



Esche Verklebung

Ergänzende Untersuchungen zur Optimierung der Verklebung von Eschenholz für den Einsatz als Brettschichtholz im konstruktiven Holzbau

Schlussbericht

Bericht Nr.	R.007038-10-63FE-01-SB-01
Auftrag Nr.	R.007038-10-63FE-01, Bafu Projekt 2014.06
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	15.Dezember 2015
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt (BAFU) Fond zur Förderung der Wald- und Holzforschung Abteilung Wald
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Werkstoffe und Holztechnologie Kompetenzbereich Holz- und Oberflächenbehandlung Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel 6 Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91 www.ahb.bfh.ch
Bearbeiter	B.Sc. Gaspard Clerc
Projektverantwortliche	Prof. Dr. Peter Niemz/Dr. Martin Lehmann
Institutsleiter	Prof. Dr. Frédéric Pichelin

Abstract

Die Verklebung von Eschenholz mit konventionellen Klebstoffen wie 1K-PUR und MUF ist bisher problematisch. Nur mit PRF werden bisher die Normvorgaben für den Delaminierungstest nach EN 302-2:2013 erreicht. Im Projekt wurden daher ein von der Fa. Henkel entwickelter Primer für 1K-PUR und weiterentwickelte MUF Harze von Dynea für die Verklebung von Eschenholz getestet. Es wurden Delaminationstests (Verfahren bei hoher und tiefer Temperatur) nach EN 302-2:2013 und Zugscherprüfungen (A1, A4 und A5) nach EN 302-1:2013 durchgeführt. Das Holz für die Delaminierungstests wurde unter industriellen Bedingungen verklebt. In einer ersten Versuchsreihe, wurde der Einfluss von Primerkonzentration (Primer von Henkel) bei 1K-PUR im Vergleich mit MUF (weiterentwickelte Systeme von Dynea), PRF (handelsübliches System mit optimierten Auftragsbedingungen) geprüft. In einer zweiten Versuchsreihe (reduziert auf Zugscherproben mit Behandlungen A1 und A4), wurden der Einfluss der

Primerkonzentration, der Einwirkungszeit und der Holzfeuchte bei der Verklebung mit 1-KPUR auf die Verklebungsgüte untersucht. Bei MUF erfolgte lediglich eine Wiederholung mit den gleichen Klebstoffsystemen. Die Ergebnisse zeigen, dass alle 1K-PUR Klebstoffe mit Primer die Mindestanforderungen der Zugscherfestigkeit nach EN 301:2013 resp. EN 15425:2008 (Lagerfolgen A1, A4 und A5) erreichen. Die Mindestanforderungen bei der Delaminierungsbeständigkeit werden bisher nur bei PRF erreicht. Auch das weiterentwickelte Melaminharz konnte die Anforderungen noch nicht erfüllen. Für PUR konnte in den Nachversuchen kein eindeutiger Einfluss der Primerkonzentration, der Einwirkungszeit des Primers und Holztaugungsfeuchte auf die Zugscherfestigkeit nachgewiesen werden. Für Melaminklebstoffe wurden in der 2. Versuchsreihe ähnliche Ergebnisse wie in der ersten erzielt (keine Verbesserung). Es sind weitere Arbeiten zur Optimierung der Verklebung von Esche notwendig.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
Inhaltsverzeichnis	3
1 Ausgangslage	4
2 Zielsetzungen	6
3 Projektbeteiligte	6
4 Material und Methode	7
4.1 Übersicht	7
4.2 Holz	7
4.3 Verkleben	7
4.4 Versuchsübersicht (Klebstoffe/Primer)	9
4.5 Versuchsmethodik	10
5 Ergebnisse	12
5.1 Ergebnisse Zugscherfestigkeit	12
5.2 Ergebnisse Delaminierungsprüfung (Versuchsreihe 1)	15
5.3 Ergebnisse Versuchsreihe 2 (Zugscherproben, ergänzende Nachversuche)	17
5.4 Ausbildung der Klebfugen	21
6 Diskussion	24
6.1 Serie 1	24
6.2 Serie 2	24
7 Schlussfolgerungen	25
8 Verzeichnisse	26
8.1 Abbildungsverzeichnis	26
8.2 Tabellenverzeichnis	27
8.3 Literaturverzeichnis	27
9 Anhang	29

1 Ausgangslage

Das Aufkommen an Laubholz ist durch forstwirtschaftliche Massnahmen in der Schweiz, Deutschland und Österreich in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Derzeit wird ein Grossteil dieses Holzes noch energetisch genutzt, eine stärkere stoffliche Nutzung ist daher zwingend erforderlich.

Bisher wird im Holzleimbau überwiegend Nadelholz verwendet. Die Mehrheit der Normen ist daher für Nadelhölzer entwickelt worden. Die Anwendung von Laubholz im Holzleimbau ist derzeit begrenzt auf Eschen- und Buchenholz, da diese beiden Holzarten den höchsten Anteil am Laubholzaufkommen der Schweiz haben. Für Buche existiert für die Verklebung eine Zulassung mit einem speziellen Melaminharz mit langer geschlossener Zeit sowie für 1K-PUR mit einem von Henkel und Cie. entwickelten Primer für Laubholz. Mit PUR und dem einem speziellen Primer für Nadelholz sind auch schwer verklebbare Nadelhölzer verklebbar.

Grosse Schwierigkeiten bestehen derzeit, die Normanforderungen hinsichtlich der Verklebungsgüte für die Zugscherfestigkeit nach EN 302-1:2013 nach Lagerfolge A4 und der Delaminierung (EN 302-2:2013) zu erfüllen. Die bisher eingesetzten Klebstoffe wurden für die Verklebung von Nadelholz entwickelt, Buche wird wegen der höheren Festigkeit meist als Referenzmaterial für die Prüfung der Verklebungsgüte verwendet, da die Festigkeit der Fichte für die Testung des Klebstoffes zu gering ist. Spezielle Klebstoffe für Laubholz existieren wegen des geringen Marktpotentials bisher nicht. PRF (Aerodux) erfüllt alle erforderlichen Anforderungen. Die Fa. neue Holzbau, Lungern setzt für entsprechende Beanspruchungsfälle derzeit daher für die Flächenverklebung nur PRF ein. Hinderlich ist hier die dunkle Farbe des PRF. Das Verbesserungspotential durch die Holzbearbeitung ist relativ begrenzt (Oberflächenbearbeitung, insbesondere Stirnplanfräsen, Bearbeitung des Holzes maximal 2 h vor dem Verkleben). Das grösste Potential ist derzeit in einer Verbesserung der Klebstoffe (Adhäsion, Kohäsion) oder einer Oberflächenbehandlung (z.B. Vorbehandlung mit Primer) zu suchen. Der verfügbare HMR Primer wird wegen der aufwendigen Verarbeitung und der Nutzung von Formaldehyd nicht genutzt. Die Ursachen für die grösseren Probleme bei der Laubholzverklebung liegen zum einen in der höheren Dichte, damit dem grösseren Quell- und Schwindmassen im Vergleich zum Nadelholz aber auch teilweise in der noch nicht völlig bekannten chemischen Zusammensetzung (Extraktstoffe, Zugängigkeit der OH-Gruppen u.a.). Ebenso ist die Festigkeit der Esche deutlich höher als bei Nadelholz, was bei mechanischen Tests oder Quellen/Schwinden zu höheren Belastungen in der Klebefuge führt.

Die vorliegende Arbeit ist eine Fortsetzung der Untersuchungen des 2014 abgeschlossenen Projektes der ETH zur Optimierung der Verklebung von Eschenholz mit Melaminharz und PUR [Projekt Nummer: 2013.11 und Artikel dazu von S. Ammann et al., 2015]. Dabei zeigte sich, dass bisher nur PRF Klebstoffe die Mindestanforderung in nassem Zustand (Zugscherfestigkeit und Delaminierungsbeständigkeit) erfüllen können. Bei 1 K-PUR (anderer Hersteller als in diesem Projekt) wurden im vorherigen Projekt mit beiden getesteten Klebstoffen nicht die zulässigen Werte der Delaminierung erreicht, das Primern mit DMF brachte aber eine Verbesserung. Melaminsysteme erfüllten in diesem Projekt auch die Forderungen nicht. Die Variation der geschlossenen Zeit, wie sie bei Buche durch Arbeiten der TU München zum Erfolg führte, brachte für Esche nicht die gewünschten Ergebnisse.

Auch bei PRF muss eine lange geschlossene Wartezeit eingestellt werden, um eine entsprechende Ausbildung der Klebfugen zu erreichen. Die wurde durch Vorarbeiten der TU München ermittelt (Knorz (2015)).

Um die Verklebung von Esche zu verbessern, wurden

- ein von der Fa. Henkel Schweiz entwickelter Primer in verschiedenen Applikationsvarianten untersucht.
- weiterentwickelte Melaminharze der Fa. Dynea (Weiterentwicklung durch Dynea nach Ergebnissen des Projektes von 2014) getestet.

In diesem Projekt (2014) wurden zwei Einkomponenten Polyurethan-Klebstoffe (1K-PUR), ein Phenol-Resorcinol Formaldehyd (PRF) und zwei weiterentwickelte Melamin Urea Formaldehyde (MUF) geprüft.

PRF diene dabei als Massstab, den es zu erreichen gilt. Dabei wurde die Verklebungsgüte mittels Zugscherprüfung (EN 302-1:2013) und Delaminierungsprüfung (EN 302-2:2013) geprüft.

2 Zielsetzungen

Ziel dieser Arbeit ist eine Untersuchung des Einflusses verschiedener Herstellungsparameter (zwei Klebstoffe und Primer für 1 K-PUR, zwei MUF Harze und ein PRF von Dynea) auf die Verklebungsgüte von Eschenholz. In einer ersten Versuchsreihe wurde als Einflussparameter die Einwirkungszeit der Primer variiert. Basierend auf den Ergebnissen wurde in einer zweiten, anschliessenden Versuchsreihe der Einfluss der Holzfeuchte bei der Verklebung und der Primerkonzentration für PUR- Verklebungen variiert.

- Versuchsreihe 1(MUF, PRF, PUR mit Primer): Zugscherfestigkeit und Delaminierung bei Variation der Primereinwirkungsdauer.
- Versuchsreihe 2 MUF, PUR mit Primer, variierte Konzentration): Zugscherfestigkeit bei Variation der Primerkonzentration für PUR und der Holzfeuchte. Die Melaminharze wurden unverändert nochmals getestet, um die Ergebnisse von Versuchsreihe 1 zu überprüfen. Die zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Delaminierungsprüfung

3 Projektbeteiligte

Am Projekt arbeiteten:

die BFH, Institut für Werkstoffe und Holztechnologie (G. Clerc, Prof. Dr. F. Pichelin, Prof. Dr. P. Niemz, Dr. M. Lehmann, Dr. M. Placenia

die Fa. neue Holzbau AG Lungern (Herr Strahm)

die Fa. Henkel & Cie AG, Sempach (Dr. Gabriel, Dr. Amen, D. Salzgeber)

die Fa. DeMeth AG (Vertretung der Fa. Dynea), Einsiedeln (Herr Keiser)

4 Material und Methode

4.1 Übersicht

Die Versuche wurden in zwei Etappen durchgeführt

1) Serie 1:

- Verklebung von Brettschichtholz in der Fa. neue Holzbau unter industriellen Bedingungen Delaminierungstest nach EN 302-2:2013
- Verklebung von Zugscherproben bei der Fa. Henkel und Cie., Prüfung der Zugscherfestigkeit nach EN 302-1:2013

Das Holz für diese Versuche wurde vorsortiert (Messung des dynamischen E-Moduls und der Rohdichte, siehe Schlussbericht zum Projekt 2013.11)

2) Serie 2:

- Nachversuche an Zugscherproben nach EN 302-1:2013 mit variiertem Primerauftrag bei PUR und Wiederholung der Verklebung mit Melaminharz, Verklebung des Holzes mit 8% und 12% Holzfeuchte

4.2 Holz

Proben für Zugscherprüfung:

30 Bretter wurden bei der Fa. neue Holzbau AG (Lungern) nach Dichte, E-Modul und Jahrringlage vorsortiert. Die Rohdichte betrug $673 \pm 43 \text{ kg/m}^3$, der dynamische E-Modul $12662 \pm 1431 \text{ MPa}$ bei einer Feuchte von circa 10 %. Aus diesen wurden an der BFH Proben im Format $650 \times 130 \times 15 \text{ mm}$ geschnitten und in Klimaraum (20°C, 65% R.F.) gelagert. Vor der Verklebung erfolgte ein erneutes Hobeln an der BFH (Messer vorher gewechselt). Die Zugscherprüfung erfolgte unter den in EN 302-1:2013 angegebenen Bedingungen.

Proben für Delaminierungsprüfung

Je Brettstück wurden ca. 6 Lamellen erzeugt. Das Holz wurde vorgängig mit Ultraschall sortiert. Bei einer geschätzte Feuchte von 10% betrug die Rohdichte $689 \pm 45 \text{ kg/m}^3$, der dynamische E-Modul $17401 \pm 2734 \text{ MPa}$. Das Holz wurde in der Fa. neue Holzbau AG ca. 2 h vor der Verklebung gehobelt. Die Verklebung für den Delaminierungstest erfolgte unter industriellen Bedingungen (Holzfeuchte auf spätere Nutzung angepasst).

4.3 Verkleben

Verkleben für die Zugscherfestigkeit Versuche

Versuchsreihe 1

Die Eschenlamellen (*Fraxinus excelsior*) wurden ca. 3 Stunden vor dem Verkleben an der BFH auf $650 \times 130 \times 5 \text{ mm}$ gehobelt. Die Hobelmesser wurden vor dem Hobeln gewechselt, so dass der Einfluss des Messerverschleisses ausgeklammert werden konnte. Das Zuschneiden der Lamellen auf $320 \times 130 \times 5 \text{ mm}$ und die Verklebung erfolgte für alle Varianten bei der Fa. Henkel in Sempach. Tabelle 1 zeigt die Versuchsübersicht zu Versuchsreihe 1. Als Primer für PUR wurde PR 3105 (Henkel) mit einer Auftragsmenge von 20 g/m^2 (maschineller Auftrag) und einer Konzentration von 5% in Versuchsreihe 1 verwendet. Die Verklebungsparameter sind in Tabelle 2 ersichtlich.

In der ersten Versuchsreihe wurden die PRF und MUF Klebstoffe (Klebstoff und Härter) gemäss Herstellerangaben gemischt und einseitig aufgetragen.

Versuchsreihe 2

In der zweiten Versuchsreihe wurden bei den beiden MUF Systemen Harz und Härter separat appliziert, auf der einen Fläche wurde das Harz und auf der anderen der Härter aufgetragen. Der Klebstoffauftrag erfolgte jeweils durch Mitarbeiter der beiden Klebstofflieferanten. Die Auftragsmenge wurde gewogen und per Zahnpachtel aufgetragen. Die verklebten Holzlamellen wurden dann ca. eine Woche im Normalklima bei 20°C 65% R.LF gelagert. Danach erfolgte der Zuschnitt (Probenform siehe EN 302-1:2013).

Verkleben des Holzes für die Delaminierungsversuche

Parameter: Lamellendicke 30mm, Pressparameter nach Angaben der Klebstoffhersteller.

Die Verklebung der Delaminierungsproben erfolgte bei der neuen Holzbau AG auf der industriellen Produktionsanlage für Brettschichtholz, die Firma verfügt über langjährige Erfahrungen bei der Verklebung von Laubholz. Für MUF und PRF standen industrielle Auftragssysteme bereit, der 1K-PUR Klebstoff wurde manuell aufgetragen (Abbildung 1). Die Verklebung erfolgte nach EN 302-2:2013. Der Primer für PUR (je Lamellenseite 10g/m²) wurde kontinuierlich mittels Auftragsgerät von oben und unten aufgesprüht. Bei MUF und PRF wurden Klebstoff und Härter mit der Industrieanlage ohne vorheriges Mischen auf die Lamellen aufgebracht.



Abbildung 1: Klebstoff Applikation des PUR bei der Verklebung der Delaminierungsproben

Die Lamellen wurden manuell aufeinander gelegt und anschliessend mit der Presse der neuen Holzbau AG verpresst (Abbildung 2).



Abbildung 2: Verpressen der Lamellen für die Delaminierungsversuche

4.4 Versuchsübersicht (Klebstoffe/Primer)

Tabelle 1: Versuchsübersicht (verwendete Klebstoffe und primer(mit Kürzel))

Klebstoff System	Kürzel
Aerodux 185 mit Härter HRP 155	PRF (Resorcin-Phenol Formaldehyd-Harz)
Melaminharz Prefere 4546 und Härter 5020	MUF_5020
Melaminharz Prefere 4546 und Härter 5022	MUF_5022
PUR HB S309 und Primer PR 3105 (1 min)	S3_1min
PUR HB S309 und Primer PR 3105 (5 min)	S3_5min
PUR HB S309 und Primer PR 3105 (10 min)	S3_10min
PUR HB S709 und Primer PR 3105 (1 min)	S7_1min
PUR HB S309 ohne Primer	S3_NP

Tabelle 2 : Technologische Parameter für die verwendeten Klebstoffe. Für die Applikation bedeutet 1 einseitiger Auftrag, und 2 getrennter Auftrag Harz und Härter.

Klebstoff	Presszeit [min]	Auftragsmenge [g/m ²]	geschlossene Wartezeit [min]	Pressdruck [MPa]	Applikation ¹⁾
HB S309	360	150	-	0.8	1
HB S709	360	150	-	0.8	1
PRF	350	450	45	1	1
MUF_5022	180	500	45	1	1, 2
MUF_5020	180	500	30	1	1, 2

4.5 Versuchsmethodik

Versuchsreihe 1

Es wurden weiterentwickelte MUF- Systeme sowie PRF von Dynea getestet. Bei 1K-PUR wurde die Einwirkungszeit des Primers variiert. Es wurde die Zugscherfestigkeit nach den Behandlungen A1, A4 und A5 (EN 302-1:2013) geprüft.

Zusätzlich wurde die Delaminierungsbeständigkeit bei tiefer (27.5°C) und hoher Temperatur (65°C) nach EN 302-2:2013 geprüft. Tabelle 3 zeigt die Versuchsübersicht.

Die Delaminierung wurde parallel an der BFH und bei Henkel in Sempach sowie Dynea in Norwegen geprüft. Dadurch war zugleich ein Vergleich der Methodik möglich (Ringversuch). Die Ergebnisse zeigten gleiche Tendenzen und waren gut reproduzierbar (siehe Anlagen).

Tabelle 3: Geprüfte Varianten - Versuchsreihe 1

Variante	Holzfeuchte [%]	Klebstoff	Primer Konzentration [%]	Primer EZ [min]
1	12	Aerodux	-	-
2	12	Prefere 4546/5020	-	-
3	12	Prefere 4546/5022	-	-
4	12	HB S309	5	1
5	12	HB S309	5	5
6	12	HB S309	5	10
7	12	HB S709	5	1
8	12	HB S309	-	-

EZ: Einwirkungszeit des Primers

Versuchsreihe 2

Da in Versuchsreihe 1 nicht alle Normkennwerte erfüllt wurden, wurden in Versuchsreihe 2 nochmals Nachversuche

a) zu den beiden MUF Harzen

b) zu PUR (es wurde HB S709 verwendet) und Primer mit variiertem Primerkonzentration (3 Stufen) durchgeführt. Diese Versuche wurden auf Zugscherprüfungen nach der Behandlung A1 und A4 reduziert. Es hatte sich gezeigt, dass die A4 Prüfung einen guten Richtwert für die Delaminierung gibt. Die Beanspruchung der Klebfugen ist aber geringer als bei der Delaminierungsprüfung, da durch die kleineren Abmessungen geringere Spannungen (Feuchtegradienten) entstehen.

In der zweiten Versuchsreihe wurde nur der Klebstoff PUR HB S709 verwendet. Dazu wurde zusätzlich der Einfluss Holzfeuchte der Lamellen bei der Verklebung untersucht (8% und 12%). Nach der Verklebung wurden die Lamellen einheitlich im Normalklima auf ca. 12 % (20°C, 65 % R.F) konditioniert und dann geprüft. Durch diese Feuchtedifferenz entstehen zusätzlich Eigenspannungen wie in früheren Arbeiten nachgewiesen wurde (Hering 2011).

Tabelle 4: Geprüfte Varianten - Versuche Reihe 2 (EZ: Einwirkungszeit)

Variant e	Holzfeuchte [%]	Klebstoff (Härter)	Primer Konzentration [%]	Primer EZ [min]
9	8	Prefere 4546/5020	-	-
10	12	Prefere 4546/5020	-	-
11	8	Prefere 4546/5022	-	-
12	12	Prefere 4546/5022	-	-
13	8	HB S709	10	1
14	8	HB S709	10	10
15	12	HB S709	10	1
16	12	HB S709	10	10
17	8	HB S709	15	1
18	8	HB S709	15	10
19	12	HB S709	15	1
20	12	HB S709	15	10
21	8	HB S709	5	1
22	8	HB S709	5	10
23	12	HB S709	5	1
24	12	HB S709	5	10
25	8	HB S709	-	-
26	12	HB S709	-	-

Tabelle 5: Anforderungen für die Delaminierungsprüfung bzw. Zugscherfestigkeitsprüfung nach EN 301:2013

Behandlung	Zugscherfestigkeit	Verfahren	Delaminierung
	Mindestwerte		zulässige Maximalwerte
A1	10 MPa	Hohe Temperatur (65°C)	5 %
A4	6 MPa	Niedrige Temperatur (27,5°C)	10 %
A5	8 MPa		

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse Zugscherfestigkeit

5.1.1 Versuchsreihe 1

Die Ergebnisse sind in Boxplots dargestellt. Dabei sind der Median (Linie) der Mittelwert (x) Ränder des Boxplots. 25 % bzw. 75 % aller Werte +-Ausreisser.

Die Oberkante des grau hinterlegten Bereiches stellt die Mindestanforderung der Normwerte da, also z.B. mindestens 10MPa, für die Zugscherfestigkeit dar.

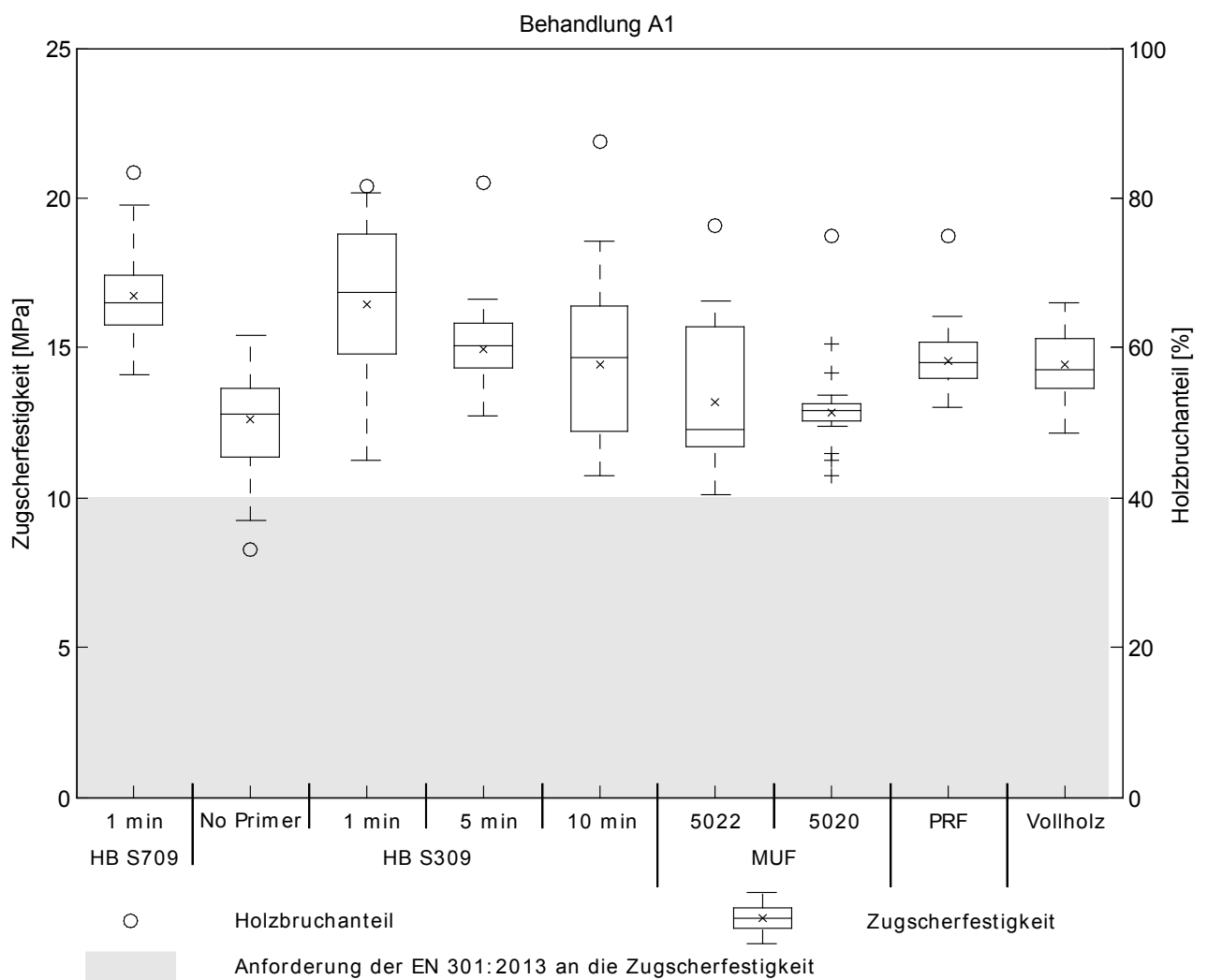


Abbildung 3: Zugscherfestigkeit nach Behandlung A1 für die Varianten 1 bis 8, zum Vergleich Vollholz (Esche), Versuchsreihe 1

Die mittlere Holzfeuchte beim Prüfen bei der Behandlung A1 beträgt 10.6 ± 0.6 %. Alle Klebstoffe erfüllen die Mindestanforderungen (siehe Abbildung 3). Es gibt relativ geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten. Der Holzbruchanteil wird bei PUR durch den Primer deutlich erhöht.

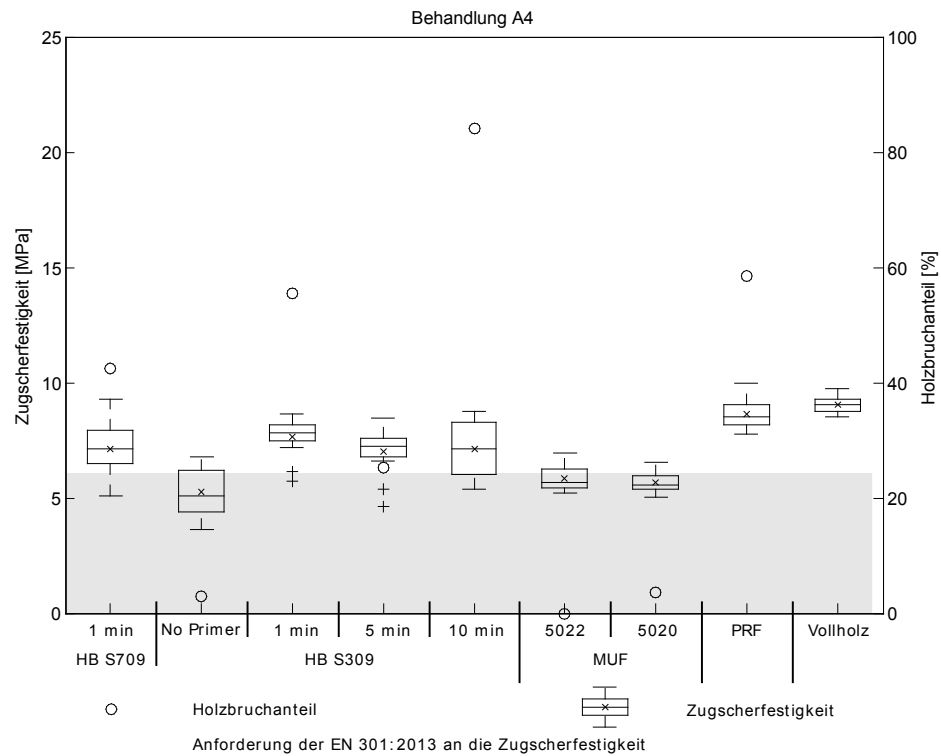


Abbildung 4: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A4 für die Varianten 1 bis 8, Versuchsreihe 1

Die Zugscherfestigkeit und der Holzbruchanteil nach Behandlung A4 sind in der Abbildung 4 gezeigt. Die Mindestwerte werden bei PUR HB S309 ohne Primer und MUF nicht erreicht. Auch der Holzbruchanteil ist bei diesen Varianten gering.

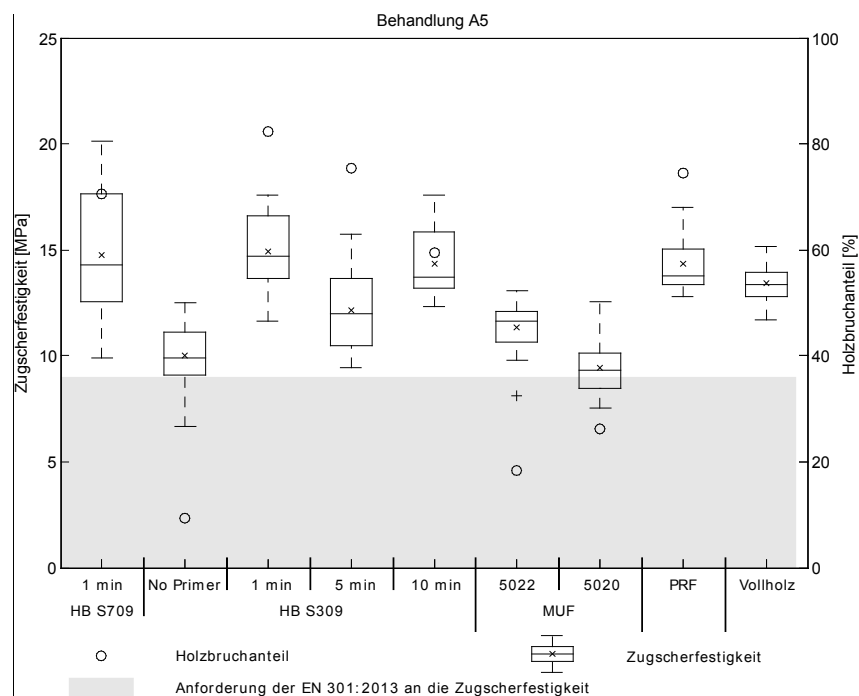


Abbildung 5: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A5 für die Varianten 1 bis 8, Versuchsreihe 1.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse nach Behandlung A5 (Rücktrocknung). Die mittlere Holzfeuchte beim Prüfen beträgt 15.2 ± 0.3 %. HB S309 ohne Primer und die MUF Klebstoffe haben deutlich tiefere Werte als die anderen Klebstoffvarianten. Die Varianten HB S309 mit Primer und einer Einwirkungsdauer von 1 Minute sowie 10 Minuten erreichen die gleiche Festigkeit PRF und Vollholz Proben. In künftigen Arbeiten muss offensichtlich noch länger rückgetrocknet werden, da die zulässige Masseänderung gemäss Norm auch durch die Luftumwälzung beeinflusst wird. Die Holzfeuchte bei A5 betrug 15,2% (erwartet etwa 12%) und ist zu hoch.

Tabelle 6: Zusammenfassung aller Ergebnisse der Versuchsreihe 1. (EZ: Einwirkungszeit; PK: Primerkonzentration; ZF: Zugshefestigkeit; V: Variationskoeffizient; HB: Holzbruchanteil; n: Probenanzahl)

Klebstoff	Behandlung	EZ [min]	PK [%]	ZF [MPa]	V [%]	HB [%]	n [-]
HB S309	A1	-	-	12.62	13	33	20
HB S309		1	5	16.44	18	82	20
HB S309		5	5	14.93	7	82	20
HB S309		10	5	14.45	17	88	20
HB S709		1	5	16.73	9	84	20
MUF_5020		-	-	12.84	7	75	20
MUF_5022		-	-	13.21	17	76	20
PRF		-	-	14.47	8	75	20
Vollholz		-	-	14.54	6	-	20
HB S309	A4	-	-	5.26	19	8.5	10
HB S309		1	5	7.67	10	52.5	16
HB S309		5	5	7.03	13	22.5	17
HB S309		10	5	7.12	17	82.8	20
HB S709		1	5	7.1	15	40.5	21
MUF_5020		-	-	5.68	9	0	12
MUF_5022		-	-	5.87	10	2	10
PRF		-	-	8.64	8	58.5	18
Vollholz		-	-	9.07	4	-	20
HB S309	A5	-	-	10.03	16	9	16
HB S309		1	5	14.9	12	82	25
HB S309		5	5	12.16	15	76	20
HB S309		10	5	14.35	11	60	22
HB S709		7	5	14.77	21	70	22
MUF_5020		-	-	9.44	15	18	12
MUF_5022		-	-	11.36	11	26	18
PRF		-	-	14.33	9	75	20
Vollholz		-	-	13.42	6	-	24

5.2 Ergebnisse Delaminierungsprüfung (Versuchsreihe 1)

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung der BFH dargestellt, die Ergebnisse der Prüfungen durch Dynea und Henkel & Cie. befinden sich im Anhang. Abbildung 6 und 7 zeigen die Ergebnisse der Prüfungen nach den Verfahren bei hoher und tiefer Temperatur.

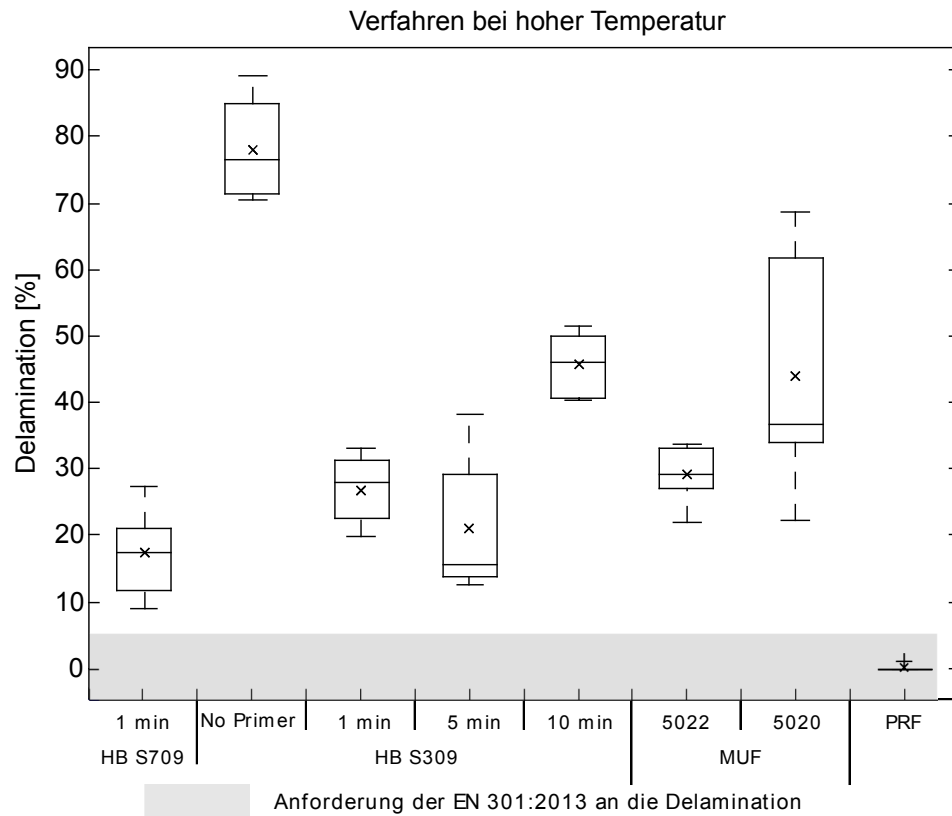


Abbildung 6: Delamination nach Verfahren bei hoher Temperatur.

Es sind deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Systemen zu finden. PRF erreicht eine Delamination von nahezu 0 %, bei HB S309 ohne Primer beträgt die Delamination ca. 80 %. Nur die PRF Klebstoffe erreichen die maximal zulässigen Werte der Delamination nach EN 301:2013. Das Primern bewirkt aber eine deutliche Reduzierung der Delaminierung, die Normvorgaben werden jedoch noch nicht erreicht. Hier besteht weiterer Optimierungsbedarf. Offensichtlich sind auch die industriellen Bedingungen bei der Verklebung von Einfluss (z.B. Jahrringlage) von Einfluss auf das Ergebnis der Delaminierungsprüfung. Bei Laborversuchen wurden bei Henkel die Vorgaben erreicht.

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse bei niedriger Temperatur.

Auch die MUF Klebstoffe erreichen die Normvorgaben nicht. MUF 5020 hat deutliche höhere Werte der Delamination als MUF 5022. Bei niedriger Trocknungstemperatur im Delaminierungstest ist tendenziell die Delamination geringer, insbesondere die MUF Klebstoffe erreichen bessere Werte. Aber auch hier erfüllt nur PRF die Normvorgaben.

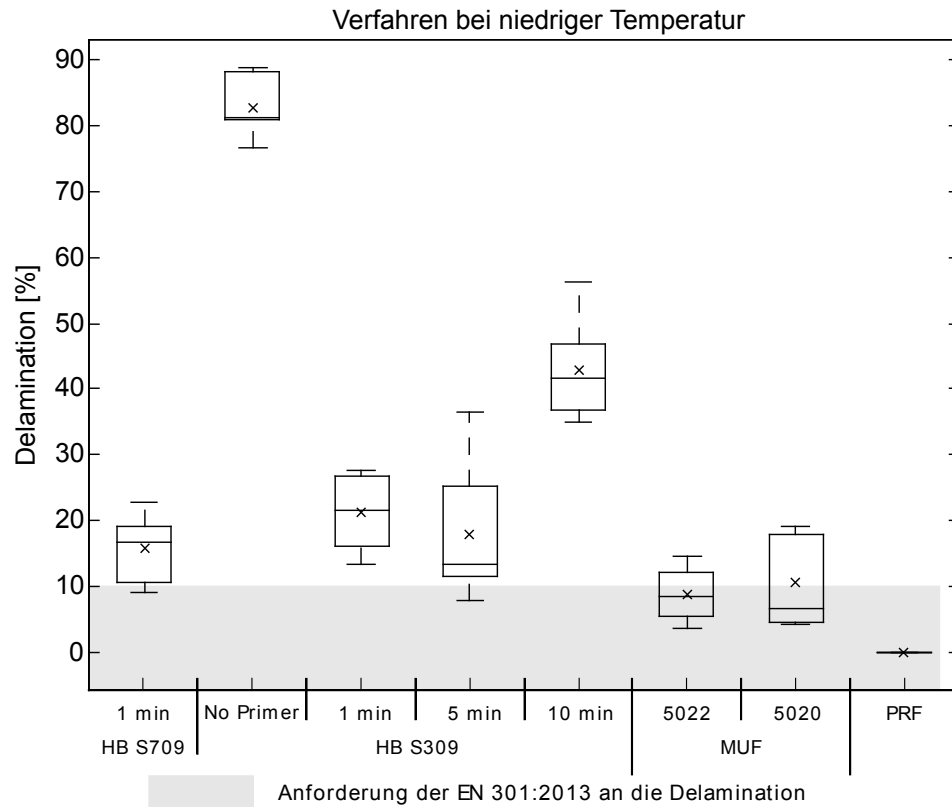


Abbildung 7: Delamination nach Verfahren bei niedriger Temperatur.

Tabelle 7: Zusammenfassung alle Ergebnisse bei der Delaminationsversuche. (EZ: Einwirkungszeit; PK: Primerkonzentration; ZF: Zugscherfestigkeit; v: Variation Koeffizient; HB: Holzbruchanteil; n: Probenanzahl)

Klebstoff	Verfahren	EZ [min]	PK [%]	Delam. [%]	v [%]	n [-]
HB S309	Hohe Temperatur	-	-	78.1	11	4
HB S309		1	5	26.8	27	7
HB S309		5	5	21	21	8
HB S309		10	5	45.6	11	8
HB S709		1	5	17.4	37	7
MUF_5020		-	-	44	40	7
MUF_5022		-	-	29.2	15	7
PRF		-	-	0.1	-	7
HB S309	Niedrige Temperatur	-	-	82.8	6	6
HB S309		1	5	21.4	27	7
HB S309		5	5	18.1	56	8
HB S309		10	5	42.8	17	7
HB S709		1	5	15.7	32	7
MUF_5020		-	-	10.7	66	7
MUF_5022		-	-	8.9	46	7
PRF		-	-	0	-	7

5.3 Ergebnisse Versuchsreihe 2 (Zugscherproben, ergänzende Nachversuche)

Abbildungen 8 und 9 zeigen die Messergebnisse nach Behandlung A1 bei 8% und bei 12% Holzfeuchte beim Verkleben.

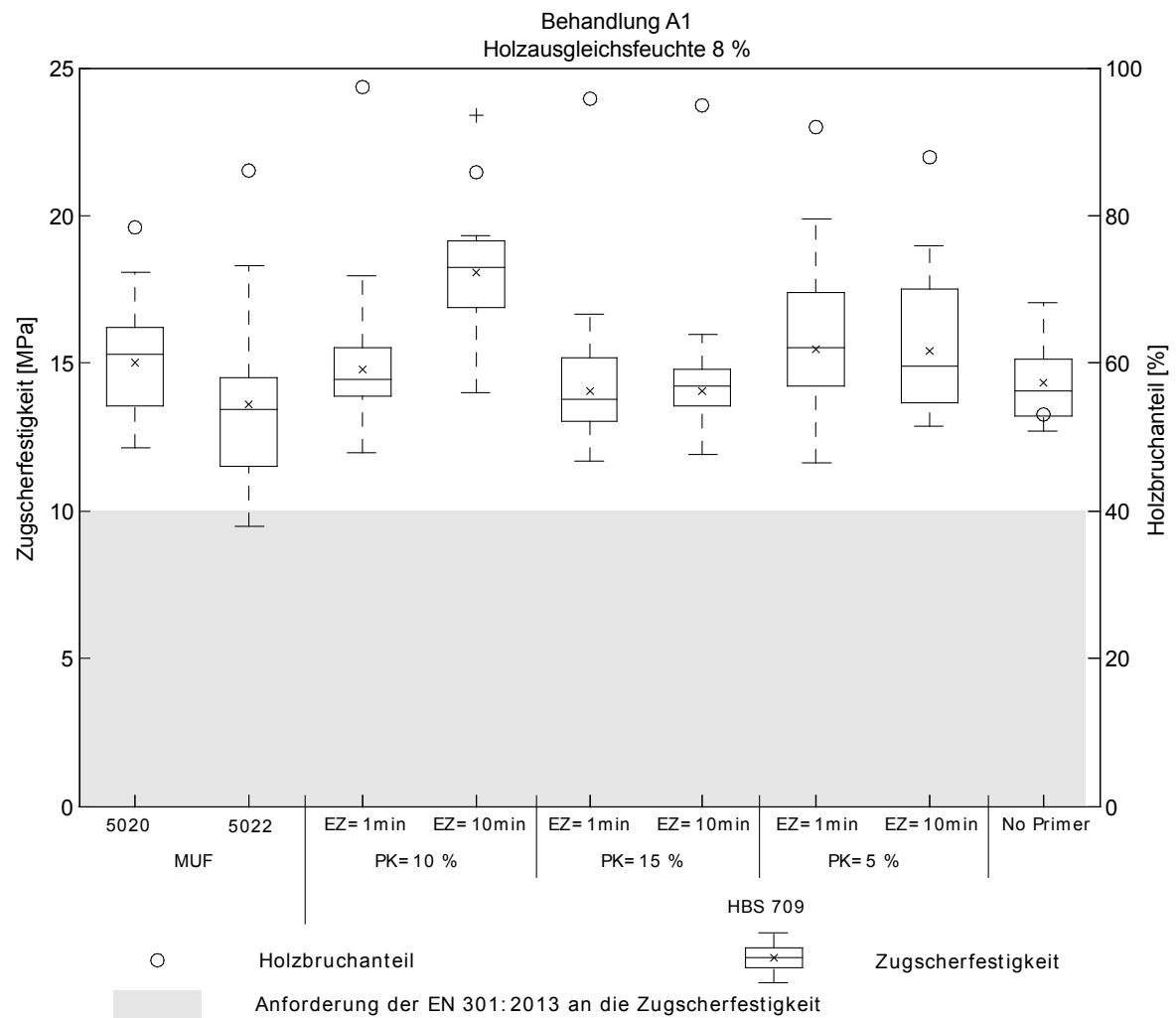


Abbildung 8: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A1, Holzfeuchte beim Verkleben: 8 %, beim Prüfen 12%

Alle Klebstoffe erreichen die Anforderungen. Es ist ein gewisser Einfluss der Holzfeuchte beim Verkleben durch die Eigenspannungen gegeben, die sich bei der Feuchteänderung ergeben. Bei geringer Holzfeuchte beim Verkleben werden leicht höhere Werte erreicht (vergl. Abb. 8 und 9). Das deckt sich mit Ergebnissen früherer Arbeiten (Hering (2011)). Die mittlere Holzfeuchte beim Prüfen nach der Behandlung A1 betrug 10.6 ± 0.8 %.

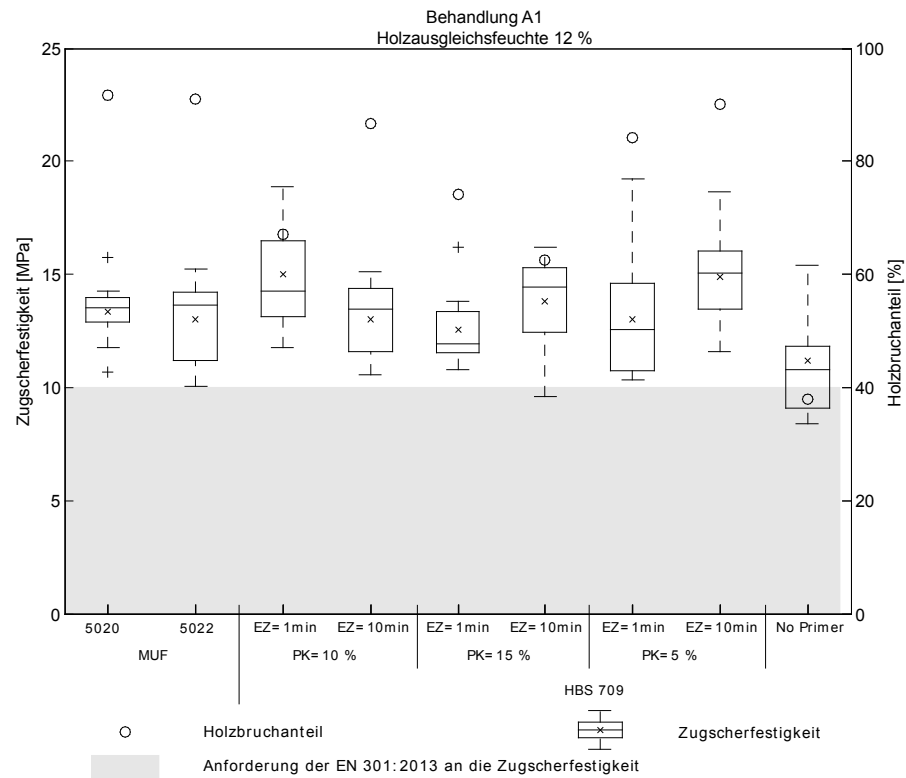


Abbildung 9: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A1, Holzfeuchte beim Verkleben und Prüfen: 12 %

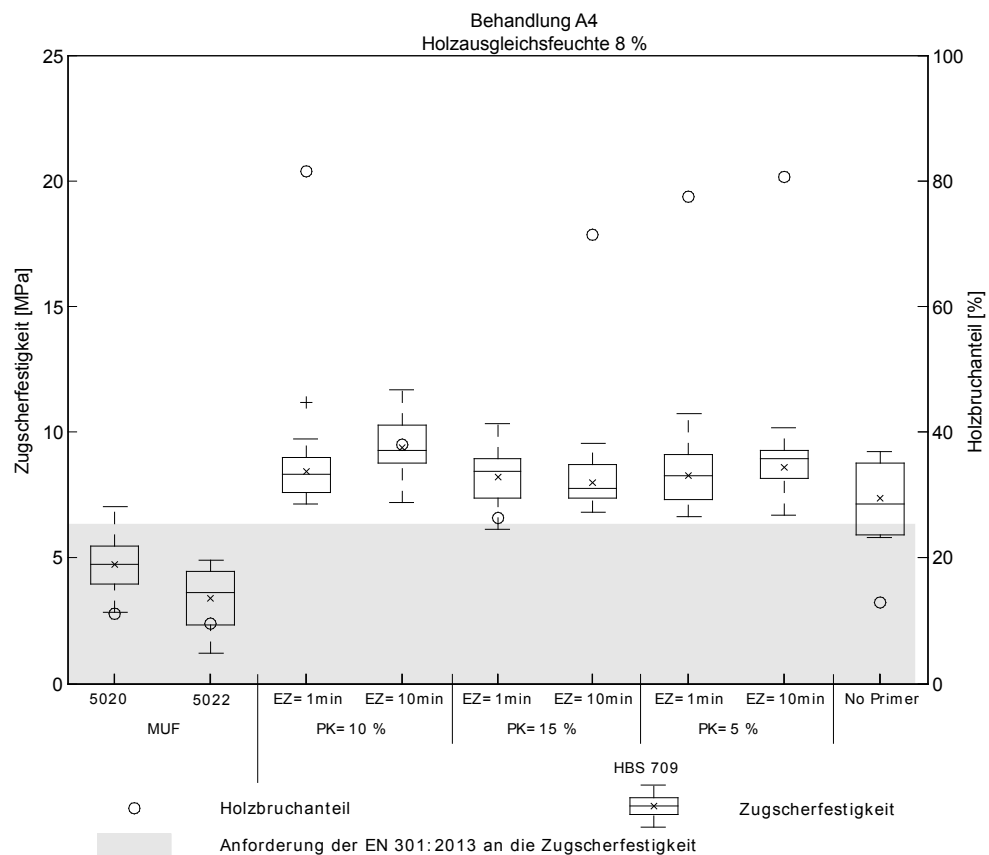


Abbildung 10: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A4, Holzfeuchte beim Verkleben: 8 %,

Die MUF Klebstoffe erreichen nach Behandlung A4 die Anforderungen von 6 MPa gemäss EN 301:2013 nicht, MUF hat auch den geringsten Holzbruchanteil. PUR mit Primer erreicht die Anforderungen. Die Resultate sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

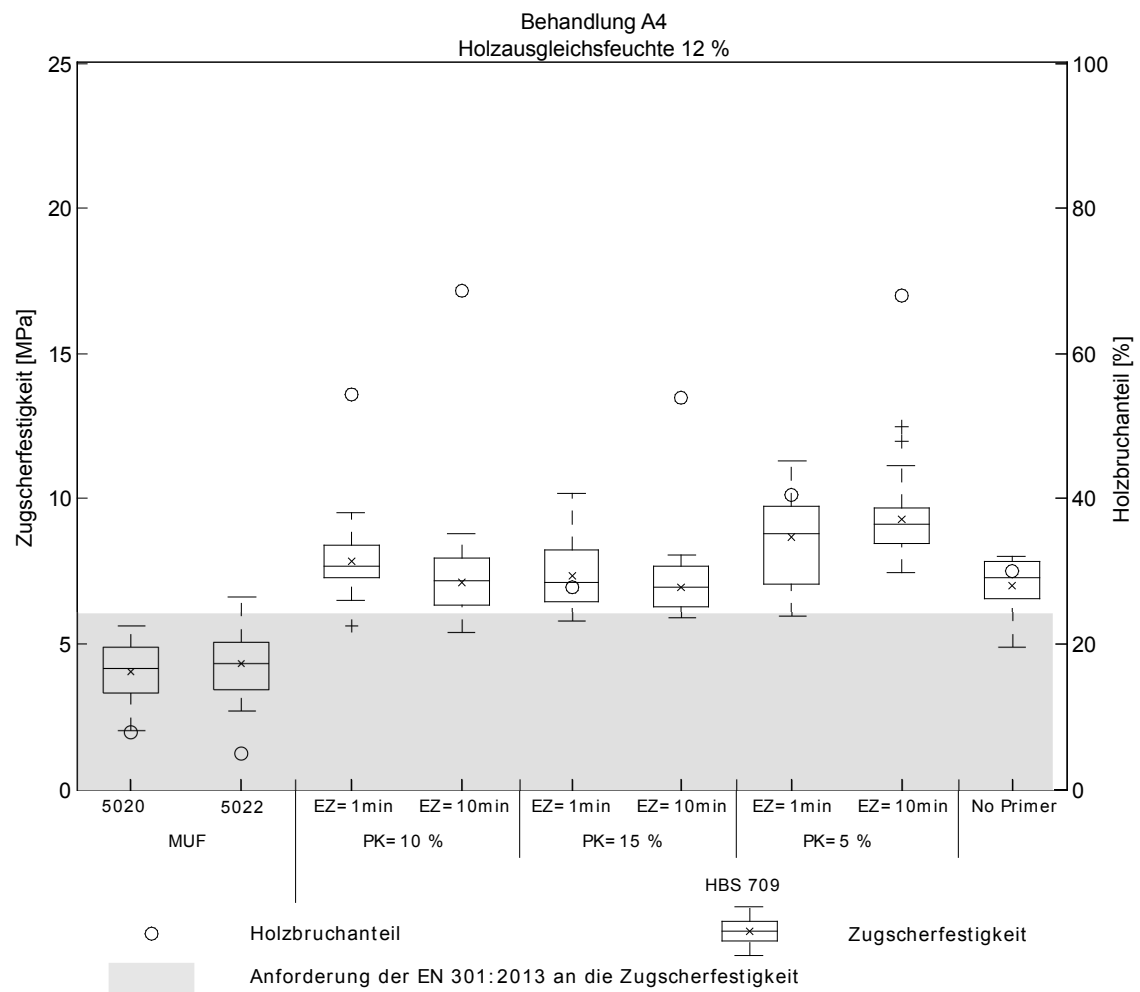


Abbildung 11: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A4, Holzfeuchte beim Verkleben: 12 %, HBS 709

Tabelle 8: Zusammenfassung alle Ergebnisse bei der zweite Versuchsreihe. (HF : Holzfeuchte; EZ : Einwirkungszeit; PK : Primerkonzentration; ZF: Zugscherfestigkeit ;v: Variationskoeffizient; HB: Holzbruchanteil; n: Probenanzahl)

Klebstoff	Behandlung	HF	EZ	PK	ZF	v	HB	n
	g	[%]	[min]	[%]	[MPa]	[%]	[%]	[-]
MUF_5020	A1	8	-	-	15.02	12	78	12
MUF_5020		12	-	-	13.33	9	92	13
MUF_5022		8	-	-	13.62	20	86	10
MUF_5022		12	-	-	12.99	14	91	10
HB S709		8	10	1	14.78	11	98	12
HB S709		8	10	10	18.05	13	86	12
HB S709		12	10	1	14.98	16	67	10
HB S709		12	10	10	13.03	12	87	12
HB S709		8	15	1	14.05	10	96	12
HB S709		8	15	10	14.04	9	95	12
HB S709		12	15	1	12.53	12	74	12
HB S709		12	15	10	13.81	15	63	12
HB S709		8	5	1	15.45	17	92	10
HB S709		8	5	10	15.42	14	88	10
HB S709		12	5	1	13.04	20	84	12
HB S709		12	5	10	14.91	13	90	12
HB S709		8	-	-	14.33	9	53	10
HB S709		12	-	-	11.20	22	38	10
MUF_5020	A4	8	-	-	4.71	27	11	21
MUF_5020		12	-	-	4.04	26	8	20
MUF_5022		8	-	-	3.37	35	10	21
MUF_5022		12	-	-	4.31	26	5	20
HB S709		8	10	1	8.43	12	82	20
HB S709		8	10	10	9.39	13	38	19
HB S709		12	10	1	7.85	14	54	16
HB S709		12	10	10	7.1	15	69	15
HB S709		8	15	1	8.22	14	26	19
HB S709		8	15	10	8.01	11	72	20
HB S709		12	15	1	7.31	17	28	14
HB S709		12	15	10	6.97	11	54	15
HB S709		8	5	1	8.26	14	78	20
HB S709		8	5	10	8.63	11	81	20
HB S709		12	5	1	8.66	19	41	17
HB S709		12	5	10	9.29	14	68	20
HB S709		8	-	-	7.35	18	13	10
HB S709		12	-	-	7.02	14	30	11

5.4 Ausbildung der Klebfugen

Abb. 13 bis 18 zeigen REM Aufnahmen der verschiedenen Klebstoffe. Es ist ein deutliches Eindringen der Klebstoffe in das Holz erkennbar. Bei den geprimerten Oberflächen ist tendenziell eine bessere Klebfugenausbildung sichtbar. Weitere Bilder sind im Anhang dargestellt.

Bild 1

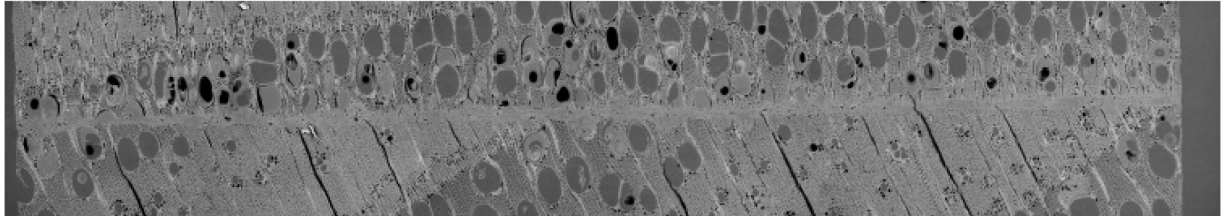


Bild 2

V= 100x

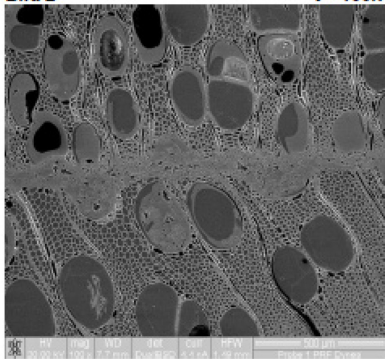


Bild 3

V=150x

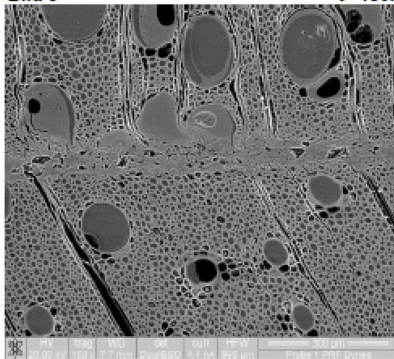


Bild 4

V=150x

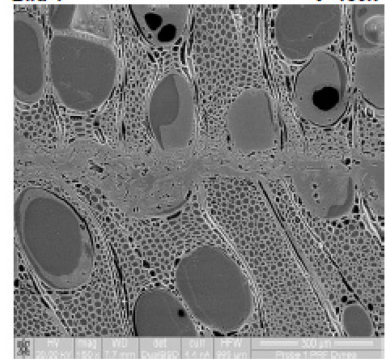


Abbildung 12: REM Aufnahme: Klebefuge verklebt mit PRF (Foto: Peschke, ETH Zürich, IfB)

BSE-Bilder V= 70x

Bild 5

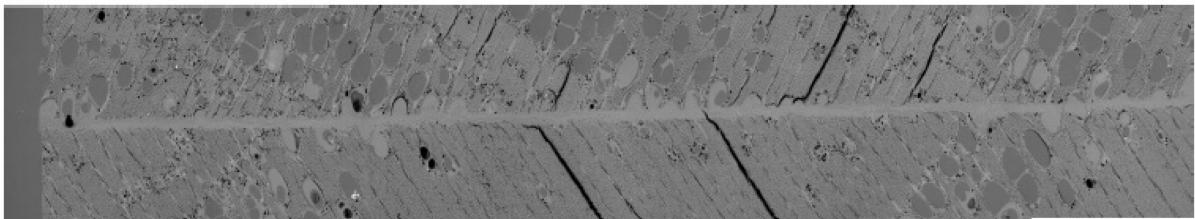


Bild 6

V= 100x

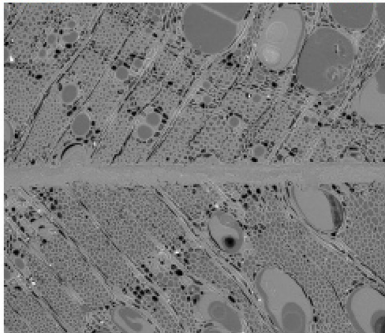


Bild 7

V=200x

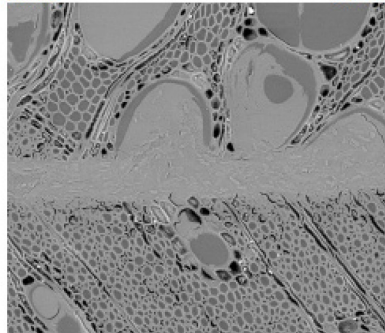


Bild 8

V=400x

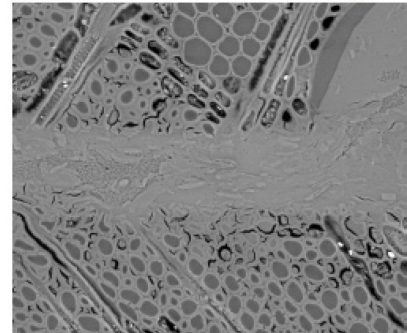


Abbildung 13: REM Aufnahme: Klebefuge verklebt mit 5020 (Foto: Peschke, ETH Zürich, IfB)

Bild 9

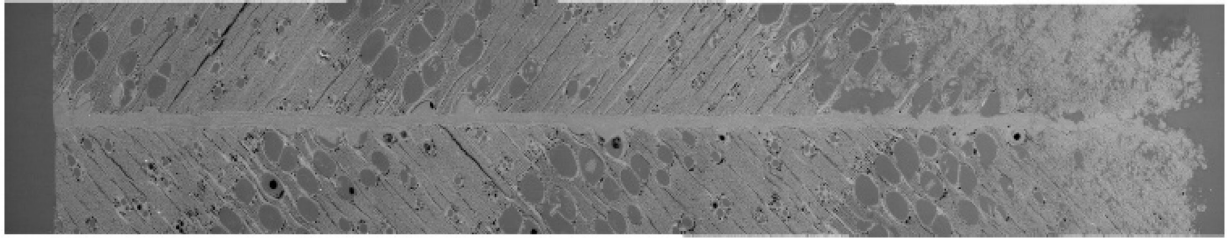


Bild 10

V= 100x

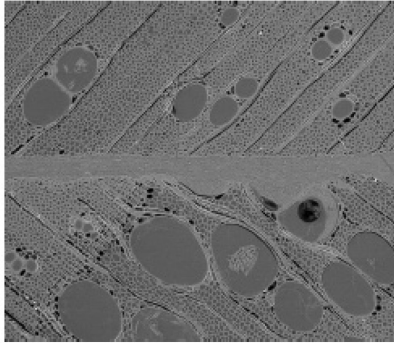


Bild 11

V=200x

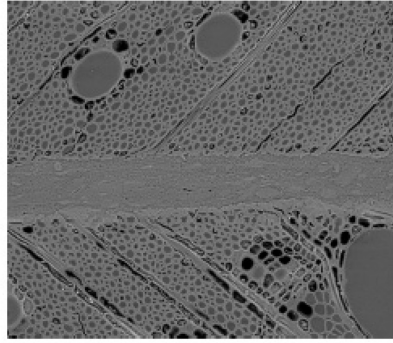


Bild 12

V=500x

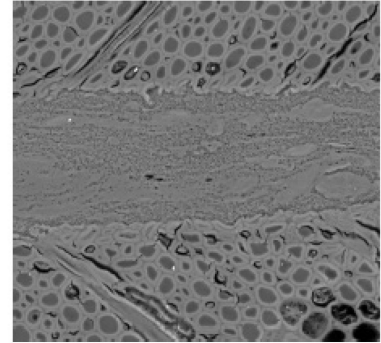


Abbildung 14 : REM Aufnahme: Klebefuge, verklebt mit MUF 5022 (Foto: Peschke, ETH Zürich, IfB)

BSE-Bilder V= 70x

Bild 13

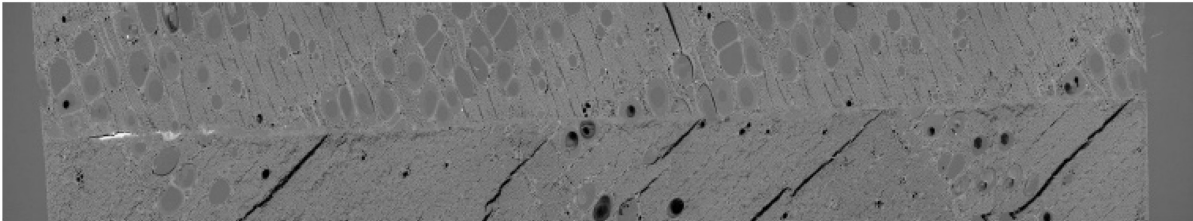


Bild 14

V= 100x

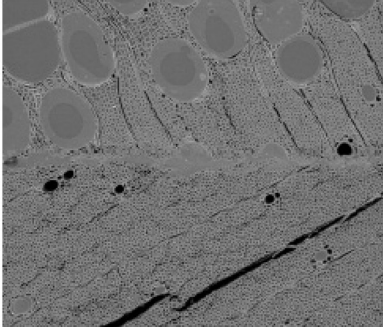


Bild 15

V=200x

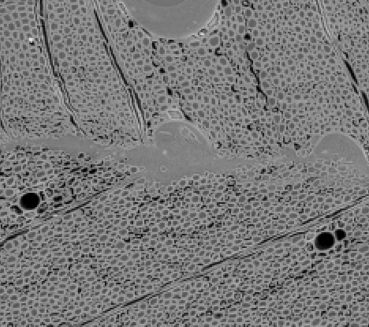


Bild 16

V=500x

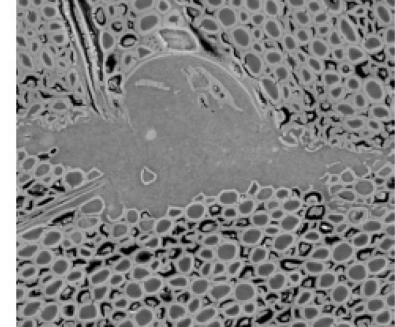


Abbildung 15: REM Aufnahme: Klebefuge, verklebt mit HB S309, mit Primer und 1 min Wartezeit (Foto: Peschke, ETH Zürich, IfB)

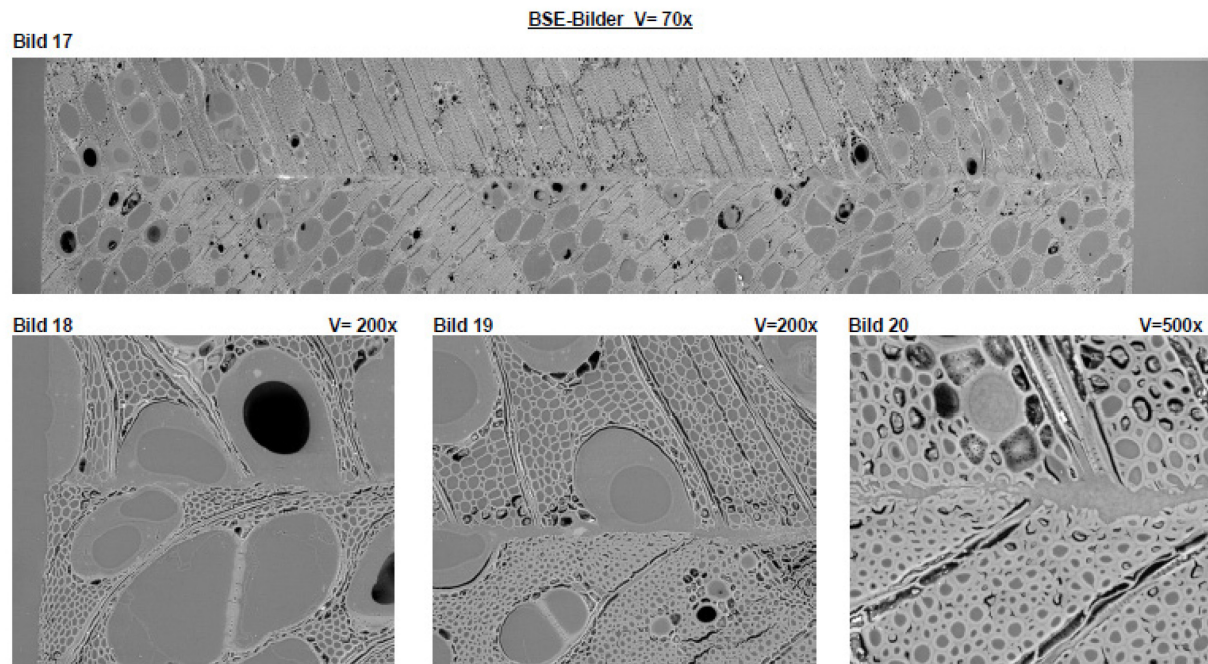


Abbildung 16: REM Aufnahme: Klebefuge, verklebt mit HB S309, mit Primer und 10 min Wartezeit (Foto: Peschke, ETH Zürich, IfB)

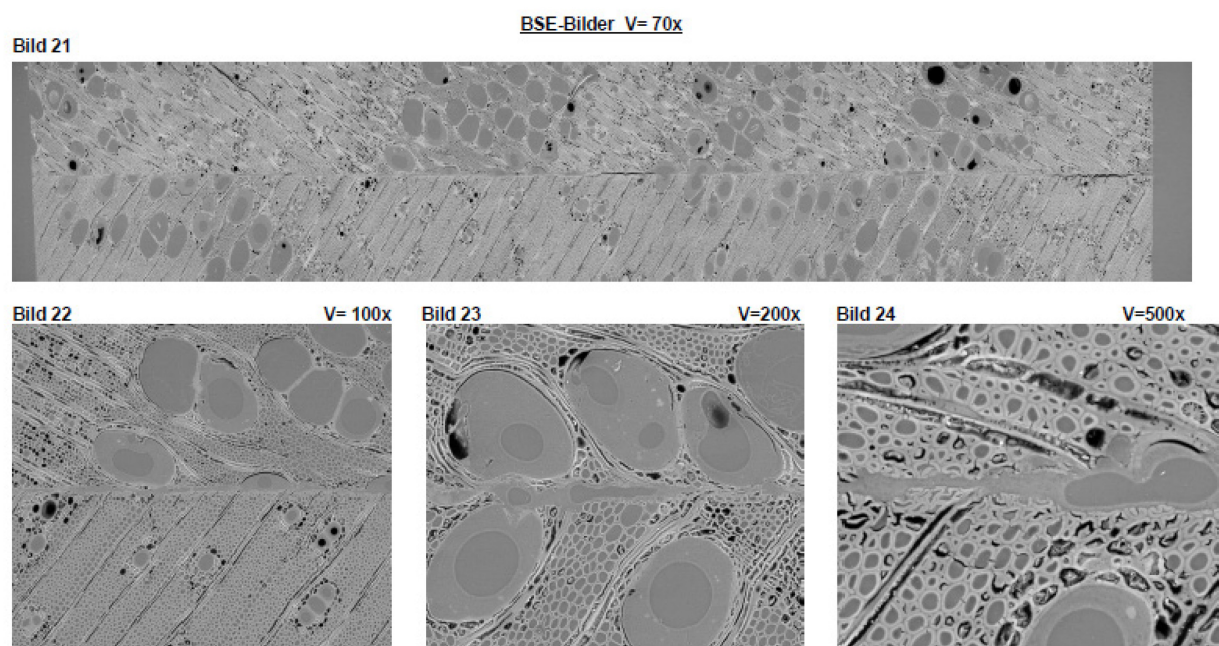


Abbildung 17: REM Aufnahme: Klebefuge, verklebt mit HB S309, ohne Primer (Foto: G. Peschke, ETH Zürich, IfB)

6 Diskussion

6.1 Serie 1

Zugscherprüfung

Alle Klebstoffe erreichten bei Behandlung A1 die gleiche Festigkeit wie Vollholz. Bei der Behandlung A4 traten deutliche Unterschiede zwischen den Varianten auf. Bei Behandlung A4 werden die Anforderungen nach EN 301:2013 für die Zugscherfestigkeit von beiden MUF Klebstoffen und 1K-PUR ohne Primer nicht erreicht. Bei Lagerfolge A4 erreichen alle PUR Proben mit Primer ausser mit einer Einwirkungszeit von 5 min die gleiche Festigkeit wie PRF und Vollholz. Nach dem Trocknen der Proben (Behandlung A5) sind die Festigkeitswerte ca. 12 % tiefer als bei der Behandlung A1. Durch die Rücktrocknung (A5) verbessern sich die Festigkeiten deutlich gegenüber den Werten nach der Behandlung A4.

Delamination

Beim Verfahren bei niedriger Temperatur konnten die Trocknungszeit von 90 ± 6 Stunden nicht eingehalten werden. Die Trocknungszeit erreichte ca. 120 Stunden bei beiden Zyklen. Die Anforderung der Norm EN 302-2:2013 bezüglich der Trocknungszeit ist für Laubhölzer nicht realistisch (höhere Dichte, höherer Diffusionswiderstand, längere Trocknungsdauer).

Es gibt eine gute Reproduzierbarkeit zwischen den Verfahren bei hoher Temperatur und niedriger Temperatur. Der Einfluss des Primers auf die Delamination ist deutlich, der Einfluss der Einwirkungszeit ist nicht immer ganz klar erkenntlich. Es scheint, dass die tiefsten Werte mit einer Einwirkungszeit von 5 Minuten erreicht werden. Die Delaminationswerte sind bei den MUF bei dem Verfahren mit niedriger Temperatur geringer als bei hoher. Nur der PRF-Klebstoff erreicht die Anforderungen der EN 301:2013 mit einer Delamination von maximal 5 % beim Verfahren bei hoher Temperatur resp. 10% beim Verfahren bei niedriger Temperatur.

6.2 Serie 2

Bei der Behandlung A1, ist der Einfluss der Ausgleichsfeuchte vor dem Verkleben (8 % bzw. 12%) relativ gering. Die Festigkeit ist tendenziell leicht höher bei einer Ausgleichsfeuchte von 8 % beim Verkleben. Die Serie mit einer Ausgleichsfeuchte beim Verkleben von 8 % hat eine um 1,5% tiefere Ausgleichsfeuchte beim Prüfen als die Serie mit einer Ausgleichsfeuchte beim Verkleben von 12 % (11.8 % bzw. 10.3 %). Die Unterschiede sind zwischen den verschiedenen Varianten (Primerkonzentration) nicht konstant und liegen innerhalb des Bereiches der Standardabweichung. Bei der Behandlung A4 sind die Unterschiede noch geringer als bei der Behandlung A1. Für die zweite Serie kann generell gesagt werden, dass die Holzqualität geringer war als bei der ersten Prüfserie, was sich etwas auswirkt und den bekannten Holzeinfluss auf das Ergebnis zeigt.

Die Variante mit den HB S709 mit einer Primerkonzentration von 5 % und Einwirkungszeit von einer Minute ist in beiden Serien vorhanden. Die Werte der 2. Serie liegen unterhalb der ersten. Die Festigkeit der MUF Verklebung ist in der 2. Serie geringer als in der ersten. Möglicherweise liegt hier ein Einfluss der Applikation vor. Die Applikationsbedingungen und das Raumklima beim Verkleben müssen bei künftigen Versuchen noch stärker berücksichtigt werden.

7 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend könne folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Alle geprüften Klebstoffe erreichen die Mindestanforderung nach EN 301:2013 resp. EN 15425:2008 (Leistungsanforderungen für PUR) an die Zugscherfestigkeit in trockenem Zustand (Behandlung A1)
- Die 1K-PUR Klebstoffe mit Primer erreichen die Mindestanforderung nach EN 15425:2008 an die Zugscherfestigkeit in nassem Zustand (Behandlung A4)
- Nur der PRF- Klebstoff erreicht die zulässigen 5% Delamination nach EN 301:2013 resp. EN 15425:2008, bei PUR wird durch den Primer eine deutliche Reduzierung der Delaminierung erreicht.
- Es konnte kein systematischer Einfluss der Einwirkungszeit und der Primerkonzentration auf die Zugscherfestigkeit und auf den Holzbruchanteil gezeigt werden
- Es konnte kein wesentlicher Einfluss der Ausgleichsfeuchte auf die Zugscherfestigkeit bei der Behandlung A1 und A4 gezeigt werden

Generell wurde eine deutliche Verbesserung der Verklebung mit PUR gegenüber den Ergebnissen der Projektes „Optimierung der Verklebung von Eschenholz mit Melaminharz und PUR“ [Projekt Nummer: 2013.11 erreicht]. In diesem Projekt wurden andere Klebstoffe und Primer (im ersten Projekt DMF) verwendet.

Der Einfluss des „Henkel Primers“ auf die Scherfestigkeit (Holzbruchanteil) und auf die Delaminierung ist deutlich erkennbar. Bei der ersten Serie gibt es eine starke Verbesserung der Festigkeit durch den Primereinsatz bei Behandlung A4 und A5. Dieser Unterschied ist aber bei der 2. Serie (anderer Klebstoff, mit längerer geschlossener Zeit) nicht so deutlich. Auch beim vorherigen Projekt gab es Unterschiede zwischen den damals genutzten beiden Klebstoffen.

Die 1K-PUR Klebstoffe erreichen die geforderte Zugscherfestigkeit im nassem Zustand, die Anforderungen an den Delaminationstest werden allerdings bisher bei PUR und Melaminharz noch nicht erfüllt.

Die Analyse des Delaminationstests bei hoher und niedriger Temperatur zeigt ein Optimum Einwirkungszeit des Primers bei 5 Minuten für HB S309.

Tendenziell sind die Werte mit HB S709 besser als mit dem HB S309 Klebstoff. Interessant ist, dass bei der zweiten Versuchsreihe mit HB S709 ohne Primer die gleiche Festigkeit erreicht wurde wie bei HB S709 mit Primer. Lediglich der Holzbruchanteil ist ohne Primer Einsatz tiefer. Weitere Untersuchungen sind nötig. Das betrifft die Optimierung des Primereinsatzes für 1K-PUR und die Weiterentwicklung der MUF-Klebstoffe. Entsprechende Arbeiten werden mit Henkel vorbereitet. Eine erneute Prüfung mit PUR und Primer unter industriellen Bedingungen ist in einer studentischen Arbeit für 2016 geplant.

8 Verzeichnisse

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klebstoff Applikation des PUR bei der Verklebung der Delaminierungsproben	8
Abbildung 2: Verpressen den Lamellen für die Delaminierungsversuche	9
Tabelle 1: Versuchsübersicht (verwendete Klebstoffe und primer(mit Kürzel))	9
Tabelle 2 : Technologische Parameter für die verwendeten Klebstoffe. Für die Applikation bedeutet 1 einseitiger Auftrag, und 2 getrennter Auftrag Harz und Härter.	9
Tabelle 3: Geprüfte Varianten - Versuchsreihe 1	10
Tabelle 4: Geprüfte Varianten - Versuche Reihe 2 (EZ: Einwirkungszeit)	11
Tabelle 5: Anforderungen für die Delaminierungsprüfung bzw. Zugscherfestigkeitsprüfung nach EN 301:2013	11
Abbildung 3: Zugscherfestigkeit nach Behandlung A1 für die Varianten 1 bis 8, zum Vergleich Vollholz (Esche), Versuchsreihe 1	12
Abbildung 4: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A4 für die Varianten 1 bis 8, Versuchsreihe 1	13
Abbildung 5: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A5 für die Varianten 1 bis 8, Versuchsreihe 1.	13
Tabelle 6: Zusammenfassung aller Ergebnisse der Versuchsreihe 1. (EZ: Einwirkungszeit; PK: Primerkonzentration; ZF: Zugscherfestigkeit; V: Variationskoeffizient; HB: Holzbruchanteil; n: Probenanzahl)	14
Abbildung 6: Delamination nach Verfahren bei hoher Temperatur.	15
Abbildung 7: Delamination nach Verfahren bei niedriger Temperatur.	16
Tabelle 7: Zusammenfassung alle Ergebnisse bei der Delaminationsversuche. (EZ: Einwirkungszeit; PK: Primerkonzentration; ZF: Zugscherfestigkeit; v: Variation Koeffizient; HB: Holzbruchanteil; n: Probenanzahl)	16
Abbildung 8: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A1, Holzfeuchte beim Verkleben: 8 %, beim Prüfen 12%	17
Abbildung 9: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A1, Holzfeuchte beim Verkleben und Prüfen: 12 %	18
Abbildung 10: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A4, Holzfeuchte beim Verkleben: 8 %,	18
Abbildung 11: Zugscherfestigkeit und Holzbruchanteil nach Behandlung A4, Holzfeuchte beim Verkleben: 12 %,	19
Tabelle 8: Zusammenfassung alle Ergebnisse bei der zweite Versuchsreihe. (HF : Holzfeuchte; EZ : Einwirkungszeit; PK : Primerkonzentration; ZF: Zugscherfestigkeit ;v: Variationskoeffizient; HB: Holzbruchanteil; n: Probenanzahl)	20
Abbildung 13: REM Aufnahme: Klebefuge verklebt mit PRF (Foto: Peschke, ETH Zürich, IfB)	21
Abbildung 14: REM Aufnahme: Klebefuge verklebt mit 5020 (Foto: Peschke, ETH Zürich, IfB)	21
Abbildung 15 : REM Aufnahme: Klebefuge, verklebt mit MUF 5022 (Foto: Peschke, ETH Zürich, IfB)	22
Abbildung 16: REM Aufnahme: Klebefuge, verklebt mit HB S309, mit Primer und 1 min Wartezeit (Foto: Peschke, ETH Zürich, IfB)	22
Abbildung 17: REM Aufnahme: Klebefuge, verklebt mit HB S309, mit Primer und 10 min Wartezeit (Foto: Peschke, ETH Zürich, IfB)	23
Abbildung 18: REM Aufnahme: Klebefuge, verklebt mit HB S309, ohne Primer (Foto: G. Peschke, ETH Zürich, IfB)	23
Abbildung 19: Delaminierungsprüfung Henkel - 1	29
Abbildung 20: Delaminierungsprüfung Henkel - 2	29

Abbildung 21: Delaminierungsprüfung Dynea	30
Abbildung 22: Vergleich zwischen Delaminierungsprüfung durchgeführt bei Henkel, Dynea und die BFH	30
Tabelle 9: Vergleich zwischen Delaminierungsprüfung durchgeführt bei Henkel, Dynea und die BFH - Numerische Werten	31
Abbildung 23: Delaminierungsprobe – hoher Temperatur Verfahren – 1K-PUR mit 1 min Primer Einwirkungszeit	31
Abbildung 24: Delaminierungsprobe – hoher Temperatur Verfahren – 1K-PUR ohne Primer	32
Abbildung 25: Delaminierungsprobe – hoher Temperatur Verfahren – 1K-PUR mit 10 min Primer Einwirkungszeit	32
Abbildung 26: Delaminierungsprobe – hoher Temperatur Verfahren – 1K-PUR mit 5 min Primer Einwirkungszeit	33
Abbildung 27: Delaminierungsprobe – hoher Temperatur Verfahren – 1K-PUR HB S709 mit 1 min Primer Einwirkungszeit	33
Abbildung 28: Delaminierungsprobe – hoher Temperatur Verfahren – MUF 5020	34
Abbildung 29: Delaminierungsprobe – hoher Temperatur Verfahren – MUF 5022	35
Abbildung 30: Delaminierungsprobe – hoher Temperatur Verfahren – PRF	35

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsübersicht (verwendete Klebstoffe und primer(mit Kürzel))	9
Tabelle 2 : Technologische Parameter für die verwendeten Klebstoffe. Für die Applikation bedeutet 1 einseitiger Auftrag, und 2 getrennter Auftrag Harz und Härter.	9
Tabelle 3: Geprüfte Varianten - Versuchsreihe 1	10
Tabelle 4: Geprüfte Varianten - Versuche Reihe 2 (EZ: Einwirkungszeit)	11
Tabelle 5: Anforderungen für die Delaminierungsprüfung bzw. Zugscherfestigkeitsprüfung nach EN 301:2013	11
Tabelle 6: Zusammenfassung aller Ergebnisse der Versuchsreihe 1. (EZ: Einwirkungszeit; PK: Primerkonzentration; ZF: Zugscherfestigkeit; V: Variationskoeffizient; HB: Holzbruchanteil; n: Probenanzahl)	14
Tabelle 7: Zusammenfassung alle Ergebnisse bei der Delaminationsversuche. (EZ: Einwirkungszeit; PK: Primerkonzentration; ZF: Zugscherfestigkeit; v: Variation Koeffizient; HB: Holzbruchanteil; n: Probenanzahl)	16
Tabelle 8: Zusammenfassung alle Ergebnisse bei der zweite Versuchsreihe. (HF : Holzfeuchte; EZ : Einwirkungszeit; PK : Primerkonzentration; ZF: Zugscherfestigkeit ;v: Variationskoeffizient; HB: Holzbruchanteil; n: Probenanzahl)	20
Tabelle 9: Vergleich zwischen Delaminierungsprüfung durchgeführt bei Henkel, Dynea und die BFH - Numerische Werten	31

8.3 Literaturverzeichnis

- S. Ammann, S. Schlegel, M. Beyer, K. Aehlig, M. Lehmann, H. Jung, P. Niemz, Suitability of Industrially Glued Ash Wood for Construction Engineering, European Journal of Wood and Wood Products, 2015 (on line first) DOI 10.1007/s00107-015-0981-2
- S. Schlegel, Untersuchungen zur Optimierung der Verklebung von Eschenholz für den Einsatz als Brettschichtholz im konstruktiven Holzbau, Forschungsbericht, Institut für Baustoff ETH Zürich, 2014 (Finanziert durch Fonds zur Förderung der Wald-und Holzforschung)
- S. Hering, Charakterisierung und Modellierung der Materialeigenschaften von Rotbuchenholz zur Simulation von Holzverklebungen. Dissertation, ETH Zürich 2011
- M. Knorz Investigation of structurally bonded ash (*Fraxinus excelsior* L.) as influenced by adhesive type and moisture, Dissertation TU München 2015

M. Schmidt, Die Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile
unter besonderer Berücksichtigung der Farbverkernung. Dissertation, TU München 2013

Normen

EN 301:2013, Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile – Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 301:2013

EN 15425:2008, Klebstoffe – Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis für Tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen; Deutsche Fassung EN 15425:2008

EN 302-1:2013, Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit; Deutsche Fassung EN 302-1:2013

EN 302-2:2013, Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren - Teil 2: Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit - Deutsche Fassung EN 302-2:2013

9 Anhang

Als Vergleich sind die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung durchgeführt bei Henkel und Dynea präsentiert. Die Abbildung 22 präsentiert einen Vergleich zwischen die gemeinsamen Serien.

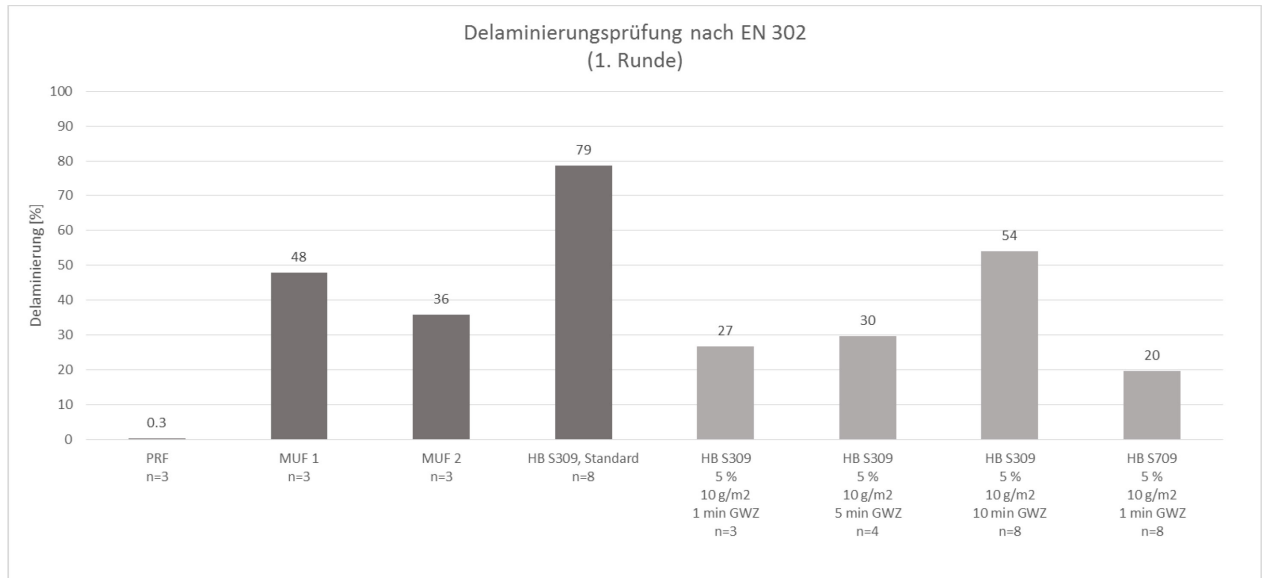


Abbildung 18: Resultate der Delaminierungsprüfung durchgeführt bei Henkel - 1

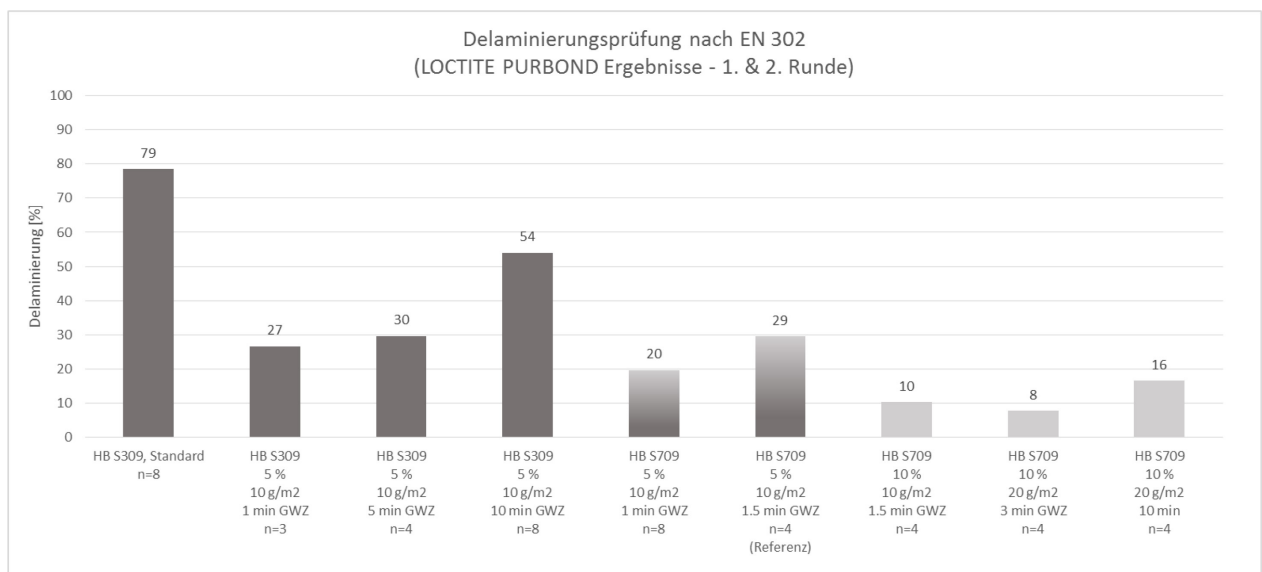


Abbildung 19: Resultate der Delaminierungsprüfung durchgeführt bei Henkel - 2

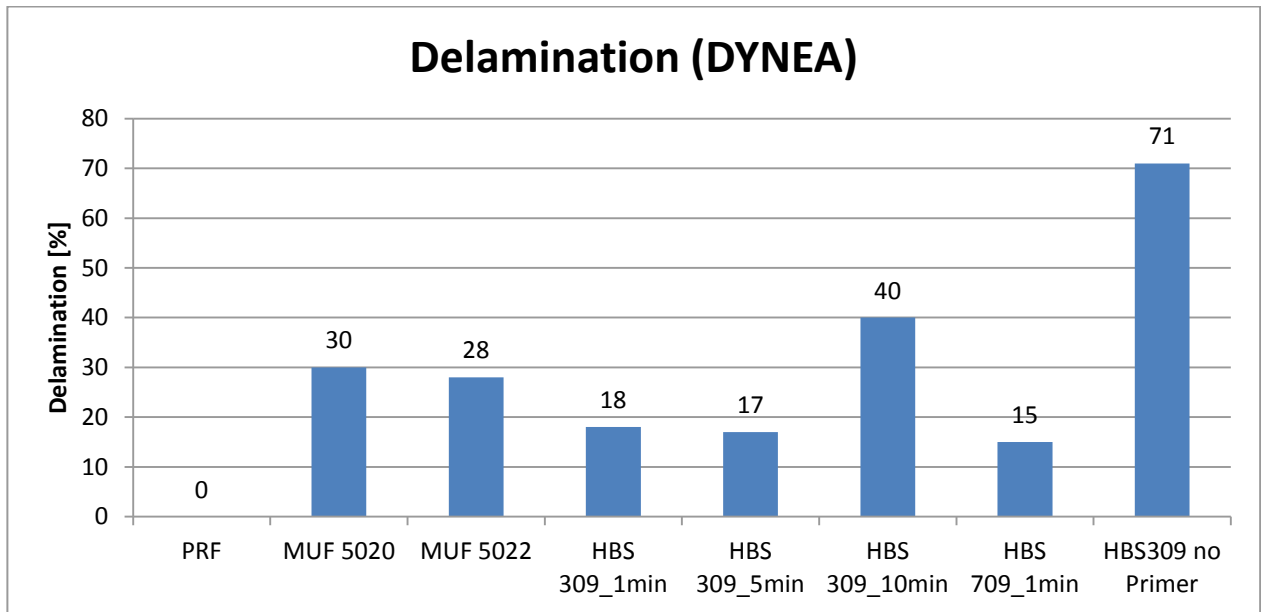


Abbildung 20: Resultate der Delaminierungsprüfung durchgeführt bei Dynea

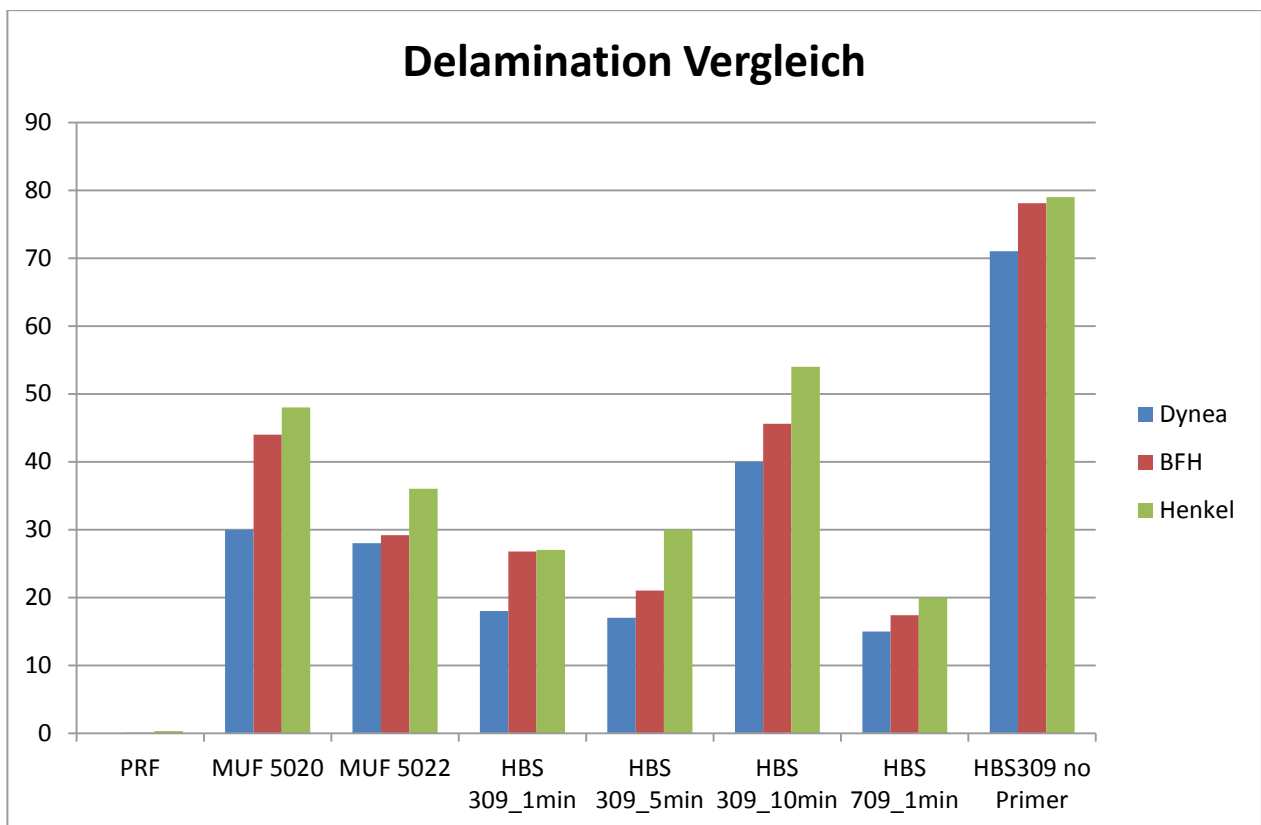


Abbildung 21: Vergleich zwischen den Delaminierungsprüfungen durchgeführt bei Henkel, Dynea und der BFH

Tabelle 9: Vergleich zwischen den Delaminierungsprüfungen durchgeführt bei Henkel, Dynea und der BFH - Numerische Werte

	PRF	MUF 5020	MUF 5022	HB S 309_1min	HB S 309_5min	HB S 309_10min	HB S 709_1min	HB S309 No Primer
Dynea	0	30	28	18	17	40	15	71
BFH	0.1	44	29.2	26.8	21	45.6	17.4	78.1
Henkel	0.3	48	36	27	30	54	20	79

Delaminierungsbeispiel

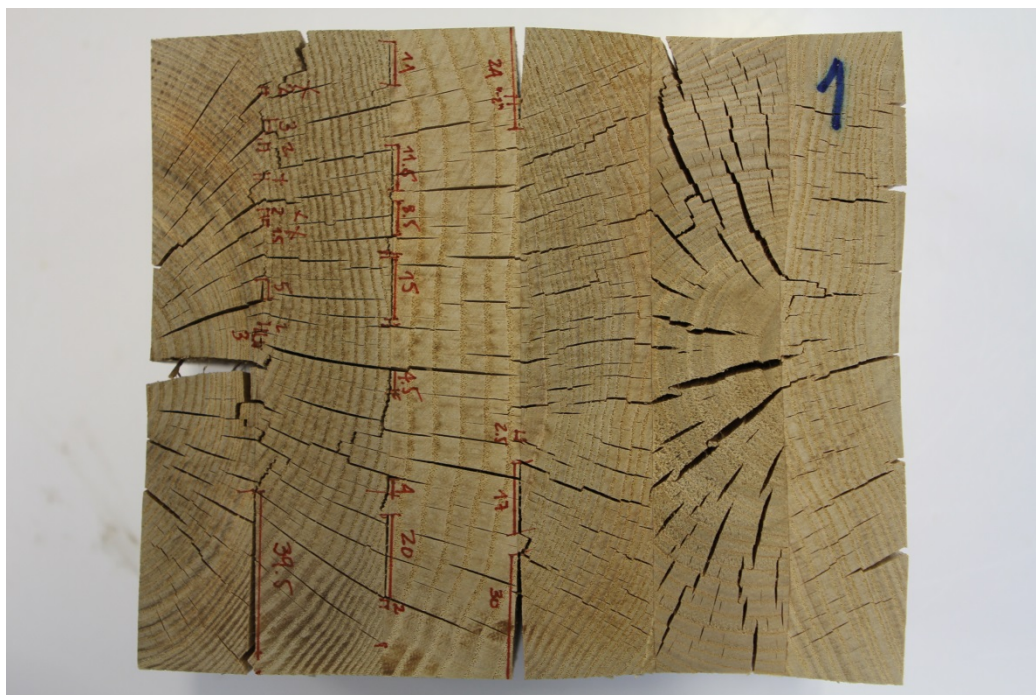


Abbildung 22: Delaminierungsprobe – Verfahren bei hoher Temperatur – 1K-PUR mit 1 min Primer Einwirkungszeit



Abbildung 27: Delaminierungsprobe – Verfahren bei hoher Temperatur – MUF 5020



Abbildung 28: Delaminierungsprobe - Verfahren bei hoher Temperatur - MUF 5022



Abbildung 29: Delaminierungsprobe - Verfahren bei hoher Temperatur - PRF