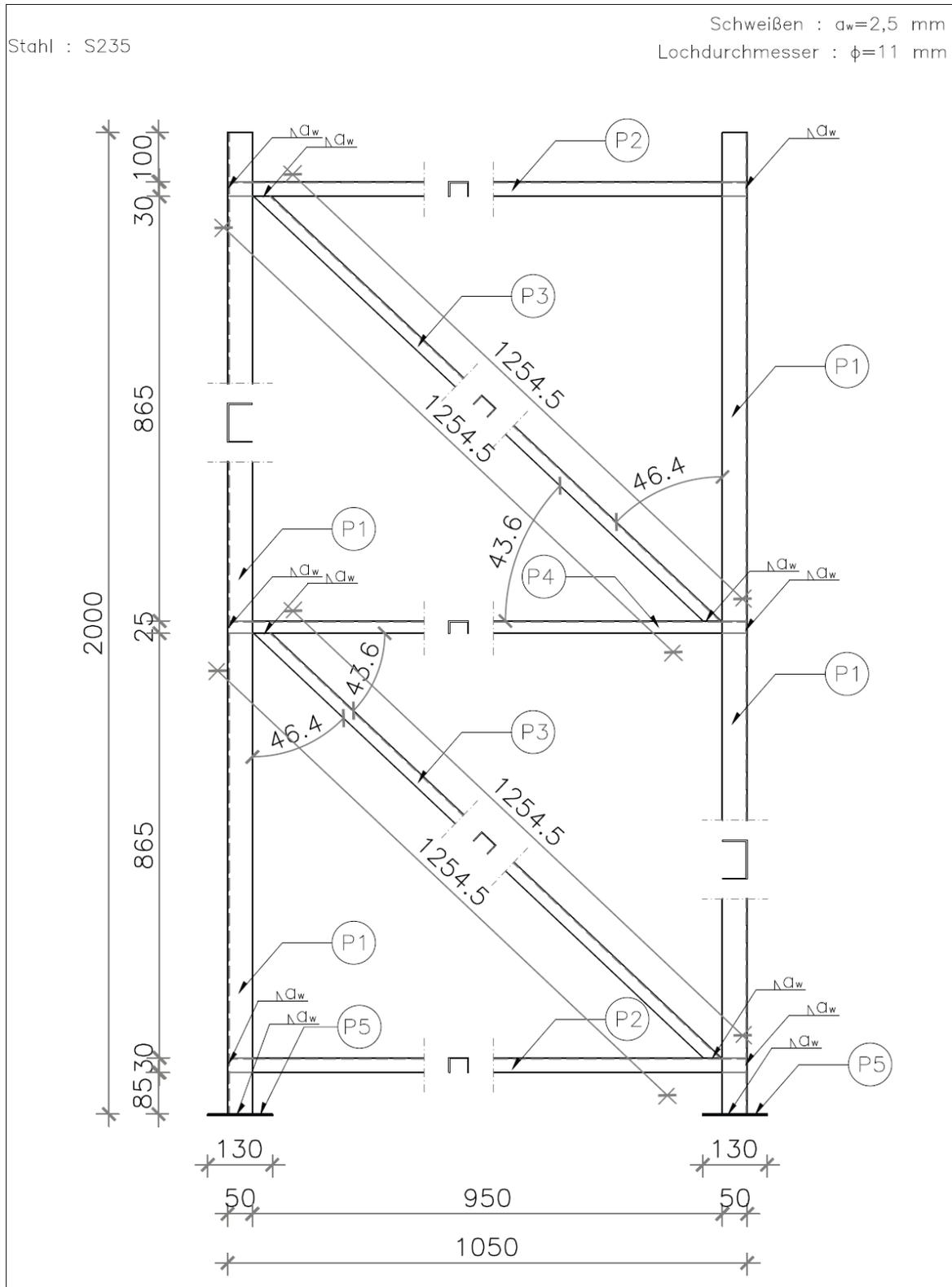


Bild 3-1: Skizze Versuchsstand



Bild 3-2: Versuchsstand



Bild 3-3: Probekörper in Klimakammer – Vorversuch

A3.2 Langzeitversuch



Bild 3-4: Probekörper Vorbereitung

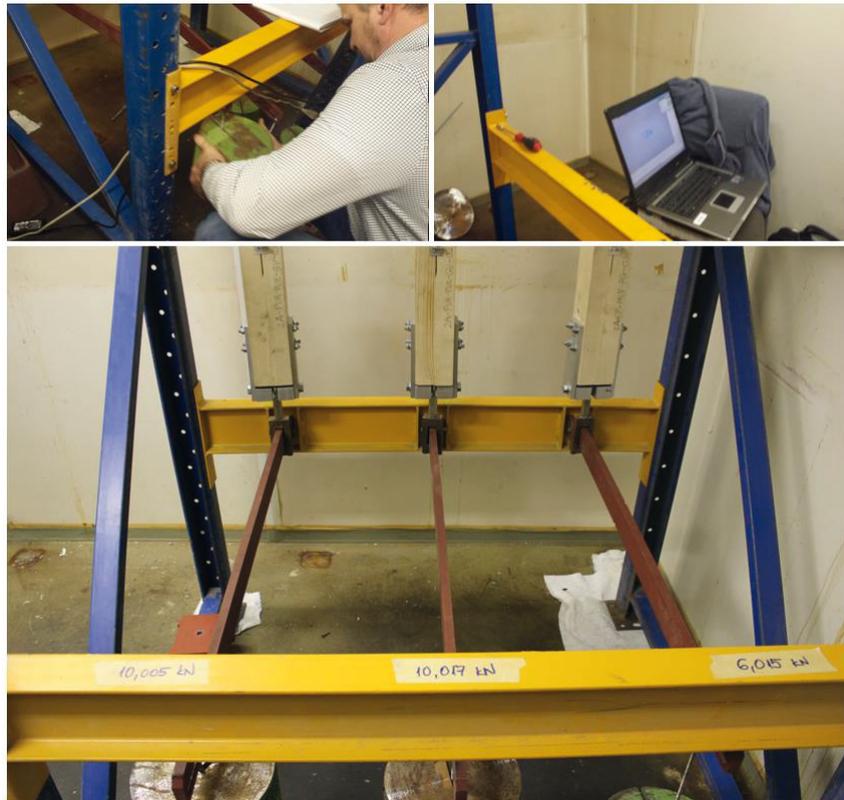


Bild 3-5: Krafteintragung, Kraftmessung und Umbau



Bild 3-6: Probekörper in Klimaraum – Langzeitversuch

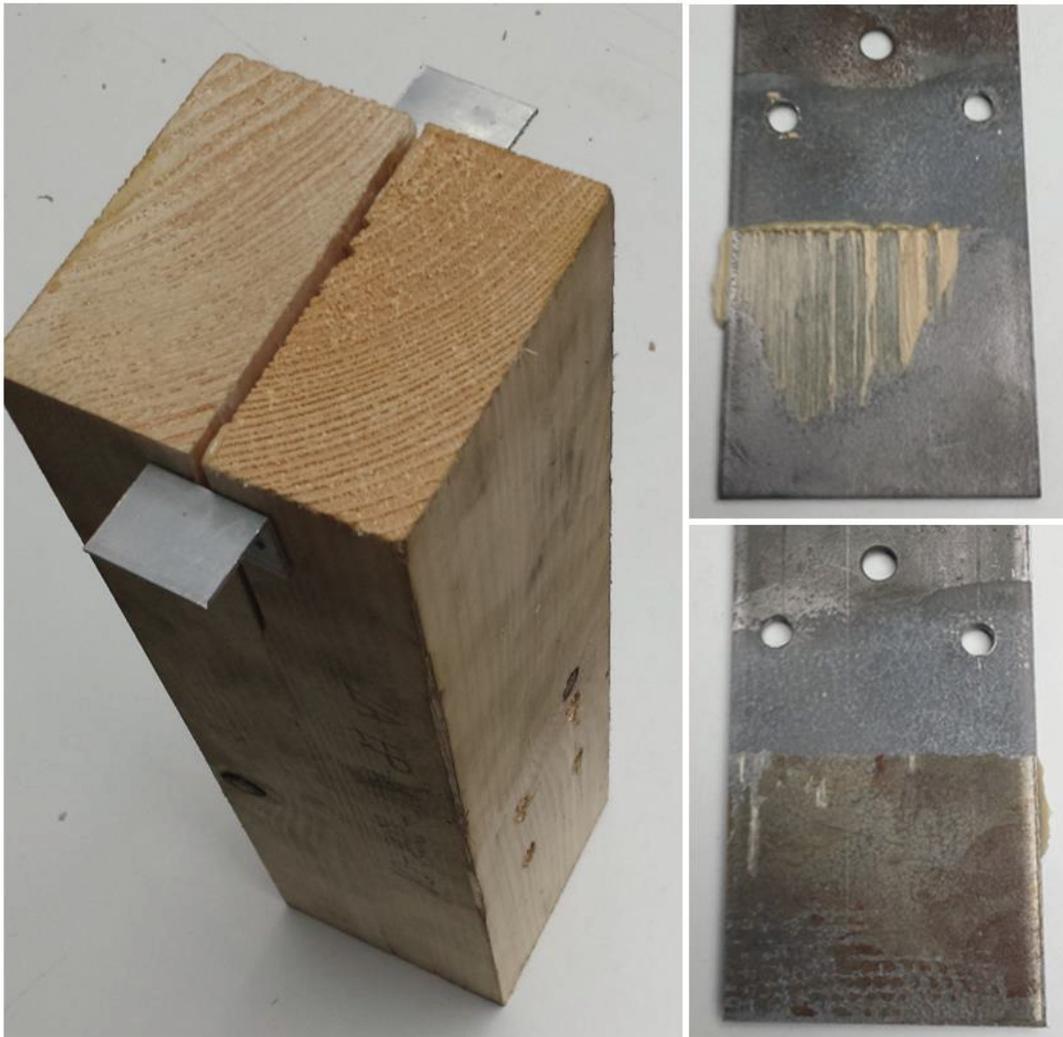


Bild 3-7: Versagte Probe EP-MUF-P-RG



Bild 3-8: Versagte Probe PUR-PUR-P-GVrauh

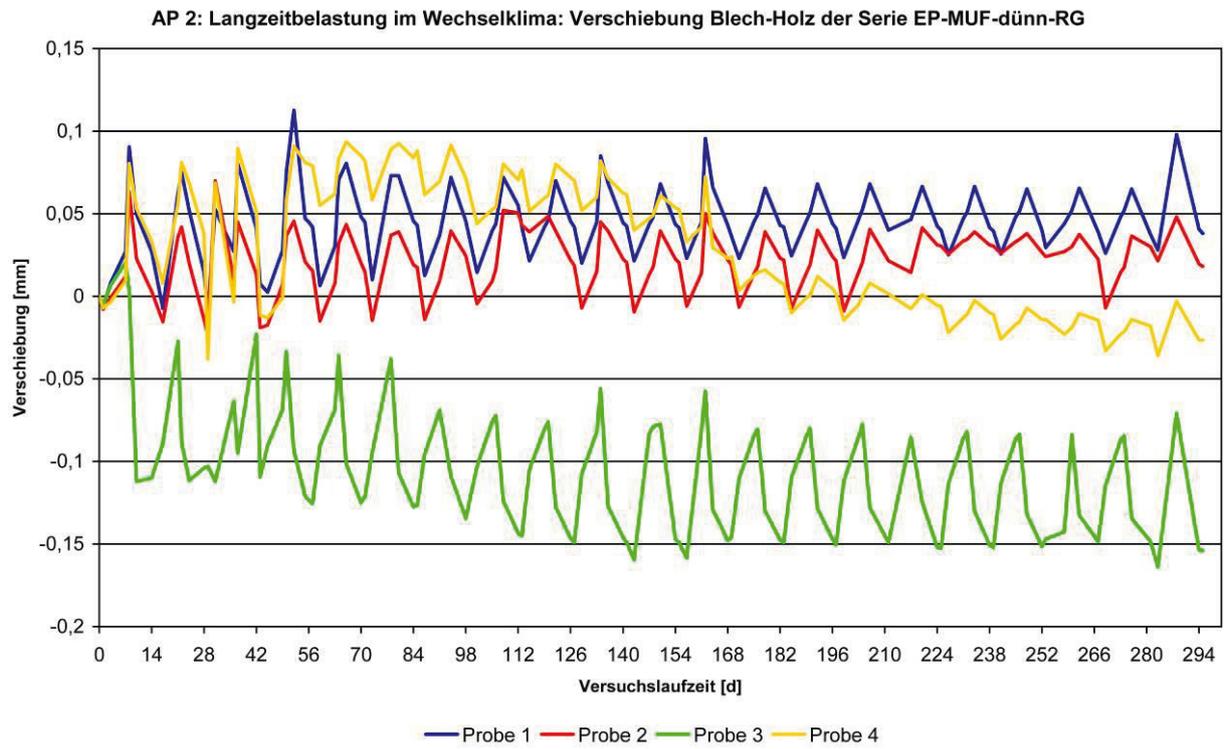


Bild 3-9: Verschiebung Blech-Holz über die Versuchslaufzeit (Typ EP-MUF-dünn-RG)

### A3.3 Bruchversuche zur Ermittlung der Resttragfähigkeit

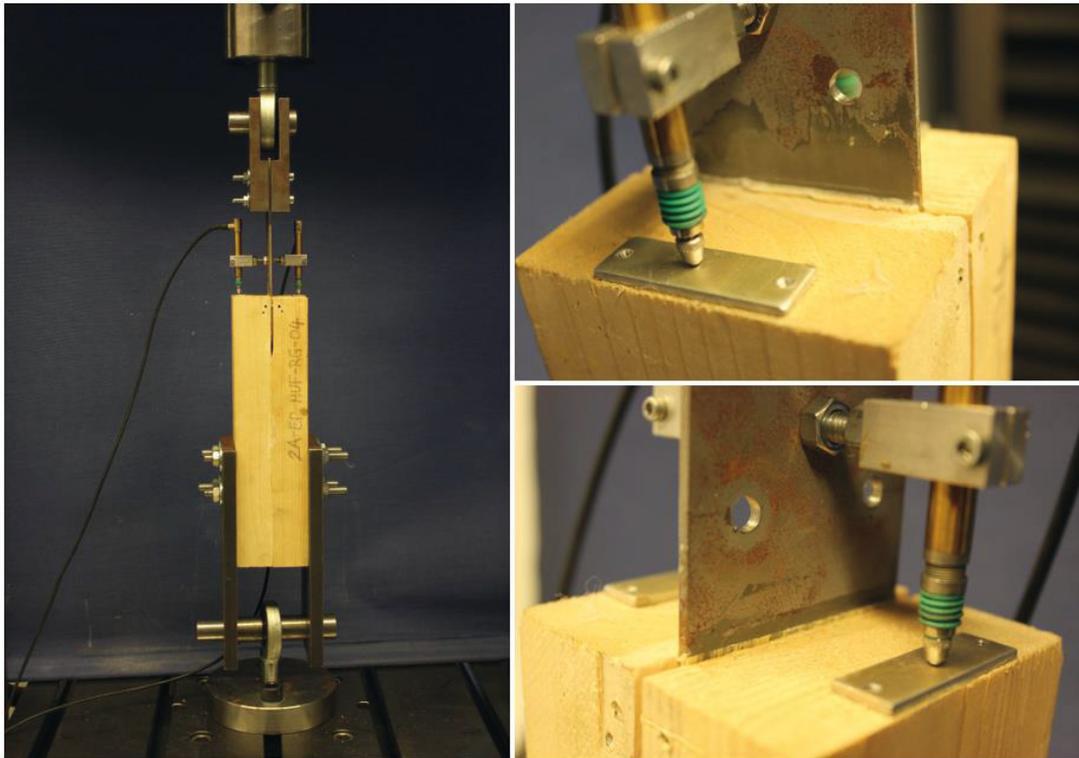


Bild 3-10: Resttragfähigkeitsversuch – Serie EP-MUF-dünn-RG

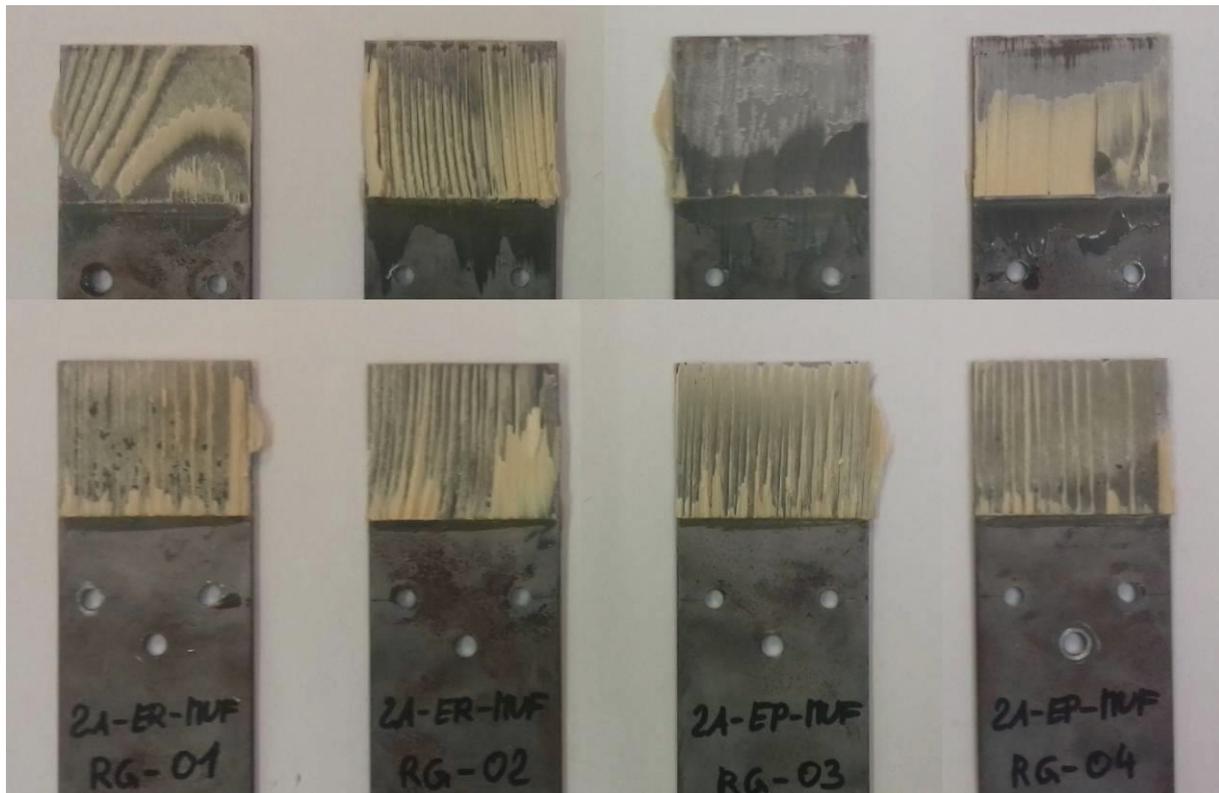


Bild 3-11: Bruchflächen nach Resttragfähigkeitsversuch der Serie EP-MUF-dünn-RG (oben MUF-, unten EP-Fuge)

## 2A-EP-MUF-RG-01

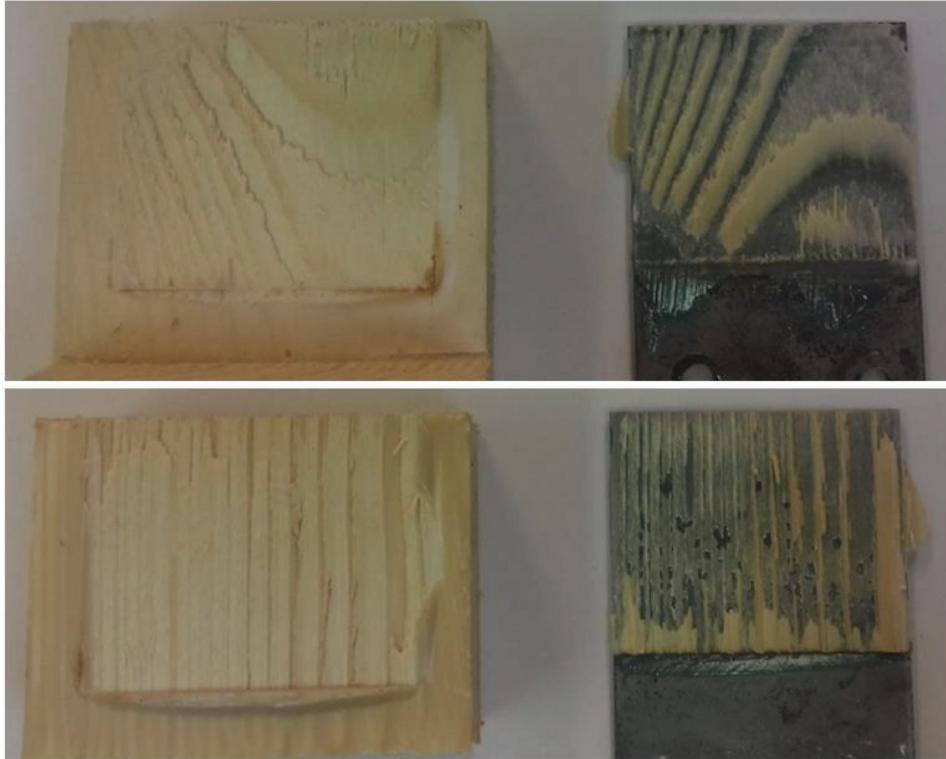


Bild 3-12: EP-MUF-dünn-RG Probekörper 01 nach Resttragfähigkeitsversuch

## 2A-EP-MUF-RG-02

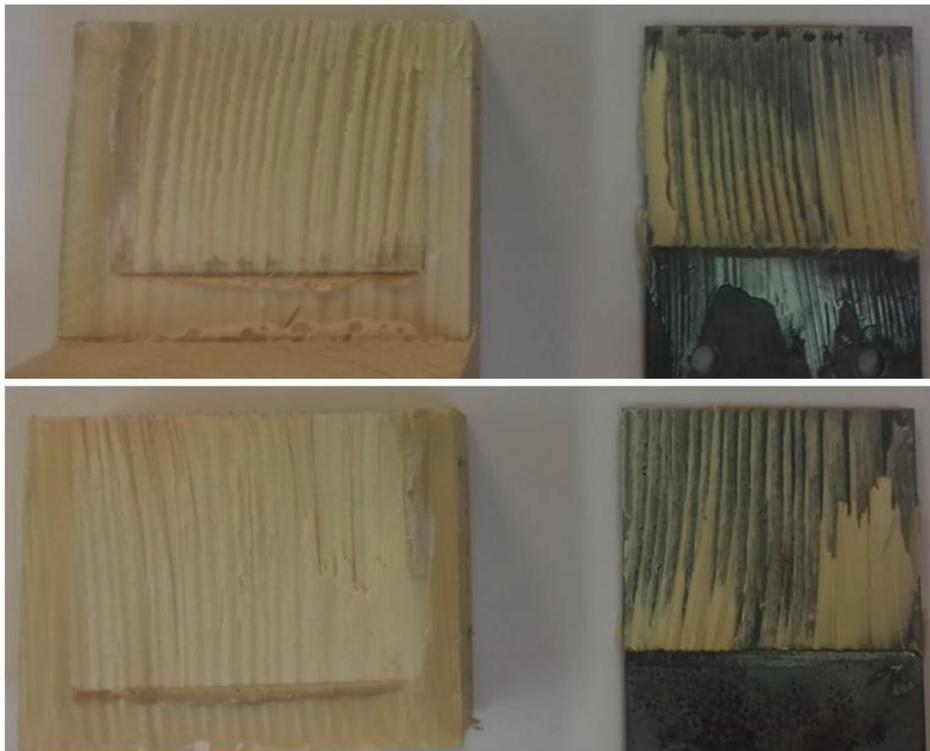


Bild 3-13: EP-MUF-dünn-RG Probekörper 02 nach Resttragfähigkeitsversuch

## 2A-EP-MUF-RG-03

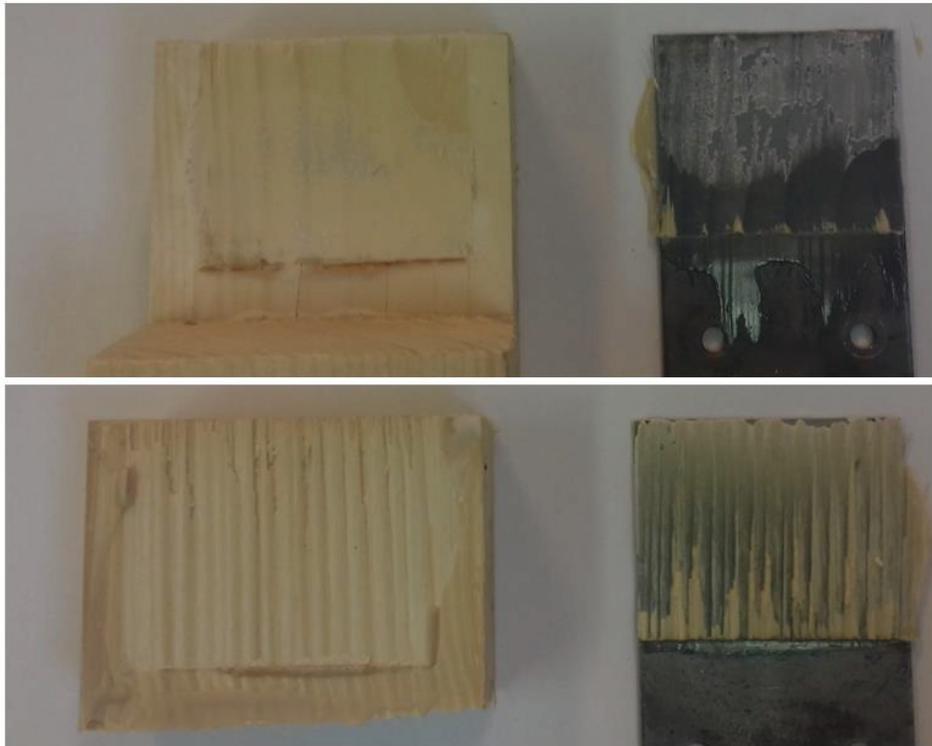


Bild 3-14: EP-MUF-dünn-RG Probekörper 03 nach Resttragfähigkeitsversuch

## 2A-EP-MUF-RG-04

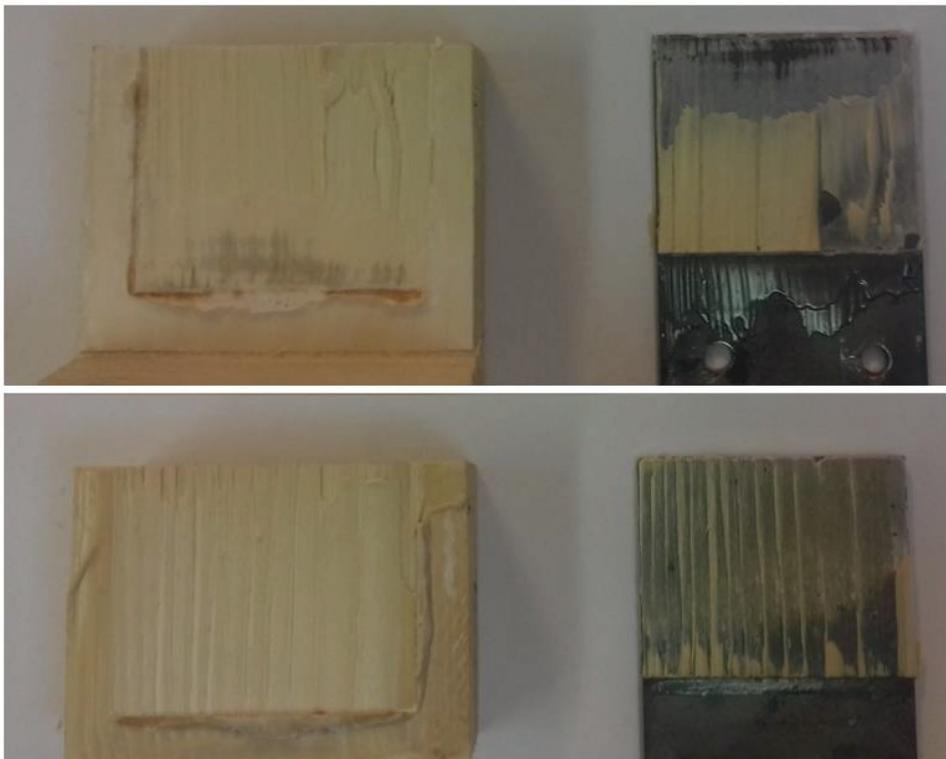
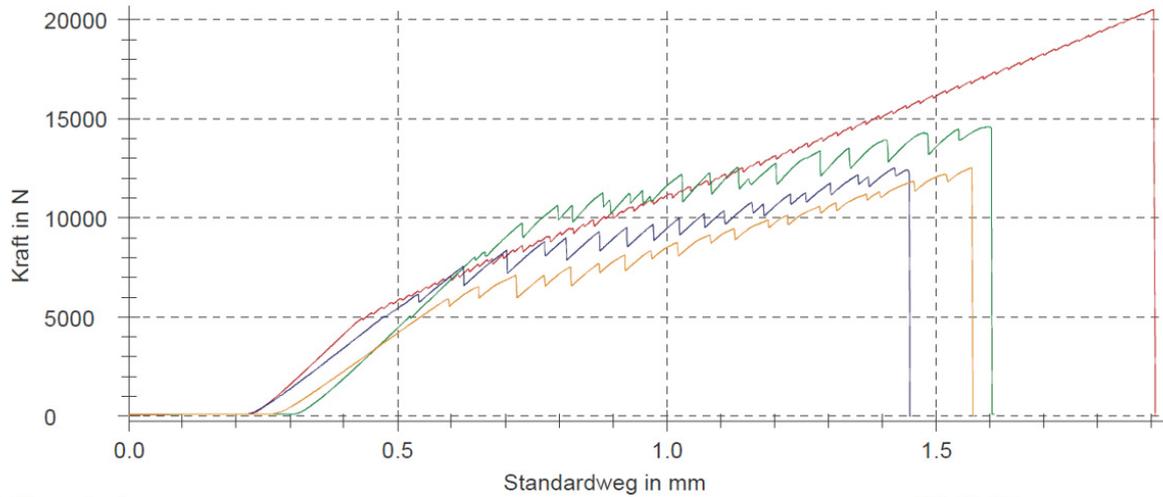


Bild 3-15: EP-MUF-dünn-RG Probekörper 04 nach Resttragfähigkeitsversuch

### A3.3.1 Ergebnisse der Bruchversuche zur Ermittlung der Resttragfähigkeit

#### Seriengrafik:



#### Prüfergebnisse:

Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	Kommentar	MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm
<span style="color: red;">■</span>	01	20,5	1,9	Prüfgeschwindigkeit 0,5 mm/min	5000	-
<span style="color: green;">■</span>	02	14,6	1,6	Prüfgeschwindigkeit 0,5 mm/min	-	-
<span style="color: blue;">■</span>	03	12,5	1,4	Prüfgeschwindigkeit 0,5 mm/min	-	-
<span style="color: orange;">■</span>	04	12,5	1,6	Prüfgeschwindigkeit 0,5 mm/min	-	-

#### Statistik:

EP-MUF-RG	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm
n = 4	-	-
$\bar{x}$	15,0	1,6
s	3,77	0,2
v [%]	25,09	12,47

Bild 3-16: EP-MUF-dünn-RG Resttragfähigkeit

## A4 Produktionsversuche AP 3 - Prozessintegration im Herstellwerk



Bild 4-1: Herstellung der Probekörper bei Hüttemann



Bild 4-2: Herstellung der Probekörper bei Hüttemann

## A5 Bauteilversuche AP 4 in baupraktischen Dimensionen

### A5.1 Versuchsreihe 4V: Zugkraftanschluss Vorversuch I



Bild 5-1: Probekörper Vorbereitung



Bild 5-2: PUR-PUR-GV

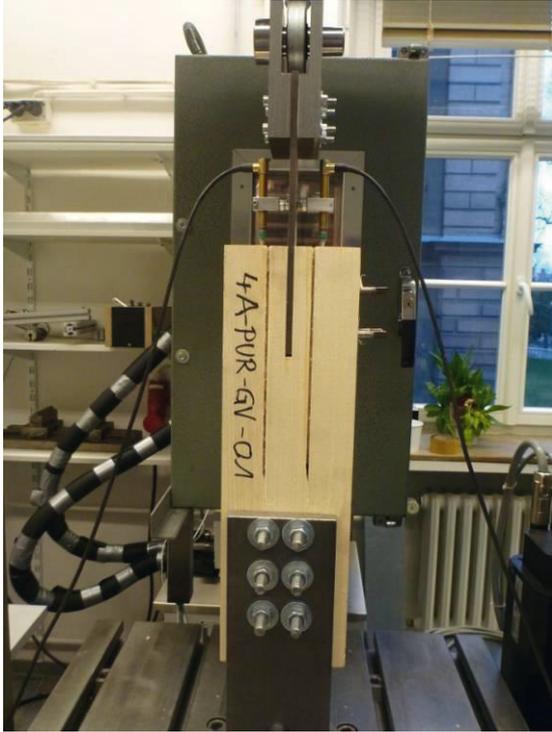
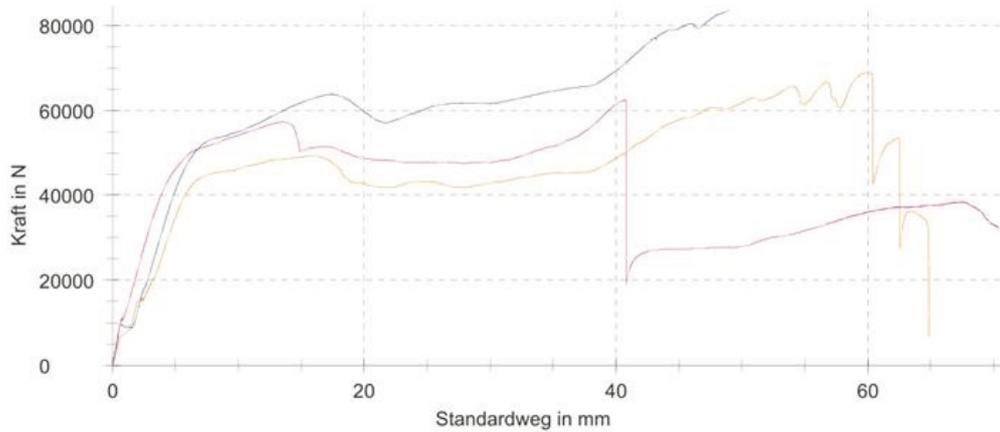


Bild 5-3: PUR-MUF-GV

## A5.1.1 Ergebnisse der geprüften Probekörper: Zugkraftanschluss Vorversuch I

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

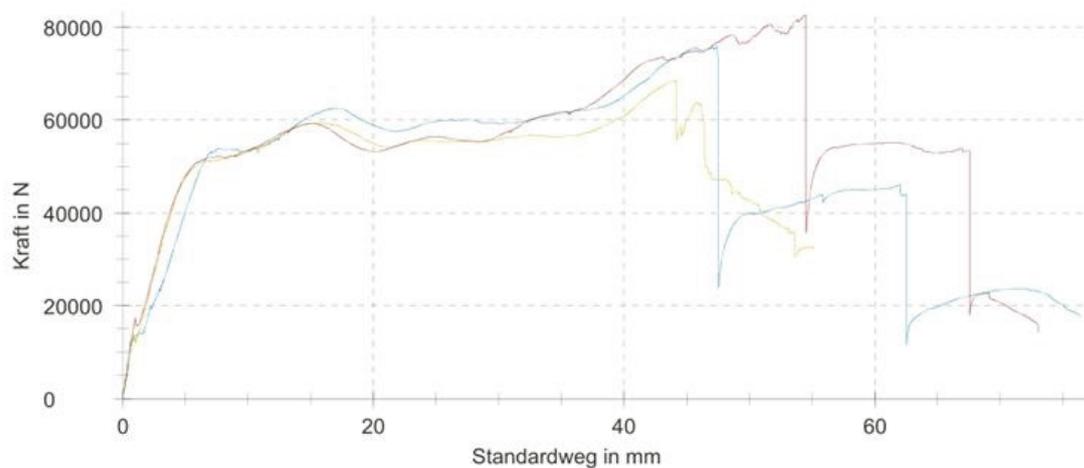
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
<span style="color: blue;">■</span>	PUR-PUR-GV-02	83,7	49,0	0,226	8000
<span style="color: orange;">■</span>	PUR-PUR-GV-03	68,9	59,9	0,297	
<span style="color: magenta;">■</span>	PUR-PUR-GV-01	62,5	40,8	0,270	

### Statistik:

PUR-PUR-GV	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
n = 3			
$\bar{x}$	71,7	49,9	0,265
s	10,9	9,6	0,036
v [%]	15,16	19,20	13,55

Bild 5-4: PUR-PUR-GV

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm	Vorgabe Kraft N
<span style="color: blue;">■</span>	PUR-GV-01	75,7	47,0	0,143	8000
<span style="color: yellow;">■</span>	PUR-GV-02	68,5	43,9	0,289	
<span style="color: red;">■</span>	PUR-GV-03	82,7	54,5	0,221	

### Statistik:

PUR-GV	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	MW-Weta(XXXX N) mm
n = 3			
$\bar{x}$	75,6	48,5	0,218
s	7,08	5,4	0,073
v [%]	9,36	11,22	33,43

Bild 5-5: PUR-MUF-GV

## A5.2 Versuchsreihe 4V: Zugkraftanschluss Vorversuch II

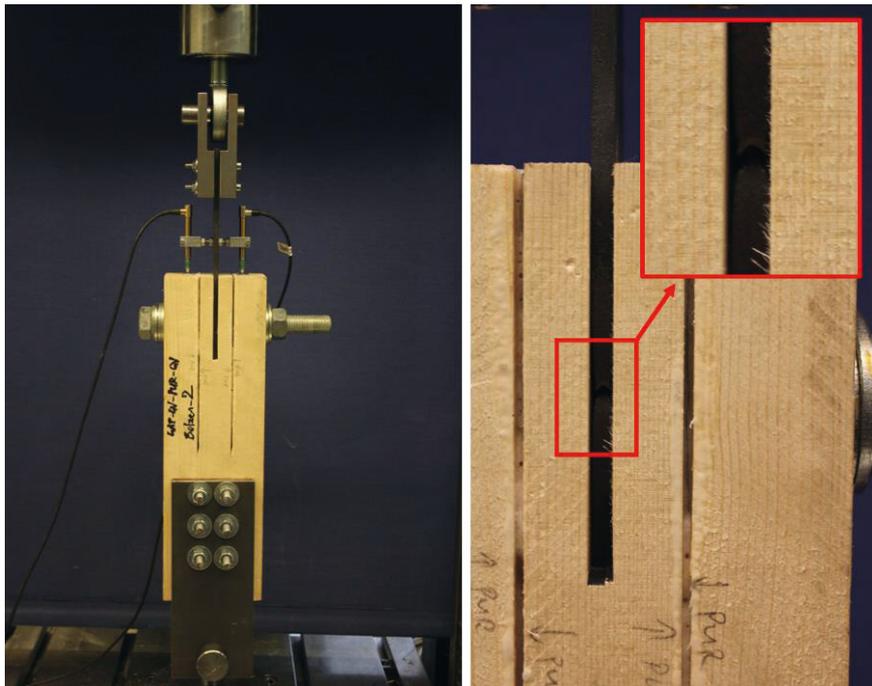


Bild 5-6: PUR-PUR-GV-B mit Bolzenanschluss

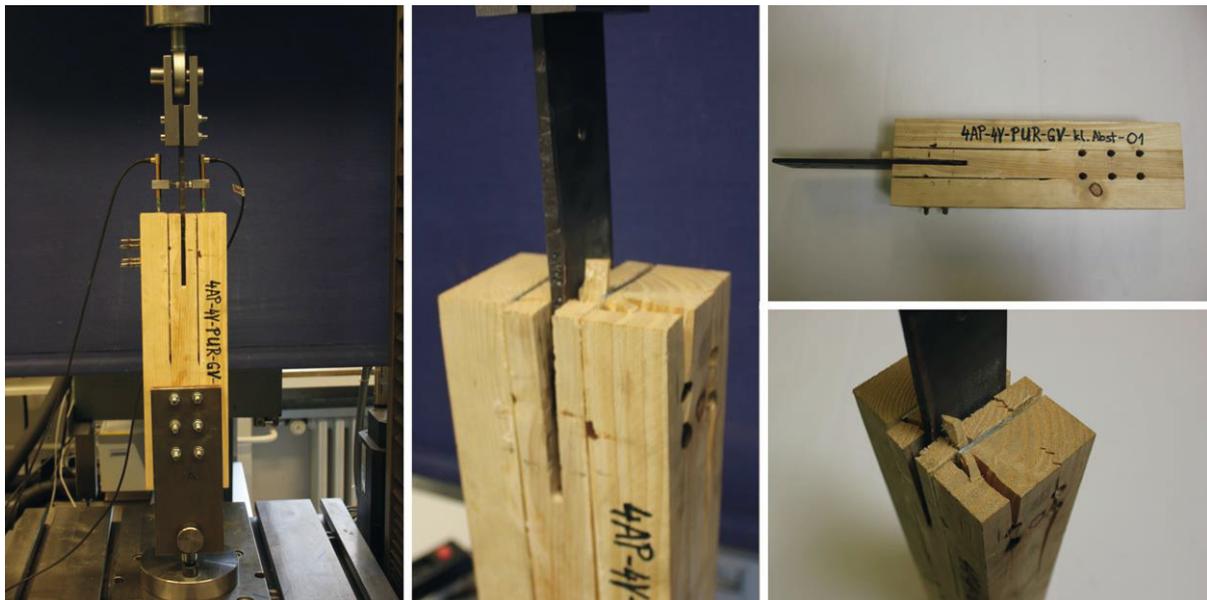


Bild 5-7: PUR-MUF-GV-RA mit reduziertem Abstand der Dübel

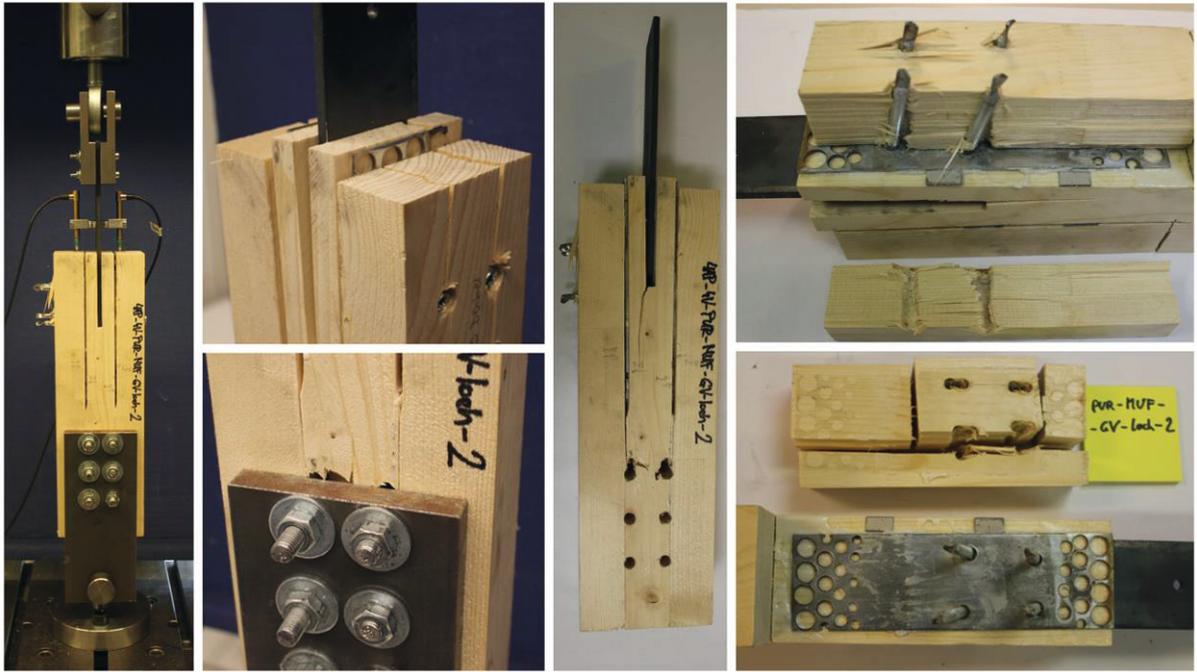


Bild 5-8: PUR-MUF-GV-L mit gelochten Stahlblechen

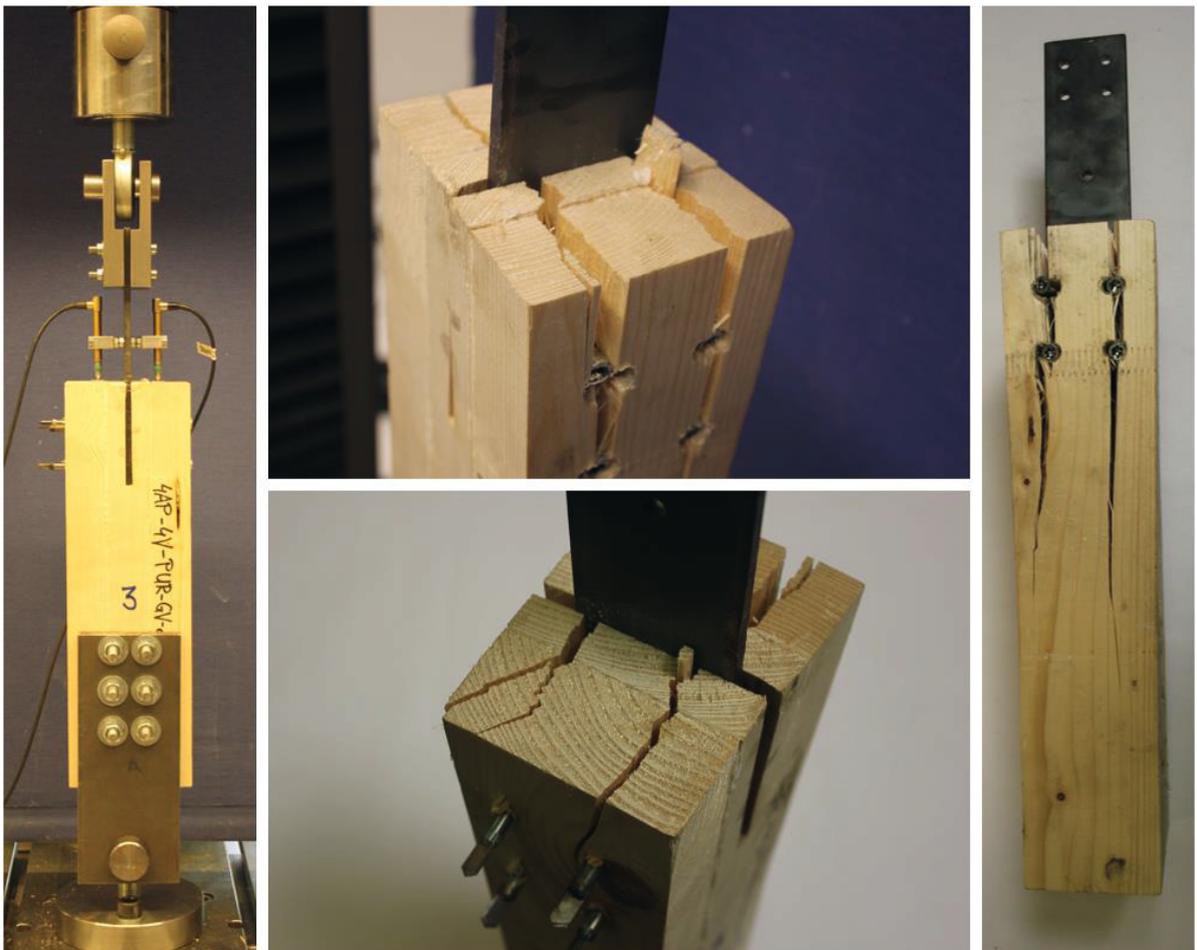


Bild 5-9: MUF-MUF-OB ohne Stahlbleche

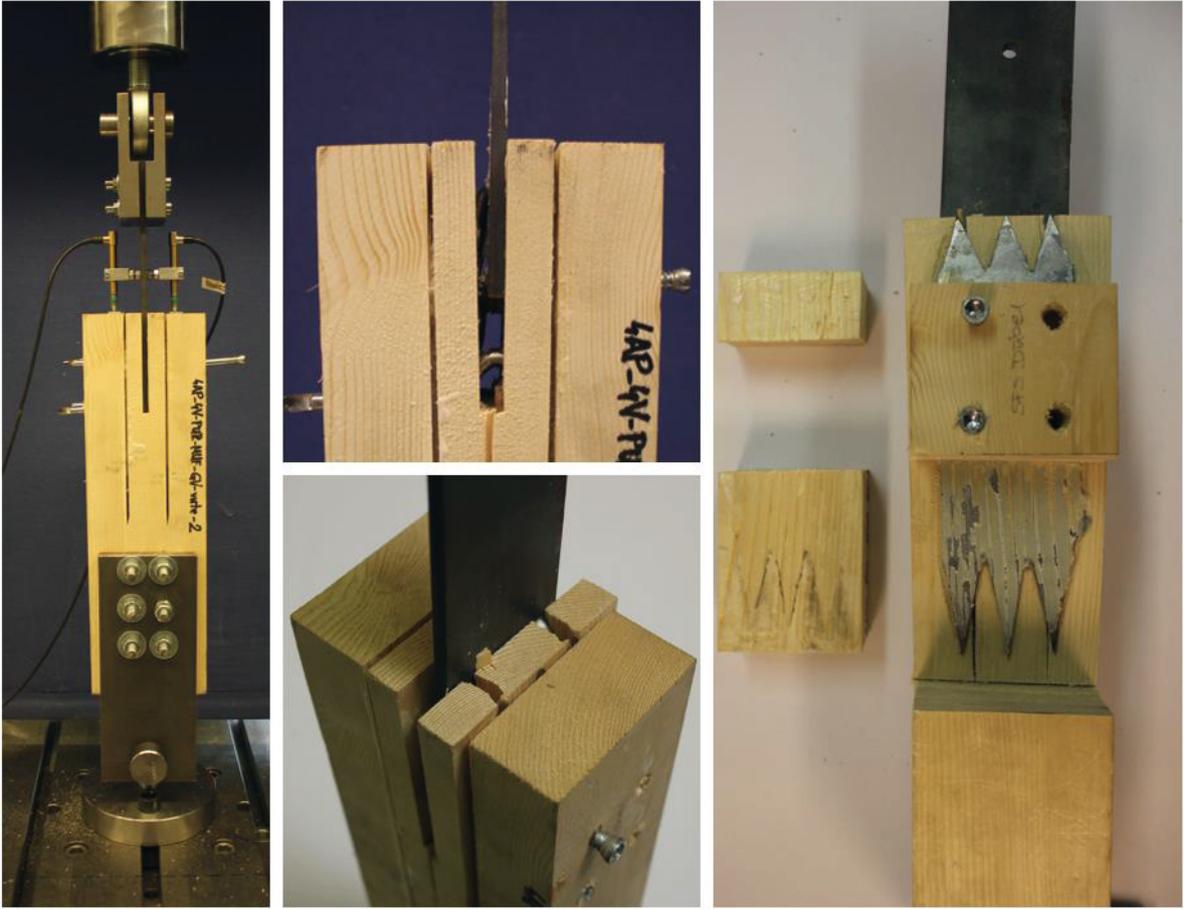
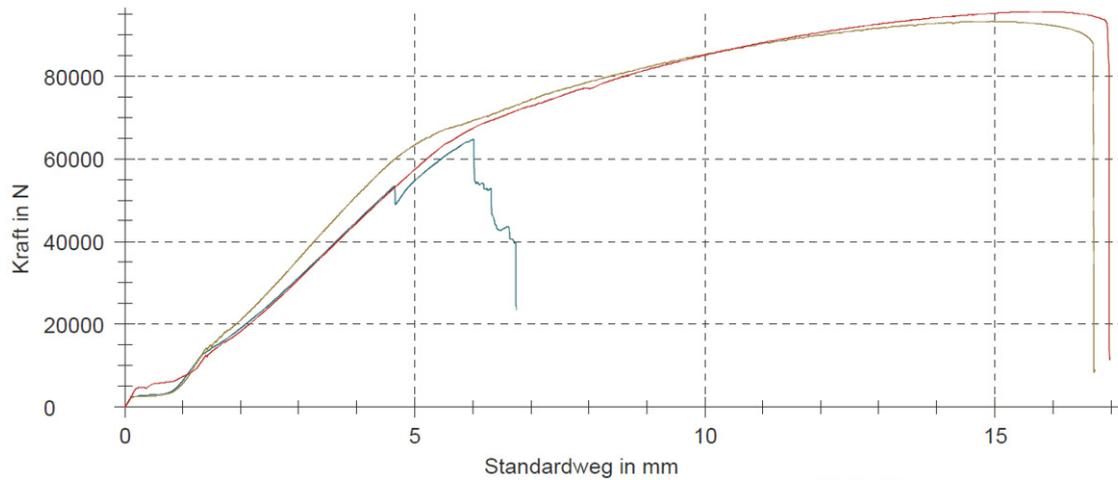


Bild 5-10: PUR-MUF-GV-V mit gevouteten Stahlblechen

## A5.2.1 Ergebnisse der geprüften Probekörper: Zugkraftanschluss Vorversuch II

### Seriengrafik:



#### Prüfergebnisse:

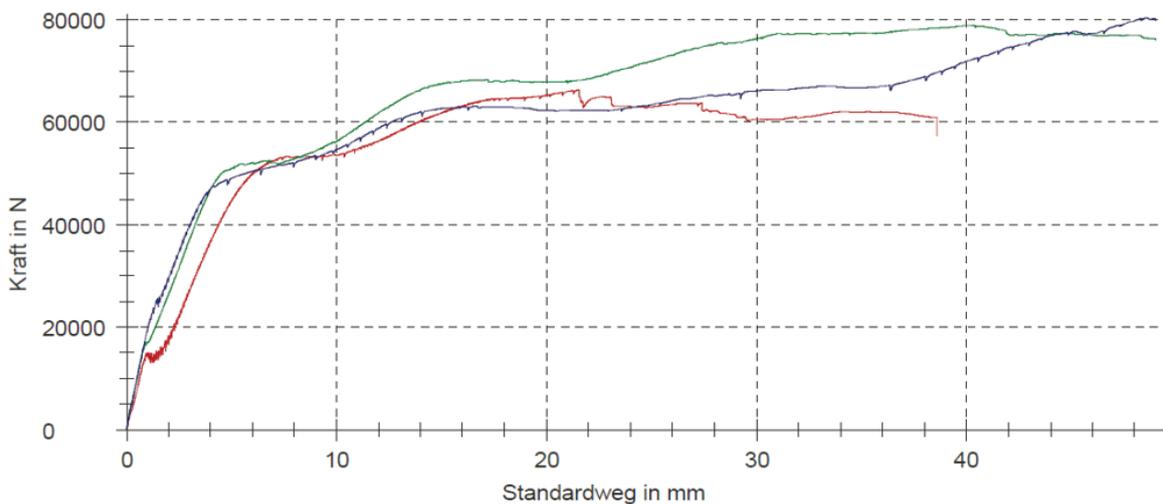
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	Kommentar	MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm
■	03	64,8	6,0	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min	5000	-
■	02	93,3	15,0	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min	-	-
■	01	95,7	15,7	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min	-	-

#### Statistik:

4AR-4V-PUR-GV-Bolzen n = 3	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm
$\bar{x}$	84,6	12,2
s	17,2	5,4
v [%]	20,34	44,03

Bild 5-11: PUR-PUR-GV-B mit Bolzen

### Seriengrafik:



#### Prüfergebnisse:

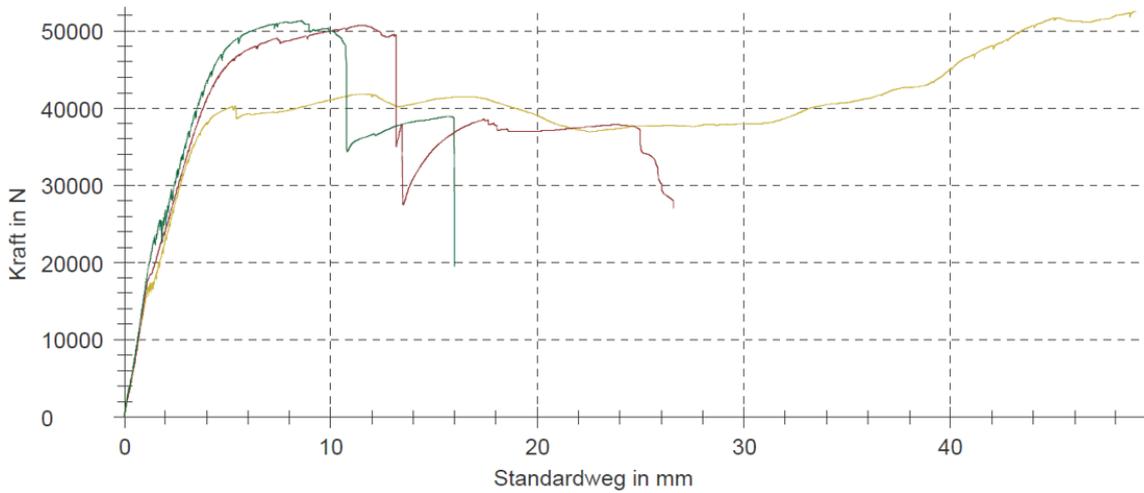
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	Kommentar	MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm
■	01	66,3	21,6	Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min	5000	-
■	02	78,9	40,0	Prüfgeschwindigkeit: 2,5 mm/min	-	-
■	03	80,4	48,6	Prüfgeschwindigkeit: 2,5 mm/min	-	-

#### Statistik:

4AP-4V-PUR-GV-kl.Abst n = 3	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm
$\bar{x}$	75,2	36,7
s	7,73	13,8
v [%]	10,27	37,66

Bild 5-12: PUR-MUF-GV-RA mit reduziertem Abstand der Dübel

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

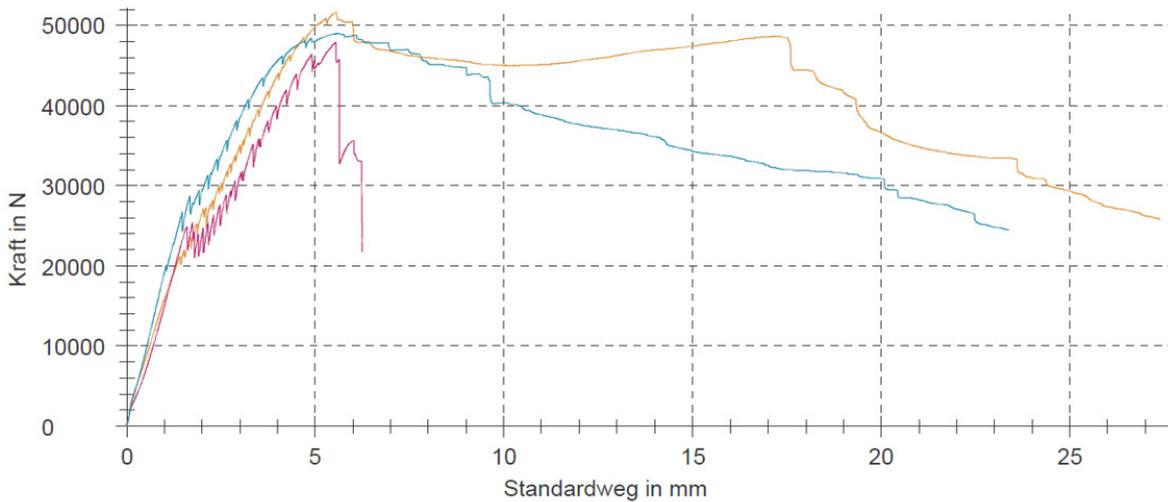
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	Kommentar
01	01	52,6	49,0	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min
02	02	50,7	11,5	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min
03	03	51,3	8,6	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min

### Statistik:

MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm	4AP-4V-PUR-MUF-GV-loch n = 3	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm
5000	-	$\bar{x}$	51,5	23,0
-	-	s	0,943	22,5
-	-	v [%]	1,83	97,88

Bild 5-13: PUR-MUF-GV-L mit gelochten Stahlblechen

### Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

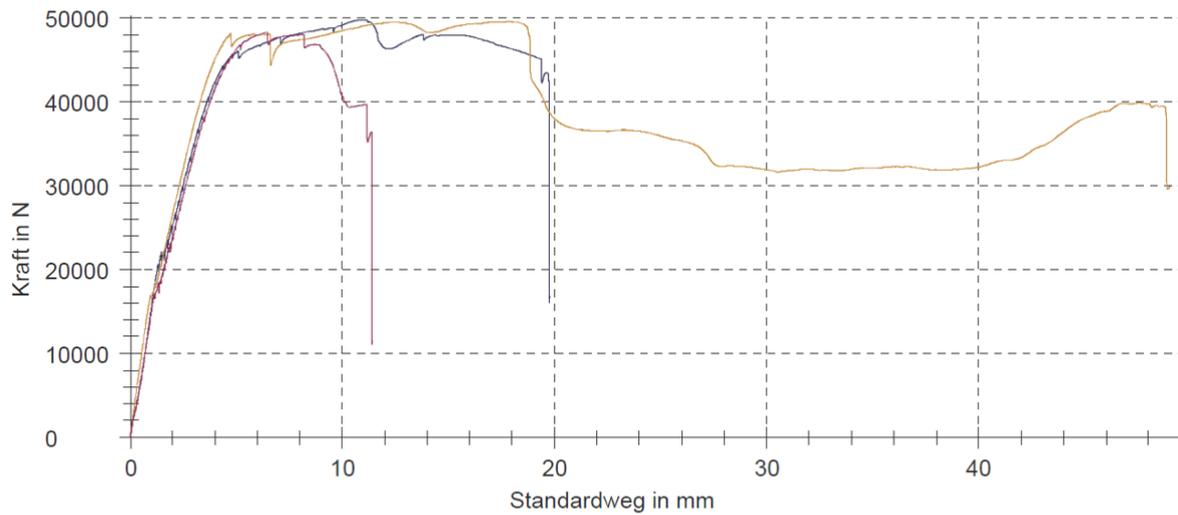
Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	Kommentar
01	01	51,7	5,6	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min
02	02	47,9	5,5	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min
03	03	49,0	5,6	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min

### Statistik:

MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm	4AP-4V-PUR-GV-ohne Bl. n = 3	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm
5000	-	$\bar{x}$	49,5	5,6
-	-	s	1,95	0,0
-	-	v [%]	3,95	0,68

Bild 5-14: MUF-MUF-OB ohne Stahlbleche

## Seriengrafik:



### Prüfergebnisse:

Legende	Probenbezeichnung	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm	Kommentar	MW Weta (5000N) N	MW-Weta mm
■	01	49,8	10,9	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min	5000	-
■	02	49,6	17,8	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min	-	-
■	03	48,3	6,5	Prüfgeschwindigkeit 2,5 mm/min	-	-

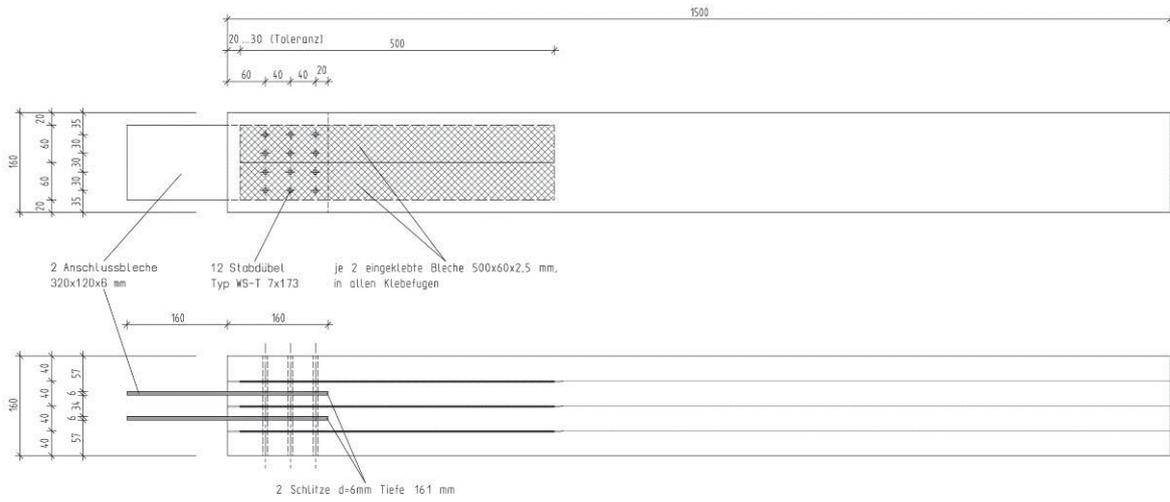
### Statistik:

4AP-PUR-MUF-GV-vute	F <sub>max</sub> kN	dL(F <sub>max</sub> ) mm
n = 3		
x	49,2	11,7
s	0,811	5,7
v [%]	1,65	48,73

Bild 5-15: PUR-MU-GV-V mit gevouteten Stahlblechen

## A5.3 Versuchsreihe 4A: Zugkraftanschluss

VR 4A: Zugprobekörper mit Stabdübelanschluss



VR 4A: Zugprobekörper mit Bolzenanschluss

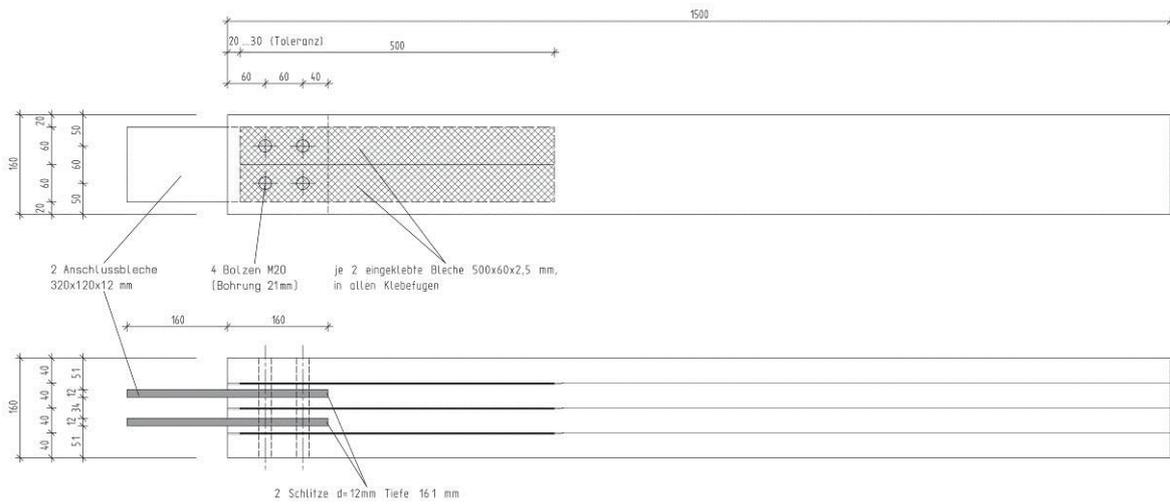


Bild 5-16: VR 4A: Werkplan Probekörper Zugkraftanschluss



Bild 5-17: VR 4A: Zugprobekörper - Vorbereitung beim IBAC

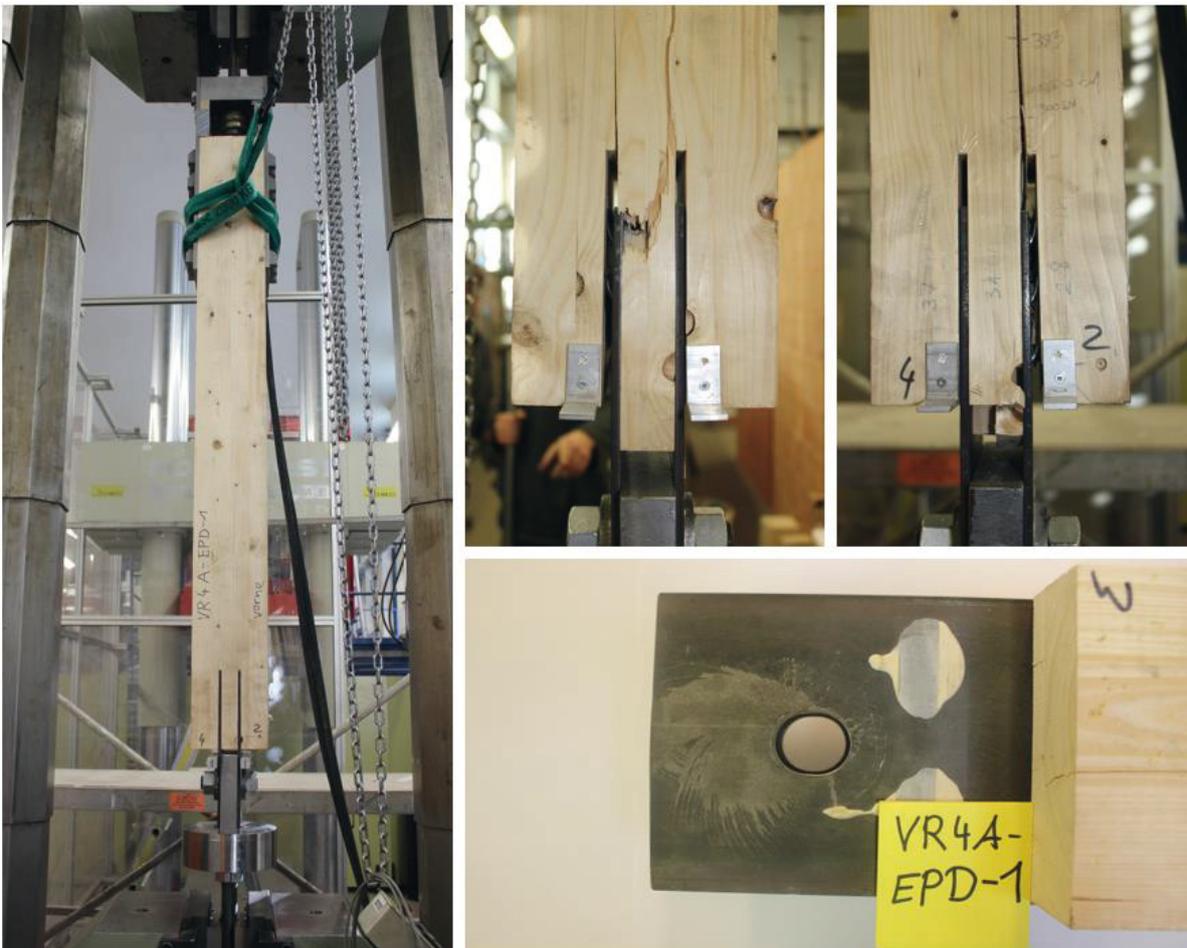


Bild 5-18: VR 4A: Probekörper EP-D-1



Bild 5-19: VR 4A: Probekörper PUR-D-1

**VR 4A: Kraft-Verschiebungs-Diagramm Stabdübelanschlüsse**

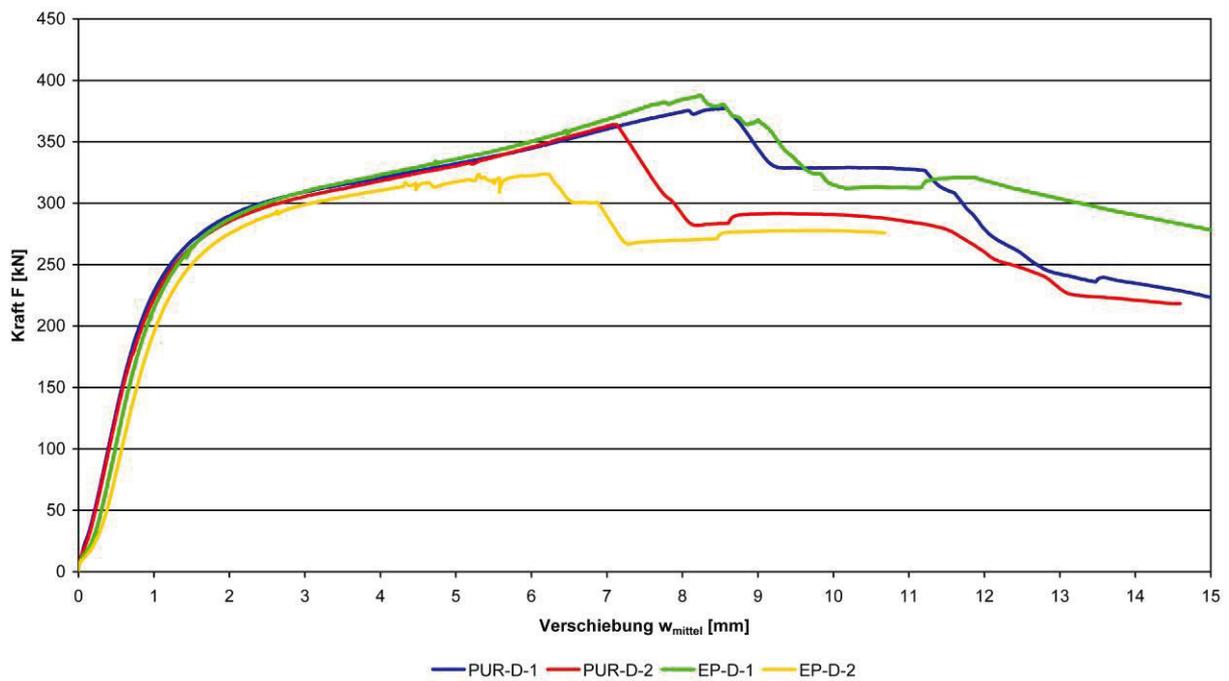


Bild 5-20: VR 4A: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Proben mit Stabdübelanschluss



Bild 5-21: VR 4A: Probekörper EP-B-2



Bild 5-22: VR 4A: Probekörper PUR-B-1

**VR 4A: Kraft-Verschiebungs-Diagramm Bolzenanschlüsse**

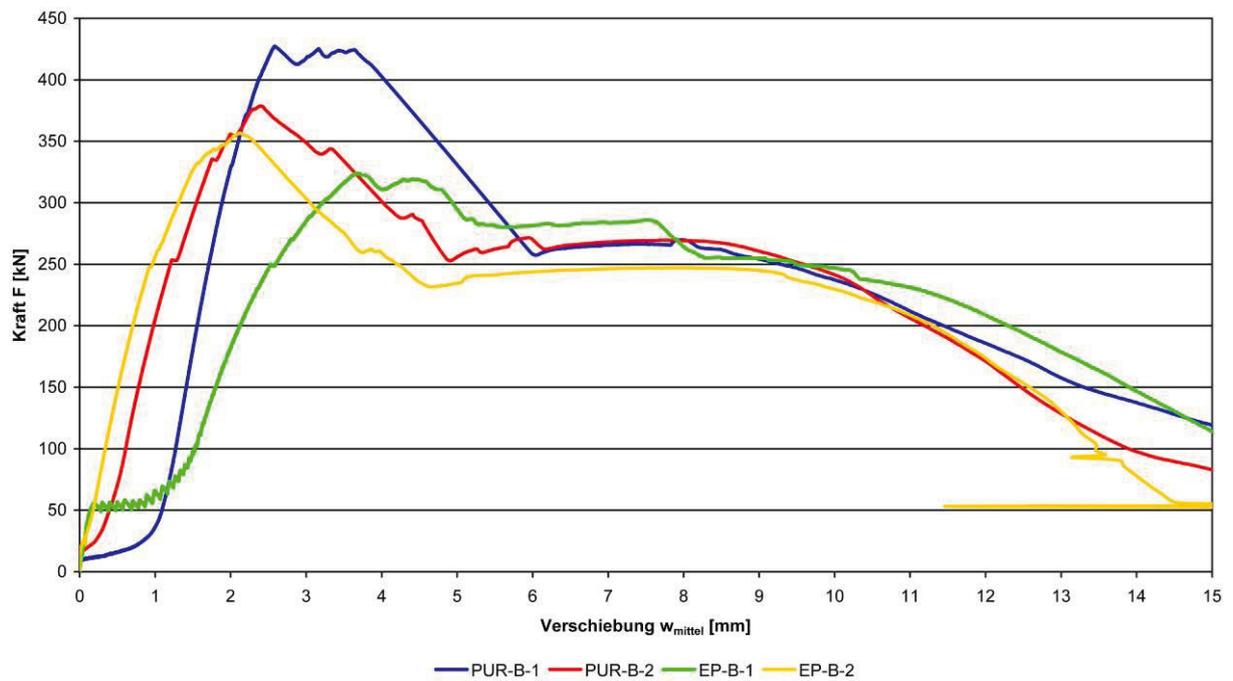
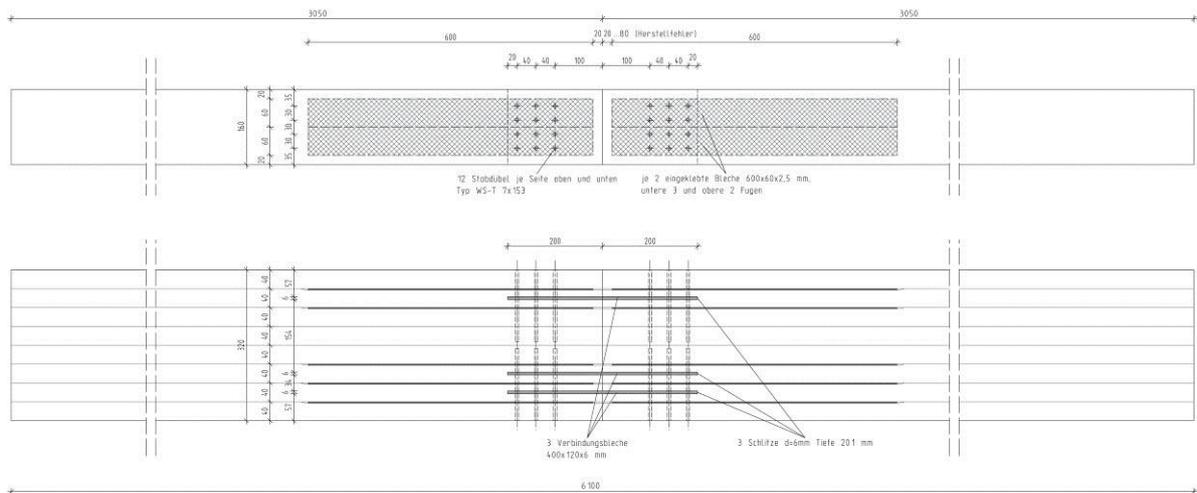


Bild 5-23: VR 4A: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Proben mit Bolzenanschluss

## A5.4 Versuchsreihe 4B: Biegeträger mit biegesteifem Stoß

VR 4B: Biegeträgerstoß mit Stabdübeln und eingeschlitzten Verbindungsblechen



VR 4B: Biegeträgerstoß mit Bolzen und außen liegenden Verbindungsblechen

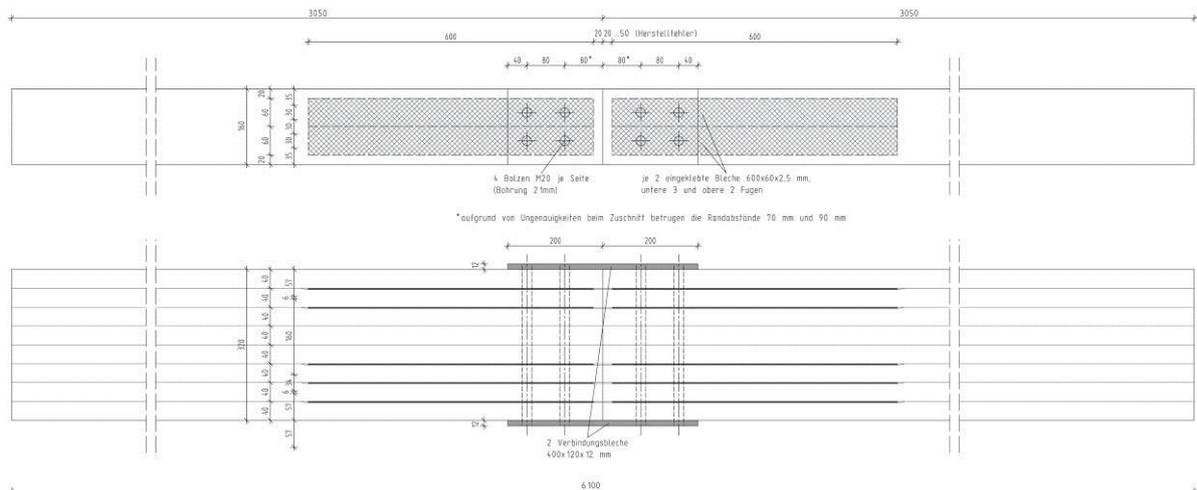


Bild 5-24: Werkplan Probekörper Biegeträger mit biegesteifem Stoß

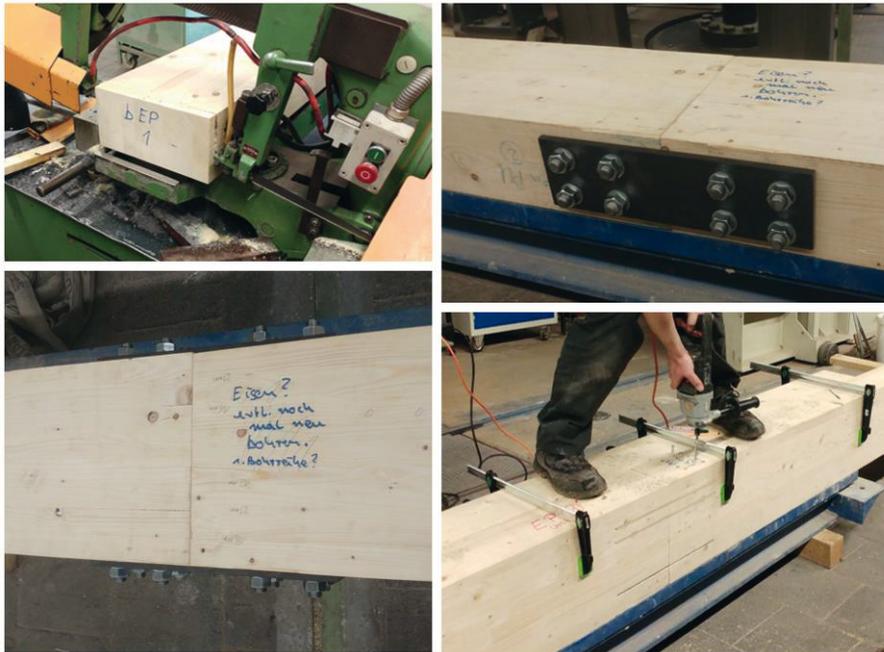


Bild 5-25: VR 4B: Probekörpervorbereitung beim IBAC



Bild 5-26: VR 4B: Probekörper EP-D-1



Bild 5-27: VR 4B: Probekörper EP-D-1



Bild 5-28: VR 4B: Probekörper PUR-D-2

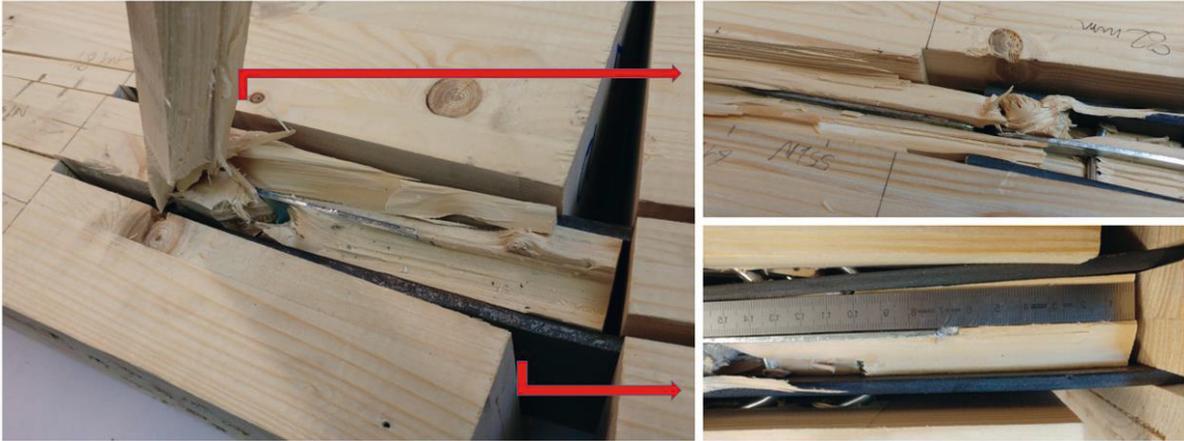


Bild 5-29: VR 4B: Probekörper PUR-D-2

**VR 4B: Biegesteifer Trägerstoß mit Stabdübelanschluss**

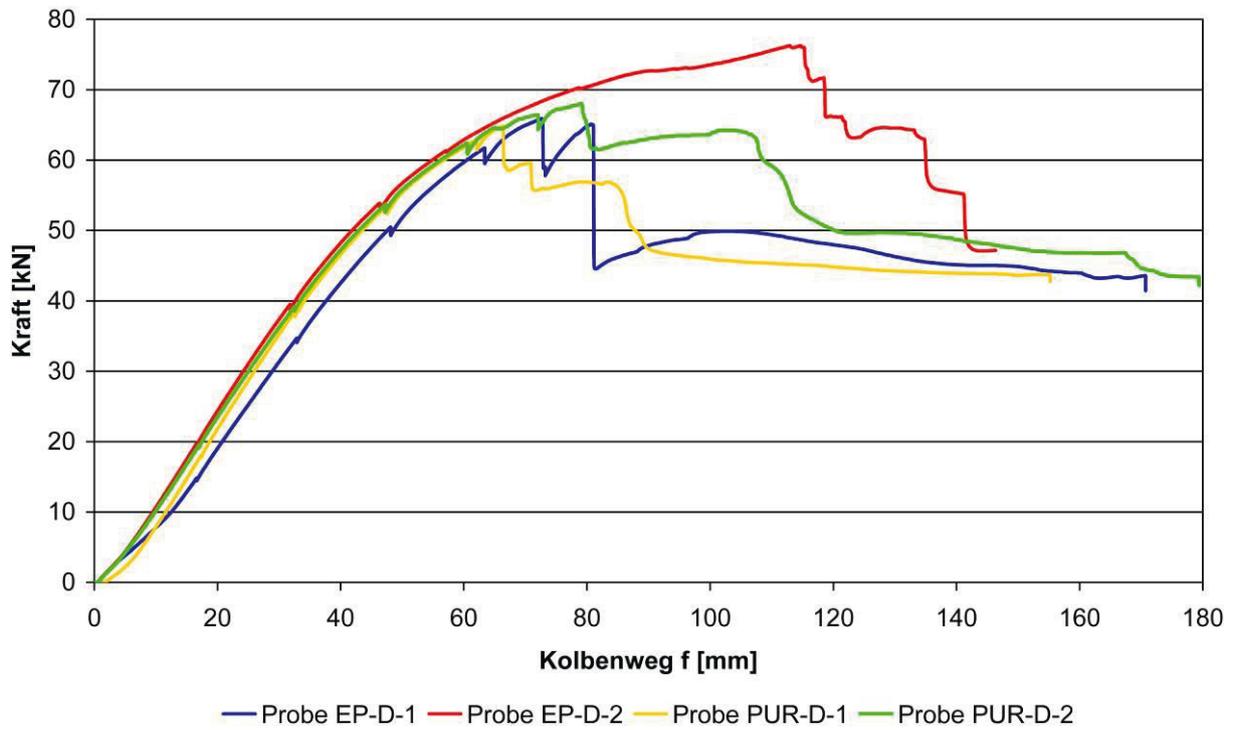


Bild 5-30: VR 4B: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Proben mit Stabdübelanschluss

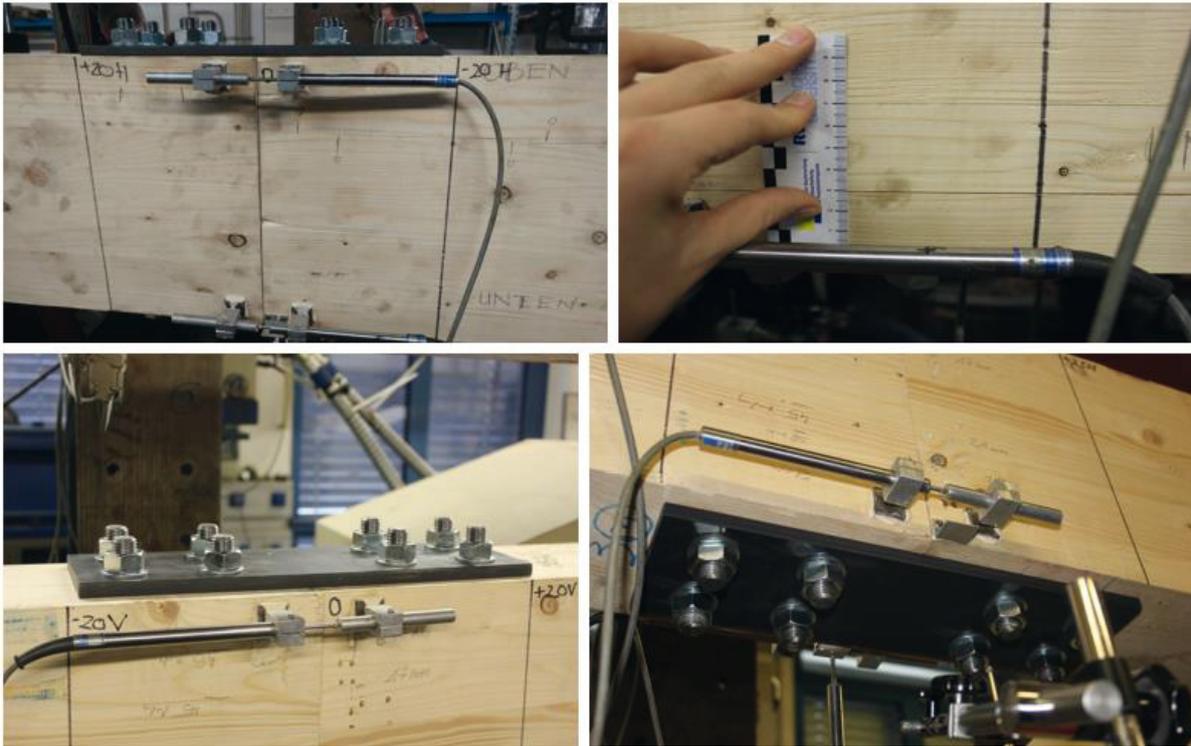


Bild 5-31: VR4B: Probekörper EP-B-1



Bild 5-32: VR4B: Probekörper EP-B-1



Bild 5-33: VR4B: Probekörper PUR-B-1



Bild 5-34: VR4B: Probekörper PUR-B-1

### VR 4B: Biegesteifer Trägerstoß mit Bolzenanschluss

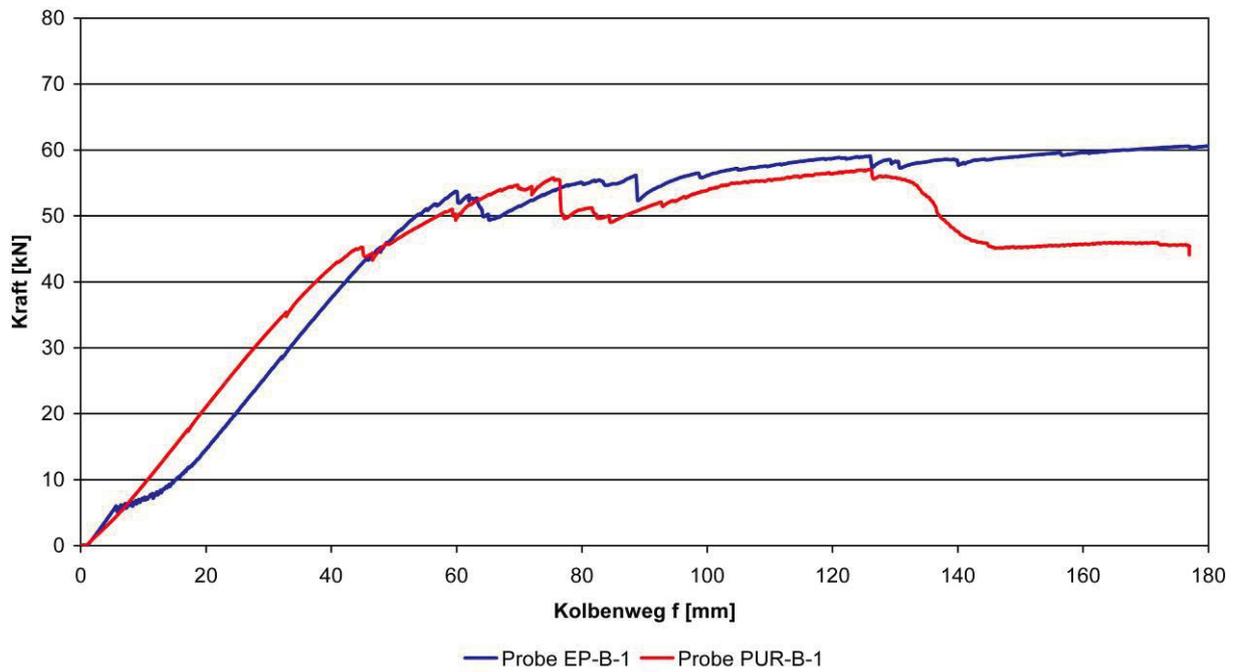


Bild 5-35: VR 4B: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Proben mit Bolzenanschluss