



Laubholz in Tragwerken

Der Keilzinkenstoss als Schlüsselement

Forschungsbericht

Bericht Nr.	2831-SB-01
Auftrag Nr.	2831.DHB (intern) 2012.01 (Förderer)
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	20.12.13
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Wald Herr Werner Riegger 3003 Bern
Adresse der Forschungs- stelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Abteilung F+E, Holz und Verbundbau Solithurnstrasse 102 2504 Biel
Verfasser	Bettina Franke, Anna Schusser, Andreas Müller
Projektverantwortlicher	Andreas Müller
Abteilungsleiter	Urs von Arx

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
F+E Holz und Verbundbau

Abstract

Die Anwendung von Laubholz in Tragstrukturen bietet aufgrund der natürlich höheren Festigkeiten ein hohes Potential zur Realisierung von weitspannenden Holzkonstruktionen und mehrgeschossigen Wohn- und Verwaltungsbauten. Laubholz unterstützt im Allgemeinen Holz als nachwachsenden Rohstoff in der Konkurrenz zum Massiv- und Stahlbau.

Für den erhöhten Einsatz von Laubholz müssen qualitativ abgesicherte Bauprodukte für die Architekten, Planer und Ingenieure auf dem Schweizer Markt zur Verfügung stehen. Aufgrund der natürlichen Wuchsmerkmale stehen für Laubholz zumeist nur kürzere gerade Stammformen zur Verfügung als in Nadelholz. Die Realisierung der Keilzinkenverbindung, ein geklebter Längsstoss, in Laubholz würde diese Einschränkung in den verfügbaren Längen der Brettlamellen wieder aufheben. Die Keilzinkenverbindung stellt somit ein Schlüsselement dar, was die erforderliche Vielfalt in der Produktpalette für Laubholz sichern und gleichzeitig die bisherige Lücke in den Herstellungsprofilen schliessen könnte.

Zu beachten ist hierbei, dass Laubholz gegenüber Nadelholz verschieden ist, was sich nicht nur in den Wuchsformen widerspiegelt sondern auch im mikroskopischen Aufbau und deren resultierenden Eigenschaften, wie Tränk- und Bearbeitbarkeit. Bekannte Technologien für die Verarbeitung von Nadelholz können nicht eins zu eins auf Laubholz übertragen werden.

Innerhalb des Projektes wurden in der Literatur bekannte Keilzinkengeometrien betreffend ihrer auftretenden Spannungskonzentrationen, erreichbaren Festigkeiten und Produk-

tionsschritte analysiert und dem Anforderungsprofil zur Herstellung von hochleistungsfähigen Brettschichtholz aus Laubholz gegenübergestellt. Für eine detailliertere Abschätzung wurde ein numerisches Modell zur Abbildung einer Keilzinkenverbindung unter Zugbeanspruchung erarbeitet. Die durchgeführte Parameterstudie mit dem numerischen Modell bestätigte theoretische wie praktische Annahmen zur Optimierung von Keilzinkenverbindungen.

In experimentellen Prüfserien mit Buchenholz wurden verschiedene Keilzinkenprofile unter Anwendung von drei verschiedenen Klebstofftypen sowie variierenden Herstellungsparametern untersucht. Die Herstellung der Prüfserien konnte zum einen industriell beim Projektpartner n'Holzbau AG und zum anderen unter labortechnischen Rahmenbedingungen bei der Firma Grecon Dimter in Alfeld-Hannover, Deutschland erfolgen. Die Prüfung der Serien erfolgte stets an der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau.

Die erreichten Projektergebnisse belegen, dass mit den gegenwärtig genutzten Herstellungsparametern für Laubholz noch nicht das verfügbare Tragfähigkeitspotential von Laubholz ausgeschöpft wird. Angepasste Prüfserien innerhalb des Projektes zeigen erste Lösungsansätze auf. Die industrielle und qualitätssichere Umsetzung der Keilzinkenverbindung für Brettschichtholz in Laubholz ist aber noch zu untersuchen. Gerade für die Klassifizierung in unterschiedliche Festigkeitsklassen sind Parameter und Qualitätskriterien noch zu definieren.

Keywords

Laubholz, Keilzinkung, Geometrie, Material, Festigkeit

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	5
1.1	Problembeschreibung	5
1.1	Ziele der geplanten Forschung	5
1.2	Bedeutung des Projektes für die Praxis und Forschung	6
2	Zielsetzung und überarbeiteter Forschungsplan	7
2.1	Allgemein	7
2.2	Arbeitspaket 1: Sicherstellung der Grundlagen für die Produktherstellung	7
2.3	Arbeitspaket 2: Herstellung und Überprüfung der Keilzinkenverbindungen	7
2.4	Arbeitspaket 3: Zusammenstellung von Lösungsvorschlägen und -ansätzen	7
2.5	Projektlaufzeit	7
3	Projektbeteiligte	8
4	Projektveröffentlichungen	8
5	Projektumsetzung	9
5.1	Grundlegende Anforderungen an Keilzinkenverbindungen	9
5.2	Anforderungen an das Holz	9
5.3	Klebstoff	10
5.4	Pressdruck	10
5.5	Prüfverfahren	11
5.6	Keilzinkengeometrien	12
5.7	Diskussion	12
6	Lamellenquerschnitte	15
6.1	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit im Einschnitt	15
6.1.1	Einschnitt	15
6.1.2	Prozess und Wirtschaftlichkeit	16
6.1.3	Fazit und Ausblick zum Einschnitt von Lamellenquerschnitten	19
6.2	Formstabilität im Trocknungsprozess	20
7	Bestehende Keilzinkenprofile und deren Einflussgrößen	23
7.1	Grundlagen	23
7.2	Breite Zinkengrund	23
7.3	Flankenneigung	24
7.4	Zinkenlänge und Zinkenteilung	24
7.5	Diskussion zu den verschiedenen Keilzinkenprofilen	25
8	Entwicklung eines numerischen Modells zur Parametervariation der Keilzinkengeometrie	29

9	Alternative Keilzinkenverbindungen	31
9.1	Verwendetes Material und Profilquerschnitte	31
9.2	Prüfmethode	32
9.3	Prüfergebnisse	33
10	Prüfprogramm zu Standard-Keilzinkenprofilen	35
10.1	Grundlagen	35
10.2	Verwendetes Material	36
10.3	Industriell und labortechnisch gefertigte Keilzinkenverbindungen	36
10.4	Prüfmethoden	39
10.5	Zugprüfergebnisse	41
10.5.1	Allgemeines Bruchverhalten	41
10.5.2	Bruchfestigkeiten	42
10.6	Biegeprüfergebnisse	44
10.6.1	Allgemeines Bruchverhalten	44
10.6.2	Bruchfestigkeiten	44
11	Mikroskopische Untersuchungen	46
12	Diskussion der Projektergebnisse	48
12.1	Vergleich der Zug- und Biegefestigkeit	48
12.2	Vergleich der Festigkeiten mit den normativen Anforderungen	50
13	Zusammenfassung und Ausblick	51
13.1	Zusammenfassung	51
13.2	Zukünftige Untersuchungen	52
14	Abbildungsverzeichnis	53
15	Tabellenverzeichnis	55
16	Literaturverzeichnis	56
	 Anhang A1	 59

1 Ausgangslage

1.1 Problembeschreibung

Für die Realisierung von Holztragwerken als Wohn- und Verwaltungsgebäude oder Hallen- und Brückenkonstruktionen wird gegenwärtig vorwiegend Nadelholz in der Tragstruktur eingesetzt. Die Anwendung von Laubhölzern beschränkt sich auf einen geringen Prozentsatz und wird nur in Pilotprojekten verwendet, [5]. Die Bestrebungen von Planern und Ausführenden Holz in immer imposanteren und weitspannenderen Objekten einzusetzen, erfordert sehr leistungsfähige und zuverlässige Bauprodukte. Die Grenzen in den mechanischen Eigenschaften von Nadelholz werden heutzutage immer öfter erreicht. Die Anwendung von Laubholz bietet hier, durch die natürlich höheren mechanischen Eigenschaften, einen effektiven Vorteil den Holzbau positiv zu unterstützen.

Der Laubholzbestand in den nationalen Wäldern wächst langfristig gesehen stärker als die derzeitige Nutzung in Tragkonstruktionen. Der Holzvorrat in den heimischen Wäldern gliedert sich nach der Gattung in 69 % Nadelhölzer und 31 % Laubhölzer, hierbei beträgt der Anteil von Buche 18 %, vgl. Abbildung 1, [8]. Der Buchenholzbestand der Schweiz konzentriert sich besonders in der Region Jura und Mittelland. Bestände in denen eine Nadelbaumart vorherrscht, haben gesamtschweizerisch leicht abgenommen, wohingegen die Bestände von den Baumarten Buche, Ahorn und Esche zugenommen haben, [10]. Die wirtschaftliche Marktanalyse der Schweizer Holzindustrie und Waldwirtschaft belegen zu dem, dass Säge-Rundholz von Laubholz im Einkauf ab Wald um ca. 30 % günstiger ist als Nadelholz [19], dass zur Zeit in den Laubholzsägereien ungenutzte Einschnittkapazitäten vorliegen und die lokale Weiterverarbeitung fehlen.

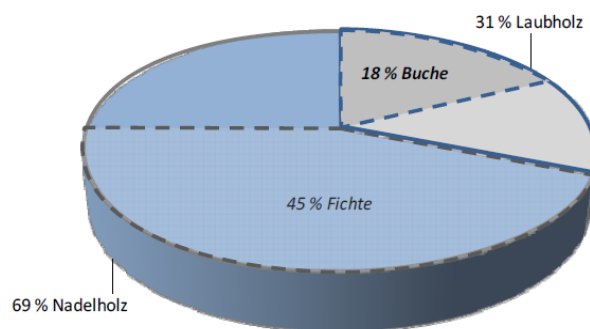


Abbildung 1 : Prozentualer Anteil von Laub- und Nadelholz mit vorherrschenden Baumarten, [8]

Fehlende normative Grundlagen und Richtlinien für Bauprodukte in Laubholz sind ein wichtiger und schrittweise angegangener Forschungsschwerpunkt, vgl. [11]. Aber auch die industrielle Herstellung der Konstruktionsprodukte in Laubholz sowie deren Qualitätssicherung sind zwingend zu lösen. Hierin besteht der Ansatzpunkt des Projektes. Unter Einbeziehung der Besonderheiten von Laubholz ist es das Ziel, die Prozessschritte zur Herstellung von Keilzinkenverbindungen in Laubholz zu analysieren. Keilzinkenverbindungen sind ein Schlüsselement zur Herstellung von zuverlässigen Bauprodukten. Bedingt durch die angesprochenen Wuchsformen von Laubholz stehen im Vergleich zu Nadelholz eher kürzere gerade Stammlängen zur Verfügung. Die Realisierung der Keilzinkenverbindung unter den praxisnahen Anforderungen der Industrie würde dieses Defizit ausgleichen. Laubholz würde durch die Keilzinkenverbindung wieder als bekannte nahezu endlose Brettlamelle verfügbar sein.

1.1 Ziele der geplanten Forschung

Die direkte Anwendung von Laubholz ist bedingt durch die Wuchsformen und die physikalischen Eigenschaften von Laubholz eingeschränkt. Die vermehrten Eigenspannungen oder grösseren Verwerfungen im Brett führen in der Regel nur zu Schnittholzprodukten mit relativ kleinen Querschnitten und/oder Längen. Hier gilt es intelligente Methoden anzuwenden und Verfahren zu entwickeln, die es ermöglichen jeden Zentimeter von Laubholz effektiv zu nutzen.

Die Analyse der in Abbildung 2 aufgezeigten Prozesskette von Laubholz zeigt, dass die Keilzinkenverbindung von Laubholz sowie die flächige Verklebung ein wichtiger Schritt innerhalb des gesamten Zyklus zur Bereitstellung von Bauprodukten und für das Errichten von Tragwerken in Laubholz ist.

Nach dem Einschnitt, der Trocknung und der Sortierung stehen verschiedene Schnittholzprodukte für die Herstellung der Konstruktionsprodukte in Laubholz zur Verfügung. Erst durch die technische sowie qualitätssichere Umsetzung der Keilzinkenverbindung können diese Ressourcen effektiv zur Herstellung des in Nadelholz bekannten Brettschichtholzes oder Brettsperrholzes genutzt werden. Die Realisierung einer industriellen Keilzinkenverbindung in Laubholz würde die bisherigen Grenzen öffnen.

Eine sichere und effektive industrielle Herstellung von Keilzinkenverbindungen in Laubholz ist jedoch bisher noch nicht umgesetzt. Die aktuellen Forschungsfragen konzentrieren sich hier in

- der erforderlichen Geometrie der Zinken,
- dem eigentlichen Fräsvorgang für die Zinken der Verbindung,
- in der Klebstoffauswahl sowie dessen Auftrag und
- die erforderlichen Pressdrücke und Aushärtezeiten.

Der aktuelle Forschungsstand zu Laubhölzern zeigt bereits erste Lösungsansätze auf, die bisher aber eher nur unter sogenannten Laborbedingungen umgesetzt wurden. Im Forschungsvorhaben ist es das Ziel, aufbauend auf bisher publizierten Ergebnissen, die Keilzinkenverbindung in Laubholz zu prüfen und bezugnehmend auf das natürliche Festigkeitspotentials anzupassen.

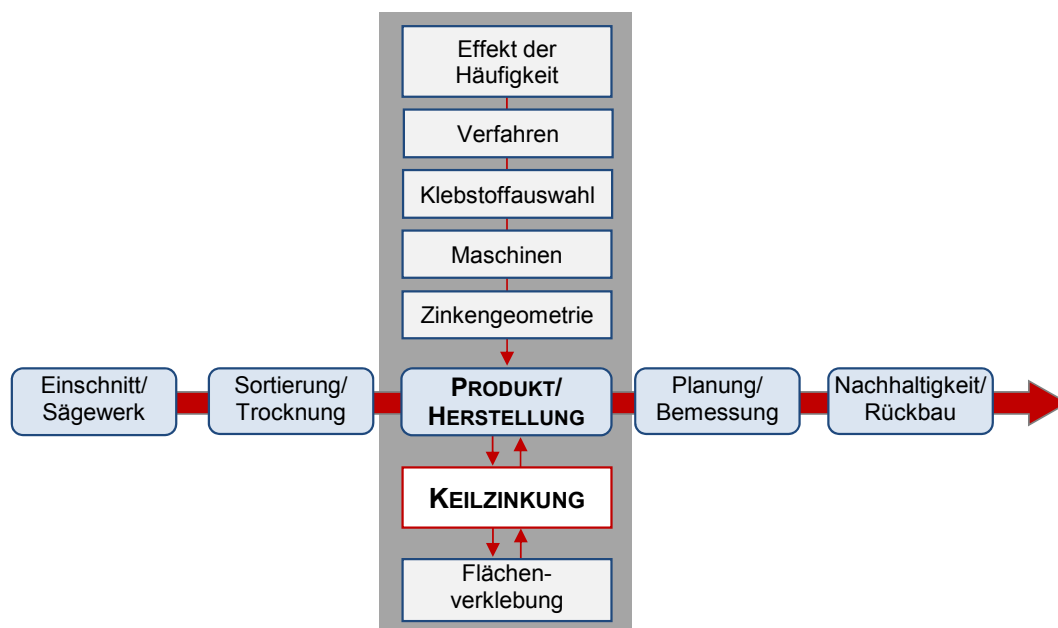


Abbildung 2 : Eingliederung des Forschungsziels in die Prozesskette von Laubholz

1.2 Bedeutung des Projektes für die Praxis und Forschung

Der Einsatz von Buche findet immer wieder Anwendung in beeindruckenden Pilotanwendungen, [5]. Die Bauobjekte offenbaren aber auch ähnliche Problemkreise während der Umsetzung, die immer wieder zu Einzellösungen in der Fertigung, Herstellung sowie in Anschlusspunkten führten. Gleiches zeigen der aktuelle Absatzmarkt von Laubholz sowie die Analyse der Baubranche, dass bisher für Laubholz keine vergleichbare Entwicklung wie in Nadelholz vorliegt. Einer gesteigerten Anwendung von Laubholz stehen in der gesamten Prozesskette immer noch Hindernisse im Weg, die zu erhöhten Endkosten in den Produkten und zur Skepsis bei den Architekten, Planern und Ingenieuren führt. Die angesprochenen Lösungsansätze existieren gegenwärtig oft nur unter sogenannten Laborbedingungen oder als Einzellösungen.

Durch das gesetzte Forschungsziel, die Realisierung der Keilzinkenverbindung kann erreicht werden, dass z. B. zukünftig Brettschichtholz in Laubholz keine Einzellösung mehr ist. Durch die Prüfung der vorhandenen Methoden und deren industriellen Verwirklichung könnten Brettlamellen von Laubholz, ebenso wie für Nadelholz bekannt auf dem Markt zur Verfügung stehen. Die Optimierung der Prozessabläufe und deren Schnittstellen offerieren neue Standards verglichen zu den bisherigen Musterlösungen in Laubholz. Die Eingrenzung der verfügbaren Klebstoffe durch experimentelle Festigkeits- und Qualitätsprüfungen würde die vorhandenen Unsicherheiten bei den Herstellern für Konstruktionsprodukte vermindern. Gleichzeitig würden sich langfristig gesehen die weiterführenden Aspekte der regionalen Absatzsteigerung von Laubholz parallel mit der Auslastung und Wirtschaftlichkeit der Beteiligten erhöhen.

2 Zielsetzung und überarbeiteter Forschungsplan

2.1 Allgemein

Die mit der Genehmigung des Beitragsgesuchs erfolgten Auflagen führten zur Anpassung des Forschungsplanes gegenüber den geplanten Inhalten im Beitragsgesuch. Der überarbeitete Forschungsplan und die Projektgliederungen sind im Folgenden beschrieben.

2.2 Arbeitspaket 1: Sicherstellung der Grundlagen für die Produktherstellung

In einem ersten Schritt werden die verfügbaren Schnittholzquerschnitte in Laubholz für zukünftige Brettlamellen klassifiziert. Dabei werden Querschnittsgeometrien und Längen erfasst. Im Hinblick auf die weiteren Arbeitsschritte, wie Trocknung und Keilzinkenstoss, wird eine Charakterisierung der Dicke der Brettlamellen durchgeführt. Dabei sind auch Betrachtungen zur Formstabilität und zum Feuchtegehalt der Brettlamellen wichtig.

2.3 Arbeitspaket 2: Herstellung und Überprüfung der Keilzinkenverbindungen

In der Herstellung von Keilzinkenverbindungen gibt es verschiedene Verfahrensschritte, die die Qualität des Längsstosses beeinflussen. Dabei wird das Fräsen, der Klebstoffauftrag, dessen Auftragsmenge, der Pressdruck und die Pressdauer sowie die Aushärtung näher betrachtet. Es werden die bekannten und erprobten Prozessschritte in der Keilzinkenverbindung von Nadelholz für die Anwendung in Laubholz geprüft und optimiert. Neben dem Herstellungsprozess hat auch die Keilzinkengeometrie einen Einfluss. Es werden experimentelle Prüfungen von Keilzinkenstössen durchgeführt.

2.4 Arbeitspaket 3: Zusammenstellung von Lösungsvorschlägen und -ansätzen

Zusammenfassend werden die Möglichkeiten zur Optimierung der Prozesskette dargelegt. Es soll eine geeignete Keilzinkenverbindung und Klebstofftechnologie für Brettlamellen in Laubholz ausgewählt werden. Die gewonnenen Ergebnisse werden für das Fachpublikum aufbereitet und können auch für zukünftige Projekte genutzt werden.

2.5 Projektlaufzeit

Das Projekt wird vom Juli 2012 bis Dezember 2013 durchgeführt; die Laufzeit beträgt 18 Monate. Die zeitliche Abfolge der beschriebenen Arbeitspakete gliedert sich wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Laufzeit des Projektes

2012							2013											
AP	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1																		
2																		
3																		

3 Projektbeteiligte

Projektverantwortlicher

- Andreas Müller, Prof. Dipl.-Ing., Professor für Holzbau, Leiter der Einheit Holz- und Verbundbau, Forschung und Entwicklung, BFH-AHB

Projektleiter

- Bettina Franke, Dr.-Ing., Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Forschung und Entwicklung, Einheit Holz- und Verbundbau, BFH-AHB

Projektmitarbeiter

- Anna Schusser, Assistentin, Forschung und Entwicklung, Einheit Holz- und Verbundbau, BFH-AHB
- Flavien Sauser, Assistent, Forschung und Entwicklung, Einheit Holz- und Verbundbau, BFH-AHB
- Thomas Volkmer, Dr. rer. nat., Professor für Holzwerkstoffe, Forschung und Entwicklung, Einheit Werkstoffe und Holztechnologie, BFH-AHB

Fördergeber

- Wald- und Holzforschungsfonds, Bundesamt für Umwelt BAFU, CH- 3003 Bern

Wirtschaftspartner

- neue Holzbau AG, CH-6078 Lungern
- Purbond AG, CH-6203 Sempach
- A+C Corbat SA, CH-2943 Vendlincourt
- DeMeth GmbH, CH-8840 Einsiedeln
- LEUCO Production SAS, F-67930, Beinheim
- Grecon Dimter Holzoptimierung Nord GmbH & Co. KG, DE-31061 Alfeld-Hannover

4 Projektveröffentlichungen

Innerhalb des Projektes konnten drei Arbeiten erfolgreich abgeschlossen werden und es sind die folgenden Veröffentlichungen vorgesehen.

- **„Betrachtung der Prozessschritte zur Herstellung von Buchenlamellen für Brettschichtholz“**
Die Semesterarbeit H/0801/809/13/0 wurde von S. Pittaro und J. Baumann an der BFH-AHB erstellt und durch P. Corbat begleitet und von A. Müller und B. Franke betreut.
- **„Theoretische und praktische Analyse zur Produktion von Brettschichtholz in Buche“**
Die Bachelorarbeit H/M22/756/13/5 wurde an der BFH-AHB durch F. Sauser bearbeitet und durch B. Franke und T. Volkmer betreut. Im Rahmen der Arbeit wurden die verfügbaren Ressourcen analysiert und deren Wirtschaftlichkeit beurteilt. Des Weiteren wurden die Flächenverklebung und der Keilzinkenstoss als Schlüsselemente der Brettschichtholzproduktion untersucht.
- **„Untersuchung der Keilzinkenverbindung für Brettlamellen in Laubholz“**
Die im Rahmen des Masters of Science in Engineering an der BFH-AHB entstandene Masterarbeit von A. Schusser unter Leitung von A. Müller und B. Franke umfasst die theoretischen Grundlagen wie numerische und experimentelle Untersuchungen zu Keilzinkenverbindungen in Laubholz.
- **„Analysis of finger joints from beech wood“**
Konferenzbeitrag auf der World Conference of Timber Engineering, August 2014, Beitrag eingereicht und nach internationalen Review Process angenommen
- **„Analysis of the penetration of adhesives at finger joints in beech wood“**
Konferenzbeitrag auf der World Conference of Timber Engineering, August 2014, Beitrag eingereicht und nach internationalen Review Process angenommen
- **„Keilzinkenverbindungen in Buche – Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten“**
Veröffentlichung als Artikel, vorgesehen Frühjahr 2014

5 Projektumsetzung

5.1 Grundlegende Anforderungen an Keilzinkenverbindungen

Die Herstellung von Keilzinkenverbindungen kann in das Ausgangsmaterial, das Holz und den eingesetzten Klebstoff, den Fräsvorgang, das Pressen und Aushärten gegliedert werden. Zur Einschätzung der Tragfähigkeit und zur späteren Qualitätskontrolle im industriellen Prozess schliesst sich noch die Prüfung der Keilzinkung an. Im Folgenden sind aufbauend auf den normativen Anforderungen die einzelnen Schritte näher erörtert.

Die normativen Anforderungen zur Herstellung von Keilzinkenverbindungen in Holzbauteilen werden in der EN 14080:2005, EN 386:2001 und EN 385:2007 aufgeführt. Zurzeit liegt auch ein Norm-Entwurf für die FprEN 15497:2012 vor. Die EN 385:2007 bezieht sich auf Keilzinkenverbindungen in Nadelholz, doch die Anforderungen sind auch für Laubholz gültig, wenn die Verklebung zufriedenstellend ist. Im Zuge der Normüberarbeitung zu den Anforderungen von Brett-schichtholz sollen auch die Herstellungsbedingungen für Keilzinkenverbindungen überarbeitet werden. Die EN 385:2007 soll zukünftig durch die FprEN 15497:2012 ersetzt werden. Die Norm gilt für Keilzinkenverbindungen für Nadelholz und Pappelholz.

5.2 Anforderungen an das Holz

In der Schweiz werden die Mindestanforderungen an die Lamellen nach EN 385:2007, der Schweizerischen Fachgemeinschaft Holzleimbau (SFH) [36], der FprEN 14080:2012 und FprEN 15497:2012 wie folgt gestellt:

- Äste, Risse und starke Faserabweichungen sollten nicht innerhalb der Keilzinkenverbindung vorkommen. Äste mit Durchmesser ≤ 6 mm bleiben unberücksichtigt. Nach FprEN 15497:2012 sind Risse erlaubt, wenn sie nicht mehr als 50 % der Holzdicke betragen.
- Eine astfreie Länge im Abstand vom 3-fachen Astdurchmesser von der Keilzinkenverbindung (gemessen ab Keilzinkenspitze, siehe Abbildung 3) ist gefordert.
- Innerhalb der Zinkenlänge und bis zu einem Abstand von 75 mm vom Zinkengrund dürfen keine Baumkanten oder Kantenbeschädigungen, die mehr als zwei Kanten betreffen, vorhanden sein. Die Baumkantenfläche darf höchstens 1 % des Holzquerschnittes betragen.
- Die Holzfeuchte ist je nach Klebstoffhersteller einzuhalten, beträgt aber normalerweise zwischen 8 – 18 %. Der Unterschied zwischen zwei Brett-lamellen soll < 5 % sein. Nach FprEN 14080:2012 soll die Holzfeuchte zwischen 6 % und 15 % betragen, wobei der Unterschied zwischen zwei Brett-lamellen < 5 % sein soll. Die SFH-Richtlinie empfiehlt eine einheitliche Holzfeuchte von 10 ± 2 %.
- Beim Pressen soll die Holztemperatur ≥ 15 °C sein.

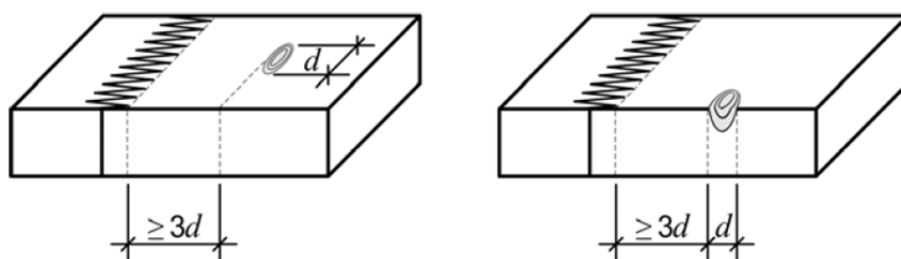


Abbildung 3: Astfreie Längen im Bereich der Keilzinkung, d ist der Astdurchmesser, [FprEN 14080:2012, S.83]

5.3 Klebstoff

Die Verklebung muss ihre Festigkeit und Dauerhaftigkeit während der gesamten Lebensdauer der Bauteile garantieren. Die Klebstoffe müssen die Anforderungen nach EN 301:2001 bzw. EN 15425:2008 erfüllen.

Nach EN 385:2007, FprEN 14080:2012, FprEN 15497:2012 muss der Klebstoff an beiden Brett-lamellen über eine Länge von mind. $\frac{3}{4}$ der Zinkenlänge aufgebracht werden und alle Zinkenflan-ken müssen mit Klebstoff bedeckt sein. Bei einer ständigen Produktionskontrolle des Klebstoff-auftrages kann auch nur auf einer Seite Klebstoff aufgetragen werden. Die Verklebung soll nach EN 385:2007 und SFH-Richtlinie innerhalb von 24 h nach der Keilzinkenfräsung stattfinden, nach FprEN 15497:2012 bzw. FprEN 14080:2012 innerhalb von 6 h. Beim Pressen sollte an allen vier Seiten im Zinkenbereich Klebstoff austreten.

Nach FprEN 15497:2012 können folgende Klebstoffe verwendet werden:

- Phenol- und Aminoplaste (MF, MUF, PRF, UF,...)
- Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoffe (PUR)
- Emulsion Polymer Isocyanat (EPI)

Gemäss der SFH-Richtlinie muss der Klebstoff die Anforderungen der SIA 265:2012 erfüllen.

5.4 Pressdruck

Die EN 385:2007 stellt folgende Anforderung an den Pressdruck:

- Den Längspressdruck mind. 2 sec auf Verbindung aufbringen (bei über 25 mm Zinklänge Pressdruck zwischen 2 N/mm² und 5 N/mm²; bei kürzeren Zinkenlängen 5-10 N/mm²). Dies wird auch in der SFH-Richtlinie aufgeführt.
- „Der Längspressdruck ist so zu bemessen, dass das Risiko einer Rissbildung oder eines Druck-bruches im Zinkenbereich so klein wie möglich ist. Wenn sich dennoch infolge des Pressdrucks Risse im Zinkengrund bilden, dürfen sie nirgends breiter als 0.5 mm sein und nicht von einer Oberfläche zur anderen reichen. Die Gesamtlänge der Risse darf auf einer Breite von jeweils 30 mm auf einer Oberfläche 10 mm nicht überschreiten.“ [EN 385:2007, Ziffer 6.4.2, S.10]

Nach FprEN 15497:2012 ist der Längspressdruck abhängig von der Keilzinkengeometrie, Holzart, Holzfeuchte, Temperatur des Holzes und Holzquerschnitt, siehe Abbildung 4. Bei Holzdicken ≤ 45 mm muss der Pressdruck mind. 1 sec. auf die Verbindung aufgebracht werden bzw. 2 sec. für andere. Nach FprEN 14080:2012 muss der Pressdruck auch an die Keilzinkenlänge gemäss Abbildung 4 angepasst und mind. 1 sec aufgebracht werden.

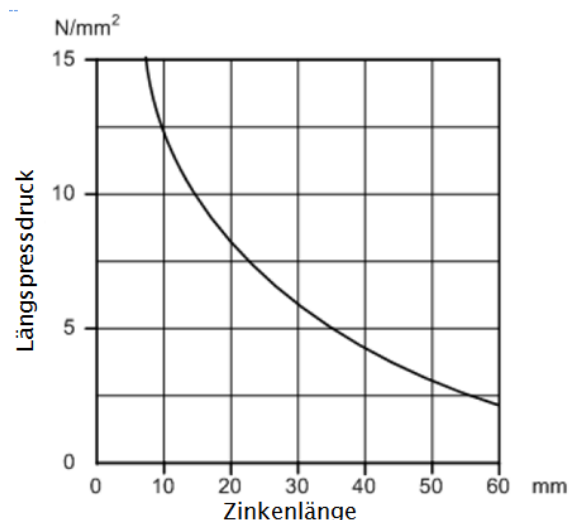


Abbildung 4: Längspressdruck bei einer Temperatur des Holzes von 20°C [FprEN 15497:2012, Fig. G.5, S. 48]

5.5 Prüfverfahren

Nach EN 385:2007 ist die charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung nach der Lognormalverteilungsfunktion zu bestimmen und muss grösser sein als die deklarierte charakteristische Festigkeit laut Herstellerangaben, vgl. Gleichung (1). Bei Flachkant-Biegeprüfung muss ein Faktor k_f (Verhältnis zwischen Biegefestigkeit bei Flach- und Hochkantbiegung) berücksichtigt werden, vgl. Gleichung (2), Tabelle 2. Bei Hochkantprüfung ist der Faktor $k_f = 1.0$.

$$\begin{aligned} &\textbf{Hochkantprüfung} \\ &\text{charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkung} \geq f_{m,d,k} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\textbf{Flachkantprüfung} \\ &\text{charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkung} \geq k_f \cdot f_{m,d,k} \end{aligned} \quad (2)$$

mit:

$$f_{m,d,k} \quad \text{deklarierte charakteristische Biegefestigkeit}$$

Tabelle 2: Keilzinkengeometrien und Faktor k_f [EN 385:2007, Tabelle 1]

Zinkenlänge in mm	Zinkenteilung in mm	Breite Zinkengrund in mm	Faktor k_f [-]	Bemerkung
10	3.7	0.6	1.1	Zinken sichtbar auf der Flachseite
15	3.8	0.42	1.25	Zinken sichtbar auf der Flachseite
20	6.2	1.0	1.25	Zinken sichtbar auf der Flachseite
20	6.2	1.0	1.0	Zinken sichtbar an der schmalen Aussenseite
32	6.2	1.0	1.0	Zinken sichtbar an der schmalen Aussenseite

Nach FprEN 15497:2012 soll die Keilzinkenfestigkeit grösser sein als die charakteristische Biegefestigkeit des Holzes. Die Keilzinken sind mittels einer Flachkant-Biegeprüfung zu testen. Bei Hochkant-Biegeprüfung ist eine Umrechnung mit dem Faktor k_f nach Gl. (3) notwendig:

$$f_{m,\text{Hochkant}} = \frac{f_{m,\text{Flachkant}}}{k_f} \quad (3)$$

mit:

$$k_f = 1,25 \quad (\text{Zinken sichtbar auf der Flachseite rechtwinklig zur Belastung})$$

$$k_f = 1,0 \quad (\text{Zinken sichtbar auf der Flachseite parallel zur Belastung})$$

Nach SN EN 14080:2005 ist die Keilzinkenverbindung mittels Flachkant-Biegung oder Zugbeanspruchung nach SN EN 408:2011 zu überprüfen. Im Norm-Entwurf (FprEN 14080:2012) wird eine Flachkant-Biegeprüfung nach EN 408:2011 verlangt.

Nach SN EN 386:2001 muss die Biegefestigkeit von Lamellenstössen mittels Flachkant-Biegeprüfung kontrolliert und nach EN 385:2007 durchgeführt werden. Die Lamellenstösse müssen nach EN 1194:1999 eine der beiden folgenden Anforderungen, (4), (5), erfüllen:

$$\text{charakteristische Zugfestigkeit der Keilzinkung} \geq 5 + f_{t,0,k,\text{Lamelle}} \quad (4)$$

$$\text{charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkung} \geq 8 + 1,4 \cdot f_{t,0,k,\text{Lamelle}} \quad (5)$$

mit:

$$f_{t,0,k,\text{Lamelle}} \quad \text{charakteristische Zugfestigkeit der Lamelle}$$

5.6 Keilzinkengeometrien

Tabelle 3 gibt einen Überblick zu den Keilzinkengeometrien der Normen EN 385:2007, FprEN 15497:2012 und FprEN 14080:2012. In der Norm FprEN 15497:2012 wird anstatt der Breite des Zinkengrundes die Breite der Zinkenspitze des Fräasers b_{cut} aufgeführt, siehe Abbildung 5.

Tabelle 3: Keilzinkengeometrie

Zinkenlänge in mm	Zinkenteilung in mm	Breite Zinkengrund in mm	Reduktionsfaktor ν [-]	Norm
10	3.7	0.6	0.16	EN 385:2007
15	3.8	0.42	0.11	EN 385:2007, FprEN 15497:2012, FprEN 14080:2012
15	3.8	0.6	0.16	FprEN 15497:2012
20	6.2	1.0	0.16	EN 385:2007, FprEN 15497:2012 FprEN 14080:2012
20	5.0	0.5	0.10	FprEN 15497:2012, FprEN 14080:2012
30	6.2	0.6	0.10	FprEN 14080:2012
32	6.2	1.0	0.16	EN 385:2007

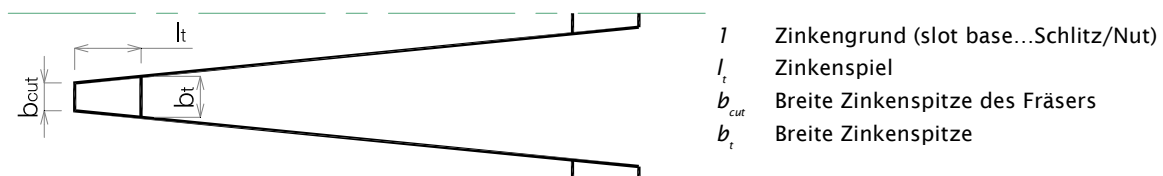


Abbildung 5: Keilzinkenprofil [geändert nach FprEN 15497:2012, Bild 2]

In der FprEN 15497:2012 und FprEN 14080:2012 werden folgende Angaben zur Keilzinkengeometrie angeführt:

- Die Geometrie des Profils muss so ausgeführt werden, dass eine Klemmwirkung (self-interlocking) nach dem Pressen entsteht (nach FprEN 15497:2012).
- max. relatives Zinkenspiel: $e = l_t/l$ mit $0.01 \leq e \leq 0.08$ nach dem Pressen
- Verhältnis zwischen b_t/b_{cut} : $1.1 \leq b_t/b_{cut} \leq 1.2$ (nach FprEN 15497:2012)
- Zinkenlänge $l \geq 4p(1-2\nu)$ und $l \geq 10$ mm
- Reduktionsfaktor $\nu = b_t/p \leq 0.2$ nach FprEN 15497:2012 bzw. ≤ 0.18 nach FprEN 14080:2012
- Flankenwinkel $\alpha \leq 7,1^\circ$

5.7 Diskussion

Die vorgestellten normativen Regelungen zur Herstellung von Keilzinkenverbindungen sind in Abbildung 6 in einer Übersicht zusammengefasst. In der Schweiz spielt die SN EN 14080:2005 zukünftig eine zentrale Rolle. Auch steht die Biegeprüfung der Keilzinkenverbindung als Qualitätssicherungsmassnahme im Herstellungsprozess im Vordergrund. Bei auf Biegung beanspruchten Brettschichtholzträgern treten in der äussersten Lamelle jedoch hauptsächlich Zugspannungen parallel zur Faserrichtung auf. RIBERHOLT [32], COLLING [12], SERRANO [38], sowie AICHER und RADOVIC [1], führen auf, dass die Zugfestigkeit bei Brettschichtholzträgern die festigkeitsrelevantere Beanspruchung für die keilgezinkten Lamellen repräsentiert und einen entscheidenden Einfluss auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholz hat, [15]. Gleiches wurde in den Diskussionen während der Projektsitzungen bestätigt, wobei die praxisrelevante Umsetzung der Zugprüfungen zu einem erheblichen Mehraufwand in der Qualitätsprüfung führt. Nicht jeder Hersteller könnte die Qualitätsprüfung bezogen auf die Zugfestigkeit durchführen. Durch die Entwicklungen in der Lamellenprüfung wird in der FprEN 14080:2012 die Biegeprüfung eingeführt, [39].

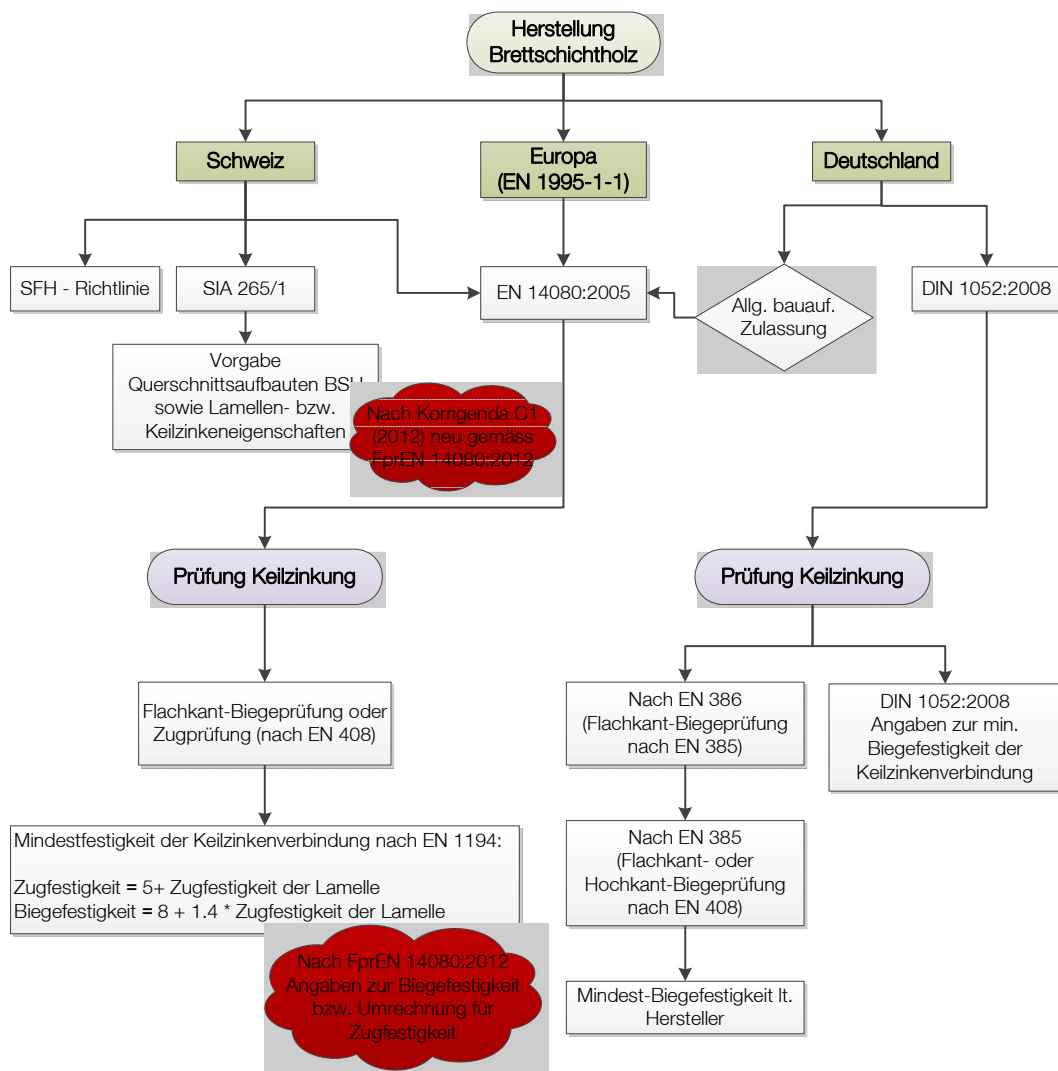


Abbildung 6: Übersicht der relevanten Normen und Richtlinien zur Brettschichtholzherstellung und Keilzinkung

In Abbildung 8 sind die Anforderungen laut Norm (orange schattierter Bereich) und eine theoretische Erweiterung (violett schattierter Bereich) der Festigkeit der Lamellen und Keilzinkenverbindung in Abhängigkeit der Brettschichtholzklassen dargestellt. Die Anforderungen an die Lamellen sind als rechteckige Markierungspunkte dargestellt, die für die Keilzinkenverbindung als Dreiecke. Die Anforderung an die Zugfestigkeit ist rot gekennzeichnet, die an die Biegefestigkeit blau. Die Linien mit Markierungspunkten sind die Anforderungen nach der Norm SIA 265/1:2009 bzw. SN EN 1194:1999, die sich aus den Formeln der Norm ableiten, siehe Abbildung 7. Die Linien ohne Markierungspunkte stellen die Anforderungen nach SIA 265/1-C1:2012 bzw. FprEN 14080:2012 dar. Hier werden nur mehr Angaben bis zur Brettschichtholzklasse GL 32 gemacht und nur die Mindest-Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung aufgeführt. Die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$f_{t,j,k} = \frac{f_{m,j,k}}{1,4} \quad (6)$$

mit:

- $f_{t,j,k}$ charakteristische Zugfestigkeit der Keilzinkung in N/mm²
- $f_{m,j,k}$ charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkung in N/mm²

Die Anforderungen weichen gegenüber der Norm SIA 265/1:2009 bzw. SN EN 1194:1999 (Linien mit Markierungspunkten) ab. So werden höhere Anforderungen an die Zug- und Biegefestigkeit der Keilzinkung gestellt. Für den Brettschichtholzquerschnitt der Klasse GL 32h müssen Lamellen der Klasse T24 und nicht mehr T22 verwendet werden.

Werden die Formeln aus Abbildung 7 verwendet, um die Anforderungen für höhere Brettschichtholzklassen festzulegen, ergibt sich eine theoretische Erweiterung der Anforderung (violett schattierter Bereich). Es ist ersichtlich, dass die Formeln nur mit den bereits vorhandenen Brettschichtholzklassen übereinstimmen. Die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung liegt bei höheren Brettschichtholzklassen unter den Anforderungen für die Lamellen. Deshalb wurde eine Korrektur vorgenommen (violette Linie), um die Anforderungen anzupassen.

Nach FprEN 14080:2012 wird folgender Zusammenhang zwischen den Festigkeiten angegeben:

$$f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5 + f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 \left(\frac{f_{m,j,k}}{1,4} - f_{t,0,l,k} + 6 \right)^{0,65} \quad (7)$$

mit:

$$1,4f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1,4f_{t,0,l,k} + 12$$

$f_{m,g,k}$ charakteristische Biegefestigkeit von Brettschichtholz in N/mm²

$f_{t,0,l,k}$ charakteristische Zugfestigkeit der Lamellen in N/mm²

$f_{m,j,k}$ charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkung in N/mm²

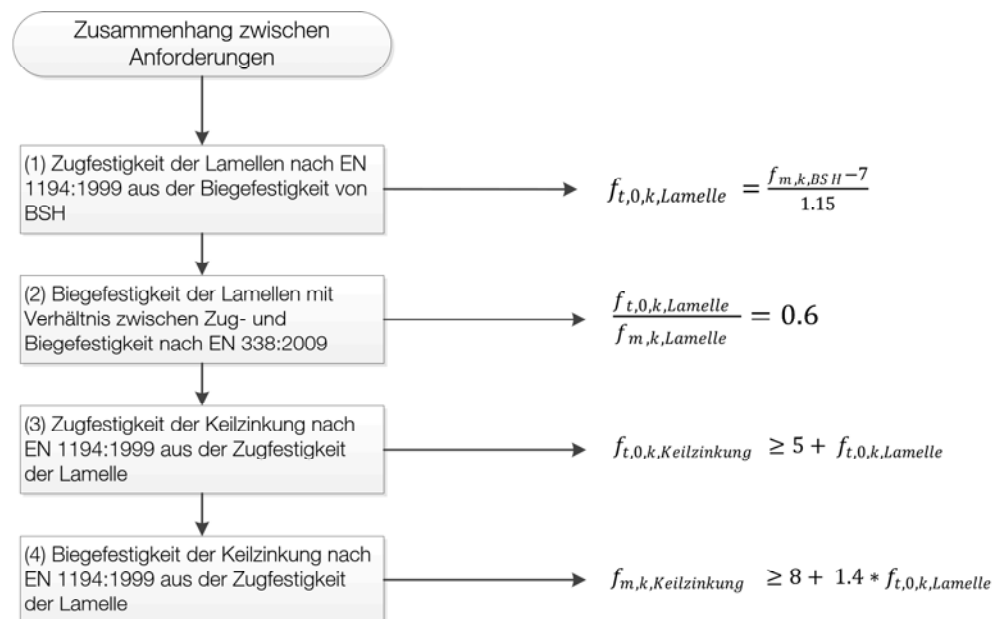


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Anforderungen lt. Norm EN 1194:1999 und EN 338:2009

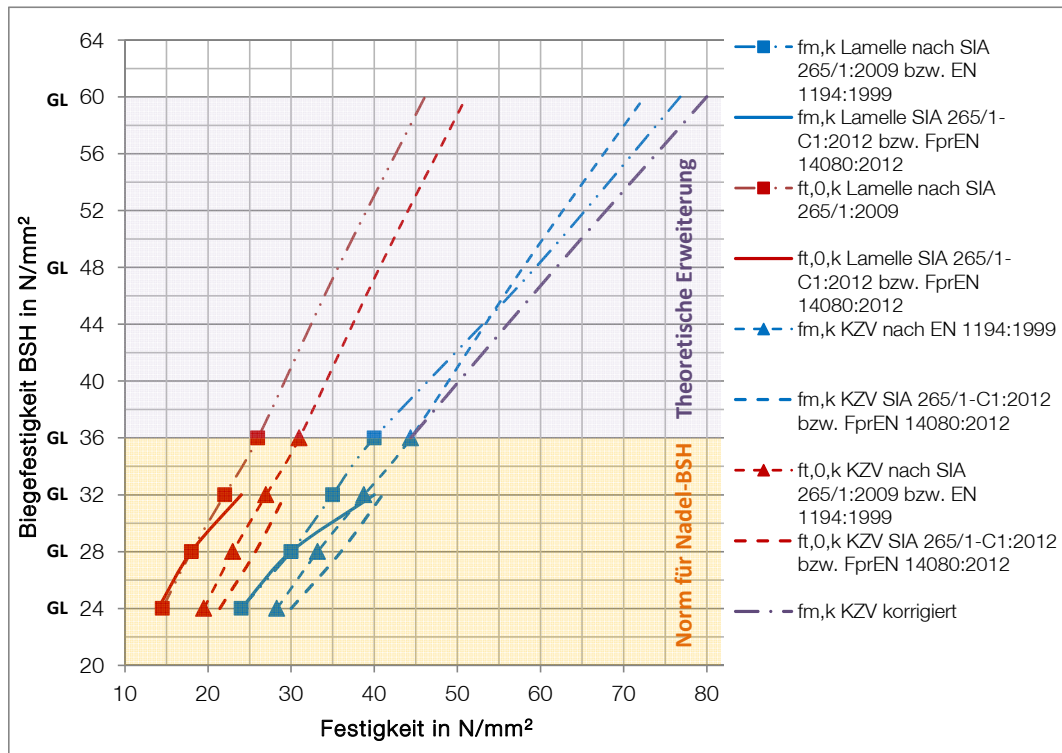


Abbildung 8: Anforderungen an die Festigkeit der Lamellen und Keilzinkenverbindung (KZV) für die verschiedenen Brettschichtholzklassen, charakt. Biegefestigkeit $f_{m,k}$ und charakt. Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$

6 Lamellenquerschnitte

6.1 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit im Einschnitt

6.1.1 Einschnitt

Buchenholz wird bedingt durch die optimalen Lagerungsbedingungen für Buchenstammholz in der Kaltperiode zwischen November und Mai eingeschnitten. Der Einschnitt von Laubholz ist individueller und benötigt eine höhere Flexibilität als für Nadelholz. Jeder Stamm wird vom Säger evaluiert und einzeln eingeschnitten. Um diese Flexibilität zu erlangen, wird Laubholz vorwiegend mit einer Bandsäge eingeschnitten.

In den Laubholzsägewerken werden hauptsächlich Klotzbretter (ca. 40 %) und Schwellen (ca. 25 %) eingeschnitten, [25]. Der Einschnitt von gewissen Hauptprodukten hat zur Folge, dass eine grosse Menge an Nebenprodukten entsteht. Im Einschnitt von Eisenbahnschwellen fallen Seitenbretter an, vgl. Abbildung 9. Sie sind 27 - 30 mm dick und 2.5 - 3 m lang. Die Breite hängt vom Stammdurchmesser ab. Die minimale Brettbreite, die aussortiert wird, beträgt 100 mm. Diese Bretter werden in zwei Qualitäten sortiert. Für Schreinerarbeiten wird das praktisch fehlerlose Holz eingesetzt, die sogenannte Schwellenseitenware. Für die Paletten-Industrie können auch Bretter mit Wuchsmerkmale eingesetzt werden. Die sogenannte Palettenware wird häufig wegen Überkapazität als mindere visuelle Qualität verkauft. Für die Herstellung von Brettschichtholz aus Buche stehen also Bretter mit guten Festigkeitseigenschaften zu einem tiefen Preis zur Verfügung. Die geringere Lamellendicke gegenüber Nadelholz (46 mm) ist nicht unbedingt gravierend, denn wie in der Arbeit von FRÜHWALD et al. [18] aufgezeigt, weisen dünnere Bretter/Lamellen bessere Eigenschaften für die flächige Verklebung auf. Die Gefahr der Delaminierung wird positiv reduziert.

Im Sägewerk können auch ganze Stämme im Rundschnitt zu Brettern in Dicken von 27 - 150 mm verarbeitet werden, vgl. Abbildung 10. Mit diesem Verfahren können Längen bis zu 6 m gefertigt werden. Die Stammdurchmesser betragen meistens 400 - 900 mm. Die eingeschnittenen Bretter werden zumeist Stammweise gestapelt, vgl. Abbildung 11. Bei den Kernbrettern wird noch das Mark herausgeschnitten, vgl. Abbildung 12.

Die ungesäumten Buchenbretter werden mit einer automatisierten Nachschnittanlage weiterverarbeitet. Diese ermöglicht das Auftrennen, Vorhobeln und Kappen der Bretter. In diesem Arbeitsschritt können die rohen Buchenbretter für die spätere Nutzung optimal vorbereitet werden, indem die Dimensionen und das Ausschiessen von eventuellen Fehlern im Holz auf das Endprodukt eingestellt werden.

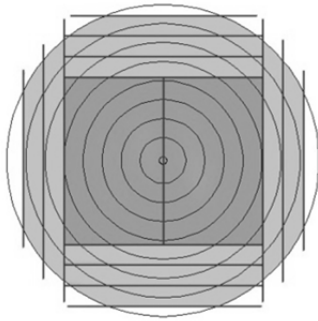


Abbildung 9: Einschnitt
Eisenbahnschwellen

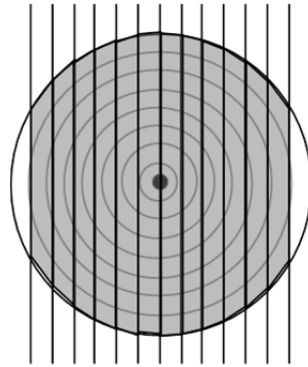


Abbildung 10: Einschnitt
Rundschnitt

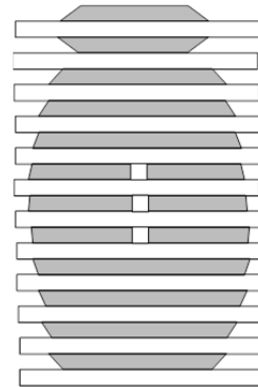


Abbildung 11: Stapelung
Rundschnitt

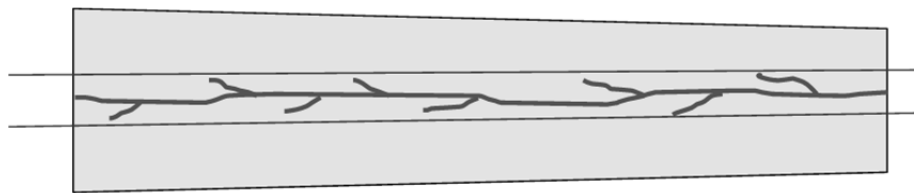


Abbildung 12: Schema Trennschnitt Kern

6.1.2 Prozess und Wirtschaftlichkeit

Die exemplarische wirtschaftliche Betrachtung wurde in der Sägerei A+C Corbat SA in Vendlin-court/Schweiz im Rahmen der Bachelorthesis von SAUSER [33] durchgeführt. Für eine komplette Kostenanalyse ist es wichtig jeden Produktionsschritt in der Sägerei miteinzubeziehen. Die Prozesskette beginnt beim Einkauf des Rundholzes und geht weiter zur Vorbereitung auf dem Rundholzplatz, der Entrindung, dem Einschnitt, die Lagerung sowie Trocknung und schlussendlich der Nachschnitt. In jeder Etappe wird die Ausbeute berücksichtigt und die Verwertung der Abfälle in jeglicher Form einbezogen. So kann für ein definiertes Volumen des Endproduktes das nötige Eingangsvolumen an Rundholz ermittelt werden. In Abbildung 13 ist der Materialfluss vom Rohmaterial zum Fertigprodukt dargestellt.

Die analysierten Eschenholz-Lamellen mit 45 x 175 x 3000 mm werden aufgetrennt, vorgehobelt und gekappt. Die Zielfeuchte von 10 % (+/- 2 %) wird mittels einem Vakuumtrockners erreicht. Die erforderliche Holzqualität wird wie folgt beschrieben:

- gesund verwachsene Äste bis zu einem Durchmesser von 5 mm werden unbegrenzt toleriert
- gesund verwachsene Holzmerkmale sind über der Hälfte der Breite toleriert insofern 20 mm von Randbereich fehlerfrei sind
- Braunkern wird toleriert
- Fäule, Flügeläste und Schälrisse werden nicht toleriert

Die ermittelten Ausbeuten sind in Abbildung 14 dargestellt. Die Analyse ergab, wie in Tabelle 4 aufgelistet, dass für 1 m³ Lamellen 3.75 m³ Rundholz benötigt werden.

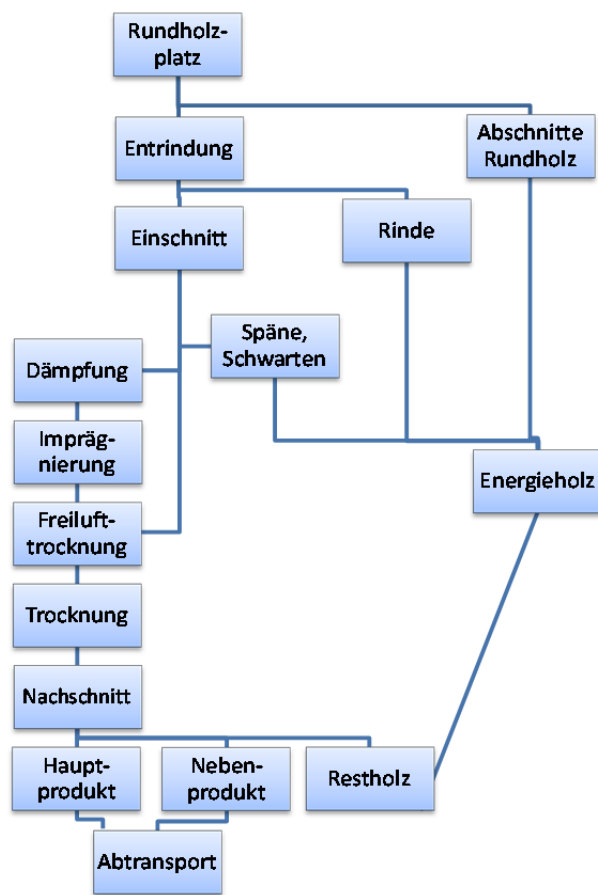


Abbildung 13: Schematischer Materialfluss der Firma A+C Corbat SA, [33]

Tabelle 4: Ausbeuteanalyse, [33]

Berechnungsbasis	Prozentsatz pro Etappe	Prozentsatz vom Eingangsvolumen
Entrindung		
Rinde	10 %	10 %
Rundholzplatz		
Ausbeute Rundholzplatz	90 %	90 %
Rundholzabschnitte	10 %	10 %
Einschnitt		
Ausbeute Bretter in Paketen von 54 mm	60 %	54 %
Ausbeute Seitenbretter 30 mm, weiss (33 mm eingeschnitten)	15 %	13.5 %
Späne, Schwarten	25 %	22.5 %
Lagerung		
Lagerkostensatz	5 %	5 %
Nachschnitt		
Ausbeute Hauptprodukt (inkl. Hobelverlust)	55 %	29.7 %
Ausbeute Nebenprodukt	10 %	5.4 %
Energieholz aus Bretter in Pakete	35 %	18.9 %
Verrechnung		
Gewinn & Risiko	10 %	10 %
Skonto	3 %	3%

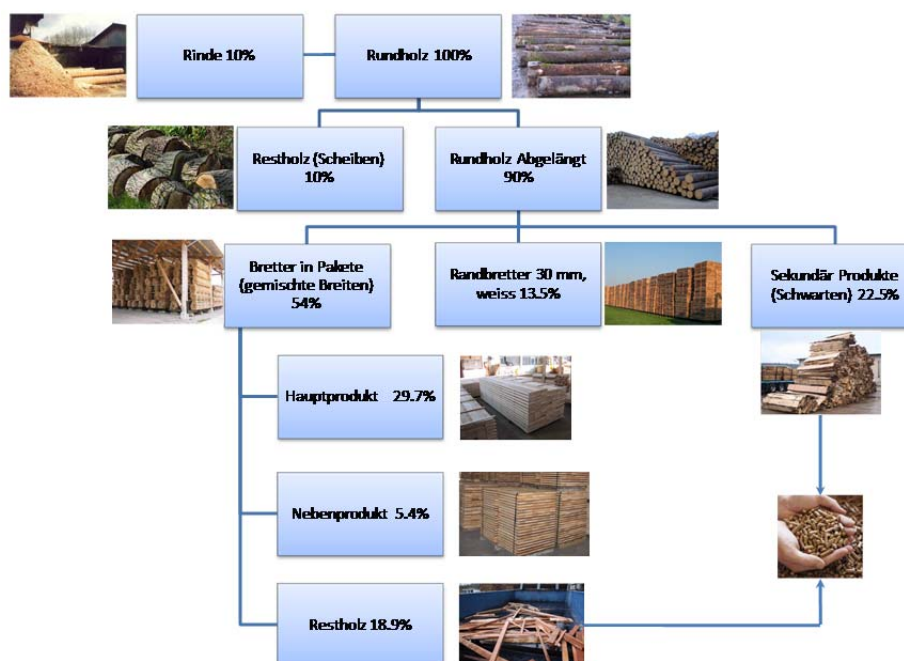


Abbildung 14: Ausbeute Verarbeitung Sägerei, [33] (Bilder: [9] [24] [25])

Die Tabelle 5 zeigt die Kosten der einzelnen Prozessschritte für die Herstellung von Eschenholz- und Buchenholzlamellen auf, die für die Berechnung verwendet werden. Für Buchenholz besteht ein günstigerer Rundholzpreis im Einkauf. Für die anderen Produktionsschritte werden die Kosten von den Eschenholzlamellen übernommen, da momentan noch keine Produktion von Buchenholzlamellen vorhanden ist.

Tabelle 5: Beispielhafte Kosten der einzelnen Prozessschritte, [33]

Kostenstelle	Esche	Buche
Einkaufspreis Rundholz [Fr./fm]	100	90
Produktionskosten Rundholzplatz, Sägerei [Fr./fm]	120	120
Verkaufspreis Rundholzabschnitt (gehackt) [Fr./m³]	13	13
Verkaufspreis Rinde [Fr./m³]	12	12
Verkaufspreis Seitenbretter 30 mm, weiss [Fr./m³]	200	200
Verkaufspreis Schwarten [Fr./m³]	50	50
Trocknungskosten (2 Fr./mm und m³) [Fr./m³]	96	96
Produktionskosten Nachschnitt (240 Fr./to x 800kg/m³) [Fr./m³]	192	192

Die stufenweise Preisentwicklung ist wie folgt:

- **Ausgang Einschnitt**
Zuerst werden die Kosten für den Rundholzeinkauf ermittelt. Dann die Produktionskosten in der Sägerei und die Verwertung der Abfälle. Dadurch wird der Preis für das Holz Ausgang Einschnitt ermittelt. Dieser beträgt ungefähr 323 Fr./m³.
- **Lagerkosten**
Die Lagerkosten erhöhen den Preis um 5 % auf 339 Fr./m³.
- **Trocknung**
Die Trocknungskosten belaufen sich auf 2 Fr./mm Dicke und m³. Hier werden 96 Fr./m³ angesetzt.
- **Nachschnitt**
Die Kosten für den Nachschnitt betragen 240 Fr./to. Das ergibt für ofentrockenes Eschenholz einen Preis von 192 Fr./m³. Danach werden die Trocknungs- und Produktionskosten ermittelt.

Die durch die Produktion entstandenen Nebenprodukte und Abfälle werden verwertet. Am Ende werden noch 10 % Gewinn und Risiko sowie 3 % Skonto dazugerechnet. Der Verkaufspreis von Eschenholzlamellen für die Produktion von Brettschichtholz beläuft sich auf 1070 Fr./m³. Werden die Lamellen erst nach dem Nachschnitt getrocknet, ergibt sich eine Einsparung von knapp 80 Fr./m³.

Die gleiche Berechnung wird für Buchenholzlamellen durchgeführt. Der Verkaufspreis für Buchenholzlamellen für die Herstellung von Brettschichtholz würde ca. 980 Fr./m³ betragen. Der Verkaufspreis bei einer Trocknung nach dem Nachschnitt beträgt 905 Fr./m³. Diese Einsparung gegenüber den Eschenholzlamellen ist vor allem auf den Rundholzpreis zurückzuführen. Für eine umfassende Preiseinschätzung ist es notwendig eine Testserie durchzuführen und die Kosten zu ermitteln.

6.1.3 Fazit und Ausblick zum Einschnitt von Lamellenquerschnitten

Das Optimierungspotenzial beginnt bereits beim Einkauf des Rundholzes. Ein tiefer Eingangspreis ändert den Gewinn am Ende der Produktionskette. Der Einschnitt von kürzeren Brettlängen hat zur Folge, dass das Durchgangsvolumen reduziert und damit die Produktionskosten erhöht werden. Die Ausbeute kann erhöht werden, wenn Holzfehler (Äste, Deformationen, Risse, ...) beim Besäumen und Kappen äusserst effizient herausgeschnitten werden. Um die genaue Auswirkung beurteilen zu können, müsste eine Testserie gemacht werden.

Es ist auch möglich, die eingeschnittenen Brettdicken zu optimieren. Die Bretter, die für die Lamellenproduktion in Nadelholz oder auch Eschenholz benutzt werden, werden gegenwärtig mit einer Dicke von 52 mm eingeschnitten. Anhand einer Optimierung des Einschnittbildes ist es möglich, den Stammquerschnitt besser auszunutzen und die Ausbeute zu steigern, vgl. Abbildung 15. Wenn die Einschnittbilder auf 40 mm oder sogar 35 mm gesenkt werden könnte, würde sich die Ausbeute beim Einschnitt um 2 % bzw. um 9 % steigern.

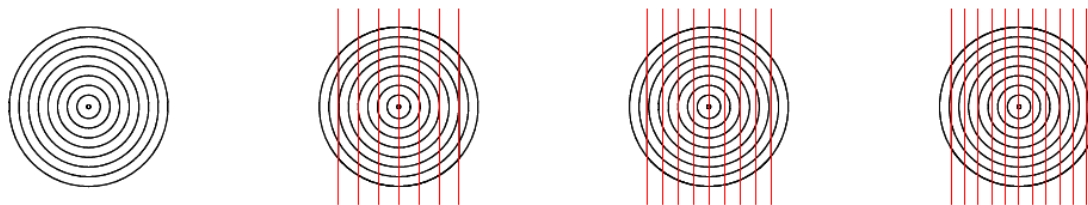


Abbildung 15: Einschnittbilder mit 52 mm, 40 mm und 35 mm

Die Trocknung nach dem Nachschnitt ermöglicht eine Optimierung des Trocknungsvolumens. Es wird nur das getrocknet, was auch effektiv verkauft wird. Obwohl das Eingangsvolumen im Nachschnitt höher ist, ist das zu trocknende Volumen um fast die Hälfte kleiner. Diese Reduzierung des Trockenvolumens hat eine Auswirkung auf die Trocknungskosten. Diese Schrittfolge in der Prozesskette ermöglicht eine Kostensenkung von 8 %. Zu beachten ist aber, dass die möglichen Auswirkungen einer solchen Reihenfolge nicht unbedeutend sind. Die Spannungen und Risse, die bei der Trocknung entstehen, könnten ein Fertigprodukt unbrauchbar machen. Eine nachträgliche Qualitätskontrolle wäre notwendig. Die ausgeschlossenen Produkte reduzieren die Ausbeute bei der Trocknung und dadurch würde sich das Eingangsvolumen nochmals erhöhen.

Eine gute Verwertung der Holzabfälle und Nebenprodukte ist auch notwendig. Eine Lamellenproduktion generiert Energieholz und weitere Nebenprodukte. Dieser Anteil der Produktion darf nicht unterschätzt werden. Durch einen Verkauf oder die Eigennutzung können die Kosten der ganzen Produktionskette gesenkt werden.

Ein wichtiges Potenzial bleiben die Produktionseinrichtungen und deren Unterhalt. Die Mehrkosten, die durch eine Störung oder einen Schaden entstehen, haben eine sehr grosse Auswirkung auf den Verkaufspreis. Es ist also wichtig, dass die Maschinen gut gewartet werden, um Störungen zu verhindern und die Kosten beizubehalten oder sogar zu senken.

6.2 Formstabilität im Trocknungsprozess

Die Trocknung der Lamellenquerschnitte ist entscheidend für die spätere flächige Verklebung und Keilzinkung der Lamellen zur Herstellung von Brettschichtholz. Frisch eingeschlagenes Holz hat eine Holzfeuchte oberhalb des Fasersättigungspunktes, bei Buche ca. 32 M %. Für die Ausführung der Verklebung sollte das Holz je nach Klebstoffart eine Holzfeuchte von 10-15 M % haben. Dies liegt unterhalb des Fasersättigungspunktes und unterliegt damit dem physikalischen Schwindverhalten von Holz respektive führt zu Verformungen infolge der materialachsenspezifischen Schwindmasse. In der Semesterarbeit von PITTARO und BAUMANN [29] wurde die schwindungsbedingte Deformation zur Abschätzung der Formstabilität der Lamellenquerschnitte betrachtet.

Die Trocknung gliedert sich für Laubhölzer in die Freilufttrocknung (Abbildung 16) und die technische Trocknung. Die Freilufttrocknung erfolgt i.d.R. über einen längeren Zeitraum (ca. 12 Monate) und begünstigt zusätzlich durch die lagenweise Schichtung der Brettlamellen und der damit verbundenen Auflast die Erhaltung der Formstabilität. Mitunter erfolgt vor der technischen Trocknung noch die Dämpfung (Abbildung 17) des Holzes zur Reduzierung von Eigenspannungen. Ausschlaggebend ist hier nicht der Holzfeuchtegehalt sondern die Erhöhung der Formstabilität der Lamellenquerschnitte. In Abhängigkeit von der Reihenfolge der Trocknung in der Prozesskette, nach dem Nachschnitt oder vor dem Nachschnitt, ergeben sich unterschiedliche Ausbeuten und Risiken.

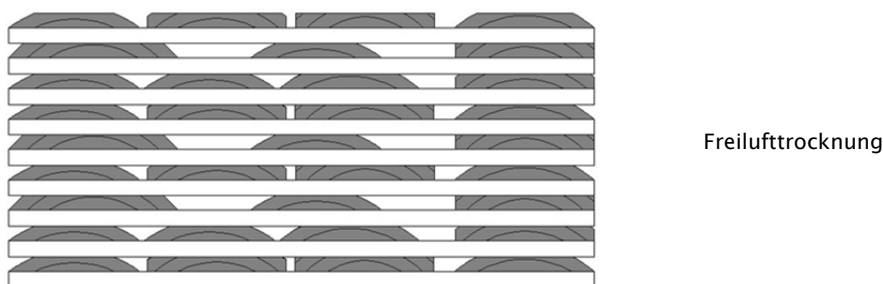


Abbildung 16: Schema Stapelung Freilufttrocknung

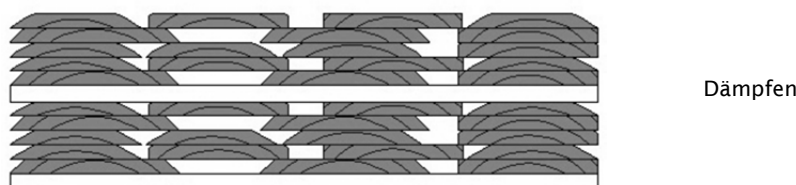


Abbildung 17: Schema Stapelung Dämpfung

Die schwindungsbedingte Deformation von Holz infolge der Trocknung differenziert sich in tangentialer, radialer und longitudinaler Richtung, vgl. Quell- und Schwindmasse in Tabelle 6. Hierbei beeinflusst den Lamellenquerschnitt die radiale und tangential Richtung. Der Unterschied zwischen dem effektiven Lamellenquerschnitt aus Buche und Fichte ist bereits anhand der stark abweichenden Quell- und Schwindmasse ableitbar. Das Ergebnis der Vergleichsrechnungen für die Trocknung eines Ausgangsquerschnittes von 35/130 mm auf eine Holzfeuchte $u = 12 \%$ ist in Abbildung 18 bis Abbildung 21 dargestellt.

Tabelle 6: Quell- und Schwindmasse, [23]

Holzart	Rohdichte	Longitudinal α_L	Radial α_R	Tangential α_T
Fichte	330-680 kg/m ³	0,3 %	3,6 %	7,8 %
Buche	700-790 kg/m ³	0,3 %	5,8 %	11,8 %

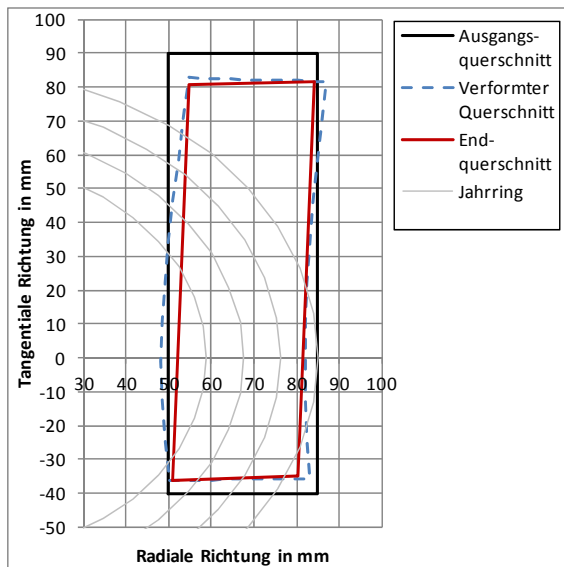


Abbildung 18: Theoretische Verformung und Ausbeute einer Buchenlamelle mit liegenden Jahrringen, [29]

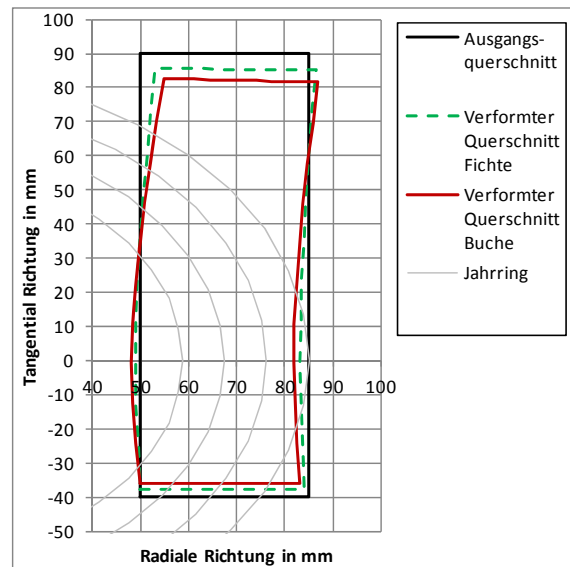


Abbildung 19: Vergleich theoretische Verformung einer Buchen- und Fichtenlamelle mit liegenden Jahrringen, [29]

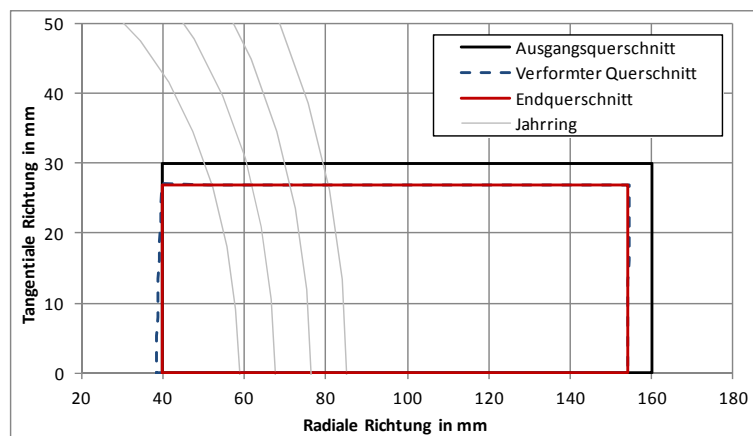


Abbildung 20: Theoretische Verformung und Ausbeute einer Buchenlamelle mit stehenden Jahrringen, [29]

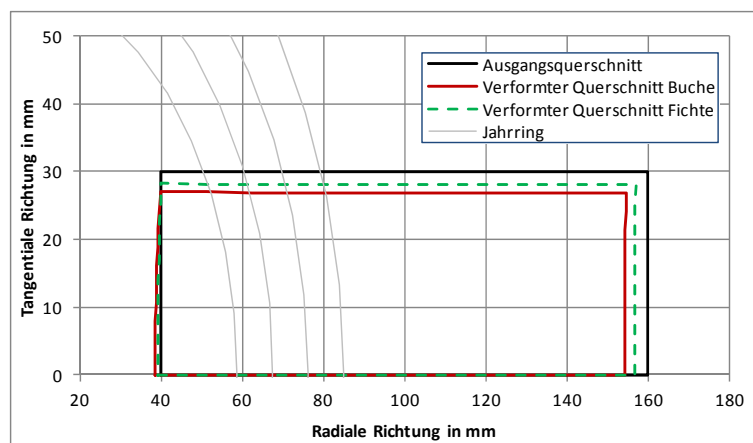


Abbildung 21: Vergleich theoretische Verformung einer Buchen- und Fichtenlamelle mit stehenden Jahrringen, [29]

Die Berechnung der Verformung basiert auf der Differenz zwischen Ausgangs- und Endfeuchte unter Beachtung des zugrundeliegenden Schwindmasses je Materialrichtung nach Gleichung (8). Die Berücksichtigung der unterschiedlichen Jahrringneigung in einem Seitenbrett (liegende Jahrringe) und Riftbrett (stehende Jahrringe) erfolgte über die Anwendung eines polaren Koordinatensystems.

$$\Delta x = \alpha \cdot x \cdot (u_{FSP} - u_{Endfeuchte}) \quad (8)$$

mit:

Δx	Änderung der Ausgangsdimension
x	Ausgangsdimension
α	Schwindmass in % / 1 M%
u_{FSP}	Holzfeuchte des Fasersättigungspunktes
$u_{Endfeuchte}$	Angestrebte Endholzfeuchte

Der direkte Vergleich der Ausbeute zwischen Lamellenquerschnitten aus Fichten- und Buchenholz zeigt für beide Ausgangsquerschnitte eine deutliche Reduzierung aufgrund des erhöhten Nachschnittes infolge der schwindungsbedingten Deformation für Laubholz. Die erzielbare Ausbeute für Buchenholzlammellen kann durch den Einschnitt von Riftbrettern gegenüber von Seitenbrettern um ca. 9 % innerhalb des Trocknungsprozesses gesteigert werden, vgl. Tabelle 7. Die erreichten Werte basieren auf einer theoretischen Idealisierung. In der Praxis muss aufgrund der natürlichen Wuchsmerkmale, Astverteilungen und Dichteviationen mit einer geringeren Ausbeute gerechnet werden. In weiterführenden Forschungsprojekten sollten die erreichten Werte anhand einer detaillierten Ausbeuteanalyse von verschiedenen Einschnittmustern und Stammquerschnitten im Sägewerk referenziert werden.

Tabelle 7: Theoretisch erzielbare Ausbeute im Trocknungsprozess auf $u = 12 \%$, Ausgangsquerschnitt 35/130 mm

Einschnitt	Holzart	Ausbeute
Seitenbrett	Fichte	86,8 %
	Buche	75,7 %
Riftbrett	Fichte	90,7 %
	Buche	84,6 %

7 Bestehende Keilzinkenprofile und deren Einflussgrößen

7.1 Grundlagen

Die Keilzinkenfestigkeit wird von den Holz- und Klebstoffeigenschaften, der Keilzinkengeometrie und dem Herstellungsprozess beeinflusst. Hinsichtlich der Holzeigenschaften spielt z. B. die Herkunft des Holzes, Wuchsmerkmale, Holzfeuchte und -temperatur, Festigkeit und Steifigkeit eine Rolle, [14], [12], [30] [1]. Die Festigkeit und Deformationseigenschaften des Klebstoffes, d.h. ob es sich um einen spröden oder duktilen Klebstoff handelt, sind ebenfalls massgebend, [38], [1]. Herstellungsbedingte Faktoren sind die Standzeit der Fräswerkzeuge, der Fräsvorgang, der Klebstoffauftrag, die Wartezeit, der Pressdruck, die Presszeit, die Aushärtezeit und das Hantieren mit den frisch gezinkten Lamellen, [14], [12], [30] [1].

Neben diesen Faktoren spielt auch die Keilzinkengeometrie eine Rolle. In Abbildung 22 ist eine Keilzinkung mit den definierten Geometrieparametern abgebildet. Folgend werden die Einflüsse der einzelnen Parameter der Keilzinkengeometrie näher erläutert, die vorwiegend auf Versuchen mit Nadelholz basieren.

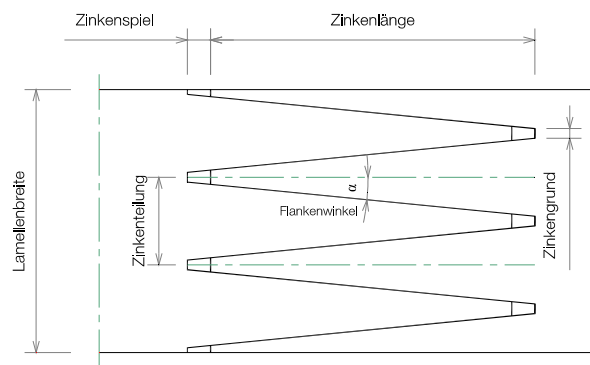


Abbildung 22: Geometrieparameter einer Keilzinkung

7.2 Breite Zinkenrund

Der Zinkenrund wirkt als stumpfe Verbindung und hat bei Zug- oder Biegebelastung keine Bedeutung, da er durch das vorhandene Zinkenspiel nicht für die Kraftweiterleitung eingesetzt werden kann, [31], [12]. Die Kräfte müssen umgelenkt werden, wodurch Zusatzspannungen auftreten, die bei breiterem Zinkenrund höher sind, [12]. Diese Spannungskonzentrationen an den Zinkenspitzen beeinflussen die Festigkeit, [40]. Ein breiterer Zinkenrund resultiert in geringerer Festigkeit, [37]. Daher sollte die Zinkenrundbreite so klein wie möglich sein, [37], [26], [40].

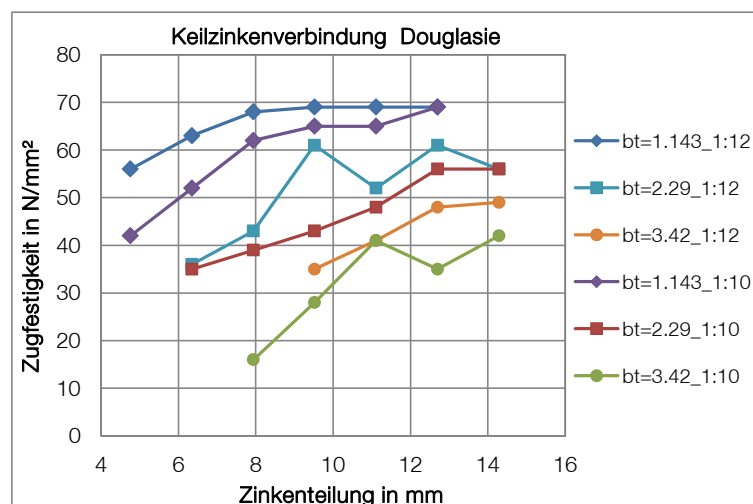


Abbildung 23: Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Douglasie bei unterschiedlicher Zinkenrundbreite, Flankenneigung sowie Zinkenteilung (Ergebnisse aus SELBO [37])

SELBO [37] stellte Keilzinkenverbindungen mit unterschiedlicher Zinkengrundbreite, Zinkenteilung und Flankenneigung mit einer Bandsäge her und benutzte Holz der Sitka-Fichte, Douglasie und Weisseiche sowie Phenol-Resorzin-Klebstoff. Die Aushärtung erfolgte unter Wärmezufuhr bei einem Längspressdruck von 1.38 N/mm^2 und Querpressdruck von 0.34 N/mm^2 . Abbildung 23 zeigt den Einfluss der Zinkengrundbreite. Es ist die Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Douglasie bei unterschiedlicher Zinkengrundbreite, Flankenneigung sowie Zinkenteilung dargestellt. Bei gleicher Flankenneigung sinkt die Festigkeit mit zunehmender Zinkengrundbreite.

7.3 Flankenneigung

Die Klebfuge in der Keilzinkung unterliegt vorwiegend einer Scherbeanspruchung. Eine gute Keilzinkenverbindung besitzt eine grosse Klebfläche. Die Klebfläche wird mit geringerer Neigung grösser. Die Zugfestigkeit steigt also mit flacher werdendem Flankenwinkel. Die Neigung ist aber ebenfalls limitiert, da ab einem gewissen Verhältnis keine Steigerung mehr möglich ist, [37]. Zu beachten ist auch, dass die Stabilität der Fräser von der Flankenneigung beeinflusst wird, [31]. Folgende optimale Neigungen werden in der Literatur aufgeführt:

- 1:8 – 1:10, vgl. [26] [40] [30]
- 1:11.5 – 1:12.5, vgl. [31]
- 1:12 – 1:14, vgl. [37]

In Abbildung 24 sind Ergebnisse aus den Versuchen von SELBO [37] dargestellt. Es ist die Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Weisseiche bei einer Zinkengrundbreite von $b_t = 1.143 \text{ mm}$ und unterschiedlicher Flankenneigung sowie Zinkenteilung abgebildet. Es zeigt sich, dass bei konstanter Zinkenteilung die Festigkeit mit zunehmender Flankenneigung ansteigt. Für eine konstante Flankenneigung steigt die Festigkeit mit zunehmender Zinkenteilung.

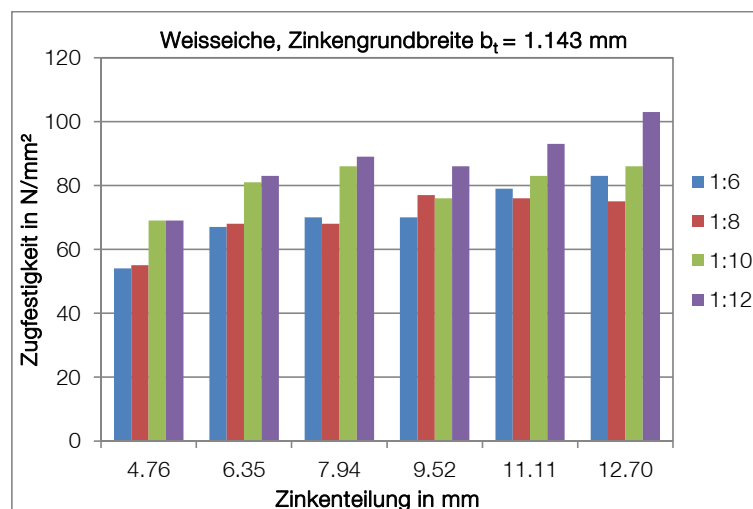


Abbildung 24: Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Weisseiche bei einer Zinkengrundbreite von $b_t = 1.143 \text{ mm}$ und unterschiedlicher Flankenneigung sowie Zinkenteilung (Ergebnisse aus SELBO [37])

7.4 Zinkenlänge und Zinkenteilung

STRICKLER [40] stellte gefräste Keilzinken mit Holz der Douglasie und Hemlock-Tanne her. Nach STRICKLER haben die Zinkenteilung und Zinkenlänge erst einen Einfluss auf die Keilzinkenfestigkeit, wenn sie die Grösse einer einzelnen Holzfaser erreichen. Für Nadelholz ergibt sich ein grosser Einfluss zwischen 3 mm und 6 mm.

WALFORD [42] verwendete Holz der Monterey-Kiefer (*Pinus radiata*) und Resorzin-Klebstoff. Die Keilzinken wurden industriell gefräst. Die Keilzinkenlänge wurde zwischen 3.5 mm und 16 mm variiert. Die Abbildung 25 dargelegten Ergebnisse aus den Versuchen von WALFORD zeigen, dass die Zinkenlänge keinen Einfluss auf Zugfestigkeit hat (Korrelationskoeffizient $r^2 = 0.029$).

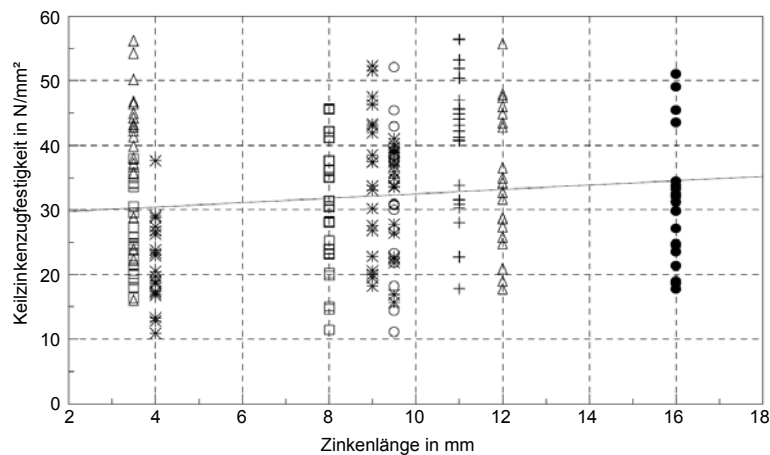


Abbildung 25: Keilzinken-Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Zinkenlänge, nach [42]

Nach SELBO [37] ist ein gutes Verhältnis von Zinkenlänge l zu Zinkenteilung p zwischen 4 bis 5 oder höher. Ab einem gewissen Verhältnis l/p bzw. einer gewissen Klebfläche ist die Scherspannung in den Flanken ähnlich der Zugspannung im ungeschwächten Querschnitt. Die Keilzinkenspitzen sind dann soweit voneinander entfernt, dass die Spannungskonzentration in der einen Zinke die gegenüberliegende nicht beeinflusst. Die Festigkeit kann darüber hinaus nur durch eine reduzierte Zinkengrundbreite erhöht werden, [37].

7.5 Diskussion zu den verschiedenen Keilzinkenprofilen

Die Zusammenhängende Betrachtung der einzeln erörterten Parametern führt zu folgenden Schlüssen:

- Für eine konstante Zinkengrundbreite, aber mit Verkleinerung der Flankenneigung, steigt die Festigkeit der Keilzinkung, da die Klebfläche grösser wird, [31], [37], [20]. Die Klebfläche sollte deshalb möglichst gross sein, [37], [30].
- Die Zinkengrundbreite sollte so klein wie möglich sein, [37], [40], [30].
- Der Verschwächungsgrad, also das Verhältnis zwischen Breite des Zinkengrundes und der Zinkenteilung, sollte ebenfalls gering sein, [37], [30].

In Tabelle 8 sind verschiedene Keilzinkenprofile mit Angaben ihrer Geometrieparameter aufgelistet. Die effektive Klebfläche A_j für diese Keilzinkenprofile wird dabei nach SELBO [37] als die geneigte Klebfläche an den Flanken der Zinken ohne die Fläche am Zinkengrund definiert und wie folgt berechnet:

$$A_j = \frac{2 \sqrt{l^2 + \left(\frac{p}{2} - b_t\right)^2}}{p} \quad (9)$$

mit:

A_j	Effektive Klebfläche [-]
l	Zinkenlänge in mm
p	Zinkenteilung in mm
b_t	Zinkengrundbreite in mm

Die Keilzinkenprofile werden im Folgenden anhand ihres Verschwächungsgrades v , ihrer Klebfläche A_j und dem Verhältnis zwischen Zinkenlänge l und Zinkenteilung p beurteilt. Dabei wird folgende Klassierung vorgenommen:

- Verschwächungsgrad: grün schattiert $v \leq 0,12$ (günstig)
orange schattiert $v \leq 0,20$
rot schattiert $v > 0,20$

- Effektive Klebfläche: grün schattiert $A_j \geq 7$ (günstig)
orange schattiert $A_j \geq 5$
rot schattiert $A_j < 5$
- Verhältnis Zinkenlänge l / Zinkenteilung p : grün schattiert $l/p \geq 4$ (günstig)
orange schattiert $l/p \geq 3$
rot schattiert $l/p < 3$

Diese Beurteilung zeigt, dass alle Profile unter 15 mm Zinkenlänge eher ungünstige geometrische Eigenschaften aufweisen. Günstige Eigenschaften weisen Profile mit der Zinkenlänge von 15 mm, 20 mm, 30 mm, 32 mm und 38 mm auf. Dabei ist das I-20-Profil* mit einer geringeren Zinkengrundbreite und Zinkenteilung besser einzustufen als das I-20-Profil. Diese Beurteilung kann durch experimentelle Untersuchungen aus verschiedenen Literaturquellen bestätigt werden.

Tabelle 8: Darlegung und Bewertung von Keilzinkenprofilen

Zinkenprofil	l in mm	p in mm	b in mm	α in Grad	v [-]	A_j [-]	l/p [-]	Quelle
I-7.5-Profil	7.5	2.50	0.20	7.97	0.08	6.06	3.00	Marian [26]
I-8-Profil	8	3.80	1.20	5.00	0.32	4.23	2.11	Walford [42]
I-9-Profil	9	3.80	0.70	7.59	0.18	4.78	2.37	Walford [42]
I-9.5-Profil	9.5	3.80	0.70	7.20	0.18	5.04	2.50	Walford [42]
I-10-Profil	10	3.70	0.60	7.13	0.16	5.45	2.70	EN 385:2007
I-11-Profil	11	4.00	0.60	7.25	0.15	5.54	2.75	Walford [42]
I-12-Profil	12	3.90	0.80	5.47	0.21	6.18	3.08	Walford [42]
I-15-Profil	15	3.80	0.42	5.63	0.11	7.93	3.95	Radovic [30], EN 385:2007, prEN 14080:2012
I-16-Profil	16	6.00	1.00	7.13	0.17	5.37	2.67	Walford [42]
I-20-Profil	20	6.20	1.00	5.99	0.16	6.49	3.23	Radovic [30], Aicher, Radovic [1], EN 385:2007, prEN 14080:2012
I-20-Profil*	20	5.00	0.50	5.71	0.10	8.04	4.00	Radovic [30], Aicher, Radovic [1], prEN 14080:2012
I-28-Profil	28	10.80	3.00	4.90	0.28	5.20	2.59	Rajcan, Kozelouh [31]
I-30-Profil	30	6.20	0.60	4.76	0.09	9.71	4.84	Radovic [30], prEN 14080:2012
I-32-Profil	32	6.20	1.00	3.75	0.16	10.34	5.16	EN 385:2007
I-38-Profil	38	10.50	0.50	7.13	0.05	7.29	3.62	Rajcan, Kozelouh [31]
I-48-Profil	48	11.00	1.80	4.41	0.16	8.75	4.36	Rajcan, Kozelouh [31]
I-50-Profil	50	12.00	3.10	3.32	0.26	8.35	4.17	Universalkeilzinkung

AICHER und RADOVIC [1] führten Versuche mit Fichtenholz durch und verwendeten das I-20-Profil und I-20-Profil*. Die Keilzinken wurden in einer Paket-Keilzinkenanlage mit Melamin-Klebstoff und einen Pressdruck von 8 N/mm² hergestellt. Dabei wurden mit dem I-20 Profil* 10 – 20 % höhere Zugfestigkeit als mit dem I-20-Profil erreicht.

RAJCAN und KOZELOUH [31] führten ebenfalls Versuche mit Fichtenholz durch. Die Keilzinken wurden industriell hergestellt und es wurde Phenol-Resorzin-Formaldehyd-Klebstoff verwendet. Der Quer- und Längspressdruck betrug 0.3 bis 0.5 N/mm². Dabei konnte mit dem I-48-Profil und dem I-38-Profil eine höhere Festigkeit erreicht werden, als mit dem I-28-Profil, dass auch ungünstigere Geometrieeigenschaften aufweist, vgl. Tabelle 9.

Tabelle 9: Ergebnisse zu den Versuchen von RAJCAN und KOZELOUH [31] mit verschiedenen Keilzinkenprofilen

Profil	Ausrichtung	Anzahl Prüfkörper	mittlere Biegefestigkeit in N/mm ²
I-48-Profil	liegend	40	58
	stehend	41	57
	Vollholz	40	71
I-38-Profil	liegend	40	58
	stehend	37	60
	Vollholz	15	69
I-28-Profil	liegend	51	43
	stehend	52	45
	Vollholz	57	65

Im Weiteren führte RADOVIC [30] Versuche mit Kerto-Furnierschichtholz durch, um eine geringere Streuung der Holzeigenschaften sicherzustellen. Als Klebstoff wurde Phenol-Resorzinharzleim verwendet und ein Längspressdruck von 8 N/mm². Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse zur Zug- und Biegefestigkeit der verschiedenen Keilzinkenprofile. Das I-30-Profil (IV) weist die besten Eigenschaften auf. Das I-20-Profil* (II) und I-15-Profil (I) sind mit dem I-30 Profil (IV) vergleichbar. Mit dem I-20-Profil (III) werden die geringsten Festigkeiten erreicht.

2002-2005 wurde an der Holzforschung Austria ein Forschungsprojekt zur Entwicklung und Optimierung von Längsverbindungen von Holz durchgeführt, [27]. Dabei wurde unter anderem ein modifiziertes Keilzinkenprofil entwickelt, da höhere Festigkeitsklassen in den Sortiernormen auch eine Optimierung der Keilzinkenverbindung erfordern. Das Profil weist einen Flankenwinkel von 4.56° auf und die Querschnittsschwächung, die durch die Zinken verursacht wird, wird auf mehrere Ebenen aufgeteilt, siehe Abbildung 27. Mit diesem Profil wurden Keilzinkenverbindungen hergestellt und die Biegefestigkeit von Kanthölzern bzw. Zugfestigkeit von Brettschichtholzlamellen geprüft. Die Zugfestigkeit hat sich durch das modifizierte Profil nicht erhöht. Es wird vermutet, dass bei einer Durchlaufpresse die schmale Zinkengeometrie beim Transport deformiert worden. Dies hat einen negativen Einfluss auf das Fügen und die erreichbare Festigkeit. Die Keilzinken der Kanthölzer wurden in einer Kompaktanlage hergestellt. Man konnte eine Erhöhung der Biegefestigkeit feststellen. Das modifizierte Profil bedarf durch den höheren Fertigungsaufwand der Fräs-werkzeuge und der Klebstoffapplikation noch weiteren Optimierungsbedarf, [27], [34].

HERNANDEZ und FLACH [22] führten bereits 2002 Versuche mit einem ähnlichen Keilzinkenprofil durch. Niedrige Festigkeiten von Keilzinkenverbindung resultierten aus den Spannungskonzentrationen im Zinkengrund, die sich mit den angrenzenden Zinken überlagerten. Sie optimierten die Keilzinkengeometrie, sodass solche Überlagerungen verhindert werden. Der Abstand zwischen

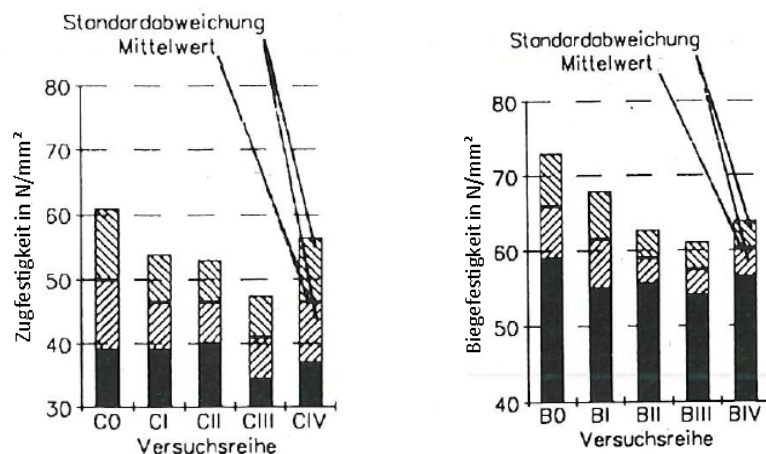


Abbildung 26: Ergebnisse zur Zug- und Biegefestigkeit aus den Versuchen von RADOVIC [30]
(O...ungezinkte Proben, I...I-15-Profil, II...I-20-Profil*, III...I-20-Profil, IV...I-30-Profil)

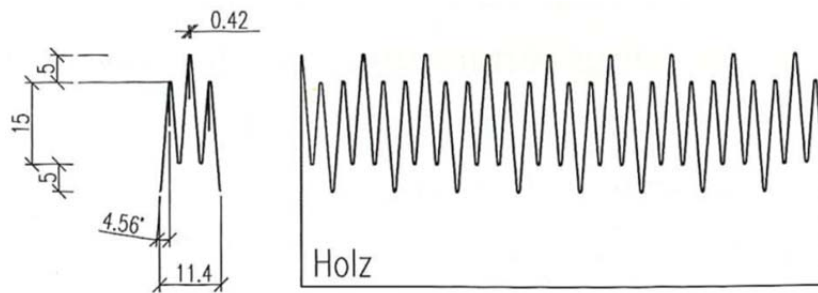


Abbildung 27: Modifiziertes Keilzinkenprofil ([34] S. 6)

den Spannungskonzentrationen muss vergrößert werden, jedoch soll die Klebfugenlänge dadurch nicht verringert werden. Es konnten höhere Festigkeiten mit einem Keilzinkenprofil mit versetzt angeordneten Zinken durch Eliminieren der Spannungsüberbrückung und längere Klebfugen erreicht werden.

Auch die Orientierung der Keilzinkung hat einen Einfluss auf die Festigkeit. Dabei ist besonders das Profil der Randzinken entscheidend. In Finnland wurden Versuche mit einem Keilzinkenprofil, das eine Neigung von 45° aufwies durchgeführt, siehe Abbildung 28 links. Dabei wurde festgestellt, dass eine bessere Leistungsfähigkeit als bei Horizontal- oder Vertikalkeilzinken erreicht werden kann, [16]

AJDINAJ und HABIBI [3] führten Versuche mit Pappelholz und Polyvinylacetat-Klebstoff (PVA) durch. Sie stellten ein Keilzinkenprofil mit einer Neigung von 30° her, siehe Abbildung 28 rechts. Durch die grössere Klebfläche konnte eine um 10 % höhere Biegefestigkeit, im Vergleich zu einem Standardprofil, erzielt werden.

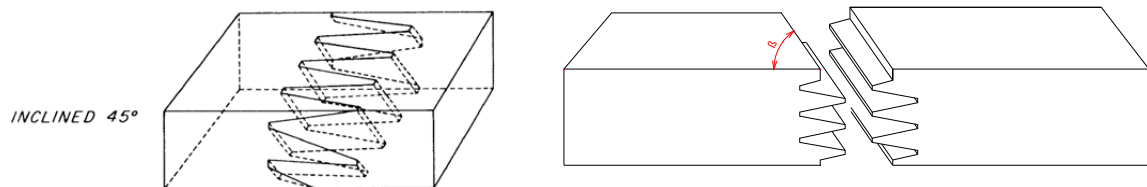


Abbildung 28: Zinkenprofil mit 45° Neigung, [16], S. 5 (links); Zinkenprofil mit Neigung $\beta = 30^\circ$, [3] (rechts)

8 Entwicklung eines numerischen Modells zur Parametervariation der Keilzinkengeometrie

Mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) wird ein Modell erstellt und die Spannungsverteilung innerhalb der Keilzinkengeometrie näher analysiert. Mit Hilfe des numerischen Modells können verschiedene Parameteranalysen für Keilzinkenprofile durchgeführt werden. Für die Modellentwicklung und die FEM Analyse der Keilzinken wird die Software ANSYS (Release 14.0) verwendet. Die unterschiedlichen Keilzinkenprofile unterliegen einer Zugbeanspruchung für die Analyse der Spannungsverteilungen parallel und senkrecht zur Faser. Im Simulationsmodell wird für Holz ein linear-elastisches orthotropes Materialgesetz verwendet. Die Materialkennwerte für Rotbuchenholz stammen aus Forschungsergebnissen der ETH Zürich [28]. Der Klebstoff wird als linear-elastisches isotropischer Werkstoff abgebildet. Die Kennwerte dazu stammen von BRANDMAIR et al [7]. Abbildung 29 zeigt auszugsweise das numerische Modell, mit der Klebstoffschicht rot gekennzeichnet und den zwei Keilzinkenprofilen rechts und links in den Farben türkis und violett. Das Modell ist symmetrisch zur Längsrichtung/parallel zur Faser aufgebaut und stets auch so dargestellt.

Im Variantenstudium wird unter anderem der Einfluss von Zinkenlänge, Zinkengrundbreite, des Flankenwinkels und des Zinkenspiels untersucht. Eine detaillierte Beschreibung des Modells und der Ergebnisse ist in der Masterthesis von SCHUSSER [35] zu finden.

Die im Zinkengrund des Keilzinkenprofils entstehenden Spannungskonzentrationen infolge der Kräfteumlenkung können im numerischen Modell sehr gut erkannt werden. In Abbildung 30 und Abbildung 31 sind die Verläufe der Spannungen parallel und quer zur Faser eines Keilzinkenprofils dargestellt.

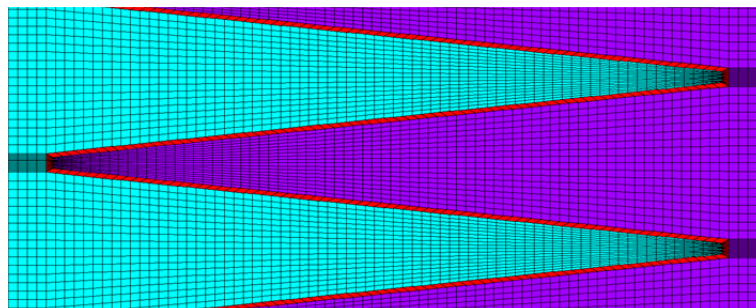


Abbildung 29 : FEM Modell der Keilzinkenverbindung; symmetrischer Aufbau in Längsrichtung (parallel zur Faser)

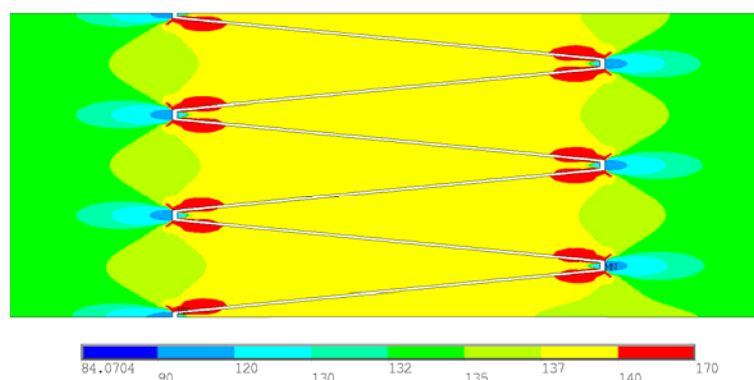


Abbildung 30: Verteilung der Spannungen parallel zur Faser, Symmetrieebene am oberen Rand

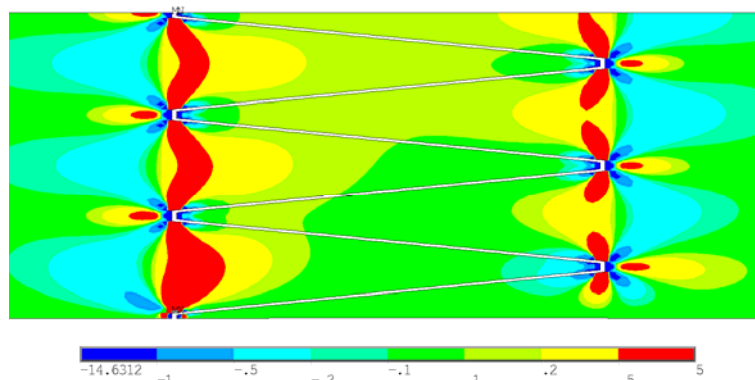


Abbildung 31: Verteilung der Spannung quer zur Faser, Symmetrieebene am oberen Rand

Die Parameterstudie mit dem numerischen Modell zeigt, dass die Zinkengeometrie einen Einfluss auf die Keilzinkenfestigkeit hat. Im Allgemeinen besitzt eine gute Keilzinkenverbindung eine grosse Klebfläche. Durch die zunehmende Zinkenlänge wird der Anteil der Klebfläche erhöht. Die numerischen Simulationen zeigen, dass mit zunehmender Zinkenlänge die Spannungen reduziert werden, vgl. Abbildung 32.

Mit breiterem Zinkengrund wird dagegen die Klebfläche verringert und die Spannungen erhöhen sich, vgl. Abbildung 33. Auch die Flankenneigung hat einen Einfluss. Die Klebfläche wird mit flacher werdendem Winkel zwar grösser, jedoch können sich bei einem zu geringen Flankenwinkel die Spannungskonzentrationen der angrenzenden Zinken überlagern, wodurch die Keilzinkenfestigkeit reduziert wird, vgl. Abbildung 34.

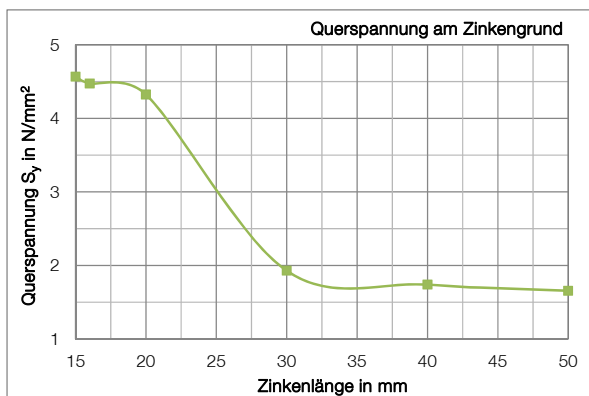


Abbildung 32: Max. Querspannung im Bereich des Zinkengrundes in Abhängigkeit der Keilzinkenlänge

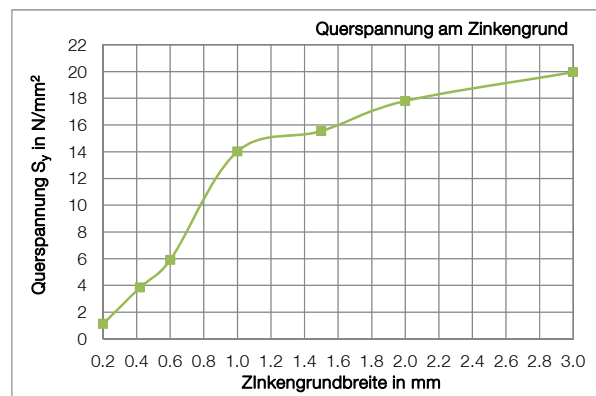


Abbildung 33: Max. Querspannung im Bereich des Zinkengrundes in Abhängigkeit der Zinkengrundbreite

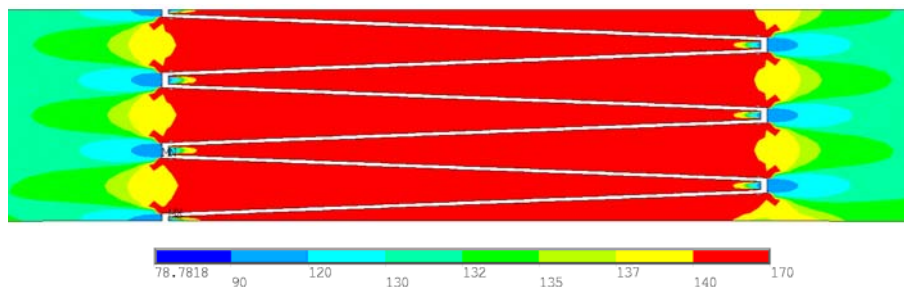


Abbildung 34: Verteilung der Spannung parallel zur Faser bei einem Flankenwinkel von 2°, Symmetrieebene am oberen Rand

9 Alternative Keilzinkenverbindungen

9.1 Verwendetes Material und Profilquerschnitte

Ergänzend zur theoretischen und numerischen Analyse von Standardkeilzinkenprofilen wurden auch alternative Keilzinkenverbindungen im Rahmen der Bachelorthesis von SAUSER [33] an der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau durchgeführt. Es wurden 5 verschiedene Profile mittels einer 5-Axe CNC-Maschine hergestellt, vgl. Abbildung 35 bis Abbildung 39. Die Schwalbenschwanzverbindung ist im Schreinerhandwerk schon seit langem im Einsatz, um diverse Verbindungen herzustellen. Die Firma SAMVAZ in Kanton Freiburg benutzt ein S-Profil, um Lamellenstösse für Kantholz herzustellen. Das Keilzinkenprofil mit 10 mm Zinkenlänge wird benutzt, um Eckverbindungen bei der Fensterherstellung zu fräsen. Ein Universalkeilzinkenprofil wird für die Ausführung von Rahmenecken oder Generalstössen von Brettschichtholzträgern eingesetzt. Durch die zusätzliche Ausführung einer Überblattung, kann der Anteil der Klebefläche weiter erhöht werden.

Für die Versuche wurden fehlerfreie Buchenholzlamellen verwendet. Die Herstellung und Fertigung der verschiedenen Profile erfolgte im Techpark der Berner Fachhochschule. Für die Herstellung wird ein Querschnitt von 20 x 42 mm² benutzt, der dann für die Durchführung der Prüfungen auf 18 x 40 mm² gehobelt wurde. Die Prüfkörper werden im Normklima bei einer Temperatur von 20 °C +/- 2 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % +/- 5 % bis zur Herstellung bzw. Festigkeitsprüfung gelagert.

Für die Verklebung wurde der Polyurethanklebstoff (PUR) und Melamin-Harnstoff-Formaldehydharz (MUF) Klebstoff verwendet. Die Prüfkörper mit PUR-Klebstoff wurden je zur Hälfte vor dem Klebstoffauftrag mit Wasser besprüht. Der Klebstoffauftrag erfolgte manuell mit einem Pinsel. Die Auftragsmenge wurde durch Wägungen überwacht. Das Pressen der Keilzinkung erfolgte Zeit- und Kraftgesteuert in einem individuell aufgebauten Prüfstand, vgl. Abbildung 40. In Tabelle 10 sind die Profile mit den Herstellungsparameter angegeben.

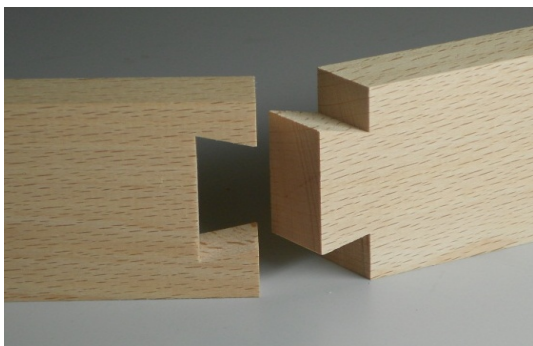


Abbildung 35: Schwalbenschwanz

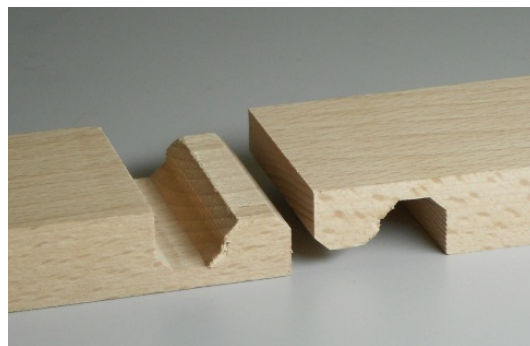


Abbildung 36: Anlehnung an das S-Profil der Firma SAMVAZ



Abbildung 37: Keilzinkenprofil für Fensterkanteln, 10 mm Zinkenlänge

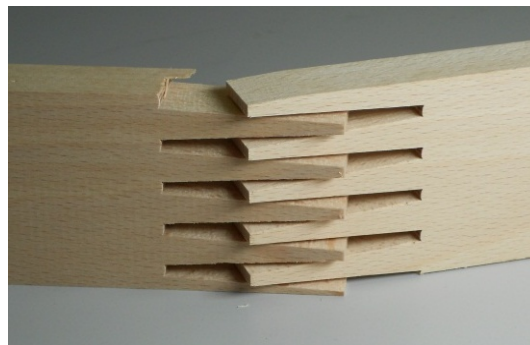


Abbildung 38: Universalkeilzinkenprofil, 50 mm Zinkenlänge

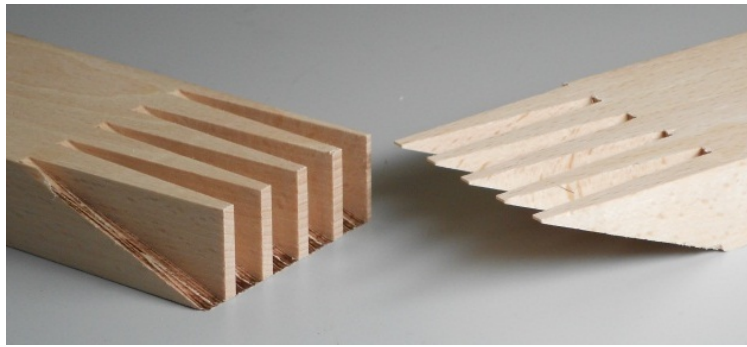


Abbildung 39: Universalkeilzinkenprofil in Kombination mit Überblattung, 50 mm Zinkenlänge

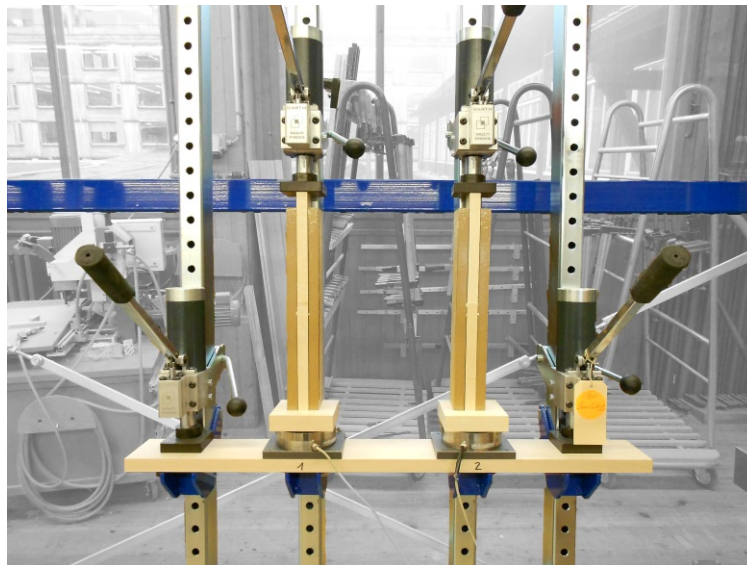


Abbildung 40: Presseinrichtung auf der Rahmenpresse

Tabelle 10: Herstellungsparameter alternative Keilzinken

Profil	Kontaktfläche	Klebstoff		Vorbe- handlung	Pressdruck	Presszeit
Schwalbenschwanz	1850 mm ²	PUR	140 g/m ²	-	5 N/mm ²	10 Min.
SAMVAZ-Profil	3330 mm ²	PUR	140 g/m ²	-	10 N/mm ²	20 Min.
		MUF	500 g/m ²	-	10 N/mm ²	60 Min.
Keilzinken 10 mm	3000 mm ²	PUR	140 g/m ²	- / H ₂ O	10 N/mm ²	20 Min.
		MUF	500 g/m ²	-	10 N/mm ²	10 Min.
Keilzinken 15 mm	8240 mm ²	PUR	140 g/m ²	H ₂ O	10 N/mm ²	6 Sek.
Universalkeilzinken	9100 mm ²	PUR	140 g/m ²	- / H ₂ O	5 N/mm ²	6 Sek.
		MUF	500 g/m ²	-	5 N/mm ²	10 Min.
Universalkeilzinken, Überblattung	7360 mm ²	PUR	140 g/m ²	- / H ₂ O	5 N/mm ²	6 Sek.
		MUF	500 g/m ²	-	5 N/mm ²	10 Min.

9.2 Prüfmethode

Die Festigkeiten der Keilzinkenverbindungen wurde als Zug- und Biegeprüfung nach der Norm SN EN 408:2011 durchgeführt, vgl. hierzu Abschnitt 10.4. Das Universalkeilzinkenprofil mit Überblattung wurde wegen der Orientierung der Zinken bei der Biegeprüfung je zur Hälfte mit der Überblattung der Verbindung in der Druck- oder Zugzone getestet. Für die Zugprüfung wurde die Universalprüfmaschine der Firma Schenk genutzt. Der Prüfkörper wird so eingerichtet, dass die Keilzinkenverbindung mittig zwischen den zwei Spannbacken liegt.

9.3 Prüfergebnisse

Die Ergebnisse zur Biege- und Zugfestigkeit sind in Tabelle 11 bzw. Tabelle 12 dargestellt. In Abbildung 41 sind die Ergebnisse zur Biegefestigkeit dargestellt. Es werden jeweils die Minimal- und Maximalwerte sowie Mittelwerte abgebildet. Mit dem Universalkeilzinkenprofil können die höchsten Festigkeiten erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen auch, dass eine Vorbehandlung der Prüfkörper mit Wasser, die Festigkeit erhöhen kann. Für die Zugfestigkeit können mit dem Standardkeilzinkenprofil mit 15 mm Zinkenlänge die höchsten Festigkeiten erreicht werden, vgl. Abbildung 42. Wie bei der Biegefestigkeit können mit einer Vorbehandlung der Prüfkörper mit Wasser höhere Festigkeiten erzielt werden. Die Überblattung, das Schwalbenschwanz-, SAMVAZ- oder Keilzinkenprofil mit 10 mm Zinkenlänge führten zu keinen relevanten Festigkeiten für die Brett-schichtholzproduktion. Die Prüfergebnisse zeigen tendenziell, dass mit Vergrößerung der Keilzinkenlänge die erreichbaren Festigkeiten steigen.

Tabelle 11: Ergebnisse der Biegeprüfung der alternativen Keilzinken (n = Probenanzahl, MW = Mittelwert, Max = Maximalwert, Min = Minimalwert, STA = Standardabweichung, COV = Variationskoeffizient)

Biegefestigkeit [N/mm ²]	n	MW	Max	Min	STA	COV
Schwalbenschwanz, PUR	5	11.3	14.3	7.6	2.5	21.8 %
SAMVAZ, PUR	5	5.5	6.1	4.7	0.5	9.0 %
SAMVAZ, MUF	1	23.2	23.2	23.2	0.0	-
Keilzinken, 10 mm, PUR	5	39.7	44.7	35.4	3.5	8.8 %
Keilzinken, 10 mm, PUR+H ₂ O	5	54.4	61.1	44.5	6.6	12.0 %
Keilzinken, 10 mm, MUF	5	54.3	63.2	41.0	9.8	18.0 %
Keilzinken, 15 mm, PUR+H ₂ O	5	78.9	103.0	58.2	17.3	21.9 %
Universalkeilzinken, PUR	5	79.8	86.2	76.0	4.3	5.4 %
Universalkeilzinken, PUR H ₂ O	5	104.4	124.2	94.0	12.6	12.1 %
Universalkeilzinken, MUF	3	111.9	122.1	103.8	9.3	8.4 %
Universalkeilzinken, Überblattung Druckzone, PUR	3	44.7	49.4	40.0	4.7	10.5 %
Universalkeilzinken, Überblattung Zugzone, PUR	2	80.4	83.9	76.8	5.0	6.2 %
Universalkeilzinken, Überblattung Druckzone, PUR+H ₂ O	2	51.2	53.8	48.6	3.7	7.3 %
Universalkeilzinken, Überblattung Zugzone, PUR+H ₂ O	3	94.3	110.1	83.4	14.0	14.8 %
Universalkeilzinken, Überblattung Druckzone, MUF	1	61.2	61.2	61.2	-	-
Universalkeilzinken, Überblattung Zugzone, MUF	1	94.1	94.1	94.1	-	-

Tabelle 12: Ergebnisse der Zugprüfung der alternativen Keilzinken (n = Probenanzahl, MW = Mittelwert, Max = Maximalwert, Min = Minimalwert, STA = Standardabweichung, COV = Variationskoeffizient)

Zugfestigkeit [N/mm ²]	n	MW	Max	Min	STA	COV
Schwalbenschwanz, PUR	5	3.4	4.9	2.4	0.9	27.6 %
SAMVAZ, PUR	5	2.3	2.6	1.9	0.3	15.3 %
SAMVAZ, MUF	4	3.4	6.1	2.4	1.8	53.9 %
Keilzinken, 10 mm, PUR	5	22.3	24.1	18.4	2.2	10.1 %
Keilzinken, 10 mm, PUR+H ₂ O	5	27.5	29.6	26.0	1.4	4.9 %
Keilzinken, 10 mm, MUF	5	21.3	22.3	20.1	0.9	4.0 %
Keilzinken, 15 mm, PUR+H ₂ O	5	74.9	84.9	67.8	6.9	9.3 %
Universalkeilzinken, PUR	5	44.4	59.7	30.4	10.5	23.6 %
Universalkeilzinken, PUR+H ₂ O	5	64.2	84.5	36.7	17.9	27.8 %
Universalkeilzinken, MUF	3	49.7	54.5	41.4	7.2	14.5 %
Universalkeilzinken, Überblattung, PUR	5	29.7	33.6	25.7	3.5	11.9 %
Universalkeilzinken, Überblattung, PUR+H ₂ O	5	37.0	40.7	35.2	2.3	6.1 %
Universalkeilzinken, Überblattung, MUF	3	40.5	43.9	38.6	2.9	7.2 %

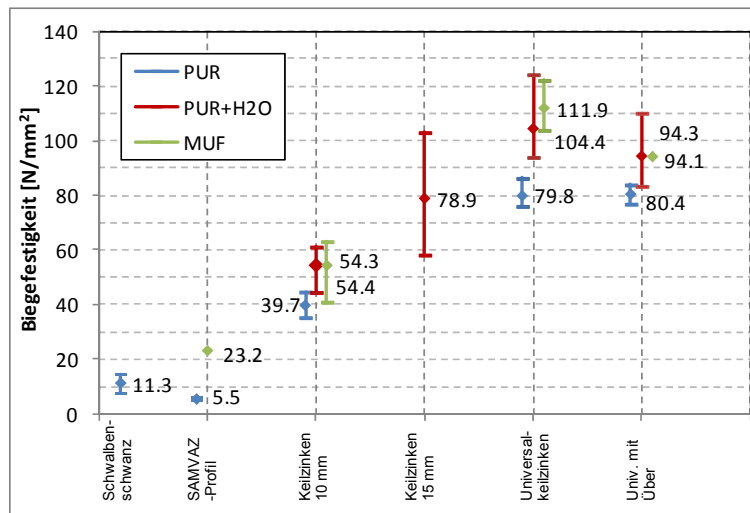


Abbildung 41: Ergebnisse der Biegefestigkeit mit Angaben von Minimal- und Maximalwerten sowie Mittelwert

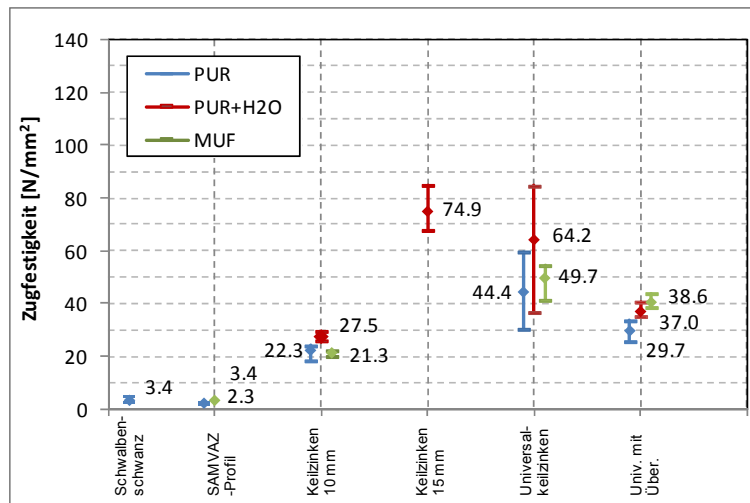


Abbildung 42: Ergebnisse der Zugfestigkeit mit Angaben von Minimal- und Maximalwerten sowie Mittelwert

10 Prüfprogramm zu Standard-Keilzinkenprofilen

10.1 Grundlagen

Für die Prüfung von Standard-Keilzinkenprofilen wurden einerseits Keilzinkenverbindungen beim Unternehmen neue Holzbau AG in Lungern/Schweiz hergestellt (industrielle Fertigung) und andererseits beim Unternehmen Grecon Dimter in Hannover/Deutschland produziert (labortechnische Fertigung). In diesem Prüfprogramm werden Standardkeilzinkenprofile und marktübliche Klebstoffe verwendet, die derzeit für die Brettschichtholzproduktion für Nadelholz eingesetzt werden, vgl. Tabelle 13 sowie Abbildung 43 und Abbildung 44.

Tabelle 13: Verwendete Keilzinkenprofile im Prüfprogramm

Zinkenlänge l	Zinkenteilung p	Breite Zingengrund b_1	Skizze
15 mm	3.8 mm	0.42 mm	
20 mm	6.2 mm	1.0 mm	

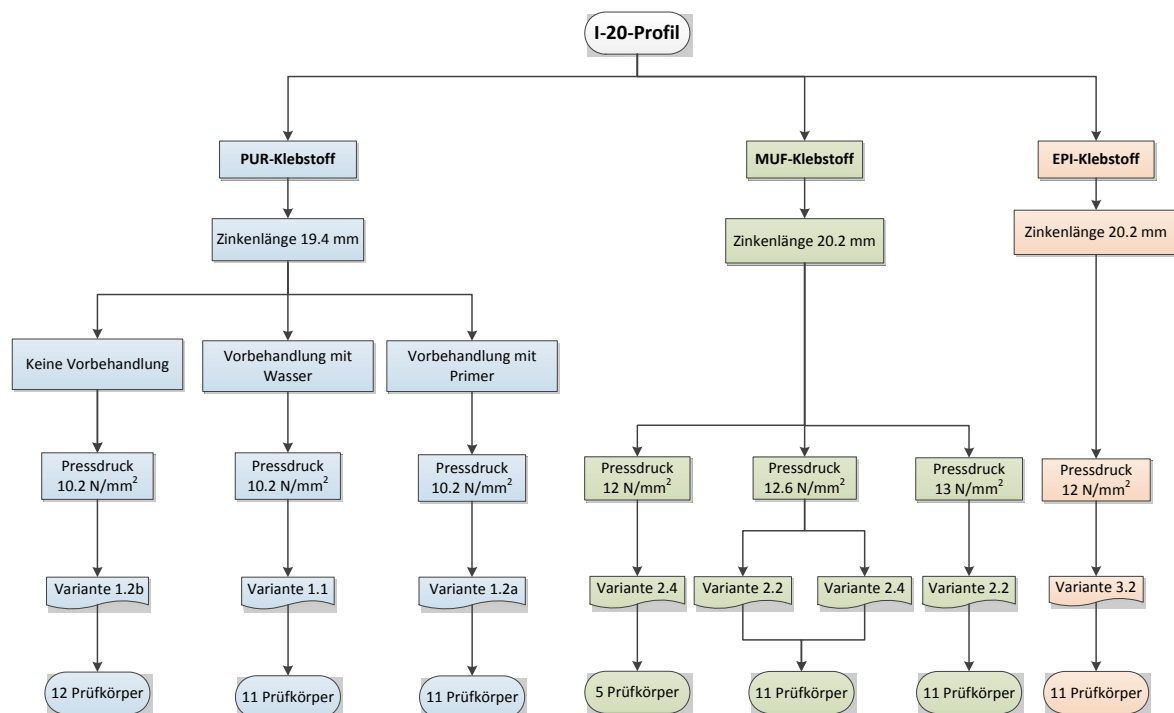


Abbildung 43: Prüfprogramm mit dem Keilzinkenprofil 20 mm Zinkenlänge

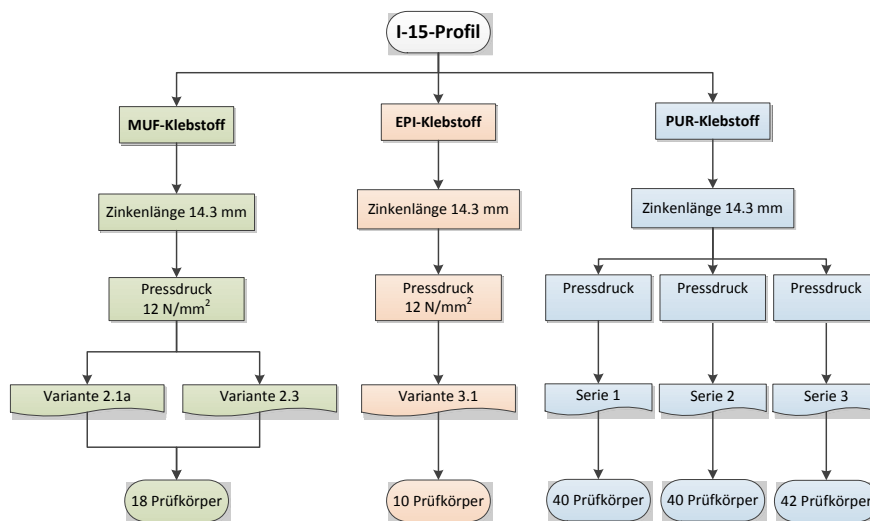
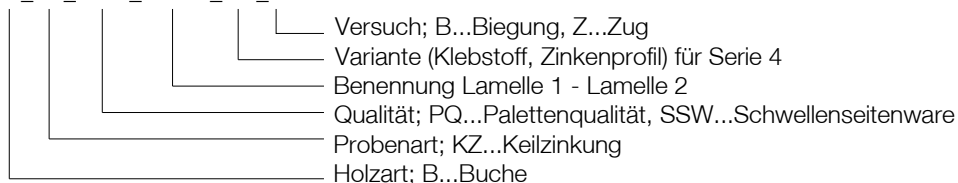


Abbildung 44: Prüfprogramm mit dem Keilzinkenprofil 15 mm Zinkenlänge

10.2 Verwendetes Material

Für die Versuche wurden Buchenholzlamellen mit den Keilzinkenprofilen 15 mm und 20 mm Zinkenlänge hergestellt, siehe Tabelle 13. Die Buchenholzlamellen entsprechen einer Qualität für Schwellenseitenware bzw. Palettenqualität. Für die Herstellung wird ein Querschnitt von 27 x 130 mm² benutzt, der dann für die Durchführung der Prüfungen auf 20 x 120 mm² gehobelt wird. Die Keilzinken werden nach den Anforderungen der EN 385:2007 hergestellt. Die Prüfkörper werden im Normklima bei einer Temperatur von 20 °C +/- 2 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % +/- 5 % bis zur Herstellung bzw. Festigkeitsprüfung gelagert. Die Prüfkörper werden wie folgt bezeichnet:

B_KZ_SSW_A1-B1_3.1_Z



10.3 Industriell und labortechnisch gefertigte Keilzinkenverbindungen

Für die industrielle Fertigung (Serie 1 bis 3) wird Polyurethanklebstoff (PUR) verwendet und die Holz-Fügeteiloberflächen mit Wasser vorbehandelt. Zudem werden bei den einzelnen Serien verschiedene produktionstechnische Anpassungen vorgenommen. In Tabelle 14 ist eine Übersicht zum Prüfprogramm mit Angaben zur Anzahl, mittlerer Rohdichte und Holzfeuchte der Prüfkörper dargestellt. Im Anhang A 1.1 bis A 1.6 sind die Prüfprotokolle angefügt.

Für die labortechnischen Fertigung (Serie 4) werden die Keilzinken mit einer Paket-Keilzinkenanlage „Ultra TT 1000“ gefräst, siehe Abbildung 45. Die hierzu verwendeten Fräser werden von der Firma Leuco zur Verfügung gestellt, siehe Abbildung 46. Es werden Varianten mit dem Polyurethanklebstoff (PUR) PURBOND HB S049, Melamin-Harnstoff-Formaldehydharz (MUF) Prefere 4546 mit Härter Prefere 5020 sowie Emulsion Polymerized Isocyanat - Klebstoff (EPI) Prefere 6151 mit Härter Prefere 6651 hergestellt. Der Klebstoffauftrag erfolgt manuell, wie in Abbildung 47 dargestellt, als Raupe (bei EPI) bzw. mittels Kamm (bei MUF und PUR). Anschliessend werden die Keilzinken in einer Stirnseitenpresse „PASH-Conti A 12/6100“ gepresst, siehe Abbildung 48. In Tabelle 14 ist eine Übersicht zum Prüfprogramm mit Angaben zur Anzahl, mittlerer Rohdichte und Holzfeuchte der Prüfkörper dargestellt. Im Anhang A 1.7 und A 1.8 sind die Prüfprotokolle angefügt.

Tabelle 14 : Prüfprogramm zu industriell und labortechnisch gefertigten Keilzinkenverbindungen,
(Anzahl Prüfkörper, Mittelwerte zur Rohdichte ρ sowie Holzfeuchte u)

Serie	Zugprüfung	Biegeprüfung
Serie 1 (industrielle Fertigung)	20 Stück $\rho = 697 \text{ kg/m}^3$ $u = 10.1 \%$	16 Stück $\rho = 697 \text{ kg/m}^3$ $u = 10.1 \%$
	Keilzinkenprofil: 15 mm Zinkenlänge Klebstoff: PUR (Vorbehandlung mit Wasser)	
Serie 2 (industrielle Fertigung)	21 Stück $\rho = 708 \text{ kg/m}^3$ $u = 11.0 \%$	21 Stück $\rho = 708 \text{ kg/m}^3$ $u = 11.4 \%$
	Keilzinkenprofil: 15 mm Zinkenlänge Klebstoff: PUR (Vorbehandlung mit Wasser)	
Serie 3 (industrielle Fertigung)	20 Stück $\rho = 713 \text{ kg/m}^3$ $u = 10.3 \%$	28 Stück $\rho = 713 \text{ kg/m}^3$ $u = 10.3 \%$
	Keilzinkenprofil: 15 mm Zinkenlänge Klebstoff: PUR (Vorbehandlung mit Wasser)	
Serie 4 (labortechnische Fertigung) vgl. Abbildung 43 und Abbildung 44	46 Stück $\rho = 748 \text{ kg/m}^3$ $u = 10.7 \%$	55 Stück $\rho = 754 \text{ kg/m}^3$ $u = 11.3 \%$
	Keilzinkenprofil: 15 mm und 20 mm Zinkenlänge Klebstoff: PUR, MUF, EPI	

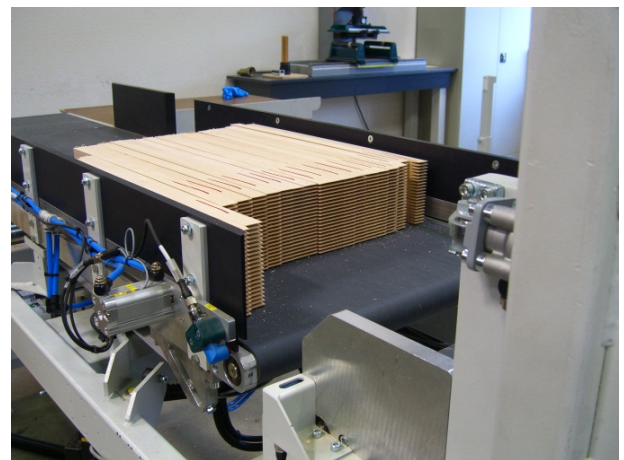


Abbildung 45: Paket-Keilzinkenanlage Ultra TT 1000



Abbildung 46: Werkzeugsatz Fräser (links: I-15-Profil, rechts: I-20-Profil)



Abbildung 47: Klebstoffauftrag (links: Raupe, rechts: mittels Kamm)



Abbildung 48: Stirnseitenpresse PASH-Conti A 12/6100

10.4 Prüfmethoden

Die Festigkeiten der Keilzinkenverbindungen wurden als Zug- und Biegeprüfung nach der Norm SN EN 408:2011 durchgeführt. Die verwendeten Prüfgeräte und Messtechnik sind in Tabelle 15 aufgelistet. Die Biegefestigkeit der Keilzinkverbindungen wird mit einer Flachkant-Biegeprüfung kontrolliert. In Abbildung 49 bzw. Abbildung 51 ist dazu die Prüfeinrichtung dargestellt. Die Vorschubgeschwindigkeit des Belastungskolbens beträgt 3 mm/min. Die Spannweite zwischen den Auflagern ist die 18-fache Höhe des Prüfkörpers (360 mm). Die Keilzinkung ist zentriert angeordnet. Die Krafteinwirkungspunkte sind im Abstand der 6-fachen Höhe (120 mm) vom Auflager angeordnet. Die Prüfung wird bis zum vollständigen Bruchversagen durchgeführt.

Für die Prüfung der Zugfestigkeit wird der Prüfkörper mittig zwischen zwei Spannbacken eingebracht, siehe Abbildung 50 bzw. Abbildung 52. Der Anpressdruck der Spannbacken beträgt 5 MPa. Die Zugprüfung erfolgt kraftgesteuert mit einer Geschwindigkeit von 500 N/s bis zum vollständigen Bruchversagen der Prüfkörper.

Tabelle 15: Prüfgeräte und -hilfsmittel

Gerät oder Messmittel	Interne Nummer
Holzfeuchtemessgerät Hydromette M4050	Nr. 2.42.4012.9383
Prüfmaschine Zwick 50 kN	Nr. 36.9489
Messverstärker Spider 8 (Hottinger Baldwin Messtechnik)	Nr. 2.42.4012.1618
Software Catman Professional (Messwertausgabe) sowie testXpert V 12.1 (Steuerung); Messtaktfrequenz = 10 Hz	-
Wegmesseinrichtung WA50_005 / 287 Wegmesseinrichtung WA50HT_222 / 223 (Hottinger Baldwin Messtechnik; Nennmessweg = 50 mm)	Nr. 42_9744 / 42_9522 Nr. 42_9516 / 42_9517
Zugprüfmaschine Walter+Bai 850 kN	Nr. 42_9490
Software Dion Pro+ (Walter+Bai AG) Version 4.71	-

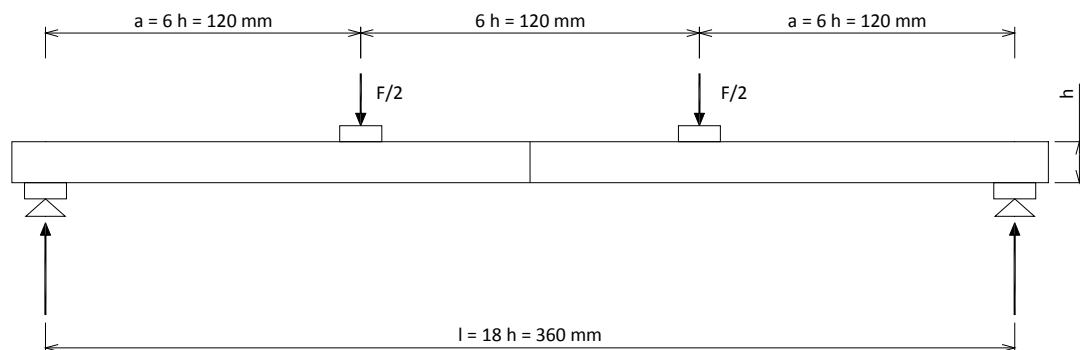


Abbildung 49: Prüfanordnung Biegeprüfung

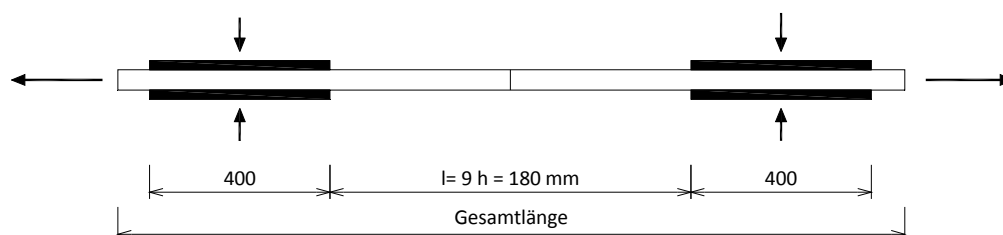


Abbildung 50: Prüfanordnung Zugprüfung

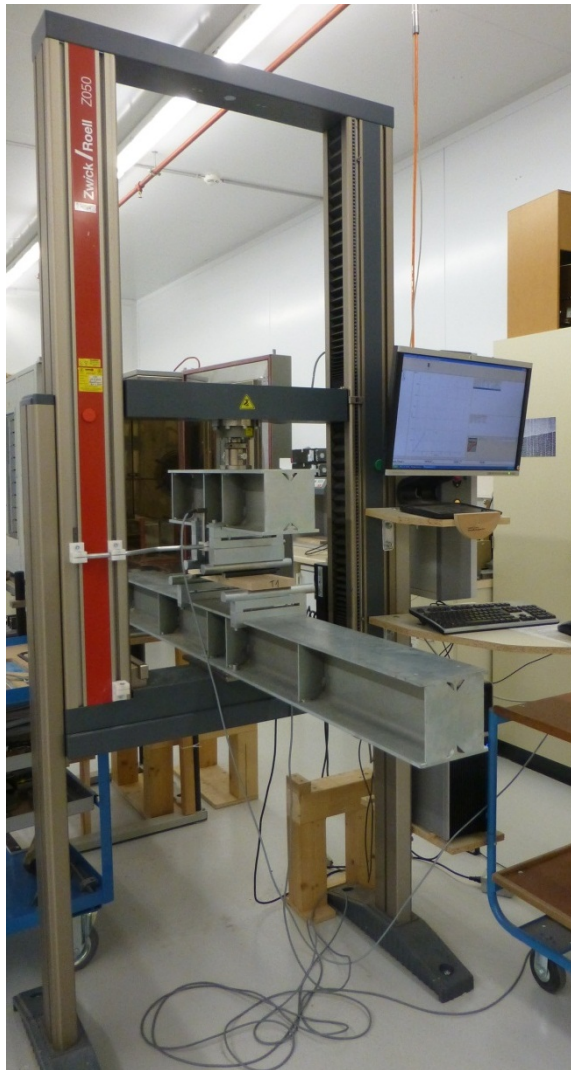


Abbildung 51: Prüfmaschine und Versuchsaufbau für Biegeprüfung

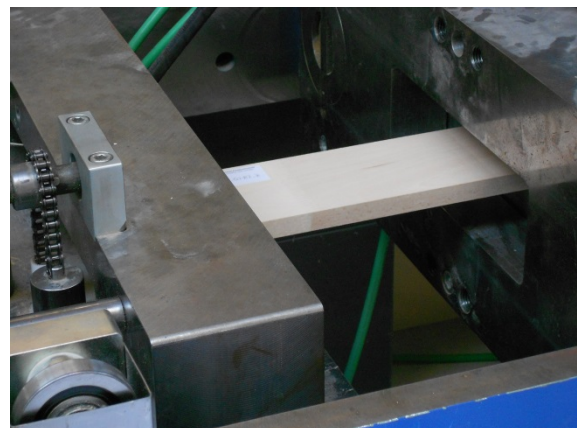
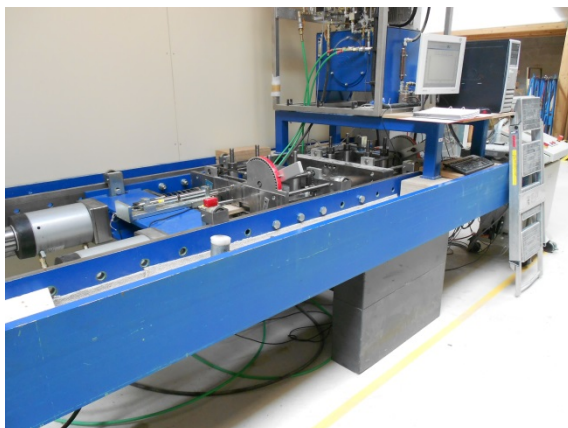


Abbildung 52: Prüfmaschine und Versuchsaufbau für Zugprüfung

10.5 Zugprüfgergebnisse

10.5.1 Allgemeines Bruchverhalten

Das Versagen der Keilzinkung während der Zugprüfung unterteilt sich in sogenannte Mischbrüche, ein Versagen der Keilzinkung entlang der Zinkenflanken und ein Holzversagen im Zinkengrund auf, vgl. Abbildung 53. Ferner kann es zum Versagen des Holzes ausserhalb der Keilzinkung durch Wuchsmerkmale, wie z.B. Faserabweichung und Äste, kommen, siehe Abbildung 54.

Die Prüfkörper mit Keilzinkenversagen entlang der Zinkenflanken wurden mittels „Wiesner-Test“ zur Beurteilung des Bruchversagens innerhalb des Klebstoffes oder des Holzes genauer analysiert. Im „Wiesner-Test“ verfärben sich Zellwände, die Lignin enthalten, bei der Behandlung mit Phloroglucin in konzentrierter Salzsäure hell-rot. So kann festgestellt werden, ob sich noch Holzfasern an den Zinkenflanken befinden oder ein Klebstoffversagen vorliegt. Bei den Prüfkörpern der Serie 1 bis 3 können noch Holzfasern an den Zinkenflanken erkannt werden, siehe Abbildung 55. Bei den Prüfkörpern der Serie 4 kommt auch Klebstoffversagen vor, siehe Abbildung 56. Teilweise sind auch nur an einer Zinkenflanke Holzfasern zu erkennen, siehe Abbildung 56.

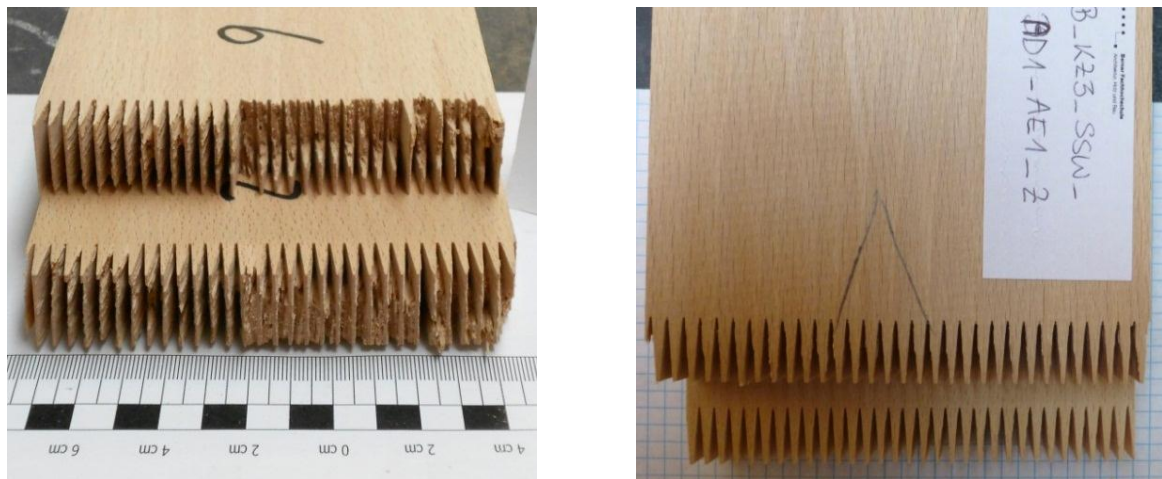


Abbildung 53: Typische Bruchbilder während der Zugprüfung, Prüfkörper mit Mischbruch (links) und Prüfkörper mit Keilzinkenversagen entlang der Zinkenflanken (rechts)



Abbildung 54: Prüfkörper mit Holzversagen ausserhalb der Keilzinkung während der Zugprüfung

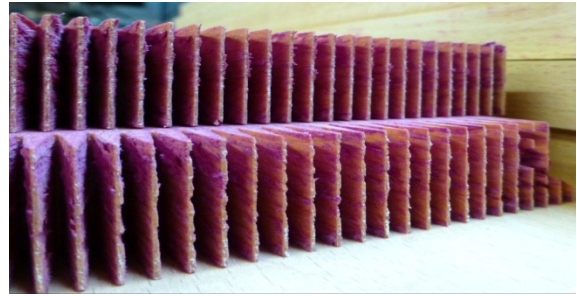


Abbildung 55: Prüfkörper mittels Wiesner-Test analysiert (Lignin färbt sich hell-rot), Serie 1-3

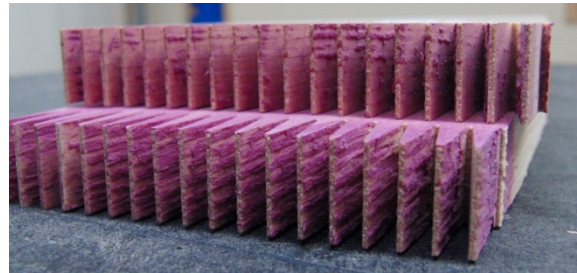
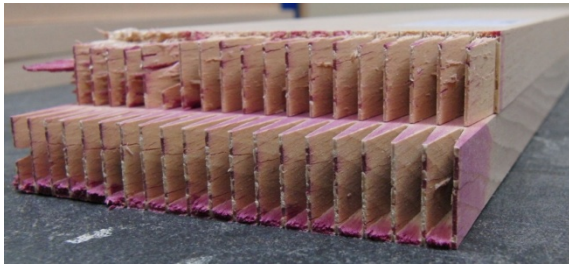


Abbildung 56: Prüfkörper mittels Wiesner-Test analysiert (Lignin färbt sich hell-rot); Serie 4 (links: keine Holzfasern an Zinkenflanken; rechts: nur einseitig Holzfasern an Zinkenflanken)

10.5.2 Bruchfestigkeiten

Die Festigkeit der Keilzinkenverbindung wird aus der Höchstlast bei Bruchversagen bestimmt und auf den ungeschwächten Brettquerschnitt bezogen. Die Zugfestigkeit $f_{t,0}$ wird wie folgt berechnet:

$$f_{t,0} = \frac{F_{\max}}{b \cdot h} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (10)$$

mit:

$F_{\max}$	Höchstlast in N
b	Prüfkörperbreite in mm
h	Prüfkörperhöhe in mm

Zur Berechnung der charakteristischen Festigkeitskennwerte (5 % - Fraktilwerte) wird die Norm SN EN 14358:2006 verwendet. Für die Prüfergebnisse wird eine logarithmische Normalverteilung angenommen.

In Tabelle 16 bis Tabelle 18 sind die statistischen Kennwerte der Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindungen aufgelistet. Die Prüfergebnisse mit dem Keilzinkenprofil I-20 und den PUR-Klebstoff werden an dieser Stelle nicht mit dargelegt und diskutiert.

Tabelle 16: Ergebnisse der Zugprüfung der Serie 1-3, PUR-Klebstoff

Kennwerte in N/mm ²	Zugfestigkeit		
	Serie 1	Serie 2	Serie 3
Mittelwert	42.66	58.52	56.54
Standardabweichung	6.96	10.41	12.57
Variationskoeffizient	16.31 %	17.79 %	22.23 %
Minimum	30.40	36.41	35.33
Maximum	57.48	85.74	82.37
Probenanzahl	n = 20	n = 21	n = 20
5 % - Fraktilwert	30.43	40.94	35.99

Tabelle 17: Ergebnisse der Zugprüfung der Serie 4, MUF-Klebstoff

Kennwerte in N/mm ²	Zugfestigkeit		
	MUF, I-20 Profil, Pressdruck = 13 N/mm ²	MUF, I-20 Profil, Pressdruck = 12.6 N/mm ²	MUF, I-15 Profil, Press- druck = 12 N/mm ²
Mittelwert	59.71	66.37	87.53
Standardabweichung	18.24	7.46	14.29
Variationskoeffizient	30.55 %	11.24 %	16.32 %
Minimum	31.33	56.83	66.18
Maximum	79.61	76.92	100.42
Probenanzahl	n = 5	n = 5	n = 9
5 % - Fraktilwert	23.41	50.07	59.73

Tabelle 18: Ergebnisse der Zugprüfung der Serie 4, EPI-Klebstoff

Kennwerte in N/mm ²	Zugfestigkeit	
	EPI, I-20 Profil, Pressdruck = 12 N/mm ²	EPI, I-15 Profil, Pressdruck = 12 N/mm ²
Mittelwert	61.05	58.71
Standardabweichung	15.73	5.74
Variationskoeffizient	25.77 %	9.78 %
Minimum	37.10	51.58
Maximum	78.39	64.48
Probenanzahl	n = 6	n = 5
5 % - Fraktilwert	30.23	45.87

10.6 Biegeprüfergebnisse

10.6.1 Allgemeines Bruchverhalten

Innerhalb der Flachkant-Biegeprüfung tritt bei allen Serien hauptsächlich Holzversagen im Zinkengrund in der Zugzone oder Keilzinkenversagen entlang der der Zinkenflanken in der Zugzone auf, siehe Abbildung 57.



Abbildung 57: Typische Bruchbilder während der Flachkant-Biegeprüfung, Prüfkörper mit Holzversagen im Zinkengrund (links) und Prüfkörper mit Keilzinkenversagen entlang der Zinkenflanken in Zugzone (rechts)

10.6.2 Bruchfestigkeiten

Die Festigkeit der Keilzinkenverbindung wird aus der Höchstlast bei Bruchversagen bestimmt und auf den ungeschwächten Brettquerschnitt bezogen. Die Biegefestigkeit f_m wird wie folgt berechnet:

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot a}{b \cdot h^2} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (11)$$

mit:

$F_{\max}$	Höchstlast in N
a	Abstand Auflager zu Lasteinleitung in mm
b	Prüfkörperbreite in mm
h	Prüfkörperhöhe in mm

Zur Berechnung der charakteristischen Festigkeitskennwerte (5 % - Fraktilwerte) wird die Norm SN EN 14358:2006 verwendet. Für die Prüfergebnisse wird eine logarithmische Normalverteilung angenommen.

In Tabelle 19 bis Tabelle 21 sind die statistischen Kennwerte der Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen aufgelistet. Die Prüfergebnisse mit dem Keilzinkenprofil I-20 und den PUR-Klebstoff werden an dieser Stelle nicht mit dargelegt und diskutiert.

Tabelle 19: Ergebnisse der Biegeprüfung der Serie 1-3

Kennwerte in N/mm ²	Biegefestigkeit		
	Serie 1	Serie 2	Serie 3
Mittelwert	67.83	79.51	81.77
Standardabweichung	6.82	9.34	10.82
Variationskoeffizient	10.06 %	11.74 %	13.23 %
Minimum	59.63	57.58	64.97
Maximum	83.31	92.16	101.98
Probenanzahl	n = 16	n = 21	n = 28
5 % - Fraktilwert	55.63	62.53	63.84

Tabelle 20: Ergebnisse der Biegeprüfung der Serie 4, MUF-Klebstoff

Kennwerte in N/mm ²	Biegefestigkeit			
	MUF, I-20 Profil, Pressdruck = 13 N/mm ²	MUF, I-20 Profil, Pressdruck = 12.6 N/mm ²	MUF, I-20 Profil, Pressdruck = 12 N/mm ²	MUF, I-15 Profil, Pressdruck = 12 N/mm ²
Mittelwert	78.84	85.43	88.51	97.43
Standardabweichung	12.28	5.15	4.08	9.49
Variationskoeffizient	15.57 %	6.03 %	4.61 %	9.74 %
Minimum	62.98	81.27	84.55	84.07
Maximum	94.27	94.84	95.01	109.94
Probenanzahl	n = 6	n = 6	n = 5	n = 9
5 % - Fraktilwert	54.31	74.40	79.08	78.57

Tabelle 21: Ergebnisse der Biegeprüfung der Serie 4, EPI-Klebstoff

Kennwerte in N/mm ²	Biegefestigkeit	
	EPI, I-20 Profil, Pressdruck = 12 N/mm ²	EPI, I-15 Profil, Pressdruck = 12 N/mm ²
Mittelwert	84.05	80.63
Standardabweichung	3.32	10.98
Variationskoeffizient	3.95 %	13.62 %
Minimum	80.32	65.23
Maximum	89.95	89.58
Probenanzahl	n = 6	n = 5
5 % - Fraktilwert	76.69	56.41

11 Mikroskopische Untersuchungen

In ersten weiter gehenden Analysen wurden mikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde mit einem Auflichtmikroskop (Leica DMLM) und UV-Licht das Eindringverhalten der verschiedenen Klebstoffe aus der Serie 1-4 näher betrachtet. Eine detaillierte Beschreibung zur Auswahl und dem generellen Vorgehen innerhalb dieser orientierenden Untersuchungen sind in der Masterthesis von SCHUSSER [35] zu finden.

In Abbildung 58 ist eine mikroskopische Aufnahme eines, mit Wasser vorbehandelten, Prüfkörpers mit PUR-Klebstoff (blau fluoreszierend) dargestellt. Im Allgemeinen wird damit die Klebstoffpenetration in Rotbuchenholz näher erläutert. Der Klebstoff dringt in die Zelllumen der Holzfasern und Gefässe ein oder wird auf die Zellwand aufgelagert. Quer zur Faser wird der Klebstoff über die Tüpfelmembran der Parenchymzellen und Gefässe transportiert. Die Eindringtiefe des Klebstoffes kann man nicht genau abschätzen. Eine reine Klebstoffschicht wird in der Fügefläche nicht ausgebildet. In Abbildung 59 ist zu erkennen, dass der Klebstoff im Bereich des Spätholzes, welches eine höhere Dichte aufweist, weniger eindringt.

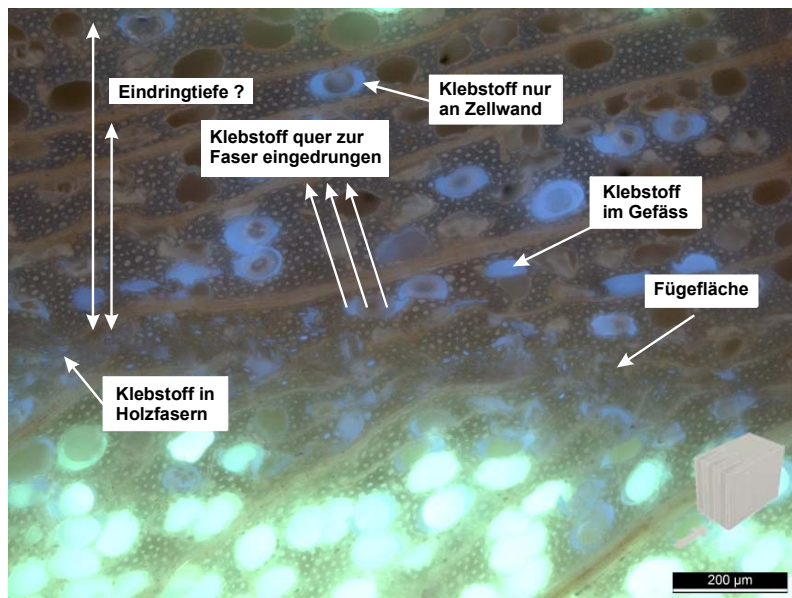


Abbildung 58: Querschnitt Prüfkörper AR2-AO1, Serie 3; 100-fache Vergrößerung

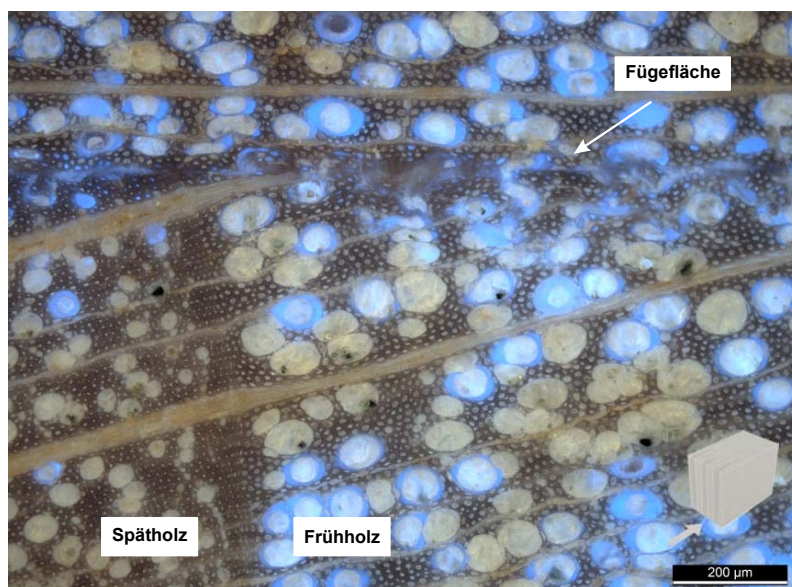


Abbildung 59: Querschnitt Prüfkörper AR2-AO1, Serie 3; 100-fache Vergrößerung

Unter dem Mikroskop können einige Besonderheiten erkannt werden, wie z. B. eine starke einseitige, herstellungsbedingte Klebstoffpenetration, vgl. Abbildung 60, der Einfluss der Vorbehandlung des Holzes, vgl. Abbildung 61, oder der Klebstoffeintritt in Längsrichtung des Holzes Im Zinkengrund, vgl. Abbildung 62. Ferner können Unterschiede zwischen den einzelnen Klebstofftypen oder zu Nadelholz genauer analysiert werden. Mit mikroskopischen Aufnahmen kann man detaillierte Informationen über die Verbindung erhalten. So kann vor allem das Eindringverhalten des Klebstoffes genauer analysiert und in zukünftigen Forschungsvorhaben zur Beurteilung der erreichbaren Festigkeiten genutzt werden.

Ferner können weitere Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop gemacht werden, um zu sehen, wie die Zelllumen mit Klebstoff gefüllt sind. Diese Aufnahmen könnten Aufschluss über den Zusammenhang mit der Festigkeit geben.

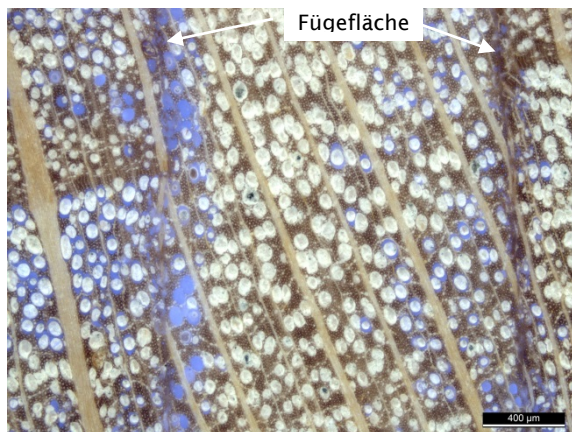


Abbildung 60: Querschnitt Prüfkörper Serie 1;
50-fache Vergrößerung

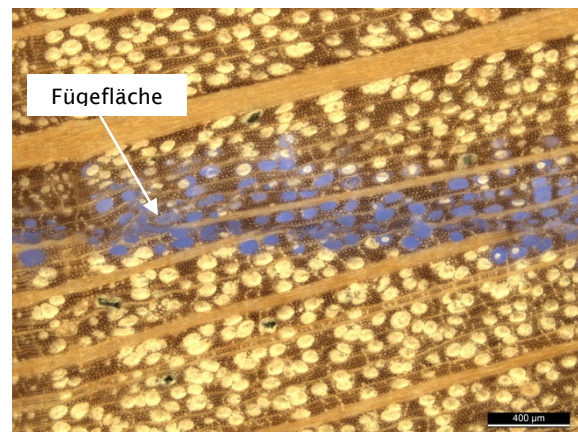


Abbildung 61: Querschnitt Prüfkörper CK1-CK3,
Serie 4; 50-fache Vergrößerung

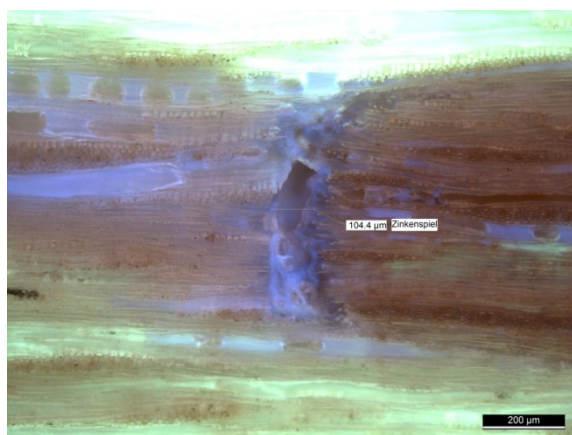


Abbildung 62: Längsschnitt Prüfkörper AR2-AO1,
Serie 3, Zinkenspitze; 100-fache Vergrößerung

12 Diskussion der Projektergebnisse

12.1 Vergleich der Zug- und Biegefestigkeit

In Abbildung 63 sind die erreichten Ergebnisse zur Zugfestigkeit der industriell und labortechnisch gefertigten Serien als Box-Plots dargestellt. Es wird das Minimum und Maximum, der Median sowie das 25 % - Quantil und 75 % - Quantil angegeben. Die Zugfestigkeiten der industriellen Serien 1-3 haben sich durch die produktionstechnischen Anpassungen in einem ersten Schritt verbessert. Führt aber im zweiten Schritt, den Serien 2 und 3 zu keiner wesentlichen Veränderung mehr. Die Streuung der einzelnen Festigkeitswerte ist für einen standardisierten qualitätsgesicherten Prozess noch nicht zufriedenstellend.

Innerhalb der Serie 4 konnten mit der Variante MUF-Klebstoff und dem I-15-Keilzinkenprofil die höchsten Zugfestigkeiten innerhalb des Prüfprogramms erreicht werden. Der Vergleich der Varianten mit dem I-15-Keilzinkenprofil zeigt, dass mit der labortechnischen Fertigung im Mittel höhere Zugfestigkeiten erreicht wurden.

Für die Serie mit dem EPI-Klebstoff können bei Betrachtung der Einzelwerte mit dem I-20-Keilzinkenprofil höhere Festigkeiten im Vergleich zum I-15-Keilzinkenprofil erreicht werden. Innerhalb der Serie mit dem MUF-Klebstoff verhält sich das gegensätzlich. Dieses Verhalten bestätigt, dass das Keilzinkenprofil einen Einfluss hat, vgl. Tabelle 8, S. 26.

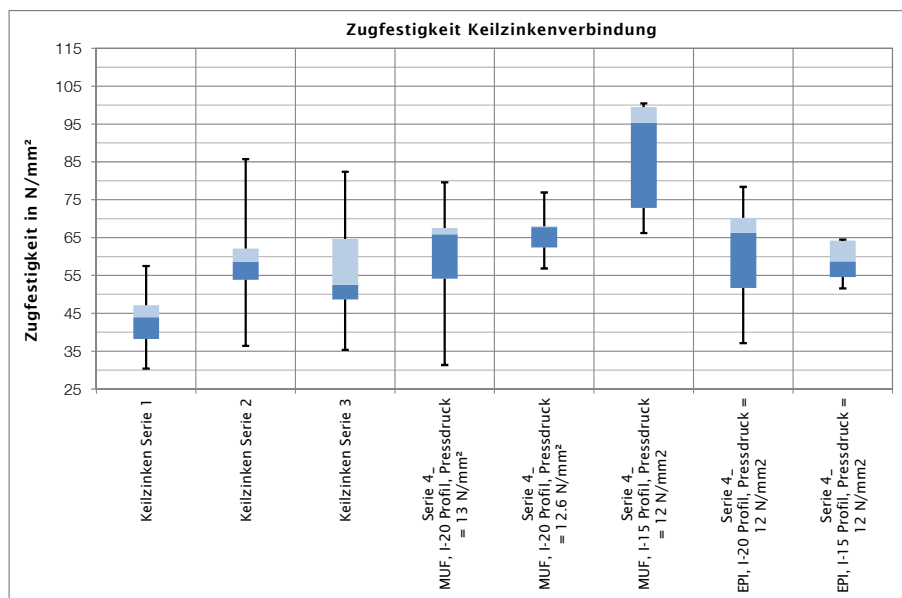


Abbildung 63: Ergebnisse zur Zugfestigkeit aller Serien
(Box-Plots mit Angabe zum Minimum, Maximum, Median, 25 % - Quantil und 75 % - Quantil)

In Abbildung 64 sind die Ergebnisse zur Biegefestigkeit aller Serien aus industrieller und labortechnischer Fertigung als Box-Plots dargestellt. Es wird ebenfalls das Minimum und Maximum, der Median sowie das 25 % - Quantil und 75 % - Quantil angegeben. Für die industrielle Serien 1-3 kann hier eine Steigerung zwischen den einzelnen Serien infolge der produktionstechnischen Anpassungen erkannt werden.

Die Serie 4 der Variante MUF-Klebstoff und I-15-Keilzinkenprofil führt auch hier zu den höchsten Biegefestigkeiten innerhalb des Prüfprogramms. Vergleicht man die Varianten MUF-Klebstoff und I-20-Keilzinkenprofil können mit abnehmendem Pressdruck höhere Festigkeiten erreicht werden. Mit dem I-20-Keilzinkenprofil und dem MUF-Klebstoff können im Vergleich zum EPI-Klebstoff ebenfalls höhere Biegefestigkeiten festgestellt werden.

In Abbildung 65 sind zusammenfassend die Zug- und Biegefestigkeit der Varianten mit MUF-Klebstoff der Prüfserie 4 bisherig in der Literatur erreichten Festigkeiten von Keilzinkenverbindungen in Buchenholz gegenübergestellt. Die innerhalb des Forschungsprojektes erreichten Er-

gebnisse sind wiederum als Box-Plots dargestellt, mit dem Minimum und Maximum, dem Median sowie dem 25 % - Quantil und 75 % - Quantil. Die in der Literatur veröffentlichten Ergebnisse sind als Spannweite mit dazugehörigem Mittelwert dargestellt.

Die Zugfestigkeit der I-20-Keilzinkenprofile ist mit Werten aus den Versuchen von AICHER et al [2], die ebenfalls ein I-20-Profil und MUF-Klebstoff verwendeten, vergleichbar. Die im Forschungsprojekt erreichte Zugfestigkeit des I-15-Keilzinkenprofils ist hingegen der Versuche von BLASS et al [4] und FRÜHWALD et al [18], die ein I-15-Profil und MUF-Klebstoff verwendeten, höher. Auch die Biegefestigkeit des I-15-Profils ist höher als die Festigkeit aus den Versuchen von FRESE und BLASS [17], obwohl die Lamellen dort aus einer maschinellen Sortierung stammen.

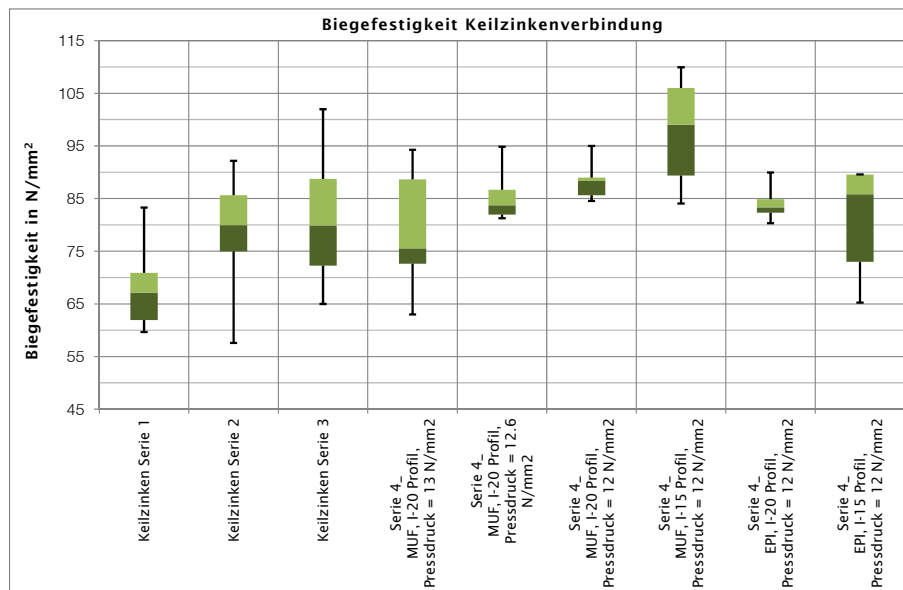


Abbildung 64: Ergebnisse zur Biegefestigkeit aller Serien (Box-Plots mit Angabe zum Minimum, Maximum, Median, 25 % - Quantil und 75 % - Quantil)

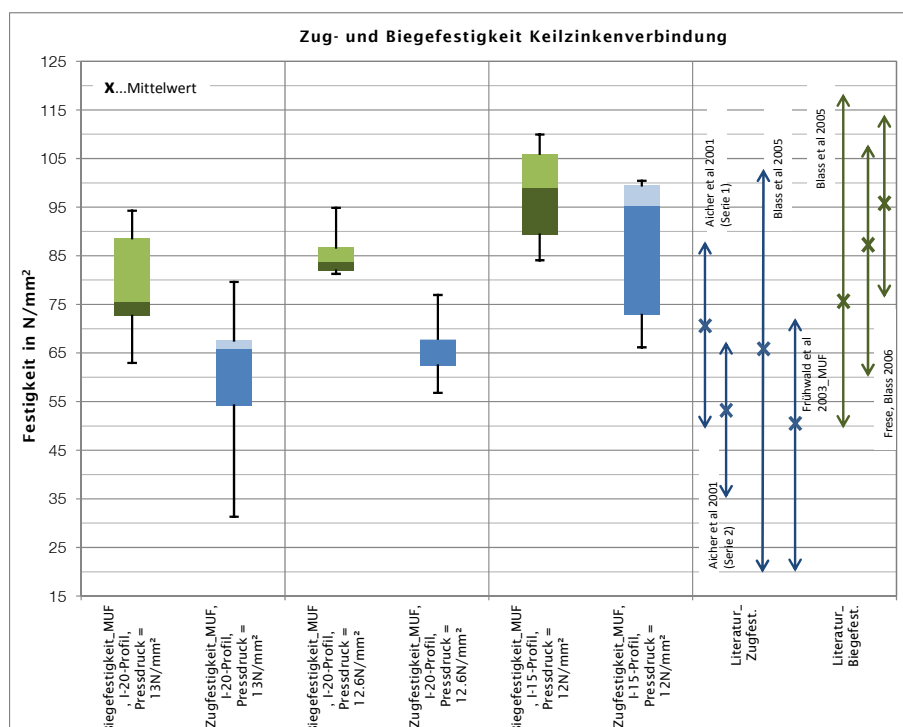


Abbildung 65: Ergebnisse zur Zug- und Biegefestigkeit der Serie 4 mit MUF-Klebstoff (Box-Plots) sowie Werte aus der Literatur (Pfeile mit Spannweite und Mittelwerte)

12.2 Vergleich der Festigkeiten mit den normativen Anforderungen

Die innerhalb des Prüfprogramms erreichten Ergebnisse zur Zug- und Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen werden im Folgenden den normativen Anforderungen gegenübergestellt. Abbildung 66 zeigt die charakteristische Zug- und Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung in Abhängigkeit der Biegefestigkeit von Brettschichtholz (BSH) laut Vorgaben aus der Norm SIA 265/1-C1:2012 bzw. Fpr EN 14080:2012 und Zulassung für Buchen-BSH Z-9.1-679 [13]. Die charakteristischen Kennwerte zur erreichten Zug- und Biegefestigkeit der Serien 1-4 sind als horizontales Niveau dargestellt.

Laut SIA 265/1-C1:2012 bzw. Fpr EN 14080:2012 wird für die Brettschichtholzklasse GL 32h für die Lamellen über das Verhältnis $f_{t,j,k} = f_{m,j,k} / 1,4$ eine Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung von mind. 29 N/mm² gefordert, vgl. Abbildung 66. Dies kann von allen Varianten des Prüfprogramms erreicht werden. Für dieselbe BSH-Klasse GL 32h wird eine Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung von mind. 41 N/mm² gefordert, vgl. Abbildung 66. Auch hier würden alle Varianten des Prüfprogramms die Anforderungen für GL 32h erfüllen.

Laut Zulassung für Buchen-BSH Z-9.1-679 [13] wird für die Brettschichtholzklasse GL 32c für die äussersten Lamellen eine Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung von mind. 55 N/mm² gefordert, die auch in den Versuchen erzielt werden konnte. Für die BSH-Klasse GL 44c und GL 48c werden jedoch mind. 65 N/mm² bzw. 69 N/mm² vorgeschrieben. Mit den Varianten mit MUF-Klebstoff sowie EPI-Klebstoff und I-20-Profil können diese Anforderungen erfüllt werden.

Die Variante mit MUF-Klebstoff und I-15-Keilzinkenprofil führt zur höchsten Zugfestigkeit von ca. 60 N/mm² und Biegefestigkeit von 78 N/mm² innerhalb des Prüfprogramms. Unter zur Grundlegung der theoretischen Erweiterung der Anforderungen lt. SIA 265/1-C1:2012 bzw. Fpr EN 14080:2012 könnten mit dieser Keilzinkenkonfiguration hochfestes Brettschichtholz der Klasse GL 48 und höher hergestellt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die erreichten Festigkeiten zunächst nur an Prüfkörpern die unter labortechnischen Bedingungen hergestellt wurden, erzielt wurden. In fortführenden Forschungsvorhaben sollte diese Variante in einem industriellen Prozess hergestellt und überprüft werden.

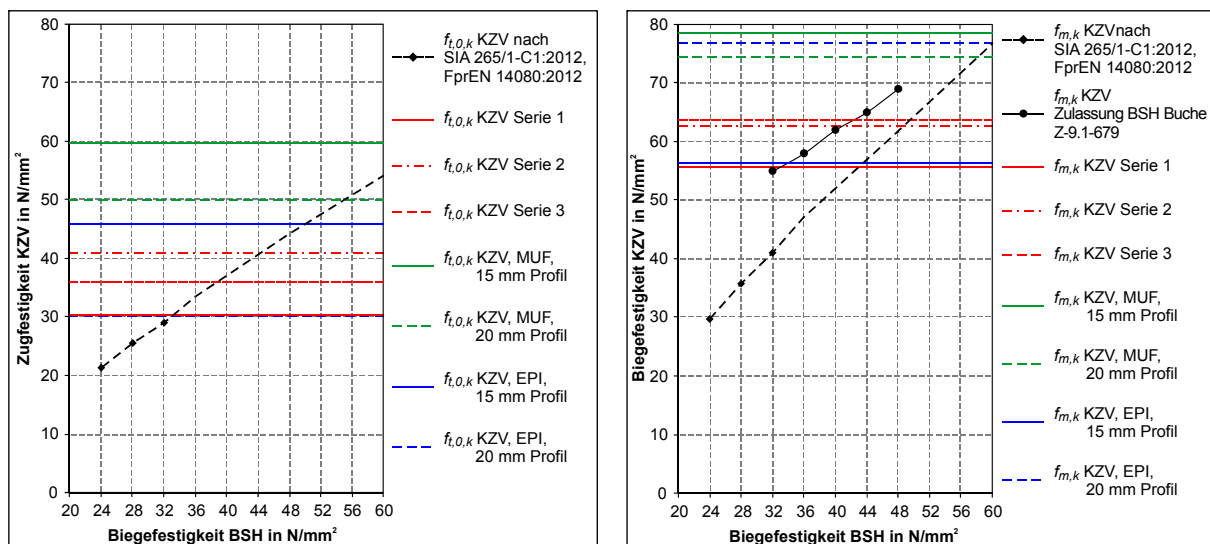


Abbildung 66: Charakteristische Kennwerte der Zugfestigkeit (links) und der Biegefestigkeit (rechts) der Keilzinkenverbindung (KZV) des Prüfprogramms in Abhängigkeit der Biegefestigkeit von BSH laut Norm oder Zulassung

13 Zusammenfassung und Ausblick

13.1 Zusammenfassung

Zurzeit wird Brettschichtholz aus Laubholz in der Schweiz von Produzenten hergestellt, die auf Nadelholz spezialisiert sind. Brettschichtholz aus Laubholz ist gegenwärtig noch ein Nebenprodukt, weshalb auch nur geringe Änderungen im Produktionsprozess gewünscht sind. Die erforderlichen Anpassungen zur Herstellung des Brettschichtholzes haben aber einen entscheidenden Einfluss auf deren Wirtschaftlichkeit. Die Analyse der einzelnen Prozessschritte zur Erreichung einer qualitätssicheren und festigkeitsrelevanten Keilzinkenverbindung für Laubholz innerhalb des Projektes zeigt, dass bereits beim Einschnitt, über die Trocknung bis hin zur Herstellung der Keilzinkenverbindungen eine Vielzahl von Parametern die Qualität sowie Quantität stark beeinflusst. Weiterführend herrscht noch eine grosse Unsicherheit in den ausführenden Firmen da anerkannte und bewährte Standardlösungen, wie sie für Nadelholz in langjährigen Prozessen entstanden sind, für Laubholz noch nicht vorhanden sind. Das Forschungsprojekt liefert hierzu erste wegweisende Ergebnisse die in weiterführenden Schritten auf die industriellen Prozesse appliziert und überprüft werden sollten.

Die Analyse zur Bereitstellung von Lamellenquerschnitten in Laubholz zeigt, dass bereits beim Einschnitt von Laubholzstämmen eine Optimierung positive Auswirkungen hätte. Zurzeit stehen wegen Überkapazität im Einschnitt bereits Brettlamellen mit 27 mm bis 30 mm Dicke zur Verfügung, die für die Herstellung von Brettschichtholz aus Buche geeignet wären. Die Reduzierung des Verlustes im Nachschnitt infolge der schwindungsbedingten Deformation des Lamellenquerschnittes im Trocknungsprozess kann durch die Wahl geeigneter Einschnittmuster erreicht werden.

Die vorhanden nationalen wie internationalen normativen oder standardisierten Regelungen zur Herstellung von Keilzinkenverbindungen enthalten im Ansatz Regelungen für Laubholz. Im Zuge der Normenüberarbeitung wäre es sinnvoll die Anforderungen für Laubholz für eine einheitliche Qualitätssicherung und -prüfung vollständig und umfassend zu integrieren. Die im Forschungsprojekt und in veröffentlichten Arbeiten durchgeführten experimentellen Untersuchungen mit Standardkeilzinkenprofilen in Buchenholz bieten dafür eine erste Grundlage.

Für Nadelholz liegen umfangreiche Untersuchungen zu verschiedenen Keilzinkenprofilen vor. Die Keilzinkengeometrie wurde langjährig optimiert, um eine ausreichende Festigkeit für die verschiedenen Brettschichtholzklassen zu erreichen. Diese Parameter sind durch die andere Holzstruktur von Laubholz nicht einfach übertragbar. Die Betrachtung von alternativen Keilzinkenverbindungen und die erreichten Ergebnisse mit Hilfe eines numerischen Simulationsmodells belegen, dass mit Erhöhung der Keilzinkenlänge eine Steigerung der Festigkeit erreichbar ist. Weiterführend Parameteranalysen mit dem numerischen Simulationsmodell zeigen sehr deutliche Tendenzen zur Reduzierung von festigkeitsmindernden Spannungskonzentrationen auf.

Die in umfangreichen experimentellen Untersuchungen erreichten Ergebnisse mit marktüblichen Standardkeilzinkenprofilen und Klebstoffen für Nadelholz, bestätigen, dass Brettschichtholz der Klasse GL 32 hergestellt werden kann. Für Brettschichtholzklassen GL 48 und höher konnten nur ausgewählte Konfigurationen ein ausreichendes Potential aufzeigen. Für Brettschichtholzklassen, die dem natürlichen Festigkeitspotential von Laubholz entsprechen, ist eine Optimierung der Keilzinkenverbindung wichtig. Mit begleitenden mikroskopischen Aufnahmen können hierzu ebenfalls hilfreiche detaillierte Informationen über die Keilzinkenverbindung und das Eindringverhalten des Klebstoffes erhalten werden.

Die in diesem Forschungsprojekt erhaltenen Grundlagen zu Keilzinkenverbindungen als Längsverbindung in Brettlamellen sind weiterzuführen im Hinblick auf die industrielle Umsetzung und Qualitätssicherung. Die in der Analyse, der numerischen Simulation oder experimentellen Untersuchung erreichten Ergebnisse vom Einschnitt bis zum fertigen Keilzinkenstoss konzentrieren sich auf Buchenholz und zeigen einführende Lösungsansätze zur Herstellung von Keilzinkenverbindungen respektive Brettschichtholz in Laubholz auf.

13.2 Zukünftige Untersuchungen

Das Forschungsprojekt konzentrierte sich auf die Anwendung von Buchenholz, dem vorherrschenden Laubholz in den Schweizer Wäldern. Das gestartete Prüfprogramm sollte für allgemeingültigere Aussagen auf andere nationale Laubhölzer, wie Esche oder Eiche, erweitert werden.

Die im Forschungsprojekt erzielten Prüfergebnisse zeigen Potential zur Festigkeitssteigerung. Eine Erweiterung der experimentellen Untersuchungen mit Keilzinkenprofilen mit längerer Zinkenlänge oder optimierter Flankenneigung sowie unter Anpassung der eingesetzten Klebstofftechnologie, z. B. offene und geschlossene Wartezeiten, Pressdruck und -zeit, könnte zu neuen fortschrittlichen Ergebnissen führen. Es ist auch notwendig den statistischen Umfang der Prüfserien zu erweitern, um die Reproduzierbarkeit der Festigkeit zu bestätigen und die allgemeingültige Anwendung in der Brettschichtholzherstellung zu ermöglichen. Anschliessend sind dringend Kriterien für die Qualitätsprüfung und -sicherung für Keilzinkenverbindungen in Laubholz zu erarbeiten.

In dem entwickelten numerischen Simulationsmodell zur Abbildung der Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen ist die Kontaktfläche zwischen Holz und Klebstoff in zukünftigen Schritten zu präzisieren, da hier ebenfalls ein wichtiger Einflussparameter zur Keilzinkenfestigkeit vorliegt. Auch die Integration von Wuchsmerkmalen wie die Faserneigung beeinflussen das Verhalten einer Keilzinkenverbindung.

Die ersten Aufnahmen mit einem Auflichtmikroskop zur Betrachtung des Eindringverhaltens von Klebstoffen in Laubholz könnten mit einem Rasterelektronenmikroskop ergänzt werden, um zu analysieren wie die Zelllumen mit Klebstoff gefüllt sind. Dies könnte Aufschluss über die mögliche Korrelation mit der Festigkeit geben.

Aktuell wurden folgende Forschungsgesuche im Zuge des „Aktionsplan Holz“ des Bundesamtes für Umwelt zur Unterstützung der Anwendung von Laubholz in Tragwerken und zur Weiterführung der gewonnenen Forschungsergebnisse eingereicht:

- Brettschichtholz aus Laubholz: Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt in die Schweiz
- Voll- und Brettschichtholz in Laubholz: Grundlagen für die Bemessung von Anschlüssen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für die Schweiz

14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Prozentualer Anteil von Laub- und Nadelholz mit vorherrschenden Baumarten, [8]	5
Abbildung 2 : Eingliederung des Forschungsziels in die Prozesskette von Laubholz	6
Abbildung 3: Astfreie Längen im Bereich der Keilzinkung, d ist der Astdurchmesser, [FprEN 14080:2012, S.83]	9
Abbildung 4: Längspressdruck bei einer Temperatur des Holzes von 20°C [FprEN 15497:2012, Fig. G.5, S. 48]	10
Abbildung 5: Keilzinkenprofil [geändert nach FprEN 15497:2012, Bild 2]	12
Abbildung 6: Übersicht der relevanten Normen und Richtlinien zur Brettschichtholzherstellung und Keilzinkung	13
Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Anforderungen lt. Norm EN 1194:1999 und EN 338:2009	14
Abbildung 8: Anforderungen an die Festigkeit der Lamellen und Keilzinkenverbindung (KZV) für die verschiedenen Brettschichtholzklassen, charakt. Biegefestigkeit $f_{m,k}$ und charakt. Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$	15
Abbildung 9: Einschnitt Eisenbahnschwellen	16
Abbildung 10: Einschnitt Rundschnitt	16
Abbildung 11: Stapelung Rundschnitt	16
Abbildung 12: Schema Trennschnitt Kern	16
Abbildung 13: Schematischer Materialfluss der Firma A+C Corbat SA	17
Abbildung 14: Ausbeute Verarbeitung Sägerei (Bilder: [9] [24] [25])	18
Abbildung 15: Einschnittbilder mit 52 mm, 40 mm und 35 mm	19
Abbildung 16: Schema Stapelung Freilufttrocknung	20
Abbildung 17: Schema Stapelung Dämpfung	20
Abbildung 18: Theoretische Verformung und Ausbeute einer Buchenlamelle mit liegenden Jahrringen	21
Abbildung 19: Vergleich theoretische Verformung einer Buchen- und Fichtenlamelle mit liegenden Jahrringen	21
Abbildung 20: Theoretische Verformung und Ausbeute einer Buchenlamelle mit stehenden Jahrringen	21
Abbildung 21: Vergleich theoretische Verformung einer Buchen- und Fichtenlamelle mit stehenden Jahrringen	21
Abbildung 22: Geometrieparameter einer Keilzinkung	23
Abbildung 23: Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Douglasie bei unterschiedlicher Zinkengrundbreite, Flankenneigung sowie Zinkenteilung (Ergebnisse aus SELBO [37])	23
Abbildung 24: Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Weisseiche bei einer Zinkengrundbreite von $b_f = 1.143$ mm und unterschiedlicher Flankenneigung sowie Zinkenteilung (Ergebnisse aus SELBO [37])	24
Abbildung 25: Keilzinken-Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Zinkenlänge, nach [42]	25
Abbildung 26: Ergebnisse zur Zug- und Biegefestigkeit aus den Versuchen von RADOVIC [30] (0...ungezinkte Proben, I...I-15-Profil, II...I-20-Profil*, III...I-20-Profil, IV...I-30-Profil)	27
Abbildung 27: Modifiziertes Keilzinkenprofil ([34] S. 6)	28
Abbildung 28: Zinkenprofil mit 45° Neigung, [16], S. 5 (links); Zinkenprofil mit Neigung $\beta = 30^\circ$, [3] (rechts)	28
Abbildung 29 : FEM Modell der Keilzinkenverbindung; symmetrischer Aufbau in Längsrichtung (parallel zur Faser)	29
Abbildung 30: Verteilung der Spannungen parallel zur Faser, Symmetrieebene am oberen Rand	29
Abbildung 31: Verteilung der Spannung quer zur Faser, Symmetrieebene am oberen Rand	30
Abbildung 32: Max. Querspannung im Bereich des Zinkengrundes in Abhängigkeit der Keilzinkenlänge	30
Abbildung 33: Max. Querspannung im Bereich des Zinkengrundes in Abhängigkeit der Zinkengrundbreite	30
Abbildung 34: Verteilung der Spannung parallel zur Faser bei einem Flankenwinkel von 2°, Symmetrieebene am oberen Rand	30

Abbildung 35: Schwalbenschwanz	31
Abbildung 36: Anlehnung an das S-Profil der Firma SAMWAZ	31
Abbildung 37: Keilzinkenprofil für Fensterrahmen, 10 mm Zinkenlänge	31
Abbildung 38: Universalkeilzinkenprofil, 50 mm Zinkenlänge	31
Abbildung 39: Universalkeilzinkenprofil in Kombination mit Überblattung, 50 mm Zinkenlänge	32
Abbildung 40: Presseinrichtung auf der Rahmenpresse	32
Abbildung 41: Ergebnisse der Biegefestigkeit mit Angaben von Minimal- und Maximalwerten sowie Mittelwert	34
Abbildung 42: Ergebnisse der Biegefestigkeit mit Angaben von Minimal- und Maximalwerten sowie Mittelwert	34
Abbildung 43: Prüfprogramm mit dem Keilzinkenprofil 20 mm Zinkenlänge	35
Abbildung 44: Prüfprogramm mit dem Keilzinkenprofil 15 mm Zinkenlänge	36
Abbildung 45: Paket-Keilzinkenanlage Ultra TT 1000	37
Abbildung 46: Werkzeugsatz Fräser (links: I-15-Profil, rechts: I-20-Profil)	38
Abbildung 47: Klebstoffauftrag (links: Raupe, rechts: mittels Kamm)	38
Abbildung 48: Stirnseitenpresse PASH-Conti A 12/6100	38
Abbildung 49: Prüfanordnung Biegeprüfung	39
Abbildung 50: Prüfanordnung Zugprüfung	39
Abbildung 51: Prüfmaschine und Versuchsaufbau für Biegeprüfung	40
Abbildung 52: Prüfmaschine und Versuchsaufbau für Zugprüfung	40
Abbildung 53: Typische Bruchbilder während der Zugprüfung, Prüfkörper mit Mischbruch (links) und Prüfkörper mit Keilzinkenversagen entlang der Zinkenflanken (rechts)	41
Abbildung 54: Prüfkörper mit Holzversagen ausserhalb der Keilzinkung während der Zugprüfung	41
Abbildung 55: Prüfkörper mittels Wiesner-Test analysiert (Lignin färbt sich hell-rot), Serie 1-3	42
Abbildung 56: Prüfkörper mittels Wiesner-Test analysiert (Lignin färbt sich hell-rot); Serie 4 (Oben: keine Holzfasern an Zinkenflanken; Unten: nur einseitig Holzfasern an Zinkenflanken)	42
Abbildung 57: Typische Bruchbilder während der Flachkant-Biegeprüfung, Prüfkörper mit Holzversagen im Zinkengrund (links) und Prüfkörper mit Keilzinkenversagen entlang der Zinkenflanken in Zugzone (rechts)	44
Abbildung 58: Querschnitt Prüfkörper AR2-AO1, Serie 3; 100-fache Vergrösserung	46
Abbildung 59: Querschnitt Prüfkörper AR2-AO1, Serie 3; 100-fache Vergrösserung	46
Abbildung 60: Querschnitt Prüfkörper Serie 1; 50-fache Vergrösserung	47
Abbildung 61: Querschnitt Prüfkörper CK1-CK3, Serie 4; 50-fache Vergrösserung	47
Abbildung 62: Längsschnitt Prüfkörper AR2-AO1, Serie 3, Zinkenspitze; 100-fache Vergrösserung	47
Abbildung 63: Ergebnisse zur Zugfestigkeit aller Serien (Box-Plots mit Angabe zum Minimum, Maximum, Median, 25 % - Quantil und 75 % - Quantil)	48
Abbildung 64: Ergebnisse zur Zug- und Biegefestigkeit der Serie 4 mit MUF-Klebstoff (Box-Plots) sowie Werte aus der Literatur (Pfeile mit Spannweite und Mittelwerte)	49
Abbildung 65: Ergebnisse zur Biegefestigkeit aller Serien (Box-Plots mit Angabe zum Minimum, Maximum, Median, 25 % - Quantil und 75 % - Quantil)	49
Abbildung 66: Charakteristische Kennwerte der Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ (links) und der Biegefestigkeit (rechts) der Keilzinkenverbindung (KZV) des Prüfprogramms in Abhängigkeit der Biegefestigkeit von BSH laut Norm oder Zulassung	50

15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Laufzeit des Projektes	7
Tabelle 2: Keilzinkengeometrien und Faktor k_f [EN 385:2007, Tabelle 1]	11
Tabelle 3: Keilzinkengeometrie	12
Tabelle 4: Ausbeuteanalyse	17
Tabelle 5: Beispielhafte Kosten der einzelnen Prozessschritte	18
Tabelle 6: Quell- und Schwindmasse, [23]	20
Tabelle 7: Theoretisch erzielbare Ausbeute im Trocknungsprozess auf $u = 12\%$, Ausgangsquerschnitt 35/130 mm	22
Tabelle 8: Darlegung und Bewertung von Keilzinkenprofilen	26
Tabelle 9: Ergebnisse zu den Versuchen von RAJCAN und KOZELOUH [31] mit verschiedenen Keilzinkenprofilen	27
Tabelle 10: Herstellungsparameter alternative Keilzinken	32
Tabelle 11: Ergebnisse der Biegeprüfung der alternativen Keilzinken (n = Probenanzahl, MW = Mittelwert, Max = Maximalwert, Min = Minimalwert, STA = Standardabweichung, COV = Variationskoeffizient)	33
Tabelle 12: Ergebnisse der Zugprüfung der alternativen Keilzinken (n = Probenanzahl, MW = Mittelwert, Max = Maximalwert, Min = Minimalwert, STA = Standardabweichung, COV = Variationskoeffizient)	33
Tabelle 13: Verwendete Keilzinkenprofile im Prüfprogramm	35
Tabelle 14 : Prüfprogramm zu industriell und labrotechnisch gefertigten Keilzinkenverbindungen, (Anzahl Prüfkörper, Mittelwerte zur Rohdichte ρ sowie Holzfeuchte u)	37
Tabelle 15: Prüfgeräte und -hilfsmittel	39
Tabelle 16: Ergebnisse der Zugprüfung der Serie 1-3, PUR-Klebstoff	43
Tabelle 17: Ergebnisse der Zugprüfung der Serie 4, MUF-Klebstoff	43
Tabelle 18: Ergebnisse der Zugprüfung der Serie 4, EPI-Klebstoff	43
Tabelle 19: Ergebnisse der Biegeprüfung der Serie 1-3	45
Tabelle 20: Ergebnisse der Biegeprüfung der Serie 4, MUF-Klebstoff	45
Tabelle 21: Ergebnisse der Biegeprüfung der Serie 4, EPI-Klebstoff	45
Tabelle 22: Prüfkörperbeschreibung zur Biegeprüfung Serie 1	59
Tabelle 23: Prüfkörperbeschreibung zur Zugprüfung Serie 1	60
Tabelle 24: Prüfkörperbeschreibung zur Biegeprüfung Serie 2	61
Tabelle 25: Prüfkörperbeschreibung zur Zugprüfung Serie 2	62
Tabelle 26: Prüfkörperbeschreibung zur Biegeprüfung Serie 3	63
Tabelle 27: Prüfkörperbeschreibung zur Zugprüfung Serie 3	64
Tabelle 28: Prüfkörperbeschreibung zur Biegeprüfung Serie 4 (MUF-Klebstoff)	65
Tabelle 29: Prüfkörperbeschreibung zur Biegeprüfung Serie 4 (EPI-Klebstoff)	66
Tabelle 30: Prüfkörperbeschreibung zur Zugprüfung Serie 4 (MUF-Klebstoff)	67
Tabelle 31: Prüfkörperbeschreibung zur Zugprüfung Serie 4 (EPI-Klebstoff)	68

16 Literaturverzeichnis

- [1] Aicher, S. und Radovic, B. (1999): Untersuchungen zum Einfluss der Keilzinkengeometrie auf die Zugfestigkeit keilgezinkter Brettschichtholz-Lamellen. In: Holz als Roh- und Werkstoff (57), S. 1–11.
- [2] Aicher, S., Höfflin, L. und Behrens, W. (2001): A study on tension strength of finger joints in beech wood laminations [Otto-Graf-Journal Vol. 12]. Stuttgart.
- [3] Ajdinaj, D. und Habibi, B. (Mai 2013): The effect of joint slope on bending strength of finger-joint connection – case of poplar wood (*Populus alba* L.). Albanien. Mai 2013. International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering
- [4] Blass, J., Frese, M. und Glos, P. (2005): Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche [Band 1 Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau]. Karlsruhe. Universitätsverlag Karlsruhe.
- [5] Bogusch, W. (2013): Konstruktive Ansätze: Bauen mit Laubholz. CH. Holzbau 3/4.2013, S. 42-47
- [6] Brändli, U.-B. (2010): Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Bern.
- [7] Brandmair, A. et al (2010): Verfahrenstechnische Optimierung von PUR-basierten Klebstoffen zur Verklebung von Laubholz und Materialkombinationen [Wald & Holz Projekt Nr. 2008.09], Eidgenössische Technische Hochschule ETH, Zürich
- [8] Bundesamt für Statistik, Hrsg. (2010): Forstwirtschaft der Schweiz, Taschenstatistik 2010, Neuchâtel.
- [9] Bundesamt für Statistik [WWW] <http://www.bfs.admin.ch> (11.12.2012)
- [10] Bundesamt für Umwelt BAFU, Hrsg. (2011): Aktionsplan Holz, Laubholz-Wettbewerb, Faktenblätter, [WWW] <http://www.bafu.admin.ch/aktionsplan-holz/10302/10308/11417/index.html?lang=de> (26.05.2013)
- [11] Bundesamt für Umwelt BAFU, Hrsg. (2013): Brettschichtholz aus Laubholz - Marktimplementierung als normiertes Bauprodukt. Wald- und Holzforschungsfonds. Eidgenössische Materialprüfanstalt EMPA. [WWW] <http://www.bafu.admin.ch/wald/01234/01238/index.html?lang=de>. (23. August 2013).
- [12] Colling, F. (1990): Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflussgrößen. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana. Karlsruhe.
- [13] Deutsches Institut für Bautechnik DIBt (2013): Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung für Brettschichtholz aus Buche und für Brettschichtholz Buchen-Hybridträger. Z-9.1-679. Berlin.
- [14] Ehlbeck, J., Colling, F. und Görlacher, R. (1985): Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. In: Holz als Roh- und Werkstoff (43), S. 333–337.
- [15] Ehlbeck, J. und Colling, F. (1987): Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen. In: Bauen mit Holz (10/87), S. 646–655.
- [16] Forest Products Laboratory, Hrsg. (1981): Finger-jointed wood products [Research paper FPL 382]. Forest Service. United States Department of Agriculture. Madison.
- [17] Frese, M. und Blass, J. (2006): Die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Buche (*Fagus sylvatica* L.). In: Holz als Roh- und Werkstoff (64), S. 433–443.
- [18] Frühwald, A., Ressel, J. und A. Bernasconi (2003): Hochwertiges Brettschichtholz aus Buchenholz, Institut für Holzphysik und mechanische Technologie, Hamburg
- [19] Gautschi, M. (2009): Entwicklung eines Konstruktions-Vollholz-Sortiments aus Laubholz für niedrige Anforderungen bezüglich Masshaltigkeit. Diplomarbeit, Berner Fachhochschule.
- [20] Gehri, E. (1985): Verbindungstechniken mit hoher Leistungsfähigkeit – Stand und Entwicklung. In: Holz als Roh- und Werkstoff (43), S. 83–88.
- [21] Gross, D. und Schmutz, A. (2010): Jahrbuch Wald und Holz. Bundesamt für Umwelt, BAFU, Bern
- [22] Hernandez, R. und Flach, D. (2002): Finger-joint in finger-jointed lumber. United States Patent Application Publication. [WWW] <http://www.freepatentsonline.com/20020076275.pdf>. (23. Juli 2013).
- [23] Kucera, V. und Gfeller, B. (1994): Einheimische und fremdländische Nutzhölzer, Zürich und Biel, Schweiz.
- [24] Landesforstinventar Schweiz [WWW] <http://www.lfi.ch> (11.12.2012)
- [25] Lüthi, T. (2009): Analyse der Schweizer Laubholz-Sägewerke, Bundesamt für Umwelt, Hasliberg
- [26] Marian, J.-E. (1968): Das Keilzinken von Holz – Erste Mitteilung: Ein neues Verfahren für die Keilzinkung von Holz und seine Grundlagen. In: Sonderdruck aus Holz als Roh- und Werkstoff, Band 26 (Heft 2, 3 und 5), S. 41–45.

- [27] Neumüller, A. und Scheibenreiter, J. (2005): Entwicklung und Optimierung von Längsverbindungen von Holz und Erarbeitung neuer Methoden zur Qualitätssicherung. In: *Holzforschung Austria*, Hrsg. Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur 4. Jahres-Evaluierung, S. 15–61.
- [28] Ozyhar, T. (2013): Moisture and time-dependent orthotropic mechanical characterization of beech wood [Dissertation], Eidgenössische Technische Hochschule ETH, Zürich
- [29] Pittaro, S. und Baumann, J. (2013): Betrachtung der Prozessschritte zur Herstellung von Buchenlamellen für Brettschichtholz. Semesterarbeit H/0801/809/13/0, Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Schweiz.
- [30] Radovic, B. (1993): Über die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen mit unterschiedlichen Verschwächungsgrad. In: *Bauen mit Holz* (3/93), S. 196–201.
- [31] Rajcan, J. und Kozelouh, B. (1963): Beitrag zum Entwerfen geklebter Keilzinkenverbindungen. In: *Holztechnologie* (4), S. 222–228.
- [32] Riberholt, H. (1990): Glulam beams bending strength in relation to the bending strength of the finger joints [CIB-W18A/23-12-3]. International council for research and innovation in building and construction - Working commission W18- Timber structures. Portugal.
- [33] Sauser, F. (2013): Theoretische und praktische Analyse zur Produktion von Brettschichtholz in Buche. Bachelorthesis, Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Biel, Schweiz.
- [34] Scheibenreiter, J., Entacher, K. und Neumüller, A. (2006): Vergleichende Untersuchungen zwischen industriell eingesetzten und einem neu entwickelten Keilzinkenprofil. In: *Holztechnologie* (47), S. 5–10.
- [35] Schusser, A. (2013): Untersuchung der Keilzinkenverbindung für Brettlamellen in Laubholz. Masterthesis, Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Biel, Schweiz.
- [36] Schweizerische Fachgemeinschaft Holzleimbau SFH, Hrsg. (2006): Richtlinien für die Herstellung von Brettschichtholz. [WWW] http://www.glulam.ch/media/richtlinien_brettschichtholz.pdf. (12. August 2012).
- [37] Selbo, M. (1963): Effect of joint geometry on tensile strength of finger joints. In: *Forest Products Journal* (13 (9)), S. 390–400.
- [38] Serrano, E. (1997): Finger-joints for laminated beams – Experimental and numerical studies of mechanical behavior [Report TVSM-3021]. Lund Institute of technology. Lund University. Schweden.
- [39] Steiger, R., Frangi, A. und Kobel, P. (2013): Brettschichtholz aus Laubholz - Marktimplementierung als Bauprodukt [Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Projekt 2011.17]. Eidgenössische Materialprüfungsanstalt EMPA; Eidgenössische Technische Hochschule ETH. Zürich.
- [40] Strickler, M. (1980): Finger-jointed dimension lumber – Past, Present and Future. In: *Forest Products Journal*, Vol. 30 (No. 9), S. 51–56.
- [41] Vanek, S. (2011): Branche will mehr Nadelholz und umdenken. *Schweizer Holz-Zeitung* 9592, S. 8.
- [42] Walford, G. (2000): Effect of finger length on finger-joint strength in radiata pine [Proceeding Wood Timber Engineering Conference]. Whistler.

17 Normen

CEN/TC 124. FprEN 14080. (2012): Holzbauwerke — Brettschichtholz und Balkenschichtholz — Anforderungen. Date: 2012-02.

CEN/TC 124. FprEN 15497. (2012): Keilzinkenverbindungen im Bauholz – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung. Date: 2012-11.

Deutsches Institut für Normung. DIN EN 385. (2007): Keilzinkenverbindung im Bauholz – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung. Berlin: Beuth Verlag.

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. SN EN 386. (2001): Brettschichtholz – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. SN 13183-1. (2002): Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. SN EN 14080. (2005): Holzbauwerke - Brettschichtholz - Anforderungen. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. SN EN 301. (2006): Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. EN 14358. (2007): Holzbauwerke - Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. SN EN 15425. (2008): Klebstoffe - Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. SN EN 408. (2011): Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

A 1 Anhang

A 1.1 Biegeprüfung Serie 1

Tabelle 22: Prüfkörperbeschreibung zur Biegeprüfung Serie 1

Nr.	Prüfkörperbenennung (B_KZ_SSW_Brett 1 - Brett 2_B)	Bemerkung Prüfkörper	Rohdichte (Brett 1+2) [kg/m ³]	Holzfeuchte Brett 1 [%]	Holzfeuchte Brett 2 [%]	Δ Holzfeuchte [%]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Länge [mm]	Bruchlast [N]	Biegefestigkeit [N/mm ²]	Bemerkung Bruchversagen
1	B_KZ_SSW_A1-B1_B	kein Zinkenspi	718.3	10.2	10.0	0.2	120.1	20.2	498.0	10349.9	77.82	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
2	B_KZ_SSW_C1-D1_B	Zinkenspi; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	709.7	10.2	10.0	0.2	120.1	20.2	498.5	9016.8	67.83	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
3	B_KZ_SSW_G1-H1_B	kein Zinkenspi	638.0	9.7	9.8	0.1	119.9	20.2	495.5	8889.4	66.67	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
4	B_KZ_SSW_I1-J1_B	kein Zinkenspi; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	689.8	9.7	10.7	1.0	120.1	20.2	497.0	8848.0	66.36	Keilzinkung in Druckzone
5	B_KZ_SSW_K1-L1_B	Zinkenspi; Riss im Zinkengrund in Brettmitte	723.8	9.8	11.2	1.4	120.1	20.2	497.0	11108.5	83.31	30 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
6	B_KZ_SSW_M1-N1_B	Zinkenspi	766.4	9.9	10.3	0.4	120.1	20.2	499.0	7950.3	59.83	70 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
7	B_KZ_SSW_O1-P1_B	kein Zinkenspi	723.9	10.0	9.9	0.1	120.1	20.2	498.0	9352.2	70.14	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
8	B_KZ_SSW_Q1-R1_B	kein Zinkenspi	692.9	9.5	10.8	1.3	120.2	20.2	497.0	8644.5	64.83	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
9	B_KZ_SSW_U1-V1_B	Zinkenspi	732.0	9.9	11.0	1.1	120.1	20.2	496.5	8023.9	60.18	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
10	B_KZ_SSW_W1-X1_B	kein Zinkenspi	712.3	9.8	10.2	0.4	120.2	20.2	498.0	8098.5	60.74	Holzversagen in Druckzone
11	B_KZ_SSW_Y1-Z1_B	kein Zinkenspi	689.0	10.3	10.9	0.6	120.1	20.2	499.0	8072.8	60.55	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
12	B_KZ_SSW_AA1-AB1_B	kein Zinkenspi	672.9	10.4	10.7	0.3	120.2	20.2	496.0	9036.8	67.78	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
13	B_KZ_SSW_AC1-AD1_B	schräg gezinkt	690.3	10.4	9.8	0.6	120.1	20.2	497.5	8310.6	62.33	30 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone
14	B_KZ_SSW_AG1-AH1_B	kein Zinkenspi; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	653.2	9.3	10.2	0.9	120.1	20.2	499.0	10026.8	75.20	Holzversagen in Druckzone
15	B_KZ_SSW_AK1-AL1_B	schief gezinkt; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	695.8	10.0	10.3	0.3	120.1	20.2	497.5	9216.8	69.13	Holzversagen in Druckzone
16	B_KZ_SSW_AM1-AN1_B	kein Zinkenspi	656.1	9.2	9.9	0.7	120.1	20.2	499.0	9764.5	73.23	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone; Holzversagen in Druckzone

A 1.2 Zugprüfung Serie 1

Tabelle 23: Prüfkörperbeschreibung zur Zugprüfung Serie 1

Nr.	Prüfkörperbenennung (B_KZ_SSW_Brett 1 - Brett 2_Z)	Bemerkung Prüfkörper	Rohdichte (Brett 1+2) [kg/m³]	Holzfeuchte Brett 1 [%]	Holzfeuchte Brett 2 [%]	Δ Holzfeuchte [%]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Länge [mm]	Bruchlast [N]	Zugfestigkeit [N/mm²]	Bemerkung Bruchversagen
1	B_KZ_SSW_A2-B2_Z	kein Zinkenspiet	715.2	10.2	10.0	0.2	120.2	20.2	1949	106250	43.77	Kelzinkenversagen
2	B_KZ_SSW_C2-D2_Z	Zinkenspiet	715.8	10.2	10.0	0.2	120.2	20.2	1911	73690	30.40	30 % Holzversagen
3	B_KZ_SSW_E2-F2_Z	kein Zinkenspiet	670.2	9.5	9.2	0.3	120.2	20.2	1901	89180	36.78	31 % Holzversagen
4	B_KZ_SSW_G2-H2_Z	kein Zinkenspiet	636.5	9.7	9.8	0.1	120.1	20.2	1907	94540	38.94	Kelzinkenversagen
5	B_KZ_SSW_I2-J2_Z	kein Zinkenspiet; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	684.9	9.7	10.7	1.0	120.1	20.2	1906	80550	33.18	Kelzinkenversagen
6	B_KZ_SSW_K2-L2_Z	schräg gezinkt; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	726.6	9.8	11.2	1.4	120.2	20.2	1909	87280	35.98	98% Kelzinkenversagen
7	B_KZ_SSW_M2-N2_Z	Zinkenspiet; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	771.8	9.9	10.3	0.4	120.2	20.2	1933	114380	47.15	98% Kelzinkenversagen
8	B_KZ_SSW_O2-P2_Z	kein Zinkenspiet; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	726.5	10.0	9.8	0.2	120.2	20.2	1911	112200	46.19	90 % Kelzinkenversagen
9	B_KZ_SSW_Q2-R2_Z	kein Zinkenspiet	697.0	9.5	10.8	1.3	120.2	20.2	1914	75830	31.23	Kelzinkenversagen
10	B_KZ_SSW_S2-T2_Z	kein Zinkenspiet	727.5	10.2	11.3	1.1	120.2	20.2	1912	139590	57.48	Kelzinkenversagen
11	B_KZ_SSW_U2-V2_Z	Zinkenspiet	738.4	9.9	11.0	1.1	120.1	20.2	1912	118710	48.96	Kelzinkenversagen
12	B_KZ_SSW_W2-X2_Z	kein Zinkenspiet	702.1	9.8	10.2	0.4	120.2	20.2	1883	101870	41.97	Kelzinkenversagen; noch wenige Holzfasern in Zinkenflanken (Wiesner-Test)
13	B_KZ_SSW_Y2-Z2_Z	kein Zinkenspiet	683.7	10.3	10.9	0.6	120.2	20.2	1894	93980	38.73	20 % Holzversagen
14	B_KZ_SSW_AA2-AB2_Z	kein Zinkenspiet; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	666.4	10.4	10.7	0.3	120.2	20.2	1928	98740	40.62	40 % Holzversagen
15	B_KZ_SSW_AC2-AD2_Z	schräg gezinkt; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	678.9	10.4	9.8	0.6	120.2	20.2	1901	124590	51.25	50 % Holzversagen
16	B_KZ_SSW_AE2-AF2_Z	kein Zinkenspiet; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	653.3	10.1	9.8	0.3	120.2	20.2	1936	107060	44.10	98% Kelzinkenversagen; noch Holzfasern in Zinkenflanken (Wiesner-Test); Rissentstehung
17	B_KZ_SSW_AG2-AH2_Z	schräg gezinkt; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	669.8	9.3	10.2	0.9	120.1	20.2	1918	84600	34.87	30 % Holzversagen
18	B_KZ_SSW_AI2-AJ2_Z	Zinkenspiet	713.2	10.8	9.5	1.3	120.2	20.2	1913	80550	33.16	98% Kelzinkenversagen
19	B_KZ_SSW_AK2-AL2_Z	kein Zinkenspiet; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	688.1	10.0	10.3	0.3	120.1	20.2	1910	87280	36.00	Kelzinkenversagen; noch wenige Holzfasern in Zinkenflanken (Wiesner-Test)
20	B_KZ_SSW_AM2-AN2_Z	kein Zinkenspiet	665.4	9.2	9.9	0.7	120.1	20.2	1912	108950	44.92	Kelzinkenversagen

A 1.3 Biegeprüfung Serie 2

Tabelle 24: Prüfkörperbeschreibung zur Biegeprüfung Serie 2

Nr.	Prüfkörperbenennung (B_KZ_PQ_Brett 1 - Brett 2_B)	Bemerkung Prüfkörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Rohdichte Brett 1 [kg/m³]	Rohdichte Brett 2 [kg/m³]	Δ Rohdichte [kg/m³]	Holzfeuchte Brett 1 [%]	Holzfeuchte Brett 2 [%]	Δ Holzfeuchte [%]	E-Modul Brett 1 [N/mm²]	E-Modul Brett 2 [N/mm²]	Δ E-Modul [N/mm²]	Fmax [N]	Biegefestigkeit [N/mm²]	Bemerkung Bruchversagen
1B_KZ2_PQ_11-19_B		kein Zinkenspielt; 11: Oberflächenrisse nahe der Keilzirkung	503	120.02	20.12	720	716	4	10.2	11.6	1.4	15366	14989	377.0	11989.12	88.83	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone
2B_KZ2_PQ_16-28_B		kein Zinkenspielt; 28: Ast Ø 2 cm im Abstand von 2 cm zur Keilzirkung	501	120.03	20.13	711	747	36	10.5	12.3	1.8	16351	12399	3952	10313.41	76.34	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone
3B_KZ2_PQ_2-15_B		kein Zinkenspielt	503	120.00	20.05	723	696	27	11.3	11.0	0.3	14423	13399	1024	9365.68	69.89	Keilzinkenversagen in Zugzone
4B_KZ2_PQ_8-21_B		kein Zinkenspielt	503	120.15	20.14	667	749	82	11.4	11.2	0.2	12518	15172	2654	11388.24	84.12	Holzversagen in Zugzone
5B_KZ2_PQ_17-30_B		kein Zinkenspielt; 17: Oberflächenrisse nahe der Keilzirkung	503	120.12	20.06	723	752	29	10.0	11.6	1.6	14970	14945	25	12373.59	92.16	Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung in Zugzone
6B_KZ2_PQ_22-26_B		kein Zinkenspielt	501	120.02	20.12	767	723	44	10.5	11.8	1.3	16117	13336	2781	10136.09	75.10	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone
7B_KZ2_PQ_9-27_B		kein Zinkenspielt	504	120.07	20.10	620	682	62	11.8	11.4	0.4	13047	12547	500	10091.75	74.82	Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung in Zugzone
8B_KZ2_PQ_3-11_B		kein Zinkenspielt; 3: Ast Ø 2 cm im Abstand von 9 cm zur Keilzirkung	502	120.13	20.07	709	720	11	11.8	10.4	1.4	13223	15366	2143	11370.63	84.59	Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung in Zugzone
9B_KZ2_PQ_18-19_B		kein Zinkenspielt	500	120.02	20.12	765	716	49	12.6	10.4	2.2	15764	14989	775	12194.31	90.35	Holzversagen in Zugzone
10B_KZ2_PQ_23-28_B		kein Zinkenspielt	503	120.02	20.09	703	747	44	11.7	12.4	0.7	16314	12399	3915	10525.87	78.23	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone
11B_KZ2_PQ_10-16_B		kein Zinkenspielt; 16: Oberflächenrisse nahe der Keilzirkung	502	120.03	20.09	685	711	26	11.3	10.1	1.2	12815	16351	3536	8253.33	61.33	Keilzinkenversagen in Zugzone
12B_KZ2_PQ_4-9_B		kein Zinkenspielt	505	120.09	20.09	732	620	112	9.5	12.3	2.8	15723	13047	2676	11869.38	88.16	Holzversagen in Zugzone
13B_KZ2_PQ_6-27_B		kein Zinkenspielt; 27: Ast Ø 2 cm im Abstand von 7 cm zur Keilzirkung	504	120.05	20.16	696	682	14	11.1	12.0	0.9	12886	12547	349	10161.28	74.97	Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung in Zugzone im Bereich des Astes
14B_KZ2_PQ_22-25_B		kein Zinkenspielt	505	120.13	20.15	767	747	20	10.4	12.0	1.6	16117	15280	837	10831.44	79.94	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone
15B_KZ2_PQ_26-29_B		kein Zinkenspielt	502	120.02	20.09	723	687	36	11.8	11.6	0.2	13336	12491	845	11159.89	82.94	Holzversagen in Zugzone
16B_KZ2_PQ_5-17_B		kein Zinkenspielt	502	120.05	20.08	727	723	4	12.2	10.0	2.2	13520	14970	1450	12379.32	92.07	Holzversagen in Zugzone
17B_KZ2_PQ_20-30_B		schräg gezinkt; Zinkenspielt	508	120.09	20.13	629	752	123	12.2	12.3	0.1	12615	14945	2330	7783.82	57.58	Holzversagen in Zugzone
18B_KZ2_PQ_7-21_B		kein Zinkenspielt; 21: Ast Ø 1 cm im Abstand von 16 cm zur Keilzirkung	503	120.08	20.14	736	749	13	12.7	11.4	1.3	13281	15172	1891	11145.12	82.38	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone
19B_KZ2_PQ_8-12_B		kein Zinkenspielt	503	120.17	20.12	667	618	49	12.7	11.0	1.7	12518	12056	462	11572.34	85.64	Holzversagen in Zugzone
20B_KZ2_PQ_2-13_B		kein Zinkenspielt	502	120.07	20.11	723	624	99	12.0	11.1	0.9	14423	13870	553	10628.54	78.80	90 % Keilzinkenversagen in Zugzone
21B_KZ2_PQ_15-24_B		kein Zinkenspielt	503	120.12	20.14	696	698	2	11.0	12.4	1.4	13399	12284	1115	9882.99	71.54	Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung in Zugzone

A 1.4 Zugprüfung Serie 2

Tabelle 25: Prüfkörperbeschreibung zur Zugprüfung Serie 2

Nr.	Prüfkörperbenennung	Bemerkung Prüfkörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Rohdichte Brett 1 [kg/m³]	Rohdichte Brett 2 [kg/m³]	Δ Rohdichte [kg/m³]	Holzfeuchte Brett 1 [%]	Holzfeuchte Brett 2 [%]	Δ Holzfeuchte [%]	E-Modul Brett 1 [N/mm²]	E-Modul Brett 2 [N/mm²]	Δ E-Modul [N/mm²]	Fmax [kN]	Zugfestigkeit [N/mm²]	Bemerkung Bruchversagen
1	B_K22_PO_11-19_Z	kein Zinkerspiel	1205	120.11	20.13	720	716	4	10.3	11.4	1.1	15366	14889	377.0	142.39	58.89	80 % Keilzinkenversagen
2	B_K22_PO_16-28_Z	kein Zinkerspiel	1208	120.03	20.11	711	747	36	9.7	11.6	1.9	16351	12399	3952	130.07	53.89	Keilzinkenversagen
3	B_K22_PO_2-15_Z	kein Zinkerspiel; 15: Ast Ø 1 cm im Abstand von 24 cm zur Keilzirkung	1198	120.01	20.11	723	696	27	11	9.9	1.1	14423	13399	1024	143.08	59.29	Holzversagen im Bereich des Astes
4	B_K22_PO_8-21_Z	kein Zinkerspiel	1206	120.03	20.13	667	749	82	11.6	11.4	0.2	12518	15172	2654	150.06	62.11	Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung und im Bereich der Keilzirkung
5	B_K22_PO_17-30_Z	kein Zinkerspiel	1210	120.03	20.11	723	752	29	9.3	11.1	1.8	14970	14945	25	150.73	62.45	Riss im Zehengrund in aussersten Zinken
6	B_K22_PO_22-28_Z	kein Zinkerspiel	1203	120.05	20.11	767	723	44	10.1	11.4	1.3	16117	13336	2781	146.15	60.54	Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung
7	B_K22_PO_9-27_Z	kein Zinkerspiel	1206	120.04	20.06	620	682	62	11.6	11.4	0.2	13047	12547	500	144.14	59.88	Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung und im Bereich der Keilzirkung
8	B_K22_PO_3-11_Z	kein Zinkerspiel	1206	120.11	20.16	709	720	11	11.7	10.5	1.2	13223	15366	2143	116.05	47.88	Riss im Zehengrund in aussersten Zinken
9	B_K22_PO_18-19_Z	kein Zinkerspiel	1206	120.08	20.09	765	716	49	11.6	11.2	0.4	15764	14899	775	131.82	54.04	80 % Keilzinkenversagen; Holzversagen im Bereich einer Fehlstelle
10	B_K22_PO_23-28_Z	kein Zinkerspiel	1204	120.03	20.14	703	747	44	11.4	11.6	0.2	16314	12399	3915	207.28	85.74	40 % Keilzinkenversagen
11	B_K22_PO_10-16_Z	kein Zinkerspiel	1203	120.1	20.12	685	711	26	11.3	10.2	1.1	12815	16351	3536	185.04	78.98	Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung und im Bereich der Keilzirkung
12	B_K22_PO_1-9_Z	kein Zinkerspiel	1205	120.05	20.13	732	620	112	9.7	12.2	2.5	15723	13047	2676	162.32	67.17	Riss im Zehengrund in aussersten Zinken
13	B_K22_PO_6-27_Z	kein Zinkerspiel	1205	120.07	20.11	696	682	14	10	11.4	1.4	12896	12547	349	87.91	36.41	50 % Keilzinkenversagen
14	B_K22_PO_22-25_Z	kein Zinkerspiel; 22: Ast Ø 2 cm im Abstand von 7 cm zur Keilzirkung	1198	120.02	20.13	767	747	20	10.8	11.6	0.8	16117	15280	837	141.62	58.02	80 % Keilzinkenversagen
15	B_K22_PO_26-29_Z	kein Zinkerspiel	1209	120.04	20.1	723	687	36	11.9	11.1	0.8	13336	12491	845	140.45	59.21	Holzversagen im Bereich der Keilzirkung
16	B_K22_PO_5-17_Z	kein Zinkerspiel	1205	120.05	20.09	727	723	4	12.1	9.4	2.7	13520	14870	1450	132.44	54.91	Riss im Zehengrund in aussersten Zinken
17	B_K22_PO_20-30_Z	kein Zinkerspiel	1205	120.06	20.11	629	752	123	11.4	11.3	0.1	12615	14945	2330	122.3	50.65	Riss im Zehengrund in aussersten Zinken
18	B_K22_PO_7-21_Z	kein Zinkerspiel; 21: Ast Ø 4 cm im Abstand von 24 cm zur Keilzirkung	1201	120.04	20.14	736	749	13	12.1	11.6	0.5	13281	15172	1891	114.23	47.25	Holzversagen im Bereich des Astes
19	B_K22_PO_8-12_Z	kein Zinkerspiel	1203	120.04	20.11	667	618	49	12.1	10.9	1.2	12518	12056	462	121.17	50.19	Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung
20	B_K22_PO_2-13_Z	kein Zinkerspiel; 13: Ast Ø 2.5 cm im Abstand von 2 cm zur Keilzirkung	1203	120.06	20.12	723	624	99	11.4	10.3	1.1	14423	13870	553	162.62	67.32	80 % Keilzinkenversagen; Holzversagen im Bereich des Astes
21	B_K22_PO_15-24_Z	kein Zinkerspiel; 15: Ast Ø 1 cm im Abstand von 14 cm zur Keilzirkung	1203	120.08	20.12	696	698	2	9.3	12	2.7	13399	12284	1115	136.23	56.39	Holzversagen im Bereich des Astes

A 1.5 Biegeprüfung Serie 3

Tabelle 26: Prüfkörperbeschreibung zur Biegeprüfung Serie 3

Nr.	Name (B_KZ3_SSW_Breit 1 - Brett 2_B)	Bemerkung zu Prüfkörper	Länge [mm]	Breite [mm]		Dicke [mm]	Dichte [kg/m³]		E-Modul [N/mm²]			Fmax [N]	Biegefestigkeit [N/mm²]	Zeit bis zum Erreichen der Höchstlast [sec]	Bruchversagen
				Mittelwert	Mittelwert		Brett 1	Brett 2	Brett 1	Brett 2	Δ E-Modul				
1	B_KZ3_SSW_AM1-AN1_B	kein Zinkenspi	403	119,57	19,885	760	646	114	13455,4	-	-	9401,31	71,58	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
2	B_KZ3_SSW_AB2-AA2_B	Zinkenspi	406	119,95	19,85	722	722		15289,4	14036,6	1252,8	10244,66	78,03	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
3	B_KZ3_SSW_AE1-AF1_B	Zinkenspi	404	119,545	19,83	779	715	64	14727,3	14872,2	144,9	9397,41	71,25	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
4	B_KZ3_SSW_R1-S1_B	kein Zinkenspi	408	119,5	19,52	734	686	38	18416,1	17639,7	776,4	10745,12	84,95	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
5	B_KZ3_SSW_Y1-AB1_B	Zinkenspi	410	119,805	19,91	677	728	51	15124	14838,1	285,9	9278,15	70,33	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
6	B_KZ3_SSW_AJ1-AK1_B	Zinkenspi	408	119,385	19,9	722	785	63	13593,3	21806,7	8213,4	10864,04	83,64	186,78	Holzversagen in Zugzone
7	B_KZ3_SSW_J1-O1_B	kein Zinkenspi; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	410	119,77	19,905	677	614	63	14350,6	-	-	10849,94	82,31	186,78	Holzversagen in Zugzone
8	B_KZ3_SSW_R2-T2_B	Zinkenspi	404	119,59	19,755	722	690	32	18728,5	15184,5	3544	13221,29	101,98	186,78	60 % Holzversagen in Zugzone
9	B_KZ3_SSW_I1-L1_B	Zinkenspi	405	119,795	19,825	677	722	45	15693,9	14826,6	867,3	10539,55	80,59	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
10	B_KZ3_SSW_AQ1-AR1_B	Zinkenspi	407	119,72	19,935	747	703	44	19454,2	13555,9	5898,3	10472,68	79,24	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
11	B_KZ3_SSW_D1-H1_B	kein Zinkenspi	413	120,095	19,645	785	658	127	14420	-	-	9138,3	70,98	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
12	B_KZ3_SSW_BS-AU_B	Zinkenspi	413	119,64	19,86	728	709	19	12565,9	16674	4108,1	13340,72	101,78	186,78	90 % Holzversagen in Zugzone
13	B_KZ3_SSW_U1-T1_B	kein Zinkenspi	409	119,88	19,9	741	665	76	17860,8	-	-	12509,84	94,86	186,78	Holzversagen in Zugzone
14	B_KZ3_SSW_L2-K2_B	Zinkenspi	409	119,67	19,84	709	734	25	14903,9	16773,1	1869,2	10192,35	77,89	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
15	B_KZ3_SSW_AW-AV_B	kein Zinkenspi; Riss im Zinkengrund in Brettmitte	409	119,755	19,915	715	703	12	15681,4	14162,5	1518,9	9564,65	72,50	186,78	Holzversagen in Zugzone ausserhalb der Keilzinken
16	B_KZ3_SSW_I2-J2_B	kein Zinkenspi	406	119,525	19,735	639	671	32	-	13524,6	-	9898,4	76,55	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
17	B_KZ3_SSW_N1-P1_B	Zinkenspi; N1: Ast mit Ø 1 m im Abstand von 8,5 cm zur Keilzinkung	415	119,66	19,83	709	728	19	15363,9	16205,3	841,4	9885,8	74,10	186,78	95 % Keilzinkenversagen in Zugzone
18	B_KZ3_SSW_K1-M1_B	Zinkenspi	406	119,84	19,85	734	677	57	18887	14519,5	2367,5	8522,08	64,97	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
19	B_KZ3_SSW_Z2-Y2_B	kein Zinkenspi	413	119,66	19,85	741	728	13	20031,2	18959,6	1071,6	10813,97	82,57	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
20	B_KZ3_SSW_AC2-AK2_B	Zinkenspi	406	119,565	19,955	760	785	25	16525	21303,2	4778,2	10455,76	79,06	186,78	60 % Holzversagen in Zugzone
21	B_KZ3_SSW_AA1-B	kein Zinkenspi	408	119,68	19,79	715	-	-	14522	-	-	11423,17	87,74	186,78	Keilzinkenversagen in Zugzone
22	B_KZ3_SSW_AD1-AC1_B	Zinkenspi; AD1: Ast mit Ø 3cm im Abstand von 7,5 cm zur Keilzinkung	412	119,595	19,815	722	766	44	18346,6	16662,7	1683,9	11964,37	91,73	186,78	95 % Keilzinkenversagen in Zugzone
23	B_KZ3_SSW_N2-M2_B	Zinkenspi	410	119,755	19,945	703	690	13	16759	13740,6	3018,4	10654,34	80,51	186,78	weggesteuert 5 mm/min; 80 % Holzversagen in Zugzone
24	B_KZ3_SSW_A2-D2_B	Zinkenspi; Jahringbreite beider Lamellen 5,7mm	404	119,645	19,99	741	766	25	16663,7	13788,9	2874,8	9068,95	68,29	186,78	70 % Keilzinkenversagen in Zugzone
25	B_KZ3_SSW_B1-BR_B	Zinkenspi	408	119,125	19,765	766	741	25	15799,6	17997,9	2188,3	13112,22	101,43	186,78	90 % Holzversagen in Zugzone
26	B_KZ3_SSW_O2-P2_B	kein Zinkenspi	408	119,805	19,595	614	728	114	-	16930,5	-	12352,24	96,67	186,78	95 % Holzversagen in Zugzone
27	B_KZ3_SSW_W1-V1_B	Zinkenspi	404	119,63	19,865	753	753		15183,3	15415,5	232,2	12296,56	93,77	186,78	50 % Holzversagen in Zugzone
28	B_KZ3_SSW_AS1-BQ_B	Zinkenspi; schräg gezinkt; Riss im Zinkengrund in äussersten 3	410	119,585	19,8	709	722	13	13189,2	13273,1	83,9	9131,4	70,12	186,78	Holzversagen in Zugzone

A 1.6 Zugprüfung Serie 3

Tabelle 27: Prüfkörperbeschreibung zur Zugprüfung Serie 3

Nr.	Name	Bemerkung zu Prüfkörper	Länge [mm]	Breite [mm] Mittelwert	Dicke [mm] Mittelwert	Dichte [kg/m³] Brett 1 Brett 2 Δ Dichte	E-Modul [N/mm²] Brett 1 Brett 2 Δ E-Modul	Fmax [N]	Zugfestigkeit [N/mm²]	Zeit bis zum Erreichen der Höchstlast [min]	Bruchversagen				
1	B_K23_SSW_J2-K2_Z	Zinkenspiet; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	1345	120.07	19.755	671	734	63	13524.6	16773.1	3248.5	115700	48.78	00:03:54	bei 85 kN Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke; Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung
2	B_K23_SSW_A02-A11_Z	Zinkenspiet; Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke	1341	119.635	19.94	677	703	26	15635.3	13555.9	2079.4	170850	71.62	00:05:45	60 % Keilzinkenversagen
3	B_K23_SSW_V2-U2_Z	Zinkenspiet; V2: Oberflächentisse; U2: Ast mit Ø 4 cm im Abstand von 2.5 cm zur Keilzirkung (nicht durch ganze Brettstärke)	1400	120.165	19.95	747	741	6	15469	17289.3	1820.3	121670	50.75	00:04:05	98 % Keilzinkenversagen
4	B_K23_SSW_D2-H2_Z	Zinkenspiet	1339	119.66	19.9	766	684	82	13786.9	14872.5	1083.6	178520	74.97	00:06:00	90 % Holzversagen
5	B_K23_SSW_Keine Nummer_Z	Zinkenspiet; Riss im Zinkengrund in äussersten 3 Zirken	1411	119.945	19.96							84580	35.33	00:02:52	bei 50 kN Riss im Zinkengrund in 3. Zinke; 95 % Holzversagen
6	B_K23_SSW_AK1-A11_Z	Zinkenspiet	1408	119.825	19.845	785	766	19	21906.7	15925.1	5881.6	123170	51.80	00:04:09	einseitiges Versagen der Keilzinken; Brett über gesamte Länge gespalten
7	B_K23_SSW_AD2-AL2_Z	Zinkenspiet	1411	119.82	19.935	722	753	31	17639.3	14295.6	3543.7	196760	82.37	00:06:37	80 % Keilzinkenversagen; 20 % Holzversagen ausserhalb der Keilzirkung
8	B_K23_SSW_Q1-R1_Z	Zinkenspiet	1343	120.095	19.975	690	734	44	15760.9	18416.1	2655.2	101230	42.20	00:03:25	Obersäte 80 % Holzversagen; durch Wiesner-Test (Einfärbung Lignin) noch Holzfasern an Keilzinkenflanken; kein Klebstoff am Zinkengrund sichtbar
9	B_K23_SSW_K1-I1_Z	Zinkenspiet	1351	119.795	19.88	734	677	57	16897	15693.9	1193.1	125280	52.60	00:04:14	bei 110 kN Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke; Keilzinkenversagen
10	B_K23_SSW_AH1-AJ1_Z	Zinkenspiet; AH1: geregelte Textur	1403	119.95	20.045	747	722	25	15825.9	13593.3	2232.6	147460	61.33	00:04:58	100 % Holzversagen
11	B_K23_SSW_V1-U1_Z	Zinkenspiet	1350	119.815	19.91	753	741	12	15415.5	17860.8	2445.3	170760	71.58	00:05:44	80 % Holzversagen
12	B_K23_SSW_AI2-AM2_Z	Zinkenspiet	1403	119.96	19.955	696	734	38	14363.2	14907.5	544.3	171300	71.56	00:05:45	60 % Holzversagen
13	B_K23_SSW_B2-BS_Z	Zinkenspiet	1339	119.655	19.825	684	728	44	11355.4	12565.9	1210.5	126750	53.43	00:04:17	30 % Holzversagen
14	B_K23_SSW_AD1-AE1_Z	Zinkenspiet	1350	120.105	20.05	722	779	57	18346.6	14727.3	3619.3	98220	40.79	00:03:19	100 % Keilzinkenversagen; durch Wiesner-Test (Einfärbung Lignin) noch Holzfasern an Keilzinkenflanken; kein Klebstoff am Zinkengrund sichtbar
15	B_K23_SSW_BG-AZ_Z	kein Zinkenspiet	1340	119.845	19.93	690	709	19	14790.9	14508.7	282.2	115500	48.36	00:03:54	bei 50 kN Riss im Zinkengrund in äussersten Zinke; 90 % Keilzinkenversagen
16	B_K23_SSW_AN2-AJ2_Z	kein Zinkenspiet	1400	120.01	19.96	703	728	25	16290.6	14966.7	1323.9	143960	60.10	00:04:51	50 % Holzversagen
17	B_K23_SSW_AP1-AO1_Z	kein Zinkenspiet; AP1: Ast mit Ø 3.5cm im Abstand von 45cm zur Keilzirkung	1410	119.835	19.97	709	671	38	17298	15154.4	2131.6	149160	62.33	00:05:01	100 % Keilzinkenversagen; durch Wiesner-Test (Einfärbung Lignin) noch Holzfasern an Keilzinkenflanken, aber eher weniger; kein Klebstoff am Zinkengrund sichtbar
18	B_K23_SSW_T2-S2_Z	kein Zinkenspiet	1404	119.97	19.965	690	690		15184.5	16995.2	1810.7	112520	46.98	00:03:48	95 % Keilzinkenversagen
19	B_K23_SSW_AM1-AI1_Z	Zinkenspiet	1407	119.75	20.03	760	684	76	13455.4	14598.3	1142.9	123130	51.33	00:04:09	100 % Keilzinkenversagen; durch Wiesner-Test noch Holzfasern an Keilzinkenflanken; kein Klebstoff am Zinkengrund sichtbar
20	B_K23_SSW_BW-BP_Z	Zinkenspiet; Riss im Zinkengrund in Brett-Mitte	1403	119.915	20.265	766	696	70	14926.6	1978.6	127600	52.51	00:04:18	95 % Keilzinkenversagen; durch Wiesner-Test noch Holzfasern an Keilzinkenflanken; kein Klebstoff am Zinkengrund sichtbar	

A 1.7 Biegeprüfung Serie 4

Tabelle 28: Prüfkörperbeschreibung zur Biegeprüfung Serie 4 (MUF-Klebstoff)

Variante	Bemerkung Prüfkörper		Abmessung Pk. in mm		Rohdichte in kg/m³		Dyn. Elastizitätsmodul in N/mm²		Alter		Jahreslänge		Klebstoffmenge in g		Herstellung Wartzeit	Bruchlast [N]	Biegefestigkeit [N/mm²]	Zeit bis zum Erreichen der Höchstlast [sec]	Bemerkung Bruchversagen		
	Breit 1	Breit 2	Länge	Breite	Dicke	Breit 1	Breit 2	Δ E-Modul	Breit 1	Breit 2	Breit 1	Breit 2	Breit 1	Breit 2							
2.2-02	CZ3	CZ4	schlag gezeichnet, Zirkenspi	1154	120	20	756,8	756,8	0,0	16361,1	16361,1	0,0			6	I-20-Prof	00:10:00	9584,1	71,88	204,8	60 % Hobversagen im Zirkengrund in Zugzone
2.2-04	DF2	DF4	schlag gezeichnet	1165	120	20	786,9	786,9	0,0	17265,4	17265,4	0,0			4	I-20-Prof	00:10:00	8397,1	62,98	171,7	60 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.2-06	BW1	BW4	Zirkenspi	1167	120	20	705,9	705,9	0,0	18222,1	18222,1	0,0			6	I-20-Prof	00:07:17	10173,2	76,30	173,2	Hobversagen entlang der Zirkentanke in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.2-08	DW2	DW4	kein Zirkenspi; DW4: u = 10,7%	1165	120	20	705,9	705,9	0,0	18979,7	18979,7	0,0			6	I-20-Prof	00:07:17	12865,8	92,74	224,0	Klebstoffversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.2-10	HZ3	HZ4	kein Zirkenspi	1167	120	20	784,2	784,2	0,0	20161,2	20161,2	0,0			8	I-20-Prof	00:06:39	12688,7	94,27	212,2	80 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.2-11	OV2	OV4	kein Zirkenspi	1165	120	20	803,1	803,1	0,0	20648,1	20648,1	0,0			2	I-20-Prof	00:06:39	9880,4	74,85	142,2	80 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.4-02	CZ2	EV1	Zirkenspi	1100	120	20	756,8	696,7	60,2	16361,1	16351,3	309,8			8	I-20-Prof	00:06:05	10857,9	81,43	250,06	60 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.4-05	BR2	BR4	kein Zirkenspi	1095	120	20	786,2	786,2	0,0	18068,0	18068,0	0,0			6	I-20-Prof	00:09:51	11679,1	87,59	316,51	80 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.4-08	DY2	DY3	Zirkenspi	1102	120	20	743,0	743,0	0,0	18354,9	18354,9	0,0			10	I-20-Prof	00:09:51	12645,7	94,84	227,55	80 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.2-12	FK3	FG2	Zirkenspi	1162	120	20	689,7	710,6	20,8	16774,0	16309,1	464,9			8	I-20-Prof	00:05:30	11192,6	83,94	218,4	50 % Hobversagen im Zirkengrund in Zugzone
2.2-13	HA2	FG1	schlag gezeichnet	1165	120	20	712,9	747,6	34,7	17405,0	16386,6	818,4			8	I-20-Prof	00:05:30	10855,5	81,27	190,3	50 % Hobversagen im Zirkengrund in Zugzone
2.2-14	HA3	HA3	schlag gezeichnet	1165	120	20	697,0	697,0	0,0	17286,4	17286,4	0,0			4	I-20-Prof	00:05:30	11133,2	83,50	215,5	60 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.4-10	HM1	HM3	kein Zirkenspi	1100	120	20	735,1	735,1	0,0	19763,2	19763,2	0,0			8	I-20-Prof	00:09:30	11273,7	84,55	166,88	80 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.4-11	EH1	EH2	minimales Zirkenspi	1095	120	20	788,4	788,4	0,0	19893,9	19893,9	0,0			2	I-20-Prof	00:09:30	11864,7	88,98	176,59	80 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.4-12	DK1	DK2	Zirkenspi	1075	120	20	800,8	800,8	0,0	20506,0	20506,0	0,0			2	I-20-Prof	00:09:30	12688,3	95,01	205,79	80 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.4-13	DZ2	DZ3	Zirkenspi	1100	120	20	719,8	719,8	0,0	18884,0	18884,0	0,0			4	I-20-Prof	00:09:30	11780,8	88,36	234,11	80 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.4-14	DG1	DG2	minimales Zirkenspi	1100	120	20	777,7	777,7	0,0	17254,2	17254,2	0,0			8	I-20-Prof	00:08:15	11416,7	85,63	218,65	100 % Hobversagen im Zirkengrund in Zugzone
2.2-03	EU2	EU4	Zirkenspi	1100	120	20	784,6	784,6	0,0	20792,5	20792,5	0,0			4	I-15-Prof	00:08:15	13202,3	99,02	251,84	Hobversagen ausserhalb der Klebkörnung in Zugzone
2.2-06	EC3	ED1	minimales Zirkenspi	1178	120	20	754,5	759,2	4,6	18788,8	21397,3	2578,6			8	I-15-Prof	00:10:15	11209,9	84,07	200,80	80 % Hobversagen im Zirkengrund in Zugzone
2.2-08	EG1	EL4	Zirkenspi	1175	120	20	740,6	733,7	6,9	16589,9	16787,3	197,4			8	I-15-Prof	00:10:15	13479,8	101,10	255,34	60 % Hobversagen im Zirkengrund in Zugzone
2.2-11	EH3	FM3	schlag gezeichnet, Zirkenspi	1175	120	20	788,4	740,6	27,8	16983,9	18442,8	540,9			4	I-15-Prof	00:08:01	12539,1	94,04	212,40	80 % Hobversagen im Zirkengrund in Zugzone
2.2-13	BI3	B4	Zirkenspi	1175	120	20	784,6	784,6	0,0	17087,4	17087,4	0,0			4	I-15-Prof	00:08:01	11916,0	89,37	218,40	100 % Hobversagen im Zirkengrund in Zugzone
2.2-14	FO1	FO2	Zirkenspi	1180	120	20	692,0	692,0	0,0	15645,2	15645,2	0,0			4	I-15-Prof	00:08:01	11491,5	86,19	246,85	80 % Hobversagen im Zirkengrund in Zugzone
2.1a-11	EO1	EO2	Zirkenspi	1776	120	20	773,1	773,1	0,0	16639,4	16639,4	0,0			2	I-15-Prof	00:10:00	14688,3	109,94	239,4	60 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.1a-13	GW1	GW2	schlag gezeichnet	1180	120	20	766,3	766,3	0,0	21200,0	21200,0	0,0			2	I-15-Prof	00:10:00	14132,3	105,99	259,6	80 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)
2.1a-15	HW1	HZ2	Zirkenspi	1176	120	20	789,1	789,1	0,0	21465,4	21465,4	0,0			2	I-15-Prof	00:10:00	14282,9	107,12	227,0	80 % Kalziumversagen in Zugzone (kein Klebstoffversagen)

Tabelle 29: Prüfkörperbeschreibung zur Biegeprüfung Serie 4 (EPI-Klebstoff)

Bemerkung Prüfkörper	Bemerkung Prüfkörper		Abmessung Pk in mm			Rohdichte in kg/m ³			Dyn. Elastizitätsmodul in N/mm ²			Äste		Jahrmittelage		Klebstoffmenge in g		Klebstoffprofil	Herstellung Wertzeit	Bruchlast [N]	Biegefestigkeit [N/mm ²]	Zeit bis zum Erreichen der Hochlast [sec]	Bemerkung Buchversagen
	Brett 1	Brett 2	Länge	Breite	Dicke	Brett 1	Brett 2	Δ Rohdichte	Brett 1	Brett 2	Δ E-Modul	Brett 1	Brett 2	Brett 1	Brett 2								
Zirkenspiel; CV1: Risse vorhanden; CWA: u = 8,3%	OW4	OW2	1085	120	20	743,0	743,0	0,0	18948,2	18948,2	0,0			Halbrift	Halbrift	20	14	I-20-Profil	00:05:59	11994,0	89,56	239,62	80 % Kalziumversagen in Zugzone trock. Holzfasern an Zirkenspielen
minimales Zirkenspiel	HS4	HS1	1088	120	20	753,0	753,0	0,0	19914,8	19914,8	0,0			Halbrift	Halbrift	6	8	I-20-Profil	00:05:59	11338,6	85,19	202,62	80 % Kalziumversagen in Zugzone trock. Holzfasern an Zirkenspielen
Zirkenspiel	DK4	DK3	1100	120	20	800,8	800,8	0,0	20506,0	20506,0	0,0			Halbrift	Halbrift	2	8	I-20-Profil	00:05:59	10959,2	82,19	148,00	100 % Kalziumversagen in Zugzone (keine Holzfasern an den Flanken); nach Wiener-Test keine Holzfasern an Flanken sichtbar
Zirkenspiel	BY4	BY1	1066	120	20	740,6	740,6	0,0	17261,2	17261,2	0,0			Seitenware	Seitenware	14	14	I-20-Profil	00:04:15	10709,7	80,32	213,54	80 % Kalziumversagen in Zugzone Holzfasern ersichtl. an Zirkenspielen
Zirkenspiel	OV3	OV1	1094	120	20	803,1	803,1	0,0	20648,1	20648,1	0,0			Seitenware	Seitenware	14	12	I-20-Profil	00:04:15	11183,3	83,88	158,00	100 % Kalziumversagen in Zugzone (keine Holzfasern an den Flanken); nach Wiener-Test keine Holzfasern an Flanken sichtbar
Zirkenspiel	ON1	BS1	1095	120	20	738,3	824,0	85,6	19058,6	19578,4	517,8		Ø 3 mm; Abstand 36 cm	Seitenware	Seitenware	?	?	I-20-Profil	00:04:45	11034,8	82,76	177,68	80 % Kalziumversagen in Zugzone Holzfasern ersichtl. an Zirkenspielen
schliff geätzt; Zirkenspiel	CJ4	CJ3	1106	120	20	814,7	814,7	0,0	18008,4	18008,4	0,0			Halbrift	Halbrift	4	2	I-15-Profil	00:04:45	8696,8	65,23	149,13	80 % Kalziumversagen in Zugzone trock. Holzfasern an Zirkenspielen
Zirkenspiel	FL1	FL2	1110	120	20	712,9	712,9	0,0	17202,0	17202,0	0,0			Halbrift	Halbrift	24	4	I-15-Profil	00:04:45	9733,1	73,00	164,47	80 % Kalziumversagen in Zugzone trock. Holzfasern an Zirkenspielen
Zirkenspiel; EO3: u = 8,9 %	EO3	EO4	1180	120	20	773,1	773,1	0,0	18558,4	18558,4	0,0			Seitenware	Seitenware	4	4	I-15-Profil	00:05:15	11438,9	85,80	183,61	80 % Holzversagen im Zirkengrund in Zugzone
Zirkenspiel; DO1: u = 10,9 %	DO1	DO2	1180	120	20	787,3	787,3	0,0	20181,8	20181,8	0,0		Ø 10 mm/Abstand 28 cm	Halbrift	Halbrift	4	8	I-15-Profil	00:05:15	11941,6	89,56	228,77	80 % Kalziumversagen in Zugzone trock. Holzfasern an Zirkenspielen
Zirkenspiel; EK1: u = 10,6 %	EK1	ET3	1084	120	20	782,3	782,3	0,0	18557,7	19403,4	154,3			Seitenware	Seitenware	10	6	I-15-Profil	00:03:30	11944,5	89,59	182,80	80 % Kalziumversagen in Zugzone trock. Holzfasern an Zirkenspielen

A 1.8 Zugprüfung Serie 4

Tabelle 30: Prüfkörperbeschreibung zur Zugprüfung Serie 4 (MUF-Klebstoff)

Varianz	Brett 1	Brett 2	Bemerkung Prüfkörper	Abmessung Pk. in mm	Rohdichte in kg/m³		Dym. Elastizitätsmodul in N/mm²		Asse		Jahreslänge		Klebstoffmenge in g		Klebstoffprofil	Herstellung	Bruchlast [kN]	Zugfestigkeit [N/mm²]	Zeit bis zum Erreichen der Höchstlast [min]	Bemerkung Bruchversagen
	Länge	Breite	Dicke	Brett 1	Brett 2	Brett 1	Brett 2	A E-Modul	Brett 1	Brett 2	Brett 1	Brett 2	Brett 1	Brett 2		Wartzeit				
2.2-01	1165	120	20	761,5	761,5	0,0	16340,3	0,0			Seitenware	Seitenware	7	8	I-20-Profil	01.10.00	130,1	54,2	00:04:23	95 % Holzversagen (Holzbruch im Zinkenlängs)
2.2-03	1170	120	20	747,6	747,6	0,0	16596,6	0,0			Holzbrift	Holzbrift	4	6	I-20-Profil	01.10.00	75,2	31,3	00:02:34	80 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.2-05	1165	120	20	755,9	755,9	0,0	18222,1	0,0			Holzbrift	Holzbrift	12	8	I-20-Profil	00:07:17	191,1	79,6	00:05:25	70 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.2-07	1168	120	20	755,9	755,9	0,0	18979,7	0,0			Holzbrift	Holzbrift	8	4	I-20-Profil	00:07:17	162,2	67,6	00:05:28	95 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.2-09	1170	120	20	784,2	784,2	0,0	20161,2	0,0			Seitenware	Seitenware	5	6	I-20-Profil	00:06:39	158,1	65,9	00:05:20	95 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.4-01	1086	120	20	695,7	695,7	0,0	16051,3	0,0			Holzbrift	Holzbrift	10	2	I-20-Profil	00:06:05	149,8	62,4	00:05:03	80 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.4-03	1100	120	20	715,2	715,2	0,0	17257,9	0,0			Holzbrift	Holzbrift	6	10	I-20-Profil	00:06:05	163,1	68,0	00:05:29	100 % Holzversagen (Holzbruch im Zinkenlängs)
2.4-04	1083	120	20	796,2	796,2	0,0	18068,0	0,0			Holzbrift	Holzbrift	12	6	I-20-Profil	00:09:51	184,6	76,9	00:06:13	100 % Holzversagen (Holzbruch im Zinkenlängs)
2.4-06	1105	120	20	697,0	697,0	0,0	17286,4	0,0			Seitenware	Seitenware	14	10	I-20-Profil	00:09:51	162,7	67,8	00:05:29	95 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.4-07	1105	120	20	740,6	740,6	0,0	18442,9	0,0			Holzbrift	Holzbrift	8	4	I-20-Profil	00:09:51	136,4	56,8	00:04:35	100 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.4-01	1107	120	20	787,8	787,8	0,0	21995,0	0,0			Holzbrift	Holzbrift	6	6	I-15-Profil	00:08:15	232,2	96,7	00:07:48	100 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.5-02	1109	120	20	765,1	765,1	0,0	20954,4	0,0			Seitenware	Seitenware	12	8	I-15-Profil	00:08:15	228,7	95,3	00:07:41	97 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.5-04	1180	120	20	749,9	712,9	37,0	19279,5	1825,2	45,7	Ø 5 mm; Abstand 15 cm	Holzbrift	Holzbrift	2	14	I-15-Profil	00:08:15	174,9	72,9	00:05:53	95 % Holzversagen (Holzbruch im Zinkenlängs)
2.5-07	1175	120	20	782,3	782,3	0,0	19403,4	0,0		Ø 8 mm; Abstand 30,5 cm	Seitenware	Seitenware	2	2	I-15-Profil	01:10:15	241,0	100,4	00:08:05	60 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.5-09	1174	120	20	745,3	745,3	0,0	17944,5	0,0			Holzbrift	Holzbrift	6	10	I-15-Profil	01:10:15	158,8	66,2	00:05:21	100 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.5-10	1175	120	20	824,0	824,0	0,0	19576,4	0,0			Seitenware	Seitenware	4	6	I-15-Profil	00:08:01	165,6	69,0	00:05:35	100 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.5-12	1177	120	20	730,5	730,5	0,0	17835,3	0,0			Seitenware	Seitenware	6	6	I-15-Profil	00:08:01	210,1	87,5	00:07:04	95 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.1a-12	1175	120	20	765,3	765,3	0,0	21269,0	0,0			Holzbrift	Holzbrift	7	2	I-15-Profil	01:10:00	240,8	100,3	00:08:01	70 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)
2.1a-14	1176	120	20	789,1	789,1	0,0	21465,4	0,0			Holzbrift	Holzbrift	?	6	I-15-Profil	01:10:00	238,7	99,5	00:08:01	70 % Holzversagen (Holzbruch an Zinkenlängs)

Tabelle 31: Prüfkörperbeschreibung zur Zugprüfung Serie 4 (EPI-Klebstoff)

Variante	Brett 1	Brett 2	Bemerkung Prüfkörper	Abmessung Pk in mm	Dichte in kg/m ³	Dyn. Elastizitätsmodul in N/mm ²	Äste	Jahreslänge	Klebstoffmenge in g	Kalzikenprofil	Herstellung Wartezeit	Buchlast [kN]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Zeit bis zum Erreichen der Haltbarkeit [min]	Bemerkung Bruchversagen
3.2-02	CW1	CW3	Zinnenspel	Länge 1100 Breite 120	Brett 1 743,0 Brett 2 743,0	Brett 1 18948,2 Brett 2 18948,2	Brett 1 Brett 2	Brett 1 Halbrift Brett 2 Halbrift	Brett 1 4 Brett 2 2	I-20-Profil	00:05:00	89,1	37,1	00:03:01	70 % Kalzikenversagen (wenig Holzfasern an Zinkenflanken), Klebstoffversagen
3.2-04	HS2	HS3	kein Zinnenspel	1100 120	753,0 753,0	19914,8 19914,8		Halbrift Halbrift	6 10	I-20-Profil	00:05:59	188,1	78,4	00:06:19	90 % Holzversagen (Holzbruch im Zinnenspel)
3.2-09	FF1	FF3	Zinnenspel; FF1: Holzleuchte = 9,8%	1105 120	736,0 736,0	16289,0 16289,0		Seitenware Seitenware	8 12	I-20-Profil	00:04:15	112,5	46,9	00:03:48	97 % Kalzikenversagen (hoch Holzfasern an Zinkenflanken; nach Wiesner-Test nur Holzfasern an Zinkenflanken)
3.2-10	BY2	BY3	Zinnenspel; BY2: Holzleuchte = 11,2 %	1100 120	740,6 740,6	17261,2 17261,2		Seitenware Seitenware	38 18	I-20-Profil	00:04:15	198,8	66,2	00:05:20	100 % Kalzikenversagen (hoch Holzfasern an Zinkenflanken; aber nur einseitig; nach Wiesner-Test einseitig Holzfasern an Flanken erkennbar)
3.2-12	HW2	HW4	Zinnenspel	1100 120	765,3 765,3	21359,9 21359,9		Halbrift Halbrift	16 12	I-20-Profil	00:04:15	159,1	66,3	00:08:54	100 % Kalzikenversagen (wenig Holzfasern an Zinkenflanken; aber nur einseitig; nach Wiesner-Test keine Holzfasern an Flanken erkennbar)
3.2-14	EA1	EA2	Zinnenspel	1097 120	745,3 745,3	19083,6 19083,6		Seitenware Seitenware	16 8	I-20-Profil	00:04:45	171,5	71,5	00:05:46	100 % Kalzikenversagen (wenig Holzfasern an Zinkenflanken; aber nur einseitig; nach Wiesner-Test einseitig Holzfasern an Flanken erkennbar)
3.1-02	FL3	FL4	Zinnenspel	1090 120	712,9 712,9	17292,0 17292,0		Halbrift Halbrift	4 6	I-15-Profil	00:04:45	128,8	51,6	00:04:11	95 % Kalzikenversagen (hoch Holzfasern an Zinkenflanken)
3.1-04	CJ1	CJ2	Zinnenspel	1090 120	814,7 814,7	18008,4 18008,4	Ø 6 mm; Abstand 29 cm	Halbrift Halbrift	4 21	I-15-Profil	00:05:15	154,1	64,2	00:05:12	Holzversagen ausserhalb der Kalzierung durch Ast
3.1-07	EL2	EL3	Zinnenspel	1104 120	733,7 733,7	18787,3 18787,3	Ø 5 mm; Abstand 39 cm	Halbrift Halbrift	8 2	I-15-Profil	00:05:15	194,8	64,5	00:05:13	95 % Kalzikenversagen (hoch Holzfasern an Zinkenflanken)
3.1-10	GT3	GT4	GT4: Holzleuchte = 11,3%	1100 120	761,5 761,5	16044,1 16044,1		Seitenware Seitenware	8 14	I-15-Profil	00:03:30	130,9	54,6	00:04:25	70 % Holzversagen (Holzbruch im Zinnenspel)
3.1-11	EC1	EC2	Zinnenspel; EC 1: Holzleuchte = 9,6%	1100 120	754,5 754,5	18788,8 18788,8		Seitenware Seitenware	2 12	I-15-Profil	00:03:30	140,9	58,7	00:04:45	95 % Kalzikenversagen (hoch Holzfasern an Zinkenflanken)