Aktionsplan Holz

Brettschichtholz aus Laubholz – Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt in der Schweiz

Bericht: Modul 3, Projekt-Nr.: REF 1011-04200, Buchen-BSH

Bericht Nr.	R.007547-10-62FE-01-PB-01
Auftrag Nr.	R.007547-10-62FE-01
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	17.8.2017
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt, BAFU

Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Werkstoffe und Holztechnologie Kompetenzbereich Werkstoffe, Möbel und Design Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91 www.ahb.bfh.ch
Verfasser	Gaspard Clerc, Martin Lehmann und Thomas Volkmer
Projektverantwortlicher	Thomas Volkmer
Institutsleiter	Frederic Pichelin

Berner Fachhochschule

Institut für Werkstoffe und Holztechnologie

Abstract

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse des Moduls 3 des AP Holz Projektes „Brettschichtholz aus Laubholz“ zusammen. Die Arbeiten in diesem Bericht beziehen sich ausschliesslich auf die Holzart Buche, wobei folgende Untersuchungen durchgeführt wurden:

- Analyse der Keilzinkenverbindung durch Biege- und Zugversuche,
- Delaminierungsverhalten (bei Labor- und Industrie-Verklebungen)
- Zugscherversuche nach den Behandlungsvarianten A1 und A4 (entsprechend EN 302-1)

Die Proben für die Keilzinkung wurden im Rahmen des Moduls 2 in die drei Sortierklassen T33, T42 und T50 eingeteilt. Die Keilzinkenfestigkeit zeigt für die Biege- und Zugprüfung eine leichte Korrelation mit der Sortierklasse. Es hat sich in den vorliegenden Untersuchungen weiter gezeigt, dass sich die Festigkeit und Dichte der Lamellen nur geringfügig auf die Festigkeit der Keilzinkung auswirkt, was u.a. auch auf die geringe Variation der Dichte des untersuchten Materials zurückzuführen ist. Anhand des Bruchverhaltens der Proben wurde deutlich, dass der Faserverlauf eine bedeutende Rolle hinsichtlich der Keilzinkenfestigkeit einnimmt. Neben dem Faserverlauf sollte auch die Jahrringlage in den Sortierungsprozess einbezogen werden, was aufgrund der schwierigen Sichtbarkeit hohe Anforderungen an das ausführende Personal stellt. Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann festgehalten werden, dass es möglich ist, Brettschichtholz der Klassen GL 40 und bei optimierter Sortierung auch der Klasse GL 48 herzustellen. Für die Klasse GL 55 sind bis jetzt noch keine Grenzwerte für die Keilzinkenfestigkeit festgelegt. Die hier ermittelten Werte der Keilzinkenfestigkeit für diese Klasse dienen einer ersten Abschätzung und müssen in weiteren Untersuchungen bestätigt werden.

Bei der Analyse der Festigkeit der Flächenverklebung mittels Delaminierungsversuchen (EN 302-2) wurden folgende Parameter untersucht: Klebstoffart, Primer-Konzentration und –menge (bei 1K-PUR Systemen), Pressdruck und Ablüftzeit. Dabei hat sich bei den Laborverklebungen neben anderen Erkenntnissen gezeigt, dass 1K-PUR Systeme ohne Ablüftzeit die Normanforderungen (Delaminierung <5%) erfüllen können und dass die optimale Primer-Kkonzentration im Bereich von 10% liegt. Der Referenzklebstoff Aerodux 185 zeigt erwartungsgemäss sehr gute Werte und bestätigt somit die Korrektheit der durgeführten Versuche sowie die grundsätzliche Herstellbarkeit von Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL 40 und GL 48.

Die Delaminierung nach den Industrieverklebungen wurden einerseits im Labor nach EN 302-2 und im Rahmen der Qualitätskontrolle nach EN 14080 im Industriebetrieb geprüft. Dabei haben sich im Labor für die 1K PUR Varianten (Industrie-Verklebung) leicht schlechtere Werte ergeben als bei den Labor-Verklebungen (knapp über 5%). Die Resultate der Untersuchungen im Rahmen der Qualitätskontrolle nach EN 14080 (Industrieverklebung im Industriebetrieb geprüft) entsprechen aber den Normanforderungen und bestätigen somit die industrielle Verklebbarkeit von Buchenlamellen zu Brettschichtholz.

Für die Zugscherversuche wurden 2 verschiedene 1K-PUR Systeme mit und ohne Primer, ein MUF System mit und ohne geschlossene Wartezeit und zwei PRF Varianten geprüft.

Alle geprüften Varianten erfüllen die Zugscherfestigkeitsanforderung im trockenen Klima (Behandlung A1). Im Nasszustand (Behandlung A4) erreichen nur die 1K-PUR Klebstoffe mit Primer und die beiden PRF-Systeme die Normanforderungen.

Buchenbrettschichtholz, Keilzinkenfestigkeit, Delaminierung, Zugscherversuche

Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangslage	4
2 Keilzinkung	4
2.1 Anforderung an die Keilzinkenverbindung	4
2.2 Herstellung der Probekörper für die Prüfung der Keilzinkenverbindung	5
2.3 Prüfung der Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung	5
2.4 Prüfung der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung	6
2.5 Resultate: Biegefestigkeit der Keilzinkung	7
2.6 Resultate: Zugfestigkeit der Keilzinkung	9
2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Keilzinkenprüfung aufbauend auf einer vorgängigen Klassierung der Lamellen in T-Sortierklassen	14
2.8 Erweiterte Auswertung der Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindungen (ohne Berücksichtigung einer vorgängigen Einteilung in Sortierklassen)	15
3 Flächenverklebung	16
3.1 Anforderungen an die Klebefuge hinsichtlich der Delaminierungsbeständigkeit	16
3.2 Herstellung der Prüfkörper (Labormassstab)	17
3.3 Analyse der Prüfkörper	18
3.4 Ergebnisse und Diskussion der Delaminierungsversuche - Labormassstab	18
3.5 Herstellung der Delaminierungsprüfkörper (industriell)	19
3.6 Ergebnisse und Diskussion der Delaminierungsversuche (industriell verklebt und in Biel nach EN 302-2 geprüft)	20
3.7 Ergebnisse und Diskussion der Delaminierungsversuche (industriell verklebt und in Lungern nach EN 14080 geprüft)	21
4 Zugscherversuche	21
4.1 Anforderungen an die Zugscherfestigkeit	21
4.2 Herstellung der Proben für die Zugscherprüfung	22
4.3 Ermittlung der Zugscherfestigkeit	23
4.4 Resultate der Zugscherfestigkeitsversuche	24
4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Zugscherfestigkeit-Prüfung	26
5 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	29
5.1 Umfang des Berichts	29
6 Verzeichnisse	30

1 Ausgangslage

Laubholz eignet sich auf Grund seiner leistungsstarken mechanischen Eigenschaften sehr gut für Bauzwecke. Brettschichtholz, (BSH)-Bauteile aus Buche oder aus Esche stellen eine höchstwertige stoffliche Verwertung des Rohstoffs Laubholz dar. Auf Grund der hohen Leistungsfähigkeit haben solche Bauteile das Potential, in hochbeanspruchten Tragwerken für die nachhaltige Holzbauweise zu Lasten von Stahl oder von Stahlbeton Marktanteile zu gewinnen. Zum Beispiel könnten hochleistungsfähige Stützen aus Buchen-Brettschichtholz eine technisch vielversprechende Alternative zu Betonstützen darstellen.

Die Voraussetzung für die Etablierung von Laubholz-BSH als Bauprodukt am Markt sind zuverlässige und garantierte Eigenschaften sowie Bemessungsangaben für den Planer. Aus Sicht Ressourcenpolitik Holz schafft das Projekt die technischen Rahmenbedingungen für eine hochwertige stoffliche Verwertung von Laubholz und für eine Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit von Holz in hochbeanspruchten Tragwerken und Tragwerksteilen. Dies führt insgesamt zu einer Zunahme der Verwendung von Holz für Bauzwecke generell und von Laubholz im Besonderen.

Neben der Festigkeitssortierung des Rohmaterials stellen die Längsstösse der Bretter (durch Keilzinkung) und die Flächenverklebung der Lamellen zentrale Schritte in der Produktion von BSH dar. Diese beiden Prozessschritte sowie die allgemeine Klebstoffprüfung über die Ermittlung der Zugscherfestigkeit wurden im Projekt-Modul 3 untersucht.

2 Keilzinkung

2.1 Anforderung an die Keilzinkenverbindung

Die Anforderung an die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung für die verschiedenen T-Klassen basieren auf den Vorgaben des Industriepartners Neue Holzbau AG und dessen Praxiserfahrung. Sie sind zusammenfassend in der Tabelle 1 dargestellt. Die resultierenden BSH-Festigkeiten sind in Abb. 1 ersichtlich. Für Keilzinkungen von Brettern der Sortierklasse T50 wurde bis jetzt durch den Industriepartner kein zu erreichender Zugfestigkeitswert festgelegt. Anforderungen bzgl. der Biegefestigkeit bzw. Umrechnungsfaktoren existieren nicht.

Amerkung:

Die festgelegten Werte für die T-Klassen resultieren aus den Erfahrungswerten aus der Praxis. Die daraus abgeleiteten BSH-Aufbauten (Abb. 1) entsprechen einem Vorschlag der Industriepartner und müssen für eine breite Anwendung durch weitere Versuche validiert und bestätigt werden. (Eine Bewertung der Kennwerte wird auch über die statischen Versuche an Biegeträgern und Stützen im Modul 4 dieses Projekts durchgeführt werden.)

Tabelle 1: Anforderung an die Keilzinken-Zugfestigkeit für die jeweiligen T-Klassen (entsprechend den Vorgaben der Industriepartner)

T-Klasse der Bretter	Anforderung: Charakteristischer Wert (5%-Fraktilwert) der Keilzinken-Zugfestigkeit [MPa]
T24	28
T33	38
T42	48
T50	-

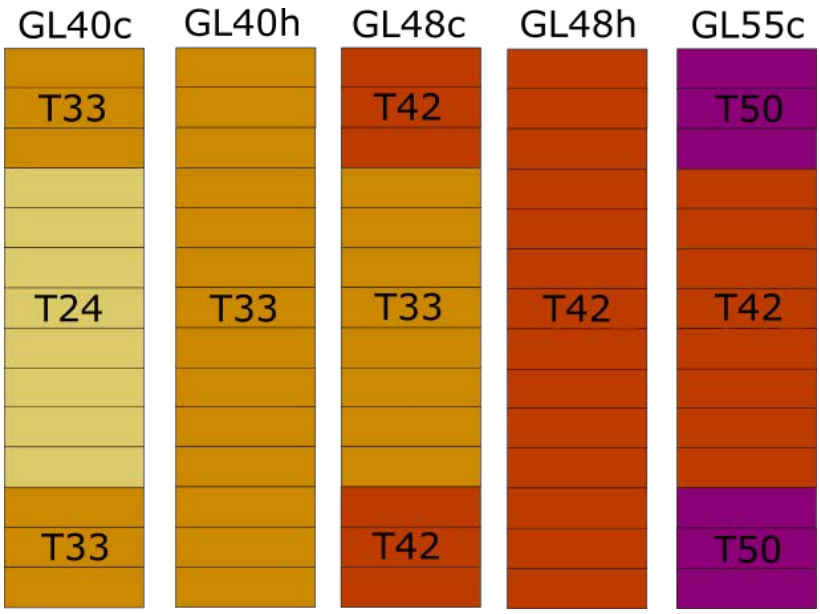


Abbildung 1: Mögliche Aufbauten für BSH der Festigkeitsklassen GL 40c, GL 40h, GL 48c, GL 48h und GL 55c, Vorschlag der Industriepartner, welcher aber noch bewertet und validiert werden muss.

2.2 Herstellung der Probekörper für die Prüfung der Keilzinkenverbindung

Das Ausgangsmaterial (Schnittware) in Form von Buchenbrettern wurde in drei Sortierklassen (T33, T42 und T50) eingeordnet. Die Sortierung erfolgte im Rahmen des Moduls 2 dieses Projektes, wobei in erster Linie der dynamische E-Modul und ausgewählte optische Merkmale berücksichtigt wurden (siehe Technischer Schlussbericht zu Modul 2). Danach wurden die Bretter mit einer Länge von ca. 3 m in drei Abschnitte aufgeteilt und für die Herstellung der Biege- und Zugproben zugeschnitten. Die Keilzinkung der Proben erfolgte bei der Neuen Holzbau AG in Lungern auf einer Kompaktanlage. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die Bretter einer ursprünglichen Sortierklasse (man spricht hier und im Folgenden daher bewusst von Sortierklasse und nicht von Festigkeitsklasse) durch den Keilzinkungsprozess (insb. wenn Äste und schrägfasrige Stellen herausgekappt wurden) u. U. zu einer höheren Festigkeitsklasse gehören können. Eine Nachbewertung der Bretter nach der Keilzinkung wurde allerdings nicht vorgenommen, da dies in der späteren Produktionspraxis auch nicht der Fall wäre. Bei den nachfolgenden Auswertungen und Beschreibungen der Ergebnisse, insb. was den Vergleich von Ergebnissen in verschiedenen Sortierklassen betrifft, ist diese Tatsache zu beachten.

Als Klebstoff wurde ein schnelles 1K-PUR System mit spezieller Prozesstechnologie verwendet, welches durch den Industriepartner bereits für die Keilzinkung von Laubholz evaluiert wurde. Das Klebstoffsystem ist auf die bestehende Kompaktanlage und den Keilzinkenprozess abgestimmt und der Test eines weiteren Klebstoffsystems wurde daher nicht in Erwägung gezogen. Je nach Länge der Proben wurden Prüfkörper für die Biege- bzw. Zugprüfung hergestellt. Generell wurden so aus einer Lamelle (3 m) zwei Zugprüfkörper und ein Biegeprüfkörper gefertigt. Die Zuteilung der Proben innerhalb einer Sortierklasse war zufällig, mit der Ausnahme, dass die drei besten mit den 3 schlechtesten Proben (bzgl. E_{dyn}) keilgezinkt wurden. Somit kann der Einfluss von grossen E-Modul Unterschieden auf die Keilzinkenfestigkeit bewertet werden. Nach der Verklebung wurden die Proben auf eine Breite von 150 mm und eine Dicke von 20 mm gehobelt. Die Proben für die Zugprüfung wurden auf eine Länge von 1 m und diejenigen für die Biegeprüfung auf eine Länge von 0.39 m (Auflagerlänge: 18 h entsprechend EN 408) zugeschnitten. Für die Verklebung wurde ebenfalls die Jahrringlage berücksichtigt. Innerhalb einer Sortierklasse wurden jeweils nur Rift-, respektive nur Seitenbretter miteinander verklebt, da die Prozessparameter für die Verklebung der genannten Jahrringlagen unterschiedlich sind und entsprechend angepasst werden müssen. (Riftbretter werden prinzipiell mit einer geringeren Presskraft verklebt als Seitenbretter, da sonst die Gefahr des Aufspaltens besteht.)

2.3 Prüfung der Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung

Die Biegeversuche wurden nach EN 408:2010+A1:2012 in der Universalprüfmaschine Z050 der Fa. Zwick mit einem 50 kN-Kraftsensor durchgeführt (Abbildung 2). Die Proben wurden mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min bis zum Bruch belastet. Die Prüfzeitvorgabe von 300 ± 120 sec konnte mit wenigen Ausnahmen für alle Prüfkörper eingehalten werden.

Für die Auswertung der Messergebnisse wurden der Mittelwert, die Standardabweichung sowie der Variationskoeffizient berechnet. Der 5% Fraktilwert wurde nach EN 14358:2006 ermittelt.

Abbildung 2: Prüfaufbau zur Ermittlung der Biegefestigkeit von keilgezinkten Brettern

2.4 Prüfung der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung

Die Zugfestigkeitsprüfung wurde nach EN 408:2010+A1:2012 durchgeführt. Dazu wurden die Proben in die Einspannbacken einer Zum Wald Zugprüfmaschine (GEZU 850) mit einem Pressdruck von 7 MPa eingespannt (Abbildung 3). Die Proben wurden während der Prüfung mit einer Geschwindigkeit von 0.7 kN/s bis zum Bruch belastet. Die Prüfzeit für die Prüfung betrug 300 ± 120 sec. Für die Auswertung der Messergebnisse wurden der Mittelwert, die Standardabweichung sowie der Variationskoeffizient berechnet. Der 5%-Fraktilwert wurde nach EN 14358:2006 ermittelt.

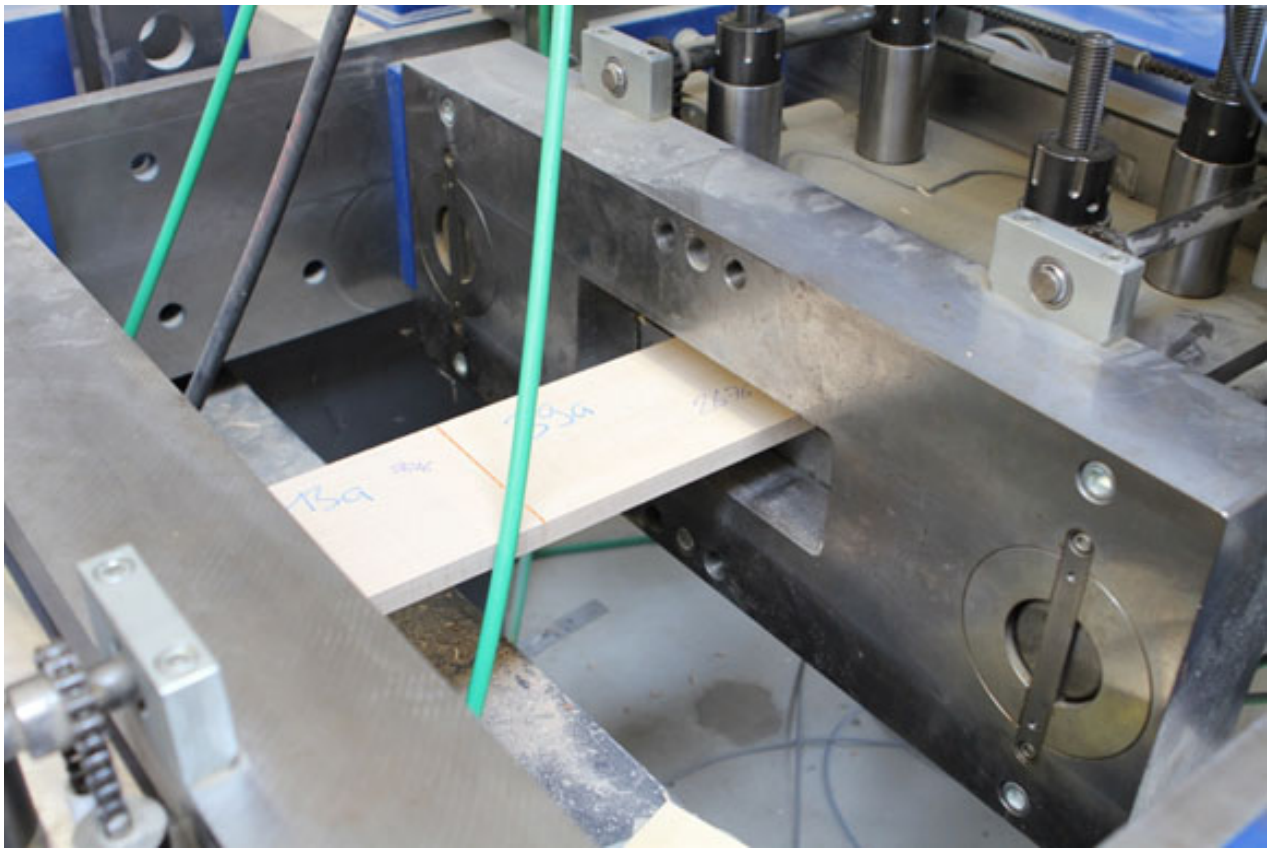


Abbildung 3: Prüfaufbau zur Ermittlung der Zugfestigkeit der Keilzinkung

2.5 Resultate: Biegefestigkeit der Keilzinkung

Die Werte für die Biegefestigkeit der Keilzinken sind in der Abbildung 4 entsprechend der Sortierklasse dargestellt. Die mittleren Festigkeitswerte steigen mit der Sortierklasse. Der Einfluss der Sortierklasse auf die 5%-Fraktilwerte der Biegefestigkeit der Keilzinkung ist relativ schwach (siehe Tabelle 2). Die geringe Abhängigkeit ist darauf zurückzuführen, dass bei der Keilzinkenprüfung die klassifizierenden Merkmale der Brettsortierung (z.B. Äste) nicht berücksichtigt werden. Die Prüfung wird immer im fehlerfreien Bereich durchgeführt, da sonst der Bruch mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Schwachstelle stattfinden würde und somit eine Aussage über die Keilzinkung nicht möglich wäre. Bei den vorliegenden Ergebnissen gibt es eine indirekte Korrelation zwischen Holzbruchanteil und der Sortierklasse, was dafür spricht, dass bei steigender Holzqualität der Klebstoffbruchanteil zunimmt und das Potential des Klebstoffes und somit auch der Verbindung besser ausgenutzt wird (siehe Abb. 4).

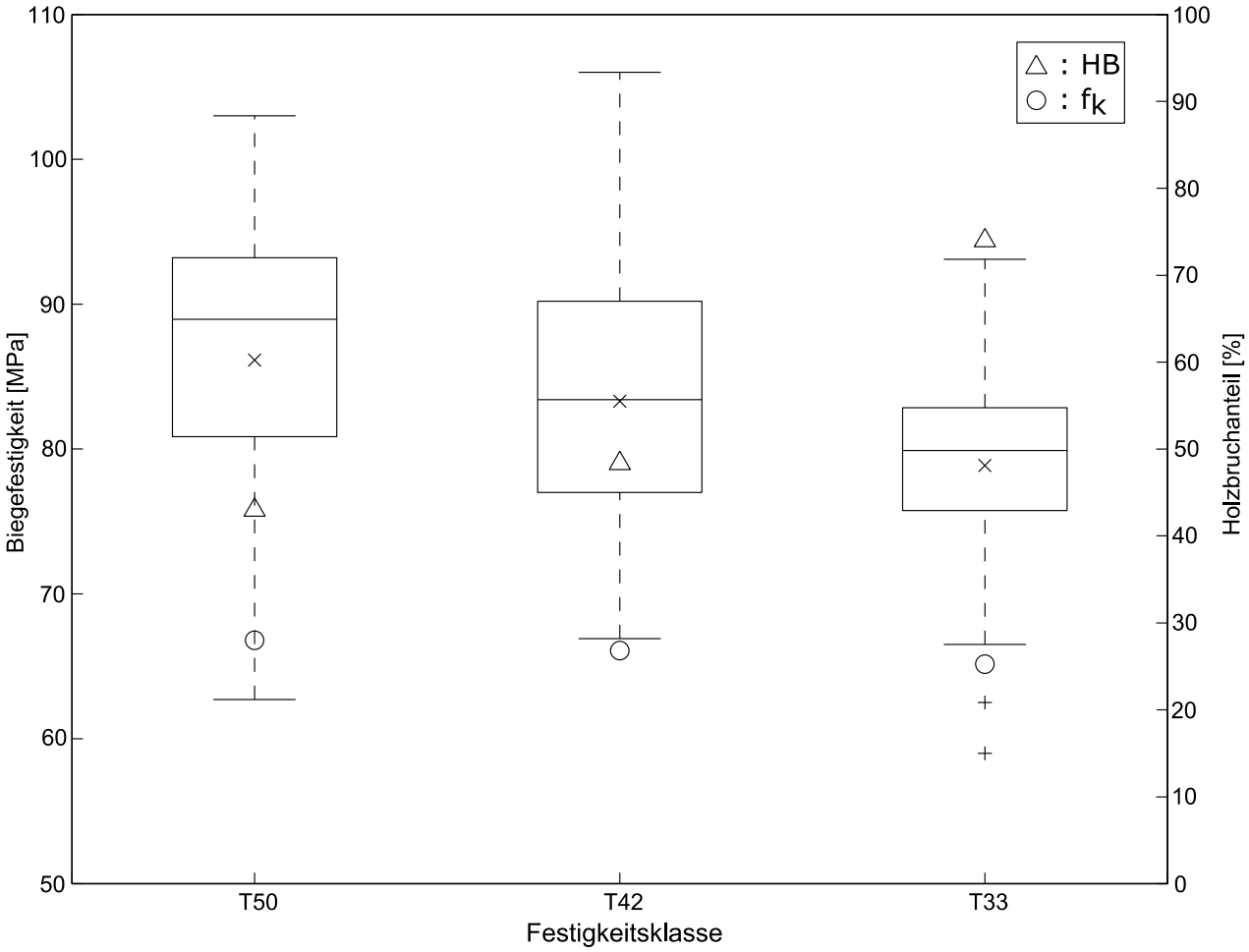


Abbildung 4: Biegefestigkeit (BF), Holzbruchanteil (HB), 5% Fraktilwert (f_k) für die keilgezinkten Bretter der Sortierklassen T33, T42 und T50 (x Mittelwert)

Die Werte der Biegefestigkeit für die Seiten- und Riftbretter sind in Abbildung 5 dargestellt, wobei die Seitenbretter eine höhere Festigkeit aufweisen als die Riftbretter. Der Holzbruchanteil ist bei den Riftbrettern ebenfalls höher als bei den Seitenbrettern, was den Einfluss der Schnittart zeigt und somit die Bedeutung dieses Parameters bei der Festigkeitssortierung der Bretter belegt. Bei der Bewertung ist aber auch zu beachten, dass die Riftbretter nur mit einem geringeren Pressdruck keilgezinkt werden konnten, da diese sonst aufgespalten wären. Dementsprechend waren niedrigere Festigkeitswerte und ein höherer Holzbruchanteil zu erwarten.

Der Zusammenhang zwischen dem mittleren Biege-E-Modul der Prüfkörper (Mittelwert der E-Moduli der beiden keilgezinkten Bretter) und der Biegefestigkeit ist in Abbildung 6 dargestellt. Dabei ist eine sehr schwache Korrelation zwischen Festigkeit und mittlerem E-Modul der Prüfkörper erkennbar.

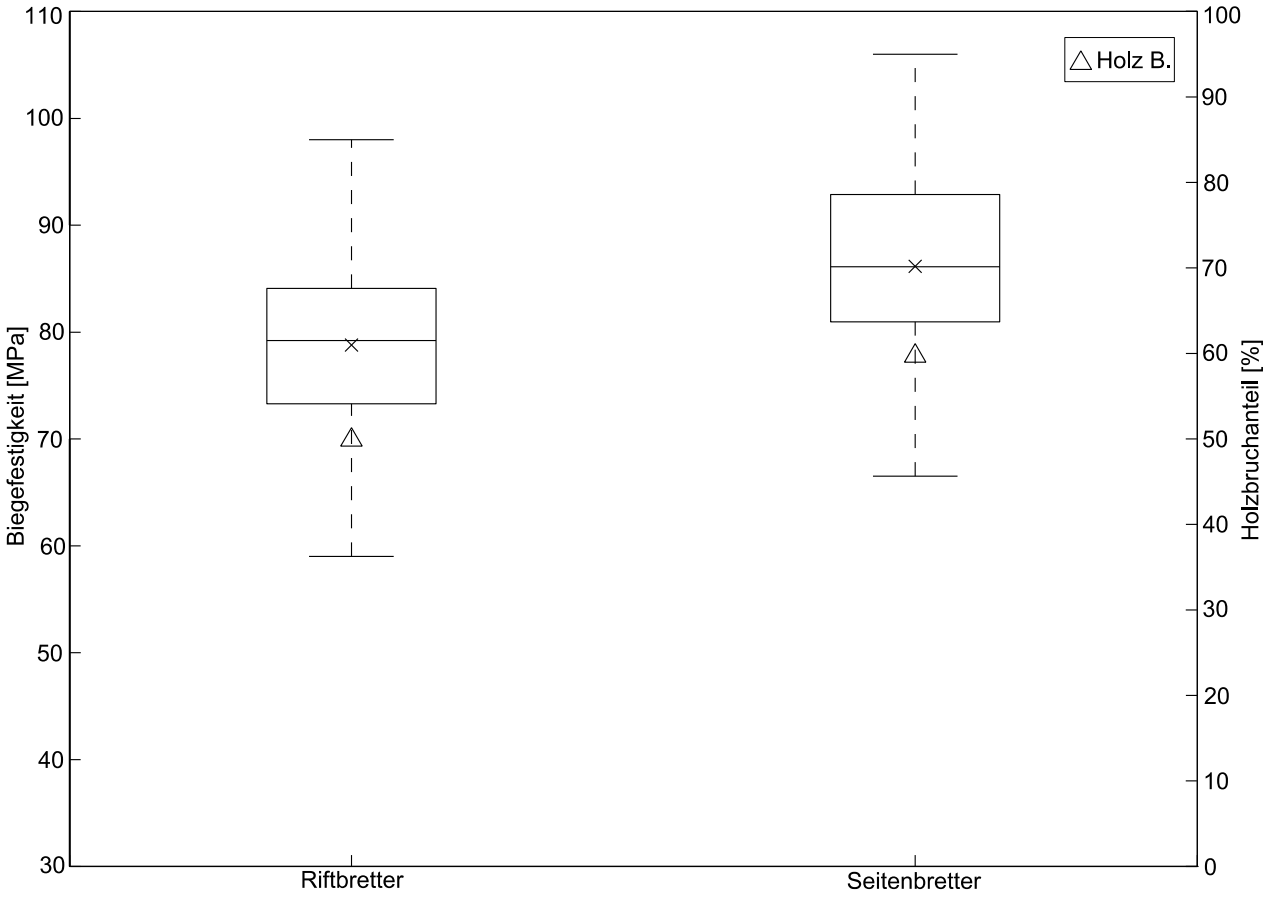


Abbildung 5:Biegefestikeit (BF) und Holzbruchanteil (HB) der Keilzinkenverbindung für Riftbretter (RxB) und Seitenbretter (SB) (x Mittelwert)

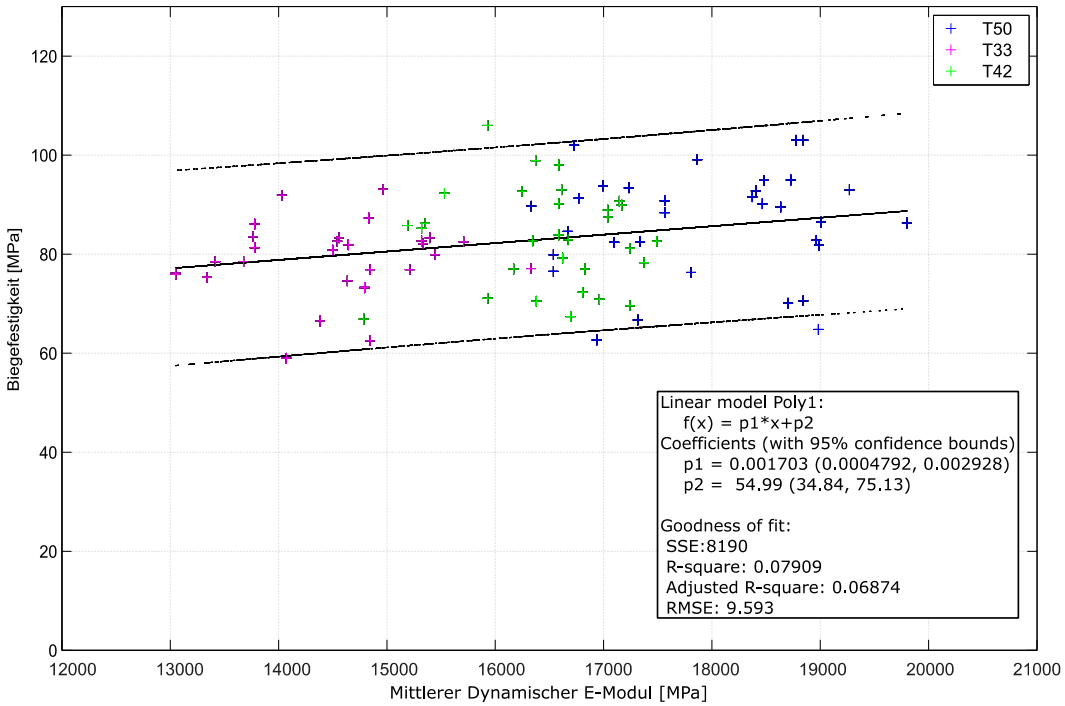


Abbildung 6: Korrelation zwischen Biegefestigkeit und mittlerem dynamischem E-Modul der keilgezinkten Bretter

Die Werte für die verschiedenen Sortierklassen sind in Tabelle 3 und die 5%-Fraktilwerte in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: 5% Fraktilwerte der Biegefestigkeit der geprüften Keilzinkenverbindungen je nach Sortierklasse der Bretter

	T33	T42	T50
f_k	65.2	66.1	66.8

Tabelle 3: Mittlere Biegefestigkeit (Average), Standardabweichung (Stdev) und Variationskoeffizient (CV) der geprüften Keilzinkenverbindungen je nach Sortierklasse. (BF: Biegefestigkeit, E_dyn,mean : Mittlere E-Modul, HB: Holzbruchanteil, BF_SB: Biegefestigkeit Seitenbretter, BF_RxB: Biegefestigkeit Riftbretter)

		BF [MPa]	E_dyn,mean [MPa]	HB [%]	BF_SB [MPa]	BF_RxB [MPa]
T33	Average	78.9	14518	74.0	81.5	75.1
	Stdev	7.5	8134	31.2	6.4	7.6
	CV [%]	9.5	5.6	42.2	7.8	10.1
T42	Average	83.3	16475	48.3	86.1	80.0
	Stdev	10.0	694	32.3	10.8	8.1
	CV [%]	12.0	4.2	66.8	12.5	10.1
T50	Average	85.9	17941	44.4	91.0	80.5
	Stdev	11.0	992	31.9	9.0	10.4
	CV [%]	12.8	5.5	71.8	9.9	13.0

2.6 Resultate: Zugfestigkeit der Keilzinkung

Die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen je nach Sortierklasse der Bretter ist in Abbildung 7 dargestellt. Dabei liegt der 5 %-Fraktilwert der Sortierklasse T42 tiefer als derjenige der Sortierklasse T33. Eine genauere Analyse der Ergebnisse und speziell der Bruchbilder der Keilzinkungen an Brettern der Sortierklasse T42 zeigt, dass zwei Proben die Ergebnisse stark beeinflussen. Zum Vergleich sind in Abbildung 8 drei Proben mit ihren Bruchbildern dargestellt. Eine Analyse dieser Proben zeigt, dass die zwei Proben mit tiefen Festigkeitswerten (Probe A und B) infolge (Holz-) Scherung im Keilzinkenbereich versagt haben. Die Probe C ist mit einem deutlich höheren Festigkeitswert im Klebstoff gebrochen. Dieses Ergebnis zeigt wiederum deutlich den Einfluss des Faserverlaufs auf die Festigkeit der Keilzinkenverbindung.

In der Abbildung 9 sind die Werte der Zugfestigkeit für Keilzinkungen von Seiten- bzw. Riftbrettern gegenübergestellt. Im Unterschied zur Biegefestigkeit sind bei der Zugfestigkeit keine signifikanten Unterschiede zwischen Rift- und Seitenbrettern festzustellen. Offensichtlich führen die unterschiedlichen Spannungszustände bei der Biegebelastung (Zug- und Druckspannung) zu einer Differenzierung zwischen Rift- und Seitenbrettern, wobei dieses Phänomen bis jetzt noch nicht abschliessend erklärt werden konnte.

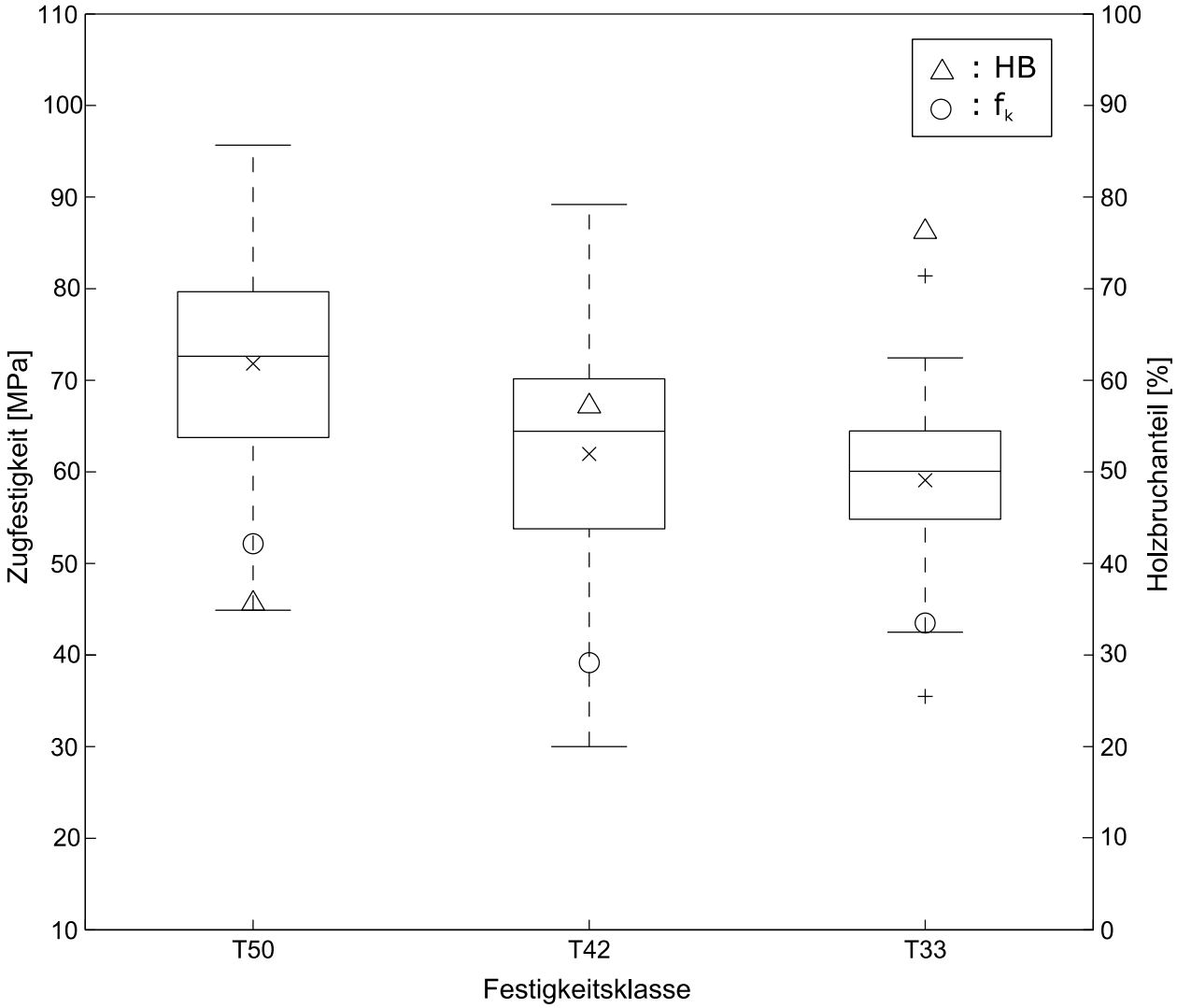


Abbildung 7: Zugfestigkeit (ZF), Holzbruchanteil (HB), 5% Fraktilwert (f_k) für Keilzinkungen an Brettern der Sortierklassen T33, T42 und T50 (x Mittelwert)

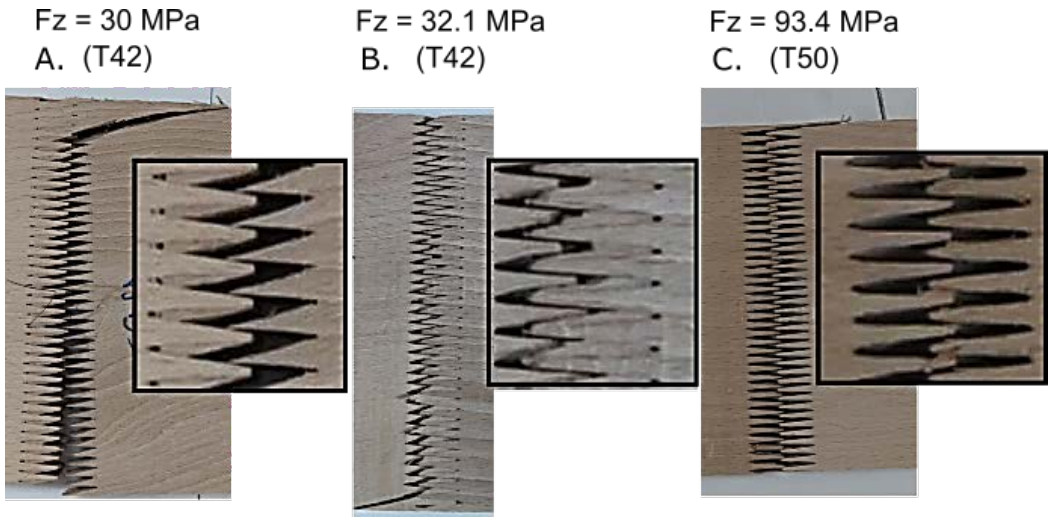


Abbildung 8: Bruchbild nach dem Zugversuch an ausgewählten Proben der Sortierklassen T42 und T50

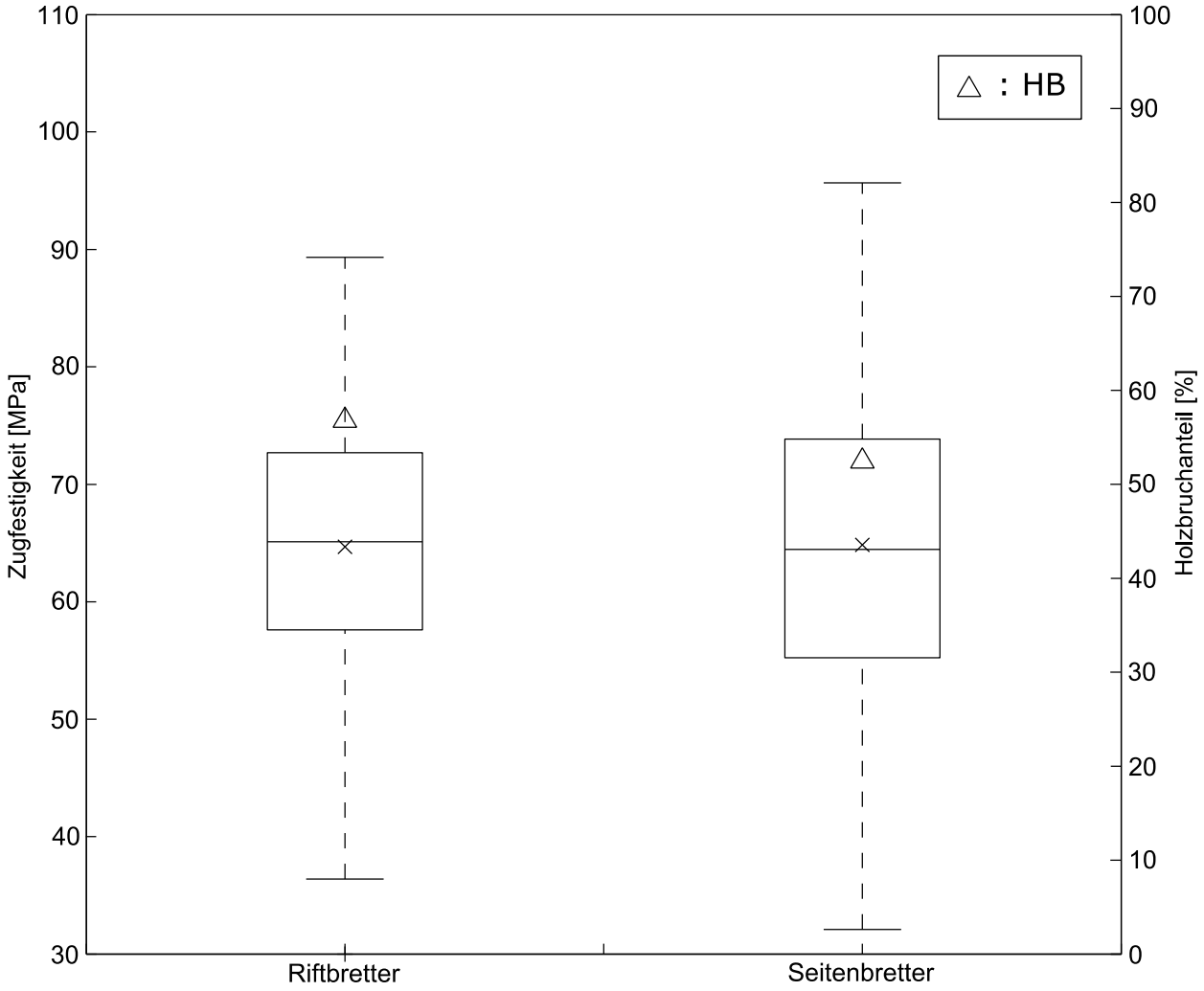


Abbildung 9:Zugfestigkeit und Holzbruchanteil (HB) für die Keilzinkenverbindung der Riftbretter (RxB) und Seitenbretter (SB) (x Mittelwert)

Der Zusammenhang zwischen mittlerem dynamischem E-Modul und Zugfestigkeit ist in Abbildung 10 dargestellt. Ähnlich wie bei der Biegefestigkeit, ist eine schwache Korrelation sichtbar, wobei die Streuung für die Sortierklassen T42 und T50 grösser ist als für die Sortierklasse T33. In Abbildung 11 wird eine mögliche Korrelation zwischen der Zugfestigkeit und der Differenz der dynamischen E-Moduln der beiden Bretter untersucht. Dabei konnten keine Abhängigkeiten zwischen diesen Parametern festgestellt werden, das heisst auch, dass es keine Abhängigkeit zwischen dem tieferen E-Modul der beiden Bretter einer Verbindung und der Zugfestigkeit gibt. Das bedeutet, dass innerhalb einer Sortierklasse keine weitere Einteilung hinsichtlich des dynamischen E-Moduls notwendig ist. In Abbildung 12 wird die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der mittleren Dichte der Probe (Mittelwert von beiden Lamellen) dargestellt. Hier ist ebenfalls nur eine sehr schwache Korrelation erkennbar, wobei zu beachten ist, dass die Dichte nur in einem relativ engen Bereich variiert und deshalb keine deutlicheren Abhängigkeiten zu erwarten sind.

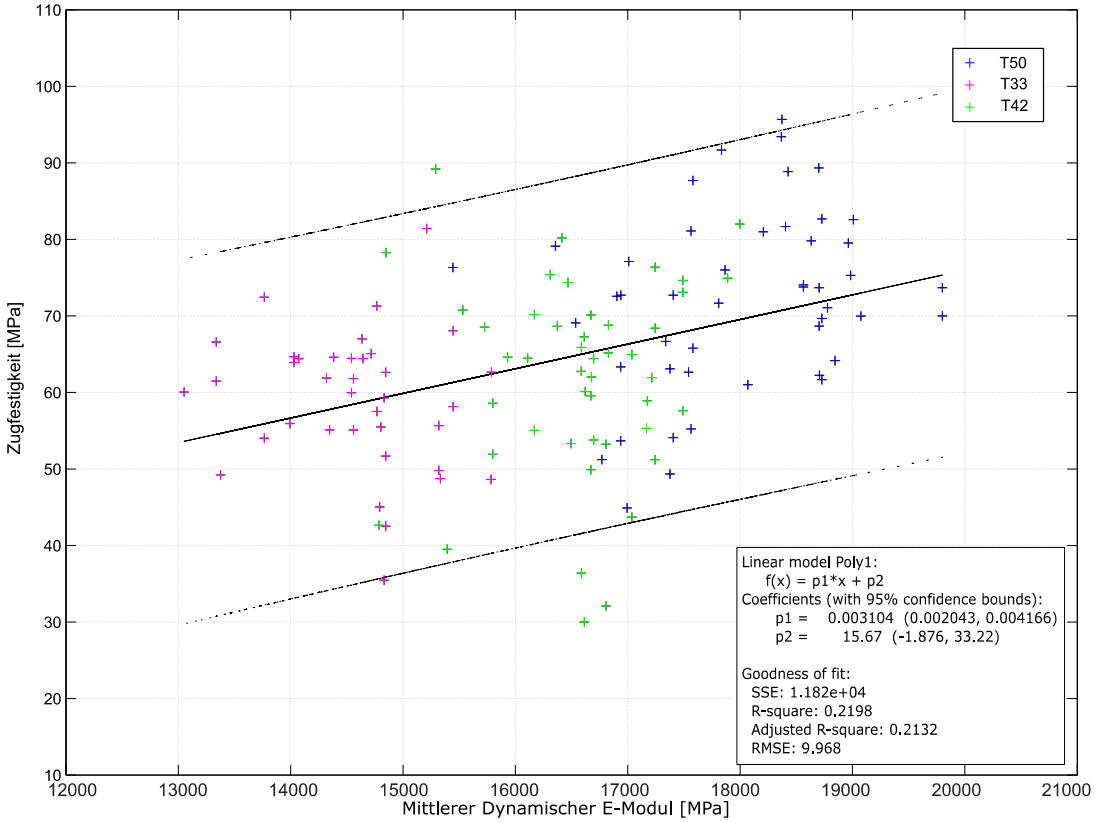


Abbildung 10: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und mittlerem dynamischem E-Modul von keilgezinkten Buchen-Brettern

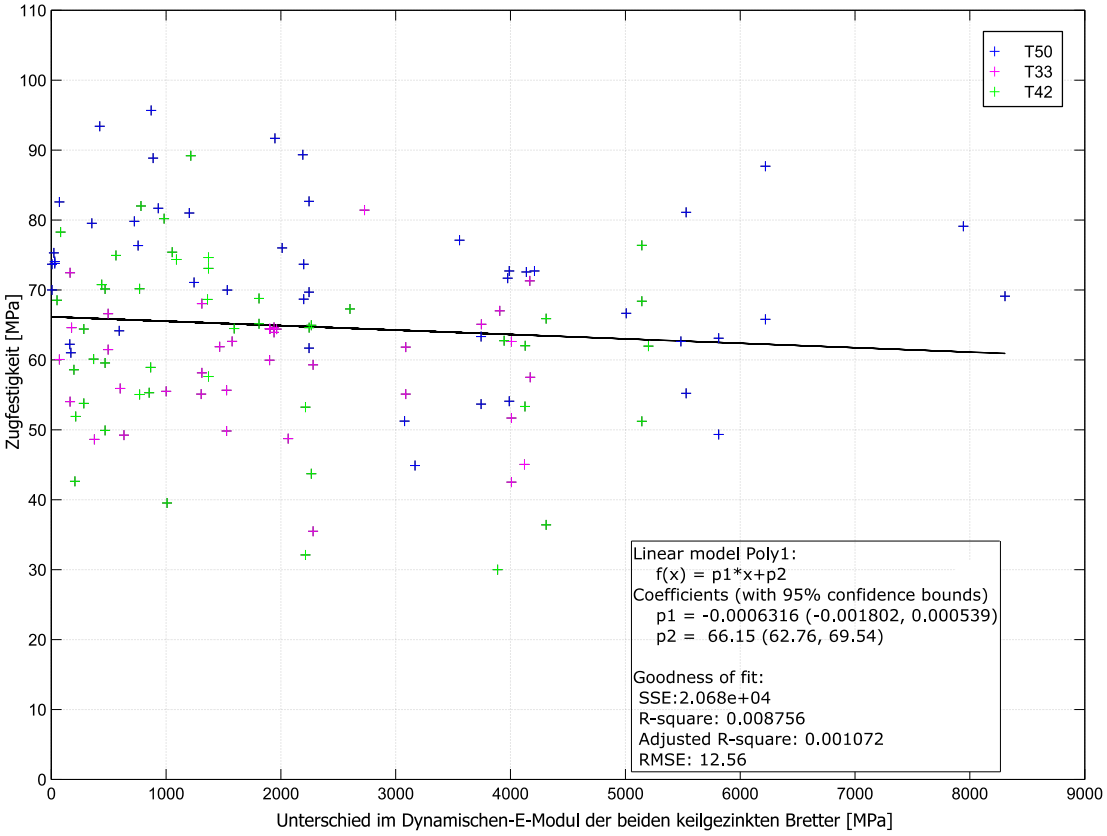


Abbildung 11: Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Unterschieds im dynamischen E-Modul der beiden keilgezinkten Bretter

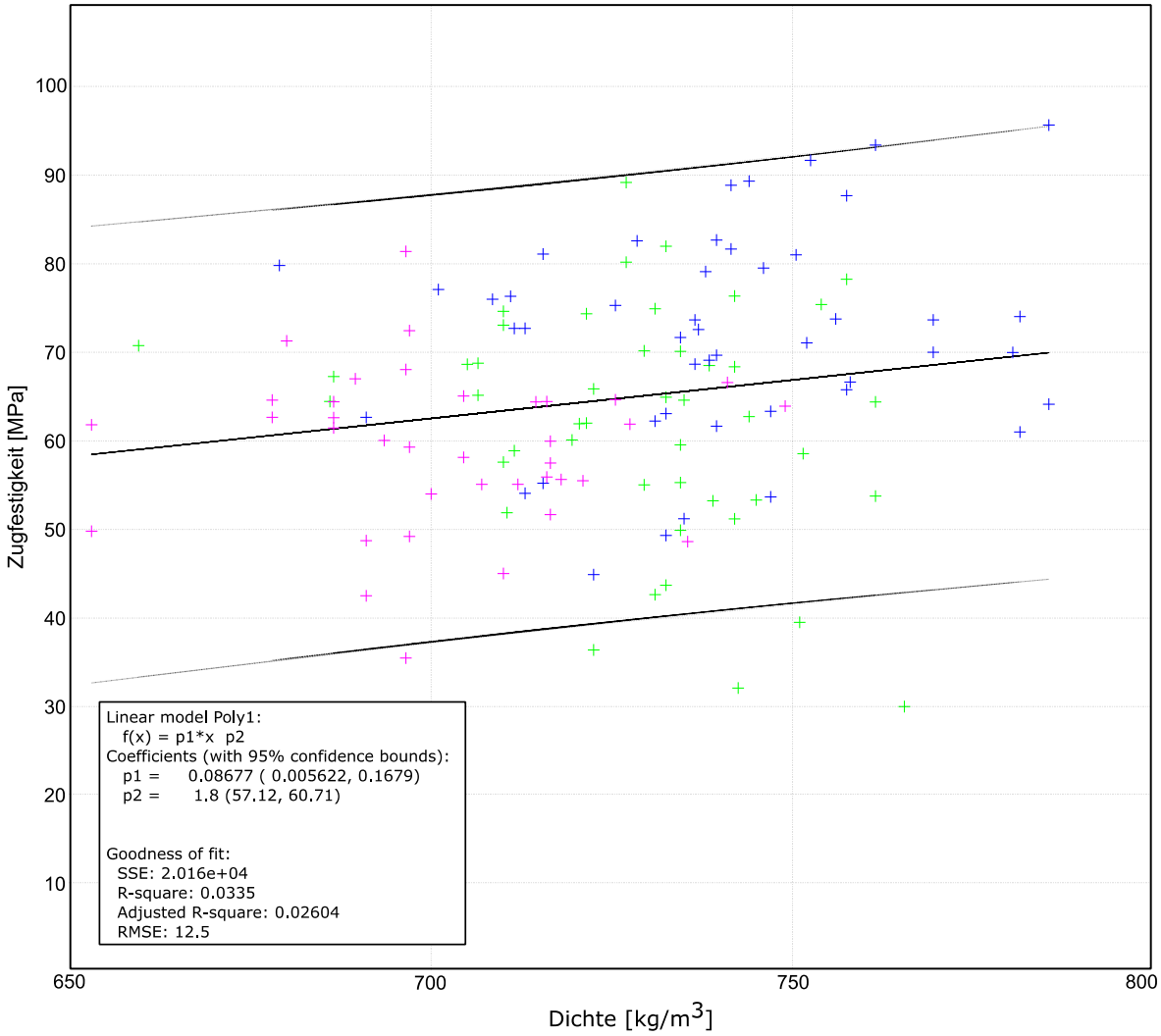


Abbildung 12: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und mittlerer Dichte der beiden keilgezinkten Bretter

In Tabelle 4 sind die 5%-Fraktilwerte für jede Sortierklasse dargestellt. Dabei sind für die Sortierklasse T42 zwei Werte angegeben: einerseits sind alle ermittelten Resultate berücksichtigt, andererseits wurde der 5%-Fraktilwerte ohne die zwei niedrigsten Werte berechnet. Dabei handelte es sich um zwei Proben mit deutlicher Faserabweichung, welche in Abbildung 8 dargestellt sind (links und Mitte). Daraus wird ersichtlich, dass bereits durch die Aussortierung von zwei Proben mit offensichtlich schrägfasrigem Faserverlauf, die gesamte Stichprobe den geforderten Grenzwert übertrifft, jedoch ist die Analyse des Faserverlaufs sehr anspruchsvoll, da die Abweichung in 2 Richtungen berücksichtigt werden muss.

Die Zusammenfassung der statistischen Werte für die Keilzinkenzugfestigkeit ist unter Berücksichtigung **aller** Messwerte in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 4: 5 %-Fraktilwerte der Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen an Brettern der Klassen T33, T42 und T50. (Die Sortierklasse T42_sorted beruht auf den gleichen Werten wie Sortierklasse T42, enthält jedoch keine Ausreisser.)

	T33	T42	T42_sorted	T50
f_k	43.5	39.2	43.7	52.2

Tabelle 5: Stichprobenkennwerte je Sortierklasse. Zugfestigkeit (ZF), Mittlerer E-Modul (E_dyn,mean), E-Modul-Differenz (E_delta), Holzbruchanteil (HB), Riftbretter (RxB), Seitenbretter (SB)

		ZF [MPa]	E_dyn,mean [MPa]	E_dyn,delta [Mpa]	Density [kg/m^3]	HB [%]	ZF_RxB [MPa]	ZF_SB [MPa]
T33	Average	59.1	14567	1985	703	76.2	59.1	59.1
	Stdev	8.91	678	1332	21.0	30.5	8.32	9.54
	CV [%]	15.1	4.66	67.13	2.98	40.0	14.1	16.2
T42	Average	62.0	16631	1719	727	57.8	62.3	61.5
	Stdev	12.3	720	1596	20.3	33.1	11.9	14.8
	CV [%]	19.9	4.33	92.9	2.80	57.2	19.2	24.0
T50	Average	73.4	18114	2501	743	32.8	70.9	72.7
	Stdev	11.6	919	2321	24.1	31.1	10.1	13.2
	CV [%]	15.9	5.07	92.8	3.25	95.0	14.2	18.1

2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Keilzinkenprüfung aufbauend auf einer vorgängigen Klassierung der Lamellen in T-Sortierklassen

Die statistische Auswertung der Ergebnisse zeigt eine schwache Abhängigkeit der Festigkeitswerte von den Sortierklassen. Vor diesem Hintergrund kann man sagen, dass die physikalischen Eigenschaften der Lamellen die Endfestigkeit der Proben nur in geringem Umfang beeinflussen. So haben z.B. der E-Modul und die mittlere Dichte (im untersuchten Dichtebereich) nur einen sehr geringen Einfluss auf die Festigkeit der Keilzinkung. Vielmehr spielt die Holzsortierung auf der Basis anatomischer Merkmale eine deutlich grössere Rolle. Dabei ist insbesondere auf die Jahrringlage und den Faserverlauf hinzuweisen, welche massgeblich die Endfestigkeit der Keilzinkenverbindung bestimmen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu erwähnen, dass bei der Keilzinkung der Seiten- und Riftbretter unterschiedliche Pressparameter angewendet werden mussten, um eine korrekte Verklebung zu gewährleisten. Weil bei Riftbrettern mit niedrigeren Drücken verpresst wurde, sind die Fugen nicht bis in den Zinkengrund geschlossen (Abb. 13) und es ergeben sich bzgl. der Biegefestigkeit tiefere Werte. Weshalb dieser Umstand bei der Zugfestigkeit nicht in dieser Art sichtbar wird, kann nicht beantwortet werden. Bei der Neuen Holzbau AG ist der Keilzinkungsprozess (Keilzinkengeometrie, Leim, Pressdruck und Pressvorgang) für Seitenbretter optimiert. Eine weitere Anpassung der Prozessparameter wäre notwendig, um die Keilzinkenfestigkeit bei Riftbrettern zu erhöhen.

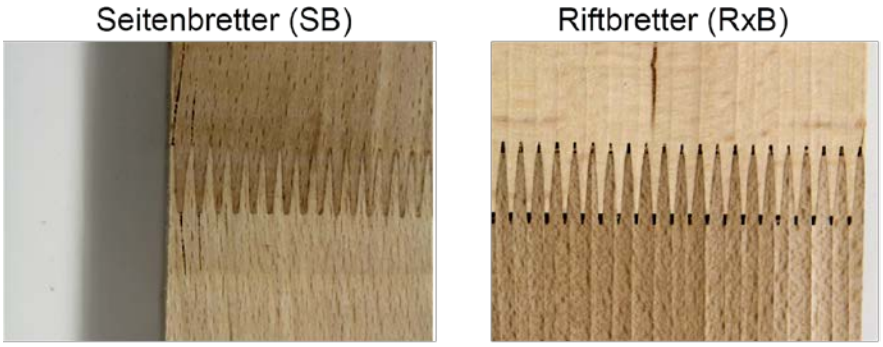


Abbildung 13: Verklebungsunterschied zwischen Seitenbrett (SB) und Riftbrett (RxB)

Anhand der Zugversuche lassen sich bessere Rückschlüsse auf die Qualität der Keilzinkenverbindung ziehen, als anhand der Biegeversuche. Bei Biegung versagt die Keilzinkung zwar infolge Zugversagens auf der Biegezugseite, aber ein erheblicher Teil des Querschnitts ist auf Druck belastet. Das reduziert entsprechend den Teil, welcher auf Zug belastet werden kann, was eine Interpretation erschwert. Beim Zugversuch ist der gesamte Querschnitt auf Zug belastet und das Versagensverhalten kann besser beurteilt werden. Eine Zugprüfung ist also eine deutlich schärfere Qualitätskontrolle als eine Biegeprüfung. Inwiefern eine Umrechnung der Biegefestigkeit in die Zugfestigkeit möglich ist, muss durch weitere Untersuchungen mit einem grösseren Stichprobenumfang geklärt werden. Die vorliegenden

Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Abhängigkeit zwischen Biege- und Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung vorliegt.

In Tabelle 6 sind die 5%-Fraktilwerte der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung den geforderten Werten gegenübergestellt. Daraus lässt sich ableiten, dass die Sollwerte der Sortierklasse T33 gut erfüllt werden, was weiter bedeutet, dass man Brettschichtholz der Klasse GL 40 herstellen kann. Für die Sortierklasse T42 konnte mit dem vorliegenden Probensatz noch nicht die geforderte Keilzinkenfestigkeit erreicht werden. Jedoch wäre das mit dem Probensatz der Sortierklasse T50 möglich, bei welchem eine Festigkeit von 52.2MPa erreicht wurde. Das bedeutet: Prinzipiell ist es auf Basis der Vorsortierung in die entsprechenden T-Sortierklassen auch möglich, Brettschichtholz der Klasse GL 48 herzustellen. Jedoch handelt es sich hier um hochfeste Produkte, bei denen kleinste Qualitätsmängel die Festigkeitswerte so beeinflussen, dass die notwendige Klasse nicht mehr erreicht wird. Aufbauend auf den vorliegenden Industrieerfahrungen ist aber davon auszugehen, dass bei optimaler Sortierung der Bretter und optimaler Lage der Keilzinkungen die minimalen Werte für die Sortierklasse T42 erreicht werden können und somit BSH der Klasse GL 48 hergestellt werden kann. Die Sortierung wird dabei nach erprobten, betriebsinternen Vorschriften durchgeführt (Gehri E. (2010): Sortierung Buchenbretter, 8803 Rüschlikon), wobei das erfahrene, geschulte Personal immer nur eine begrenzte Zeit von wenigen Stunden an einem Tag sortiert, sodass Fehler infolge von Müdigkeit oder Unkonzentriertheit nahezu ausgeschlossen werden können. Die Lage der Keilzinken ist so zu wählen, dass **keine** abweichende Faserneigung (infolge anatomischer Merkmale) im Bereich der Keilzinkenverbindung vorliegt.

Tabelle 6: 5%-Fraktilwerte der Zug-(Zf_k) und der Biegefestigkeit (Bf_k) von Keilzinkenverbindungen: Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und den Anforderungen.

	T33	T42	T42_sorted	T50
Bf_k [MPa]	65.2	66.1	66.1	66.8
Zf_k [MPa]	43.5	39.2	43.7	52.2
Bf_k/Zf_k	**1.50**	**1.69**	**1.51**	**1.28**
Sollwerte (5% Fraktilwerte) bzgl. der Zugfestigkeit	**38**	**48**	**48**	-
Vergleich Ist / Soll	**Ist > Soll**	**Ist << Soll**	**Ist < Soll**	-

2.8 Erweiterte Auswertung der Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindungen (ohne Berücksichtigung einer vorgängigen Einteilung in Sortierklassen)

Entsprechend der Aufgabenstellung des Moduls, wesentliche Qualitätskriterien für die Herstellung/Verleimung von Buchenbrettschichtholz zu definieren, hat speziell die Auswertung der Keilzinkeneigenschaften im Vergleich mit den vorliegenden Eigenschaften der Bretter (Dichte, dynamischer E-Modul) noch keine klare Tendenz ergeben (siehe Kap. 2.7). Dementsprechend wurden speziell die Festigkeitswerte der Zugfestigkeit nach folgendem Ansatz vertiefter analysiert.

- Optische Auswertung der Bruchbilder und Vergleich mit den Festigkeitswerten.
- Analyse aller Werte als eine Gesamtheit ohne eine vorgängige Einordnung in Sortierklassen.

Es wurden alle Lamellen (n = 130) bzgl. ihrer Festigkeit (Zug) sortiert und anschliessend die schlechtesten 10 % in einer Gruppe zusammengefasst. Dabei hat sich gezeigt, dass 80 % dieser Gruppe eine deutliche Faserneigung im Versagensbereich aufweisen, was auf einen deutlichen Einfluss des Faserverlaufs hindeutet. Danach wurden alle Proben, welche im Bruchbereich eine deutliche Faserabweichung zeigen, aus dem Datensatz entfernt und die verbleibenden 118 Proben erneut statistisch ausgewertet. Dabei wurden folgende 5 %-Fraktilwerte bestimmt:

$$N = 118 \rightarrow k(n) = 1.748 \rightarrow Zf_k = 50.7 \text{ MPa}$$

$$N = \infty \rightarrow k(n) = 1.645 \rightarrow Zf_k = 51.6 \text{ MPa}$$

Anhand dieser Ergebnisse ist ersichtlich, dass durch die Nichtberücksichtigung der Werte von Proben mit Faserneigung ein 5% Fraktilwert erreicht werden kann, welcher den Anforderungen der Festigkeitsklasse T42 entspricht. Das bedeutet, dass dieses Sortiment (130 Lamellen) mit der vorgenommenen Auswahl (118 Lamellen) eine ausreichende Qualität hätte, um damit BSH der Festigkeitsklasse GL48 herzustellen. Eine Quantifizierung und Bewertung der Faserneigung bzgl. der Reduzierung der

Keilzinkenfestigkeit ist infolge des Probenumfangs und des Versuchsplans in dieser Arbeit noch nicht möglich.

Dieses Ergebnis ist als sehr positiv zu bewerten, da es die Machbarkeit einer BSH-Produktion basierend auf Buchenbrettern bzw. -lamellen darstellt. Auf der anderen Seite ist zu beachten, dass der Faserverlauf im vorliegenden Fall erst nach dem Bruch sichtbar und identifizierbar war. Oftmals ist dieser Verlauf an einer Lamelle nicht bewertbar, auch weil die Abweichung in 2 Richtungen (tangential und radial) berücksichtigt werden muss. Aus diesem Grund muss zwingend untersucht werden, inwieweit dieses Kriterium effektiv in die Festigkeitssortierung mit einbezogen werden kann, da sich dadurch die Qualität der BSH Träger zielführend beeinflussen lässt. Es existieren labormässige Ansätze zur Erkennung der Faserneigung, welche aber industriell noch nicht umsetzbar sind. Das bedeutet, dass die Bewertung dieses Qualitätsmerkmals noch immer auf einer subjektiven, visuellen Begutachtung durch das Sortierpersonal aufbaut. Für die Sortierung des Materials für Modul 4 konnten somit auch nur die bis jetzt bekannten Kriterien und Methoden eingesetzt werden.

Es wurden noch weitere mögliche Korrelationen der 10% niedrigsten Festigkeitswerte (Keilzinken-Zugfestigkeit) analysiert:

- Dynamischer E-Modul,
- Dynamischer E-Modul Unterschied zwischen den Lamellen,
- Dichte,
- Dichteunterschied zwischen den Lamellen.

Bei diesen Parametern konnte keine spezifische Abhängigkeit festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass diese Parameter weniger wesentlich sind für die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung. Auch die jeweils niedrigeren Werte (E-Modul bzw. Dichte) der beiden Bretter einer Verbindung zeigten keine Korrelation mit der Zugfestigkeit. Es ist zu beachten, dass für die Auswertung nur wenige Messdaten zur Verfügung standen (n=13).

Aufgrund der vorliegenden erweiterten Auswertung zur Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung kann festgehalten werden, dass es möglich ist, Buchelamellen für den Einsatz bei Brettschichtholz industriell herzustellen. Damit ist der Meilenstein 3 des Projektes bestätigt. Es bleibt jedoch anzumerken, dass die Messmethodik und Quantifizierung der Faserneigung bzgl. einer industriellen Anwendung noch weiter untersucht werden muss.

3 Flächenverklebung

3.1 Anforderungen an die Klebefuge hinsichtlich der Delaminierungsbeständigkeit

Bei der Prüfung der Delaminierungsbeständigkeit nach dem Verfahren bei hoher Temperatur nach EN 302-2 dürfen gemäss Anforderungen der EN 301 (PRF und MUF) bzw. EN 15425 (PUR) nicht mehr als 5 % der Fugenlänge delaminiert sein. Diese Angabe bezieht sich dabei auf alle Prüfkörper, was bedeutet, dass auch kein Extremwert (Ausreisser) einer Probe grösser als 5 % sein darf. Die Prüfung nach EN 302-2 ist für Klebstoffprüfungen und somit für Prüfkörper, welche im Labor hergestellt wurden gedacht. Die oben genannten Grenzwerte der EN 301 resp. EN 15425 wurden für Nadelholzarten definiert und werden gegenwärtig, solange keine anderen Erfahrungen vorliegen, auch für Laubholzarten angewendet, einzig für Eiche sind in den Normen andere Grenzwerte festgelegt. Dieser beträgt für das Verfahren bei hoher Temperatur 8 %, bei speziellen Laubholzarten (Eiche) sind auch die Abmessungen und Jahrringlage der zu verklebenden Bretter den Industriebedingungen anzupassen. In der EN 14080:2013 sind die Anforderungen an Brettschichtholz aus bestimmten Nadelholzarten und Pappel geregelt. Eine Norm für die Anforderungen an die Produktion von Brettschichtholz aus Laubholz (exkl. Pappel) und die Eigenschaften dieser Produkte soll im CEN/TC 124 erarbeitet werden, diese ist aber noch nicht einmal als Entwurf publiziert. Somit gibt es für Laubholzbrettschicht keine Anforderungen an die werkseigene Produktionskontrolle, weshalb oft die Werte der EN 14080:2013 herangezogen werden. Diese fordert für die Prüfung der Delaminierung der Klebefugen nach dem Verfahren B nach dem ersten Zyklus total max. 4 % und nach dem zweiten Zyklus total max. 8 %, wobei der zweite Zyklus nur bei Nicht-Bestehen nach dem ersten Zyklus durchgeführt wird. Zusätzlich darf keine Fuge mehr als 30 % Delaminierung aufweisen.

3.2 Herstellung der Prüfkörper (Labormassstab)

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung der Delaminierungsprüfkörper diente Buchenholz mit einer Dichte von 680 ± 15 kg/m^3, welches bei einer Holzfeuchte von 10 % verarbeitet wurde.

Damit ein möglichst breites Spektrum an Klebstoffen evaluiert werden konnte, wurden Vertreter aus der Gruppe der Kondensationsharze und verschiedene PUR-Varianten getestet. Der PRF-Klebstoff Aerodux 185 entspricht dabei quasi einer Referenz und hat sich seit Jahren bei der Verklebung von Laubholz bewährt. Daneben wurden verschiedene weitere PRF, MUF und MF Systeme angewandt und hinsichtlich ihrer Eignung getestet. Dadurch sollte abgeklärt werden, ob die geprüften Varianten ähnlich gute Eigenschaften zeigen, wie der genannte Aerodux 185. Durch die Analyse der PUR-Varianten wurde eine neue Klebstoffvariante geprüft. Bei einer entsprechenden Eignung wäre ein Ersatz der phenolharzbasierten und formaldehyhaltigen Systeme denkbar und möglich, was speziell für die Verarbeitung und den Arbeitsschutz wesentliche Vorteile ergeben würde.

Die Herstellung der Proben erfolgte entsprechend der Vorgaben nach SN EN 302-2. Alle geprüften Klebstoff-und Verklebungsparameter sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Die einzelnen Lamellen wurden vor dem Verkleben auf eine Dicke von 29 mm und anschliessend die verklebte Probe auf eine Breite von 147 mm gehobelt. Pro Variante wurden 5 Prüfkörper hergestellt und geprüft, wobei der Einfluss folgender Parameter untersucht wurde:

- Pressdruck bei den 1K-PUR Varianten variiert zwischen 0.1 MPa und 1 MPa
- Primer Konzentration variiert zwischen 10 % und 20 %
- Primer Auftragsmenge variiert zwischen 10 g/m^2 und 20 g/m^2
- Ablüftzeit (Zeit zwischen Primer- und Klebstoffauftrag)

Die Untersuchung zum Einfluss der Ablüftzeit ist wesentlich für eine industrielle Implementierung von 1K-PUR Klebstoffen, da eine Wartezeit zwischen Primer- und Klebstoffauftrag logistisch und zeitlich sehr schwer zu realisieren ist. Jedoch ist momentan nur die Variante mit einer Ablüftzeit von 10 Minuten bauaufsichtlich zugelassen, weshalb die hier durchgeführten Versuche wichtige und notwendige Erkenntnisse für eine industrielle Herstellung von Buchen-BSH liefern.

Der Auftrag des Primers erfolgte mit der gleichen Auftragsmaschine (Abbildung 17) wie bei der Herstellung der Proben für die Zugscherversuche.

Tabelle 7: Verklebungsparameter für die Herstellung der Delaminierungsproben: PZ = Presszeit; AM = Auftragsmenge; GWZ = geschlossene Wartezeit; PD = Pressdruck; MR = Mischungsverhältnis (Bindemittel-Härter); PK = Primer-Konzentration; EWZ = Primer offene Wartezeit; P_AM = Primer Auftragsmenge

Variante	Klebstoff	Klebstoff-typ	MR	AM [g/m^2]	PZ [min]	PD [N/mm^2]	GWZ [min]	PK [%]	P_AM [g/m^2]	EWZ [min]
A	Aerodux 185	PRF	100:20:00	450	350	1	45	-	-	-
B	HBS 709	1K-PUR	-	170	350	0.1	10	20	10	0
C	HBS 709	1K-PUR	-	170	350	0.1	10	10	20	0
D	HBS 709	1K-PUR	-	170	350	0.1	10	10	10	0
E	HBS 709	1K-PUR	-	170	350	0.1	10	10	20	10
F	Prefere, P 4040/P 5035	PRF	100:20:00	450	350	1	45	-	-	-
G	Prefere, P 4535/P 5046	MUF	100:35:00	400	480	1.2	45	-	-	-
H	HBS 709	1K-PUR	-	170	350	1	10	20	10	0
I	HBS 709	1K-PUR	-	170	350	1	10	10	20	0
J	HBS 709	1K-PUR	-	170	350	1	10	10	10	0
K	HBS 709	1K-PUR	-	170	350	1	10	10	20	10

3.3 Analyse der Prüfkörper

Die Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit wurde nach dem Verfahren bei hoher Temperatur, gemäss SN EN 302-2:2013, durchgeführt. Die Prüfkörper wurden hierfür vorgängig auf eine Holzfeuchte von circa 10 % vorkonditioniert. Diese Feuchte richtet sich dabei nach den Bedingungen für die industrielle Herstellung von Brettschichtholz und nicht nach der Prüfnorm.

3.4 Ergebnisse und Diskussion der Delaminierungsversuche - Labormassstab

Die Ergebnisse der Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit nach SN EN 302-2:2013 sind in der Abbildung 14 dargestellt, wobei die graue Fläche der normativen Anforderung einer maximal zulässigen Delaminierung von 5 % entspricht (siehe SN EN 301 bzw. SN EN 15425).

Der Pressdruck wirkt sich deutlich auf die Delaminierungsbeständigkeit der Klebfugen aus. Alle 1K-PUR Proben, verpresst mit einem Druck von 1 MPa, weisen eine deutlich niedrigere Delaminierung auf als die Proben, welche mit 0.1 MPa verpresst wurden, obwohl selbst bei diesem vergleichsweise niedrigen Pressdruck von 0.1 MPa relativ gute Werte erzielt wurden. Die hohe Primer-Konzentration von 20 % hat bei beiden Pressdrücken einen negativen Einfluss auf das Delaminierungsverhalten. In beiden Fällen wird der zulässige Anteil von 5 % delaminierten Fugen überschritten. Die besten Ergebnisse wurden mit einer minimalen Ablüftzeit von 0 min, einer Primer-Konzentration von 10% und einer Auftragsmenge von 20 g/m^2 beim System HBS 709 erreicht.

Beim Vergleich der PRF Varianten hat nur der Referenzklebstoff Aerodux 185 die Prüfung bestanden. Das PRF-System Prefere 4040/5039 verhält sich ähnlich wie das MUF-System Prefere 4535/5046, wobei beide Systeme die Prüfung nicht bestanden. Dabei ist zu beachten, dass bedingt durch den händischen Klebstoffauftrag, die Anwendung der geschlossenen Wartezeit beim MUF-System Prefere 4535 möglicherweise nicht optimal für diese Variante war. Dies insbesondere, da das System für getrennten Harz / Härter Auftrag entwickelt ist. Im Labor wird der Klebstoff jedoch vor dem händischen Auftrag gemischt, was einen Einfluss auf die Reaktivität des Klebstoffes und somit auch auf die geschlossene Wartezeit hat.

Insgesamt haben 4 Varianten die Delaminierungsprüfung nach EN 302-2:2013 bestanden, was für die industrielle Herstellung einen gewissen Spielraum bietet und die Möglichkeit eröffnet, das bis dato gängige PRF System durch 1K PUR Varianten zu ersetzen. Durch den möglichen Einsatz eines 1K-PUR Klebstoffs sind die Mitarbeiter in den herstellenden Betrieben nicht mehr den Emissionen von PRF Klebstoffen ausgesetzt und die Klebefugen sind im Endprodukt nicht mehr oder nur noch schwach sichtbar. Der Meilenstein 4 des Projektes wurde erfüllt.

Zusammenfassend können folgende Erkenntnisse aus den Delaminierungsversuchen abgeleitet werden:

- 1K-PUR Systeme mit Primer erreichen ähnlich gute Delaminierungswerte wie das bisher für die Buchen-BSH-Herstellung bei der Neuen Holzbau eingesetzte PRF-System Aerodux 185.
- Eine Ablüftzeit nach dem Primerauftrag bei 1K-PUR Systemen ist nicht mehr notwendig.
- Die Verklebung mit den Prefere Systemen (PRF und MUF) ist relativ schwierig infolge der schwer einschätzbaren geschlossenen Wartezeit. Je nach Holzfeuchte, Raumfeuchte und Raumtemperatur sind unterschiedliche Abbindereaktionen zu erwarten (kurze geschlossene Wartezeit: Klebstoff wird aus der Fuge gepresst, lange geschlossene Wartezeit: Klebstoff bindet bereits vor dem Pressen ab).
- Die Primer-Konzentration und die Primer-Menge haben einen grossen Einfluss auf die Qualität der PUR-Verklebungen.
- Es ist neben der Primer-Menge eine entsprechend grosse Menge Wasser notwendig, um bei PUR-Verklebungen eine ausreichende Delaminierungsbeständigkeit zu gewährleisten.

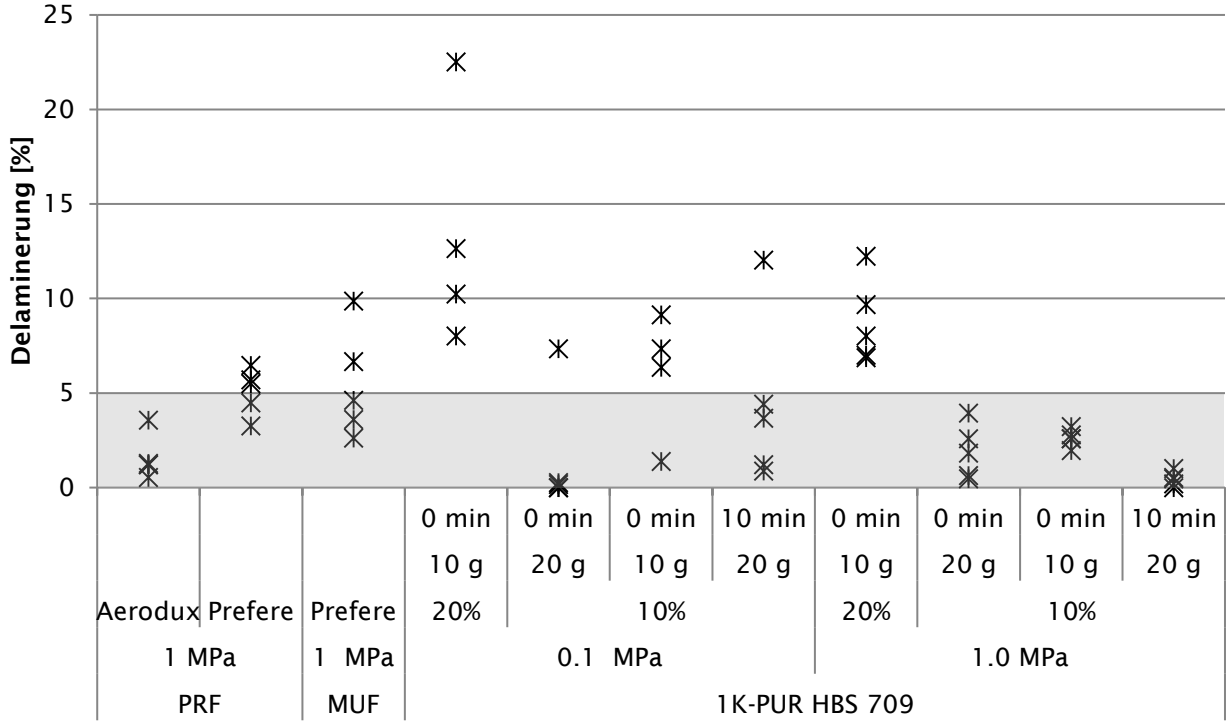


Abbildung 14: Ergebnisse der Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit nach SN EN 301-2:2013 – Die Verklebungsparameter sämtlicher geprüfter Varianten sind in der Tabelle 2 zusammengefasst

3.5 Herstellung der Delaminierungsprüfkörper (industriell)

Die Industrie-Verklebungen stellen den heutigen Stand der Technik dar, wobei sämtliche Parameter, welche das Verklebungsergebnis beeinflussen können, miteinfliessen und somit eine praxisgerechte Bewertung des Verfahrens möglich ist. Die Lamellendicke wurde auf 25 mm festgelegt. Das 1K-PUR System (Primer und Klebstoff) wurde mittels einer speziell für Industrieanwendungen konzipierten Auftragseinrichtung appliziert, wodurch ein reproduzierbarer Klebstoffauftrag gewährleistet war. Die Systeme Aerodux und MUF Prefere 4535/5046 wurden mit der Standard-Anlage appliziert. MF Prefere 4720/5020 und PRF Prefere 4040/5039 wurden händisch gemischt und aufgetragen (was als Applikationsmethode nicht optimal ist und sich negativ auf die Verklebungsgüte auswirken kann). Alle weiteren Verarbeitungsparameter können der Tabelle 8 entnommen werden.

Tabelle 8: Verklebungsparameter für die Herstellung der Delaminierungsproben im industriellen Massstab: PZ = Presszeit; AM = Auftragsmenge; GWZ = geschlossene Wartezeit; PD = Pressdruck; MR = Mischungsverhältnis; PK = Primer-Konzentration; EWZ = Primer Ablüftzeit ; P_AM = Primer Auftragsmenge, n.H. = ??

Variante	Klebstoff	Klebstoff-typ	MR	AM [g/m²]	PZ [min]	PD [N/mm²]	GWZ [min]	PK [%]	P_AM [g/m²]	EWZ [min]
1	Aerodux 185	PRF	100:20:00	n.H.	480	1	30	-	-	-
2	PRF Prefere 4040/5039	PRF	100:20:00	n.H.	480	1	30			
3	MUF Prefere 4535/5046	MUF	100 :35	n.H.	480	1	30			
4	MF Prefere 4720/5020	MF		n.H.	480	1	60			
5	HBS 709	1K-PUR		180	480	1		10	20	0
6	HBS 709	1K-PUR		180	480	1		10	20	10

3.6 Ergebnisse und Diskussion der Delaminierungsversuche (industriell verklebt und an der BFH/AHB in Biel nach EN 302-2 geprüft)

Die untersuchten Varianten zeigen deutliche Unterschiede bzgl. des Delaminierungsverhaltens (Abbildung 15 und Abbildung 16), wobei die beiden PRF-Systeme im Vergleich zu allen anderen Klebstoffen praktisch keine bzw. eine zu vernachlässigende Delaminierung der Klebefugen zeigen. Vor diesem Hintergrund kann bereits gesagt werde, dass die Herstellung von Buchenbrettschichtholz mit momentan am Markt verfügbaren Klebstoffsystemen möglich ist.

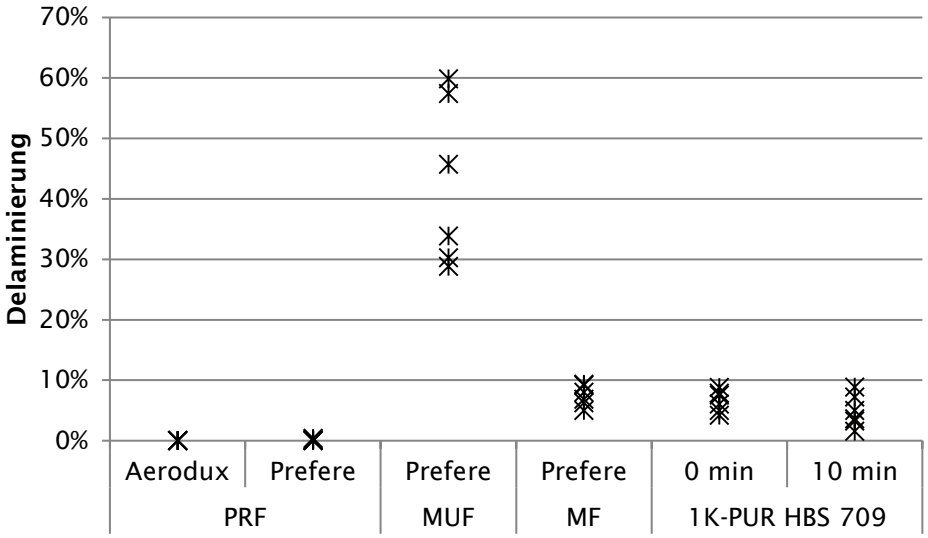


Abbildung 15 : Ergebnisse der Delaminierungsversuche (Einzelwerte) – nach der industriellen Verklebung unter Berücksichtigung aller Ergebnisse

Das getestete MUF-System zeigt relativ hohe Delaminierungswerte von teilweise bis zu 60 %, weshalb sich dieses System nicht für die Verklebung von Buche für im tragenden Bereich eingesetzte Bauteile eignet. Erstaunlich ist auch der deutliche Unterschied zu den Laborverklebungen. Dort hatte die gleiche Variante wesentlich besser abgeschnitten (Mittelwert der Delaminierung unter 5 %). Daraus ist ersichtlich, dass bei dieser Variante die Verklebungsbedingungen offensichtlich eine grosse Rolle spielen. Es ist anzunehmen, dass folgende Faktoren für die Unterschiede zwischen der Labor- und Industrieverklebung von Bedeutung sind: Auftragsart und –menge, Klebstoffverteilung, geschlossene Wartezeit in Abhängigkeit der Auftragsmenge sowie Pressdruck und Druckverteilung im Prüfkörper. Aufgrund dieser Sensibilität des Klebstoffs und des Verfahrens ist ein Einsatz im industriellen Bereich im Moment nicht zu empfehlen, da das Prozessfenster für die Verarbeitung zu klein ist, um eine sichere BSH-Produktion mit Buche zu garantieren.

Das MF-System zeigt vergleichsweise gute Delaminierungswerte, welche für alle Prüfkörper zwischen 5-10 % liegen. Bei einer entsprechenden Optimierung des Systems ist es denkbar, dass der Grenzwert von 5 % erreicht werden kann.

Die 1K-PUR Systeme zeigen ebenfalls ein gutes Delaminierungsverhalten mit Werten zwischen 3.3 - 8.9 %. Da jeder Einzelwert entsprechend der Norm (EN 302-2) unter 5 % liegen muss, haben beide Systeme den Grenzwert leicht überschritten. Das Ablüften des Primers hat darauf keinen oder nur einen geringen Einfluss. Jedoch ist aus Abb. 16 ersichtlich, dass ein Teil der Prüfkörper Werte deutlich unter 5 % Delaminierung aufweisen. Das zeigt, dass die Flächenverklebung von Buchen-BSH mittels 1K-PUR auch unter industriellen Bedingungen möglich ist, dass aber noch einige Anpassungen und mehr Erfahrung notwendig sind, um die Prozesssicherheit gewährleisten zu können. Im Vergleich zu den Laborverklebungen, welche die Anforderungen der Normen erfüllt haben, zeigen die industriell verklebten Proben etwas schlechtere Werte. Offensichtlich ergeben sich auch hier deutliche Einflüsse der Verklebungsparameter. Ein Vergleich dieser Parameter (Industrie-Labor) legt den Schluss nahe, dass folgende Faktoren eine wesentliche Rolle spielen: Pressdruck/Druckverteilung, Probendimension, ggf. Hobelqualität und entsprechende Massungenauigkeiten. Es gilt allerdings zu bedenken, dass die Grenzwerte und Verfahren der Normen für Nadelholz ausgelegt sind und diese für Laubhölzer wohl angepasst werden müssten.

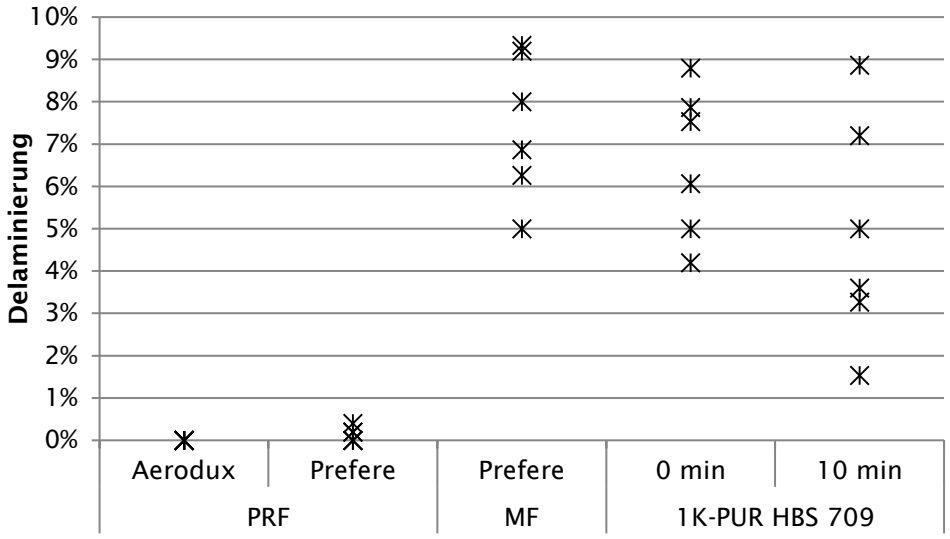


Abbildung 16 : Ergebnisse der Delaminierungsversuche (Einzelwerte) – nach der industriellen Verklebung ohne die MUF Variante 4535/5041

3.7 Ergebnisse und Diskussion der Delaminierungsversuche (industriell verklebt und in Lungern (neue Holzbau AG) nach EN 14080 geprüft)

Die n'H Lungern führte direkt nach der Produktion der Prüfkörper im Rahmen der internen Qualitätskontrolle die Prüfung der Delaminierung von Klebfugen nach SN EN 14080:2013, Anhang C durch. Bei diesen Prüfungen wurde nur die 1-K PUR Variante mit HBS 709 und 0 min Primerablüftzeit geprüft. Diese Parameter sind auf die industrielle Produktion anwendbar und sollen bei akzeptablen Delaminierungswerten für die Qualitätskontrolle im Rahmen des Modul 4 angewendet werden. Die vom Klebstoffhersteller empfohlene Wartezeit zwischen Produktion und Prüfung ist dabei 48 h. Bedingt durch den geplanten Produktionsablauf wurde die Delaminierung nach EN 14080 bereits nach 24 h geprüft. Die Resultate sind in Tabelle 9 aufgeführt und zeigen, dass die Anforderungen, welche an Nadelholz BSH gestellt werden auch von einem 1K-PUR System in Kombination mit Primer, ohne Ablüftzeit zwischen Primer- und Klebstoffauftrag und 25 mm Buchen Lamellen erfüllt werden. Somit ist die Machbarkeit einer industriellen Produktion von Buchen-BSH mit 1-K PUR gegeben. Die Prozesssicherheit in der industriellen Produktion soll im Rahmen der Produktion der Träger für das Modul 4 untersucht werden.

Tabelle 9: Resultate der Prüfung der Delaminierungsbeständigkeit der Klebfugen nach EN 14080:2013 (die Prüfungen wurden durch die n'H Lungern durchgeführt)

#	Delaminierung total	max. Delaminierung pro Fuge	Anzahl Zyklen	Anforderungen der EN 14080:2013
1	2.3 %	8.7 %	1	erfüllt
2	3.3 %	12.0 %	1	erfüllt
3	2.4 %	9.3 %	1	erfüllt
4	4.6 %	12.7 %	2	erfüllt

4 Zugscherversuche

4.1 Anforderungen an die Zugscherfestigkeit

Die Zugscherfestigkeit ist entsprechend der EN 302-1 für zwei Zustände A1(trocken) und A4 (nass) zu bewerten. Es müssen folgende minimale Festigkeitswerte erreicht werden:

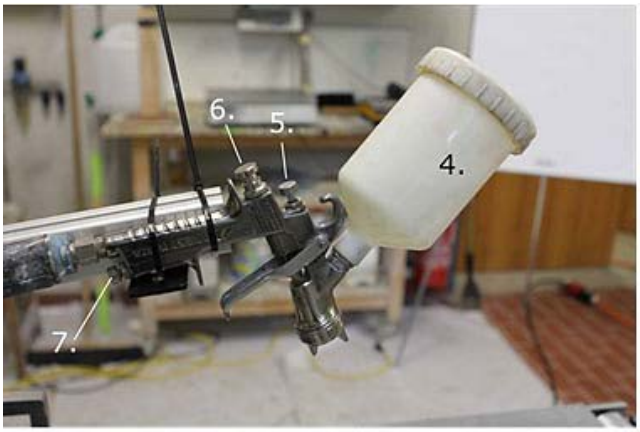
Zustand A1 10 MPa

Zustand A4 6 MPa.

4.2 Herstellung der Proben für die Zugscherprüfung

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung der Zugscherproben wurde Buchenholz mit einer mittleren Dichte von 706 kg/m^3 verwendet, welches bei einer Holzfeuchte von 12 % verarbeitet wurde. Die Herstellung erfolgte entsprechend der Vorgaben der SN EN 302-1.Alle geprüften Klebstoff-und Verklebungsparameter sind in der Tabelle 8 zusammengestellt. Es wurden etablierte Kondensationsharze und neu zu bewertende PUR Systeme analysiert Die Geometrie der Proben ist in der Abbildung 18 zu sehen, wobei die Breite a (Abbildung 18) bei jedem Prüfkörper einzeln gemessen wurde. Die Länge b ist durch den Zuschnittvorgang definiert und wurde deshalb für jede Probe konstant angenommen.

Der Klebstoffauftrag hinsichtlich Art und Menge erfolgte entsprechend den Herstellerangaben. Für die Aufbringung des Primers wurde eine halbautomische Anlage konzipiert, um eine gleichmässige Verteilung der Primer-Menge zu gewährleisten. (Abbildung 17).



1: Lackpistole ; 2: Rollband; 3: Probe; 4: Primer Behälter;
5: Strahlbreite; 6: Strahldurchfluss; 7: Luftdurchfluss

Abbildung 17: Primer-Auftragsmaschine, eingesetzt bei der Verklebung der 1K-PUR Proben

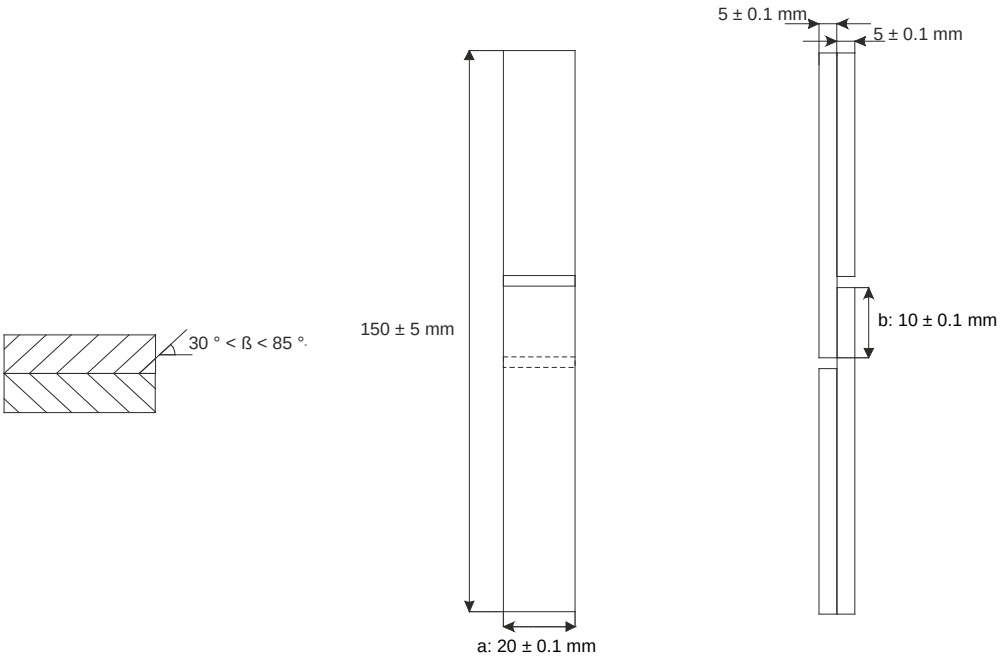


Abbildung 18: Geometrie der Zugscherproben nach DIN EN 302-1

Tabelle 10: Verklebungsparameter der Zugscherproben: PZ = Presszeit ; AM = Auftragsmenge ; GW = geschlossene Wartezeit ; PD = Pressdruck ; MR = Mischungsverhältnis ; PK = Primer Konzentration ; P_OW = Primer offene Wartezeit ; P_AM = Primer Auftragsmenge

Klebstoff	Klebstoff-typ	Kürzel	PZ [min]	AM [g/m²]	GW [min]	PD [MPa]	MR	PK	P_OW	P_AM
HB181+Primer	1K-PUR	B81P	360	150	-	0.8	-	10%	10min	20g/m²
HB181	1K-PUR	B81	360	150	-	0.8	-	-	-	-
HBS_709+Primer	1K-PUR	S79P	360	150	-	0.8	-	10%	10min	20g/m²
HBS_709	1K-PUR	S79	360	150	-	0.8	-	-	-	-
Aerodux 185	RF5	RF5	350	450	45	1	100/20	-	-	-
PRF Prefere 4040/5839	PRF	RF	350	450	45	1	100/20	-	-	-
MF Prefere 4546/5020 + Wartezeit	MF	MW	180	500	45	1	100/30	-	-	-
MF Prefere 4546/5020	MF	M	180	500	-	1	100/30	-	-	-

4.3 Ermittlung der Zugscherfestigkeit

Die Zugscherversuche wurden nach SN EN 302-1:2012 durchgeführt. Vor der mechanischen Prüfung wurden die Proben einer Vorbehandlung unterzogen:

- A1, Konditionierung der Prüfkörper bei 20° C und 65 % relativer Luftfeuchte.
- A4, Kochen der Proben für 6 h bei 100°C, Abkühlen für 2 h im Wasser bei 20° C, Prüfen der Proben direkt im Nasszustand

Damit die Proben frei quellen konnten, wurden spezielle Behälter für die Lagerung während der Behandlung A4 gebaut (Abbildung 19).

Abbildung 19: Lagerung der Proben vor der Behandlung A4

In Abbildung 20 ist der Prüfaufbau für die Zugscherprüfung dargestellt. Dabei war es notwendig, auf eine exakte Ausrichtung der Prüfkörper entsprechend dem Kraftfluss in der Maschine zu achten, um die Einleitung eines Biegemomentes in die Probe und somit eine Überlagerung von Zugscher- mit Biegespannungen und damit eine Verfälschung der Versuchsresultate zu verhindern.

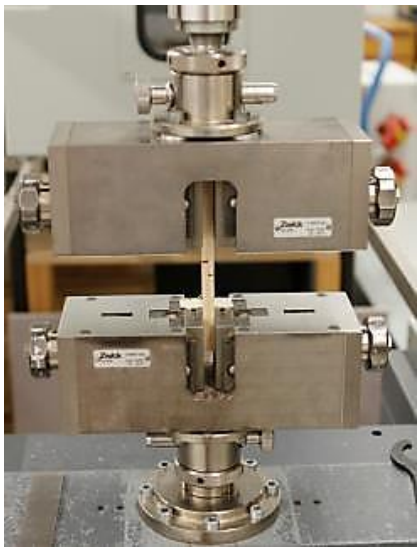


Abbildung 20: Prüfaufbau der Zugscherfestigkeit

Die Zugscherfestigkeit wurde nach folgender Formel auf der Basis der ermittelten Bruchlast und der belasteten Fläche berechnet:

$$\sigma = \frac{F}{a * b}$$

Dabei ist F die ermittelte Bruchlast, a und b sind die Abmessungen der Probe entsprechend Abbildung 18. Bei der Prüfung im Zustand A4 wurden dabei die Abmessungen im gequollenen Zustand ermittelt. Dieser Ansatz entspricht der wissenschaftlichen Praxis, nicht aber der in der SN EN 302-1:2013 spezifizierten Methode, bei welcher immer mit einer Fläche von 200 mm^2 gerechnet wird. Die 200 mm^2 entsprechen der verklebten Fläche im trockenen Zustand. Die gewählte Methode liefert jedoch die wissenschaftlich korrekten Ergebnisse, da speziell bei Behandlung A4 der Effekt der Holzquellung berücksichtigt und die tatsächliche Fläche für die Berechnung der Spannung herangezogen wird. Bei Verwendung der Abmessungen a und b im klimatisierten Ausgangszustand fallen die Zugscherfestigkeiten höher aus.

4.4 Resultate der Zugscherfestigkeitsversuche

Die Ergebnisse der Zugscherversuche nach Behandlung A1 sind in der Abbildung 21 dargestellt.

Alle Verklebungsvarianten weisen eine höhere Zugscherfestigkeit auf als die nach Norm geforderten 10 MPa. Wegen des hohen Holzbruchanteils entsprechen die erreichten Festigkeiten der verklebten Systeme der Festigkeit des Vollholzes. Alle geprüften Klebstoffsysteme zeigen somit gute Ergebnisse in trockenen Zustand, wobei das Potential der Klebstoffe noch nicht vollständig genutzt wird.

Die Zugscherfestigkeit nach Behandlung A4 ist in Abbildung 22 dargestellt. Hier erreichen nur die PUR-Systeme mit Primer und die PRF Systeme die geforderte Festigkeit von 6 MPa. Es konnte kein Einfluss der geschlossenen Wartezeit auf die Festigkeit der Melaminsysteme nachgewiesen werden. Im Gegensatz zu den PRF Systemen unterscheiden sich die PUR Systeme leicht hinsichtlich der erzielten Festigkeit.

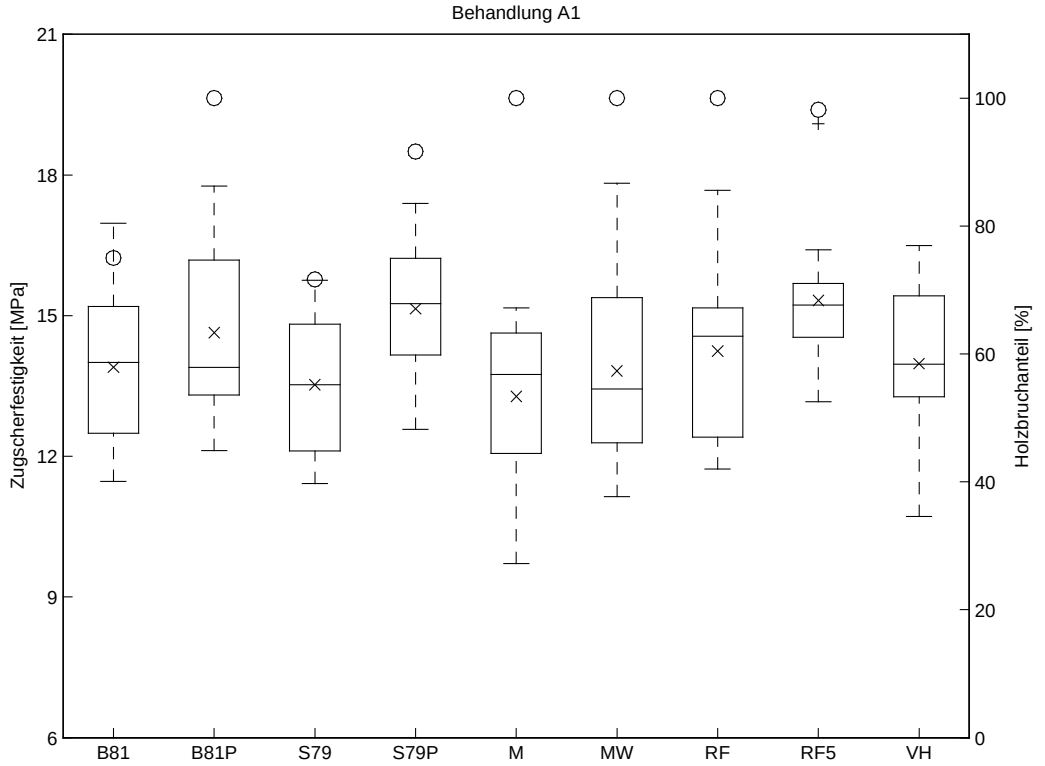


Abbildung 21: Zugscherfestigkeit nach Behandlung A1(trocken), + Ausreisser, O Holzbruchanteil

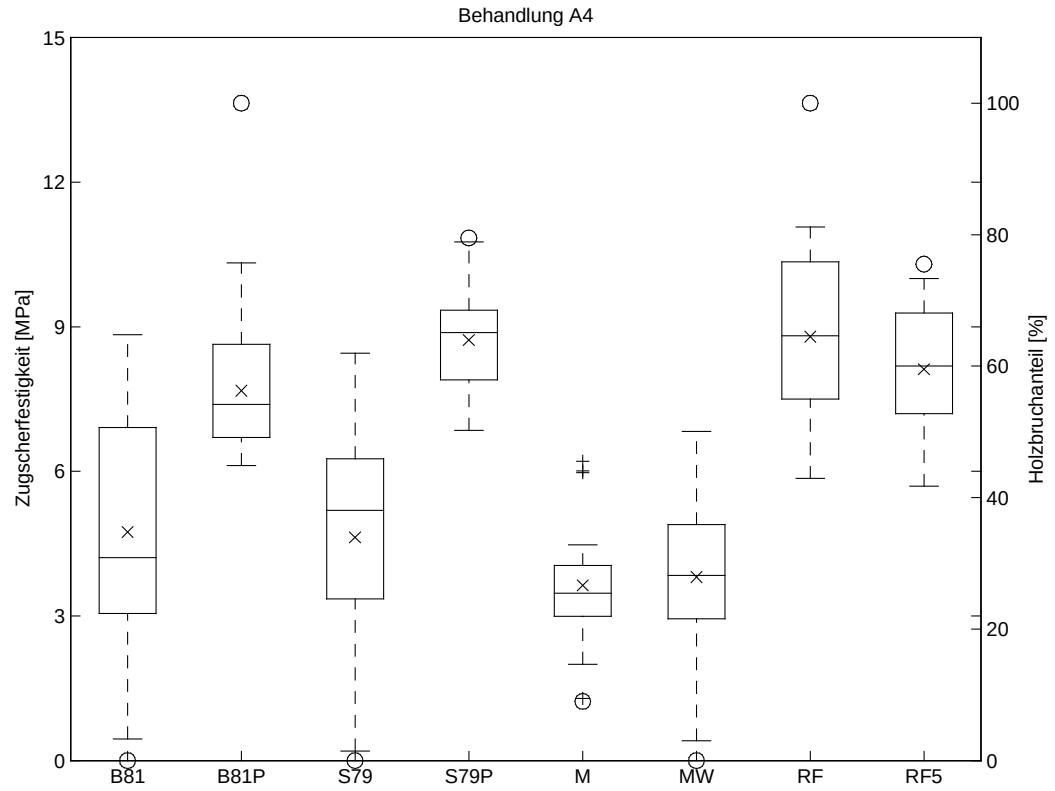


Abbildung 22: Zugscherfestigkeit nach Behandlung A4 (nass), + Ausreisser, O Holzbruchanteil

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Zugscherfestigkeit

Die Prüfung der Zugscherfestigkeit hat gezeigt, dass 1K-PUR Klebstoffe mit Einsatz eines Primers die Normanforderung im trocknen und im nassen Zustand (A1 bzw. A4) erfüllen können. Die beiden PRF-Varianten zeigen hinsichtlich der Zugscherfestigkeit keine Unterschiede und erfüllen die minimal geforderten Festigkeiten ebenfalls. Die MUF Varianten zeigen speziell im nassen Zustand sehr niedrige Werte und bestehen die Anforderungen nicht, wobei die Variation der geschlossenen Wartezeit nicht zu einer Steigerung der Fugenfestigkeit führte.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Erkenntnisse aus den Untersuchungen im Labor und im Holzbaubetrieb

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse des Moduls 3 des AP Holz - Forschungsprojektes: " Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz – Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen" dargestellt und belegen anhand von Versuchsergebnissen zu den 3 Parametern: Keilzinkenfestigkeit, Delaminierung und Zugscherfestigkeit, die technische Machbarkeit der Herstellung von Buchenbrettschichtholz.

5.1.1 Projekt-Meilenstein 3 (Mechanische Eigenschaften der Keilzinkenverbindungen→ Ausreichend hohe Zugsteifigkeiten und –festigkeiten zur Herstellung von BSH der FK GL40, 48 und 55?)

Die Keilzinkenfestigkeit wurde anhand der Biege- und Zugfestigkeit bewertet. Dabei wurde festgestellt, dass beim vorliegenden Probenmaterial nur eine schwache Abhängigkeit zwischen Sortierklasse und Keilzinkenfestigkeit existiert. Das gleiche trifft auf den dynamischen E-Modul und die Dichte zu, wobei zu beachten ist, dass das Ausgangsmaterial bzgl. der Dichte nur wenig variierte (653 – 785 kg/m^3, bei 12% Holzfeuchte). Die anatomischen Merkmale des Holzes in Form von Faserneigung und Jahrringlage wirken sich deutlich stärker aus. So konnte unter Berücksichtigung (Aussortierung) der Lamellen mit einer deutlichen Faserneigung im Bruchbereich (10 % der Proben) nachgewiesen werden, dass das verbleibende Probensortiment für die Herstellung von BSH der Festigkeitsklasse GL 48 geeignet ist, was als positiv zu bewerten ist und die Qualität der Sortierung unter Beweis stellt. Als generell ungünstig ist der Umstand zu bewerten, dass die Faserneigung erst nach dem Bruch sichtbar ist und somit nur teilweise in die Sortierung der Ausgangsbretter miteinbezogen werden kann. Eine Umrechnung der Festigkeitswerte zwischen Biege- und Zugfestigkeit ist aufgrund des begrenzten Probenumfangs in diesem Modul nur eingeschränkt möglich.

Ein weiterer wesentlicher Punkt bei der Herstellung der Keilzinkenverbindung ist die Berücksichtigung der Jahrringlage, da für Rift- bzw. Seitenbretter unterschiedliche Pressdrücke verwendet werden müssen. Weiter ist darauf zu achten, dass die Lage der Keilzinkung so gewählt wird, dass anatomische Merkmale wie Astausläufe und Verwachsungen im Bereich der Keilzinkung den Faserverlauf nicht beeinflussen.

Die Parameter der Sortierung wurden entsprechend auf die Produktion der Prüfkörper für die Folgemodule angewendet, wodurch die maximal mögliche Prozesssicherheit und Qualität der Proben gewährleistet ist.

5.1.2 Projekt-Meilenstein 4 (Untersuchungen zur Flächenverklebung → Ausreichend hohe Schubfestigkeiten und Klebfugenbeständigkeit zur Herstellung von BSH der FK GL40, 48 und 55 in NKL 1)

Für die Herstellung der Probenkörper wurden zwei grundlegende Klebstoffvarianten verwendet. Einerseits wurden bekannte Kondensationsharze eingesetzt und andererseits wurden neuartige 1K-PUR Systeme geprüft und hinsichtlich ihrer Eignung für Verklebungen von tragenden Bauteilen analysiert.

Die Qualität der Flächenverklebung wurde mittels Delaminierungsprüfungen bewertet. Da es für diese Prüfung bis zum jetzigen Zeitpunkt keine Grenzwerte für Buche gibt, muss auf die jeweiligen Anforderungen für Nadelholz zurückgegriffen werden: Bei Laborprüfungen nach EN 302-2:2013 bedeutet dies maximal 5 % delaminierte Fugenlänge und bei der betriebsinternen Qualitätskontrolle nach EN 14080 dürfen 4 % nach dem ersten Zyklus bzw. 8 % nach dem zweiten Zyklus nicht überschritten werden. Die Prüfkörper wurden einerseits unter Laborbedingungen und andererseits im Industriemassstab verklebt. Bei den Laborverklebungen haben neben dem Referenz-Klebstoff Aerodux noch drei 1K PUR Varianten bestanden. Dabei wurden die besten Ergebnisse mit dem System HBS 709 bei einer minimalen Ablüftzeit von 0 min, einer Primerkonzentration von 10 % und einer Auftragsmenge von 20 g/m^2

erzielt. Die genannte Variante hat auch die Prüfung zur betriebsinternen Qualitätskontrolle (Industrieverklebung) bestanden, wodurch nachgewiesen werden konnte, dass die industrielle Produktion von Buchen-BSH neben Aerodux auch mit 1K-PUR möglich ist. Auf der Basis dieses Ergebnisses wurden entsprechend alle Prüfkörper für das Folgemodul 4 verklebt, wodurch die bestmöglichste Verklebungsqualität gewährleistet ist.

Zugscherversuche entsprechen einem reinen Klebstofftest, bei welchem Holzeinflüsse soweit möglich minimiert, reale Gebrauchsbedingungen jedoch nur zum Teil abgebildet werden können. In der vorliegenden Studie hat sich zudem gezeigt, dass alle getesteten Systeme die Normanforderungen (10 MPa) im trockenen Zustand gut erfüllen. Bei verschärften klimatischen Bedingungen entsprechend A4 erreichen die phenol-resorzin basierten Systeme neben den 1K-PUR-Systemen mit Primer die Normanforderungen von 6 MPa.

Wie eingangs erwähnt, konnte im Modul 3 die industrielle Herstellung von Buche-BSH als technisch machbar nachgewiesen werden. Die Längsverbindung der Lamellen und deren Flächenverklebung sind technisch möglich und führen zu hochfesten Bauteilen, welche mit hoher Qualität reproduzierbarer hergestellt werden können. Die Sortierung und Holzauswahl ist dabei ein Kernelement und gestaltet sich deutlich schwieriger als bei Nadelholz. Für die Festigkeitssortierung der Bretter aber auch für die Wahl der Lage der Keilzinkung erwies dich die Faserneigung als der kritischste Parameter, weil dieser bis jetzt noch nicht zufriedenstellend und mit einfachen Mitteln vor der Keilzinkung erkannt werden kann. Dort besteht weiterhin eine Unsicherheit, welcher nur mit weiterführenden Forschungsaufwand und entsprechenden Entwicklungen von möglichst apparativen Methoden begegnet werden kann. Die fehlende Normung des Bauprodukts BSH aus Laubholz und die damit zusammenhängenden fehlenden Grenzwerte für die Qualitätsprüfung von Keilzinkungen und Flächenverklebungen stellen eine weitere Unsicherheit dar. Momentan muss auf entsprechende Werte aus dem Bereich des Nadelholzes zurückgegriffen werden und die Übertragung dieser Normanforderungen auf BSH aus Buche muss hinterfragt und angepasst werden.

5.2 Handlungsempfehlungen für die Praxis

Im Rahmen der Abschlusssitzung zum Modul 3 (30.11.2018 Biel) wurden die wesentlichen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Daraus haben sich für eine praktische Umsetzung folgende konkrete Fragen ergeben, welche durch die Industrievertreter, speziell die neue Holzbau AG beantwortet wurden. Dabei ist zu beachten, dass es noch nicht möglich war, auf alle Fragen eine definitive und abschliessende Antwort zu geben. Aber es war trotzdem möglich, entsprechende Handlungsempfehlungen für die Herstellung von Buchenbrettschichtholz abzuleiten.

1. Festigkeitsklassen

Die erforderlichen Lamellenfestigkeiten sowie die dazugehörigen Zugfestigkeiten der Keilzinken wurden durch die neue Holzbau AG infolge langjähriger Erfahrung vorgegeben. Die Versuche an Biegeträgern im Projekt-Modul 4 haben bestätigt, dass die Vorgabe-Werte angemessen gewählt sind. Die EN 14080 (für BSH NH) geht jedoch bei der Vorgabe der Lamellenfestigkeiten einen anderen Weg: Je nachdem wie gut die Keilzinkung ist, dürfen gewisse BSH-Klassen auch mit tieferen Brettqualitäten hergestellt werden. Dieser Punkt ist in der zukünftigen Normierung von BSH aus Laubholz zu beachten.

Industrievertreter:

Wir benötigen ganz klare Anforderungen an Brett und Keilzinkung. Müssen jedoch noch aufzeigen, wie wir zu den festgelegten Festigkeiten gekommen sind. Dies ist jedoch erst möglich, wenn wir alle statischen Werte aus den Trägerversuchen ermittelt haben (Modul 4).

2. Qualitätssicherung

Welche Qualitätssicherungsmassnahmen sind für die Herstellung von BSH in Laubholz der Festigkeiten GL40 und GL48 erforderlich?

Industrievertreter:

- Zugprüfungen jeder 50. Lamelle:
- Keilzinken: Zugprüfung von 2 Prüfkörpern je Festigkeitsklasse und Schicht
- Delaminierungsproben: 1 Probe pro 20 m^3 BSH.

3. Keilzinkenprüfungen

Können die Keilzinkungen anstelle auf Zug auch auf Biegung geprüft werden?

Industrievertreter:

In diesen Festigkeitsklassen ist die Zugprüfung zwingend. Die Rückschlüsse aus den Zugprüfungen auf das fertige Produkt sind aussagekräftiger und entsprechen der Beanspruchung im Bauteil. Im Gegensatz zum Nadelholz ist die Keilzinkung im Laubholz meistens der massgebende Faktor für die Festigkeit der Lamelle.

4. Anforderungen an die Holzqualität im Bereich der Keilzinken

Im Projekt wurde festgestellt, dass zusätzlich zur Festigkeitssortierung der Bretter Anforderungen an die Holzqualität im Bereich der Keilzinkenstösse zu formulieren sind. Insbesondere die lokale Schrägfasrigkeit ist jedoch schwierig zu erkennen. Welche Anforderung stellt die Neue Holzbau an die Holzqualität im Bereich der Keilzinkungen?

Industrievertreter:

Die Problematik der Schrägfasrigkeit wurde im Rahmen des Moduls 2 erkannt und untersucht. Konkrete Sortierkriterien im Bereich der Stösse sind noch keine vorhanden und müssten noch definiert werden. Es existieren vielversprechende Ansätze zur Erkennung der Faserneigung, welche aber noch nicht in die Praxis umgesetzt worden sind. Es kann jedoch festgehalten werden, dass eine hohe Leistung in den Keilzinkungen nur erreicht werden kann, wenn das Holz lokal keine Schrägfasrigkeit aufweist.

5. Auswertung 5% Fraktilwert

Die Auswertung der Versuche nach EN 14358 (Keilzinkung, Biege- bzw. Zugfestigkeit) ergibt infolge der Stichprobengrössen sowohl in der Fichte wie nun leider auch in der Buche keine den Anforderungen genügenden Werte. Die Praxis behilft sich demnach mit der Abzählmethode. Wie gehen wir hier bezüglich Normierung vor?

Industrievertreter:

Die Resultate aus den Prüfungen der Biegeträger zeigen, dass die angesetzten Werte für die Keilzinkung ausreichend sind.

6. Flächenverklebung

Wir haben in der Flächenverklebung im Projekt deutliche Fortschritte erzielt, konnte im Projekt doch aufgezeigt werden, dass neben der PRF Verklebung auch Systeme mit PUR und Primer sowie allenfalls Systeme auf der Basis von MF für eine Laubholzverklebung angewendet werden können. Wir erreichten mit den neuen Systemen allerdings die Anforderungen, die an Nadelholzverklebungen gestellt werden, nicht ganz. Können/dürfen wir hier die Anforderungen an die Laubholzverklebung anpassen? Für Eiche gelten beispielsweise andere Delaminierungswerte.

Industrievertreter:

Infolge der Zielstellung, den PRF zu ersetzten, werden gewisse Anpassungen notwendig werden (Werte der Delaminierung). Im Moment läuft diesbezüglich ein vom Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung gefördertes Projekt an der Abteilung Applied Wood Materials der Empa, an welchem die Neue Holzbau AG als Industriepartner mitwirkt.

6 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für Werkstoffe und Holztechnologie und des Projektverantwortlichen gültig. Von den Bestimmungen ist der Beitragsgeber ausgenommen.

6.1 Umfang des Berichts

Dieser Bericht besteht aus 30 Seiten inkl. Anhang.

7 Verzeichnisse

Abbildung 1: Mögliche Aufbauten für BSH der Festigkeitsklassen GL 40c, GL 40h, GL 48c, GL 48h und GL55c. 5

Abbildung 2: Prüfaufbau zur Ermittlung der Biegefestigkeit von keilgezinkten Brettern 6

Abbildung 3: Prüfaufbau zur Ermittlung der Zugfestigkeit der Keilzinkung 6

Abbildung 4: Biegefestigkeit (BF), Holzbruchanteil (HB), 5% Fraktilwert (f_k) für die keilgezinkten Bretter der Sortierklassen T33, T42 und T50 7

Abbildung 5:Biegefestikeit (BF) und Holzbruchanteil (HB) der Keilzinkenverbindung für Riftbretter (RxB) und Seitenbretter (SB)....8

Abbildung 6: Korrelation zwischen Biegefestigkeit und mittlerem Zug-E-Modul der keilgezinkten Bretter 8

Abbildung 7: Zugfestigkeit (ZF), Holzbruchanteil (HB), 5% Fraktilwert (f_k) für Keilzinkungen an Brettern der Sortierklassen T33, T42 und T50 10

Abbildung 8: Bruchbild nach dem Zugversuch an ausgewählten Proben der Sortierklassen T42 und T50 10

Abbildung 9:Zugfestigkeit und Holzbruchanteil (HB) für die Keilzinkenverbindung der Riftbretter (RxB) und Seitenbretter (SB) 11

Abbildung 10: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und mittlerem Zug-E-Modul von keilgezinkten Buchen-Brettern 12

Abbildung 11: Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Unterschieds im Zug-E-Modul der beiden keilgezinkten Bretter.... 12

Abbildung 12: Korrelation zwischen Zugfestigkeit und mittlerer Dichte der beiden keilgezinkten Bretter 13

Abbildung 13: Verklebungsunterschied zwischen Seitenbrett (SB) und Riftbrett (RxB) 14

Abbildung 14: Ergebnisse der Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit nach SN EN 301-2:2013 – Die Verklebungsparameter sämtlicher geprüfter Varianten sind in der Tabelle 2 zusammengefasst 19

Abbildung 15 : Ergebnisse der Delaminierungsversuche (Einzelwerte) – nach der industriellen Verklebung unter Berücksichtigung aller Ergebnisse 20

Abbildung 16 : Ergebnisse der Delaminierungsversuche (Einzelwerte) – nach der industriellen Verklebung ohne die MUF Variante 4535/5041 21

Abbildung 17: Primer-Auftragsmaschine, eingesetzt bei der Verklebung der 1K-PUR Proben.... 22

Abbildung 18: Geometrie der Zugscherproben nach DIN EN 302-1 22

Abbildung 19: Lagerung der Proben vor der Behandlung A4 23

Abbildung 20: Prüfaufbau der Zugscherfestigkeit.... 24

Abbildung 21: Zugscherfestigkeit nach Behandlung A1(trocken), + Ausreisser, O Holzbruchanteil 25

Abbildung 22: Zugscherfestigkeit nach Behandlung A4 (nass), + Ausreisser, O Holzbruchanteil 25