

Leistungsfähige Hirnholz-Schrauben- und Klebeverbindungen für schlanke Birken-Laubholzkonstruktionen

M-4-06/2014



Irene Obermayr
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir während meiner Studienzeit zur Seite standen, mich unterstützten und so meine Studienzeit zu einer spannenden, lustigen und lehrreichen Zeit machten.

Ich möchte mich bei Univ.- Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer, der mich schon in der ersten Holzbau GL Vorlesung für den Holzbau begeistern konnte, für die tolle Unterstützung und die anregenden Gespräche bei der Entstehung dieser Arbeit, bedanken.

Ein besonderer Dank gilt DI Markus Grabner und DI Andreas Ringhofer für die hervorragende Betreuung und Unterstützung bei dieser Masterarbeit sowie die hilfreichen Gespräche und Ratschläge, die schlussendlich zu dieser Arbeit einen großen Teil beigetragen haben. Es war mir eine große Freude mit euch zusammenzuarbeiten.

Außerdem bedanke ich mich bei den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Institutes für Holzbau und Holztechnologie sowie der holz.bau forschungs gmbh für die angenehme Atmosphäre und die anregenden Gespräche. Ein besonderer Dank gilt vor allem Bernd Heissenberger und Thomas Kröpfl, die mich bei der Vorbereitung, Durchführung sowie der Nachbereitungen der Prüfungen tatkräftig unterstützt haben.

Der größte Dank gilt meiner Familie die immer hinter mir stand, an mich geglaubt hat und mir diesen großen Schritt ermöglichte. Danke!

Zu guter Letzt noch ein großes Dankeschön an meinen Freund Markus, meine guten Freunde und Studienkollegen, im speziellen an die Gruppe 1, für eine unvergessliche Studienzeit, vom Anfang bis zum Ende, und hoffentlich auch eine spannende Zeit im Berufsanfang.

Kurzfassung

Heutzutage werden Laubholzprodukte als tragende Elemente im konstruktiven Holzbau nur vereinzelt eingesetzt. Deren hohe mechanische Eigenschaften ermöglichen schlanke Bauteilabmessungen im Sinne eines ressourcenschonenden und effizienten Einsatzes des nachwachsenden Rohstoffes Holz. Dies erfordert neue Ansätze im Bereich der Verbindungstechnologie. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf Untersuchungen zum Tragverhalten von faserparallelen Hirnholzverschraubungen und -verklebungen. Die durchgeführten Untersuchungen dienen zur Entwicklung leistungsfähiger Zuganschlüsse in Fachwerkkonstruktionen und basieren auf vorangegangenen Arbeiten zum Thema Brettschichtholz und Brettsperrholz aus Birke an der TU Graz, welche auf ein hohes Potential dieser Holzart für den konstruktiven Einsatz schließen lassen. Zur Fertigung der stabförmigen Brettschichtholz-Prüfkörper wurde nach definierten Sortierkriterien ausgewähltes Brettmaterial verwendet, um eine hohe Leistungsfähigkeit des Materials zu gewährleisten. Die Ermittlung der Zugkenngrößen des Grundmaterials erfolgte mittels Zugprüfungen an Einzellamellen, welche zur Abschätzung der Bruchlasten bei Nettoquerschnittsversagen des Bauteils dienen. Das Prüfkonzept umfasste zwölf Zugprüfungen faserparalleler Hirnholzverschraubungen sowie drei Prüfungen eingeklebter Kreuzbleche. Durch Wahl geometrischer Randbedingungen sollte die Bruchursache der Prüfkörper einem der drei definierten Versagensmechanismen (i) Nettoquerschnittsversagen, (ii) Ausziehversagen und (iii) Stahlbruch zuordenbar sein. Die Ergebnisse dieser Studie erlauben es, das Tragverhalten von geschraubten oder geklebten Hirnholzanschlüssen qualitativ beurteilen zu können und bilden die Grundlage für weiterführende Arbeiten.

Abstract

Timber products, made from deciduous wood, are occasionally used as load bearing elements these days. Their high mechanical properties allow slim dimensions of structural components. This is a resource-conserving and efficient way of using the renewable resource wood. That demands new approaches in the field of jointing technology. The focus of this master thesis lies on tests of parallel to the grain implemented screw and glued-in steel plate connections, investigating their load bearing behaviour. These tests form a basis for the development of high performance tensile connections for truss constructions. The experiments are based on previous reports on the subject of glued and cross-laminated timber made of birch at Graz University of Technology. These reports indicate a high potential of this wood species for constructive use. The production of the bar-shaped glued laminated timber specimens used birch lamellas, selected by grading criterias, to guarantee a high performance material. The tensile strength was determined by tension tests for estimating the load of cross-section failure. The concept for the main tests included twelve tensile tests of screw connections as well as three glued-in steel plate connections, both implemented parallel to the grain. The three failure mechanisms (i) cross-section, (ii) pull-out and (iii) steel failure were defined due to the choice of geometrical boundary conditions. The results of this study allow assessing the load bearing capacity of the mentioned connections and provide a basis for further research.

1 Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.1 Veranschaulichung des Tragpotentials von Birken-Brettschichtholz anhand eines Strebenfachwerks	2
2 Literaturrecherche	5
2.1 Laubholz	5
2.2 Birke	9
2.2.1 Allgemeines	9
2.2.2 Mechanische Kenngrößen.....	14
2.2.3 Verwendungsmöglichkeiten	15
2.2.4 Verklebung von Birke bzw. Laubholz	15
2.2.5 Stand des Wissens.....	19
2.2.5.1 Kilde et al. [58]	19
2.2.5.2 Hübner [53]	26
2.2.5.3 Sieder [82]	30
2.2.5.4 Zusammenfassung	33
2.3 Hirnholzverbindungen.....	34
2.3.1 Faserparallele Hirnholzverschraubungen	34
2.3.1.1 Versagensarten von Holzschrauben	36
2.3.1.2 Mindestabstände	37
2.3.1.3 effektive Verbindungsmittelanzahl	39
2.3.1.4 Abschätzung der Schraubentragfähigkeit auf Herausziehen	39
2.3.1.5 Langzeiteinfluss auf Schrauben 0° zur Faser	40
2.3.1.6 Vorbohren in Laubholz	41
2.3.2 Faserparallel eingeklebte Stahlbleche	41
2.3.2.1 Stand der Technik - Vergleich von Fachwerkanschlüssen mit Stabdübeln und eingeklebten Blechen	42
2.3.2.2 Verklebung	43
3 Offene Fragestellungen	47

4 Material und Methoden	49
4.1 Prüfkonzept	49
4.2 Material	50
4.2.1 Ausgangsmaterial	50
4.2.2 Verklebung der Birkenlamellen zu Brettschichtholz	50
4.2.3 Schrauben	51
4.2.4 Stahl der eingeklebten Stahlbleche	51
4.2.5 Verklebung Brettschichtholz - Stahlquerschnitt	51
4.3 Methoden	52
4.3.1 Bestimmung der Grundkenngrößen / Zugprüfungen Brettlamelle	52
4.3.1.1 Bestimmung der mechanischen Kenngrößen auf Zug parallel zur Faser	55
4.3.2 Prüfungen faserparalleler Hirnholzverschraubungen	61
4.3.2.1 Vorbemessung	61
4.3.2.2 Herstellung der Prüfkörper	63
4.3.2.3 Bezeichnung der Prüfkörper	64
4.3.2.4 Überprüfung der Schraubenzugfestigkeit	64
4.3.2.5 Vorversuche	65
4.3.2.6 Festlegung der effektiv wirksamen Gewindelänge (Eindringtiefe)	66
4.3.2.7 Prüfplan	66
4.3.2.8 Schraubenbild	68
4.3.2.9 Prüf- und Messeinrichtung	68
4.3.2.10 Ablauf der Prüfungen	69
4.3.2.11 Ermittlung des Verschiebungsmoduls K_{ser}	71
4.3.3 Prüfungen von in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen	72
4.3.3.1 Vorbemessung	72
4.3.3.2 Herstellung der Verklebung Holz-Stahl	73
4.3.3.3 Prüfkonfiguration	77
4.3.3.4 Prüf- und Messeinrichtung	78
4.3.3.5 Ablauf der Prüfungen	78
4.3.3.6 Ermittlung des Verschiebungsmoduls K_{ser} und der Fugenöffnung	79
5 Resultate und Diskussion	81
5.1 Holzsortierung	81
5.1.1 Rohdichte und dynamische Elastizitätsmoduln nach Sortierklassen getrennt	83

5.1.2 Korrelation der dynamischen Elastizitätsmoduln	83
5.1.3 Korrelation der Rohdichte mit den dynamischen Elastizitätsmoduln.....	84
5.2 Zugprüfungen Brettlamelle	85
5.2.1 Bruchursachen	86
5.2.2 Modellvergleich Zugprüfungen.....	86
5.2.3 Korrelation der Zugfestigkeit mit dem Zug-Elastizitätsmodul bzw. der Rohdichte.....	87
5.2.4 Korrelation zwischen den dynamischen Elastizitätsmoduln und dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul	88
5.2.5 Vergleich zur Literatur.....	89
5.3 Prüfungen faserparalleler Hirnholzverschraubungen	89
5.3.1 Überprüfung der Schraubenzugfestigkeit	89
5.3.2 Schraubengruppenprüfungen	90
5.3.2.1 Vorversuche	90
5.3.2.2 Prüfkongfiguration 1	93
5.3.2.3 Prüfkongfiguration 2	97
5.3.2.4 Prüfkongfiguration 3	99
5.3.2.5 Prüfkongfiguration 4	102
5.3.2.6 Gesamtauswertung der Schraubengruppenprüfungen	103
5.3.2.7 Resüme	104
5.4 Prüfungen von in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen	105
5.4.1 Prüfungen.....	105
5.4.2 Auswertung der Prüfungen.....	109
5.4.3 Resüme	110
6 Zusammenfassung und Ausblick	111
6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	111
6.2 Empfehlungen für weitere Prüfungen.....	112
6.2.1 Zugprüfungen faserparalleler Hirnholzverschraubungen.....	112
6.2.2 Zugprüfungen von in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen.....	112
6.3 Ausblick	113
7 Literaturverzeichnis	115

7.1 Normen	115
7.2 Datenblätter und Zulassungen	116
7.3 Bücher, Abschlussarbeiten und Forschungsberichte	117
7.4 Internetquellen.....	122
Anhang A: Pläne der Prüfkfigurationen	123
Anhang B: Auswertung der Prüfungen	135
Anhang C: Pläne und Bemessung der angefertigten Stahlteile	143
Anhang D: Sortierfolie	159

1 Motivation und Ziel der Arbeit

Mittelfristig ist ein Anstieg des Laubholzanteils bei gleichzeitigem Rückgang der Nadelholzverfügbarkeit in Mitteleuropa zu erwarten. Gründe hierfür sind unter anderem der Klimawandel sowie das waldbauliche Umdenken von Nadelholz-Monokulturen zu Mischkulturen [60]. Die Folge ist ein steigendes wirtschaftliches Interesse an laubholzbasierenden Produkten aus Buche, Esche und Birke für den Baubereich.

Während die Birke als Pionierbaumart in Österreich einen verhältnismäßig geringen Anteil am Waldbestand aufweist, gehört sie im nordeuropäischen und asiatischen Raum zu den weitverbreitetsten Laubholzarten und wird vor allem in skandinavischen Ländern vermehrt genutzt. Die Vorteile dieser Holzart sind - wie aus vorangegangenen Arbeiten hervorgeht - vergleichsweise hohe Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. In Form aufgelöster Strukturen (vor allem Fachwerke, siehe Abschnitt 1.1) eingesetzt, stellen Tragsysteme aus Birkenholz eine effiziente Alternative zu Massivholzträgern dar. Die damit einhergehende, vorwiegend axiale Beanspruchung der Bauteile ist speziell für die Verbindungstechnik eine große Herausforderung. Dies insofern, da das für Nadelholz verfügbare Platzangebot bei nahezu gleichbleibenden Anforderungen an die Mindestabstände der Verbindungsmittel nur eingeschränkt vorhanden ist.

Somit gilt es, für die gegebenen Randbedingungen - kleinere Bauteilabmessungen bei gleichbleibenden Anschlusskräften - geeignete Lösungen im Bereich der Anschlussstechnik zu finden. Eine Möglichkeit stellen Schraub- oder Klebverbindungen dar, welche sich insbesondere durch ihre hohe axiale Tragfähigkeit auszeichnen und sich bereits am Markt etabliert haben. Die Übertragung hoher Anschlusskräfte erfordert für diese Verbindungsmittel große Verbundlängen, welche für den vorliegenden Fall kleinerer Querschnittsdimensionen ausschließlich durch Situierung parallel zur Stabachse (Hirnholzanschluss) realisierbar sind.

Daraus leitet sich die Umsetzung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen der Anschlusstypen Hirnholzverschraubung und -verklebung ab. Ziel ist es, deren Tragverhalten experimentell zu studieren und die dabei gewonnenen Erkenntnisse aus den Beobachtungen für weitere, tiefergehende Betrachtungen zusammenzufassen.

1.1 Veranschaulichung des Tragpotentials von Birken-Brettschichtholz anhand eines Strebenfachwerks

Um das hohe Potential von Birke an einem Beispiel zu veranschaulichen, wird folgend ein Vergleich eines Fichten-Brettschichtholz-Fachwerks mit einem Birken-Brettschichtholz-Fachwerk auf Basis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit angeführt. Dafür wird das statische System, das in Abbildung 1.1 dargestellt ist, für beide Berechnungen mit der gleichen Belastung verwendet, wobei das Eigengewicht unberücksichtigt blieb. Für die dargestellte Kraft F wurden 30 kN angesetzt. Es wurden zuerst Querschnitte mit einem hohen Ausnutzungsgrad für das Birken-Fachwerk ermittelt. Anschließend wurden für das Fichten-Fachwerk Querschnitte, mit beinahe der gleichen Ausnutzung definiert, um einen aussagekräftigen Vergleich zu erhalten. Es ist anzumerken, dass für die Querschnitte ausschließlich auf die annähernd gleiche Ausnutzung und nicht auf verkaufübliche Abmessungen geachtet wurde.

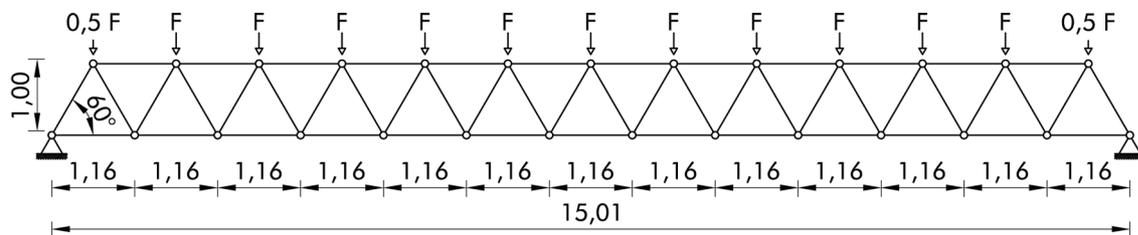


Abbildung 1.1: Statisches System des für den Vergleich verwendeten Fachwerks (alle Maße in Meter)

Als statisches System wurde ein ideales Fachwerk festgelegt, sodass nur Zug- und Druckkräfte im System auftreten und folglich die Querschnitte nur auf die maßgebenden Zug- und Druckkräfte zu dimensionieren waren. Die gesamte Berechnung dieses Vergleichs beruht auf abgeschätzten Mittelwerten (siehe Tabelle 1.1) der beiden Holzarten. Für die Festigkeitskennwerte des Birken-Brettschichtholzes wurde die aus den durch Zugprüfungen (siehe Kapitel Tabelle 5.2) ermittelte mittlere Zugfestigkeit angesetzt. Die Druckfestigkeit wurde gemäß ÖNORM EN 14080 [13] mittels der festgelegten Zugfestigkeit berechnet. Für die Festigkeitskennwerte des Fichten-Brettschichtholzes wurde die Festigkeitsklasse GL 32h gewählt und mit Gleichung (1.1), unter Annahme einer Normalverteilung, und einem Variationskoeffizienten von 15 % von den laut ÖNORM EN 14080 [13] definierten charakteristischen Werten auf die Mittelwerte rückgerechnet.

$$f_{\text{mean}} = \frac{f_k}{1 - 1,645 \cdot \text{CoV}} \quad (1.1)$$

f_{mean} ...	Mittelwert [N/mm ²]
f_k ...	charakteristischer Wert [N/mm ²]
CoV	Variationskoeffizient [%]

Tabelle 1.1 fasst die Ergebnisse der Berechnungen zusammen und vergleicht die jeweiligen Querschnitte der beiden Fachwerke. Daraus ist ersichtlich, dass im Mittel eine Querschnittseinsparung von ca. 29 % bei Verwendung von Birke anstatt Fichte möglich ist.

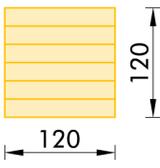
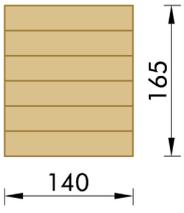
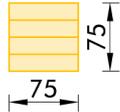
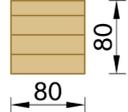
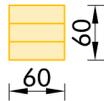
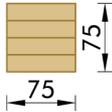
		Birke	Fichte (GL32h)
		$f_{t,0,mean}$	55,0
		$f_{c,0,mean}$	68,8
Obergurt Untergurt	Abmessungen (b x h)	120 mm x 120 mm	140 mm x 165 mm
	Querschnittsfläche	14.400 mm ²	23.100 mm ²
	Skizze		
	Ausnutzung	92 %	93 %
	Einsparung der Querschnittsfläche bei Verwendung von Birke anstatt Fichte	38 %	
Druckstrebe	Abmessungen (b x h)	75 mm x 75 mm	80 mm x 80 mm
	Querschnittsfläche	5.625 mm ²	6.400 mm ²
	Skizze		
	Ausnutzung	86 %	87 %
	Einsparung der Querschnittsfläche bei Verwendung von Birke anstatt Fichte	12 %	
Zugstrebe	Abmessungen (b x h)	60 mm x 60 mm	75 mm x 75 mm
	Querschnittsfläche	3.600 mm ²	5.625 mm ²
	Skizze		
	Ausnutzung	96 %	100 %
	Einsparung der Querschnittsfläche bei Verwendung von Birke anstatt Fichte	36 %	

Tabelle 1.1: Gegenüberstellung der verwendeten Festigkeitskennwerte und der berechneten Querschnitte für ein Birken- und ein Fichten-Fachwerk

Durch eine Berechnung der erforderlichen Holzmenge (Fichte: 0,86 m³, Birke 0,56 m³) kann eine Einsparung von 35 % festgestellt werden.

Abbildung 1.2 zeigt den Vergleich für beide berechnete Fachwerke anhand eines aufgezeichneten Fachwerks, wobei die linke Hälfte mit den Abmessungen für Fichte und die rechte Hälfte mit den Abmessungen für Birke dargestellt ist.

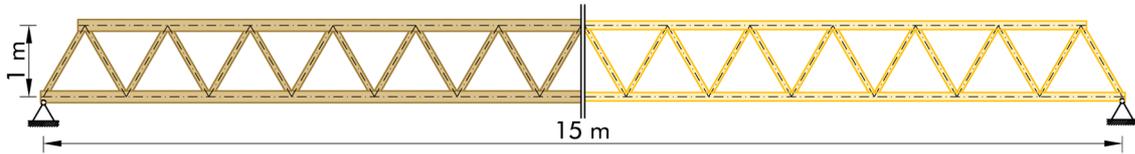


Abbildung 1.2: Vergleich des berechneten Fichten- (links) mit dem Birken-Fachwerk (rechts)

2 Literaturrecherche

2.1 Laubholz

[22], [35], [56], [57], [59], [60], [64], [76], [80], [81]

Zur Zeit werden große Teile des Laubholzes im mitteleuropäischen Raum energetisch genutzt. Die hohen Festigkeiten und Steifigkeiten von einigen Laubholzarten bieten allerdings beste Voraussetzungen für den Einsatz von Laubholz für tragende Zwecke. Dies geschieht hingegen bis jetzt nur in Pilotprojekten. Abbildung 2.1 zeigt das große Potential von Laubholz im Vergleich eines Laub- und eines Nadelholzquerschnittes bei gleicher Tragfähigkeit. Es wird unter anderem an den Laubholzarten Buche, Esche, Eiche, Birke, Edelkastanie, Kastanie und Ahorn geforscht, wobei der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten in den beiden erstgenannten Holzarten liegt.

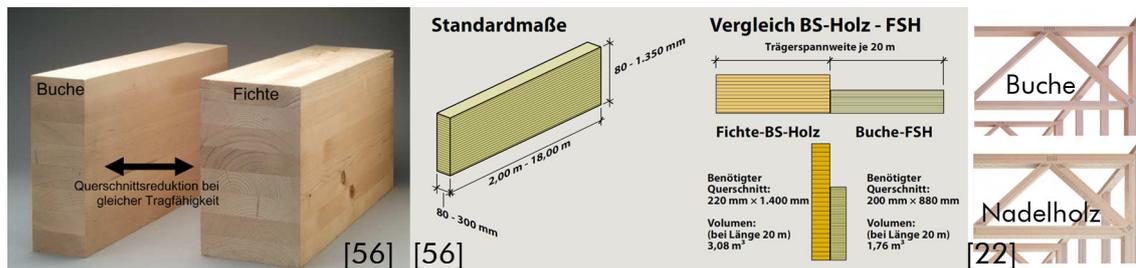


Abbildung 2.1: Vergleich von Brettchichtholz aus Fichte mit Brettchichtholz bzw. Furnierschichtholz aus Buche (aus [56], [22])

Produkte - Zulassungen

Es gibt bereits viele Produkte, wie etwa Vollholz, Brettchichtholz, Furnierschichtholz, Brettsperrholz, Spanwerkstoffe und Faserwerkstoffe aus Laubholz, allerdings nur wenige, die über eine Zulassung verfügen. In der Tabelle 2.1 ist ein Auszug der zurzeit gültigen Zulassungen im deutschsprachigen Raum für Laubholzprodukte aufgelistet. Dabei fällt auf, dass drei von vier Zulassungen für Buchenholz vorliegen.

Zulassungsbez.	Beschreibung
Z-9.1-679 [18]	BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger
Z-9.1-704 [19]	VIGAM Brettschichtholz aus Eiche
Z-9.1-837 [20]	Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz
Z-9.1-838 [21]	Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke - Buchen-FSH längslagig - Buchen-FSH querlagig

Tabelle 2.1: Gültige Zulassungen im deutschsprachigen Raum für Laubholz

Projekte

- **Schischulzentrum Arosa (2010) [64]**

Bei diesem Projekt wurde eine Überdachung einer Tiefgaragendecke mit Brettschichtholz aus Laubholz ausgeführt. Hier wurden, wie im linken Bild der Abbildung 2.2 erkennbar, zum Teil Brettschichtholzträger aus Eschenholz eingesetzt, um die große Spannweiten mit geringeren Querschnitten, als in Nadelholzausführung, zu überspannen. Würde der hier gewählte Querschnitt aus Eschenholz in Fichtenholz ausgeführt werden, so müsste dieser um 61 % größer sein, um die gleichen Lasten aufnehmen zu können. Als Verbindungssystem wurde das „GSA“-System (Gewinde-Stangen-Anker) gewählt, da dies eine hohe Tragfähigkeit, Steifigkeit sowie ein duktileres Verhalten aufweist. Dadurch konnten die Anschlüsse filigran gestaltet werden, sodass die Verbindungstechnik kaum sichtbar ist und trotzdem die Verbindungsmittel in den reduzierten Querschnitten untergebracht werden konnten.



Abbildung 2.2: Parkgarage des Schischulzentrums in Arosa (rechts: Fotografie, Mitte: Tragstruktur der Brettschichtholzträger, links: Vergleich Eschen-Brettschichtholz zu Fichten-Brettschichtholz) (aus [64])

- **Sporthalle Sargans (2012) [57]**

Als zweites Projekt wird die Sporthalle in Sargans in der Schweiz vorgestellt. Das Tragwerk dieser Halle, welches im linken Bild der Abbildung 2.3 dargestellt ist, bilden Zweigelenkrahmen aus Fichten-Brettschichtholz, welche über 28,8 m spannen. Das Besondere an diesem Projekt sind erneut die verwendeten „GSA“-Verbinder. Zusätzlich wurden im zweigeschossigen Bereich für die Unterzüge der Zwischendecke Hybridbrettschichtholzträger aus Fichten- und Eschenholz verwendet.

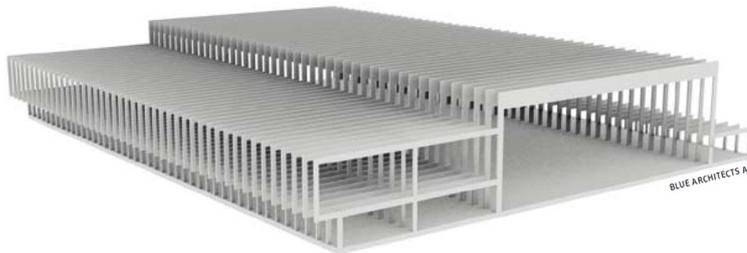


Abbildung 2.3: Sporthalle Sargans (links: Tragwerk, rechts: Fotografie) (aus [57])

- **Ökonomiegebäude Lauenen (2010) [35]**

Das Ökonomiegebäude in Lauenen in der Schweiz wurde ausgewählt, da es an einem einfachen System zeigt, welche Querschnittseinsparungen bei Verwendung von Laubholz möglich sind. Hier wurde die Dachkonstruktion aus Buchen- anstatt aus Fichten-Brettschichtholz hergestellt, da dies einen großen Anteil an Material einspart (siehe linkes Bild der Abbildung 2.4). Das Ziel dieses Projektes war es, zu zeigen, dass der Einsatz von Brettschichtholz in Buche technisch und wirtschaftlich möglich ist.

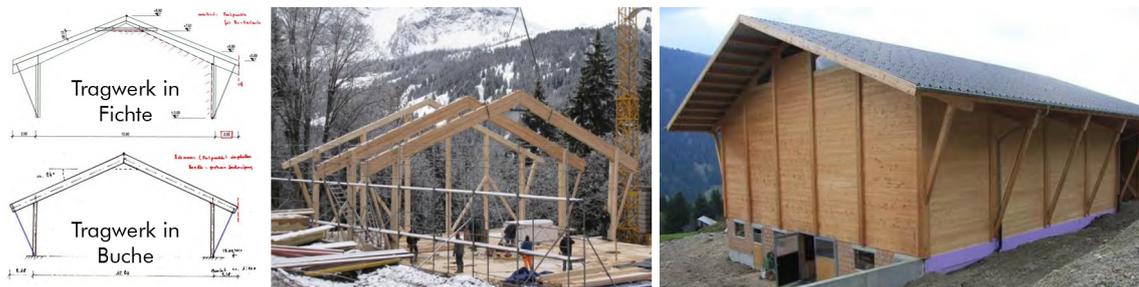


Abbildung 2.4: Ökonomiegebäude Lauenen (links: Tragwerk in Fichte bzw. Buche, Mitte: Aufstellen des Tragwerks, rechts: fertiges Gebäude) (aus [35])

- **Erweiterungsbau der bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) Freising (2014) [59], [80], [81]**

Dieser Erweiterungsbau ist das erste Bauvorhaben in Bayern, bei dem eine größere Menge Buchen-Brettschichtholz zum Einsatz kam. Es wurden ca. 38 m³ Buchen-Brettschichtholz verarbeitet. Davon wurden 31 m³ im Innenbereich (Nutzungsstufe 1) als Stützen (b x h = 140 mm x 240 mm) bzw. Deckenbalken (b x h = 140 mm x 540 mm) und 7 m³ im überdachten Außenbereich (Nutzungsstufe 2) eingesetzt. Da Buchen-Brettschichtholz zur Zeit nur für die Nutzungsstufe 1 zugelassen ist, wurde eine Zustimmung im Einzelfall mit der Bedingung, dass mindestens drei Jahre ein Holzfeuchte-Monitoring durchgeführt wird, erteilt.



Abbildung 2.5: Erweiterungsbau der bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (links: 3D-Visualisierung, rechts: Innenansicht des Rohbaus) (aus [80], [93])

- **Massive Living Graz (2012) [76]**

Bei dem Projekt Massive Living handelt sich um ein Wohnbauprojekt in Graz, Ö, das im Herbst 2012 fertiggestellt wurde. Es wurden zwei Gebäude errichtet, welche unterirdisch über eine Tiefgarage verbunden sind. Die beiden Wohngebäude selbst sind zwei separate dreistöckige Gebäude und bestehen aus 22 Wohneinheiten. Es wurden die Wände einer Wohnung aus Birken-Brettsperrholz ausgeführt. Da es für dieses Bauprodukt noch keine Zulassungen gibt, wurde eine Genehmigung für den Einzelfall eingeholt. Dafür wurden Prüfungen am Ausgangsmaterial sowie am fertigen Produkt Birken-Brettsperrholz an der Technischen Universität Graz durchgeführt [53]. Zusätzlich wurde ein Monitoring-System eingerichtet, welches die Holzfeuchte und die Temperatur für zwei Kontrollquerschnitte aufzeichnet [75]. Einer der Kontrollquerschnitte ist im Birken-Brettsperrholz und der andere im Fichten-Brettsperrholz einer ein Meter langen Wand situiert, um einen Vergleich der beiden Holzarten zu erhalten.



Abbildung 2.6: Wohnbauprojekt Massive Living (links: Fotografie Gebäude 1, Mitte: Fotografie Gebäude 2, rechts oben: Grundriss, rechts unten: Schnitt durch beide Gebäude) (aus [76])

2.2 Birke

2.2.1 Allgemeines

[42], [66], [84], [85], [86]

Die Birke leitete vor rund 12.000 Jahren die Wiederbewaldung nach der letzten Eiszeit in Europa ein und gehört somit zu den ältesten Bäumen Europas. Sie besiedelte zwar zunächst weite Teile des Kontinents, musste aber bald aufgrund ihrer schwachen Konkurrenzfähigkeit in den gemäßigten Klimazonen anderen Baumarten weichen und auf extremere Standorte ausweichen. Man kann Birken auf der ganzen Nordhalbkugel finden. Je weiter nördlich man sich befindet, desto häufiger sind Birken anzutreffen. In Österreich wachsen in freier Natur nur vier von rund 60 verschiedenen Birkenarten. Dies sind die Zwergbirke (*betula nana*), die stark gefährdete Strauchbirke (*betula homilis*), die seltene und gefährdete Moorbirke (*betula pubescens*) und die Sand- bzw. Hängebirke (*betula pendula*). Da diese Baumart sehr viel Licht benötigt, verschwindet sie an Standorten, wo sie von anderen Bäumen zu sehr beschattet wird. Dies ist der Grund für die beliebtesten Standorte der Birke wie etwa Waldlichtungen oder der Waldrand und erklärt den geringen Anteil der Birke am österreichischen Ertragswald mit 1,6 % (vgl. [85]). Als Konsequenz des hohen Lichtbedarfs benötigt sie auch viel Wasser und ist somit häufig in Moor- und Bruchwäldern zu finden. Die Sand- sowie die Moorbirke gehören zu den schnellwüchsigsten heimischen Bäumen. So kann eine Sandbirke im ersten Jahrzehnt zwischen einem und zwei Meter pro Jahr wachsen. In Tabelle 2.2 sind vergleichend die Größe, der Stammdurchmesser und das Alter von Hängebirke und Fichte aufgelistet.

	Hängebirke ([42], [47], [66], [84])	Fichte ([47], [84])
Größe	15 m bis 25 m	20 m bis 60 m
Stammdurchmesser	bis zu 90 cm	bis zu 150 cm
Alter	80 bis 150 Jahre	bis zu 600 Jahre (für Ernte 80 bis 100 Jahre)

Tabelle 2.2: Vergleich der Größe, des Stammdurchmessers und des Alters von Hängebirke und Fichte (vgl. [42], [47], [66], [84])

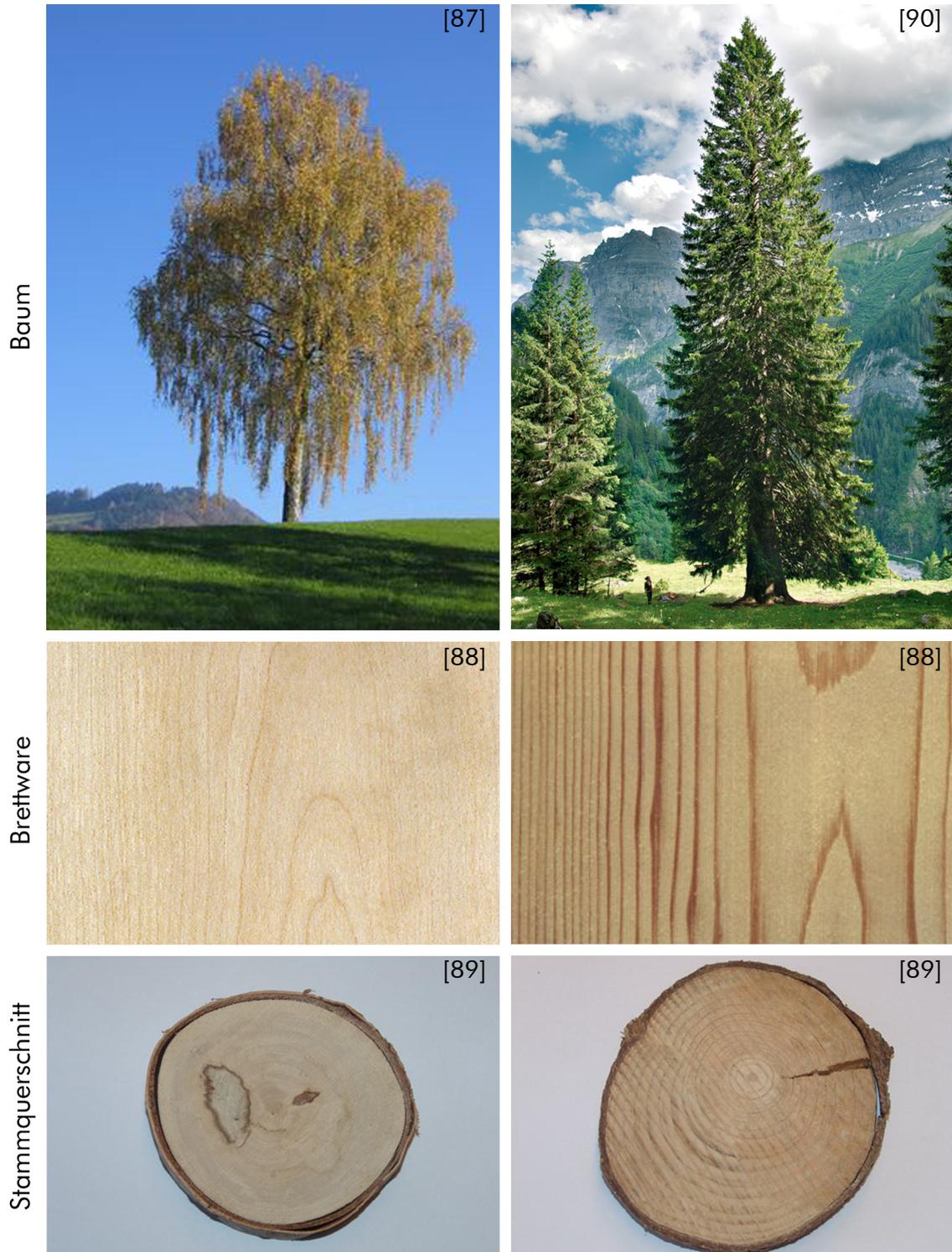


Abbildung 2.7: Vergleich von Birke (links) (aus [87], [88], [89]) mit Fichte (rechts) (aus [90], [88], [89])

Abbildung 2.7 zeigt eine Hängebirke und eine Fichte, sowie deren Brettware und Stammquerschnitt. Sowohl beim Vergleich der Brettware als auch beim Vergleich der Stammquerschnitte ist gut zu erkennen, dass die Jahrringe der Birke viel enger liegen und keine so große Farbabstufung wie bei der Fichte erkennbar ist.

Da die Birke in Österreich mit 1,6 % (vgl. [85]) keinen maßgebenden Anteil am Ertragswald hat, wird auf das Birkenvorkommen anderer europäischer Länder eingegangen. Abbildung 2.8 zeigt anhand einer Grafik die Verbreitung der häufigsten Birkenarten in Europa.



Abbildung 2.8: Vorkommen der häufigsten Birkenarten in Europa (aus [42])

Aus dieser Abbildung geht allerdings noch nicht hervor, dass die Birke in Skandinavien und in Russland im Vergleich zum mitteleuropäischen Raum von sehr hoher forstwirtschaftlicher Bedeutung ist. Dort sind auch reine Birkenbestände vorhanden. Hierzu ist in Tabelle 2.3 der Birkenanteil am Holzbestand dieser Länder aufgelistet.

Land	Russland [77]	Schweden [67]	Finnland [86]	Norwegen [95]	Lettland [94]	Estland [94]
Anteil [%]	15	18	10	18	24	26

Tabelle 2.3: Auflistung des Birkenanteils am Holzbestand der skandinavischen Länder sowie Russlands (vgl. [77], [67], [86], [95], [94])

Strukturmerkmale

[47], [84]

In den Abbildungen 2.9 und 2.10 sind die grundlegenden Begriffe für die Definition von Strukturmerkmalen zur besseren Verständlichkeit bildlich dargestellt. Es sind zum einen am Beispiel

eines Nadelholzquerschnitts der allgemeine Aufbau und Stammholzquerschnitte von Bäumen mit unterschiedlicher Kernholzbildung in Abbildung 2.9 und zum anderen die Definition der einzelnen Schnittrichtungen für den Querschnitt, den Tangential- und den Radialquerschnitt in Abbildung 2.10 dargestellt.

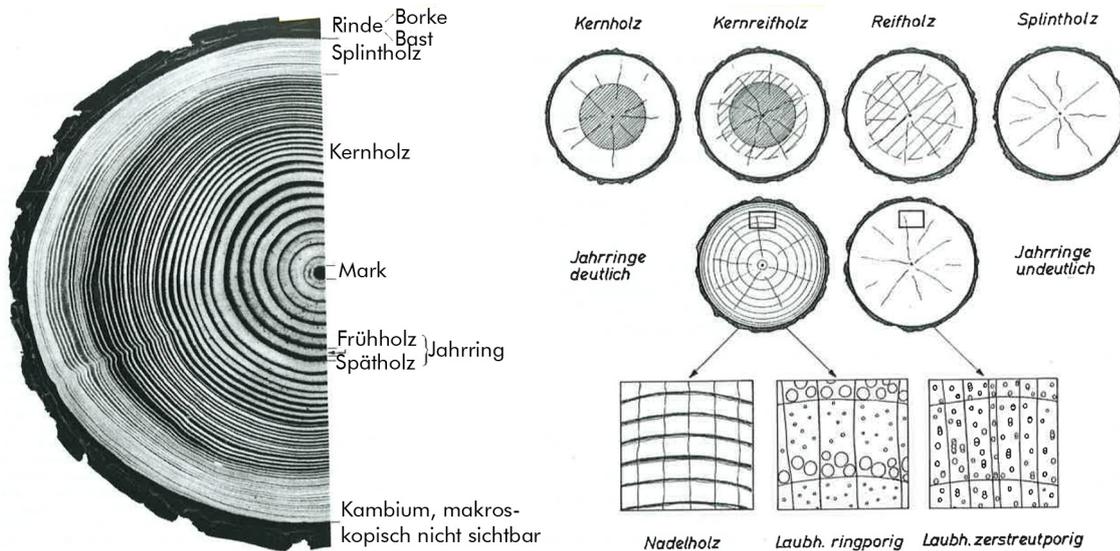


Abbildung 2.9: Allgemeiner Aufbau am Beispiel eines Nadelbaumquerschnitts (links) und Stammholzquerschnitte von Bäumen mit unterschiedlicher Kernholzbildung (rechts) (aus [47])

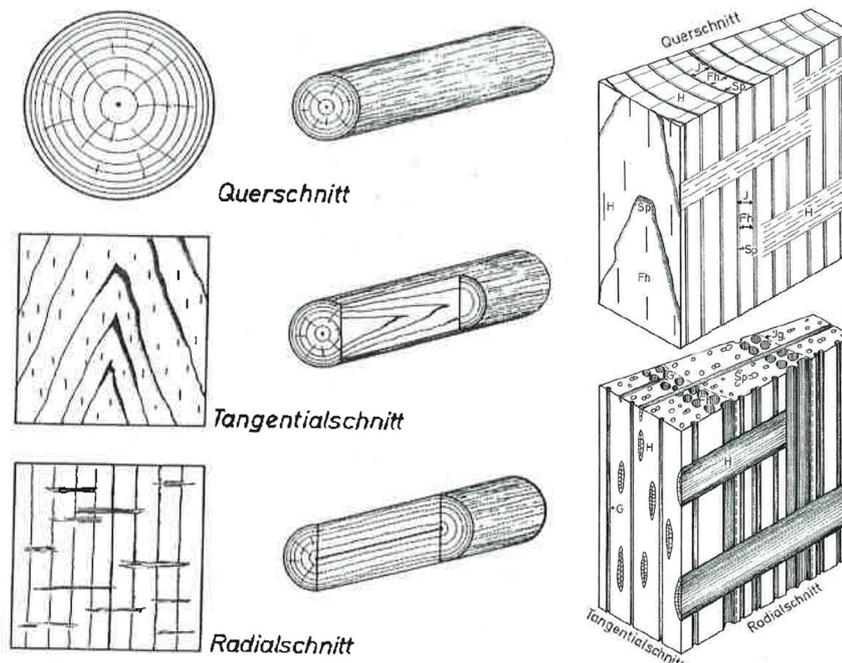


Abbildung 2.10: Schnittrichtungen für Querschnitt, Tangentialschnitt und Radialschnitt (links) und eine schematische Darstellung mit charakteristischen, makroanatomischen Erkennungsmerkmalen (rechts oben: Nadelholz, rechts unten: ringporiges Laubholz) (aus [47])

Bei der Birke ist im Querschnitt die Jahrringgrenze mehr oder weniger deutlich durch Faserzonen mit verdickten Zellwänden, Gefäßen und Holzstrahlen selbst unter der Lupe kaum erkennbar. Der Tangentialschnitt ist fein-nadelrissig. Mikroskopisch gesehen ist die Anordnung der Gefäße zerstreutporig und sehr gleichmäßig über den Jahrring verteilt, weswegen die Jahrringgrenzen auch kaum erkennbar sind. Die Holzstrahlen sind ein- bis vierreihig mit einer sehr variablen Höhe und haben großteils eine homogene Zusammensetzung. Die Fasern sind überwiegend radial angeordnet und verdichten sich an der Jahrringgrenze. Das Besondere an der Birke ist, dass sie ein Baum mit verzögerter und fakultativer (unregelmäßiger) Kernholzbildung ist. Es treten leiterförmige Gefäßdurchbrechungen mit 10 bis 25 feinen Sprossen auf. Außerdem sind vereinzelt Kristalle in den Holzstrahlzellen vorzufinden. Zum Vergleich dieser Beschreibung sind in Abbildung 2.11 mikroskopische Aufnahmen des Zellaufbaus im Querschnitt, im Tangential- und im Radialschnitt dargestellt.

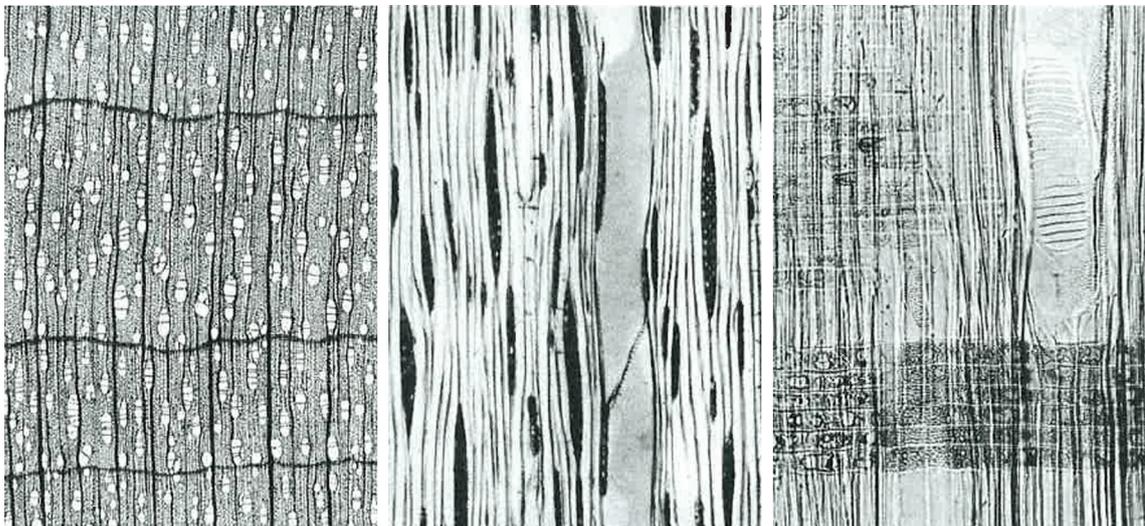


Abbildung 2.11: mikroskopische Aufnahmen des Zellaufbaus von Birke (links: Querschnitt 25 x vergrößert, Mitte: Tangentialschnitt 75 x vergrößert, rechts: Radialschnitt 75 x vergrößert) (aus [47])

Vergleichend zu den Strukturmerkmalen der Birke, sind in Abbildung 2.12 mikroskopische Aufnahmen des Zellaufbaus der Fichte im Querschnitt, im Tangential- und Radialschnitt stellvertretend für Nadelholzarten dargestellt. Es kann beim Vergleich der beiden Abbildungen 2.11 und 2.12 ein deutlicher Unterschied zwischen Laub- und Nadelholz festgestellt werden. Dies ist durch die erheblich größere Vielfalt im Aufbau des stammesgeschichtlich jüngeren Holzes der Laubbäume im Vergleich zum einförmig strukturierten Nadelholz zu erklären. Laubholz weist eine größere Anzahl von Zell- und Gewebearten auf. Besonders die Gefäße für den Wassertransport sind bei Laubholz im Vergleich zum Nadelholz auffallend. Die Nährstoffspeicherung findet bei beiden Arten in den Parenchymen statt. Allerdings ist deren Anteil am Gewebe bei Laubholzarten deutlich höher.

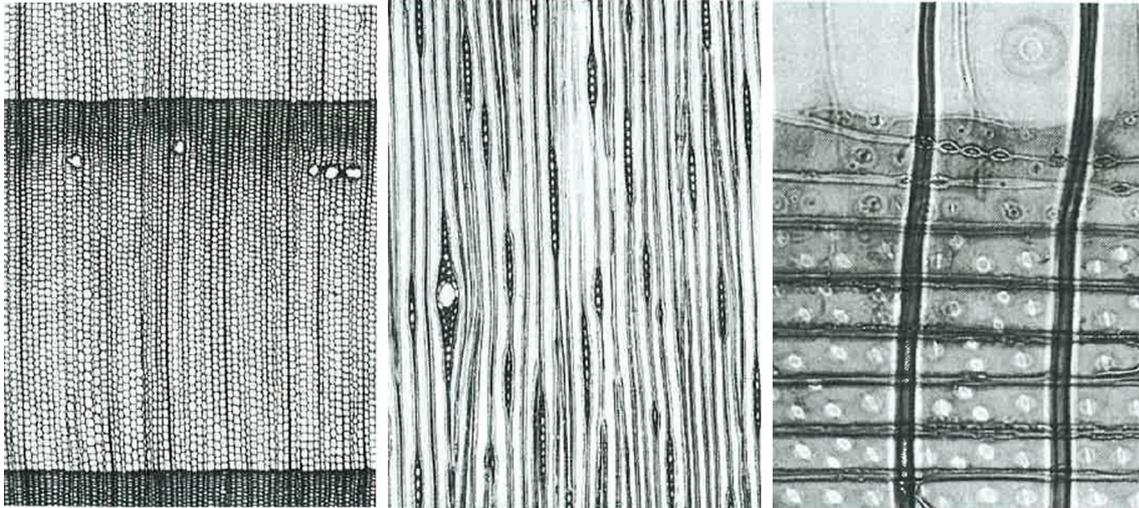


Abbildung 2.12: mikroskopische Aufnahmen des Zellaufbaus von Fichte (links: Querschnitt 25 x vergrößert, Mitte: Tangentialschnitt 75 x vergrößert, rechts: Radialschnitt 75 x vergrößert) (aus [47])

2.2.2 Mechanische Kenngrößen

Derzeit liegen nur sehr wenige Untersuchungen zu den mechanischen Kenngrößen von Birkenlamellen und Birken-Brettschichtholz bzw. zu einer gezielten Verbindungstechnik für Birken-Brettschichtholzanschlüsse in Fachwerken vor. Bisherige Erkenntnisse zu den mechanischen Kenngrößen des Materials gehen aus [53], [58], [82] und [84] hervor (siehe Tabelle 2.4).

Einzellamelle BSH	[82]	[53] ¹⁾	[58]	[84] ²⁾
Biegung $f_{m, \text{mean}}$ [N/mm ²]	- -	- 67,2	- 53,8	147
Zug $f_{t,0, \text{mean}}$ [N/mm ²]	37,4 -	43,0 -	43,5 -	137
E-Modul $E_{0, \text{mean}}$ [N/mm ²]	14476 -	14691 17467	13288 14734	14500-16500
Rohdichte ρ_{mean} [kg/m ³]	600 -	609 602	625 629	650

¹⁾... 3 Prüfkörper für Ermittlung der BSH Kennwerte

²⁾... fehlerfreie Kleinprobe

Tabelle 2.4: Gegenüberstellung ausgesuchter mechanischer Kenngrößen (Mittelwerte) (vgl. [53], [58], [82], [84])

In Tabelle 2.5 sind im Vergleich zur Birke weitere einheimische Nutzhölzer und ihre Rohdichte angeführt. Hieraus ist ersichtlich, dass die Grenzwerte für die Rohdichte der Birke im Vergleich zu anderen Holzarten eine geringere Bandbreite aufweisen, allerdings der Mittelwert im Ver-

gleich zu den anderen Laubhölzern in der unteren Hälfte angeordnet ist.

Baumart	Mittelwert Rohdichte ρ [kg/m ³]	Grenzwerte Rohdichte ρ [kg/m ³]
Laubholz		
Bergahorn	630	530 - 790
Birke	650	510 - 830
Buche	720	540 - 910
Eiche	690	430 - 960
Esche	720	450 - 860
Nadelholz		
Fichte	470	330 - 680
Kiefer	510	330 - 890

Tabelle 2.5: Vergleich der Rohdichte von einheimischen Nutzhölzern (vgl. [84])

2.2.3 Verwendungsmöglichkeiten

[42], [84]

Als tragendes Bauholz wird Birkenholz im mitteleuropäischen Raum noch kaum eingesetzt. Es wird hauptsächlich als Furnierholz, hier zum großen Teil als Schälholz (Furniere im Schälverfahren gewonnen) für Deck-, Innendeckfurniere und Sperrholz, verwendet. Des Weiteren wird es als Ausstattungsholz für Möbel, Vertäfelungen und Parkett genutzt. Es dient auch als Spezialholz für Stilmöbel, Zellstoff und Papier, Span- und Faserplatten, Sportgeräte, Flugzeugbau, Kisten, Spulen, Holznägel sowie für Stiele zum Drechseln und Schnitzen. Außerdem wird es weiterhin für die Herstellung von Blasinstrumenten, Gewehrschäften, Haushaltsgegenständen, Kinderspielzeug, Fassreifen, Schuhteilen, Verpackungskisten, Griffe und imprägnierte Schwellen verwendet sowie zu Pressvoll- und Presslagenholz verarbeitet.

2.2.4 Verklebung von Birke bzw. Laubholz

[36], [39], [40], [48], [49], [59], [79]

Da für den Großteil der Laubholzprodukte für den konstruktiven Einsatz (z.B. Brettschichtholz, Brettsperrholz, Furnierschichtholz) eine Verklebung notwendig ist, wird hier auf die Grundlagen der Verklebung von Holzwerkstoffen, im Speziellen für Laubholz, eingegangen.

Grundlagen der Klebetechnologie

Eine Verklebung besteht aus zwei Fügeteilen, welche durch einen Klebstoff über Oberflächenhaftung miteinander verbunden werden. Gemäß ÖNORM EN 923 [6] sind Klebstoffe „... nicht-metallische Stoffe, die Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) so verbinden, dass die

Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion) besitzt.“ (aus [6]) Klebstoffe können nach ihrem Abbindemechanismus in chemisch und physikalisch abbindende Klebstoffe eingeteilt werden. In Tabelle 2.6 ist eine Einteilung ausgewählter Klebstoffe nach ihrem Abbindemechanismus angeführt. Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass alle für den konstruktiven Holzbau relevanten Klebstoffe der Gruppe der chemisch abbindenden Klebstoffe angehören.

physikalisch abbindend		chemisch abbindend
natürlich	synthetisch	synthetisch
Glutin	Polyvinylacetat	Harnstoff-Formaldehyd (UF)
Kasein	Polyvinyläther	Melamin-Formaldehyd (MF)
Blutalbumin	Polyvinylchlorid	Phenol-Formaldehyd (PF)
Stärke	Polyacrylat	Kresol-Formaldehyd
Dextrin	Polymehtacrylat	Resorcin-Formaldehyd (RF)
Zelluloseäther	Polyäthylen	Polyurethane (PUR)
Naturkautschuk	Polystyrol	Epoxidharze (EP)
	synthetischer Kautschuk	

Tabelle 2.6: Einteilung ausgewählter Holzklebstoffe nach ihrem Abbindemechanismus (aus [40])

Zusätzlich können Klebstoffe auch in einkomponentige und zweikomponentige Systeme unterteilt werden. Einkomponentige Klebstoffe sind ohne ein vorheriges Anmischen fertig zu verarbeiten und weisen eine eingeschränkte Lagerfähigkeit auf. Für zweikomponentige Klebstoffe werden das Harz und der Härter getrennt gelagert und erst kurz vor der Verwendung angemischt. Sie haben eine begrenzte Topfzeit (Zeit vom Anmischen bis zur Verwendung) bzw. Verarbeitbarkeit nach dem Anmischen. Tabelle 2.7 zeigt, welche Klebstoffe für welchen Holzwerkstoff am besten geeignet sind. Auch hier ist erkennbar, dass es sich ausschließlich um chemisch abbindende Klebstoffe handelt.

	KS-Typ	Kurzeichen	Produkte				
			Massivholzplatte	Sperrholz	Spanplatte	Faserplatte	Sonderverklebungen
Aminoplaste	Harnstoff-Formaldehyd	UF		x	x	x	
	Melamin-Formaldehyd	MF	x		x		
	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd	MUF	x		x		
Phenoplaste	Phenol-Formaldehyd	PF		x	x		
	Resorcin-Formaldehyd	RF		x			x
	Resorcin-Phenol-Formaldehyd	RPF		x	x		
Isocyanate	Polyurethan	PUR	x				x
	Emulsions-Polymer-Isocyanat	EPI	x				
	Polymeres Diphenylmethan-Diisocyanat	PDMI			x	x	
Epoxide	Epoxid	EP					x

Tabelle 2.7: Geeignete Holzklebstoffe für den lastabtragenden Einsatz (aus [40])

Zudem gibt es folgende Einflussfaktoren auf die Festigkeit der Klebeverbindung: Es wird unterschieden zwischen den stofflichen Einflüssen der Fügeteile bzw. des Klebstoffs, den technologischen Einflüssen der Klebstoffvorbereitung, der Klebstoffverarbeitung bzw. des Zustands der Fügeteiloberfläche, den geometrischen Einflüssen der Fügeteile und den Gebrauchseinflüssen der Beanspruchungsart bzw. der Umweltbedingungen. Holzwerkstoffe für tragende Zwecke werden, um kontrollierte Bedingungen sicherzustellen, ausschließlich im Werk hergestellt, um so die Tragfähigkeit der Bauteile garantieren zu können. Zudem erfordern hochfeste Holzarten eine hohe Präzision und Qualitätssicherung in ihrer Verklebung. Die Verklebungsqualität ist stark von der Art und Menge der Holzinhaltsstoffe abhängig.

Um eine ausreichende Qualität der Verklebung sicherzustellen, müssen außerdem noch die folgenden Fristen eingehalten werden. Es wird von den Herstellern der Klebstoffe eine maximale offene Wartezeit vorgegeben. Dies ist die maximal zulässige Zeit von Beginn des Klebstoffauftrags bis zum Pressen der Fügeteile und ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung bzw. dem Typ des Klebstoffs, der Auftragsmenge, der Verarbeitungstemperatur bzw. -feuchte, der Saugfähigkeit der Fügeteile und der Feuchte bzw. Temperatur der Fügeteile. Des Weiteren

wird eine geschlossene Warte- und eine Presszeit vorgegeben. Die geschlossene Wartezeit ist jene Zeit von Beginn des Fügens bis zum Aufbringen des Pressdrucks. Die Presszeit ist über die Aushärtezeit des Klebstoffs definiert und hängt von der Reaktivität des Klebstoffs, der Temperatur, der Feuchte, dem Eigengewicht und den Eigenspannungen der Fügeteile ab. Diese einzuhaltenen Zeiten definieren im Wesentlichen die Wirtschaftlichkeit der Fertigung der jeweiligen Klebeverbindungen.

Verklebung von Laubholz

Aufgrund der kaum vorhandenen Verwendung von Laubholz im konstruktiven Holzbau sind auch die Klebstoffe, die zur Zeit verwendet werden, für Nadelholz entwickelt worden. Da Laubholz in seiner anatomischen Struktur komplexer ist und eine höhere Rohdichte als Nadelholz aufweist, ist das Verbundverhalten von Klebstoffen für Laubhölzer unterschiedlich zu jenem der Nadelhölzer. Die unterschiedliche Struktur sowie die differierenden Inhaltsstoffe von Laub- und Nadelholz führen zu einem unterschiedlichem Eindringverhalten des Klebstoffs und somit zu einem unterschiedlich starken bzw. schwachen Verbund. Somit kann nicht automatisch jeder Klebstoff auch für Laubholz verwendet werden. Da, wie schon erwähnt, immer mehr Laubholz im konstruktiven Holzbau genutzt werden wird, wird auch in Bezug auf eine geeignete kraftschlüssige Klebeverbindung geforscht. Laut [59] besteht auch ein erheblicher Unterschied bei unterschiedlicher Oberflächenbehandlung des Holzes. Aus [59] geht hervor, dass eine geschliffene Holzoberfläche bei Eschenholz nur halb so viel delaminiert wie eine gehobelte.

Im Vergleich zu Nadelholz wurden für Laubholz folgende Einflussfaktoren auf eine dauerhafte Verklebung festgestellt [36]:

- hohe Rohdichte
- hohe Steifigkeitskenngrößen
- hohe Oberflächenhärte
- Inhaltsstoffe
- pH-Wert
- Schwind-Quellanisotropie in radialer/ tangentialer Wuchsrichtung

Unter anderem wurde die Verklebung von Laubholz in [39], [59] und [79] untersucht. Es wurden sowohl Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffe als auch Polyurethanklebstoffe verwendet und es konnte festgestellt werden, dass beide für bestimmte Holzarten geeignet sind. Außerdem wurde eine unterschiedliche Verbundwirkung für Klebstoffe, einer Klebstoffart, von unterschiedlichen Herstellern, bei Verwendung des gleichen Ausgangsmaterials, festgestellt. Für die spezifische Verklebung von Birke wurden von [53], [58] und [82] bereits Delaminierungs-, Keilzinken- sowie Brettchichtholzprüfungen durchgeführt. Die Erkenntnisse daraus sind in Kapitel 2.2.5 zusammengefasst.

2.2.5 Stand des Wissens

Dieses Kapitel befasst sich mit den bereits vorhandenen Forschungsarbeiten zum Thema Birkenholz und seinen Eigenschaften für bautechnische Einsätze. Es werden drei Arbeiten in den Fokus gestellt. Zum einen der Forschungsbericht [58] aus Norwegen, ein Forschungsbericht der TU Graz [53] sowie der Forschungsbericht [82], welcher auch an der TU Graz erstellt wurde und auf den Bericht [53] aufbaut.

2.2.5.1 Kilde et al. [58]

Am Norsk Treteknisk Institutt wurde 2006 von Kilde, Solli, Pitzner und Og Jan Bramming ein Forschungsbericht über die folgenden Prüfungen zu Brettschichtholz aus Birke verfasst: Zu Beginn wurden Zugprüfungen von Birkenlamellen durchgeführt, darauffolgend wurden verschiedene Klebstoffe auf ihre Verwendbarkeit für Birke getestet, um im Anschluss daran Biegeprüfungen von Brettschichtholzträgern sowie Biege- und Zugprüfungen von Keilzinkenverbindungen durchzuführen.

Material (Zugprüfungen)

Die Abmessungen des gehobelten Grundmaterials betragen $h \times b \times l = 36 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 2700 \text{ mm}$. Die ca. 1200 Lamellen wurden auf einen Feuchtegehalt von 12 % konditioniert. Außerdem stammte das Material aus jeweils zwei Regionen Norwegens (Osten und Süden) und Schwedens (Mitte/Norden und Süden). Diese Unterscheidung fließt auch in die späteren Auswertungen mit ein, wurde allerdings anonymisiert.

Sortierung

Die ca. 1200 Birkenlamellen für die Zugprüfungen wurden vor den Prüfungen vorsortiert und danach noch einmal nachsortiert. Für die Vorsortierung wurden Birkenlamellen in zwei Klassen, eine niedrigere Klasse L und eine höhere Klasse S, eingeteilt. Der Klasse L wurden die Klassen T0 (C14), T1 (C18) und Teile von T2 (C24), welche in der NS-INSTA 142 [17], der norwegischen Norm für visuelle Sortierkriterien, definiert sind, zugeteilt. Der höheren Klasse S wurde der obere Anteil der Klasse T2 (C24) sowie T3 (C30) zugeordnet. Motivation für die Vorsortierung war der Wunsch einer gleichmäßigen Verteilung der Materialeigenschaften und dass eine Verteilung in die beiden Klassen L und S zu gleichen Teilen (50 %/ 50 %) erfolgte. Zusätzlich wurden auch die visuell sichtbaren Charakteristika, Äste und Faserneigung, aufgenommen. Die Definitionen der Sortierklassen gemäß NS-INSTA 142 [17] sind ähnlich den Definitionen gemäß ÖNORM DIN 4074-5 [15]. Für das Kriterium der Astigkeit sind die gleichen Definitionen festgelegt, dabei entspricht T3 - LS13, T2 - LS10 und T1 - LS7.

Für die spätere Sortierung wurden alle Lamellen auf Grundlage der aufgenommenen visuellen Eigenschaften gemäß der NS-INSTA 142 [17] sortiert und einer der zwei Klassen T3 und T1, welche sich aus T1 und T2 zusammensetzt, oder dem Ausschuss zugeordnet. Zusätzlich wurde für die Auswertung der Zugprüfungen je Klasse unterschieden, aus welcher Region die Lamellen stammten.

Zugprüfungen Brettlamelle

Es wurden alle zuvor sortierten Lamellen auf Zug gemäß EN 408 [5] geprüft und die erhaltenen Ergebnisse ausgewertet. In Tabelle 2.8 ist die Auswertung für den gesamten Prüfumfang dargestellt. Die Tabellen 2.9 bis 2.12 zeigen die Auswertung für die höchste Sortierklasse T3 jeweils für die vier untersuchten Regionen.

$n \approx 1200$	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Dichte [kg/m ²]
Mittelwert	43,5	13288	625
Standardabweichung	12,5	1950	45,8
Variationskoeffizient	28,8 %	14,7 %	7,3 %

Tabelle 2.8: Auswertung aller Zugprüfungen (vgl. [58])

Region 1 $n = 142$	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Dichte [kg/m ²]
Mittelwert	53,6	14.805	636
Standardabweichung	9,9	1.739	43,1
Variationskoeffizient	18,6 %	11,7 %	6,8 %
P05	565		
$f_{05(\text{ranked})}$	36,2		
$f_{05(\text{lognormalverteilt})}$	37,6		

Tabelle 2.9: Auswertung der Zugprüfungen der Klasse T3 für die Region 1 (vgl. [58])

Region 2 $n = 67$	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Dichte [kg/m ²]
Mittelwert	48,0	13.748	636
Standardabweichung	9,1	1.995	44,4
Variationskoeffizient	18,9 %	14,5 %	6,8 %
P05	576		
$f_{05(\text{ranked})}$	33,0		
$f_{05(\text{lognormalverteilt})}$	33,5		

Tabelle 2.10: Auswertung der Zugprüfungen der Klasse T3 für die Region 2 (vgl. [58])

Region 3 n = 68	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Dichte [kg/m ³]
Mittelwert	53,6	14.012	616
Standardabweichung	10,5	1.697	39,8
Variationskoeffizient	19,7 %	12,1 %	6,5 %
P05	550		
f _{05(ranked)}	36,5		
f _{05(lognormalverteilt)}	36,6		

Tabelle 2.11: Auswertung der Zugprüfungen der Klasse T3 für die Region 3 (vgl. [58])

Region 4 n = 109	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Dichte [kg/m ³]
Mittelwert	53,1	14.259	620
Standardabweichung	11,9	1.783	42,7
Variationskoeffizient	22,4 %	12,5 %	6,9 %
P05	549		
f _{05(ranked)}	32,3		
f _{05(lognormalverteilt)}	33,7		

Tabelle 2.12: Auswertung der Zugprüfungen der Klasse T3 für die Region 4 (vgl. [58])

Als Erkenntnis wurde für die visuelle Sortierung weitergegeben, dass die Faserneigung sowie Äste die wichtigsten und maßgebendsten Faktoren für die Klasseneinteilung waren. Diese beiden Merkmale bildeten 87 % aller Herabstufungsursachen für die Klasseneinteilung.

Es konnte sowohl für die Zugfestigkeit als auch für den Elastizitätsmodul festgestellt werden, dass ein klar erkennbarer Unterschied zwischen den beiden Sortierklassen besteht (vgl. Abbildung 2.13). Für die Dichte konnte dieser Zusammenhang nicht festgestellt werden. Deren Verteilung ist für beide Sortierklassen nahezu ident. Die in Abbildung 2.14 dargestellten Korrelationen der ermittelten Werte zeigen, dass zwischen der Zugfestigkeit und der Rohdichte mit $R^2 = 0,05$ kein Zusammenhang besteht. Für die Korrelation zwischen dem Elastizitätsmodul und der Dichte ($R^2 = 0,24$) konnte ebenfalls kein Zusammenhang festgestellt werden. Nur für die Korrelation zwischen der Zugfestigkeit und dem Elastizitätsmodul ($R^2 = 0,3$) liegt ein schwacher Zusammenhang vor.

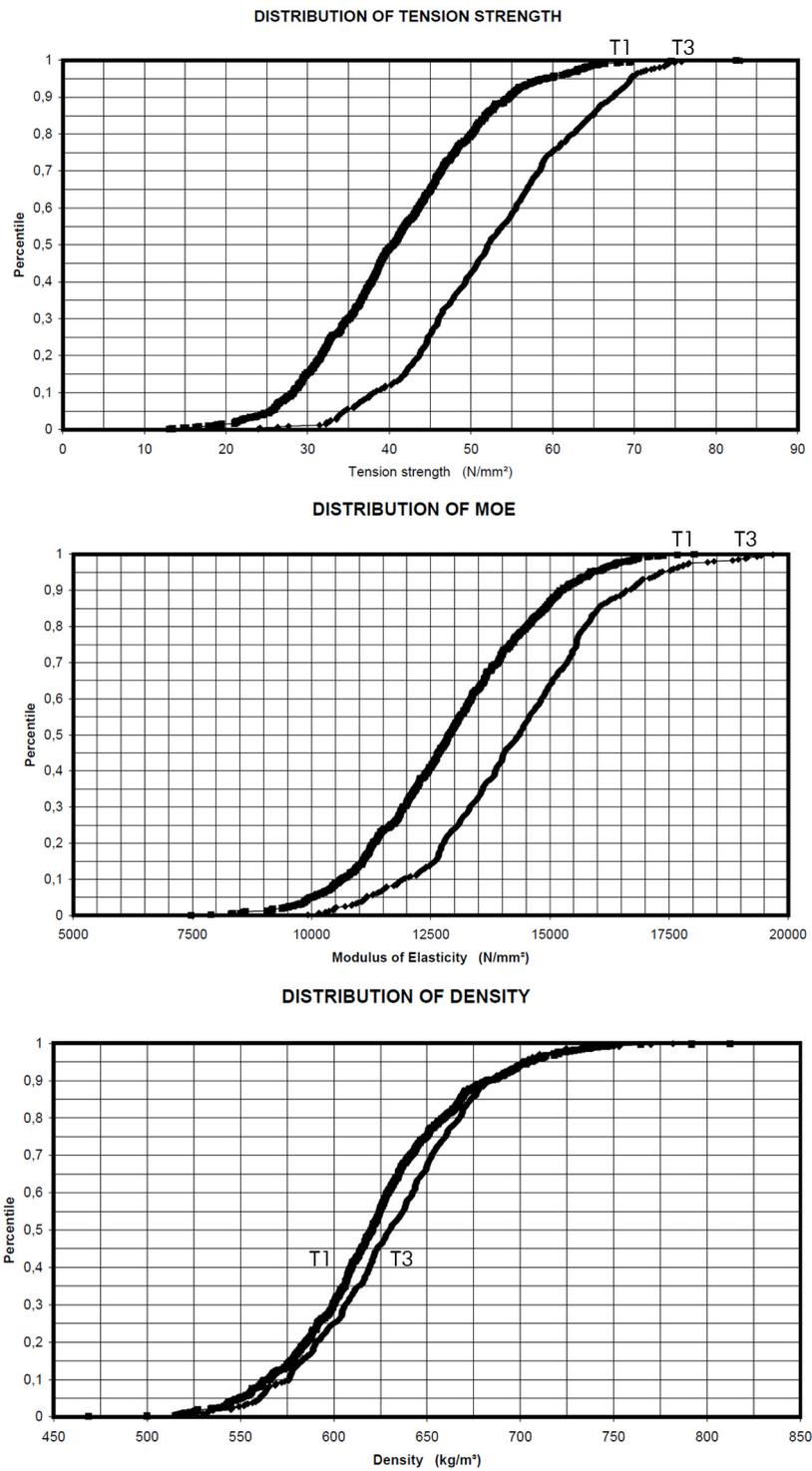


Abbildung 2.13: Vergleich der Zugfestigkeit (oben), des Elastizitätsmoduls (Mitte) und der Dichte (unten) der Klassen T1 und T3 (aus [58])

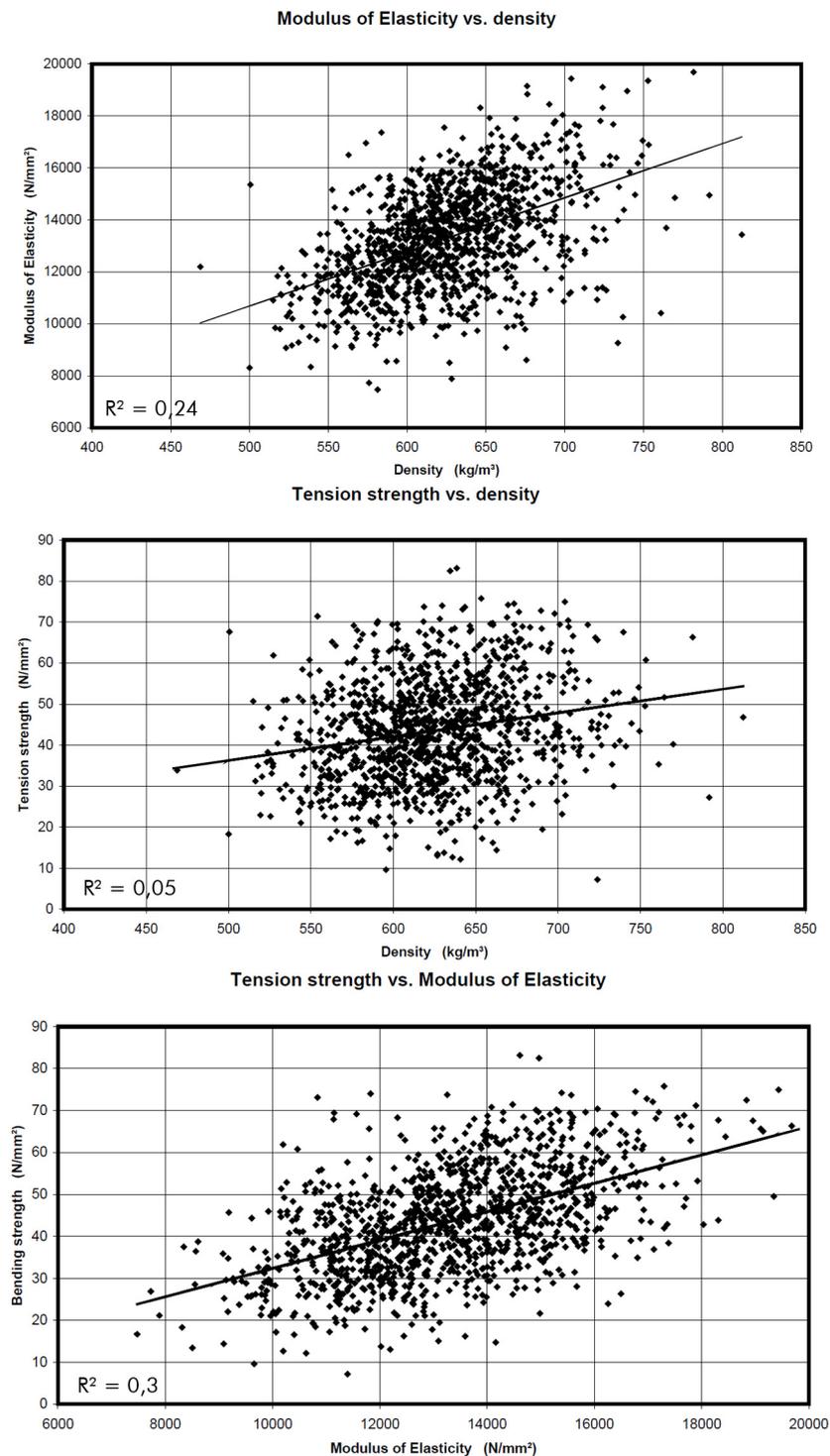


Abbildung 2.14: Korrelationen der ermittelten Werte (oben: MOE vs. Rohdichte, Mitte: Zugfestigkeit vs. Rohdichte, unten: Zugfestigkeit vs. MOE) (aus [58])

Die erhaltenen Werte konnten nicht den der EN 338 [1] entsprechenden D-Klassen zugeordnet werden, weil die Zugfestigkeit, der Elastizitätsmodul und die Rohdichte jeweils in eine andere Klasse zugeteilt werden müssten. Darum wurden, basierend auf den Zugprüfungen, zwei separate Festigkeitsklassen, LTB 34 für Sortierklasse T3 und LTB 25 für Sortierklasse T1, definiert (siehe Tabelle 2.13). Die Bezeichnung LTB steht für „limtre lameller av bjork“, das bedeutet in der deutschen Übersetzung „Brettschichtholzlamellen aus Birke“.

	$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,mean}$ [N/mm ²]	ρ_k [kg/m ³]
LTB 34	34,0	14300	550
LTB 25	25,0	12900	550

Tabelle 2.13: In [58] neu definierte Festigkeitsklassen für Birkenlamellen (vgl. [58])

Klebstoffauswahl

Es wurden Vorversuche vor den eigentlichen Keilzinkenprüfungen durchgeführt, um zwei geeignete Klebstoffe für Keilzinken- sowie Brettschichtholzverklebungen zu finden. Neun verschiedene Klebstoffe wurden getestet, darunter drei verschiedene Melamin-Harnstoff-Formaldehyd- (MUF), zwei Phenolresorcinharz- (PRF), zwei Polyurethan- (PUR), ein Emulsions-Polymer-Isocyanat- (EPI) sowie ein Epoxy-Klebstoff. Die Klebstoffe wurden nach EN 392 [4] geprüft. Hierfür wurde die Schubfestigkeit der Klebefuge parallel zur Faserrichtung bestimmt. Für jeden Klebstoff wurden zehn Probekörper gefertigt und anschließend geprüft. Von vier, nach den Prüfungen, überzeugenden Klebstoffen (MUF, EPI, PRF, Epoxy) wurden jene zwei ausgewählt, welche den wirtschaftlichen sowie den ästhetischen (PRF-Klebstoffe weisen eine dunkle Farbe auf) Ansprüchen gerecht wurden.

Die ausgewählten Klebstoffe waren ein MUF- und der EPI-Klebstoff:

- MUF = Dynomel L-435 + H-469 = Prefere 4535 / 5035 [23]
- EPI = EXP 9018 + ESP 7314 = Prefere 6151 / 6651 [92]

Keilzinkenprüfungen

Die Keilzinkenverbindungen wurden sowohl auf ihre Zug- als auch auf ihre Biegefestigkeit geprüft. Des Weiteren wurden zwei verschiedene Prüfserien durchgeführt. Die beiden Serien wurden in zwei verschiedenen Werken hergestellt und unterscheiden sich durch ihre Keilzinkenlänge (15 mm und 29 mm). Bei beiden Serien wurde jeweils ein Teil mit dem MUF- und der andere Teil mit dem EPI-Klebstoff hergestellt.

Es wurden sämtliche Prüfungen in die Auswertung miteinbezogen, obwohl einige Prüfkörper ein Versagen zeigten, wodurch sie eigentlich dem Ausschuss zugeordnet werden müssten. Alles in Allem zeigten die Prüfungen, dass der Keilzinkenverbindung von Birkenlamellen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Es ist sehr wichtig, dass die Keilzinkenprofile eine korrekte Geometrie aufweisen und der anschließende Pressdruck hoch genug gewählt wird, um die bei-

den Keilzinkenenden zufriedenstellend zu verbinden. Des Weiteren ist es wichtig, dass das Holz im Bereich der Verbindung möglichst keine Schrägfaser aufweist. Es wird zusätzlich empfohlen, den Klebstoff beidseitig zu applizieren.

Zusätzliche Keilzinkenprüfungen bestätigen die vorherige Annahme, dass die Keilzinkenverbindung die charakteristische Festigkeit der Lamellen erreichen.

Brettschichtholzträger - Biegeprüfungen

Es wurden 14 Brettschichtholzträger aus je neun Lamellen mit einer Dicke von je 33 mm produziert. Die jeweils äußeren zwei Lamellen wiesen die zuvor definierte Festigkeitsklasse LTB 34 und die fünf inneren die Festigkeitsklasse LTB 25 auf. Die Gesamtabmessungen der Träger betragen $b \times h \times l = 140 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 6000 \text{ mm}$. Um diese Trägerlänge (sechs Meter) zu erreichen, wurden die einzelnen Lamellen über Keilzinken miteinander verbunden. Hierfür wurde der Klebstoff Prefere 4525/5025 verwendet. Für die Verklebung der Lamellen zu Brettschichtholz wurde der Klebstoff Prefere 4535/5035 [23] verwendet. Die Träger wurden gemäß EN 408 [5] geprüft, um die Biegefestigkeit und den Biegeelastizitätsmodul (MOE) zu bestimmen. Für die Auswertung wurden die Werte der Biegefestigkeit noch auf einen Referenzquerschnitt von $150 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ bezogen (nach EN 1194 [8]). Der Elastizitätsmodul sowie die Dichte wurden feuchtekorrigiert. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 2.14 ersichtlich.

n = 14	Biegefestigkeit [N/mm ²]	MOE ¹⁾ _{lokal} [N/mm ²]	MOE ¹⁾ _{global} [N/mm ²]	Dichte [kg/m ³]
Mittelwert	53,8	14734	13736	629
Standardabweichung	6,7	513	357	10,2
Variationskoeffizient	12,4 %	3,5 %	2,6 %	7,3 %
ρ_k	612			
$f_{m,g,k\text{-norm}}$	40,4			
$f_{m,g,k\text{-lognorm}}$	41,2			

¹⁾...Modulus of Elasticity (Biege-Elastizitätsmodul)

Tabelle 2.14: Auswertung der Biegeprüfungen der Brettschichtholzträger (vgl. [58])

In Tabelle 2.15 werden Werte angegeben, welche bei Verwendung des gleichen Querschnittsaufbaus, den gleichen Festigkeitsklassen und den gleichen Klebstoffen für die Berechnung empfohlen werden können.

$f_{m,g,k}$ [N/mm ²]	$E_{0,mean}$ [N/mm ²]	ρ_k [kg/m ³]
40,0	14700	600

Tabelle 2.15: empfohlene charakteristische Werte (vgl. [58])

2.2.5.2 Hübner [53]

Hübner verfasste an der holz.bau forschungs gmbh einen Forschungsbericht, welcher sich mit unterschiedlichen Untersuchungen zu Brettschicht- und Brettsperrholz aus Birkenholz beschäftigt. Im Anschluss daran erstellte er einen Arbeitsplan für weitere Prüfungen, die auf den Ergebnissen seiner Vorversuche aufbauen sollen.

Zugprüfungen Brettlamelle

Es wurden 61 Bretter mit den Abmessungen $b \times h \times l = 151 \text{ mm} \times 22 \text{ mm} \times 4050 \text{ mm}$ auf Zug gemäß ÖNORM EN 408 [5] geprüft. Diese Brettware stammte von der Firma Haslacher Norica Timber aus der Region Novgorod in Russland. Vor den Prüfungen wurden sowohl die genauen Abmessungen, die Masse als auch die Ultraschalllaufzeit (siehe Kapitel 4.3.1) und die erste Eigenfrequenz in Längsrichtung (siehe Kapitel 4.3.1) aufgenommen.

Die Rohdichte der Bretter wies einen Mittelwert von 609 kg/m^3 auf. Des Weiteren wurde eine mittlere Zugfestigkeit der höchsten Sortierklasse von $51,1 \text{ N/mm}^2$ erreicht und könnte mit seiner 5%-Quantile (bei Korrektur auf die Referenzlänge $9 b$ gemäß ÖNORM EN 1194 [8]) von $41,6 \text{ N/mm}^2$ der Festigkeitsklasse D70 zugeordnet werden. Alle weiteren Mittelwerte bzw. 5%-Quantile des Elastizitätsmoduls sowie der Zugfestigkeit sind der Tabelle 2.16 zu entnehmen.

Sortier- klasse	n	$E_{\text{reg,korr,mean}}^{1)}$ [N/mm ²]	$E_{\text{reg,korr,05}}^{1)}$ [N/mm ²]	$E_{\text{stat,EF,mean}}^{2)}$ [N/mm ²]	$E_{\text{stat,EF,05}}^{2)}$ [N/mm ²]	$f_{t,0,\text{mean}}$ [N/mm ²]	$f_{t,0,05}$ [N/mm ²]	CoV [%]
Ausschuss	8	13.440	9.877	14.125	10.567	26,0	15,1	25,5
Mittellage	26	14.962	12.470	14.942	12.486	41,4	27,8	18,5
Decklage	22	14.775	12.163	14.525	12.574	51,1	37,5	23,0
Alle	61	14.691	11.493	14.662	12.078	43,0	25,6	28,0

¹⁾... Zug-Elastizitätsmodul aus der Regressionsanalyse

²⁾... statischer Elastizitätsmodul durch Umrechnung des dynamischen Elastizitätsmodul aus der Eigenfrequenz

Tabelle 2.16: Auswertung der Zugprüfungen der Brettlamellen (vgl. [53])

Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass auf Grund des höchsten Bestimmtheitsmaßes eine normalverteilte Grundgesamtheit angenommen werden kann. Beim Vergleich des Zugelastizitätsmoduls mit den beiden dynamischen Elastizitätsmoduln ergibt sich, dass mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,834$ eine höhere Korrelation zum dynamischen Elastizitätsmodul aus der Eigenfrequenz besteht.

Vier-Punkt-Biegeprüfungen Brettschichtholz

Als Grundmaterial diente das gleiche Material wie es auch für die Zugprüfungen der Einzella-mellen verwendet wurde. Die Lamellen wurden auf $39,8 \text{ mm}$ gehobelt, über 15 mm lange Keil-zinken miteinander verbunden und anschließend wurden je vier Lamellen zu einem Brettschichtholzquerschnitt von $b \times h = 120 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ verklebt. Für die Verklebung wurden

das Melaminharz Dynea Prefere 4546 [26] und der Härter Prefere 5021 [26] verwendet.

Es wurden drei Prüfkörper auf Biegung über eine freie Spannweite von 2880 mm geprüft. Nach den Biegeprüfungen wurde die Keilzinkengeometrie vermessen (Zinkenspiel betrug im Mittel 2,54 mm) sowie die verschiedenen Bruchbilder analysiert und dokumentiert. Einerseits zeigten die Brüche lange Risse und andererseits das Abreißen von größeren Querschnittsflächen auf minimaler Länge. Aufgrund der hohen Biegefestigkeit konnten in der oberen Lamelle Durckfalten festgestellt werden.

Aus Tabelle 2.17 können die einzelnen Werte für Biegefestigkeit, Schubspannung, Elastizitätsmodul und Dichte entnommen werden.

	f_m [N/mm ²]	τ_{max} [N/mm ²]	E_{lokal} [N/mm ²]	$E_{global,app}$ [N/mm ²]	Dichte ρ_u [kg/m ³]
PK ¹⁾ 1	66,9	3,30	19.130	18.240	611
PK ¹⁾ 2	69,5	3,41	16.358	16.421	595
PK ¹⁾ 3	65,0	3,19	16.914	17.005	602
Mittelwert	67,2	3,30	17.467	17.222	602
CoV	3,38 %	3,39 %	8,40 %	5,39 %	1,34 %

¹⁾...Prüfkörper

Tabelle 2.17: Auswertung Biegeprüfungen Brettschichtholz (vgl. [53])

Aufgrund der Ergebnisse der Prüfungen kann dieses Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL44c zugeordnet werden. Dies ist laut [53] allerdings noch nicht ausreichend belegt, da erst nach mindestens 30 Prüfungen Aussagen über die tatsächlichen mittleren und charakteristischen mechanischen Eigenschaften getroffen werden können.

Vier-Punkt-Biegeprüfungen Brettsperrholz

Auch für diese Prüfungen stammt das Material aus der Region Novgorod in Russland. Es wurden sowohl Prüfungen mit fünfplagigem als auch mit dreilagigem Brettsperrholz durchgeführt. Die Bretter wurden kurz vor der Verklebung auf einen Querschnitt von 18 mm x 144 mm gehobelt. Acht der fünfplagigen Prüfkörper wurden im Vakuum-Press-Verfahren im Werk der Firma Hasslacher hergestellt (Probe 1). Die restlichen Prüfkörper (vier fünfplagige und 5 dreilagige) wurden in der Tischlerwerkstatt des Lignum Test Centers hergestellt (Probe 2).

Für die Prüfkörper der Probe 1 wurde eine mehr als doppelt so große Spannweite als für die der Probe 2 gewählt, da hier Biegebrüche provoziert werden sollten. Für Probe 2 wurden hingegen aufgrund der kürzeren Spannweite Rollschubbrüche erwartet.

Allerdings versagten die Prüfkörper beider Proben des fünfplagigen Brettsperrholzes auf Schub in den Klebefugen; es trat somit keiner der geplanten Versagensmechanismen auf. Die Auswertung dieser Biegeprüfungen kann Tabelle 2.18 entnommen werden.

		σ_m [N/mm ²]	$\tau_{r,max}$ [N/mm ²]	$\tau_{v,max}$ [N/mm ²]	E_0 [N/mm ²]	Dichte ρ [kg/m ³]
5-s BSP Probe 1 ¹⁾	Mittelwert	43,7	0,8	0,9	16.263	620
	CoV	9,2 %	10,1 %	9,6 %	6,8 %	1,4 %
5-s BSP Probe 2 ²⁾	Mittelwert	42,2	2,7	2,4	14.975	625
	CoV	7,8 %	7,6 %	7,7 %	2,4 %	1,1 %
3-s BPS Probe 2 ²⁾	Mittelwert	64,1	2,7	2,6	14.890	636
	CoV	11,0 %	10,8 %	10,8 %	3,7 %	1,1 %

¹⁾... im Werk der Firma Hasslacher hergestellt

²⁾... in der Tischlerwerkstatt des Lignum Test Centers hergestellt

Tabelle 2.18: Auswertung der Vier-Punkt-Biegeprüfungen von Brettsperrholz (vgl. [53])

Delaminierungsprüfungen

Es wurden verschiedene Proben der Delaminierungsprüfung unterzogen. Zum einen zwei Proben, die den Proben 1 und 2 aus den Brettsperrholzprüfungen entsprachen, und zum anderen zwei Proben, welche mit Kauramin Harz 683 [30] und Härter 688 [30] und unterschiedlichem Pressdruck, 0,1 N/mm² und 0,6 N/mm², hergestellt wurden. Außerdem wurden noch Proben aus den später nicht sichtbaren Außenwänden des Bauvorhabens „massive_living“ [76] entnommen (siehe Abbildung 2.6).

Die Anforderungen, welche nach ÖNORM EN 386 [3] an eine Verklebung gestellt werden, sind zum einen, dass nach einem Zyklus maximal 4 % und nach zwei Zyklen maximal 8 % aller Fugen delaminieren sowie, dass eine Einzelfuge zu maximal 40 % delaminieren darf. Diese Anforderungen konnten nur von den Proben, die mit dem Kauramin Harz hergestellt wurden erfüllt werden. Ergänzend wurde angemerkt, dass die gekreuzten Brettlagen des Brettsperrholzes eher delaminieren als die parallel verlaufenden von Brettschichtholz.

Pressdruck für Keilzinkenverklebung

Der Querschnitt der Bretter für die Keilzinkenverbindungen betrug $h \times b = 42 \text{ mm} \times 128 \text{ mm}$. Es wurden vor den Prüfungen sowohl die genauen Abmessungen, die Masse als auch der dynamische Elastizitätsmodul, welcher über die Eigenfrequenz (siehe Kapitel 4.3.1) ermittelt wurde, aufgenommen. Um die Reibung in der Keilzinke so zu gestalten, wie dies auch in der maschinellen Produktion der Fall ist, wurde der Härter in die stehenden Keilzinken gegossen, das Keilzinkenpaar geschlossen und leicht zusammengedrückt, um eine gleichmäßige Verteilung des Härters zu erreichen. Bei der weiteren Prüfung wurde der herausquellende Härter immer wieder mit einem Pinsel entfernt. Es wurde die Kraft, bei der kein Klebstoff mehr austrat $F_{\text{Knick,vis}}$ auf 5 kN genau abgelesen, ebenso wie die Kraft beim ersten Knacken durch Rissbildung F_{Knack} .

Tabelle 2.19 zeigt die Auswertung der Prüfungen der Keilzinkenverklebungen. Es werden die Druckspannung bei geschlossener Keilzinke σ_{Knick} , die Druckspannung beim ersten Knackgeräusch σ_{Knack} und die Druckfestigkeit $f_{c,0}$ der noch nicht ausgehärteten Keilzinkenverbindung angegeben.

	Anzahl [-]	Minimum [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	Maximum [N/mm ²]	CoV [%]	5%-Quantil [N/mm ²]
σ_{Knick} ¹⁾	40	17,6	24,4	31,0	12,2	19,8
σ_{Knack} ²⁾	32	15,8	29,6	38,9	19,7	21,4
$f_{c,0}$ ³⁾	40	24,7	31,2	44,4	11,5	31,1

¹⁾... Druckspannung bei geschlossener Keilzinke

²⁾... Druckspannung beim ersten Knackgeräusch

³⁾... Druckfestigkeit, der noch nicht ausgehärteten Keilzinkenverbindung

Tabelle 2.19: Auswertung der Keilzinkenverklebungen (vgl. [53])

Laut [53] kann aus den Ergebnissen festgestellt werden, dass der Pressdruck bei einer Keilzinkenverklebung von Birke bei 20 N/mm² liegen sollte. Da es bei einer Festigkeitsortierung sein könnte, dass zwischen den Festigkeitsklassen signifikante Unterschiede in der Rohdichte auftreten, wäre es für diesen Fall notwendig, eine Abwägung zu treffen, ob eine Anpassung des Pressdrucks für verschiedene Festigkeitsklassen erforderlich ist. Außerdem ist bei der Produktion auf eine eventuelle Rissbildung, insbesondere in den Randbereichen, zu achten. Es wurde durch weitere Untersuchungen festgestellt, dass der festgelegte Pressdruck von 20 N/mm² zu hoch angesetzt wurde, da die Lastaufbringung bei den Prüfungen unter Laborbedingungen zu langsam durchgeführt wurden, um diese mit der Werksfertigung vergleichen zu können.

Arbeitsplan für weitere Prüfungen

Da die Ergebnisse dieser Vorarbeiten zu Brettsperrholz und Brettschichtholz sehr vielversprechend waren, ist es das Ziel, der in diesem Arbeitsplan festgelegten Prüfungen, dass die grundlegenden Materialeigenschaften versuchstechnisch abgeklärt und die Keilzinken- und Flächenverklebung optimiert werden. Laut [53] ist es sowohl für Brettsperr- als auch für Brettschichtholz essentiell, die Festigkeitsortierung sowie die Keilzinken- und Flächenverklebung zu optimieren.

geplante Prüfungen Brettsperrholz:

- 30 Delaminierungsprüfungen einer Flächenverklebung mit MUF Dynea Prefere [28]
- Keilzinkenverklebung MUF Dynea Prefere [28]
 - 30 Zugprüfungen
 - 30 Vier-Punkt-Biegeprüfungen
 - 30 Delaminierungsprüfungen

- 200 Zugprüfungen Brettlamelle mit Festigkeitssortierung in drei Klassen
- je 15 Vier-Punkt-Biegeprüfungen für Platte und Scheibe zur Ermittlung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls
- 15 Vier-Punkt-Biegeprüfungen zur Ermittlung von Rollschubfestigkeit und Rollschubmodul
- 15 Scherprüfungen zur Ermittlung von Rollschubfestigkeit und Rollschubmodul

geplante Prüfungen Brettschichtholz:

- 30 Delaminierungsprüfungen einer Flächenverklebung mit MUF Dynea Prefere [26]
- 30 Vier-Punkt-Biegeprüfungen zur Ermittlung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls
- 30 Vier-Punkt-Biegeprüfungen zur Ermittlung der Schubfestigkeit und des Schubmoduls

2.2.5.3 Sieder [82]

Sieder prüfte an der holz.bau forschungs gmbh für den betreffenden Forschungsbericht [82] Birken-Lamellen auf Zug und Birken-Keilzinkenverbindungen auf Zug und Biegung. Dies ist ein Teil des von Hübner [53] vorgegebenen Arbeitsplans. Auch für diese Prüfungen stammt das Grundmaterial (ca. 680 Brettlamellen mit 42 mm x 128 mm x 4000 mm) aus der gleichen Region wie für [53].

Sortierung

Es wurden für die Zugprüfungen der Brettlamellen alle Bretter visuell gemäß der DIN 4047-5 [15] in die Sortierklassen LS13 und LS10 eingeteilt. Dafür wurden allerdings nur die Kriterien der Merkmale „Einzelaust“ und „Astansammlung“ betrachtet. Alle Bretter die nicht in eine der beiden Klassen eingeteilt werden konnten, wurden dem Ausschuss zugeordnet. Für die Keilzinkenprüfungen wurden die Birkenlamellen nach dem dynamischen Elastizitätsmodul sortiert und 140 Lamellen ausgewählt, welche den gesamten Streubereich des dynamischen Elastizitätsmoduls abdeckten.

Zugprüfungen Brettlamelle

Es wurden 59 Bretter auf Zug am Lignum Test Center der Technischen Universität Graz geprüft, davon entsprachen 17 der Sortierklasse LS13. Die Auswertung dazu kann Tabelle 2.20 entnommen werden.

		$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{0, \text{lokal}, 12}^{2)}$ [N/mm ²]	$E_{\text{dyn}, \text{US}, 12}^{3)}$ [N/mm ²]	$E_{\text{dyn}, \text{EF}}^{4)}$ [N/mm ²]	Dichte ρ [kg/m ³]
Gesamt (59)	Mittelwert	37,4	14.476	18.346	15.186	600,0
	CoV	24,6 %	14,0 %	10,1 %	11,4 %	6,0 %
	5%-Quantile	22,2	11.149	15.301	12.338	541,0
LS13 (17)	Mittelwert	43,4	15.309	19.001	16.003	597,2
	CoV	16,2 %	10,3 %	7,7 %	8,9 %	4,5 %
	5%-Quantile	31,8	12.711	16.583	13.667	552,7
LS10 (26)	Mittelwert	37,1	13.910	17.933	14.676	596,9
	CoV	23,1 %	12,5 %	10,3 %	11,2 %	5,4 %
	5%-Quantile	23,1	11.052	14.908	11.984	544,4
Ausschuss ¹⁾ (16)	Mittelwert	31,5	14.511	18.320	4.146	607,9
	CoV	27,6 %	17,9 %	11,6 %	12,8 %	8,0 %
	5%-Quantile	17,2	10.228	14.823	11.953	527,4

¹⁾... entsprach nicht den Sortierklassen LS10 und LS13 gemäß ÖNORM DIN 4074-5 [15]

²⁾... lokaler Zug-Elastizitätsmodul

³⁾... dynamischer Elastizitätsmodul aus der Ultraschallmessung

⁴⁾... dynamischer Elastizitätsmodul aus der Eigenfrequenz

Tabelle 2.20: Auswertungen der Zugprüfungen der Birken-Brettlamellen (vgl. [82])

Die Verteilung des vorliegenden Datensatzes der Zugfestigkeit konnte am besten durch eine Normalverteilung angenähert werden. Zwischen der Zugfestigkeit und dem Elastizitätsmodul konnte keine ausgeprägte Korrelation ($\text{adj. } R^2 = 0,23$) festgestellt werden (siehe Abbildung 2.15, links). Zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte ist kein Zusammenhang ($\text{adj. } R^2 = 0,003$, siehe Abbildung 2.15, rechts) ersichtlich. Dies wäre laut [82] insofern wünschenswert, als dass im Allgemeinen eine Korrelation zwischen den mechanischen Eigenschaften und der Rohdichte bei Holz bekannt ist. Ein sehr starker Zusammenhang ($\text{adj. } R^2_{\text{EF}} = 0,88$, $\text{adj. } R^2_{\text{US}} = 0,82$) konnte allerdings zwischen dem lokalen statischen und den dynamischen Elastizitätsmoduln festgestellt werden.

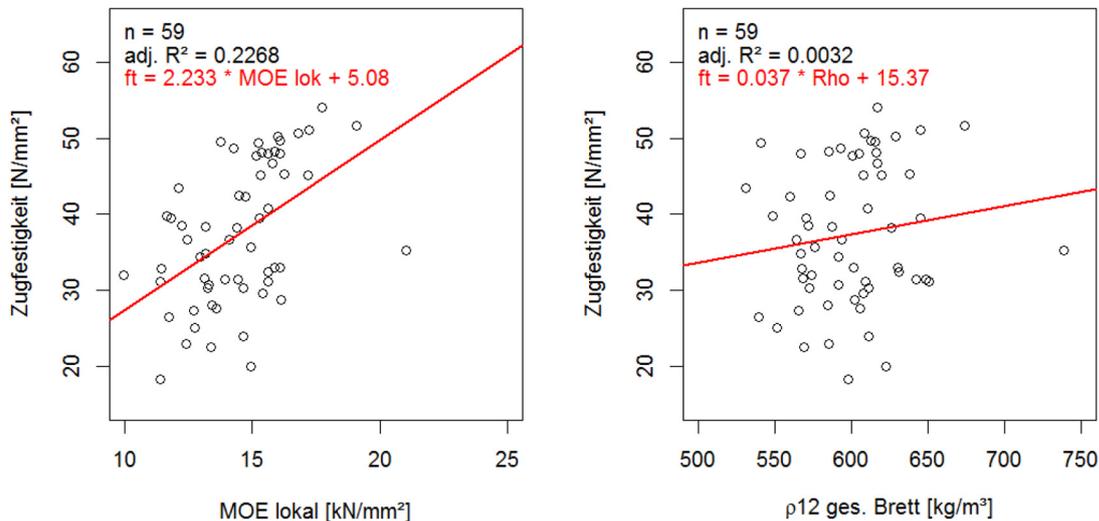


Abbildung 2.15: Korrelation der Zugfestigkeit mit dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul (links) bzw. mit der Rohdichte (rechts) (aus [82])

Auf Basis der Ergebnisse für die Zugprüfungen könnten die Sortierklassen LS13 und LS10 den Festigkeitsklassen D50 bzw. D40 zugeordnet werden. Zusätzlich wurden die charakteristischen Festigkeitswerte nach EN 1194 [8] für Brettschichtholz abgeschätzt. Demnach könnte nach dieser Hochrechnung mit der Sortierklasse LS13 eine Festigkeitsklasse GL42 erreicht werden.

Keilzinkenverbindung

Die Keilzinkenproben wurden nach vorheriger Sortierung im Werk der Firma Hasslacher hergestellt. Gleich im Anschluss daran wurden die Zinkenpaare mit dem Klebstoff Dynea Prefere 4546 [26] und dem Härter Dynea Prefere 5021 [26] verklebt. Es wurden sowohl die Zug- als auch die Biegeprüfungen, welche flachkant erfolgten, von der Holzforschung Austria/ Wien (AT) durchgeführt. Aus Tabelle 2.21 können die Ergebnisse der Zug- und Biegeprüfungen der Keilzinkenverbindungen entnommen werden.

	Zugfestigkeit $f_{t,0}$ [N/mm²]	Biegefestigkeit f_m [N/mm²]
n	66	53
Mittelwert	54,1	71,6
CoV	14,5 %	10,3 %
5%-Quantile	41,3	60,1

Tabelle 2.21: Auswertung der Keilzinkenprüfungen (vgl. [82])

Auch die Verteilung dieses Datensatzes für die Zugfestigkeit konnte am besten durch eine Normalverteilung angenähert werden. Es wurde ein mäßiger Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Zug- (adj. $R^2 = 0,43$) bzw. der Biegefestigkeit (adj. $R^2 = 0,37$) der Keilzinkenverbindung festgestellt. Außerdem besteht ein mäßiger Zusammenhang zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul und der Zug- (adj. $R^2 = 0,36$) bzw. Biegefestigkeit (adj. $R^2 = 0,44$) der Keilzinkenverbindung. Es konnte kein relevanter Zusammenhang zwischen der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen und den Unterschieden der Materialparameter der Fügepaare festgestellt werden. Allerdings ist dazu anzumerken, dass es aufgrund der eingehenden Sortierung nach dem dynamischen Elastizitätsmodul nur geringe Unterschiede in den Kenngrößen (Rohdichte und Elastizitätsmodul) der verbundenen Probekörper gab.

Auch hier erfolgte eine Abschätzung der erreichbaren Festigkeitsklasse für Brettschichtholz. Diese ergab, dass die vorhandenen Keilzinkenfestigkeiten die Anforderungen von der Festigkeitsklasse GL42, welche für die Brettlamellen möglich wäre, deutlich überschritten. Unter Voraussetzung, dass die Tragmodelle der EN 1194 [8] auch für Birke annähernd zutreffend sind, wäre bei entsprechender Sortierung durchaus das Erreichen der Festigkeitsklasse GL48 möglich.

2.2.5.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die ermittelten Grundkenngrößen der drei Forschungsberichte gut übereinstimmen. Auch die festgestellten Zusammenhänge zwischen Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul bzw. Rohdichte sind in allen Arbeiten ähnlich. Daraus kann geschlossen werden, dass die in den Forschungsarbeiten ermittelten Werte zur Abschätzung weiterer Prüfungen verwendet werden können.

In Tabelle 2.22 sind die Mittelwerte der jeweiligen Prüfserien für die höchste Sortierklasse zusammengefasst.

		Kilde et al. [58]	Hübner [53]	Sieder [82]
Lamelle Keilzinke	n	142 -	22 -	17 66
	$f_{t,0,mean}$ [N/mm ²]	53,6 -	51,1 -	43,4 54,1
	$f_{m,mean}$ [N/mm ²]	- -	- -	- 71,6
	$E_{0,mean}$ [N/mm ²]	14.805 -	14.775 -	15.309 -
	ρ_{mean} [kg/m ³]	636 -	609 -	597,2 -

Tabelle 2.22: Zusammenfassung der Mittelwerte von Birkenlamellen, Brettschicht- und Brettsperrholz (vgl. [53], [58], [82])

		Kilde et al. [58]	Hübner [53]	Sieder [82]
BSH	n	14	3	-
	$f_{m,mean}$ [N/mm ²]	53,8	67,2	-
	τ_{max} [N/mm ²]	-	3,3	-
	$E_{0,lokal}$ [N/mm ²]	14.734	17.467	-
	$E_{0,global}$ [N/mm ²]	13.736	17.222	-
	ρ_{mean} [kg/m ³]	629	602	-
3-s BSP	n	-	5	-
	$\sigma_{m,mean}$ [N/mm ²]	-	64,1	-
	$\tau_{r,max,mean}$ [N/mm ²]	-	2,65	-
	$\tau_{v,max,mean}$ [N/mm ²]	-	2,6	-
	$E_{0,mean}$ [N/mm ²]	-	14.890	-
	ρ_{mean} [kg/m ³]	-	636	-

Tabelle 2.22: Zusammenfassung der Mittelwerte von Birkenlamellen, Brettschicht- und Brettsperrholz (vgl. [53], [58], [82])

2.3 Hirnholzverbindungen

Das folgende Kapitel widmet sich Arbeiten zur Verbindungstechnik, in denen Hirnholzverschraubungen parallel zur Faserrichtung (Kapitel 2.3.1) und Verbindungen mit faserparallel eingeklebten Stahlblechen (Kapitel 2.3.2), näher behandelt werden.

2.3.1 Faserparallele Hirnholzverschraubungen

[78]

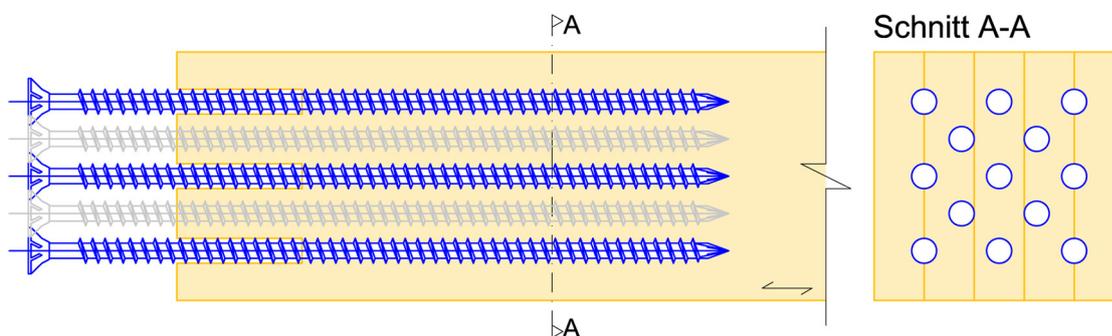


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung einer Hirnholzverschraubung parallel zur Faserrichtung

Holzschrauben werden im Gegensatz zu herkömmlichen metrischen Stahlschrauben zur Übertragung von axialen Kräften auf das Holz bzw. den Holzwerkstoff eingesetzt. Man unterscheidet zwei Arten von Holzschrauben. Zum einen jene mit einem geschnittenen Gewinde, deren Schaftdurchmesser dem Außendurchmesser des Gewindes entspricht und zum anderen selbstbohrende Holzschrauben mit einem geschmiedeten oder gewalzten Gewinde, welche einen geringeren Schaftdurchmesser als den Außendurchmesser des Gewindes aufweisen. Die selbstbohrende Holzschraube kann in Hirnholz axial beansprucht und ohne Vorbohrung eingeschraubt werden. Dies gilt allerdings nur für Nadelholz. Bei Laubholz sollte auch bei selbstbohrenden Holzschrauben vorgebohrt werden, um eine gerade Einschraubung zu erzielen, die Schraube nicht „abzudrehen“ und ein Aufspalten zu verhindern. Des Weiteren wird zwischen Voll- und Teilgewindeschrauben unterschieden. Zweitere können zum Beispiel bei Holz-Holz-Verbindungen eingesetzt werden, um eine Anpresswirkung zwischen den zu verbindenden Holzteilen zu erzeugen. Die Kraftübertragung einer Holzschraube erfolgt über den Schraubenkopf sowie entlang des Gewindes. Die durch eine Schraube übertragbare Kraft hängt von der Beschaffenheit und der Länge des Gewindes ab, welches in das Holz eingeschraubt wird. Da nicht immer das gesamte Gewinde in das Holz eingeschraubt wird, wird zwischen der Gesamtlänge, der Gewindelänge, der Eindringtiefe, der Einbindetiefe und der Einschraublänge unterschieden (siehe Abbildung 2.17).

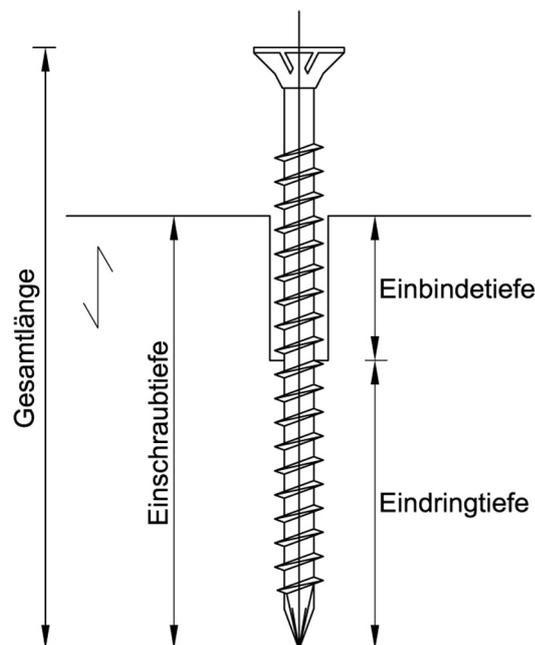


Abbildung 2.17: Skizze zur Definition der Einbindetiefe und der Eindringtiefe

Da in Österreich gemäß ÖNORM EN 1995-1-1 [9] nur Verschraubungen mit einem Winkel zwischen 30° und 90° zur Faserrichtung geregelt sind, wird hier im weiteren Teil dieses Kapitel hauptsächlich auf andere Forschungsarbeiten verwiesen.

2.3.1.1 Versagensarten von Holzschrauben

[52], [78]

Eine Verbindung mit Holzschrauben, welche nur axial beansprucht wird, kann auf folgende Arten versagen: Blockscheren, Ausziehen der Schraube, Stahlbruch der Schraube, Kopfdurchziehen und Aufspalten. Im Nachfolgenden sind diese Mechanismen in Tabelle 2.23 aufgelistet und näher erklärt.

Versagen	Beschreibung	Bild
Blockscheren	beim Überschreiten der Schubspannungen im Bereich der Umrisslinie der Verbindungsmittelgruppe durch zu gering gewählte Mindestabstände	 [78]
Ausziehen der Schraube	Schraube wird durch Überschreitung der Scher- bzw. Schubfestigkeit im Bereich der Umrisslinie des Schraubengewindes aus dem Holz herausgezogen	
Stahlbruch der Schraube	Schraube versagt bei Überschreiten der Schraubenzugfestigkeit	
Kopfdurchziehen	bei zu geringen Holzdicken, kann es als Folge des Eindrückens der Schraube zum Kopfdurchziehen kommen	 [41]
Aufspalten	Holzquerschnitt spaltet bei zu geringen Abständen zwischen den Schrauben aufgrund zu hoher Querspannungen auf	

Tabelle 2.23: Überblick möglicher Versagensmechanismen von axial beanspruchten Schrauben (vgl. [41], [78])

Für zugbeanspruchte Hirnholzverschraubungen parallel zur Faserrichtung sind die relevanten Versagensarten das Ausziehen der Schraube, das Aufspalten des Holzes und der Schraubenbruch. Die beiden Versagensmechanismen Schraubenbruch und Ausziehen der Schraube hängen zusammen, da, um das Ausziehen der Schraube zu verhindern, die Eindringtiefe erhöht wird und somit bei Versagen der Verbindung Schraubenbruch auftritt, wenn kein anderer Mechanismus als Ausziehen maßgebend wird. Umgekehrt funktioniert es gleich, wenn ein Stahlversagen der Schraube verhindert werden soll, muss die Eindringtiefe der Schraube verringert werden und es wird somit ein Ausziehen der Schraube erreicht. Um das Aufspalten des Holzes zu verhindern, ist es besonders wichtig, die Abstände der Schrauben untereinander und zu den Bauteilrändern groß genug zu wählen.

2.3.1.2 Mindestabstände

Mindestabstände zwischen den Schrauben

[9], [46], [72]

Für die Mindestabstände für in Hirnholz eingeschraubte Holzschrauben gibt es in der gültigen ÖNORM EN 1955-1-1 [9] keine Angaben, da hier nur Verschraubungen mit einem Winkel zur Faserrichtung größer als 30° geregelt sind. Somit müsste der Mindestabstand $a_2 = 5d$ eingehalten werden. Deshalb wird hier in weiterer Folge auf andere Forschungsarbeiten verwiesen.

In [72] werden verschiedene Abstände der Schrauben in der Schmalseite von Brettsperrholz aus Fichte untersucht. Unter anderem die Abstände von Schrauben untereinander bei einer Einschraubung in Hirnholz. Die Erkenntnisse dieser Arbeit zeigen, dass ein Schraubenabstand von $2,5d$ ausreichend ist, um bei faserparalleler Verschraubung die maximale Last auf die Schrauben aufbringen zu können.

In [46] wiederum wird der festgelegte Wert von $5d$, wie er in der ÖNORM EN 1995-1-1 [9] angegeben ist, anhand von Prüfungen mit Fichtenholz bestätigt. Es wurde festgestellt, dass bei einem Abstand von $5d$ der Schwellenwert, ab dem keine Steigerung der Tragfähigkeit durch einen größeren Multiplikator erreicht werden kann, liegt. Allerdings ist laut [46] diese Festlegung als Mindestabstand problematisch, da dies wirtschaftlich uninteressant ist. Es wird für kleinere Multiplikatoren ein Reduktionsfaktor, welcher in Gleichung (2.1) dargestellt ist, für die Ermittlung der Ausziehtragfähigkeit angegeben.

$$k_{\text{red}} = \left(\frac{a}{5d}\right)^{0,35} \quad (2.1)$$

k_{red} ...	Reduktionsfaktor [-]
a ...	Mindestabstand [mm]
d ...	Schraubendurchmesser [mm]

Abbildung 2.18 zeigt, dass bei Verbindungsmittelabständen zwischen $2,6d$ und $3,3d$ der optimale Abstand liegt und dieser Bereich baupraktisch interessant ist. Dies bedeutet, dass durch eine engere Anordnung der Verbindungsmittel eine Leistungssteigerung möglich ist. Es ist anzu-

merken, dass die Abbildung 2.18 nur als Orientierungshilfe anzusehen ist, da diese für Gewindestangen angefertigt wurde und nicht für Schrauben, aber die grundlegende Aussage gilt für beide Arten der Verbindungsmittel.

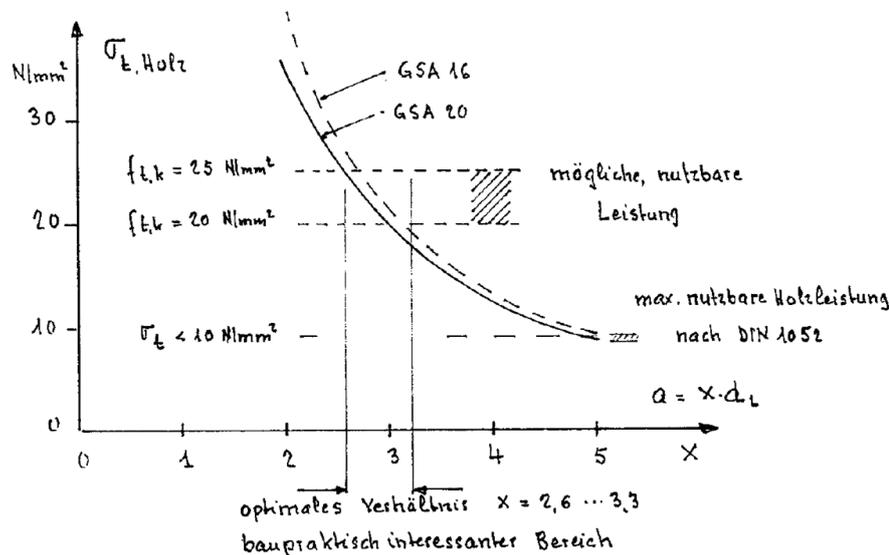


Abbildung 2.18: Leistungssteigerung in Abhängigkeit des Verbindungsmitteleabstandes $a = x \cdot d_L$ (aus [46])

In der nachfolgenden Tabelle 2.24 werden diese drei Quellen gegenüber gestellt um einen Vergleich deutlicher darzustellen.

Quelle	Bezeichnung	Wert
Plüss [72]	$a_{1,p}^{1)}$	2,5 d
Gehri [46]	$a^{2)}$	2,6 d

¹⁾... Abstand zwischen den Schrauben parallel zur Schraubenebene

²⁾... Abstand zwischen den in Hirnholz eingedrehten Schrauben

Tabelle 2.24: Literaturvergleich zu Mindestabständen zwischen den Schrauben bei Hirnholzverschraubung (vgl. [46], [72])

Randabstände

[9], [45]

Die Randabstände sind für Verschraubungen bei 0° zur Faser in der ÖNORM EN 1995-1-1 [9] nicht geregelt.

Gatternig [45] untersuchte verschiedene Randabstände bei verschiedenen Einschraubwinkeln in Fichtenholz mit Schrauben, die einen Durchmesser von sechs Millimeter aufwiesen. Es wurde zwischen Randabständen von 7,5 d und 0,5 d variiert. In Abbildung 2.19 ist die Abhängigkeit der Bruchkraft vom Randabstand der Schrauben bei einer Einschraubung von 0° zur Faser dargestellt. Dieses Bild zeigt, dass erst bei einem Randabstand von 0,5 d ein signifikanter Abfall zu

erkennen ist. Im Bereich von 2 d bis 5 d ist keine nachweisbare Änderung der aufnehmbaren Kraft zu erkennen. Somit kann als geringster Randabstand $a = 2 d$ gesetzt werden.

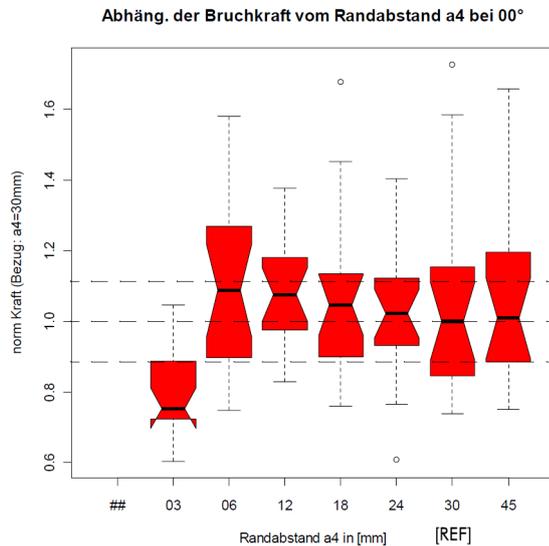


Abbildung 2.19: Abhängigkeit der Bruchkraft vom Randabstand der Schrauben bei einer Einschraubung von 0° zur Faser (aus [45])

2.3.1.3 effektive Verbindungsmittelanzahl

[9], [61], [63]

Die wirksame, effektive Verbindungsmittelanzahl kann bei Einhaltung von Mindestabständen und Schlankheiten der Verbindungsmittel gut abgeschätzt werden. In der ÖNORM EN 1995-1-1 [9] wird $n_{ef} = n^{0,9}$ angegeben. In der Praxis wird laut [61] von Ingenieuren häufig eine Abminderung von 10 % bis 15 % pro Reihe in Rechnung gestellt.

Krenn [61], [63] empfiehlt in seinen Forschungsarbeiten ($\alpha_{min} = 30^\circ$), auf Basis der dafür durchgeführten Prüfungen mit Fichten-Brettschichtholz, einen globalen multiplikativen Abminderungsfaktor von 0,9 für die Nachweisführung anzusetzen. Unter Laborbedingungen entspricht laut [61] die effektive der tatsächlichen Verbindungsmittelanzahl ($n = n_{ef}$).

2.3.1.4 Abschätzung der Schraubentragfähigkeit auf Herausziehen

[51], [52]

Hübner hat die Gleichung (2.2) auf Basis von ca. 2600 durchgeführten Schraubenausziehprüfungen ermittelt. Diese Gleichung nähert die Prüfergebnisse mit einer Abweichung von maximal 10,77 % am besten an. Diese Gleichung wurde für Buchen-, Eschen und Robinien-Brettschichtholz mit einem Rohdichtebereich von 550 kg/m³ bis 920 kg/m³ ermittelt. Für Fichte würde es weitere Modelle geben. Diese decken allerdings nicht den gewünschten Rohdichtebereich ab und können daher für Laubholz nicht angewendet werden.

$$R_{ax,mean} = 2,39 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef} \cdot \rho_{mean}^{1,6} \cdot d^{0,66} \begin{cases} 1 - 0,006 \cdot (30^\circ - \alpha) & 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \\ 1 & 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.2)$$

$R_{ax,mean}$... Mittelwert des Ausziehwerstandes [N]
 l_{ef} ... effektive Einschraublänge [mm]
 ρ_{mean} ... Mittelwert der Rohdichte [kg/m³]
 d ... Schraubendurchmesser [mm]
 α ... Einschraubwinkel [°]

Gleichung (2.2) kann in weiterer Folge auch zur Ermittlung der minimalen effektiven Einschraublänge verwendet werden, um zu ermitteln, ab welcher Eindringtiefe ein Versagen durch Stahlbruch auftritt. Dafür wird der mittlere Ausziehwerstand $R_{ax,mean}$ gleichgesetzt mit dem Mittelwert der Schraubenzugfestigkeit.

Gleichung (2.3) gilt nur für kurzzeitige Lasten mit einer Belastungsdauer von 300 ± 120 Sekunden.

$$R_{ax,05} = 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef} \cdot \rho_{05}^{1,6} \cdot d^{0,66} \begin{cases} 1 - 0,006 \cdot (30^\circ - \alpha) & 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \\ 1 & 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.3)$$

$R_{ax,05}$... 5%-Quantile des Ausziehwerstandes [N]
 l_{ef} ... effektive Einschraublänge [mm]
 ρ_{05} ... 5%-Quantile der Rohdichte [kg/m³]
 d ... Schraubendurchmesser [mm]
 α ... Einschraubwinkel [°]

2.3.1.5 Langzeiteinfluss auf Schrauben 0° zur Faser

[51], [52]

Da in [51] bzw. [52] keine Langzeitversuche durchgeführt wurden, bezog sich Hübner auf [70], [71] und [83], die sich mit Langzeitversuchen von Nadelholz auseinandersetzen. So wurde Gleichung (2.4) entwickelt, wobei der Unterschied zu Gleichung (2.3) nur darin besteht, dass hier die Ausziehtragfähigkeit nicht um den Faktor 0,006 sondern um 0,01 reduziert wurde. Zusätzlich wurde festgelegt, dass eine Mindesteinbindetiefe von $2d$ vorhanden sein muss, um diese Gleichung anzuwenden.

$$R_{ax,k} = 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef} \cdot \rho_k^{1,6} \cdot d^{0,66} \begin{cases} 1 - 0,01 \cdot (30^\circ - \alpha) & 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \cap l_{emb} = 2d \\ 1 & 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.4)$$

2.3.1.6 Vorbohren in Laubholz

[9], [33], [34], [69]

Vor allem bei Laubholz ist es wichtig, vor dem Eindrehen der Holzschrauben vorzubohren, da es ansonsten bei geringen Schraubendurchmessern durch die hohe Rohdichte des Holzes dazu kommen kann, dass sich die Schrauben verbiegen und den Weg des geringsten Widerstandes wählen. Durch die Vorbohrung kann eine gerade Einschraubung unter dem gewollten Winkel besser garantiert werden. Außerdem kann dadurch das Risiko des Aufspaltens und ein „Abdrehen“ der Schraube stark reduziert werden.

Die ÖNORM EN 1995-1-1 [9] gibt nur bis zu einer maximalen Rohdichte von 500 kg/m^3 einen Vorbohrdurchmesser mit $0,7 d$ vor. Für höhere Rohdichten sind keine expliziten Angaben vorhanden. Es wird allerdings empfohlen, den erforderlichen Durchmesser für das Vorbohren durch geeignete Prüfungen zu ermitteln.

In den Zulassungen Z-9.1-519 [34] und ETA-11/0190 [33] sind jeweils Tabellen mit den zugehörigen Bohrlochdurchmessern für Laubholz angegeben. Diese Werte sind für die wesentlichen Schraubendurchmesser in Tabelle 2.25 angegeben.

Gewindedurchmesser d [mm]	6	8	10	12
Bohrlochdurchmesser d_{BL} [mm]	4	6	7	8

Tabelle 2.25: empfohlene Bohrlochdurchmesser zu den jeweiligen Gewindedurchmessern (vgl. [33], [34])

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle Angaben auf ähnliche Bohrlochdurchmesser hindeuten, da auch kein Unterschied zwischen unterschiedlichen Schrauben sein sollte. Außerdem wurde im Forschungsbericht von Pirnbacher [69] bestätigt, dass kein Unterschied beim Auszieh Widerstand zwischen Schrauben mit und ohne Vorbohrung besteht. Dafür wurden Prüfungen mit und ohne Vorbohrung für jeweils sieben verschiedene Eindrehwinkel zwischen 0° und 90° verglichen. Es konnte ein maximaler Unterschied von $3,5\%$ für das Mittelwertniveau festgestellt werden.

2.3.2 Faserparallel eingeklebte Stahlbleche

Dieses Kapitel behandelt Stahlbleche, welche in Holz faserparallel eingeklebt werden. Dieses System besteht aus den Komponenten Holz, Stahlblech und Klebstoff. Da es für ein solches System als Verbindungsmittel im Holzbau wenig Forschungsarbeiten gibt, wird zu Beginn auf den Stand der Technik mit einem Beispiel einer Forschungsarbeit eingegangen. Anschließend wird auf die Verklebung solcher Verbindungen näher eingegangen. In Abbildung 2.20 ist eine schematische Darstellung einer möglichen Hirnholzverbindung über ein faserparallel eingeklebtes Stahlblech dargestellt.

Für nähere Informationen zum Thema Stahlblech-Holz-Verklebung siehe auch [37], [38].

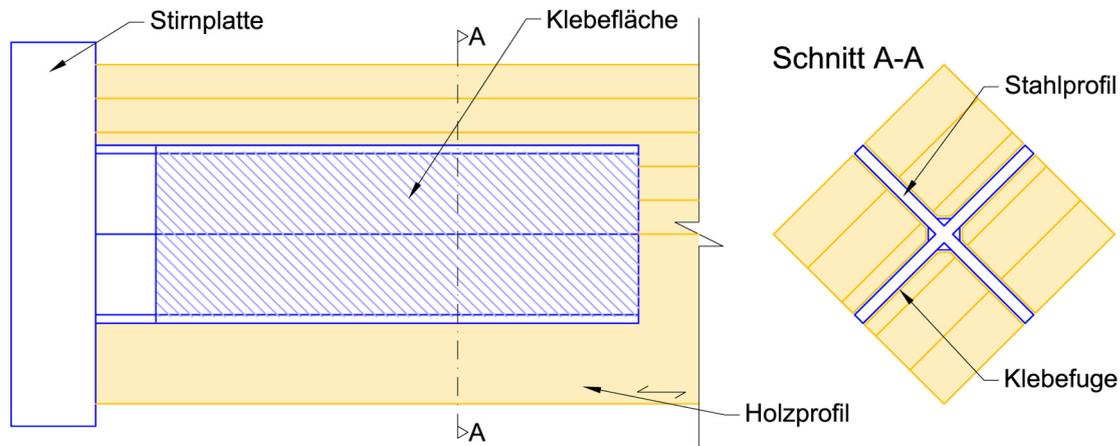


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung eines in Hirnholz eingeklebten Stahlbleches

2.3.2.1 Stand der Technik - Vergleich von Fachwerkanschlüssen mit Stabdübeln und eingeklebten Blechen

[50]

An der Fachhochschule Bern wurde im Jahr 2010 ein Forschungsprojekt zu diesem Thema durchgeführt. Es wurden zwei Fachwerkstypen aus Fichtenholz, zum einen ein „Standard-Fachwerk“ mit Stabdübelverbindungen und zum anderen ein Fachwerk, das Verbindungen mit eingeklebten Stahlblechen aufweist, miteinander verglichen. Es wurden sowohl Ergebnisse der Prüfungen als auch numerische Analysen miteinander verglichen und es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den Prüfungen und den numerischen Analysen festgestellt werden. Daraus geht hervor, dass eine Verbindung mit eingeklebten Stahlblechen die folgenden Vorteile gegenüber einer üblichen Stabdübelverbindung bietet:

Einer der größten Vorteile einer Verbindung mit eingeklebten Stahlblechen gegenüber einer üblichen Stabdübelverbindung ist, dass sie eine ca. dreimal so große Steifigkeit aufweist und somit die Gesamtverformungen des Fachwerks nur ungefähr ein Viertel der Gesamtverformung eines Fachwerks mit Stabdübelverbindungen aufweist. Dies ist natürlich von Vorteil, wenn der Grenzstand der Gebrauchstauglichkeit mit Stabdübelverbindungen nicht oder nur schwer eingehalten werden kann. Dieses Verhalten ist in Abbildung 2.21 zur besseren Anschaulichkeit als Diagramm dargestellt.

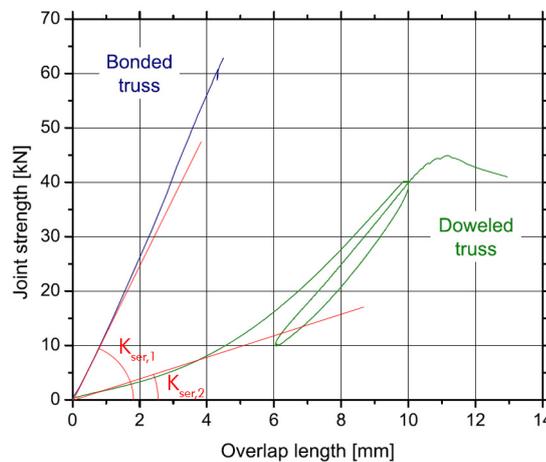


Abbildung 2.21: Absolute Verformung des Fachwerkes mit einklebten Stahlblechen im Vergleich zu Stabdübelverbindungen (nach [50])

Ein weiterer Vorteil ist, dass auch die Bruchlast des Fachwerkes mit Verbindungen aus eingeklebten Stahlblechen um ca. 40 % höher ist als die eines „Standard-Fachwerkes“.

Einen Nachteil, der aus diesen Prüfungen hervorging, stellt das sprödere Versagen der Verbindungen mit eingeklebten Stahlblechen dar. Dieses unterschiedlich spröde Versagen resultiert aus ihren unterschiedlichen Steifigkeiten. Allerdings ist dieser Unterschied auch hauptsächlich auf die weggesteuerte Prüfung zurückzuführen. Wenn man laut [50] eine kraftgesteuerte Prüfung, welche laut [50] der Realität entspricht, durchführen würde, wäre der Unterschied nicht so stark und das Fachwerk mit den Stabdübelverbindungen würde ein beinahe genauso sprödes Versagen ohne eine „Pseudoduktilität“ aufweisen. Bei dieser Aussage ist darauf hinzuweisen, dass diese Anschauung in Frage zu stellen ist.

2.3.2.2 Verklebung

[48], [49], [73], [74]

In diesem Kapitel werden die Versagensmechanismen, die Spannungsverteilung, die Oberflächenbehandlung und die Herstellung einer Klebeverbindung, behandelt. Da im Zuge der Literaturrecherche kaum Arbeiten zum Thema „Stahlblech-Holz-Verklebung“ speziell für Birke vorliegen, erfolgte die Auswahl eines geeigneten Klebstofftyps auf Empfehlung des Klebstoffherstellers.

Versagensmechanismen

Neben den Versagensmechanismen des Stahls und des Holzes, wie diese auch bei Schraubverbindungen auftreten können, gibt es für diese Verbindungsart noch die Möglichkeit eines Schubversagens in der Klebefuge. Diese Versagensmechanismen sind in Tabelle 2.26 aufgelistet und definiert.

Versagensmechanismus	Definition
Nettoquerschnittsversagen	Bruch des Holzquerschnitts bei Überschreitung der maximal aufnehmbaren Zugspannung
Aufspalten	bei Überschreiten der Querkzugspannungen am Holzquerschnitt
Scherversagen	bei Überschreitung der Scherspannungen im Holz
Stahlversagen	Versagen des Stahlblechs bei Überschreiten der maximalen Stahlzugtragfähigkeit
Versagen der Klebefuge	bei Überschreitung der maximal aufnehmbaren Schubspannung in der Klebefuge

Tabelle 2.26: Mögliche Versagensmechanismen bei Hirnholzverbindungen mit faserparallel eingeklebten Stahlblechen

Spannungsverteilung

Für die Spannungsverteilung einer Klebeverbindung gibt es unterschiedliche Ansätze: Das sind unter anderem der linear-elastische Ansatz, der nichtlineare Ansatz, welcher auf der Volkersen-Theorie (Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes) basiert und bruchmechanische Ansätze.

Laut [73] ist der am besten zutreffende Ansatz für eine Verbundspannung einer Klebeverbindung von Holz und Stahl der bilineare entfestigende Verbundspannungs-Verschiebungs-Ansatz, welcher einen ansteigenden und einen abfallenden Ast aufweist. Dieser Ansatz basiert auf dem nichtlinearen Ansatz der Volkersen-Theorie. Bei diesem Verbundansatz werden zwei Bereiche unterschieden. Der Bereich 1, welcher die Zone mit dem linear-elastischen Verbundverhalten bildet und der Bereich 2, der die Entfestigungszone darstellt. In Abbildung 2.22 ist der hier beschriebene Spannungsverlauf schematisch dargestellt.

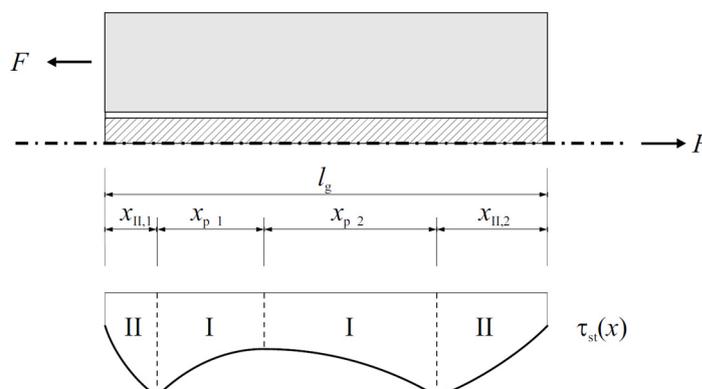


Abbildung 2.22: Schematische Darstellung der Verbundspannungsverteilung für einen Zug-Zug-Körper für Fügeteile unterschiedlicher Dehnsteifigkeiten nach einem bilinearen entfestigenden Verbundansatz (aus [73])

Oberflächenbehandlung

Da Stahl bekanntlich eine sehr glatte Oberfläche aufweist, ist es wichtig, vor jeder Verklebung eine Oberflächenbehandlung (Aufrauen der Oberfläche) für einen besseren Verbund durchzuführen. Zudem ist es besonders wichtig, vor jeder Oberflächenbehandlung die Stahloberfläche zu entfetten, da ansonsten eventuelle Fettrückstände auf der Oberfläche verteilt oder sogar in feine Poren hineingepresst werden könnten. Dies wäre für die Haftung des Klebstoffes auf der Stahloberfläche von Nachteil. Möglichkeiten für eine Oberflächenbehandlung von Stahl sind Sandstrahlen, Schleifen oder Bürsten der Stahloberfläche, wobei durch Sandstrahlen die rauste Oberfläche erzeugt werden kann. Es ist eine Rauheit von bis zu 100 µm beim Sandstrahlen, abhängig vom Strahlmittel, dem Strahldruck und der Korngröße, erreichbar. Nach dem Sandstrahlen ist es zusätzlich nötig, die Oberfläche erneut zu entfetten, da es sein kann, dass in der Druckluft von den Kompressoren geringe Ölmengen enthalten sind.

Herstellen einer Klebeverbindung

Wie bereits in den vorhergehenden Punkten zum Teil erläutert wurde, ist es besonders wichtig, bei der Herstellung einer Klebeverbindung sorgfältig, sauber und genau zu arbeiten. Im Nachfolgenden wird zusammengefasst, auf welche Arbeitsschritte bei der Herstellung einer Verklebung zu achten ist (vgl. [73]):

- Vor jeglicher Oberflächenbehandlung des Stahls, sollte dieser gründlich mit einem Lösungsmittel (z.B. Aceton oder Isopropanol) gereinigt werden.
- Um erneute Verunreinigungen, etwa durch Fettschichten auf der Haut, zu vermeiden, sollte man für die weitere Verarbeitung mit Handschuhen arbeiten.
- Nach dem Schleifen oder Sandstrahlen der Oberfläche muss diese erneut mit einem Lösungsmittel gereinigt werden.
- Um weitere Verunreinigungen zu vermeiden, sollte anschließend der Stahl möglichst staubgeschützt getrocknet werden.
- Durch Abstandhalter sicherstellen, dass eine zentrische Verklebung mit gleichmäßiger Klebefugenstärke stattfindet.
- Unmittelbares Einkleben der Stahlbleche/ Gewindestangen, und
- bei der Verklebung ist sicherzustellen, dass keine Lufteinschlüsse gebildet werden (z.B. durch eine ausreichende Entlüftung oder eine Art „Contractor-Verfahren“).

3 Offene Fragestellungen

Die in Kapitel 2 durchgeführte Literaturrecherche ergab, dass Laubholz und im Speziellen die Holzart Birke ein hohes Potential in Bezug auf weitere Forschung bietet. Des Weiteren zeigte die Literaturrecherche, dass Forschungsbedarf in Bezug auf leistungsfähige Verbindungsmittel, welche in kleineren Querschnitten, als bisher bei Nadelholz, angeordnet werden müssen, besteht. Somit stellt sich für die weitere Arbeit die Frage, wie sich faserparallel geschraubte und geklebte Hirnholzverbindungen in Birken-Brettschichtholz verhalten. Dafür werden folgende offene Fragen definiert:

- Kann ein Nettoquerschnittsversagen erreicht werden?
- Welche Versagensarten treten bei den Prüfungen allgemein auf?
- Welche Steifigkeit kann bei den Verbindungen erreicht werden?
- Wie sieht der Vergleich zwischen den Prüfungen der faserparallel geschraubten und geklebten Hirnholzverbindungen aus?
- Welche Vor- und Nachteile weisen die beiden Verbindungstypen auf?
- Wie könnte mit diesen Erkenntnissen ein gesamter Zuganschluss aussehen?

Aus diesen Fragen lässt sich die Gliederung der weiteren Arbeit wie folgt aufstellen:

Kapitel 4 - Material und Methoden

In diesem Kapitel wird zunächst das Prüfkonzept erläutert und anschließend alle Materialien definiert sowie die Methoden, die für die durchzuführenden Prüfungen notwendig sind, erklärt.

Kapitel 5 - Resultate und Diskussion

Dieser Abschnitt fasst die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen zusammen. Außerdem werden die Ergebnisse statistisch ausgewertet, diskutiert und mit vorhandener Literatur verglichen.

Kapitel 6 - Zusammenfassung und Ausblick

Zum Abschluss dieser Arbeit werden hier noch einmal die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Untersuchungen gegeben. Außerdem wird ein Vorschlag über eine mögliche Ausbildung eines leistungsfähigen Zuganschlusses gegeben.

4 Material und Methoden

4.1 Prüfkonzept

Wie in Kapitel 3 bereits erläutert, hat diese Arbeit das Ziel, das Verhalten von Anschlüssen von Zugstreben für Fachwerke aus Birken-Brettschichtholz experimentell zu untersuchen.

Es wurden zuerst die Rohdichte und der dynamische Elastizitätsmodul mittels Ultraschall und Eigenfrequenz ermittelt und anschließend Zugprüfungen an 21 Einzellamellen durchgeführt, um Materialparameter für die Zugeigenschaften von Birkenholz zu erhalten. Diese Stichprobe der Lamellen wurden durch eine vorherige Sortierung ausgewählt, um eine hohe Qualität für eine hohe Leistungsfähigkeit zu erhalten und um die Tragfähigkeit der erstellten Brettschichtholzträger, aus Material der gleichen Qualität, abschätzen zu können (siehe Vorbemessung in den Kapiteln 4.3.2.1 und 4.3.3.1).

Mit Kenntnis dieser Materialkennwerte wurden anschließend 15 Zugprüfungen von Anschlüssen an Brettschichtholzträgern mit einem Querschnitt von $b \times h$ 100 mm x 100 mm durchgeführt. Davon wurden zwölf als faserparallele Hirnholzverschraubungen und drei als faserparallele Hirnholzverklebungen durchgeführt (siehe Tabelle 4.1). Für die faserparallelen Hirnholzverschraubungen wurde ein eigener Prüfplan, der unter 4.3.2.7 angeführt ist, aufgestellt, da hierfür verschiedene Prüfkonfigurationen zur Anwendung kamen, um einen möglichst breiten Überblick über die verschiedenen Versagensarten zu erhalten.

In der nachfolgenden Tabelle 4.1 wird ein Überblick über die durchgeführten Prüfungen gegeben.

	Einzellamelle	Hirnholzverschraubungen	in Hirnholz eingeklebte Stahlbleche
Prüfkörperanzahl	21	12	3
Holz QS	100 mm x 20 mm	100 mm x 100 mm	100 mm x 100 mm
Verbindungs-mittel	-	je 9 bzw. 13 Schrauben mit $\varnothing 10$	je ein gekreuztes Stahlblech 100/100 (Blechedicke 5 mm)

Tabelle 4.1: Überblick über die durchgeführten Prüfungen

Auf Grundlage dieses Prüfkonzeptes wird im Nachfolgenden dieses Kapitels das genaue Vorgehen erläutert.

4.2 Material

4.2.1 Ausgangsmaterial

Als Ausgangsmaterial dienen Lamellen aus Hängebirke (*betula pendula*), welche in einem Sägewerk der Firma Hasslacher in Russland erzeugt, gehobelt und technisch auf eine Holzfeuchte von ca. 12 % getrocknet wurden. Tischlerware, astreine und farblich homogene Lamellen, wurde zuvor von der Firma aussortiert. Es wurden 322 Lamellen mit den Abmessungen von $l \times b \times h = 3000 \text{ mm} \times 145 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$ geliefert.

4.2.2 Verklebung der Birkenlamellen zu Brettschichtholz

Hersteller:	Dynea
Klebstoff:	Dynea Prefere 4546 [25]
Härter:	Dynea Prefere 5022 [27]
Auftragsmenge:	400 g/m ²
Mischungsverhältnis:	100:30
Pressdruck:	0,6 N/mm ²
Presszeit:	7 Stunden

Die Brettschichtholzträger für die Verbindungsprüfungen wurden aus Birkenlamellen der Sortierklasse A+ (siehe Kapitel 4.3.1) hergestellt. Die Anordnung der Bretter in den einzelnen Brettschichtholzträgern wurde nach dem Zufallsprinzip ausgewählt.

Der Klebstoff und der Härter wurden im angegebenen Verhältnis gemischt und anschließend mit einer Walze auf die Brettlamellen aufgetragen. Danach wurden die Bretter übereinander angeordnet und für sieben Stunden bei einem Pressdruck von 0,6 N/mm² verpresst (siehe Abbildung 4.1).



Abbildung 4.1: Pressvorgang der Birken-Brettschichtholzträger

4.2.3 Schrauben

Hersteller:	Schmid [32]
Typ:	Rapid Vollgewinde
Spitze:	Halbspitze
Kopf:	Senkkopf
Durchmesser:	10 mm
Länge:	240 mm, 280 mm, 300 mm, 350 mm

Es wurden Vollgewindeschrauben mit einer Halbspitze und einem Senkkopf des Herstellers Schmid gewählt. Der Durchmesser wurde mit 10 mm gewählt, da so die Schrauben im Querschnitt mit den Abmessungen $b \times h = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, mit dem gewählten Abstand zueinander angeordnet werden konnten und mit der möglichen Anzahl an Schrauben die vorhergesagte Tragfähigkeit erreicht werden konnte. Es wurden vier verschiedene Schraubenslängen gewählt, um für die jeweiligen Prüfkfigurationen die gewollten Versagensarten zu erreichen, welche in Kapitel 4.3.2.7 näher erläutert werden.

4.2.4 Stahl der eingeklebten Stahlbleche

Es wurde ein Stahl der Stahlgüte S355 gewählt:

Mindeststreckgrenze:	$f_{y,k} = 355 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit:	$f_{u,k} = 510 \text{ N/mm}^2$

Die Oberfläche der Stahlbleche wurde, für eine bessere Verbundwirkung zwischen Stahl und Holz, im Vorfeld bearbeitet. Dies geschah mittels Sandstrahlen mit Hochofenschlacke.

4.2.5 Verklebung Brettschichtholz - Stahlquerschnitt

Hersteller:	Purbond
Klebstoff:	CR421 [29]
Klebstoffart:	Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff
Aushärtezeit:	10 Tage
Mischverhältnis:	2:1 nach Volumenverhältnis
Zugfestigkeit:	25 - 30 N/mm ²
Druckfestigkeit:	79,9 N/mm ²

Da es für diese Art von Verbindung, einer Birkenholz-Stahlblech-Verbindung, erst wenig Kenntnisse gibt, wurde im Rahmen dieser experimentellen Untersuchungen auf die Empfehlung des Herstellers Purbond, welcher den Klebstoff CR421 empfahl, vertraut. Dabei handelt es sich um einen Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff, welcher zum Einkleben von Gewindestangen und Betonrippenstählen in tragende Holzbauteilen gedacht ist und eine Zugfestigkeit von 25 - 30 N/mm² aufweist.

4.3 Methoden

Um die mechanischen Zug-Kenngrößen, die für die Vorbemessung der Anschlüsse (siehe Kapitel 4.3.2.1 bzw. 4.3.3.1) verwendet wurden, zu bestätigen, wurden diese an ausgesuchten Lamellen ermittelt. Zur Bestimmung der physikalischen und mechanischen Grundkenngrößen wurden Methoden verwendet, welche in Anlehnung an Normenwerke sowie an einschlägige wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt wurden.

Im Anschluss daran wurden zwölf Zugprüfungen von faserparallel geschraubten Hirnholzanschlüssen und drei Zugprüfungen von faserparallel eingeklebten Stahlblechen durchgeführt.

4.3.1 Bestimmung der Grundkenngrößen / Zugprüfungen Brettlamelle

Im Gesamten wurden 322 Bretter vermessen, gewogen, die Rohdichte, der dynamische Elastizitätsmodul mittels Ultraschall und mittels Eigenfrequenz ermittelt sowie auf das Kriterium der Astigkeit hin in Klassen unterteilt.

Bestimmung der Holzfeuchte

Die Ermittlung der Holzfeuchte mit Hilfe der Darrmethode wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN 13183 [11] für alle Prüfkörper durchgeführt. Dafür wurden die Darrproben nahe dem Versagensbereich der Prüfkörper entnommen.

$$u = \frac{m_w}{m_0} = \frac{m_u - m_0}{m_0} \quad (4.1)$$

u ...	Holzfeuchte [%]
m_w ...	Wassermenge [g]
m_u ...	Holzmasse darrtrocken [g]
m_0 ...	Masse der Probe unter Prüfbedingungen [g]

Die Holzfeuchte der Ausgangsware wurde an Stichproben mit dem Feuchtemessgerät Hydromette M4050 der Firma Gann GmbH/ Gerlingen/ D gemessen.

Bestimmung der Rohdichte

Mit den bei der Sortierung ermittelten Abmessungen (mittels Rollmaßband und Schiebelehre) sowie der Massen (mittels Wägung der Brettlamellen auf einer digitalen Standwaage) wurde die Rohdichte nach Gleichung (4.2) berechnet. Anschließend wurde die Rohdichte in Hinblick auf die vorhandene Holzfeuchte u mit der Gleichung (4.3) nach ÖNORM EN 384 [2] auf die Referenzholzfeuchte von $u_{ref} = 12$ % zu ρ_{12} korrigiert.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{b \cdot l \cdot h} \quad (4.2)$$

ρ ...	Rohdichte [kg/m ³]
m ...	Masse des Prüfkörpers [kg]
V ...	Volumen des Prüfkörpers [m ³]
b ...	Breite des Prüfkörpers [m]
l ...	Länge des Prüfkörpers [m]
h ...	Höhe/ Dicke des Prüfkörpers [m]

$$\rho_{12} = \rho \cdot [1 - (u - 0,12) \cdot 0,5] \quad (4.3)$$

ρ_{12} ...	Rohdichte, korrigiert auf die Referenzholzfeuchte $u_{ref} = 12$ % [kg/m ³]
ρ ...	Rohdichte [kg/m ³]
u ...	Holzfeuchte [%]

Ermittlung der Sortierklasse in Anlehnung an ÖNORM DIN 4074-5 [15]

Da für die Prüfungen eine hohe Sortierklasse gewünscht war, wurden alle Brettlamellen vermessen, gewogen und auf das Kriterium der Astigkeit untersucht, sowie die Ultraschalldurchlaufzeit und die Eigenfrequenz bestimmt. Die Holzfeuchte wurde nur an Stichproben überprüft, um sicherzustellen, dass eine Holzfeuchte von 12 % \pm 2 %, welche durch das Normklima laut ÖNORM EN 384 [2] mit 20 ° C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit festgelegt ist, eingehalten wird.

In Anlehnung an ÖNORM DIN 4074-5 [15] wurden die Birkenbretter mit einer visuellen Sortierung in Anlehnung an die Sortierklassen LS13 und LS10 eingeteilt. Es wurden die vier Sortierklassen A+, A, B und C festgelegt. Für die Sortierklassen A+ und A entsprachen die visuellen Sortierkriterien die der Sortierklasse LS13 gemäß ÖNORM DIN 4074-5 [15], für B die der Sortierklasse LS10 und der Klasse C wurden alle übrigen Bretter zugeordnet. Die Bretter wurden nur auf die Kriterien „Einzelast“ und „Astansammlung“ betrachtet, zusätzlich wurden Bretter, welche von Lochfraß oder Fäule betroffen waren direkt der Klasse C zugeordnet. Der Unterschied zwischen den Klassen A+ und A besteht darin, dass Bretter der Klasse A+ einen höheren dynamischen Elastizitätsmodul (Eigenfrequenz) als 16.000 N/mm² aufweisen. In Tabelle 4.2 sind die Sortierkriterien für die festgelegten Sortierklassen angegeben.

	A+	A	B	C
$E_{dyn,EF}$ ¹⁾ [N/mm ²]	> 16.000	< 16.000	-	-
Einzelast		1/5	1/3	-
Astansammlung		1/3	1/2	-

¹⁾... dynamischer Elastizitätsmodul ermittelt aus der Eigenfrequenz

Tabelle 4.2: Sortierkriterien der festgelegten Sortierklassen in Anlehnung an ÖNORM DIN 4074-5 [15]

Die Gleichungen (4.4) und (4.5) zeigen die Berechnung des zulässigen Verhältnisses (in Tabelle 4.2 angegeben) der Astbreite zur Brettbreite für die Kriterien „Einzelast“ und „Astansammlung“. Die Erklärung der jeweiligen Parameter der Gleichungen sind der Abbildung 4.2 zu entnehmen.

$$A_{\text{Einzelast}} = \frac{a_1 + a_2}{2b} \quad (4.4)$$

$$A_{\text{Astansammlung}} = \frac{\sum_{i=1}^7 a_i}{2b} \quad (4.5)$$

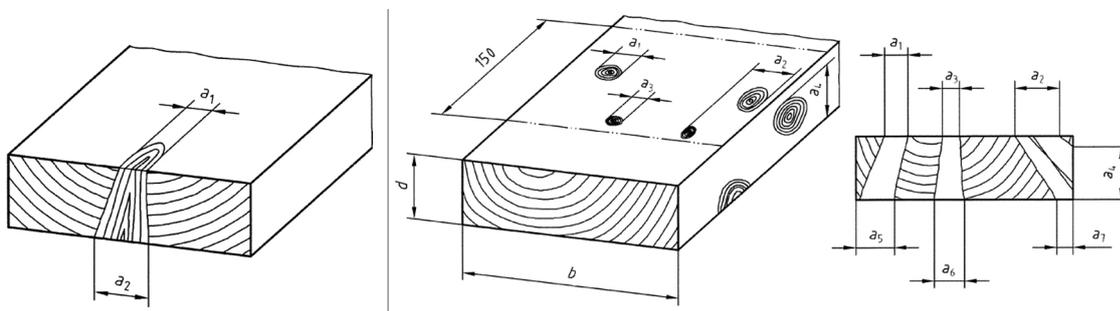


Abbildung 4.2: Definition der Sortierkriterien „Einzelast“ (links) und „Astansammlung“ (rechts) (aus [15])

Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls mittels Ultraschall

Um den dynamischen Elastizitätsmodul $E_{\text{dyn,US}}$ berechnen zu können, musste zuerst die Ultraschalllaufzeit, die Länge der Prüfkörper sowie die Rohdichte ermittelt werden. So konnte anschließend der dynamische Elastizitätsmodul $E_{\text{dyn,US}}$, auf Basis der Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit (mit Gleichung (4.6)), mit Gleichung (4.7) berechnet werden. Zuletzt wurde der dynamische Elastizitätsmodul in Hinblick auf die vorhandene Holzfeuchte u mit Gleichung (4.8) und (4.9) auf die Referenzholzfeuchte von $u_{\text{ref}} = 12\%$ korrigiert.

$$v = \frac{l}{t} \cdot 10^6 \quad (4.6)$$

v ... Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
 l ... Länge des Prüfkörpers [m]
 t ... Ultraschalllaufzeit [μ s]

$$E_{\text{dyn}} = v^2 \cdot \rho \cdot 10^{-6} \quad (4.7)$$

E_{dyn} ... dynamischer Elastizitätsmodul [N/mm²]
 v ... Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
 ρ ... mittlere Rohdichte des Prüfkörpers zum Zeitpunkt der Messung [kg/m³]

$$v_{12} = \frac{v}{[1 - (0,0053 \cdot (u - 0,12))]} \quad (4.8)$$

- v_{12} ... Ultraschallgeschwindigkeit korrigiert für eine Referenzholzfeuchte von $u_{ref} = 12$ % [m/s]
 v ... Ultraschallgeschwindigkeit bei gegebener Holzfeuchte u [m/s]
 u ... Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Messung [%]

$$E_{dyn,12,20} = v_{12,20}^2 \cdot \rho_{12,20} \cdot 10^{-6} \quad (4.9)$$

- $E_{dyn,12,20}$... korrigierter dynamischer Elastizitätsmodul [N/mm²]
 $v_{12,20}$... korrigierte Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]
 ρ_{12} ... Rohdichte, korrigiert auf die Referenzholzfeuchte $u_{ref} = 12$ % [kg/m³]

Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls über die Eigenfrequenz der Längsschwingungen

Der dynamische Elastizitätsmodul $E_{dyn,EF}$ wurde gemäß [43] über die erste Eigenfrequenz der Längsschwingung mittels Gleichung (4.11) ermittelt.

$$f_{cor} = f \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{m_k}{m_A + m_k}}\right) \quad (4.10)$$

- f_{cor} ... massenkorrigierte Frequenz [Hz]
 f ... ermittelte Frequenz [Hz]
 m_k ... Masse des Prüfkörpers
 m_A ... Masse des Beschleunigungsaufnehmers $m_A = 27,61$ g

$$E_{dyn,EF} = \frac{4}{n^2} \cdot l^2 \cdot \rho_{12} \cdot f_{cor}^2 \cdot 10^{-6} \quad (4.11)$$

- f_{cor} ... massenkorrigierte Frequenz [Hz]
 l ... Prüfkörperlänge [m]
 n ... Ordnung der Schwingung [-]
 ρ_{12} ... Rohdichte, korrigiert auf die Referenzholzfeuchte $u_{ref} = 12$ % [kg/m³]

4.3.1.1 Bestimmung der mechanischen Kenngrößen auf Zug parallel zur Faser

Nach der Ermittlung der zuvor angeführten Grundkenngößen und der Sortierung konnten 46 Bretter der höchsten Qualitätsklasse (Klasse A+) zugeordnet werden. Von diesen 46 Brettern wurden nach dem Zufallsprinzip 21 für die Zugprüfungen an den Brettlamellen ausgewählt. Die restlichen 25 wurden zu fünf Brettschichtholzträgern mit je fünf Lamellen verklebt.

Diese 21 Bretter wurden auf die Querschnittsabmessungen 20 mm x 100 mm gehobelt bzw. zugeschnitten. Vor Beginn der Zugprüfungen wurden die Bretter erneut abgemessen, abgewogen, die Ultraschalllaufzeit und die Eigenfrequenz bestimmt. Hierbei stellte sich heraus, dass drei wei-

tere Bretter einen geringeren dynamischen Elastizitätsmodul als 16.000 N/mm^2 aufwiesen. Es wurden zwar alle 21 Bretter geprüft, allerdings für die statistische Auswertung nur die 18 Bretter verwendet, die den vorher gesetzten Anforderungen entsprachen.

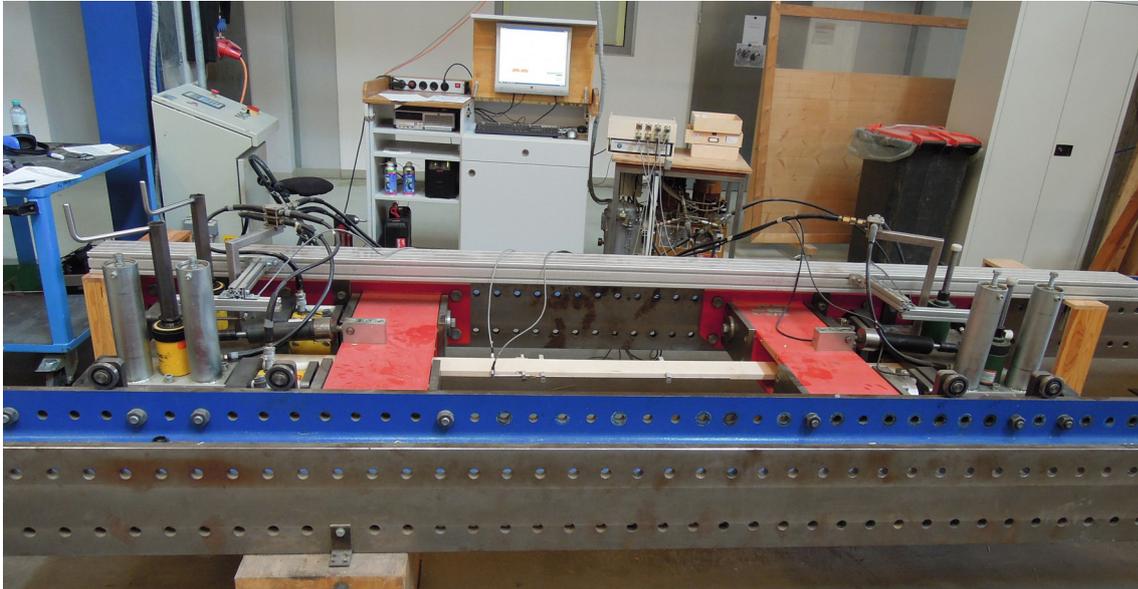


Abbildung 4.3: Zugprüfmaschine *lignum_z_850* mit eingespanntem Brett

Die Zugprüfungen wurden an der Zugprüfmaschine *lignum_z_850*, welche eine maximale Zugkraft von 850 kN aufbringen kann, am Lignum Test Center der TU Graz durchgeführt. Das Vorgehen ist mit jenem in [55] sehr ähnlich und hier kurz zusammengefasst. Die Prüfungen wurden, wie in Abbildung 4.4 dargestellt, gemäß den Vorgaben der ÖNORM EN 408 [5] ausgeführt. Die zu prüfenden Brettlamellen wurden zwischen den Riffelblechen der 320 mm langen Klemmbanken über Reibung fixiert. Beide Paare der Klemmbanken sind über rote Widerlager mit den blauen Stahlträgern (siehe Abbildung 4.3) verbunden. Auf der einen Seite befinden sich Hydraulikzylinder zwischen dem Klemmapparat und dem Widerlager, auf der anderen Seite sind Kraftmessdosen eingebaut. Die freie Prüflänge der Bretter betrug 2300 mm, welche laut ÖNORM EN 408 [5] größer als neun mal die Breite des zu prüfenden Brettes sein muss. Die genaue Prüfkongfiguration ist in Abbildung 4.4 ersichtlich.

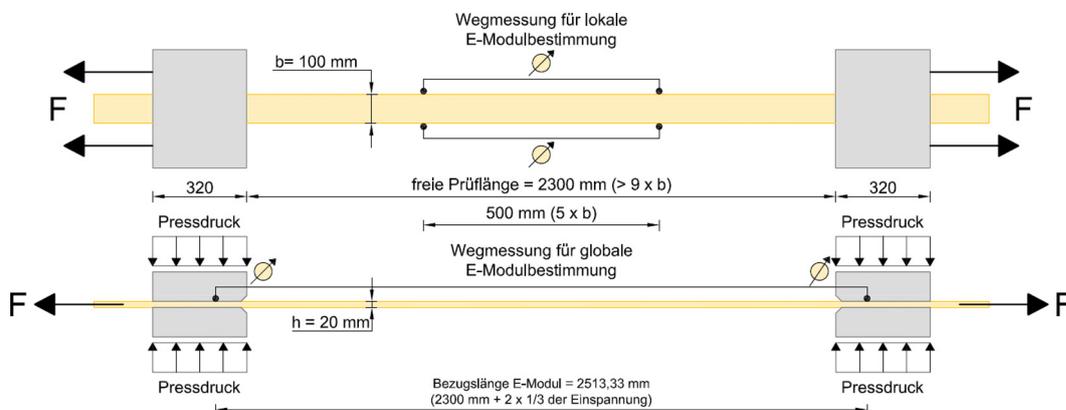


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Prüfkongfiguration der Zugprüfungen der Brettlamellen (nach [55])

Die Zugkraft wird über die zwei integrierten Kraftmessdosen und die Verschiebung der beiden Klemmbackenpaare gegenüber einem Messbalken mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Für die Messung des Elastizitätsmoduls gemäß ÖNORM EN 408 [5] werden auf beiden Schmalseiten mittig im Abstand von fünf mal der Breite, Winkel mit fixiertem Gestänge und Wegaufnehmer montiert um die Relativverschiebung dieser Punkte zu messen.

Es war nötig, Kraftlimits zu setzen, um eine Demontage der Wegaufnehmer vorzunehmen, da die Maschine auf Basis einer kraftgesteuerten Hydraulik funktioniert und die Auswertung des Elastizitätsmoduls, nach ÖNORM EN 408 [5], im Bereich zwischen $0,1 F_{\max}$ und $0,4 F_{\max}$ mit Hilfe einer Regressionsanalyse erfolgen soll. Es wurde mit den aus der Literatur bekannten Kennwerten der Zugfestigkeit (siehe Kapitel 2.2.5) eine ungefähre Maximallast von 100 kN berechnet. So wurde das Kraftlimit, bei dem die Wegaufnehmer abgenommen wurden, damit diese beim Bruch des Brettes nicht zu beschädigen, mit 40 kN, 40 % der geschätzten Maximallast, festgelegt. In Abbildung 4.5 ist eine schematische Darstellung eines möglichen Kraft-Zeit-Diagramms einer solchen Zugprüfung angegeben.

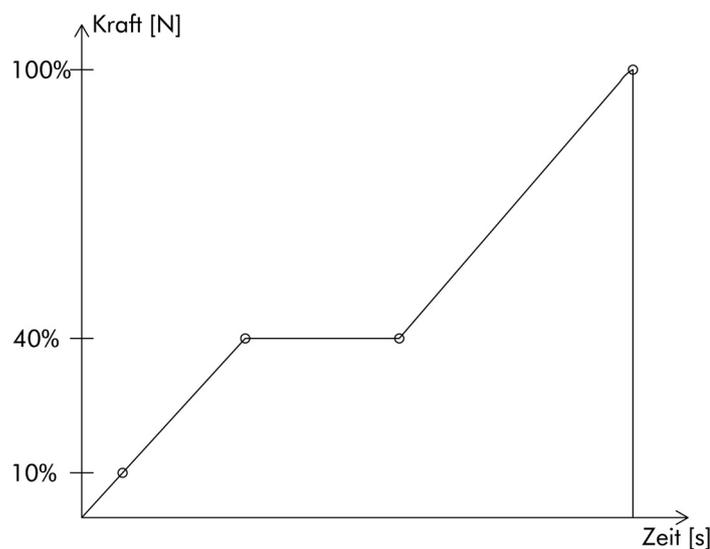


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung eines Kraft-Zeit-Diagramms mit einem festgelegten Kraftlimit von 40 %

Der lokale Zug-Elastizitätsmodul wurde über seitlich montierte induktive Wegaufnehmer bestimmt. Über zwei weitere Wegaufnehmer wurde der Maschinenweg und über Kraftmessdosen die aufgebrachte Kraft gemessen. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass eine Prüfdauer von Beginn der Prüfung bis zum Bruch von 300 ± 120 s möglichst eingehalten werden konnte.

Es wurde, soweit dies möglich war, die Ursache des Bruchbeginns festgestellt. Zudem wurden die Laststufen, die ausgewiesene Zugkraft und die primäre Bruchursache protokolliert. Abschließend wurde der Bruch noch von allen vier Seiten fotografiert.

Für die Bruchauswertung wurden neben den Fotos noch zusätzlich die Hauptbruchursache sowie der Bruchbereich von Beginn bis Ende in Längsrichtung vermessen. Des weiteren werden folgende Bruchursachen unterschieden:

- Bruch infolge eines Astes mit Rindeneinschluss (vgl. Abbildung 4.6)
- Bruch infolge eines Astes (vgl. Abbildung 4.7)
- Bruch infolge einer Astansammlung (vgl. Abbildung 4.8)
- Bruch infolge lokaler Schrägfaser (vgl. Abbildung 4.9)
- Bruch infolge globaler Schrägfaser (vgl. Abbildung 4.10)
- Sprödbbruch (vgl. Abbildung 4.11)
- Splitterbruch (Bruch längs zur Faser entlang der Stabachse; vgl. Abbildung 4.12)



Abbildung 4.6: Bruch infolge eines Astes mit Rindeneinschluss



Abbildung 4.7: Bruch infolge eines Astes



Abbildung 4.8: Bruch infolge einer Astansammlung



Abbildung 4.9: Bruch infolge lokaler Schrägfaser



Abbildung 4.10: Bruch infolge globaler Schrägfaser



Abbildung 4.11: Sprödbbruch



Abbildung 4.12: Splitterbruch

Nach Beenden der Zugprüfungen wurden, zur genauen Bestimmung der Holzfeuchte, nahe dem Bruch, Darrproben entnommen.

Aus den gewonnenen Prüfdaten der Bruchlast und der Verformungszunahme sowie der Kenntnis der Querschnittsabmessungen und der Bezugslänge für die Verformungsmessung, wurden anschließend die Zugfestigkeit längs zur Faser $f_{t,0}$ und der Elastizitätsmodul auf Zug längs zur Faser $E_{t,0}$ mit den Gleichungen (4.12) bis (4.14) gemäß ÖNORM EN 408 [5] berechnet. Die Laststeigerung für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls wurde im Bereich zwischen 10 % und 40 % der Bruchlast so gewählt, dass eine Regressionsanalyse eine Korrelation von mindestens 0,999 ergab.

$$f_{t,0} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (4.12)$$

$f_{t,0}$... Zugfestigkeit längs zur Faser [N/mm²]
 F_{\max} ... Bruchlast [N]
 A ... Querschnittsfläche [mm²]

$$E_{t,0} = \frac{l_{\text{Bezug}}}{A} \cdot \frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1} \quad (4.13)$$

$E_{t,0}$... Elastizitätsmodul auf Zug längs zur Faser [N/mm²]
 l_{Bezug} ... Bezugslänge für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls = freie Prüflänge + 2 x 1/3 Klemmbackenlänge [mm]
 A ... Querschnittsfläche [mm²]
 $F_2 - F_1$... Laststeigerung im linearen Bereich der Last-Verformungs-Kurve [N]
 $w_2 - w_1$... Verformungszunahme entsprechend $F_2 - F_1$ [mm]

$$E_{t,0,12} = E_{t,0} \cdot [1 + (u - 0,12) \cdot 2] \quad (4.14)$$

$E_{t,0,12}$... Elastizitätsmodul Zug längs zur Faser, korrigiert auf $u_{\text{ref}} = 12$ % nach EN 384 [2] [N/mm²]
 $E_{t,0}$... Elastizitätsmodul Zug längs zur Faser [N/mm²]
 u ... Holzfeuchte zum Prüfzeitpunkt [%]

4.3.2 Prüfungen faserparalleler Hirnholzverschraubungen

Es wurden zwölf Zugprüfungen von faserparallelen Hirnholzverschraubungen durchgeführt, wovon drei als Vorversuche dienten. In den nachfolgenden Punkten dieses Kapitels werden die Vorbemessung, das Prüfkonzept, die Prüfvorbereitung und der Prüfablauf näher beschrieben. Der Querschnitt der Brettschichtholzträger wurde mit $b \times h = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ nicht größer gewählt, um sicherzustellen, dass die maximal aufbringbare Kraft (850 kN) der Zugprüfmaschine *lignum_z_850* ausreicht, um ein Versagen der Prüfkörper zu erzielen.

4.3.2.1 Vorbemessung

Es wurde für alle Prüfkörper zu Beginn eine Vorbemessung durchgeführt. Dafür wurden jeweils die Nettoquerschnittstragfähigkeit (Gleichung (4.15)), die Ausziehtragfähigkeit (Gleichung (4.16)) und die maximal aufnehmbare Kraft bis zum Schraubenbruch (Gleichung (4.17)) berechnet. Diese sind für alle Prüfkörper in Tabelle 4.3 angegeben und das jeweilig maßgebende Versagen markiert.

$$F_{\text{netto}} = A_{\text{netto}} \cdot f_{t,0,\text{mean}} = \left(A_{\text{QS}} - n \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \right) \cdot f_{t,0,\text{mean}} \quad (4.15)$$

F_{netto} ... Nettoquerschnittstragfähigkeit [N]
 A_{netto} ... Nettoquerschnitt [mm²]
 A_{QS} ... Bruttoquerschnitt [mm²]
 n ... Anzahl Schrauben in der Gruppe [-]
 d ... Außendurchmesser der Schrauben [mm]
 $f_{t,0,\text{mean}}$... mittlere Zugfestigkeit der geprüften Birkenlamellen [N/mm²]

$$R_{\text{ax}} = 2,39 \cdot 10^{-3} \cdot l_{\text{ef}} \cdot \rho^{1,6} \cdot d^{0,66} \cdot (1 - 0,006) \cdot 30 \cdot n \quad (4.16)$$

R_{ax} ... Ausziehtragfähigkeit der Verbindung [N]
 l_{ef} ... Eindringtiefe [mm]
 ρ ... Rohdichte des jeweiligen Prüfkörpers [kg/m³]
 d ... Außendurchmesser der Schrauben [mm]
 n ... Anzahl Schrauben in der Gruppe [-]

$$F_{\text{SB}} = n \cdot F_{\text{max,S}} \quad (4.17)$$

F_{SB} ... maximal aufnehmbare Kraft bis zum Schraubenbruch [N]
 n ... Anzahl der Schrauben [-]
 $F_{\text{max,S}}$... maximale Zugtragfähigkeit einer Schraube [N]

$$f_{05|95} = f_{\text{mean}} \cdot (1 \pm 1,645 \cdot \text{COV}[f]) \quad (4.18)$$

$f_{05|95}$... 5 % bzw. 95 % empirischer Quantilwert [N/mm²]
 f_{mean} ... Mittelwert [N/mm²]
 CoV ... Variationskoeffizient [-]

PK-Bez.	d	l _{Schr.}	n	d _{Emb.}	l _{Emb.}	l _{ef}	ρ	R _{ax}	F _{SB}	F _{netto}	1.LS ¹⁾
	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
T005_1	10	300	9	12	20	220	644	554	360	514	-
T005_2	10	300	13	12	20	220	644	800	519	497	-
T005_3	10	300	13	12	50	190	644	691	519	497	-
T002_1	10	300	13	12	50	190	615	642	519	497	240
T001_1	10	300	13	12	50	190	611	635	519	497	240
T003_1	10	280	13	12	50	170	645	619	519	497	240
T004_1	10	280	13	12	50	170	665	6519	519	497	240
T001_2	10	240	9	12	60	120	611	277	360	514	140
T004_2	10	240	9	12	60	120	665	318	360	514	140
T003_3	10	280	9	12	50	170	645	429	360	514	180
T002_2_1	10	280	9	12	50	170	644	428	360	514	180
T002_2_2	10	280	9	12	50	170	644	428	360	514	180
T003_2	10	280 350	13	12	50	170 240	645	717	519	497	245

¹⁾... 1. Laststufe zum Abnehmen der Wegaufnahme

Tabelle 4.3: Vorbemessung der einzelnen Prüfkörper (geringste Tragfähigkeit für wahrscheinlichstes Versagen markiert)

4.3.2.2 Herstellung der Prüfkörper

Für die Herstellung der Prüfkörper wurden jeweils fünf Brettlamellen ($b \times h = 150 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$), welche zuerst auf eine Dicke von 20 mm gehobelt wurden, miteinander zu fünf Brettschichtholzträgern verklebt und für sieben Stunden bei einem Pressdruck von $0,6 \text{ N/mm}^2$ gepresst. Nach genügend Aushärtezeit bei Lagerung unter Normklima, wurden die ungefähr 3 m langen Träger auf die Querschnittsmaße 100 mm mal 100 mm formatiert, in jeweils drei einzelne Prüfkörper zu je 90 cm geschnitten und beschriftet. Des Weiteren wurde dokumentiert, welche Brettlamellen für welchen Träger zur Verklebung verwendet wurden.

4.3.2.3 Bezeichnung der Prüfkörper

Die Bezeichnung der Träger setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen.

Beispiel: T001_1

Das „T“ steht für Brett-schichtholzträger. Die fortlaufende Zahl, im Beispiel „001“, ist die Nummerierung der gesamten 3 m langen Träger und die letzte Zahl, im Beispiel „1“, variiert nur zwischen „1“, „2“ und „3“ und soll festhalten, aus welchem Teil der 3 m langen Brett-schichtholzträger der Prüfkörper stammt. In Abbildung 4.13 ist ein Beispiel am Brett-schichtholzträger T001 für den Zuschnitt der Prüfkörper und die Prüfkörperbezeichnung dargestellt.

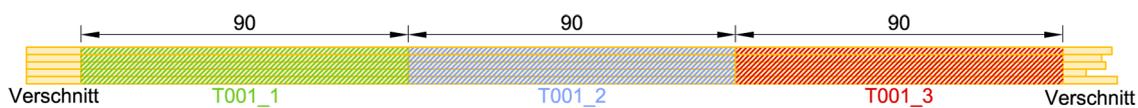


Abbildung 4.13: Beispiel zur Prüfkörperbezeichnung am Brett-schichtholzträger T001

4.3.2.4 Überprüfung der Schraubenzugfestigkeit

Um die genaue Schraubenzugfestigkeit der verwendeten Schrauben zu kennen und um zu wissen, ob eine bereits bei einem Versuch verwendete Schraube eine andere Zugfestigkeit aufweist, wurden aus der gleichen Schraubenpackung jeweils fünf neue Schrauben und fünf bereits einmal verwendete Schrauben nach ÖNORM EN 14592 [14] auf ihre Zugfestigkeit mit der Universalprüfmaschine *lignum_uni_275* am Lignum Test Center der Technischen Universität Graz geprüft.



Abbildung 4.14: Fotografie einer durchgeführten Prüfung (links) und eines Bruchbildes einer Schraube (rechts)

Die Prüfung wurde weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,7 mm/s durchgeführt, um die in ÖNORM EN 14592 [14] vorgegebene Zeit von 10 ± 5 s einzuhalten. Abbildung 4.14 zeigt Bilder der durchgeführten Prüfungen.

Es stellte sich heraus, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den neuen und den bereits einmal verwendeten Schrauben festzustellen war und die Zugfestigkeit einer Schraube im Mittel ungefähr 40 kN beträgt. Somit können ohne weitere Bedenken bereits verwendete Schrauben noch ein weiteres Mal eingesetzt werden.

4.3.2.5 Vorversuche

Von den zwölf zur Verfügung stehenden Prüfkörpern wurden drei für Vorversuche verwendet, um zu ermitteln, welches Verhalten die bis dato noch nicht geprüften Anschlüsse aufweisen. Dies ist besonders wichtig, um eine geeignete Laststufe für die Abnahme der Wegaufnahme zu definieren. Alle drei Prüfkörper für diese Prüfungen stammen aus dem gleichen Brettschichtholzträger.

Für den ersten Vorversuch wurden in beide Hirnholzenden jeweils neun Schrauben mit einer Einbindetiefe von 20 mm eingedreht und diese mit einem Drehmoment von 18 Nm angezogen, damit alle Schrauben am Stahlblech anliegen und die Last gleichmäßig auf die Schrauben verteilt wird. Das Ergebnis dieser Prüfung war allerdings unerwartet, da ein Versagen der Schrauben, anstatt des erwarteten Holzversagens, bei einer Bruchlast von 337 kN eintrat. Dies ist eine um 35 % geringere Tragfähigkeit als erwartet. Bei Verwendung des Mittelwerts, der bei den Zugprüfungen der Brettlamellen für die Zugfestigkeit ermittelt wurde, beträgt die errechnete Nettoquerschnittstragfähigkeit 511 kN. Das linke Bild der Abbildung 4.15 zeigt das Versagen dieses Vorversuchs, bei dem sechs Schrauben auf Schraubenbruch versagten und die anderen drei ausgezogen wurden.

Um eine höhere Tragfähigkeit des Anschlusses zu erreichen, wurden beim zweiten Vorversuch anstatt von neun in beide Hirnholzenden jeweils 13 Schrauben mit einer Einbindetiefe von 20 mm eingedreht und mit 19 Nm angezogen. Dieser Prüfkörper versagte auf Querkzug indem dieser über die gesamte Länge gespalten wurde. Dies kann unter anderem auf eine zu geringe Einbindetiefe zurückzuführen sein. Die Bruchlast war hier jedoch mit 406 kN (82 % der Nettoquerschnittstragfähigkeit) bereits wesentlich höher und näher an der berechneten Versagenslast von 494 kN (Nettoquerschnittsversagen bei 13 Schrauben). Das zuvor erwähnte Aufspalten ist im rechten Bild der Abbildung 4.15 dargestellt.

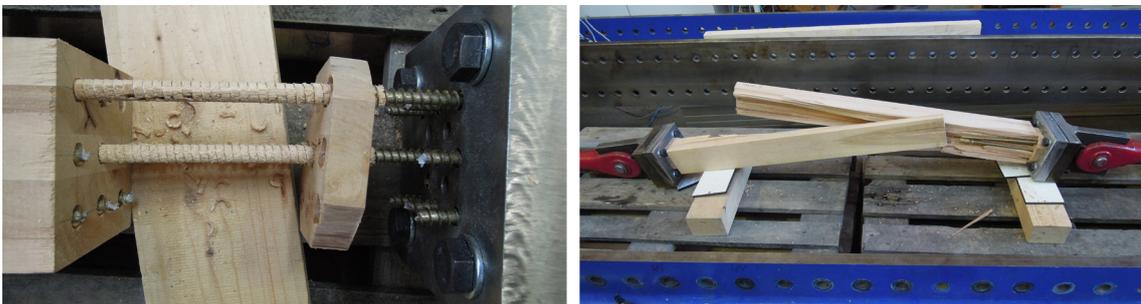


Abbildung 4.15: Versagen der ersten beiden Vorversuche (links: Vorversuch 1, rechts: Vorversuch 2)

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde vermutet, dass die gewählte Einbindetiefe zu gering war und wurde deshalb für die weiteren Prüfungen mit $5 d = 50$ mm festgelegt. Um diese Theorie zu bestätigen, wurde noch ein dritter Vorversuch, wiederum mit 13 Schrauben, allerdings mit einer Einbindetiefe von 50 mm, durchgeführt. Dieser Prüfkörper versagte wieder auf Schraubenbruch

bzw. auf Herausziehen der Schrauben (Mischbruch) bei einer Bruchlast von 428 kN - dies entspricht 87 % der Nettoquerschnittstragfähigkeit.

Mit diesen Erkenntnissen wurden die Prüfkfigurationen für die weiteren Prüfungen festgelegt, welche unter Kapitel 4.3.2.7 näher erklärt werden.

4.3.2.6 Festlegung der effektiv wirksamen Gewindelänge (Eindringtiefe)

Es wurden mit Gleichung (4.19) durch umformen der Gleichung (2.2) aus Kapitel 2.3.1.4 die 5%-ige, die mittlere sowie die 95%-ige Eindringtiefe ermittelt (siehe Tabelle 4.4). Als Grenzausziehtragfähigkeit wurde die zuvor ermittelte Bruchlast der Schrauben eingesetzt. Somit beträgt die erforderliche Einschraublänge mindestens 124 mm und maximal 174 mm, wenn die Verbindung auf Schraubenbruch versagen soll. Um Schraubenbruch als gewünschtes Versagen zu erzielen wird eine minimale Eindringtiefe von 170 mm und um Herausziehen als gewünschtes Versagen zu erreichen, wurde eine maximale Eindringtiefe von 120 mm gewählt.

$$l_{ef} = \frac{F_{t,S}}{2,39 \cdot 10^{-3} \cdot \rho^{1,6} \cdot d^{0,66} \cdot (1 - 0,006 \cdot 30)} \quad (4.19)$$

- l_{ef} ... Eindringtiefe [mm]
- $F_{t,S}$... Schraubenzugfestigkeit (5% Quantile, Mittelwert und 95% Quantile) [N]
- ρ ... Rohdichte (5% Quantile, Mittelwert und 95% Quantile) [kg/m³]
- d ... Außendurchmesser der Schrauben [mm]

n = 10	Schraubenzugfestigkeit [kN]	Rohdichte [kg/m ³]	l_{ef} [mm]
5% Quantile	39,75	568	174
Mittelwert	39,95	636	146
95% Quantile	40,14	704	124

Tabelle 4.4: Bandbreite der Eindringtiefe bei empirischer Quantilberechnung

Da die Rohdichte mit einem Variationskoeffizienten von 6,51 % bei Weitem mehr streut als die Schraubenzugfestigkeit mit 0,29 % ist die Rohdichte der maßgebende Parameter für die Änderung der Eindringtiefe. Dies geht aus Tabelle 4.4, welche die Bandbreite der Eindringtiefe zeigt, gut hervor.

4.3.2.7 Prüfplan

Um eine Übersicht über die verschiedenen Versagensarten (Holzversagen, Ausziehen, Schraubenbruch) zu erhalten, wurde ein Prüfplan für die unterschiedlichen Prüfkfigurationen erstellt. Die ersten vier Prüfungen wurden mit 13 Schrauben durchgeführt, um die Maximallast, welche in den Querschnitt eingeleitet werden kann, festzustellen. Im Idealfall sollten diese Prüfkörper ein Versagen des Nettoquerschnitts aufweisen. Im Anschluss daran wurden noch je zwei Prüfungen durchgeführt, welche auf Herausziehen bzw. Schraubenbruch versagen sollten. Die letzte Prü-

fung wurde wieder mit 13 Schrauben durchgeführt, allerdings mit einer Abstufung der Schraubenlänge, um festzustellen, ob dies einen maßgebenden Unterschied für die Kräfteinleitung und somit auch für das Versagen ergibt (siehe Tabelle 4.5). Abbildung 4.16 zeigt die grafische Darstellung dieser vier Prüfkongfigurationen.

Prüfkongfiguration	# PK [-]	d [mm]	l [mm]	n [-]	$d_{emb}^{1)}$ [mm]	$l_{emb}^{2)}$ [mm]	$l_{ef}^{3)}$ [mm]
1 max. Kräfteinleitung	2	10	300	13	12	50	190
	2		280				170
2 Herausziehen	2	10	240	9	12	60	120
3 Schraubenbruch	2	10	280	9	12	50	170
4 Lasteinleitung über unterschiedliche Einbindetiefe	1	10	5x280 8x350	13	12	50	5x170 8x240

1) ... Vorbohrdurchmesser für die Einbindetiefe l_{emb}

2) ... Einbindetiefe

3) ... Eindringtiefe

Tabelle 4.5: Überblick über die Prüfkongfigurationen der durchgeführten Prüfungen

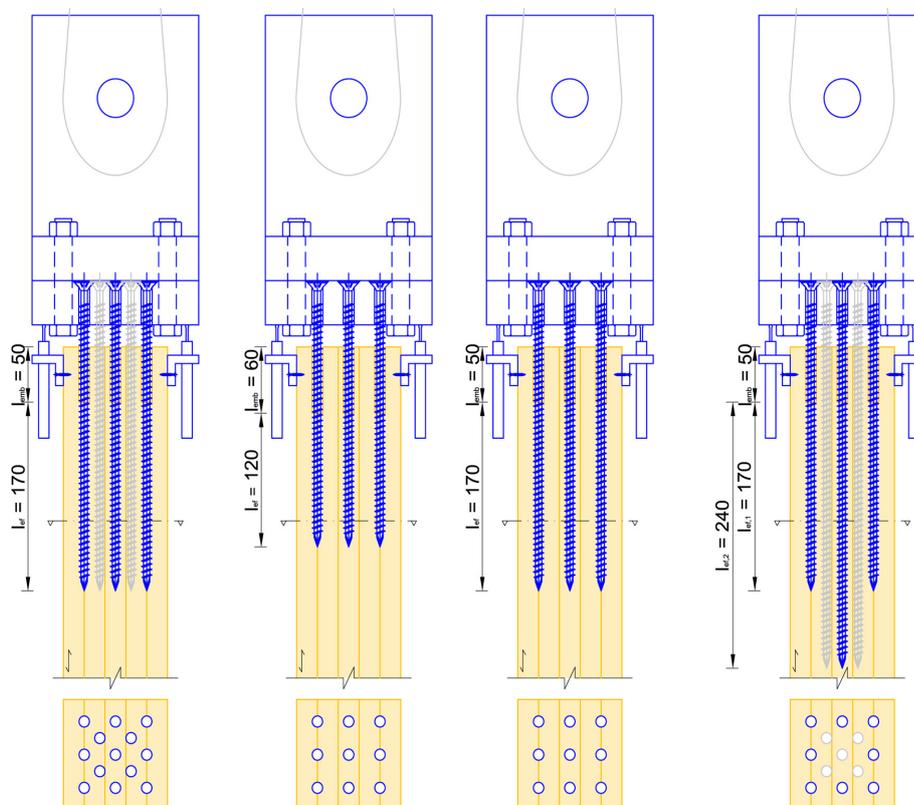


Abbildung 4.16: schematische Darstellung der vier Prüfkongfigurationen (von links nach rechts: Prüfkongfiguration 1, Prüfkongfiguration 2, Prüfkongfiguration 3, Prüfkongfiguration 4; Abmessungen sind dem Anhang A zu entnehmen)

4.3.2.8 Schraubenbild

Das Schraubenbild ist doppelt symmetrisch über den gesamten Querschnitt angeordnet, um die eingeleiteten Kräfte möglichst gleichmäßig auf den ganzen Querschnitt zu verteilen und Exzentrizitäten zu vermeiden. Abbildung 4.17 zeigt das gewählte Schraubenbild mit der Anziehreihenfolge und den Schraubenabständen. Die Mindestabstände zwischen den Schrauben, welche von Forschungsberichten empfohlen werden, wurden nicht eingehalten. Es wurde hier ein Abstand zwischen den Schrauben von $2,1 d$ (bei 13 Schrauben) gewählt, im Gegensatz zum geringsten in [72] vorgegebenen Abstand von $2,5 d$. Die Randabstände, welche mit $2 d$ gewählt wurden, entsprechen den Mindestvorgaben aus [45].

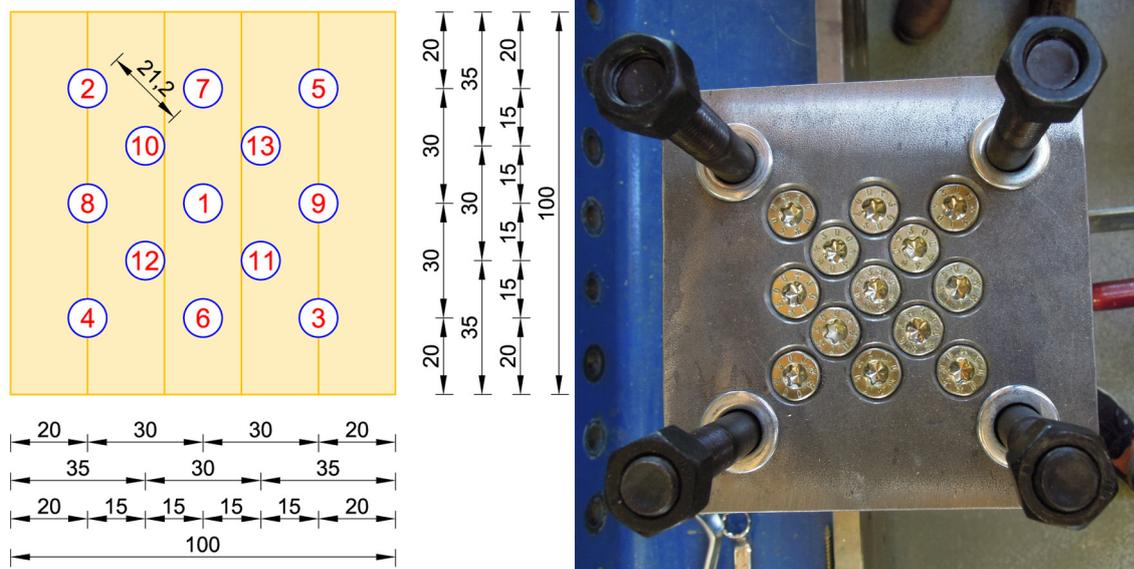


Abbildung 4.17: Schraubenbild und Anziehreihenfolge bei 13 Schrauben

4.3.2.9 Prüf- und Messeinrichtung

Die durch die Maschine aufgebrachte Kraft wird über zwei Kraftmessdosen, welche fix an der Maschine verbaut sind, gemessen. Des Weiteren wird mit Hilfe von vier Wegaufnehmern (siehe Abbildung 4.18), welche direkt am Prüfkörper befestigt sind und auf das Schraubenblech messen, sowie von zwei Dehnmessstreifen, die an den Gewindestangen wie in Abbildung 4.18 dargestellt, angebracht sind, die jeweilige Relativverschiebung gemessen. Über die Dehnung der Dehnmessstreifen wird die aufgebrachte Kraft berechnet, um Kontrollwerte für die Kraftmessung der Kraftmessdosen zu erhalten.

Aus Abbildung 4.18 ist auch erkennbar, dass der Prüfkörper auf beiden Seiten doppelt gelenkig (jeweils ein horizontales und ein vertikales Gelenk) mit der Maschine verbunden ist und somit keine Zwängungen bei der Lastaufbringung auf den Prüfkörper entstehen können.

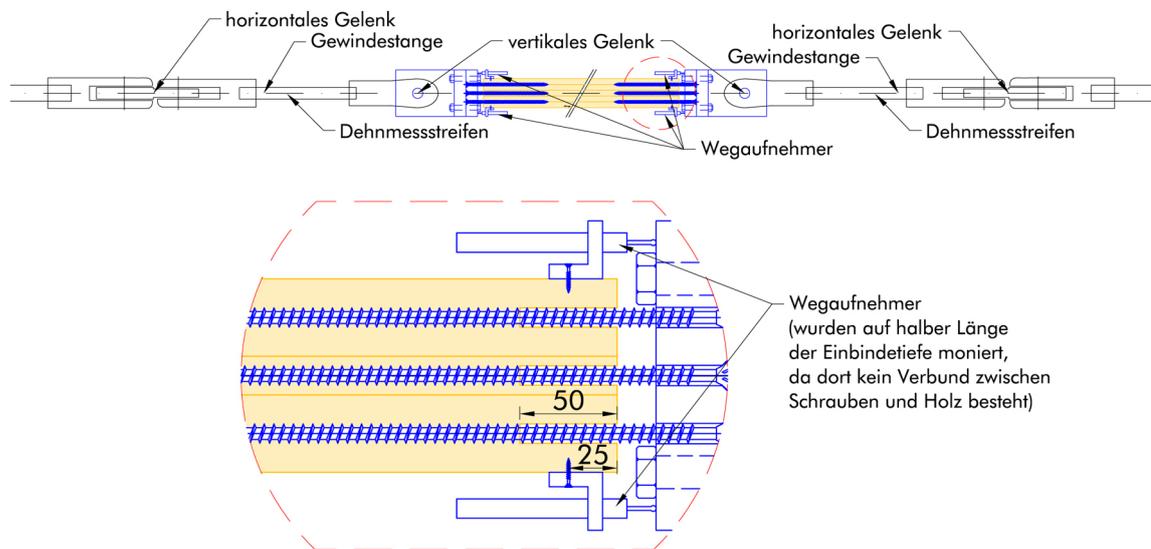


Abbildung 4.18: Anbringung der Wegaufnehmer sowie der Dehnmessstreifen am Prüfkörper

4.3.2.10 Ablauf der Prüfungen

Dieser Punkt beschreibt den Ablauf der Prüfungen. Die Vorbereitung sowie den Einbau der Prüfkörper, die Prüfung selbst, die Protokollierung und die Nachbereitung. Abbildung 4.19 beschreibt die in den folgenden Punkten erläuterte Vorbereitung sowie den Einbau der Prüfkörper und die Montage der Wegaufnehmer.

Vorbereitung der Prüfkörper

Für die Vorbohrung wurde nach [33] ein Durchmesser von sieben Millimeter gewählt.

Zuerst wurden die zu bohrenden Löcher mit einer angefertigten Schablone am Holzquerschnitt aufgezeichnet, um dann die ersten Bohrungen für die Einbindetiefe von 50 mm, dies entspricht 5 d, mit einem Durchmesser von 12 mm durchzuführen. Anschließend wurden, wiederum mit der Standbohrmaschine, bis auf ca. 80 mm (maximal mögliche Bohrlänge der Standbohrmaschine) mit einem Bohrdurchmesser von 7 mm die Löcher als Führung für die Handbohrung gebohrt. Abschließend wurde bis auf die gewählte Einschraublänge mit der Handbohrmaschine und einem Schlangenbohrer (Durchmesser von 7 mm) vorgebohrt, um die Schrauben später gerade eindrehen zu können.

Einbau

Zuerst wurden in die vorbereiteten und vorgebohrten Prüfkörper die Schrauben mit der Reihenfolge, welche in Abbildung 4.19 dargestellt ist, mit der Handbohrmaschine eingeschraubt und danach mit einem Drehmomentenschlüssel mit 19 Nm angezogen um sicherzustellen, dass sich bei der Prüfung die aufgebrachte Last gleichmäßig auf alle Schrauben verteilt. Anschließend wurden die T-Laschen mit Stahlschrauben an das Schraubenblech angeschraubt und der Prüfkörper in die Prüfmaschine eingehoben und eingebaut.

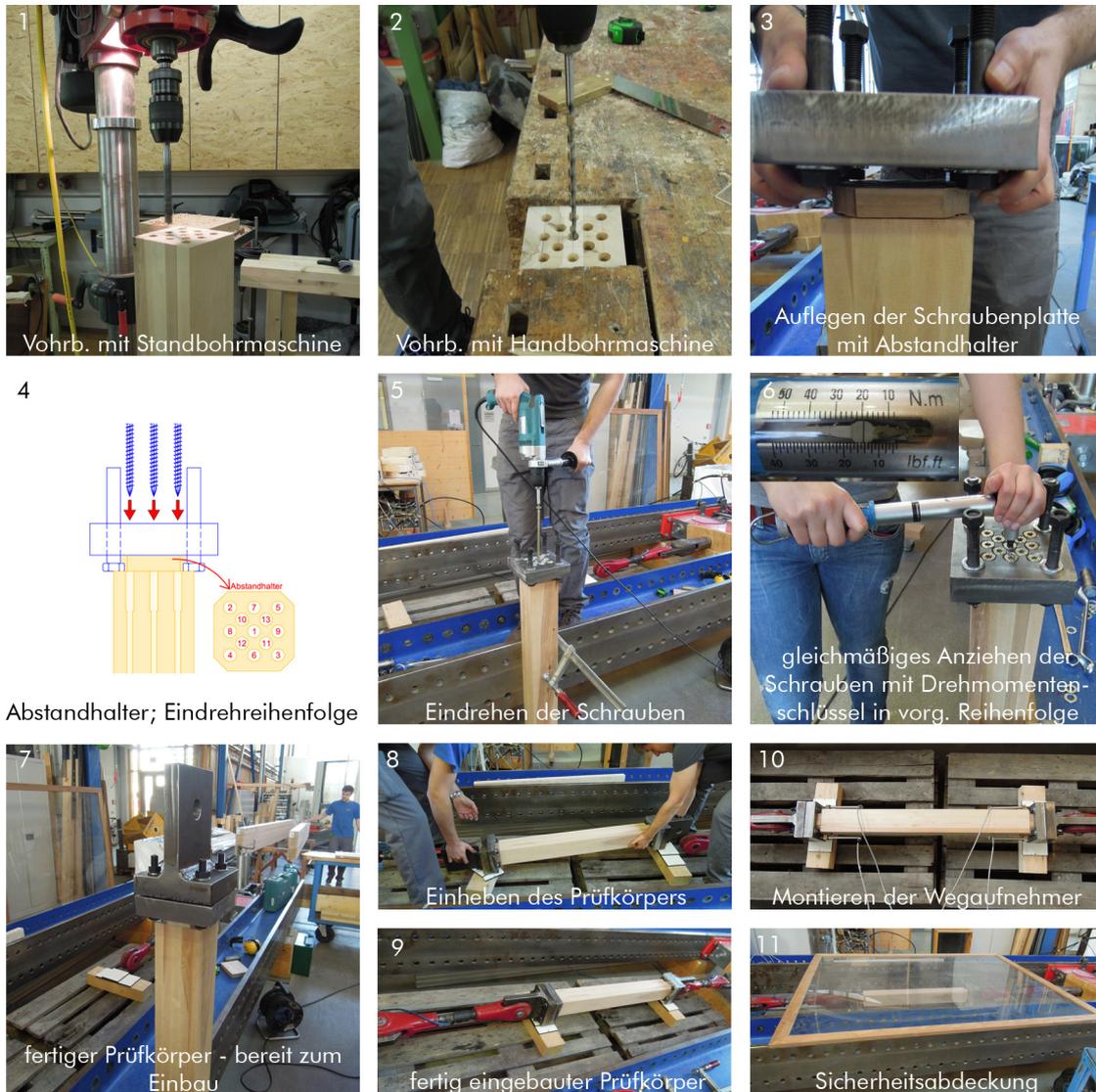


Abbildung 4.19: Ablauf von Vorbereitung und Einbau der Prüfkörper

Montieren der Wegaufnehmer

Nachdem der Prüfkörper fertig in die Zugprüfmaschine eingebaut war, wurden die Wegaufnehmer an beiden Enden des Prüfkörpers jeweils links und rechts am Prüfkörper montiert, sodass sie auf die Stahlfläche des Schraubenbleches messen (siehe Abbildung 4.18 und 4.19).

Prüfung

Die Prüfung selbst wurde mit der Zugprüfmaschine *lignum_z_850* am Lignum Test Center der Technischen Universität Graz durchgeführt. Es wurde zuerst die Last auf die erste Laststufe (siehe Tabelle 4.3) gefahren, um dann die Wegaufnehmer vom Prüfkörper zu entfernen, damit sicher-

gestellt werden konnte, dass diese nicht beim Versagen des Prüfkörpers beschädigt werden. Anschließend wurde die Last kontinuierlich bis zum Bruch gesteigert.

Protokollierung

Die Kraft sowie die Verschiebungen wurden mit Hilfe von vier Wegaufnehmern sowie zwei Dehnmessstreifen, welche an den Gewindestangen angebracht waren, und den zwei Kraftmessdosen der Maschine gemessen und aufgezeichnet. Des Weiteren wurde eine Fotodokumentation, welche die Prüfkörper vor und nach den Prüfungen darstellt, gemacht. Nach Beendigung der Prüfung wurde die Bruchursache der einzelnen Prüfkörper analysiert und in einem Prüfprotokoll festgehalten.

Nachbereitung

Im Anschluss an die Prüfungen wurden die einzelnen Holzteile der Prüfkörper mit der Prüfkörperbezeichnung sowie der Bruchlast beschriftet. Anschließend wurde eine Darrprobe nahe dem Bruch entnommen und bei „intakten“ Prüfkörpern, welche auf Schraubenbruch oder Ausziehen versagten, wurde der mittlere Teil mit einer Länge von ca. 400 mm herausgeschnitten und wieder in der Klimakammer gelagert. Diese Mittelteile wurden für spätere Ausziehprüfungen von Einzelschrauben aufbewahrt. In Abbildung 4.20 ist der Prüfkörper noch einmal mit den Teilen, welche herausgeschnitten wurden, dargestellt.



Abbildung 4.20: Entnahme der Darrproben und des mittleren Prüfkörperteils

4.3.2.11 Ermittlung des Verschiebungsmoduls K_{ser}

Der Verschiebungsmodul lässt auf die Steifigkeit bzw. die Nachgiebigkeit einer Verbindung schließen. Er ist über die Steigung der Kurve des Kraft-Weg-Diagramms für den Bereich zwischen 10 % und 40 % der Bruchlast definiert und kann mit Gleichung (4.20) ermittelt werden. Es wurde für die Ermittlung des Verschiebungsmoduls die Regressionanalyse gewählt. Dafür wurde ein Bereich zwischen 10 % und 40 % so gewählt, dass die Regressionsanalyse eine größere Korrelation als 0,999 ergibt.

$$K_{ser} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta F}{\Delta w} = \frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1} \quad (4.20)$$

4.3.3 Prüfungen von in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen

Es wurden drei Zugprüfungen mit in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen durchgeführt. In den nachfolgenden Punkten dieses Kapitels werden die Vorbemessung, das Prüfkonzept, die Prüfzubereitung und der Prüfablauf beschrieben.

4.3.3.1 Vorbemessung

Für die drei Prüfkörper wurde zu Beginn eine Vorbemessung durchgeführt. Dafür wurde die Nettoquerschnittstragfähigkeit (Gleichung (4.21)), die Tragfähigkeit des Stahlblechs (Gleichung (4.22)) und die Schubtragfähigkeit der Klebefuge (Gleichung (4.23)) berechnet. Diese sind für alle Prüfkörper in Tabelle 4.6 angegeben und das maßgebende Versagen markiert.

$$F_{\text{netto}} = A_{\text{netto}} \cdot f_{t,0,\text{mean}} \quad (4.21)$$

F_{netto} ... Nettoquerschnittstragfähigkeit [N]
 A_{netto} ... Nettoquerschnitt [mm²]
 $f_{t,0,\text{mean}}$... mittlere Zugfestigkeit der geprüften Birkenlamellen [N/mm²]

$$F_{\text{SB}} = A_{\text{Stahl}} \cdot f_u \quad (4.22)$$

F_{SB} ... Tragfähigkeit des Stahlblech-Querschnitts [N]
 A_{Stahl} ... Stahlquerschnitt [mm²]
 f_u ... Zugfestigkeit des Stahls [N/mm²]

$$F_{\text{KF}} = A_{\text{KF}} \cdot f_s = l_{\text{ef}} \cdot 4 \cdot b_{\text{Blech}} \cdot f_s \quad (4.23)$$

F_{KF} ... Schubtragfähigkeit der Klebefuge [N]
 A_{KF} ... ansetzbare Klebefugenfläche [mm²]
 l_{ef} ... ansetzbare Länge der Klebefuge [mm]
 b_{Blech} ... Breite des Stahlblechs [mm]
 f_s ... Schubfestigkeit der Klebefuge [N/mm²]

b_{Blech} [mm]	t_{Blech} [mm]	l_{ef} [mm]	A_{KF} [cm ²]	t_{KF} [mm]	f_u [N/mm ²]	$f_{t,0,\text{mean}}$ [N/mm ²]	f_s [N/mm ²]	F_{netto} [kN]	F_{SB} [kN]	F_{KF} [kN]
100	5	200	744	1	510	55	7	478,5	497,3	520,8

Tabelle 4.6: Vorbemessung der Prüfkörper (geringste Tragfähigkeit für wahrscheinlichstes Versagen markiert)

4.3.3.2 Herstellung der Verklebung Holz-Stahl

Evaluierung möglicher Herstellungsvarianten

Für die Herstellung der Verklebung der Stahlprofile mit dem Brett-schichtholz wurden vier Varianten auf ihre Machbarkeit untersucht. Im Nachfolgenden sind diese Herstellungsvarianten in den Abbildungen 4.21 bis 4.24 dargestellt.

Bei den Varianten 1 und 3 werden die Stahlbleche über die Diagonalen des Brett-schichtholz-Querschnitts eingeklebt, bei Variante 2 und 4 sollen die Stahlbleche normal bzw. parallel zu dessen Seitenkanten eingeklebt werden.

Bei Variante 1 (siehe Abbildung 4.21) sollen die Stahlbleche wie bereits erwähnt diagonal eingeklebt werden. Zuerst wird ein Brett-schichtholz-Querschnitt mit den Abmessungen 100/100 mm hergestellt (1) und dann in der Mitte des Querschnitts ein Loch mit 20 mm Durchmesser gebohrt (2). Anschließend werden über die Diagonale sieben Millimeter breite Schlitzn eingeschnitten (3). Danach werden die Ecken des Querschnitts wieder mit Füllhölzern verschlossen (4). Zum Schluss wird der Hohlraum mit ausreichend Klebstoff verfüllt (5), das Stahlprofil eingesetzt (6) und abgewartet bis der Klebstoff ausgehärtet ist.

Diese Variante ist relativ einfach durchzuführen, allerdings besteht hier eine größere Querschnittschwächung, da die Füllhölzer nicht für den tragenden Holzquerschnitt berücksichtigt werden können.

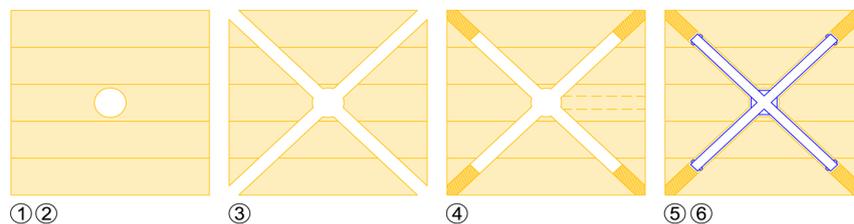


Abbildung 4.21: Vorgehensweise zum Einkleben der Stahlbleche in die Brett-schichtholzquerschnitte - Variante 1

Für Variante 2 (siehe Abbildung 4.22) werden zu Beginn 2 Brett-schichtholzquerschnitte, bestehend aus je drei Lamellen, hergestellt (1) und hier jeweils der halbe Querschnitt des Stahlprofils plus einem Millimeter links und rechts ausgefräst (2). Anschließend werden die beiden Querschnitte entweder zuerst zusammen geleimt und gepresst und dann erst der Klebstoff eingefüllt und das Stahlprofil eingesetzt (3b) oder aber es werden die beiden Querschnittsteile gleichzeitig mit dem Stahlprofil verleimt und gemeinsam gepresst.

Bei dieser Variante kommt ein größerer Querschnitt zum Einsatz, der nicht mehr einen Querschnitt von $b \times h = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ sondern $b \times h = 120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ aufweist. Diese Vergrößerung des Querschnitts ist aufgrund der vorgegebenen Lamellendicke und der gewollten vollkommenen Einbindung des Stahls in den Holzquerschnitt nötig. Dies hat zum Nachteil, dass die Tragfähigkeit des Holzes steigt, allerdings der Stahlquerschnitt auf die max. aufnehmbare Last des kleineren Querschnitts ausgelegt ist und somit das Versagen des Stahlquerschnitts früher eintreten wird, als das Versagen des Holzquerschnittes oder der Klebefuge. Ansonsten wäre für diese Variante kein großer Holzverschnitt notwendig bzw. kein größerer Arbeitsaufwand, als bei Variante 1.

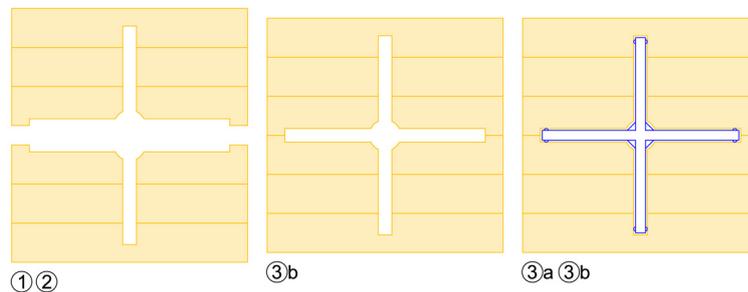


Abbildung 4.22: Vorgehensweise zum Einkleben der Stahlbleche in die Brettschichtholzquerschnitte - Variante 2

Wie in Abbildung 4.23 dargestellt, setzt sich der Querschnitt für Variante 3 jeweils aus der Hälfte von vier einzelnen Querschnitten zusammen. Es werden zuerst vier Querschnitte zu je vier Lamellen mit den Abmessungen $b \times h = 80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ hergestellt (1). Dann wird jeweils an zwei diagonal gegenüberliegenden Seiten ein Viertel des Stahlquerschnitts eingeschnitten (2). Anschließend werden die Querschnitte über die andere Diagonale, so auseinander geschnitten, dass die Länge der Diagonale genau 100 mm beträgt (3). Daran anschließend ist es wieder, wie auch schon für Variante 2 erläutert, möglich, zuerst die vier Holzquerschnitte zu verkleben und zu pressen und dann erst den Hohlraum mit Klebstoff aufzufüllen und das Stahlprofil einzusetzen (4b) oder dies gleichzeitig zu machen und den fertigen Querschnitt mit dem Stahlprofil gemeinsam zu pressen (4a).

Ein großer Nachteil dieser Variante ist der Holzverschnitt durch das Aufschneiden über die Diagonale (25 % zusätzlicher Verschnitt pro Querschnitt). Des Weiteren ist es aufwendiger, einen Querschnitt über die Diagonalen zu verkleben und zu pressen - es entsteht hier ein weitaus größerer Arbeitsaufwand als für die restlichen Varianten.

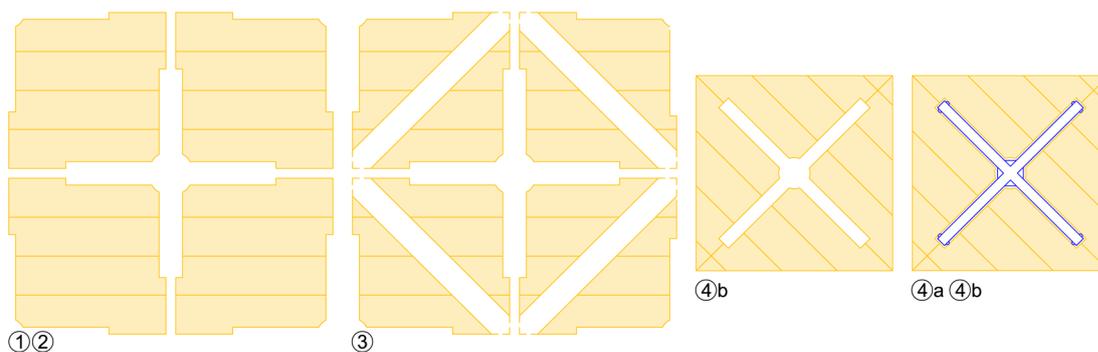


Abbildung 4.23: Vorgehensweise zum Einkleben der Stahlbleche in die Brettschichtholzquerschnitte - Variante 3

Bei der vierten Variante (siehe Abbildung 4.24) wird der Stahlquerschnitt so eingeklebt, dass die Stahlbleche bündig mit dem Holz abschließen. Hier wird wieder zuerst ein Brettschichtholzquerschnitt mit den Abmessungen $b \times h = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ hergestellt (1) und danach mittig ein Loch mit einem Durchmesser von 20 mm gebohrt (2). Anschließend werden zwei Schlitze mit einer Breite von sieben Millimeter normal aufeinander, mittig eingeschnitten (3). Daraufhin wird der Querschnitt mit einer Folie eingewickelt, damit kein Klebstoff ausläuft, und der Hohlraum mit ausreichend Klebstoff aufgefüllt (4), um letztendlich das Stahlprofil einzusetzen und mit dem Querschnitt zu verkleben (5).

Die Herstellung dieser Variante ist vom Arbeitsaufwand am einfachsten, allerdings ist hier für die Praxis kein Brandschutz für den Stahl gegeben. Da in diesem Entwicklungsstadium ausschließlich das Verbundverhalten unter Laborbedingungen (20 ° C, 65 % relative Luftfeuchte) von Interesse ist, wird der Brandschutz nicht weiter betrachtet.

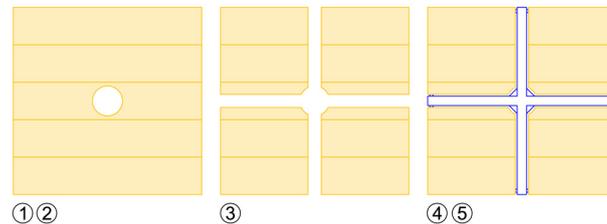


Abbildung 4.24: Vorgehensweise zum Einkleben der Stahlbleche in die Brett-schichtholzquerschnitte - Variante 4

Im Nachfolgenden sind in der Tabelle 4.7 die Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten noch einmal zusammengefasst, um eine erleichterte Entscheidungsfindung zu ermöglichen.

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Arbeitsaufwand	+	-	--	++
Holzverschnitt	+	-	--	++
Querschnitts-schwächung	-	+	+	+
Brandschutz Stahl	+	+	+	-

Tabelle 4.7: Vergleich der vier Varianten zur Verklebung der Stahlbleche mit dem Brett-schichtholz-Querschnitt

Da die Variante 4 in allen betrachteten Punkten, bis auf den Brandschutz, der für diese Prüfungen nicht relevant ist, besser abschneidet als die restlichen Varianten, wurde letztendlich diese ausgewählt.

Herstellung der Klebeverbindung der Prüfkörper

Es wurde die Stahloberfläche ungefähr zur gleichen Zeit wie die Brett-schichtholzträger bearbeitet, um den bestmöglichen Verbund durch die Verklebung zu erreichen. Auf die Stahlteile wurden zunächst Schweißpunkte mit einem Millimeter Dicke als Abstandhalter aufgebracht, um bei der Verklebung sicherstellen zu können, dass auf beiden Seiten der Stahlbleche die gleiche Klebefugendicke gewährleistet werden kann. Anschließend wurden die Stahloberflächen mit Hochofenschlacke sandgestrahlt.

Bei der Bearbeitung der Brett-schichtholzträger wurde zunächst ein 20 mm dickes und 227 mm langes Loch in die Mitte des Querschnitts gebohrt. Im Anschluss daran wurden die sieben Millimeter breiten Schlitz nach Variante 4 mit der Kreissäge und deren Verlängerung mit der Bandsäge eingeschnitten. Danach wurden die oberen Kanten der Schlitz abgescrägt, um die obere Schweißnaht, welche den Anschluss der Bleche an das Kopfblech bildet, auch im Holz versenken zu können.



Abbildung 4.25: Ablauf der Prüfkörpervorbereitung

Die letzten Vorbereitungen vor der Verklebung waren die Abdichtung der Schlitzes mit Hilfe von Klebestreifen und Holzklötzen, welche mit Schraubzwingen am Prüfkörper befestigt wurden sowie die Reinigung der Stahloberfläche der Bleche mit Isopropanol (98%-iger Alkohol) und das Abkleben der oberen 25 mm, um dort einen Klebeverbund zu verhindern. Nun konnte die berechnete Klebstoffmenge von ungefähr 180g (ein Drittel einer Klebstofftube) mit einer Kartusche eingebracht werden. Der Klebstoff wurde an der untersten Stelle der Schlitzes eingebracht, um Lufteinschlüsse zu verhindern. Zuletzt wurde das Stahlprofil bis zum Anschlag in die Brett-schicht-holzträger eingedrückt und der Klebstoff für zehn Tage ausgehärtet. Die erforderliche Klebstoffmenge betrug zwar nur ca. 125 g, allerdings wurden absichtlich 180 g gewählt, um sicherzustellen, dass bei kleinen Ungenauigkeiten beim Einschneiden der Schlitzes, auch sicher ausreichend Klebstoff in den Fugen vorhanden ist. Außerdem war es gewollt, dass der Klebstoff

am oberen Ende herausquillt, um visuell kontrollieren zu können ob ausreichend Klebstoff eingefüllt wurde. Diese Arbeitsschritte sind alle in Abbildung 4.25 ersichtlich. Außerdem zeigt Abbildung 4.26 die Prüfkongfiguration mit welcher die Prüfungen durchgeführt werden und die Herstellung der Prüfkörper erfolgte. Die beiden Stahlbleche wurden bei allen Prüfkörpern um einen Tag versetzt eingeklebt, damit der Klebstoff antrocknen konnte.

4.3.3.3 Prüfkongfiguration

Diese Prüfkongfiguration wurde darauf ausgelegt, dass die Prüfkörper als Bruchursache ein Holzversagen aufweisen sollten. Über eine angenommene Scherfestigkeit von 7 N/mm^2 wurde eine minimale Blechlänge von ca. 150 mm ermittelt, ab der die Scherfuge nicht mehr versagen sollte. Gewählt wurde schlussendlich eine Blechlänge von 200 mm über welche die Kraft übertragen werden soll. Um einem möglichen Aufspalten des Prüfkörpers entgegen zu wirken, wurden die Bleche zusätzlich 25 mm länger ausgeführt auf denen allerdings kein Verbund hergestellt wurde. Es wurde ein Stahl der Stahlgüte S355 mit einer Stärke von 5 mm ausgewählt, um auch sicher zu stellen, dass ein Stahlversagen nicht maßgebend wird. Abbildung 4.26 zeigt die Prüfkongfiguration der faserparallelen Hirnholzverklebungen.

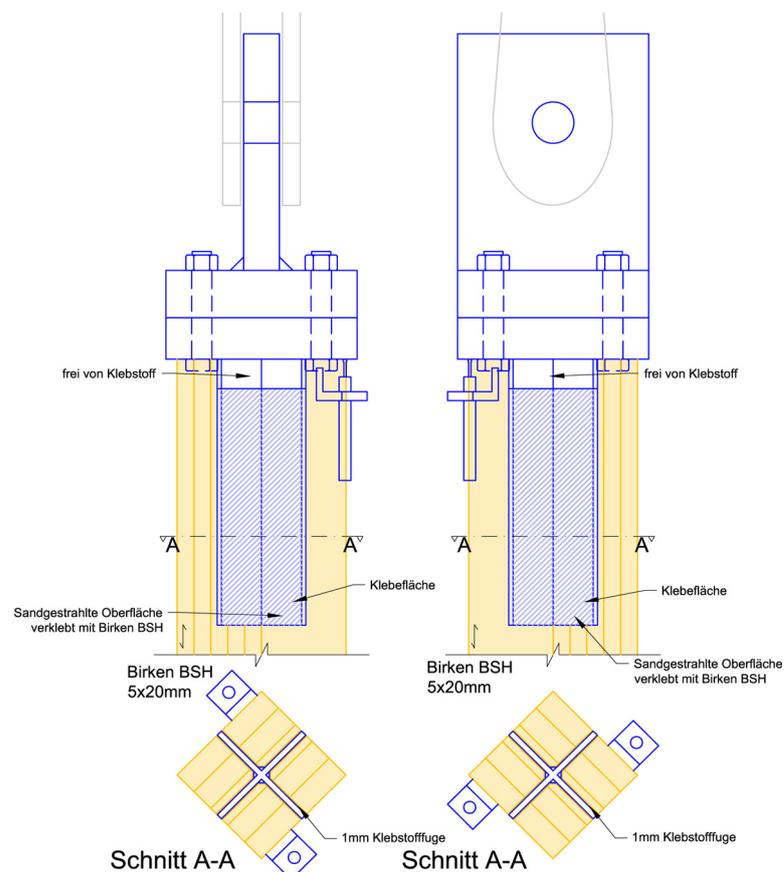


Abbildung 4.26: Prüfkongfiguration der Zugprüfungen der faserparallelen Hirnholzverklebungen (genaue Abmessungen könnend dem Anhang A entnommen werden)

4.3.3.4 Prüf- und Messeinrichtung

Die Prüf- und Messeinrichtung wurde ähnlich der für die Zugprüfungen der faserparallelen Hirnholzverschraubungen gewählt. Die einzige Änderung, die vorgenommen wurde, ist, dass nur auf einer Seite der Verschiebungsmodul gemessen wurde. Die zwei Wegaufnehmer, die den Verschiebungsmodul auf der anderen Seite messen würden, wurden, wie in Abbildung 4.27 dargestellt, quer zum Prüfkörper angeordnet, um die Öffnung der Fugen zu messen.

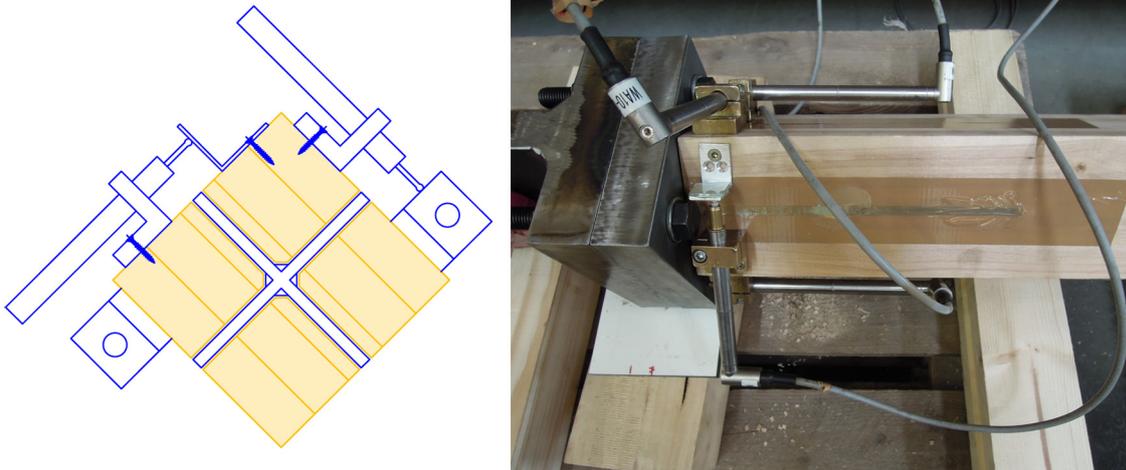


Abbildung 4.27: Anbringung der Wegaufnehmer anhand einer Skizze (links; genaue Abmessungen sind dem Anhang A zu entnehmen) und einer Fotografie (rechts)

4.3.3.5 Ablauf der Prüfungen

Da der Ablauf dieser Prüfungen sehr ähnlich dem der Prüfungen der faserparallelen Hirnholzverschraubungen ist, werden hier nur mehr jene Punkte angeführt, welche sich für diese Prüfungen von den vorhergehenden Prüfungen unterscheiden.

Prüfung

Da an den Prüfkörpern der ersten beiden Prüfungen keine Wegaufnehmer montiert wurden, wurde für diese Prüfungen keine Laststufe festgelegt. Für die dritte Prüfung wurde eine Laststufe von 150 kN definiert, bei der die Wegaufnehmer abgenommen wurden. Diese Laststufe wurde auf Basis der Bruchlast der ersten beiden Prüfkörper gewählt.

Nachbereitung

Im Anschluss an die Prüfungen wurden die Prüfkörper sowie die ausgezogenen Stahlprofile mit deren Bruchlast beschriftet. Anschließend wurde eine Darrprobe nahe dem Bruch entnommen. Zusätzlich wurde die Versagensseite des Prüfkörper in den Fugen aufgeschnitten, um den Klebeverbund und das Versagen zu analysieren und mögliche Lufteinschlüsse, die Klebefugendicken sowie die Klebstoffverteilung festzustellen. Abbildung 4.28 zeigt einen aufgeschnittenen Prüfkörper sowie die Beschriftung und Zuordnung der einzelnen Klebeflächen.

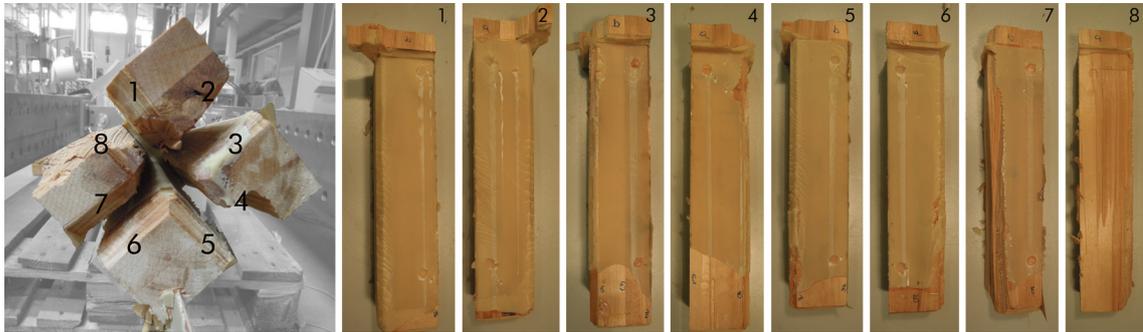


Abbildung 4.28: Beispiel eines aufgeschnittenen Prüfkörpers mit Beschriftung und Zuordnung der einzelnen Klebeflächen

4.3.3.6 Ermittlung des Verschiebungsmoduls K_{ser} und der Fugenöffnung

Der Verschiebungsmodul wurde gleich wie für die Prüfungen der faserparallelen Hirnholzverschraubungen, (siehe Kapitel 4.3.2.11) mit Gleichung (4.20) ermittelt. Zusätzlich wurden die aufgezeichneten Daten der beiden Wegaufnehmer, welche quer zur Prüfkörperlängsachse angeordnet waren, ausgewertet, um einen möglichen Trend zur Öffnung der Fugen festzustellen.

5 Resultate und Diskussion

Dieses Kapitel befasst sich mit den Ergebnissen und der Diskussion der durchgeführten Prüfungen. Es wurden im Gesamten 322 Bretter sortiert, um davon die höchste Qualitätsklasse zu ermitteln. 21 der 46 verfügbaren Bretter der höchsten Qualität wurden für die Zugprüfungen der einzelnen Brettlamellen verwendet. Die restlichen 25 wurden zu fünf Brettschichtholzträgern zu je fünf Lamellen für die Verbindungsprüfungen verklebt.

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der Ermittlung der Grundkenngrößen sowie der einzelnen Prüfserien dar- bzw. gegenübergestellt und diskutiert. Sämtliche Angaben von Quantilwerten basieren auf der empirischen Verteilung, falls keine andere Verteilung angegeben ist.

Die Datenaufbereitung, die Vorauswertung und die statistische Auswertung wurden mit Hilfe von Microsoft Excel 2010 (Version: 10.0.7113.5005) und R (Version: 3.0.2 (2013-09-25)) [96] ausgewertet.

5.1 Holzsortierung

In Tabelle 5.1 ist die Aufteilung der Bretter in die Sortierklassen dargestellt. Daraus geht hervor, dass 23 % der zu sortierenden Bretter der Klasse A und davon wiederum 62 % (das entspricht 46 Bretter) der Klasse A+, welche einen höheren dynamischen Elastizitätsmodul aus der Eigenfrequenzmessung als 16.000 N/mm^2 aufweisen, entsprechen. Etwas mehr als die Hälfte der Bretter mussten der Klasse C zugeordnet werden.

	A (alle)	A+	Klasse B	Klasse C	gesamt
n	74	46	62	186	322
%	23 %	14 %	19 %	58 %	100 %

Tabelle 5.1: Aufteilung in die einzelnen Klassen

Die Tabellen 5.2 bis 5.4 geben Auskunft über die Mittelwerte, das Minimum, das Maximum, den Median, die Standardabweichung sowie den Variationskoeffizienten jeweils für die Rohdichte, den dynamischen Elastizitätsmodul mittels Ultraschall und mittels Eigenfrequenz aufgeteilt nach den einzelnen Sortierklassen.

Rohdichte [kg/m ³]	n	ρ_{mean}	ρ_{min}	ρ_{max}	Median	5%- Quantil	s_d	CoV
Klasse A+	46	639	595	718	633	597	32,8	4,97 %
Klasse A - alle	73	618	525	718	622	532	45,4	7,34 %
Klasse B	62	613	498	726	612	524	54,0	8,81 %
Klasse C	152	604	493	802	601	544	39,7	6,58 %
gesamt	287	609	493	802	606	534	44,9	7,36 %

Tabelle 5.2: Rohdichte in die einzelnen Klassen unterteilt

$E_{\text{dyn,US}}$ [N/mm ²]	n	E_{mean}	E_{min}	E_{max}	Median	5%- Quantil	s_d	CoV
Klasse A ⁺	46	20.458	17.362	23.460	20.219	18.060	1.594	7,79 %
Klasse A - alle	73	19.087	13.699	23.460	19.447	15.045	2.427	12,7 %
Klasse B	62	18.503	13.282	24.624	18.532	14.216	2.597	14,0 %
Klasse C	151	17.129	12.808	22.440	16.943	14.034	1.992	11,6 %
gesamt	286	17.923	12.808	24.624	17.832	14.194	2.402	13,4 %

Tabelle 5.3: Dynamischer Elastizitätsmodul mittels Ultraschall in die einzelnen Klassen unterteilt

$E_{\text{dyn,EF}}$ [N/mm ²]	n	E_{mean}	E_{min}	E_{max}	Median	5%- Quantil	s_d	CoV
Klasse A ⁺	46	17.962	16.070	21.592	17.533	16.188	1.456	8,11 %
Klasse A - alle	74	16.589	9.921	21.592	16.762	12.786	2.378	14,3 %
Klasse B	61	15.766	11.501	22.107	15.714	12.443	2.191	13,9 %
Klasse C	151	14.098	10.114	21.442	13.863	11.155	1.900	13,5 %
gesamt	285	15.093	9.921	22.107	14.766	11.618	2.356	15,6 %

Tabelle 5.4: Dynamischer Elastizitätsmodul über die Eigenfrequenz der Längsschwingungen in die einzelnen Klassen unterteilt

5.1.1 Rohdichte und dynamische Elastizitätsmoduln nach Sortierklassen getrennt

In Abbildung 5.1 sind die Rohdichteverteilung und die Verteilung der dynamischen Elastizitätsmoduln, jeweils über die drei Sortierklassen aufgeteilt, dargestellt.

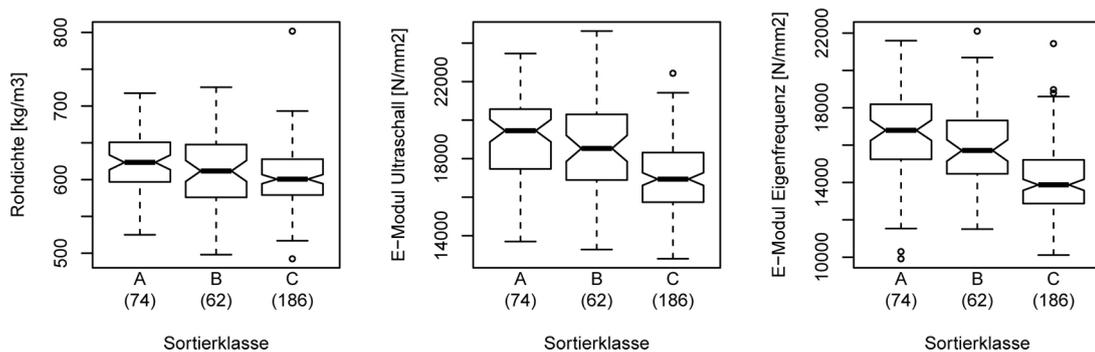


Abbildung 5.1: Boxplotdarstellungen der einzelnen Sortierklassen für Rohdichte, dynamischen Elastizitätsmodul über den Ultraschall und dynamischen Elastizitätsmodul über die Eigenfrequenz

Es ist ersichtlich, dass zwar die jeweiligen Mediane der Klasse A höher als die der anderen Klassen liegen, aber da sich die Einschnürungen (95%-Konfidenzintervall des Wilcoxon Mann Whitney Tests auf Signifikanz) zumindest für die Klassen A und B immer überschneiden ist kein signifikanter Unterschied festzustellen. Für die Rohdichte ist im Allgemeinen kein signifikanter Unterschied feststellbar, nicht einmal für den Unterschied zur Klasse C.

5.1.2 Korrelation der dynamischen Elastizitätsmoduln

In Abbildung 5.2 sind die beiden dynamischen Elastizitätsmoduln aus der Ultraschalllaufzeit und aus der Eigenfrequenz getrennt nach Sortierklassen gegenübergestellt.

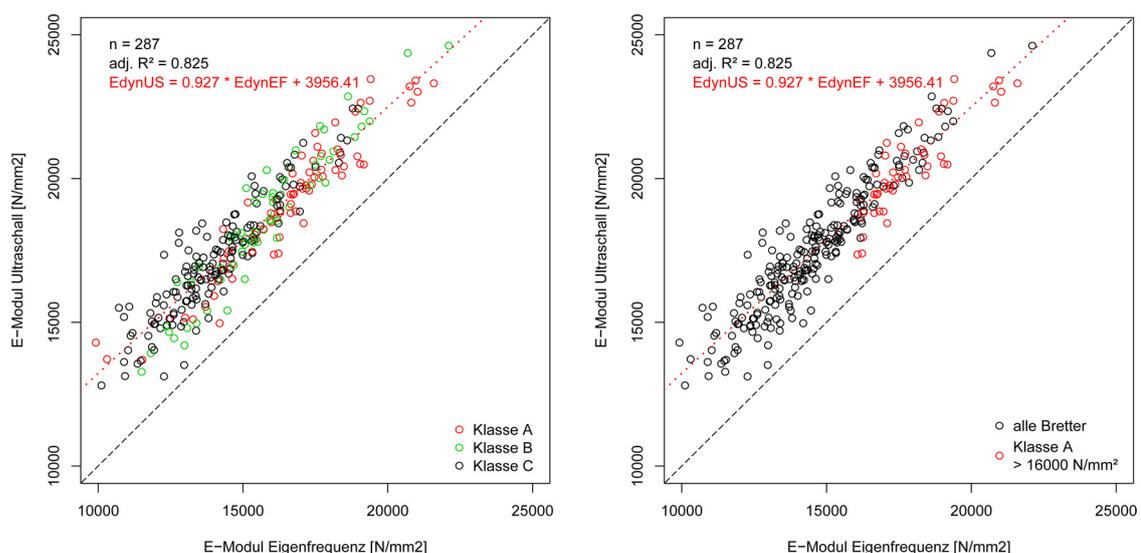


Abbildung 5.2: Korrelation der dynamischen Elastizitätsmoduln einmal nach allen Klassen unterteilt (links) und einmal mit Hervorhebung der für die weiteren Prüfungen verwendeten Bretter (Klasse A+, rechts)

In Abbildung 5.2 (links) ist zu erkennen, dass die Klasse A großteils im Bereich der höheren Elastizitätsmoduln angeordnet ist und Klasse C im Bereich der niedrigeren. Klasse B hingegen streut über den gesamten Bereich der Elastizitätsmoduln. Die rechte Abbildung verdeutlicht diese Aussage, da hier nur die Bretter der Klasse A+ hervorgehoben sind.

Es besteht ein hoher Zusammenhang zwischen den beiden dynamischen Elastizitätsmoduln, welcher durch die rote Gerade, die beinahe parallel zur 45 ° Geraden ist, sowie durch das hohe Bestimmtheitsmaß von $\text{adj. } R^2 = 0,825$ verdeutlicht wird. Da der dynamische Elastizitätsmodul aus der Ultraschallmessung im Mittel um 19 % höher ist, als der dynamische Elastizitätsmodul aus der Eigenfrequenz, ist die rote Gerade nicht deckungsgleich mit der 45 ° Geraden.

5.1.3 Korrelation der Rohdichte mit den dynamischen Elastizitätsmoduln

In Abbildung 5.3 ist die Rohdichte den dynamischen Elastizitätsmoduln aus der Ultraschalllaufzeit und der Eigenfrequenz, mit Hervorhebung der Sortierklasse A+, gegenübergestellt.

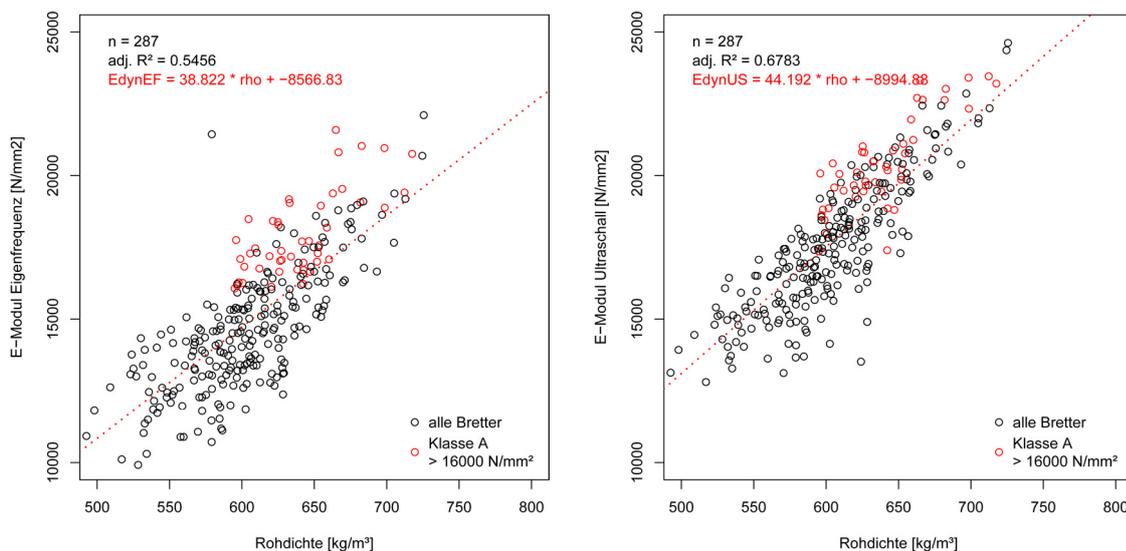


Abbildung 5.3: Korrelation der Rohdichte mit den dynamischen Elastizitätsmodul der Ultraschallmessung (rechts) und der Eigenfrequenz (links)

Es ist ersichtlich, dass ein Zusammenhang zwischen der Dichte und den dynamischen Elastizitätsmoduln besteht. Das Bestimmtheitsmaß ist für den Zusammenhang mit dem dynamischen Elastizitätsmodul aus der Ultraschallmessung mit $\text{adj. } R^2 = 0,678$ höher als für den Zusammenhang mit dem dynamischen Elastizitätsmodul aus der Eigenfrequenzmessung mit $\text{adj. } R^2 = 0,546$ und lässt somit schlussfolgern, dass der Zusammenhang der Rohdichte mit dem dynamischen Elastizitätsmodul aus der Ultraschallmessung höher ist.

5.2 Zugprüfungen Brettlamelle

In Tabelle 5.5 ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse der gesamten Zugprüfungen der Brettlamellen ($b \times h = 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$) dargestellt.

Gesamt	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{0, \text{lokal}, 12}$ [N/mm ²]	$E_{\text{dyn}, \text{US}, 12}$ [N/mm ²]	$E_{\text{dyn}, \text{EF}}$ [N/mm ²]	ρ_{12} [kg/m ²]	u [%]
Anzahl	21	21	21	21	21	21
Min	17	12.878	17.604	14.932	593	10,9 %
Max	82	20.505	23.021	20.586	691	11,9 %
Median	52	16.703	20.124	17.026	636	11,4 %
Mittelwert	53	16.869	20.374	17.463	644	11,4 %
Stabw.	18	1.798	1.566	1.506	29	0,26 %
CoV	33,4 %	10,7 %	7,68 %	8,62 %	4,56 %	2,32 %
5% Quantile	24	14.719	18.362	15.612	608	

Tabelle 5.5: Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen der Zugprüfungen

In Tabelle 5.6 ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Bretter, die bei erneuter Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls mittels Eigenfrequenz einen höheren dynamischen Elastizitätsmodul als 16.000 N/mm^2 aufwiesen, dargestellt.

$E_{\text{dyn}, \text{EF}} > 16.000$	$f_{t,0}$ [N/mm ²]	$E_{0, \text{lokal}, 12}$ [N/mm ²]	$E_{\text{dyn}, \text{US}, 12}$ [N/mm ²]	$E_{\text{dyn}, \text{EF}}$ [N/mm ²]	ρ_{12} [kg/m ²]	u [%]
Anzahl	18	18	18	18	18	18
Min	17	14.719	18.598	16.178	608	10,9 %
Max	82	20.505	23.021	20.586	691	11,9 %
Median	61	17.005	20.510	17.136	644	11,4 %
Mittelwert	55	17.171	20.740	17.791	649	11,4 %
Stabw.	17	1.646	1.363	1.358	28	0,26 %
CoV	31,5 %	9,59 %	6,57 %	7,63 %	4,35 %	2,32 %
5% Quantile (emp.)	27	15.404	18.944	16.417	609	

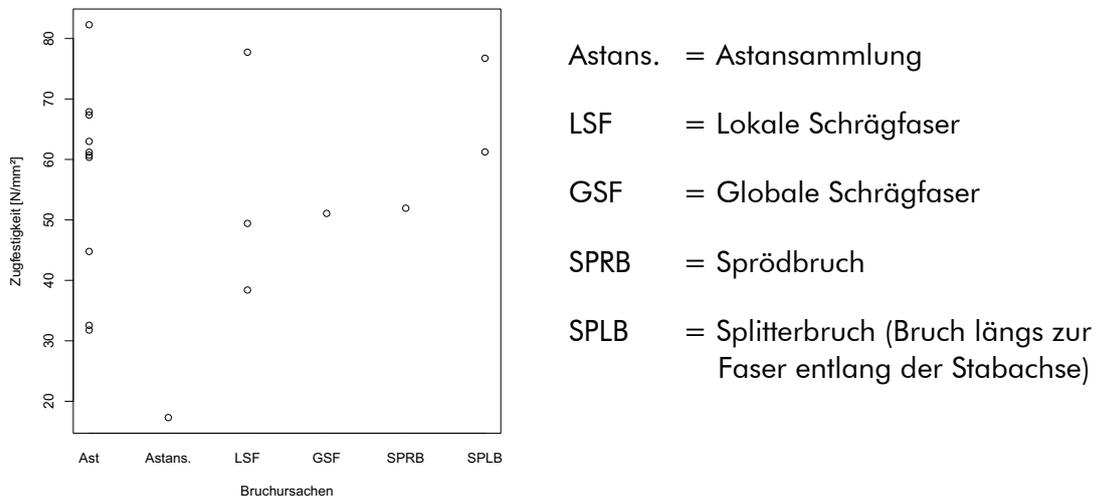
Tabelle 5.6: Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen der Zugversuche mit Ausschluss der Bretter, die bei erneuter Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls einen geringeren Elastizitätsmodul als 16.000 N/mm^2 aufwiesen

Wie aus Tabelle 5.6 ersichtlich, betrug die mittlere Zugfestigkeit 55 N/mm² und der mittlere lokale Elastizitätsmodul 17.171 N/mm². Der Variationskoeffizient ist mit 31,5 % für die Zugfestigkeit im Vergleich zu [58] (19 %), [53] (23 %) und [82] (16 %) relativ hoch.

Die Holzfeuchte betrug im Mittel bei 11,4 % und wies eine Bandbreite von 10,9 % bis 11,9 % auf. Das zeigt, dass die vorgeschriebene Holzfeuchte von 12 % ± 2 %, welche durch das Normklima gemäß ÖNORM EN 384 [2] mit 20 ° C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit festgelegt ist, eingehalten wurde.

5.2.1 Bruchursachen

Die Abbildung 5.4 zeigt die Auftretenshäufigkeit der verschiedenen Bruchursachen und darüber hinaus die Spannweite der jeweiligen Zugfestigkeit für die einzelnen Bruchursachen.



- Astans. = Astansammlung
- LSF = Lokale Schrägfaser
- GSF = Globale Schrägfaser
- SPRB = Sprödbbruch
- SPLB = Splitterbruch (Bruch längs zur Faser entlang der Stabachse)

Abbildung 5.4: Auftretenshäufigkeiten der verschiedenen Bruchursachen und ihre Zugfestigkeiten

Mehr als die Hälfte der Brett lamellen wiesen einen Bruch infolge eines Astes auf. Die höchsten Festigkeiten wiesen die Bretter mit Splitterbrüchen auf.

5.2.2 Modellvergleich Zugprüfungen

In Abbildung 5.5 sind die QQ-Plots der Zugfestigkeit für die Normal-, die Lognormal- sowie für die Weibull-Verteilung dargestellt. Außerdem sind aus dieser Abbildung auch das angepasste Bestimmtheitsmaß und das Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Tests auf Signifikanz ersichtlich.

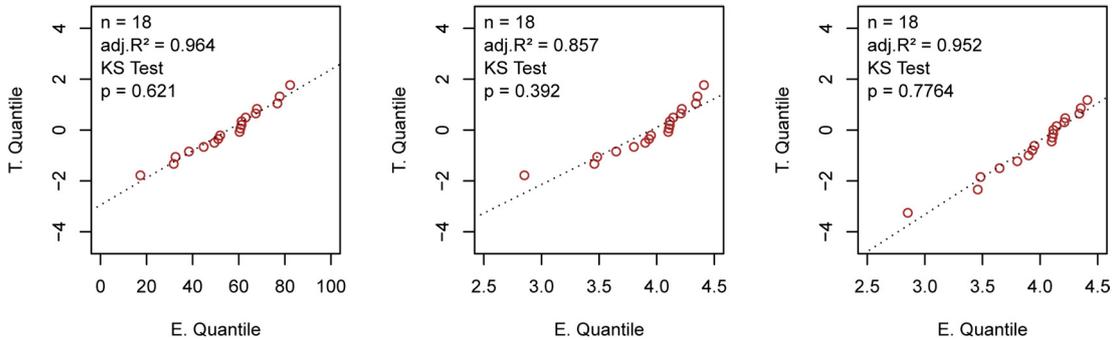


Abbildung 5.5: Modellvergleich Zugprüfungen für die Normalverteilung (links), die Lognormalverteilung (Mitte) und die Weibull-Verteilung (rechts)

Da sowohl für die Normal- als auch für die Weibull-Verteilung ein hohes Bestimmtheitsmaß der Regressionsanalyse und ein hoher p-Wert aus dem Kolmogorov-Smirnov-Test vorliegen, kann der vorliegende Datensatz der Zugfestigkeit durch eine dieser beiden Verteilungen sehr gut angenähert werden.

5.2.3 Korrelation der Zugfestigkeit mit dem Zug-Elastizitätsmodul bzw. der Rohdichte

In Abbildung 5.6 sind die Zusammenhänge zwischen der Zugfestigkeit und dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul bzw. der Rohdichte dargestellt.

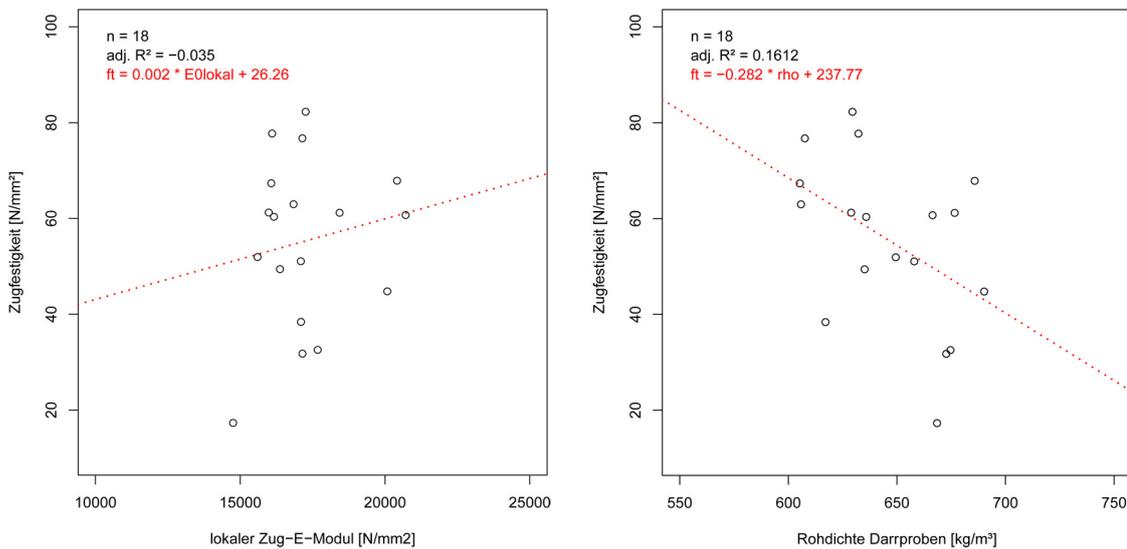


Abbildung 5.6: Korrelation der Zugfestigkeit mit dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul (links) bzw. mit der Rohdichte (rechts)

Es besteht mit einem Bestimmtheitsmaß von $\text{adj. } R^2 = 0,16$ kein Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Zugfestigkeit. Ein hoher Zusammenhang wäre insofern wünschenswert, da im Allgemeinen für fehlerfreies Holz ein Zusammenhang zwischen der Rohdichte und den mechanischen Eigenschaften bekannt ist und vielfach bestätigt wurde. Das ist ein Vorteil zur Kategorisierung des Materials in Festigkeitsklassen bei Kenntnis der Rohdichte und bei Birke daher nicht möglich. Auch zwischen dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul und der Zugfestigkeit kann hier kein Zusammenhang festgestellt werden.

Wenn man diese Erkenntnisse mit den Ergebnissen des Forschungsberichtes [82] vergleicht, kann festgestellt werden, dass in [82] ebenso kein Zusammenhang zum lokalen Zug-Elastizitätsmodul ($\text{adj. } R^2 = 0,23$) bzw. zur Rohdichte ($\text{adj. } R^2 = 0,003$) besteht. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass für Birke kein Zusammenhang zwischen diesen Kenngrößen vorliegt.

5.2.4 Korrelation zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul und dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul

In 5.7 ist der Zusammenhang der dynamischen Elastizitätsmoduln mit dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul dargestellt. Dieser Zusammenhang ist für die maschinelle Festigkeitssortierung von großer Bedeutung, da die dynamischen Elastizitätsmoduln gemessen werden können und so auf den lokalen Elastizitätsmodul geschlossen werden kann.

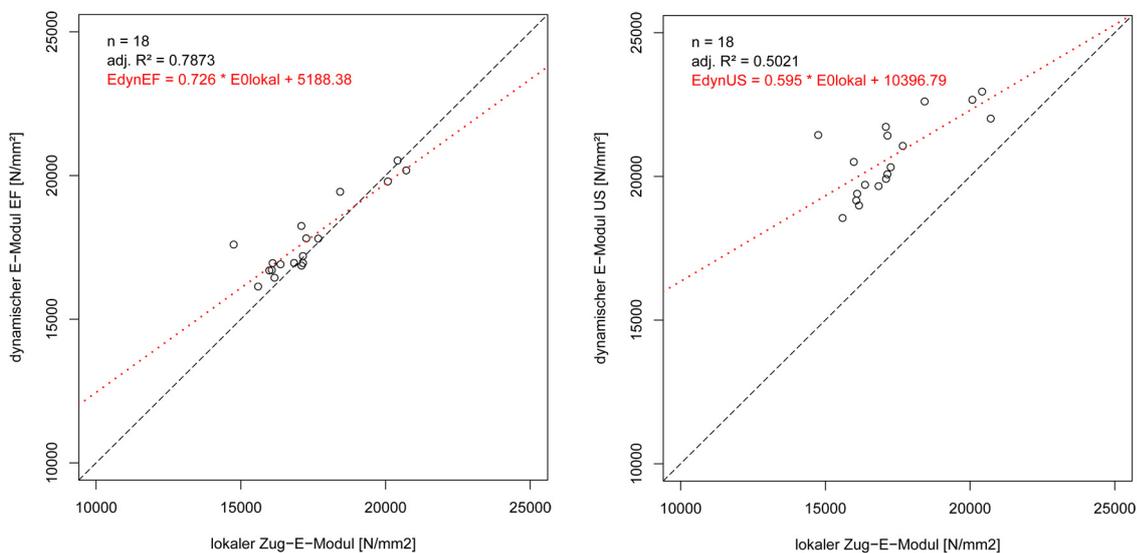


Abbildung 5.7: Korrelation zwischen dem Zug-Elastizitätsmodul und den dynamischen Elastizitätsmodul aus der Eigenfrequenz (links) bzw. der Ultraschallmessung (rechts)

Es besteht vor allem zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul, der mithilfe der Eigenfrequenz ermittelt wurde, und dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul ein hoher Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von $\text{adj. } R^2 = 0,79$. Für den Zusammenhang des dynamischen Elastizitätsmoduls aus der Ultraschallmessung und dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul besteht mit einem Bestimmtheitsmaß von $\text{adj. } R^2 = 0,50$ ein weniger ausgeprägter Zusammenhang.

Die lineare Regressionsanalyse zur Schätzung des lokalen Zug-Elastizitätsmoduls auf Basis der dynamischen Elastizitätsmoduln stimmt mit den Ergebnissen aus den Forschungsberichten [82] und [53] sehr gut überein und bestätigt diese somit zusätzlich (vgl. dazu Kapitel 2.2.5.2 und 2.2.5.3).

5.2.5 Vergleich zur Literatur

In Tabelle 5.7 ist ein Vergleich von den durchgeführten Prüfungen zu der Literatur von Kilde [58], Hübner [53] und Sieder [82] angegeben. Aus dieser Tabelle geht hervor, dass die Werte der durchgeführten Prüfungen sehr gut mit jenen aus der Literatur (wobei hier jeweils die Werte der höchsten Sortierklasse angegeben sind) übereinstimmen. Lediglich der Variationskoeffizient der hier durchgeführten Prüfungen ist deutlich höher als jene aus Kilde [58], Hübner [53] und Sieder [82].

	Kilde [58]	Hübner [53]	Sieder [82]	durchgeführte Prüfungen
$f_{t,0,mean}$ [N/mm ²]	53,6	51,1	43,4	55
CoV ¹⁾	18,6 %	23,0 %	16,2 %	31,5 %
$f_{t,0,05}$ [N/mm ²]	36,2	37,5	32,2	29,6
$E_{0,lokal}$ [N/mm ²]	14.805	14.775	15.309	17.171
ρ_{12} [kg/m ³]	636	609	597,2	649

¹⁾... Variationskoeffizient der Zugfestigkeit

Tabelle 5.7: Vergleich der eigenen Ergebnisse mit jenen aus [58], [53] und [82]

5.3 Prüfungen faserparalleler Hirnholzverschraubungen

5.3.1 Überprüfung der Schraubenzugfestigkeit

Um die Schraubentragfähigkeit bei Stahlversagen zu kennen, wurden jeweils fünf Schrauben aus der gleichen Packung, zum einen neue und zum anderen Schrauben, die bereits einmal für eine Prüfung verwendet wurden, auf ihre Zugtragfähigkeit geprüft.

Die Auswertung (siehe Tabelle 5.8) zeigt, dass zwischen den neuen und den gebrauchten Schrauben kein signifikanter Unterschied zu erkennen ist und die Streuung der beiden Prüfserien mit weniger als 0,5 % sehr gering ist. Die Streuung der neuen Schrauben ist mit $CoV = 0,36 \%$ höher als die der gebrauchten ($CoV = 0,26 \%$). Wenn man beide Prüfserien gemeinsam betrachtet, erhält man einen Mittelwert von 39,95 kN für die Zugtragfähigkeit einer Schraube bei einem Variationskoeffizienten von 0,29 %.

F_{\max} [kN]	neu	gebraucht	gesamt
Anzahl	5	5	10
Min	39,8	39,8	39,8
Max	40,1	40,1	40,1
Mittelwert	39,9	40,0	40,0
Stabw.	0,14	0,10	0,12
CoV	0,36 %	0,26 %	0,29 %

Tabelle 5.8: Auswertung der Schraubenzugfestigkeit einer Einzelschraube

5.3.2 Schraubengruppenprüfungen

Da für die Schraubengruppenprüfungen vier verschiedene Prüfkfigurationen zugrunde liegen, werden alle Prüfungen einzeln ausgewertet und erläutert. Erst im Anschluss daran wird zusammenfassend die Auswertung aller durchgeführten Prüfungen in einer Tabelle zusammengestellt und eine Statistik dazu angegeben.

5.3.2.1 Vorversuche

Im Nachfolgenden werden die drei Vorversuche genau analysiert und ihre unterschiedlichen Bruchursachen erläutert. Für diese drei Prüfungen wurden keine Wegaufnehmer an den Prüfkörpern angebracht, da nicht sicher war, zu welchem Zeitpunkt diese am besten entfernt werden sollten, um eine Beschädigung dieser bei Bruch des Prüfkörpers zu verhindern. Deshalb konnte für diese Prüfungen auch kein Verschiebungsmodul ermittelt werden.

Vorversuch 1 - T005_1

Diese Prüfung wurde mit neun Schrauben je Seite und einer Einbindetiefe von 20 mm durchgeführt.



Abbildung 5.8: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T005_1 auf Schraubenbruch und Ausziehen

Wie in 5.8 erkennbar, versagten sechs Schrauben zuerst auf Schraubenbruch und die verbleibenden Schrauben auf Herausziehen. Mit einer Bruchlast von 336,75 kN, welche ungefähr

66 % der berechneten Nettoquerschnittstragfähigkeit entspricht, versagte der Prüfkörper viel früher als erwartet. Da keinerlei Holzversagen in Form von Rissen oder Aufspalten erkennbar war, wurde daraus geschlossen, dass die neun Schrauben zu wenig Kraft auf den Querschnitt übertragen können. Für weitere Prüfungen wurden zusätzlich vier weitere Schrauben eingedreht, um ein Holzversagen zu erreichen.

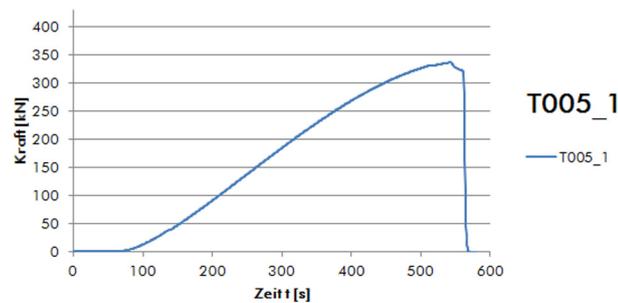


Abbildung 5.9: Kraft-Zeit-Diagramm von Vorversuch 1 T005_1 (ohne Wegaufnehmer)

In Abbildung 5.9 ist das Kraft-Zeit-Diagramm dieses Vorversuchs dargestellt, welches gut erkennen lässt, dass die Steigung der Kurve immer weiter abflacht. Dies deutet auf ein nicht lineares Verhalten der Verbindung.

Vorversuch 2 - T005_2

Für den zweiten Vorversuch wurden je Hirnholzseite 13 Schrauben, erneut mit einer Einbindetiefe von 20 mm, eingeschraubt.



Abbildung 5.10: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T005_2 durch Aufspalten

Der Prüfkörper spaltete, wie in Abbildung 5.10 gut erkennbar, über die gesamte Länge auf. Es konnte eine Bruchlast von 406,53 kN, welche 82 % der zuvor ermittelten rechnerischen Nettoquerschnittstragfähigkeit entspricht, erreicht werden. Da bei dieser Prüfung ein reines Holzversagen eintrat, wurde vermutet, dass die Einbindetiefe zu kurz gewählt wurde und diese somit für die weiteren Prüfungen auf 50 mm erhöht.

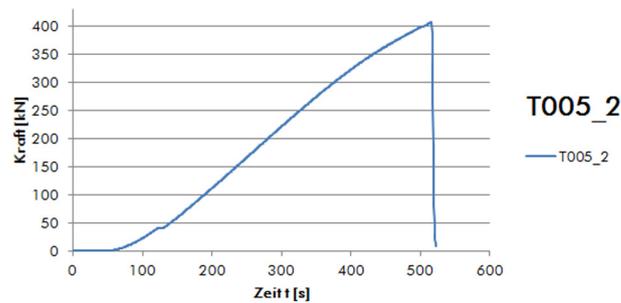


Abbildung 5.11: Kraft-Zeit-Diagramm von Vorversuch 1 T005_2 (ohne Wegaufnehmer)

Vorversuch 3 - T005_3

Bei diesem Vorversuch wurden wiederum je Hirnholzseite 13 Schrauben eingedreht, allerdings diesmal mit einer Einbindetiefe von 50 mm, um ein Aufspalten des Prüfkörpers zu verzögern bzw. zu minimieren.



Abbildung 5.12: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T005_3 auf Schraubenbruch und Ausziehen

Bei diesem Prüfkörper war kein Aufspalten erkennbar. Es trat ein Versagen durch Schraubenbruch von acht Schrauben sowie ein Ausziehen der restlichen fünf Schrauben ein (siehe Abbildung 5.12). Auch das Kraft-Zeit-Diagramm, das in Abbildung 5.13 dargestellt ist, zeigt ein nicht lineares Verhalten der Verbindung, da hier ein Abflachen der Steigung vor dem Bruch erkennbar ist. Der Prüfkörper versagte bei einer Bruchlast von 427,65 kN, welche ca. 86 % der errechneten Nettoquerschnittstragfähigkeit entspricht.

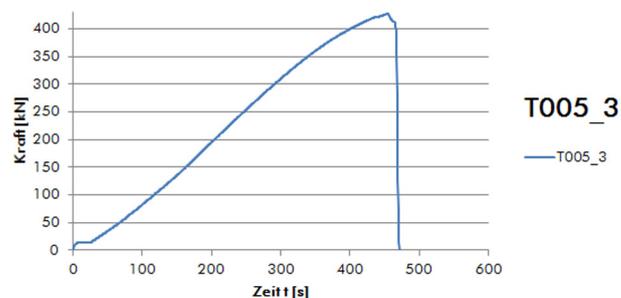


Abbildung 5.13: Kraft-Zeit-Diagramm von Vorversuch 1 T005_3 (ohne Wegaufnehmer)

Da dieses Ergebnis zufriedenstellend war, wurden diese Erkenntnisse für die Festlegung der weiteren Prüfkfigurationen verwendet. Im Nachfolgenden werden die vier Prüfkfigurationen und die dazu durchgeführten Prüfungen (insgesamt neun) erläutert und zusammengefasst.

5.3.2.2 Prüfkfiguration 1

Mit dieser Prüfkfiguration sollte die maximal übertragbare Last bis zu einem Holzversagen (Nettoquerschnittsversagen oder Aufspalten) ermittelt werden. Dafür wurden 13 Schrauben je Seite mit einer Einbindetiefe von 50 mm eingeschraubt. Die Schrauben der ersten beiden Prüfungen (T002-1, T001_1) waren 300 mm ($l_{ef} = 190$ mm) und die Schrauben der anderen zwei Prüfungen (T003_1, T004_1) 280 mm ($l_{ef} = 170$ mm) lang.

Prüfung 1 - T002_1

Dieser Prüfkörper versagte, wie in Abbildung 5.14 erkennbar, durch Aufspalten. Es versagten drei Schrauben auf Schraubenbruch, die restlichen wurden nach dem Aufspalten des Prüfkörpers ausgezogen. Das rechte Bild der Abbildung 5.14 zeigt die großen Faserabweichungen der einzelnen Lamellen sowie einen Ast mit Rindeneinschluss im Bereich des Bruches.



Abbildung 5.14: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T002_1 durch Aufspalten

Der Prüfkörper versagte bei einer Bruchlast von 428,88 kN, welche ungefähr 86 % der Nettoquerschnittstragfähigkeit entspricht. Das zweite Diagramm, das Kraft-Weg-Diagramm zeigt den, für die Ermittlung des Verschiebungsmoduls K_{ser} relevanten Bereich der Messdaten der Wegaufnahme. Hier hat einer der beiden Wegaufnahme etwas verzögert zu messen begonnen, der parallele Verlauf zeigt jedoch, dass die Messung ansonsten störungsfrei verlief. Aus der Steigung zwischen 10 % und 40 % der Bruchlast des Kraft-Zeit-Diagramms konnte der Verschiebungsmodul K_{ser} mit 242.082 N/mm berechnet werden.

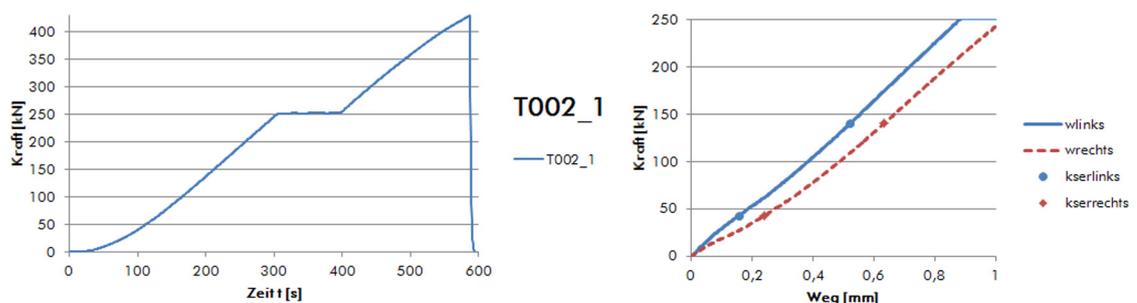


Abbildung 5.15: Kraft-Zeit- (links) und Kraft-Weg-Diagramm (rechts) der Prüfung des Prüfkörpers T002-1

Prüfung 2 - T001_1

Die Bruchursache dieses Prüfkörpers war ein Aufspalten des Holzes. In Abbildung 5.16 ist gut zu erkennen, dass ein Teil von hauptsächlich zwei Lamellen als Folge des Aufspaltens herausgezogen wurden. Es konnte allerdings kein relevanter Zusammenhang zur zuvor ermittelten Rohdichte oder zum dynamischen Elastizitätsmodul festgestellt werden, welcher dieses Versagen begünstigen würde. Im linken Bild der Abbildung 5.16 ist ebenfalls zu erkennen, dass sich die untere Lamelle im Bild vom Prüfkörper abgespalten hat. Es ist nur ein Schraubenbruch festgestellt worden, alle anderen Schrauben wurden, als Folge des zuvor eingetretenen Aufspaltens, aus dem Prüfkörper herausgezogen.



Abbildung 5.16: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T001_1 durch Aufspalten

Die Bruchlast lag bei dieser Prüfung bei 344,34 kN, welche ca. 69 % der berechneten Nettoquerschnittstragfähigkeit entspricht. Aus dem Kraft-Weg-Diagramm wurde der Verschiebungsmodul K_{ser} mit 232.445 N/mm berechnet.

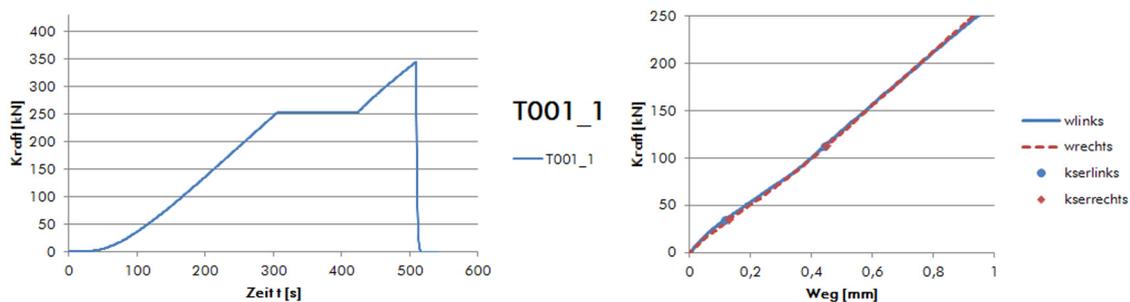


Abbildung 5.17: Kraft-Zeit- (links) und Kraft-Weg-Diagramm (rechts) der Prüfung des Prüfkörpers T001-1

Prüfung 3 - T003_1

Das Versagen dieses Prüfkörpers war, wie in Abbildung 5.18 erkennbar, eine Mischung aus Schraubenbruch und Aufspalten. Es haben vier Schrauben auf Stahlbruch versagt, die restlichen wurden aufgrund des zusätzlichen Aufspaltens ausgezogen.



Abbildung 5.18: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T003_1 durch Aufspalten und Schraubenbruch

Es konnte eine Bruchlast von 395,91 kN, welche 80 % der Nettoquerschnittstragfähigkeit entspricht, erreicht werden. Zusätzlich wurde über die Steigung im Kraft-Weg-Diagramm der Verschiebungsmodul K_{ser} mit 259.712 N/mm berechnet.

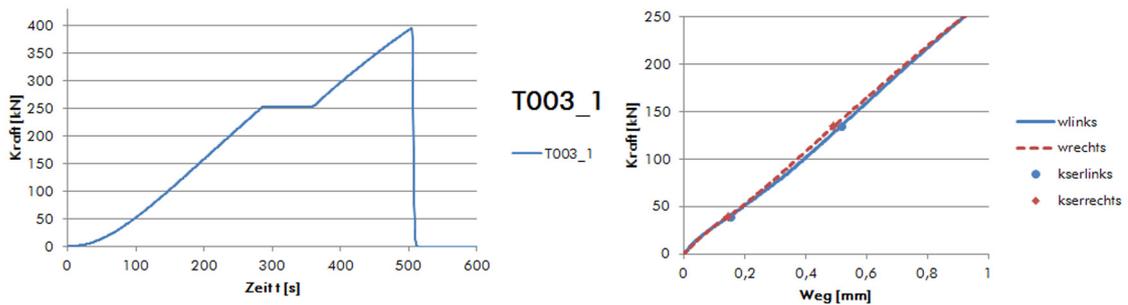


Abbildung 5.19: Kraft-Zeit- (links) und Kraft-Weg-Diagramm (rechts) der Prüfung des Prüfkörpers T003-1

Prüfung 4 - T004_1

Dieser Prüfkörper zeigte wieder ein eindeutiges Holzversagen durch Aufspalten. Das Aufspalten erfolgte allerdings nicht parallel zu den Lamellen, sondern quer zu diesen (Bruch durch alle Lamellen). Eine mögliche Ursache für dieses Versagen könnten die große Faserabweichung der einzelnen Lamellen und der Ast mit Rindeneinschluss, welche an den Bruchflächen (siehe rechtes Bild in Abbildung 5.20) des Prüfkörpers erkennbar waren. Bei dieser Prüfung ist keine einzige Schraube gerissen oder merklich ausgezogen worden.



Abbildung 5.20: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T004_1 durch Aufspalten

Im Kraft-Zeit-Diagramm der Abbildung 5.21 ist allerdings trotzdem eine leichte Abflachung der Steigung zu erkennen. Dies deutet auf eine leichte Nichtlinearität hin und es wäre möglich, dass bei einer höheren Bruchlast die Schrauben auf Stahlbruch versagt hätten bzw. bereits ein leichtes Ausziehen stattgefunden hat. Die Bruchlast betrug für diesen Prüfkörper 344,73 kN, welche ungefähr 69 % der Nettoquerschnittstragfähigkeit entspricht. Aus der Steigung des Kraft-Weg-Diagramms konnte der Verschiebungsmodul mit 265.508 N/mm berechnet werden.

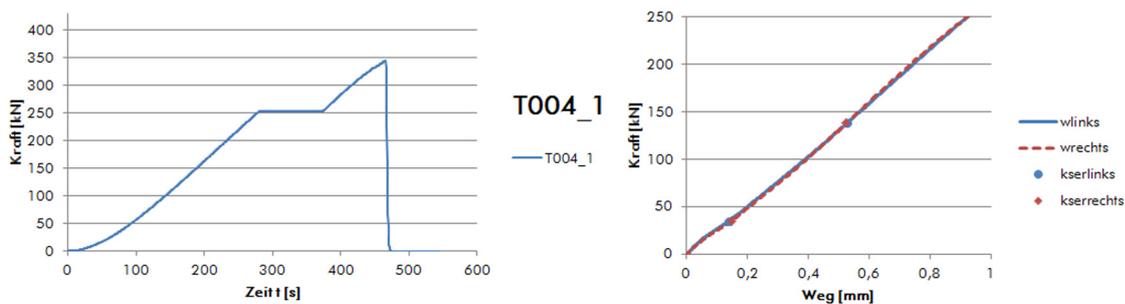


Abbildung 5.21: Kraft-Zeit- (links) und Kraft-Weg-Diagramm (rechts) der Prüfung des Prüfkörpers T004-1

Resümee der Prüfkonfiguration 1

Durch die erhaltenen Ergebnisse konnte festgestellt werden, dass die maximal übertragbare Last bei rund 430 kN liegt. Dies entspricht ca. 86 % der Nettoquerschnittstragfähigkeit.

5.3.2.3 Prüfkonfiguration 2

Das Ziel dieser Prüfkonfiguration war es, ein Versagen der Prüfkörper durch Herausziehen der Schrauben zu erreichen. Dafür wurden je Hirnholzseite neun Schrauben mit einer Einbindetiefe von 60 mm eingedreht, sodass nur noch eine Eindringtiefe von 120 mm vorhanden war. Es wurden Schrauben mit einer Länge von 240 mm verwendet.

Prüfung 5 - T001_2

Dieser Prüfkörper versagte, wie erwartet, durch ein Herausziehen der Schrauben, welches in Abbildung 5.22 erkennbar ist. Die Schrauben wurden nur ca. einen Zentimeter ausgezogen, da sie alle gleichzeitig versagten und so ein plötzlicher vollkommener Lastabfall auftrat.



Abbildung 5.22: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T001_2 durch Herausziehen der Schrauben

Das Versagen trat bei einer Bruchlast von 201,75 kN, welche ungefähr 73 % der zuvor geschätzten Ausziehtragfähigkeit mit $n_{ef} = n$ entspricht, auf. Der Verschiebungsmodul K_{ser} wurde mit der Steigung aus dem Kraft-Weg-Diagramm zu 199.178 N/mm berechnet.

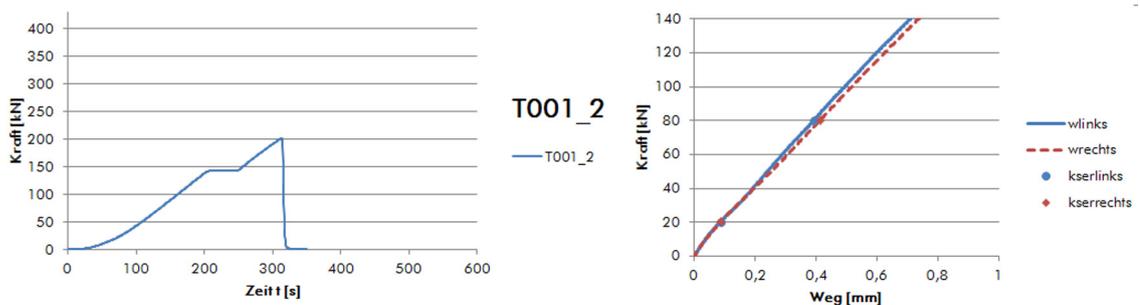


Abbildung 5.23: Kraft-Zeit- (links) und Kraft-Weg-Diagramm (rechts) der Prüfung des Prüfkörpers T001-2

Prüfung 6 - T004_2

Auch dieser Prüfkörper versagte, wie erwartet, durch ein Herausziehen der Schrauben. Er wies die gleichen sichtbaren Versagensmerkmale wie der Prüfkörper T001_2 auf. Dies ist auch erkennbar, wenn man die beiden Abbildungen 5.22 und 5.24 miteinander vergleicht.



Abbildung 5.24: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T004_2 durch Herausziehen der Schrauben

Der einzige Unterschied ist, dass dieser Prüfkörper erst bei einer höheren Last von 232,83 kN, welche ebenso 73 % der zuvor geschätzten Ausziehfestigkeit mit $n_{ef} = n$ entspricht, versagte. Dies kann auf die höhere Rohdichte dieses Prüfkörpers zurückzuführen sein. Der Verschiebungsmodul K_{ser} ist allerdings mit 173.208 N/mm geringer als der von Prüfkörper T001_2.

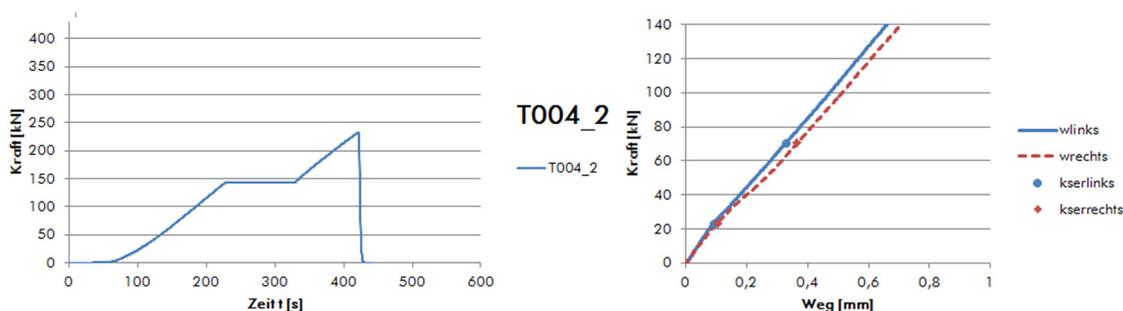


Abbildung 5.25: Kraft-Zeit- (links) und Kraft-Weg-Diagramm (rechts) der Prüfung des Prüfkörpers T004-2

Resümee der Prüfkonfiguration 2

Es konnte gezeigt werden, dass das durch die Vorbemessung definierte Versagen auf Herausziehen der Schrauben bei beiden Prüfkörpern erreicht werden konnte. Es wurde eine mittlere Ausziehtragfähigkeit von 217 kN sowie ein mittlerer Verschiebungsmodul von 191.331 N/mm erreicht. Zudem ist anzumerken, dass beide Prüfkörper bei 73 % der jeweiligen zuvor geschätzten Ausziehtragfähigkeit mit $n_{ef} = n$ versagten.

5.3.2.4 Prüfkongfiguration 3

Das Ziel dieser Prüfkongfiguration war es, ein Versagen der Prüfkörper auf Stahlbruch der Schrauben zu erreichen. Dafür wurden je Hirnholzseite neun Schrauben mit einer Einbindetiefe von 50 mm eingedreht, sodass noch eine Eindringtiefe von 170 mm vorhanden war. Es wurden Schrauben mit einer Länge von 280 mm verwendet.

Prüfung 7 - T003_3

Wie erwartet versagte dieser Prüfkörper auf Schraubenbruch. Es sind fünf Schrauben gebrochen, wobei zwei davon, wie im rechten Bild der Abbildung 5.26 erkennbar, im Bereich der Eindringtiefe, ca. 50 mm innerhalb, gerissen sind. Die restlichen vier Schrauben wurden ausgezogen.



Abbildung 5.26: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T003_3 auf Schraubenbruch und Ausziehen

Das Versagen trat bei einer Bruchlast von 304,05 kN ein, dies entspricht ungefähr 85 % der maximalen Schraubentragfähigkeit. Der Verschiebungsmodul konnte zu 206.265 N/mm ermittelt werden. Außerdem ist am kurzzeitigen Lastabfall, erkennbar im linken Bild der Abbildung 5.27, ersichtlich, dass nach dem Versagen der Schrauben noch einmal ein leichter Lastanstieg erfolgte, bis die restlichen Schrauben ausgezogen wurden.

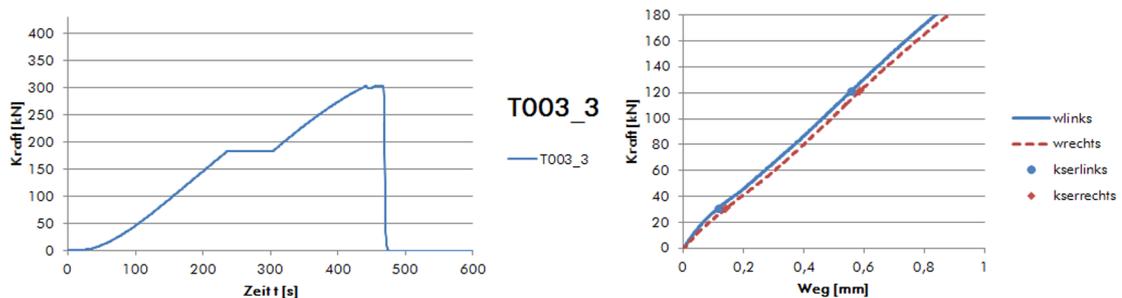


Abbildung 5.27: Kraft-Zeit- (links) und Kraft-Weg-Diagramm (rechts) der Prüfung des Prüfkörpers T003-3

Prüfung 8 - T002_2

Bei der Vorbereitung dieses Prüfkörpers wurde aus Versehen eine 240 mm ($l_{ef} = 130$ mm) lange Schraube anstatt einer 280 mm ($l_{ef} = 170$ mm) langen eingedreht. Dies führte zu einem frühzeitigen Versagen, bei dem zuerst die kürzere Schraube und anschließend auch die längeren auf Herausziehen versagten. Es konnte durch einen kurzzeitigen geringen Lastabfall, welcher im Kraft-Zeit-Diagramm, im linken Bild der Abbildung 5.30, erkennbar ist, die Versagenslast von 255 kN, bei der die kürzere Schraube ausgezogen wurde, festgestellt werden. Daraus wurde die Ausziehtragfähigkeit der 240 mm langen Schraube berechnet. Diese beträgt 91 % der zuvor mit 31,17 kN geschätzten Ausziehtragfähigkeit. Nach dem kurzzeitigen Lastabfall konnte die Last noch bis auf 263,52 kN, bei der das endgültige Versagen eintrat, gesteigert werden.



Abbildung 5.28: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T002_2 durch Herausziehen der Schrauben (Prüfung 8.1)

Es wurden anschließend alle Schrauben der Versagensseite herausgedreht und alle vorgebohrten Löcher um 70 mm mit einem Vorbohrdurchmesser von 7 mm verlängert, dabei wurden 2 der äußeren Löcher zu schräg gebohrt, sodass die Schrauben mit der Spitze nach außen drangen (siehe Abbildung 5.29, Mitte). Des Weiteren wurden die Löcher bis auf 220 mm ($l_{ef,280} = 170$ mm + $l_{emb} = 50$ mm) mit einem Durchmesser von 10 mm aufgebohrt, um auf dieser Länge einen Verbund zu verhindern. Zusätzlich sind vier Löcher mit einer Einbindetiefe von 50 mm und einer Eindringtiefe von 240 mm gebohrt worden, um anschließend die Prüfung nochmals mit dreizehn 350 mm langen Schrauben durchzuführen. Dabei wiesen 9 Schrauben eine Eindringtiefe von 70 mm und vier eine von 240 mm auf.

Allerdings wurden auch die Schrauben dieser Prüfung wieder ausgezogen und versagten nicht wie erwartet auf Schraubenbruch.



Abbildung 5.29: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T002_2 durch Herausziehen der Schrauben (Prüfung 8.2)

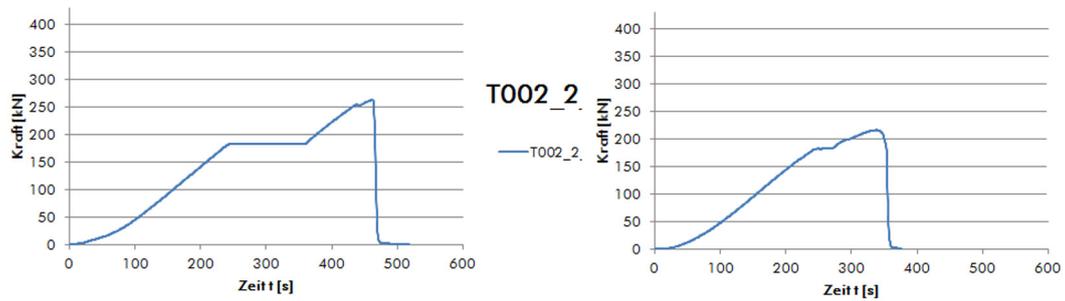


Abbildung 5.30: Kraft-Zeit-Diagramme der ersten (links) und der zweiten Prüfung (rechts) des Prüfkörpers T002-2

Die Bruchlast war bei der zweiten Prüfung dieses Prüfkörpers mit 215,88 kN geringer als die der ersten Prüfung. Ein Verschiebungsmodul konnte bei dieser Prüfung nicht ermittelt werden, da keine Wegaufnehmer montiert wurden.

5.3.2.5 Prüfkonfiguration 4

Bei dieser Prüfkonfiguration wurden je Hirnholzseite 13 Schrauben mit einer Längsabstufung von außen nach innen und einer Einbindetiefe von 50 mm eingedreht. Die inneren fünf der neun Schrauben hatten eine Schraubenlänge von 350 mm ($l_{ef} = 240$ mm) und die restlichen acht waren 280 mm ($l_{ef} = 170$ mm) lang. Diese Konfiguration wurde gewählt, um zu untersuchen, ob unterschiedliche Eindringtiefen eine positive Auswirkung auf die Lasteinleitung und somit auch auf das Bruchverhalten des Prüfkörpers haben.

Prüfung 9 - T003_2

Dieser Prüfkörper wies einen Mischbruch auf, bei dem ein Schraubenbruch, das Aufspalten des Prüfkörpers und infolgedessen das Ausziehen der restlichen Schrauben festgestellt wurde. Das rechte Bild der Abbildung 5.31 zeigt, dass der Querschnitt des Prüfkörpers in alle Richtungen aufgespalten ist, wodurch die Ausziehtragfähigkeit der Schrauben reduziert wurde. Zusätzlich wurde ein Schraubenbruch festgestellt.



Abbildung 5.31: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T003_2 durch Aufspalten

Dieser Prüfkörper versagte bei einer Bruchlast von 412,87 kN, welche 83 % der Nettoquerschnittstragfähigkeit entsprechen. Der Verschiebungsmodul beträgt für diesen Prüfkörper 289.797 N/mm.

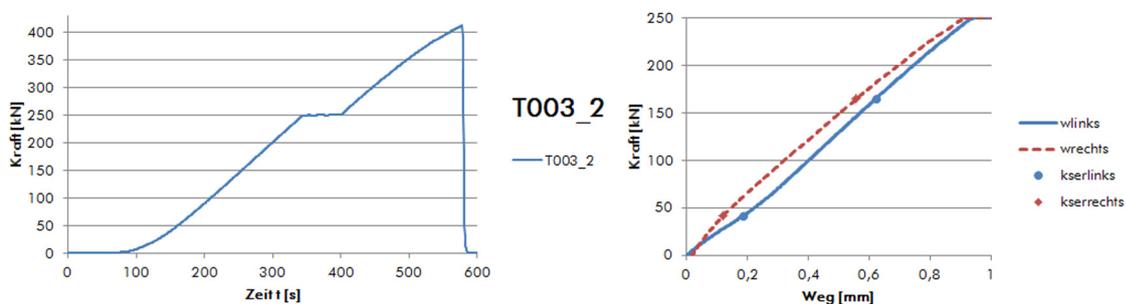


Abbildung 5.32: Kraft-Zeit- (links) und Kraft-Weg-Diagramm (rechts) der Prüfung des Prüfkörpers T003-2

5.3.2.6 Gesamtauswertung der Schraubengruppenprüfungen

Tabelle 5.9 gibt noch einmal eine Übersicht über alle durchgeführten Schraubengruppenprüfungen und zeigt auch eine Auswertung der Bruchlast, des Verschiebungsmoduls, der erreichten Kraft pro Schraube und der effektiven Verbindungsmittelanzahl.

	Prüf- körper	n_s ¹⁾ [-]	Versa- -gen [-]	n_{SB} ²⁾ [-]	ρ [kg/m ³]	F_{max} [kN]	K_{ser} [N/mm]	$\frac{F_{max}}{n}$ [kN]	$\frac{F_{max}/n}{F_s}$ ³⁾ [%]	$\frac{F_{max}}{F_{netto}}$ [%]	$\frac{F_{max}}{R_{ax}}$ [%]
Vorversuche	T005_1	9	SB ⁴⁾	6	644	337	-	37	94	65	-
	T005_2	13	ASP ⁵⁾	1	644	407	-	31	-	82	-
	T005_3	13	SB ⁴⁾	8	644	428	-	33	82	86	-
PK ⁸⁾ 1	T002_1	13	ASP ⁵⁾	3	615	429	242.082	33	-	86	-
	T001_1	13	ASP ⁵⁾	1	611	344	232.445	26	-	69	-
	T003_1	13	A/S ⁶⁾	4	645	396	259.712	30	76	80	-
	T004_1	13	ASP ⁵⁾	0	665	345	265.508	27	-	69	-
PK ⁸⁾ 2	T001_2	9	AZ ⁷⁾	0	611	202	199.178	22	56	39	73
	T004_2	9	AZ ⁷⁾	0	665	233	173.208	26	65	45	73
PK ⁸⁾ 3	T003_3	9	SB ⁴⁾	5	645	304	206.265	34	85	59	-
	T002_2 ^{a)}	9	AZ ⁷⁾	0	644	264	207.754	29	73	51	-
	T002_2 ^{b)}	9	AZ ⁷⁾	0	644	216	-	24	60	42	-
PK ⁸⁾ 4	T003_2	13	ASP ⁵⁾	1	645	413	289.797	32	-	83	-

1)... Anzahl der verwendeten Schrauben

2)... Anzahl der gerissenen Schrauben

3)... Schraubenzugfestigkeit

4)... Schraubenbruch

5)... Aufspalten

6)... Mischbruch aus Aufspalten und Schraubenbruch

7)... Ausziehen

8)... Prüfkonfiguration

a)... erste Prüfung des Prüfkörpers T002_2

b)... zweite Prüfung des Prüfkörpers T002_2

Tabelle 5.9: Gesamtauswertung der Prüfungen der faserparallelen Hirnholzverschraubungen

Wie aus Tabelle 5.9 ersichtlich schwankt die effektiv wirksame Verbindungsmittelanzahl zwischen $0,69 \cdot n$ und $0,85 \cdot n$. Diese ist durch das Versagen der Schrauben bzw. des Ausziehens definiert. Es konnte eine maximale Ausnutzung von 78 %, bezogen auf den Bruttoquerschnitt, und von 86 %, bezogen auf den Nettoquerschnitt, festgestellt werden.

	Mittelwert	Min	Max	Median	Stabw.	CoV
F_{\max} [kN]	332	202	429	344	82,1	24,7 %
F_{\max} / n [kN]	29,9	22,4	37,4	30,5	4,33	14,6 %

Tabelle 5.10: Auswertung der Bruchlasten der gesamten Verbindung und der erreichten Bruchlasten bezogen auf eine Schraube über alle Prüfkonfigurationen inklusive Vorversuche

Tabelle 5.10 zeigt die Auswertung aller Prüfkonfigurationen, inklusive der Vorversuche, der erreichten Bruchlasten der gesamten Verbindung und der erreichten Bruchlasten bezogen auf eine Schraube. In Tabelle 5.11 ist die Auswertung des Verschiebungsmoduls K_{ser} getrennt für dreizehn und neun Schrauben angegeben. Dies zeigt, dass der Verschiebungsmodul bei dreizehn Schrauben im Mittel um 34 % höher ist, als bei neun Schrauben.

K_{ser} [N/mm]	Mittelwert	Min	Max	Median	Stabw.	CoV
13 Schrauben	257.909	232.445	289.797	259.712	22.230	8,62 %
9 Schrauben	196.601	173.208	207.754	202.721	16.038	8,16 %

Tabelle 5.11: Auswertung des Verschiebungsmoduls K_{ser} für 13 bzw. 9 Schrauben

5.3.2.7 Resümee

Es wurde festgestellt, dass die effektive Verbindungsmittelanzahl n_{ef} bezogen auf die Schraubenzugfestigkeit, bei diesen Prüfungen nicht, wie etwa in [61] empfohlen, der Verbindungsmittelanzahl n entspricht. Es wurde eine maximale effektiv wirksame Verbindungsmittelanzahl n_{ef} von $0,85 \cdot n$ erreicht. Es lagen somit alle Bruchlasten deutlich unter den berechneten Versagenslasten.

Im Bezug auf die berechneten Werte des Verschiebungsmoduls K_{ser} ist anzumerken, dass Ausziehprüfungen mit Einzelschrauben durchgeführt werden müssten, um Referenzwerte zu erhalten mit denen es möglich wäre die erhaltenen Werte der durchgeführten Prüfungen zu beurteilen. Durch diese Referenzprüfungen wäre es auch möglich, festzustellen, ob die Gleichungen (2.2) bis (2.4) gemäß [51] zur Berechnung der Ausziehtragfähigkeit für Birkenholz anwendbar sind.

Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass großteils Mischbrüche auftraten, da bei keinem Prüfkörper alle Schrauben gerissen sind bzw. bei Holzversagen auch immer ein Teil der Schrauben versagte. Dies könnte unter anderem darauf zurückzuführen sein, dass keine gleichmäßige Lastaufteilung auf die einzelnen Schrauben stattfand. Dies könnte zum einen durch die unterschiedlichen Rohdichten der einzelnen Lamellen des Brettschichtholzes, welche sich auf die Auszieh Widerstände auswirken und zum anderen auf möglicherweise entstehende Momente aus der Prüfeinrichtung (Momente aus Eigengewicht oder aus Exzentrizitäten der verwendeten Stahlteile) zu erklären sein.

5.4 Prüfungen von in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen

Es wurden drei Prüfungen von Prüfkörpern mit in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen durchgeführt. Zwei davon wurden ohne Wegaufnehmer geprüft, um für den dritten das Kraftlimit für die Abnahme der Wegaufnehmer bestimmen zu können. Im Anschluss an die Prüfungen wurde auf der Seite des Versagens der Prüfkörper aufgeschnitten, um die Klebefugendicke, mögliche Luft einschlüsse und die Klebstoffverteilung zu analysieren.

5.4.1 Prüfungen

Prüfung 1 - T002_3

Das Versagen dieses Prüfkörpers erfolgte in der Klebefuge, aufgrund einer unzureichenden Haftung des Klebstoff am Stahlblech. Nur auf einer der acht vorliegenden Klebeflächen war der Verbund ausreichend, um die Scherfestigkeit des Holzes zu überschreiten (siehe rechtes Bild der Abbildung 5.33). Es wurden im Anschluss an den eingeschnittenen Schlitz, bei dem der Klebstoff-Stahl-Verbund nicht versagte, ein Riss, welcher auf ein Aufspalten des Prüfkörpers hindeutet, festgestellt. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass der Klebstoff nicht an allen Klebeflächen gleichmäßig bis zum oberen Rand des Querschnitts gepresst wurde. Das Versagen trat in dem Anschluss auf, der einen Tag länger Zeit hatte, um auszuhärten. Es wurden, wie bereits in Kapitel 4.3.3.2 erwähnt, die beiden eingeklebten Stahlbleche der Prüfkörper jeweils um einen Tag versetzt eingeklebt, damit der Klebstoff des ersten Anschlusses antrocknen konnte bevor das zweite Stahlblech eingeklebt wurde.



Abbildung 5.33: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T002_3 durch Versagen der Klebstofffuge

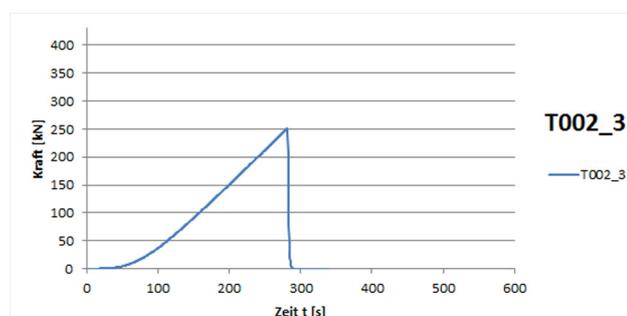


Abbildung 5.34: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfung des Prüfkörpers T002-3

Das Versagen dieses Prüfkörpers war sehr spröde, deshalb ist auch im Kraft-Zeit-Diagramm der Abbildung 5.34 keine Nichtlinearität zu erkennen. Es wurde eine Bruchlast von 250,98 kN, welche 52 % der geschätzten Nettoquerschnittstragfähigkeit entspricht, erreicht.

Am aufgeschnittenen Prüfkörper konnte an den einzelnen Klebeflächen eine Klebefugendicke mit einer Bandbreite von 1,0 mm bis 2,0 mm festgestellt werden. Das Mittel der gemessenen Klebefugendicken lag bei 1,3 mm. Außerdem konnten an den vorhandenen Klebeflächen keine Lufteinschlüsse festgestellt werden. Zudem fiel auf, dass der Klebstoff bei der Verklebung an den einzelnen Klebeflächen unterschiedlich weit zum oberen Rand gepresst wurde. Der Abstand vom oberen Rand des Profils bis zum Beginn des Klebstoffes betrug zwischen 0 mm und 55 mm. Die Abbildung 5.35 zeigt die einzelnen Klebeflächen sowie die unterschiedliche Klebstoffverteilung.

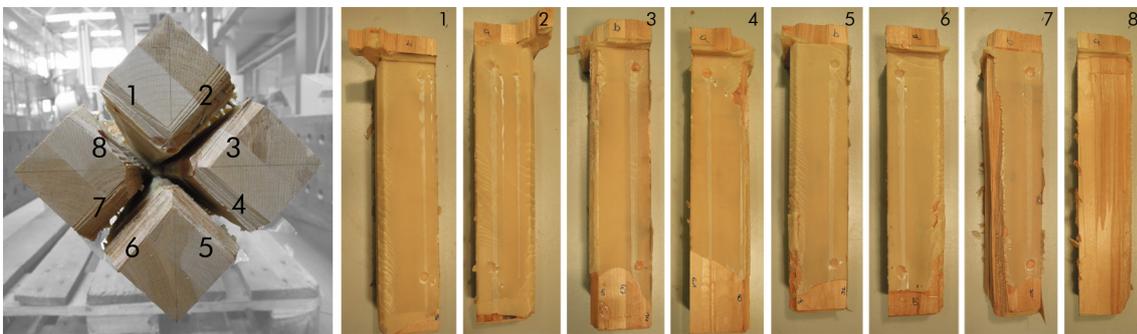


Abbildung 5.35: Bilder aller Klebeflächen des Prüfkörpers T002_3 (Bild 8 zeigt die Fläche, bei der die Schubfestigkeit des Holzes überschritten wurde)

Prüfung 2 - T001_3

Auch dieser Prüfkörper versagte aufgrund des unzureichenden Verbundes zwischen dem Klebstoff und dem Stahlblech, wobei hier auf fünf der acht Klebeflächen der Verbund zwischen Klebstoff und Stahl ausreichend war, um die Scherfestigkeit des Holzes zu überschreiten. Es konnten in der Verlängerung der eingeschnittenen Schlitze, bei denen der Klebstoff-Stahl-Verbund nicht versagte, erste Risse eines Aufspaltens erkannt werden. Bei diesem Prüfkörper trat das Versagen in der Klebefuge auf, welche einen Tag weniger Zeit zum Aushärten hatte. Außerdem konnte auch bei diesem Prüfkörper festgestellt werden, dass nicht an allen Klebeflächen der Klebstoff bis an den oberen Rand des Querschnitts gepresst wurde.



Abbildung 5.36: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T001_3 durch Versagen der Klebstofffuge

Die Bruchlast wurde bei 290,43 kN, welche 61 % der Nettoquerschnittstragfähigkeit entspricht, erreicht. Auch bei diesem Prüfkörper konnte im Kraft-Zeit-Diagramm (siehe Abbildung 5.37)

keine Nichtlinearität festgestellt werden. Somit bestätigt dieses Diagramm das spröde Versagen dieser Verbindung, welches auch visuell bei der Prüfung selbst beobachtet wurde.

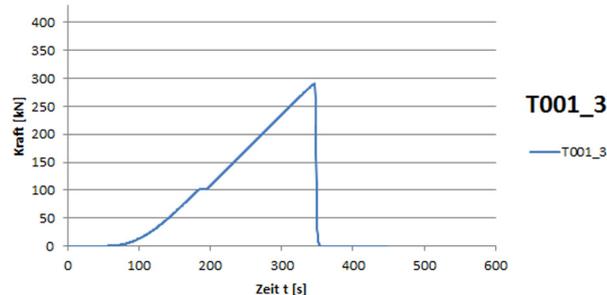


Abbildung 5.37: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfung des Prüfkörpers T001-3

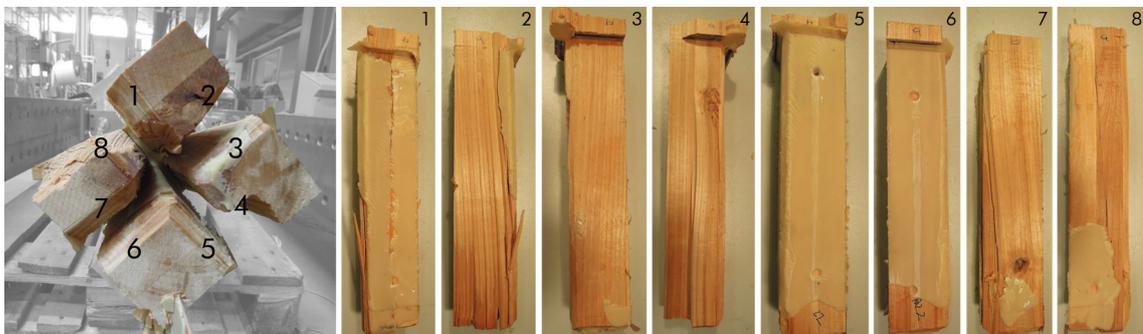


Abbildung 5.38: Bilder aller Klebeflächen des Prüfkörpers T001_3 (die Bilder 2, 3, 4, 7 und 8 zeigen die Flächen, bei der die Schubfestigkeit des Holzes überschritten wurde)

Bei diesem Prüfkörper betrug die Klebefugendicke im Mittel 1,5 mm und schwankte von 1 mm bis 2 mm. Die Verklebung dieses Prüfkörpers wies keine Lufteinschlüsse auf. Es wurde zusätzlich festgestellt, dass der Klebstoff nicht an allen Flächen gleichmäßig bis zum oberen Rand gepresst wurde. Der Abstand vom oberen Ende des Prüfkörpers bis zum Beginn des Klebstoffs betrug zwischen 0 mm und 27 mm. Diese Werte wiesen eine kleinere Bandbreite, als jene des Prüfkörpers der vorhergehenden Prüfung auf, wobei diese Werte im Rahmen liegen, da der Verbund auf den oberen 25 mm ohnehin durch ein Abkleben des Stahlblechs verhindert wurde. In Abbildung 5.38 sind die Klebeflächen dieses Prüfkörpers dargestellt, wobei hier im Vergleich zu Abbildung 5.35 gut zu erkennen ist, dass die Klebstoffverteilung bei Prüfkörper T001_3 gleichmäßiger ist.

Prüfung 3 - T004_3

Bei dieser Prüfung wurden am Prüfkörper einseitig vier Wegaufnehmer angebracht. Zwei davon wurden in Längsrichtung angeordnet, um den Verschiebungsmodul K_{ser} bestimmen zu können und zwei wurden in Querrichtung angebracht, um die Öffnung der Klebefuge zu messen (siehe Abbildung 5.39, links). Das Versagen erfolgte auch hier wieder in der Klebefuge. Es blieben hier nur auf einer Klebefläche Rückstände des Holzes haften und es versagte die Anschlussseite, welche einen Tag länger Zeit zum Aushärten hatte. Zusätzlich wurde festgestellt, dass der Klebstoff

beim Verkleben nicht in allen Fugen bis zum oberen Rand gepresst wurde (siehe rechtes Bild der Abbildung 5.39).



Abbildung 5.39: Bilder des Versagens des Prüfkörpers T004_3 durch Versagen der Klebstofffuge

Das Versagen trat bei einer Bruchlast von 212,46 kN, welche 44 % der Nettoquerschnittstragfähigkeit beträgt, ein. Es konnte auch hier, wie im Kraft-Zeit-Diagramm in Abbildung 5.40 erkennbar, keine Nichtlinearität festgestellt werden. Dies bestätigt das beobachtete spröde Versagen dieser Verbindung. Von den anderen beiden Wegaufnehmern wurden die Absolutwerte der maximalen Öffnungen der Klebefuge gemessen. Es ist durch diese Messungen ein Trend erkennbar (siehe Kraft-Weg-Diagramm in Abbildung 5.40), welcher zeigt, dass sich mit steigender Kraft die Fugen immer weiter öffnen. Hier werden keine Werte der Öffnungen angegeben, da die Absolutwerte von Messungenauigkeiten beeinflusst wurden und bei so geringen Verschiebungen ein genaueres Messsystem notwendig wäre, um repräsentative Werte angeben zu können. Der dargestellte Trend zeigt jedoch, dass sich bei derartigen Verbindungen Spannungen quer zur Faser ausbilden, welche folglich zum Aufspalten des Prüfkörpers, zu erhöhten Scherbeanspruchungen im Holz und zu einer Schwächung des Verbundes zwischen Klebstoff und Stahl führen können. Das Kraft-Weg-Diagramm in Abbildung 5.40 zeigt die Verformungen der Klebefugen sowie die Längsverformung, welche zur Ermittlung des Verschiebungsmodul, welcher 1.291.693 N/mm beträgt, diene.

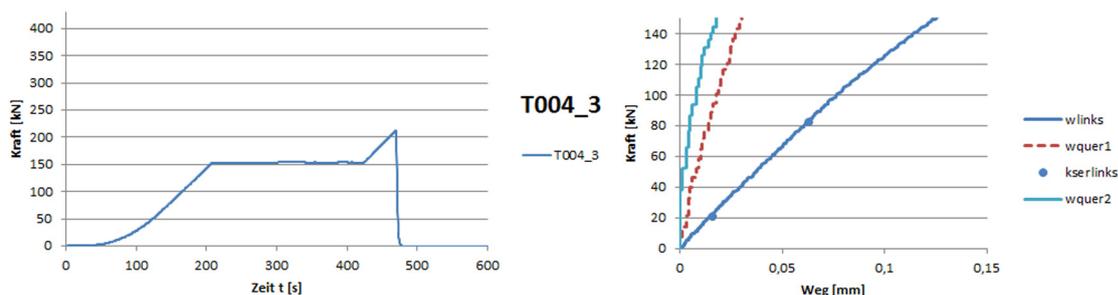


Abbildung 5.40: Kraft-Zeit- (links) und Kraft-Weg-Diagramm (rechts) der Prüfung des Prüfkörpers T004-3

Die Klebefugendicke dieses Prüfkörpers schwankte zwischen 0,8 mm und 2,0 mm und lag im Mittel bei 1,3 mm. Dabei ist anzumerken, dass nur eine Klebefugendicke mit 0,8 mm unter 1,0 mm (festgelegte Mindestfugendicke) lag. Es konnten keine Luftpneinschlüsse in der Verklebung dieses Prüfkörpers festgestellt werden. Auch bei der Herstellung diese Prüfkörpers wurde der Klebstoff nicht gleichmäßig an allen Klebeflächen bis zum oberen Rand gepresst. Es besteht hier ein Abstand zwischen 0 mm und 54 mm vom oberen Rand des Prüfkörpers bis zum Beginn des Klebstoffs.

5.4.2 Auswertung der Prüfungen

Tabelle 5.12 zeigt eine zusammenfassende Übersicht über die durchgeführten Zugprüfungen der eingeklebten Stahlbleche sowie eine Auswertung der Bruchlast und der erreichten Schubfestigkeit der Klebefuge.

PK	Versagen [-]	KF ¹⁾ [-]	ρ [kg/m ³]	F_{\max} [kN]	k_{ser} [N/mm]	$\frac{F_{\max}}{F_{\text{netto}}}$ [%]	$\frac{F_{\max}}{F_{\text{SB}}}$ [%]	$\frac{F_{\max}}{F_{\text{KF}}}$ [%]	$\tau_{v,\max}$ ³⁾ [N/mm ²]
T002_3	KF ²⁾	1	615	251	-	52	51	48	3,37
T001_3	KF ²⁾	2	611	290	-	61	58	56	3,90
T004_3	KF ²⁾	1	665	212	1.291.693	44	43	41	2,86
Mittelwert				251					3,38
Minimum				212					2,86
Maximum				290					3,90
Median				251					3,37
Standardabw.				39,0					0,52
CoV				15,5 %					15,5 %

¹⁾... Klebefuge, die versagte (1 = am ersten Tag hergestellte Klebefuge; 2 = am zweiten Tag hergestellte Klebefuge)

²⁾... Versagen der Klebefuge

³⁾... maximal erreichte Schubspannung der Klebefuge

Tabelle 5.12: Gesamtauswertung der Prüfungen der in Hirnholz eingeklebten Stahlbleche

In Tabelle 5.13 sind die dokumentierten Werte der einzelnen Klebefugendicken und des fehlenden Klebstoffs für jede Klebefuge und jeden Prüfkörper einzeln dargestellt. Zusätzlich sind die tatsächlich vorhandenen Klebefugenflächen mit den zuvor berechneten gegenübergestellt. Daraus ist ersichtlich, dass maximal 3 % der Klebefugenfläche fehlen.

	Viertel Seite Einheit	1		2		3		4		$A_{KF,tats}^{1)}$ [cm ²]	$\frac{A_{KF,tats}}{A_{KF,ber}^{2)}$ [-]
		a	b	a	b	a	b	a	b		
		[mm]									
T002_3	$t_{Klebefuge}$	1	1	2	1,7	1,5	1,3	1	1	722	0,97
	$\Delta_{Klebstoff}^{3)}$	30	16	0	0	0	0	-	0		
T001_3	$t_{Klebefuge}$	1,6	1,5	1,4	1	1,3	1,6	1,2	2	742	0,99
	$\Delta_{Klebstoff}^{3)}$	-	-	-	0	2	2	-	-		
T004_3	$t_{Klebefuge}$	1,2	1,7	1	1,2	0,8	1	2	1,6	720	0,97
	$\Delta_{Klebstoff}^{3)}$	29	19	-	0	2	0		0		

1)... tatsächlich vorhandene Klebefugenfläche

2)... berechnete Klebefugenfläche (744 cm²)

3)... Länge über die der Klebstoff fehlt (bereits abzüglich der 25 mm, welche ohne Verbund ausgeführt wurden)

Tabelle 5.13: Gesamtauswertung der Klebefugendicken bzw. des fehlenden Klebstoffs

5.4.3 Resümee

Aus diesen Untersuchungen kann der Schluss gezogen werden, dass bei allen Prüfungen eine unzureichende Haftung des Klebstoffes am Stahl vorlag. Dies könnte möglicherweise durch eine rauere Oberfläche (durch Sandstrahlen mit einem anderen Strahlmittel, einer anderen Korngröße, ...) bzw. durch eine andere Art der Oberflächenbehandlung (z.B. Ätzen, Schleifen, ...) des Stahls oder durch einen höheren bzw. gleichmäßiger verteilten Pressdruck verbessert werden. Außerdem wurde bei allen Prüfkörpern festgestellt, dass sich der Klebstoff nicht gleichmäßig auf alle Fugen verteilt hat. Um dieses Problem zu beheben könnte entweder mehr Klebstoff verwendet werden oder der Klebstoff von unten eingepresst werden. Des Weiteren wäre es möglich einen anderen Klebstoff, wie zum Beispiel einen Epoxid-Harz-Klebstoff zu verwenden.

Es konnten entstehende Risse in der Verlängerung der Fugen festgestellt werden, welche auf Spannungen quer zur Prüfkörperlängsachse und daraus folgend auf ein Aufspalten des Prüfkörpers hindeuten. Dies wird auch durch den erkennbaren Trend zur Öffnung der Fugen, welcher bei der dritten Prüfung gemessen wurde, belegt.

Positiv ist anzumerken, dass keine Lufteinschlüsse im Klebstoff festgestellt werden konnten und somit diese Art der Herstellung der Prüfkörper diesbezüglich kein Problem darstellt.

Ein besonders auffallender Unterschied zu den Hirnholzverschraubungen ist, dass der Verschiebungsmodul K_{ser} mit 1.292 kN/mm um mehr als das 5-fache höher ist als der höchste der Hirnholzverschraubungen (290 kN/mm).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden hier die wichtigsten Ergebnisse noch einmal kurz zusammengefasst, Empfehlungen für weitere Prüfungen dieser Art sowie ein kleiner Ausblick gegeben.

6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Die zu Beginn durchgeführte Sortierung der 322 Bretter wurde nach visuellen Sortierkriterien gemäß ÖNORM DIN 4074-5 [15] in die drei Klassen A, B und C eingeteilt. Zusätzlich wurden die Bretter der Klasse A nach dem dynamischen Elastizitätsmodul sortiert, wobei 46 Bretter mit einem höheren Elastizitätsmodul als 16.000 N/mm^2 der Klasse A+ zugeordnet werden konnten. Dies waren die Bretter, welche für die Zugprüfungen der Brett lamellen sowie zur Herstellung von Brettschichtholzträgern dienten. Bei der Auswertung der aufgenommenen Daten konnte ein hoher Zusammenhang zwischen den beiden ermittelten Elastizitätsmoduln aus der Ultraschallmessung bzw. aus der Eigenfrequenz festgestellt werden. Des Weiteren war auch eine Korrelation zwischen der Rohdichte und den dynamischen Elastizitätsmoduln vorhanden.

Im Anschluss an die Sortierung wurden 21 der Bretter der Klasse A+ auf Zug geprüft, um eine mittlere Zugfestigkeit (55 N/mm^2) für diese Brettware zu erhalten. Deren Verteilung konnte am besten durch eine Normalverteilung angenähert werden. Bei der Auswertung der Daten konnte kein Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und der Rohdichte bzw. dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul festgestellt werden. Allerdings lag ein hoher Zusammenhang zwischen dem lokalen Zug-Elastizitätsmodul und den beiden dynamischen Elastizitätsmoduln vor.

Aus den anderen 25 Brettern der Klasse A+ wurden 15 Brettschichtholz-Prüfkörper hergestellt. Zwölf davon wurden für Zugprüfungen faserparalleler Hirnholzverschraubungen verwendet. Es wurden drei Vorversuche sowie vier verschiedene Prüfkfigurationen geprüft. Die wichtigste Erkenntnis dieser Prüfungen war es, dass alle Prüfkörper eine Versagenslast aufwiesen, welche unter der zuvor berechneten lag. Dies deutet darauf hin, dass die effektive Verbindungsmittellanzahl n_{ef} hier nicht mit der tatsächlichen Verbindungsmittellanzahl gleichgesetzt werden kann.

Zum Abschluss wurden drei Prüfungen mit in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen durchgeführt. Bei diesen Prüfungen zeigte sich, dass der Verbund zwischen Stahl und Klebstoff unzureichend war und somit die Prüfkörper durchschnittlich bei ca. 50 % der berechneten Nettoquerschnittstragfähigkeit versagten. Außerdem wurde eine ungleichmäßige Klebstoffverteilung festgestellt. Positiv ist anzumerken, dass bei keinem der Prüfkörper Lufteinschlüsse festgestellt werden konnten.

6.2 Empfehlungen für weitere Prüfungen

Im Folgenden werden einige Empfehlungen für weitere Prüfungen faserparalleler Hirnholzverschraubungen bzw. Prüfungen von in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen gegeben. Diese Empfehlungen ergeben sich aus den erhaltenen Ergebnissen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen.

6.2.1 Zugprüfungen faserparalleler Hirnholzverschraubungen

Für weitere Prüfungen von faserparallelen Hirnholzverschraubungen ist es besonders zu empfehlen, Ausziehprüfungen mit Einzelschrauben durchzuführen, bevor weitere Prüfungen mit Schraubengruppen durchgeführt werden, um Referenzwerte für den Ausziehwiderstand zu erhalten, welche für die exakte Ermittlung, der für diesen Versagensmodus effektiv wirksamen Verbindungsmittellanzahl, notwendig ist. Außerdem sollten zusätzliche Varianten, anstatt von 13 Schrauben mit einem Durchmesser von 10 mm auch 9 Schrauben mit einem Durchmesser von 12 mm geprüft werden, um festzustellen, ob sich die daraus resultierenden größeren Abstände positiv auf die effektive Verbindungsmittellanzahl auswirken. Zusätzlich wäre es interessant, Prüfungen mit unterschiedlichen Schrauben- bzw. Randabständen durchzuführen, um geeignete und wirtschaftliche Mindestabstände definieren zu können. Des Weiteren könnten Langzeituntersuchungen durchgeführt werden, um das Verhalten dieser Verbindungen über einen längeren Zeitraum zu definieren.

6.2.2 Zugprüfungen von in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen

Um die zuvor festgestellten Probleme beheben zu können, werden für weitere Prüfungen von in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen folgenden Empfehlungen gegeben:

- Um eine gleichmäßigere Klebstoffverteilung zu erreichen, sollte mehr Klebstoff für die Verklebung verwendet werden.
- Der Klebstoff sollte durch eine geeignete Technologie am besten von unten in die einzelnen Klebefugen eingepresst werden, wie dies bereits für das Einkleben von Gewindestangen üblich ist.
- Außerdem sollte die Verwendung eines anderen Klebstoffes, möglicherweise ein Epoxid-Harz-Klebstoff, in Erwägung gezogen werden.
- Es sollte eine „Optimierung“ der Oberflächenbehandlung des Stahlbleches zum Erreichen eines besseren Verbundes zwischen Klebstoff und Stahl stattfinden. Dafür wäre es möglich eine andere Methode zu wählen (möglicherweise ein Ätzen der Oberfläche) oder eine rauere Oberfläche durch Sandstrahlen mit einem anderen Material zu erreichen.
- Eine weitere Empfehlung ist es, einen gleichmäßigen und flächigen Pressdruck auf den Prüfkörper aufzubringen um einen besseren Verbund zu erreichen.
- Um dem Aufspaltmechanismus entgegenzuwirken kann eine längere verbundfreie Länge festgelegt werden.

6.3 Ausblick

Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen im Weiteren der Entwicklung neuer, leistungsfähiger Anschlüsse, die eine hohe Kraft über kleinere Querschnitte von aufgelösten Laubholzkonstruktionen übertragen können, dienen.

Abbildung 6.1 zeigt abschließend eine Idee eines möglichen Anschlusses, welcher mit in Hirnholz eingeklebten Stahlblechen dargestellt ist. Da die Verbindungen im Holzbau sehr steif sind, wird hier auf das Prinzip der „duktilen Kette“ zurückgegriffen, um die beiden spröden Verbindungen zwischen Holz und Stahlblech über eine Stahl-Stahl-Verbindung miteinander zu verbinden. Diese Stahl-Stahl-Verbindung, welche als Bolzenverbindung dargestellt ist, stellt das duktile Glied dieser Kette dar. Es sollte so dimensioniert werden, dass es die geringste Tragfähigkeit und gleichzeitig das größte Verformungsvermögen der gesamten Kette aufweist. Somit findet die plastische Verformung der Kette einzig über dieses eine duktile Glied statt.

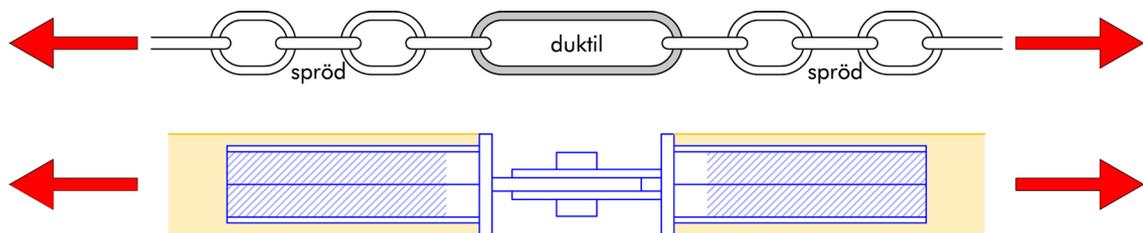


Abbildung 6.1: Prinzip der duktilen Kette (oben) sowie eine Idee einer mögliche Umlegung der duktilen Kette auf einen Anschluss (unten)

7 Literaturverzeichnis

7.1 Normen

- [1] ÖNORM EN 338: 2009, „Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen“
- [2] ÖNORM EN 384: 2010, „Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte“
- [3] ÖNORM EN 386: 2002, „Brettschichtholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung“
- [4] ÖNORM EN 392: 1995, „Brettschichtholz Scherprüfungen der Leimfugen“
- [5] ÖNORM EN 408: 2012, „Holzbauwerke - Bauwerke für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften“
- [6] ÖNORM EN 923: 2008, „Klebstoffe - Benennungen und Definitionen“
- [7] ÖNORM EN 1382: 1999, „Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmiteln“
- [8] ÖNORM EN 1194: 1999, „Holzbauwerke - Brettschichtholz - Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte“
- [9] ÖNORM EN 1995-1-1: 2009, „Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau“
- [10] ÖNORM B 1995-1-1: 2010, „Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Nationale Festlegungen, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen zur ÖNORM EN 1995-1-1“
- [11] ÖNORM EN 13183-1: 2004, „Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren“
- [12] ÖNORM EN 13183-2: 2002, „Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren“

- [13] ÖNORM EN 14080: 2013, „Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen“
- [14] ÖNORM EN 14592: 2009, „Holzbauwerke - Stiff förmige Verbindungsmittel - Anforderungen“
- [15] ÖNORM DIN 4074-5: 2009, „Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laubschichtholz“
- [16] DIN 1052: 2004, „Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau“
- [17] NS-INSTA 142: 2009, „Nordiske regler for visuelt styrkesortering av trelast - Nordic visual strength grading rules for timber“

7.2 Datenblätter und Zulassungen

- [18] Z-9.1-679, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, „BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger“, Studiengemeinschaft Holzleimbau e. V., Jahr 2013, gültig bis 30.10.2014
- [19] Z-9.1-704, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, „VIGAM Brettschichtholz aus Eiche“, Elaborados y Fabricados Gamiz S.A., Jahr 2012, gültig bis 04.05.2017
- [20] Z-9.1-837, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, „Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz“, Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Jahr 2013, gültig bis 02.12.2018
- [21] Z-9.1-838, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, „Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke - Buchen-FSH längslagig - Buchen-FSH querlagig“, Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Jahr 2013, gültig bis 21.09.2014
- [22] Produktdatenblatt, „Ingenious hardwood - BauBuche“, Pollmeier Massivholz GmbH, 2014
- [23] Technisches Merkblatt, „Prefere 4535 - Flüssiger Melamin-Harnstoffharzklebstoff für den Holzleimbau zum getrennten Aufgießen von Harz und Härter“, Dynea AS, 2007
- [24] Sicherheitsdatenblatt, „Prefere 4546“, Dynea AS, Norwegen, 30. November 2009
- [25] Technisches Merkblatt, „Prefere 4546 - Flüssiger Melaminharzkleber für den Holzleimbau“, Dynea AS, Norwegen, März 2012
- [26] Technisches Merkblatt, „Prefere 4546 - Flüssiger Melaminharzkleber für den Holzleimbau“, Dynea AS, Dezember 2009

- [27] Sicherheitsdatenblatt, „Prefere 5022“, Dynea AS, Norwegen, 12. März 2012
- [28] Z-9.1-798, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, „MUF-Klebstoff Prefere 4546 mit Härter Prefere 5020 zur Verklebung von tragenden Keilzinkenverbindungen mit getrenntem Auftrag von Harz und Härter“, Dynea AS, Jahr 2011, gültig bis 19.05.2016
- [29] Produktdatenblatt, „Purbond CR421 - 2K-Polyurethan-System zum Einkleben von Gewindestangen und Betonrippenstählen in tragenden Holzbauteilen“, Purbond AG, Jänner 2013
- [30] Z-9.1-650, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, „Melamin-Harnhar-Klebstoff Kauraminleim 683 mit dem Härter Kauramin 688 flüssig für die Herstellung von Keilzinkenverbindungen mit getrenntem Auftrag von Harz und Härter“, BASF Aktiengesellschaft, Jahr 2011, gültig bis 15.03.2016
- [31] Z-9.1-707, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, „2K-PUR-Klebstoff PURBOND CR421 zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe“, Purbond AG, Jahr 2010, gültig bis 31.05.2015
- [32] ETA-12/0373, Europäische Technische Zulassung, „Schmid Schrauben RAPID, STARDRIVE und SP“, Selbstbohrende Schrauben zur Verwendung im Holzbau, Schmid Schrauben Hainfeld GmbH, Jahr 2012, gültig bis 04.11.2017
- [33] ETA-11/0190, Europäische Technische Zulassung, „Würth Schrauben“, Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmittel, Adolf Würth GmbH & Co. KG, Jahr 2013, gültig bis 27.06.2018
- [34] Z-9.1-519, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, „SPAX-S Schrauben mit Vollgewinde als Holzverbindungsmittel“, SPAX International GmbH & Co. KG, Jahr 2012, gültig bis 31.01.2017

7.3 Bücher, Abschlussarbeiten und Forschungsberichte

- [35] ABPLANALP Bruno, „Ökonomiegebäude Lauenen mit BSH aus Buchenholz (Pilotanwendung)“, neue Holzbau AG, Lungern, Jänner 2009
- [36] AICHER Simon, „Laubholzverklebungen für den konstruktiven Hochbau - Dauerhaftigkeit von Klebfugen“, Laubholzkongress Hohenheim 2006, Materialprüfanstalt Universität Stuttgart, Abteilung Holzbau, März 2006
- [37] BATHON Leander, BLETZ-MÜHLDOERFER Oliver, SCHMIDT Jens, WEBER M., WEIL Michael, „Holz-Stahl-Klebeverbindungen mit Flachkörpern - Entwicklungen und Anwendungen“, Materialprüfanstalt für Bauwesen Wiesbaden und Labor für Holzbau Wiesbaden, 2009

- [38] BATHON Leander, BLETZ-MÜHLDORFER Oliver, DIEHL Friedemann, MANGER Philipp, SCHMIDT Jens, WEIL Michael, „Effiziente Holz-Stahl-Klebeverbindungen - Entwicklungen und Anwendungen“, 15. Internationales Holzbau-Forum 09, Materialprüfanstalt für Bauwesen Wiesbaden und Labor für Holzbau Wiesbaden, 2011
- [39] BRANDMAIR A., WETZIG M., AIGNER N., HAB P., CLAUß S., NIEMZ P., „Verfahrenstechnische Optimierung von PUR-basierten Klebstoffen zur Herstellung von Laubholz und Materialkomponenten“, Institut für Baustoffe, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Juni 2010
- [40] BRANDNER Reinhard, THIEL Alexandra, „Klebeteknologie und Holzwerkstoffe“, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 2013, Skriptum
- [41] BRATULIC Katarina, FLATSCHER Georg, BRANDNER Reinhard, „Monotonic and cyclic behaviour of joints with self-tapping screws in CLT structures“, COST Action FP1004, Prag, Mai 2014, Tagungsband
- [42] DUMMER Hermann, PÖLZER Matthias, MÜNSTER Guntran, „Die Birke - Der Baum des Jahres 2009“, Kuratorium Wald, Wien, 2009, Infobroschüre
- [43] EISER A., UNTERWIESER Helene, „Die erweiterte Längsschwingungsmessung“, Kompetenzzentrum holz.bau forschungs gmbh, Graz, 2012, Arbeitsbericht
- [44] FRESE Matthias, „Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche - Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Laminierungseffekt“, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2006, Dissertation
- [45] GATTERNIG Wolfgang, „Untersuchung der Randabstände bei selbstbohrenden Holzschrauben“, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 03. September 2010, Masterprojekt
- [46] GEHRI, Ernst, „Eingeklebte Anker - Anforderungen und Umsetzungen“, 15. Internationales Holzbau-Forum 2009, ETH Zürich, 2009
- [47] GROSSER Dietger, „Die Hölzer Mitteleuropas - Ein mikrophotographischer Lehratlas“, Reprint der 1. Auflage von 1977, Verlag Dr. Kessel, Remagen, 2007
- [48] HABENICHT Gerd, „Kleben - erfolgreich und fehlerfrei“, 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006
- [49] HABENICHT Gerd, „Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen“, 5. erweiterte und aktualisierte Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2005

- [50] HEHL Simon, SCHWENDIMANN Markus, TANNERT Thomas, VALLÉE Till, „Adhesively Bonded Trusses: Experimental and Numerical Investigation“, University of Applied Sciences Bern, Bern, 2010, WCTE Conference Paper
- [51] HÜBNER Ulrich, „Withdrawal strength of self-tapping screws in hardwoods“, Association of the Austrian Wood Industries, Vancouver, Kanada, August 2013, CIB-W18/46-7-4
- [52] HÜBNER Ulrich, „Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile“, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 01. Mai 2013, Dissertation
- [53] HÜBNER Ulrich, „Birke für Brettschichtholz und Brettsperrholz“, holz.bau forschungs gmbh, Lignum Test Center, 15. März 2012, Arbeitsbericht
- [54] HÜBNER Ulrich, „Laubhölzer im Bauwesen sind noch Exoten“, Holz-Zentralblatt, 14. September 2007, Artikel
- [55] HÜBNER Ulrich, LEEB Wolfgang, „Merkmale der Festigkeitssortierung von Buche und Esche“, holz.bau forschungs gmbh, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 06. November 2006, Forschungsbericht
- [56] JACOB-FREITAG Susanne, „Laubholz macht BS-Holz stark“, Der Zimmermann 4|2013, Karlsruhe, 2013
- [57] JACOB-FREITAG Susanne, „Sporthalle in Sargans - Ein filigranes Tragwerk aus vorgespannten Zweigelenkrahmen und ein konsequenter Verzicht auf alles Überflüssige“, mikado 1-2.2013
- [58] KILDE Vegard, SOLLI Kjell Helge, PITZNER Birte, OG JAN BRAMMING Per Lind, „Bjork i synlige konstruksjoner (Birch in visible constructions)“, Norsk Treteknisk Institutt, Oktober 2006, Forschungsbericht
- [59] KNORZ Markus, „Verklebung von Buche und Esche für tragende Holzbauteile“, 18. Internationales Holzbau-Forum 2012, Holzforschung München, Technische Universität München, 2012
- [60] KRACKLER Verena, KEUNECKE Daniel, NIEMZ Peter, „Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten“, ETH Zürich, Institut für Baustoffe, 15. Juli 2010, Projektstudie
- [61] KRENN Harald, „Der Einfluss der Gruppenwirkung von Schraubenverbindungen auf das Nachweisverfahren“, 16. Internationales Holzbau-Forum, TU Graz, 2010, Tagungsbericht

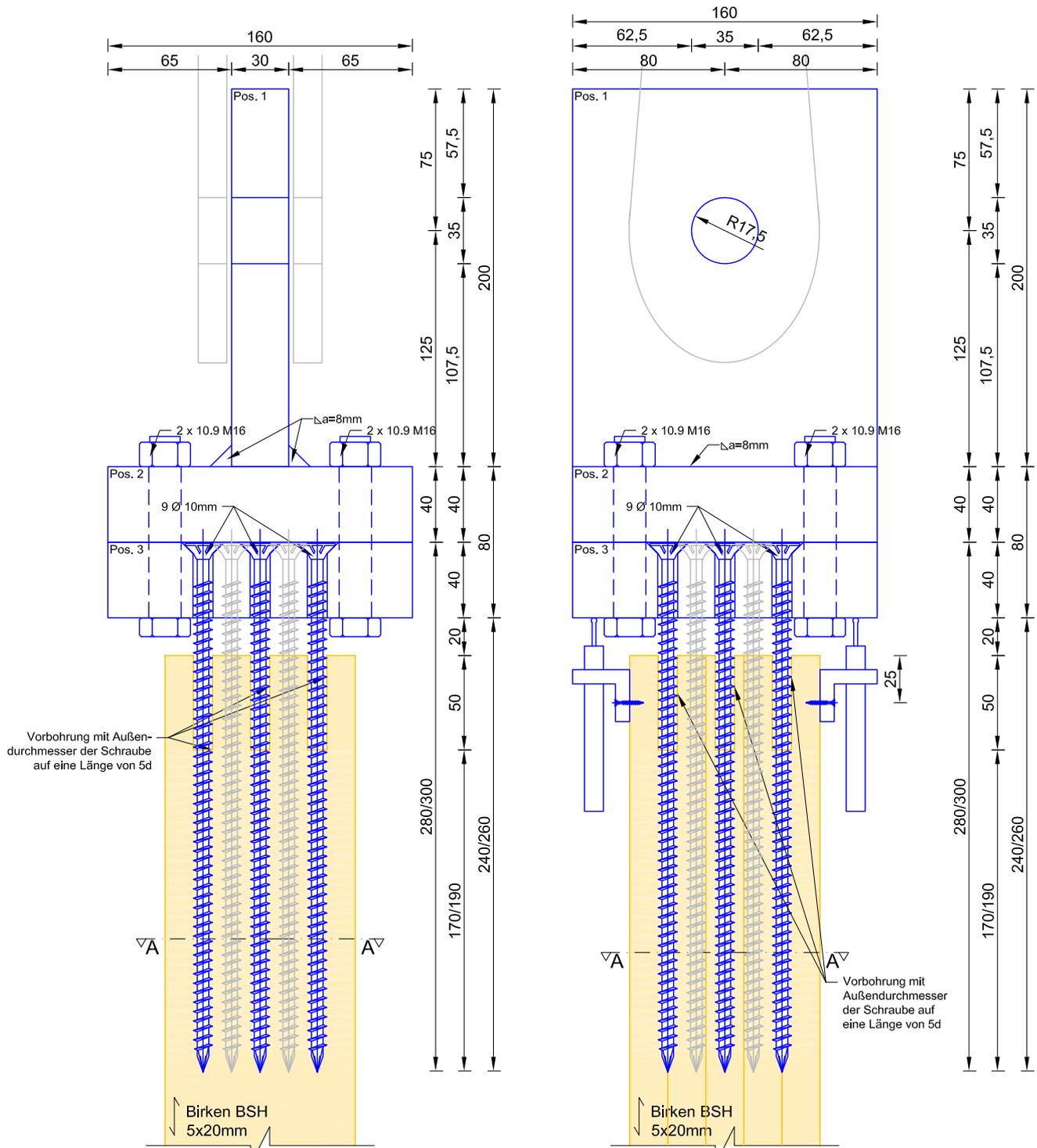
- [62] KRENN Harald, „P06 connections - Verbindungstechnik im Ingenieurholzbau - Selbstbohrende Holzschrauben in hoch beanspruchten Bereichen“, holz.bau forschungs gmbh, Technische Universität Graz, April 2009, Abschlussbericht
- [63] KRENN Harald, SCHICKHOFER Gerhard, „Joints with inclined Screws and Steel Plates as outer Members“, Technische Universität Graz, August 2009, CIB-W18/42-7-2
- [64] KÜBLER Wolfram, JACOB-FREITAG Susanne, „Pionierleistung mit Ausblick“, mikado 9.2011
- [65] MAYER, Peter, „BFW Praxis Information - Waldinventur 2007/09“, Nr. 24 - 2011, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, Februar 2011
- [66] MÖßNANG, Michael, „Die Rolle der Birke im Waldbau - Die Sandbirke in Bayern“, aus Beiträge zur Sandbirke, LWF Bericht Nr. 28, Freising, Deutschland, November 2000
- [67] N. B., „Swedish forestry - Forest lands covers 70 percent of Sweden“, Swedish Forest Industries Federation, Stockholm, 2012
- [68] NIEDERMAIR Markus, LEXER Manfred J., PLATTNER Gerald, FORMAYER Herbert, SEIDL Rupert, „Klimawandel & Artenvielfalt - Wie klimafit sind Österreichs Wälder, Flüsse und Alpenlandschaften?“, Österreichische Bundesforste AG - Kompetenzfeld Natur- und Umweltschutz, 2007, Forschungsbericht
- [69] PIRNBACHER Gernot, BRANDNER Reinhard, SCHICKHOFER Gerhard, „Base Parameters of self-tapping Screws“, Technische Universität Graz, August 2009, CIB-W18/42-7-1
- [70] PIRNBACHER Gernot, „Screws_Long_Time: Zeitabhängige Entwicklung der Traglast und Kriechverhalten von selbstbohrenden Holzschrauben“, holz.bau forschungs gmbh, Graz, Oktober 2011
- [71] PIRNBACHER Gernot, SCHICKHOFER Gerhard, „Zeitabhängige Entwicklung der Traglast und des Kriechverhaltens von axial beanspruchte selbstbohrenden Holzschrauben“, holz.bau forschungs gmbh, 2012
- [72] PLÜSS Yannick, „Prüftechnische Ermittlung des Tragverhaltens von Schraubengruppen in der BSP-Schmalfläche“, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, März 2014, Maserarbeit
- [73] PÖRTNER Carsten, „Untersuchungen zum Verbund zwischen eingeklebten stiftförmigen faserverstärkten Kunststoffen und Holz“, Universität Kassel, 25. November 2005, Dissertation

- [74] PURGSTALLER Thomas, „Das mechanische Verhalten von Klebeverbindungen im Holzbau“, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, Mai 2010, Masterarbeit
- [75] RINGHOFER Andreas, WALLNER Bernhard, SCHICKHOFER Gerhard, „Dauermessungen der Luftfeuchtigkeit und Bauteiltemperatur in Wandaufbauten aus Fichten- und Birken-Brettsperrholz“, holz.bau forschungs gmbh, Technische Universität Graz, 2012, Forschungsbericht
- [76] RINGHOFER Andreas, SCHICKHOFER Gerhard, „Timber-in-Town - current examples for residential buildings in CLT and tasks for the future“, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 2013
- [77] ROJAS-BRIALES Eduardo, MASLYAKOV Victor, „The Russian Federation Forest Sector - Outlook Study to 2030“, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome 2012
- [78] SCHICKHOFER Gerhard, „Holzbau - Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz“, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 2009, Skriptum
- [79] SCHMIDT Michael, KNORZ Markus, „Glueing of European Beech (fagus sylvatica l.) and Douglas Fir (pseudotsuga mezesii Mirb.) for Load bearing Timber Constructions“, World Conference on Timber Engineering 2010
- [80] SCHMIDT Michael, „Brettschichtholz aus Buche“, Holzforschung München, Technische Universität München, (http://www.kompetenznetz-holz.de/aktuelles/8_BSH.pdf), 2011
- [81] SCHMIDT Michael, KNORZ Markus, TORNO Stefan, „Bauen mit Laubholz - Mehr als nur für den Innenausbau tauglich: Aktuelle Forschungsergebnis bringen Laubholz in das Tragwerk zurück“, aus LWF 98/2014, München, 2014
- [82] SIEDER Raimund, „Ermittlung der Zugfestigkeit von Lamellen und der Zug- und Biegefestigkeit von Keilverzinkungen der Holzart Birke“, holz.bau forschungs gmbh, Technische Universität Graz, August 2013, Forschungsbericht
- [83] UIBEL Thomas, BLAß Hans J., „Joints with dowel type fasteners in CLT structures“, Focus solid timber solutions - European Conference on Cross Laminated Timber (CLT), Technische Universität Graz, Mai 2013
- [84] WAGENFÜHR, Rudi, „HolzAtlas“, 6. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, Leipzig, 2007

7.4 Internetquellen

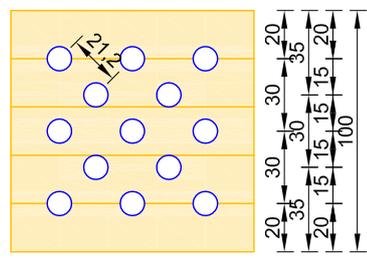
- [85] <http://bfw.ac.at>, 17.03.2014
- [86] <http://www.metla.fi/metinfo/sustainability/c4-tree-species.htm>, 17.03.2014
- [87] http://www.peterfaessler.ch/bilder/resize_of_img_1321.jpg, 11.05.2014
- [88] <http://www.arche-naturwaren.de/glossar/>, 11.05.2014
- [89] <http://www.schulbiologiezentrum.info/pflanzenlieferung%20Holz%20Waldbaeume.htm>, 11.05.2014
- [90] http://www.beobachter.ch/fileadmin/dateien/bilder-editionen/Natur_2012/06_12/Baeume_Fichte.jpg, 11.05.2014
- [91] <http://www.youtube.com/watch?v=Y41O8Un6-8U>, 11.05.2014
- [92] <http://www.dynea.com/about-us/news-center/news?id=20645085>, 11.05.2014
- [93] <http://www.stmelf.bayern.de/klimabilanz-forst>, 13.05.2014
- [94] <http://noltfox.metla.fi/nordic.htm>, 13.05.2014
- [95] <http://www.nordicforestry.org/facts/Norway.asp>, 13.05.2014
- [96] <http://www.r-project.org/>, 15.05.2014

Anhang A - Pläne der Prüfkonfigurationen

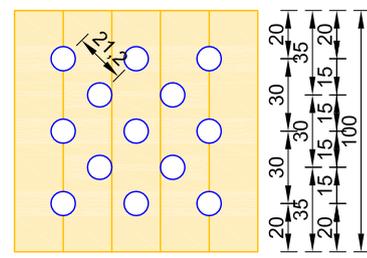


Vorbohrung mit Außendurchmesser der Schraube auf eine Länge von 5d

Vorbohrung mit Außendurchmesser der Schraube auf eine Länge von 5d



Schnitt A-A

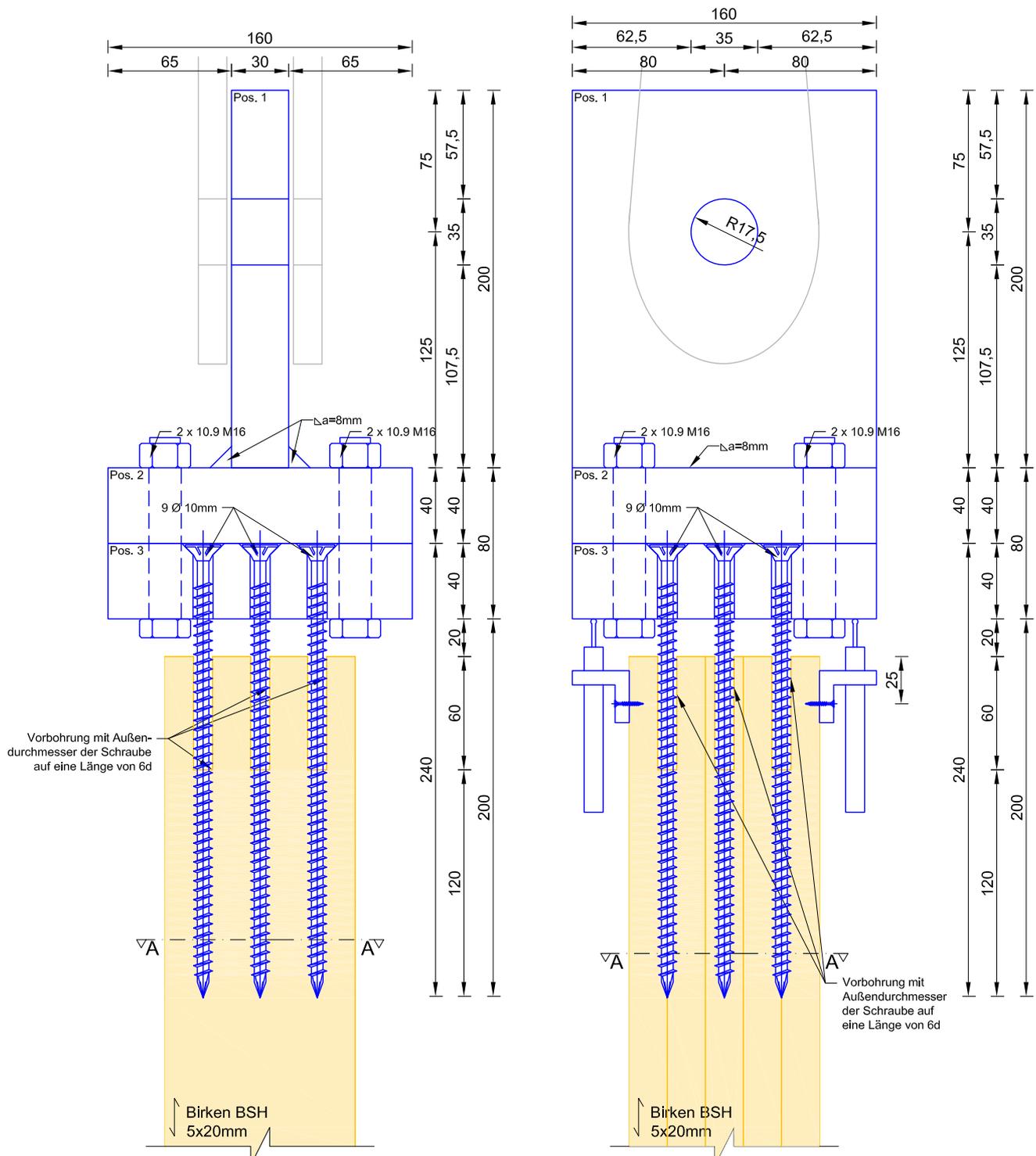


Schnitt A-A

alle Maße in mm

Zugversuche Birken BSH

Planinhalt: Prüfkonfiguration 1	Plannummer: 1	Betreuer: DI Markus Grabner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 03.05.2014	Maßstab: 1:3	Planverfasser: Irene Obermayr 0175111

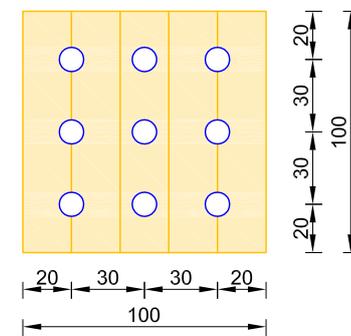
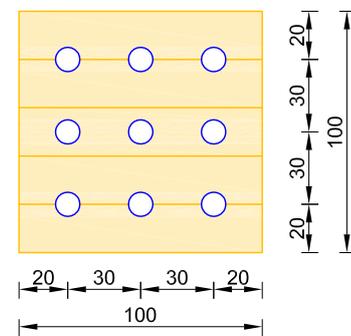


Vorbereitung mit Außendurchmesser der Schraube auf eine Länge von 6d

Vorbereitung mit Außendurchmesser der Schraube auf eine Länge von 6d

Birken BSH
5x20mm

Birken BSH
5x20mm



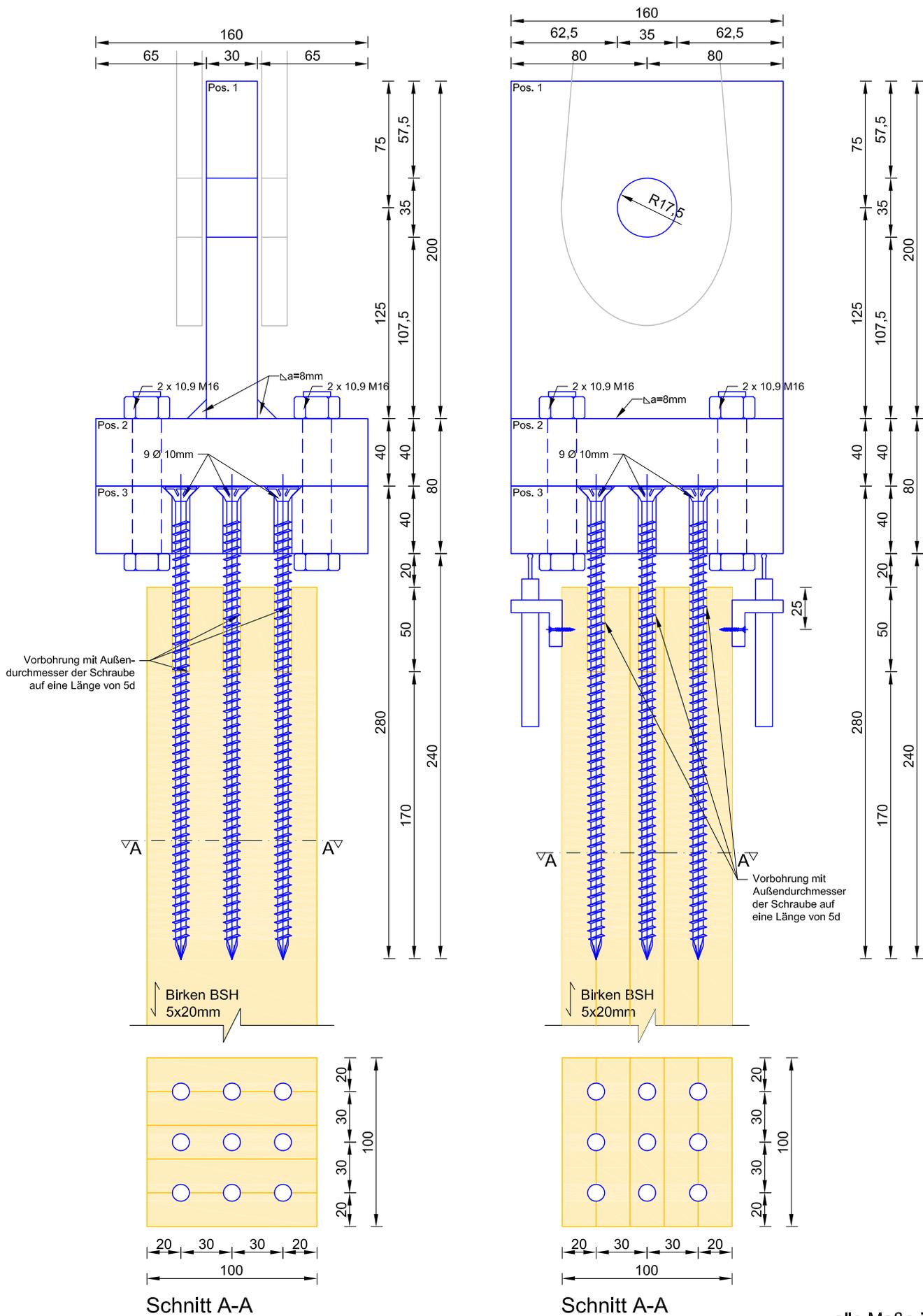
Schnitt A-A

Schnitt A-A

alle Maße in mm

Zugversuche Birken BSH

Planinhalt: Prüfkonfiguration 2	Plannummer: 2	Betreuer: DI Markus Grabner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 03.05.2014	Maßstab: 1:3	Planverfasser: Irene Obermayr 0175111



Zugversuche Birken BSH

Planinhalt:
Prüfkonfiguration 3

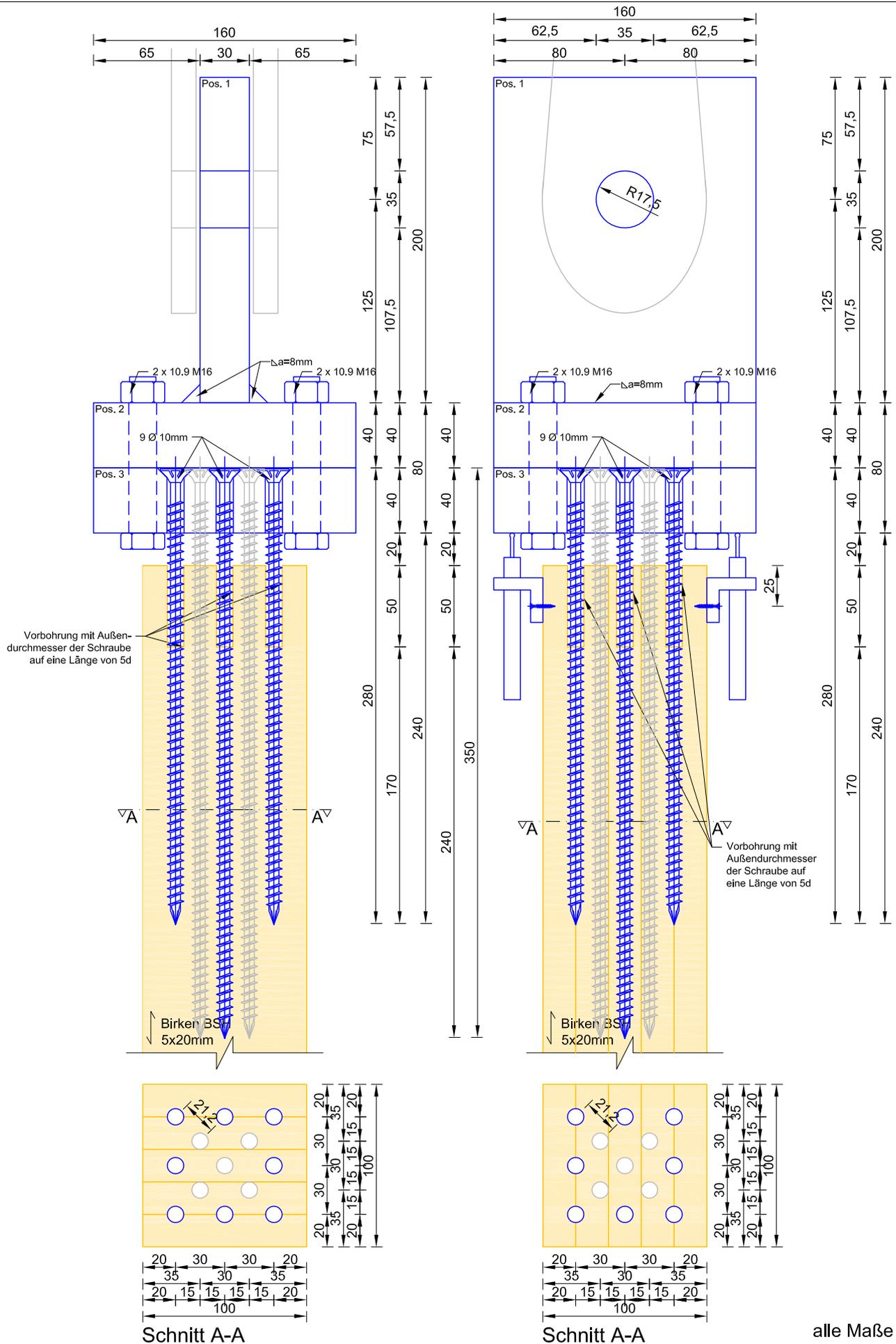
Plannummer:
3

Betreuer:
DI Markus Grabner / DI Andreas Ringhofer

Erstellungsdatum:
03.05.2014

Maßstab:
1:3

Planverfasser:
Irene Obermayr | 0175111



Zugversuche Birken BSH

Planinhalt:
Prüfkonfiguration 4

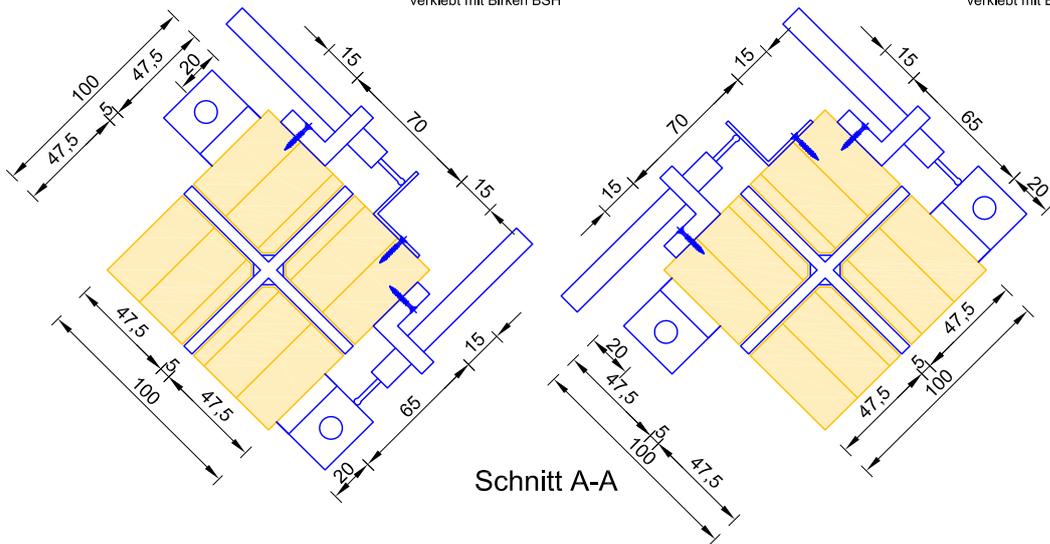
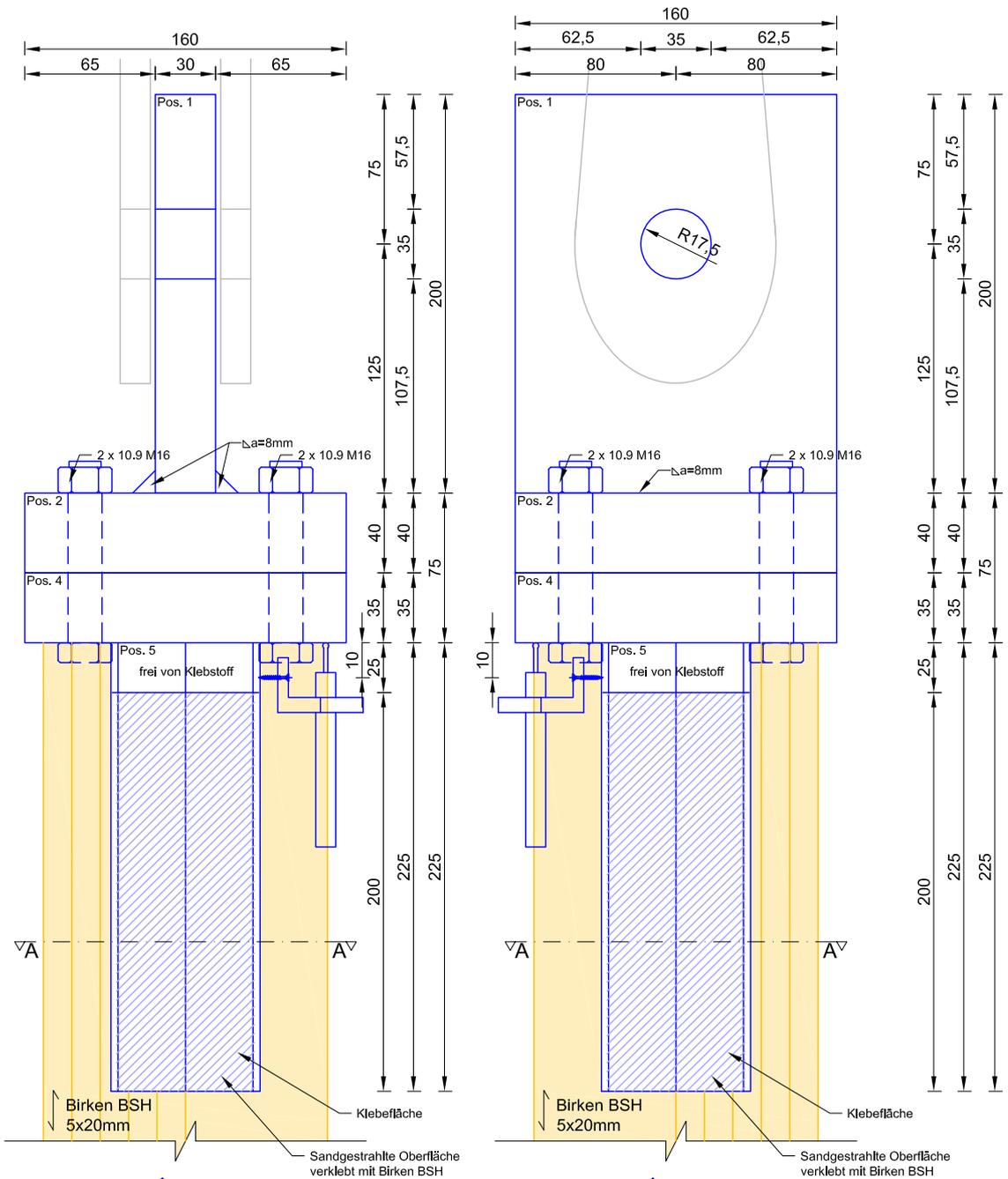
Plannummer:
4

Betreuer:
DI Markus Grabner / DI Andreas Ringhofer

Erstellungsdatum:
03.05.2014

Maßstab:
1:3

Planverfasser:
Irene Obermayr | 0175111



alle Maße in mm

Zugversuche Birken BSH

Planinhalt:
Versuchsanordnung Zugvers. eingekl. Stahlbleche

Plannummer:
5

Betreuer:
DI Markus Grabner / DI Andreas Ringhofer

Erstellungsdatum:
03.05.2014

Maßstab:
1:3,33

Planverfasser:
Irene Obermayr | 0175111

Anhang B - Auswertung der Prüfungen

Prüfungen Hirnholzverschraubungen

mittlere Zugfestigkeit: $f_{t,0} = 55,3 \text{ N/mm}^2$
Bruchlast Einzelschraube: $F_{max,3} = 39,9 \text{ kN}$

PK-Bez.	d [mm]	l _{Schr.} [mm]	Antz.	d _{Sub.} [mm]	ohne Verb. [d]	l _d [mm]	Eindrehmoment [Nm]	ρ [kg/m³]	γ _{Masch.}	alte Schr.	Versagensart	Schraubenbruch	Vers.seite	F _{max} [kN]	k _{ser} [N/mm]	F _{max} /n [kN]	F _{max} /n / F _{max,3} [%]	F _{max} /n _{ratio} [%]	F _{max} /R _{lim,mean} [%]	1. Lastst.	R _{lim,mean} [kN]	F _{max,3} [kN]	F _{ratio}			
Vorversuche	1	T005_1	10	300	9	12	2	20	220	18	644	0	nein	Schraubenbruch	6	links	336,75	-	37,4	93,7	65,5	93,7	-	553,7	359,5	514,2
	2	T005_2	10	300	13	12	2	20	220	19	644	0	nein	Spalten	1	links	406,53	-	31,3	78,3	81,8	78,3	-	799,8	519,3	496,8
	3	T005_3	10	300	13	12	5	50	190	19	644	1	nein	Schraubenbruch	8	links	427,65	-	32,9	82,4	86,1	82,4	-	690,7	519,3	496,8
PK 1	4	T002_1	10	300	13	12	5	50	190	19	615	0	1 Seite	Spalten	3	rechts	428,88	242082	33,0	82,6	86,3	82,6	240,0	641,7	519,3	496,8
	5	T001_1	10	300	13	12	5	50	190	19	611	0	13 + 4	Spalten	1	links	344,34	232445	26,5	66,3	69,3	66,3	240,0	634,6	519,3	496,8
	6	T003_1	10	280	13	12	5	50	170	19	645	0	nein	Spalten/Schraubenb	4	links	395,91	259712	30,5	76,2	79,7	76,2	240,0	619,2	519,3	496,8
	7	T004_1	10	280	13	12	5	50	170	19	665	0	nein	Spalten	0	links	344,73	265508	26,5	66,4	69,4	66,4	240,0	650,9	519,3	496,8
	8	T001_2	10	240	9	12	6	60	120	19	611	0	nein	Ausziehen	0	links	201,75	199178	22,4	56,1	39	73	140	277	360	514
PK 2	9	T004_2	10	240	9	12	6	60	120	19	665	0	nein	Ausziehen	0	rechts	232,83	173208	25,9	64,8	45	73	140	318	360	514
	10	T003_3	10	280	9	12	5	50	170	19	645	0	nein	Schraubenbruch	5	links	304,05	206265	33,8	85	59	85	180	429	360	514
PK 3	11	T002_2_1	10	280	9	12	5	50	170	19	644	0	nein	Ausziehen	0	rechts	263,52	207754	29,3	73,3	51	73	180	428	360	514
	11	T002_2_2	10	280	9	12	5	50	170	19	644	0	nein	Ausziehen	0	rechts	215,88	-	24,0	60	42	60	180	428	360	514
PK 4	12	T003_2	10	280/350	13	12	5	50	170	19	645	0	nein	Spalten/Schraubenb	1	links	412,86	289797	31,8	79,5	83	80	245	717	519	497

F_{\max}	k_{ser}	$\frac{F_{\max}}{n}$
[kN]	[N/mm]	[kN]

Statistik aller Prüfungen (ohne Vorversuche)	Mittelwert	314,48	230661	28
	Minimum	201,75	173208	22
	Maximum	428,88	289797	34
	Median	324,2	232445	28
	sd	83,67	37250,78	3,9
	COV	26,6%	16,1%	14%

Statistik Prüfungsgeneration 1	Mittelwert	378,47	249937	29
	Minimum	344,34	232445	26
	Maximum	428,88	265508	33
	Median	370,32	250897	28
	sd	41,427	15336,92	3,2
	COV	10,9%	6,1%	11%

Statistik Prüfungsgeneration 2	Mittelwert	217,29	186193	24
	Minimum	201,75	173208	22
	Maximum	232,83	199178	26
	Median	217,29	186193	24
	sd	21,977	18363,91	2,4
	COV	10,1%	9,9%	10%

Statistik Prüfungsgeneration 3	Mittelwert	261,15	207009	29
	Minimum	215,88	206265	24
	Maximum	304,05	207754	34
	Median	263,52	207009	29
	sd	44,133	1052,701	4,9
	COV	16,9%	0,5%	17%

Prüfungen Bleche

mittlere Zugfestigkeit: $f_{i,0} = 55,33 \text{ N/mm}^2$
 Querschnittsfläche Blech: $A_{\text{Blech}} = 975 \text{ mm}^2$
 Bruchlast Stahlblech: $F_{\text{max,Blech}} = 497,3 \text{ kN}$
 Nettoquerschnittstragf. $F_{\text{netto}} = 478,5 \text{ kN}$
 Klebefläche $A_{\text{KF}} = 74400 \text{ mm}^2$
 Schubfestigkeit KF $f_s = 7 \text{ N/mm}^2$ (Annahme)
 Schubtragfähigkeit FK $F_{\text{KF}} = 520,8 \text{ kN}$

PK-Bez.	t [mm]	l _{Blech} [mm]	l _{oVB} [mm]	l _{ef} [mm]	ρ [kg/m ³]	v _{Masch.} [-]	Versagensart [-]	Vers. -seite [-]	Vers. KF1 oder KF2 [-]	Vers. Flächen [-]	F _{max} [kN]	k _{ser} [N/mm]	$\frac{F_{\text{max}}}{F_{\text{netto}}}$ %	$\frac{F_{\text{max}}}{F_{\text{max,Blech}}}$ %	$\frac{F_{\text{max}}}{F_{\text{KF}}}$ %	f _{v,max} [N/mm ²]
4 T002_3	5	225	25	140	615	0	Klebstoff	rechts	1	X	250,98	-	52,4%	50,5%	48,2%	3,37
5 T001_3	5	225	25	140	611	0	Klebstoff	rechts	2	X	290,43	-	60,7%	58,4%	55,8%	3,90
6 T004_3	5	225	25	140	665	0	Klebstoff	rechts	1	X	212,46	1.291.693	44,4%	42,7%	40,8%	2,86

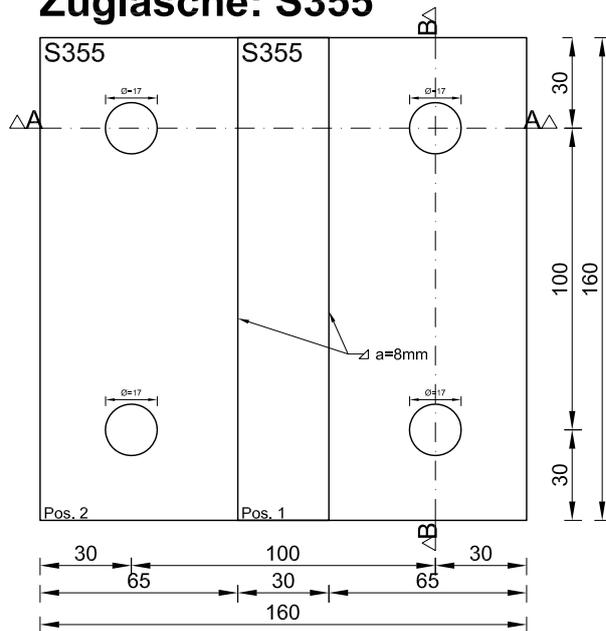
— keine Haftung am Stahlquerschnitt
— Haftung am Stahlquerschnitt
- - - teilweise Haftung am Stahlquerschnitt

Statistik aller Prüfungen (ohne Vorversuche)	
Mittelwert	251,29
Minimum	212,46
Maximum	290,43
Median	250,98
sd	38,99
COV	15,5%

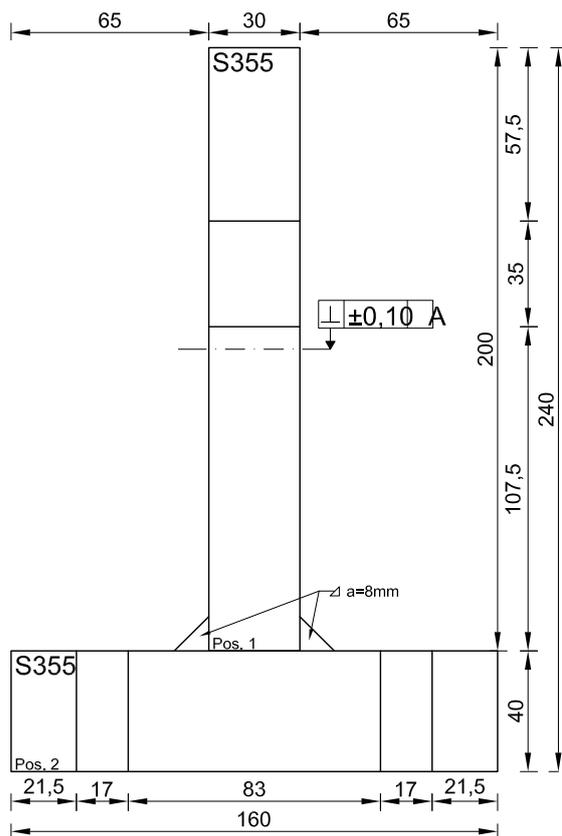
3,38
2,86
3,90
3,37
0,52
15,5%

Anhang C - Pläne und Bemessung der angefertigten Stahlteile

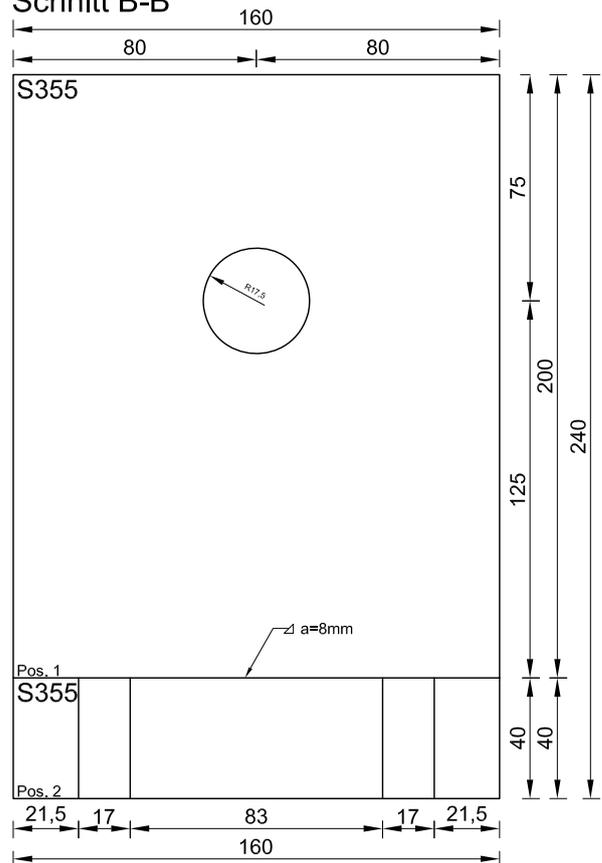
2 x Zuglasche
Kopfplatte: S355
Zuglasche: S355



Schnitt A-A



Schnitt B-B



Maß- und Ebenheitstoleranzen sofern nicht gesondert angeführt: $\pm 0,10$ mm
 alle Maße in mm

Zugversuche Birken BSH

Planinhalt: Zuglasche	Plannummer: 1	Betreuer: DI Markus Grabner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 25.02.2014	Maßstab: 1:2,5	Planverfasser: Irene Obermayr 0175111

T-Lasche:

Stahl S355:

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 510 \text{ N/mm}^2$$

Zuglasche:

$$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$d = 35 \text{ mm}$$

$$t = 30 \text{ mm}$$

$$l = 160 \text{ mm}$$

max. geschätzte Zugkraft: $N_Z = 400 \text{ kN}$

Kopfplatte:

$$t = 40 \text{ mm}$$

$$b = 160 \text{ mm}$$

$$l = 160 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

Lochleibungsnachweis in Zuglasche:

$$F_b = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 956 \text{ kN}$$

$$k_1 = \min \{2,8 \cdot e_2/d_0 - 1,7 ; 2,5\} = 2,50 -$$

$$k_1 = \min \{e_1/3 \cdot d_0 ; f_{ub}/f_u ; 1,0\} = 0,71 -$$

$$e_1 = 75 \text{ mm}$$

$$e_2 = 80 \text{ mm}$$

$$F_b / N_Z = 2,39 -$$

Schweißnaht Zuglasche-Kopfplatte:

$$a_{\min} = t_{\max}^{1/2} \cdot 0,5 = 5,8 \text{ mm}$$

$$a_{\max} = t_{\min} \cdot 0,7 = 21,0 \text{ mm}$$

$$f_{vw} = 327 \text{ N/mm}^2$$

$$a \geq N_Z/2 \cdot l \cdot f_{vw} = 3,82 \text{ mm}$$

$$a_{\text{gew}} = 8,0 \text{ mm}$$

$$N_{\max} = 838 \text{ kN}$$

$$N_{\max} / N_Z = 2,09 -$$

Zugspannungsnachweis im Stahl:

$$N_{\max} = \min \{N_{pl} ; N_u\} = \min \{A \cdot f_y ; 0,9 \cdot A_{\text{netto}} \cdot f_u\} = 1704 \text{ kN}$$

$$N_{\max} / N_Z = 4,26 -$$

Schraubenblech:

Stahl S355:

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 510 \text{ N/mm}^2$$

Stahlblech:

$$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$d = 10 \text{ mm}$$

max. geschätzte Zugkraft:

$$N_Z = 400 \text{ kN}$$

Stahlblechdicke:

$$t_{\text{gew}} = 40,0 \text{ mm}$$

Durchstanzen der Holzschrauben:

$$t_p > 0,2 \cdot d \cdot f_{ub}/f_u =$$

$$3,14 \text{ mm}$$

Grenzdurchstanznachweis ist nicht maßgebend!

Mindestabstände für versetzte Lochreihen:

Randabstände:

$$e_1 = e_2 = 1,2 \cdot d =$$

$$12,0 \text{ mm}$$

eingehalten!

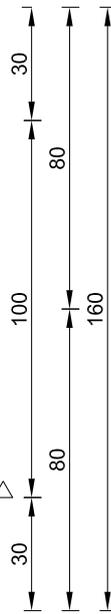
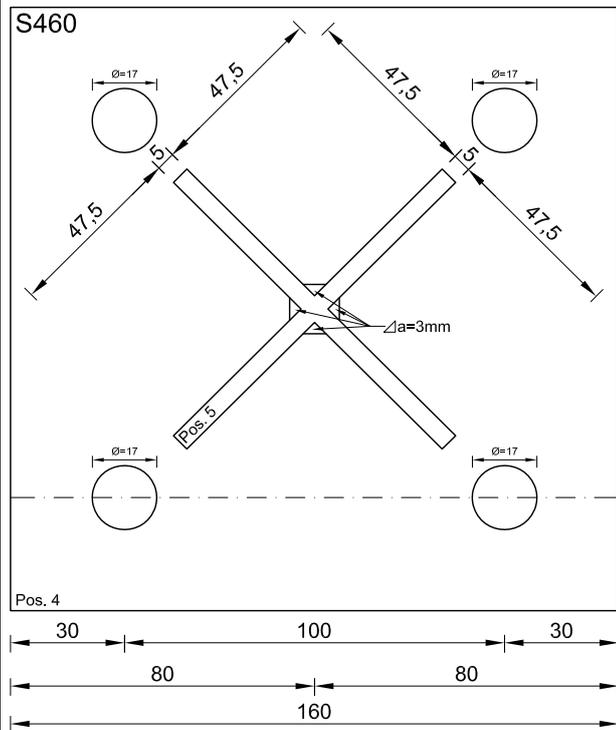
Lochabstände:

$$p_1 = p_2 = 1,2 \cdot d =$$

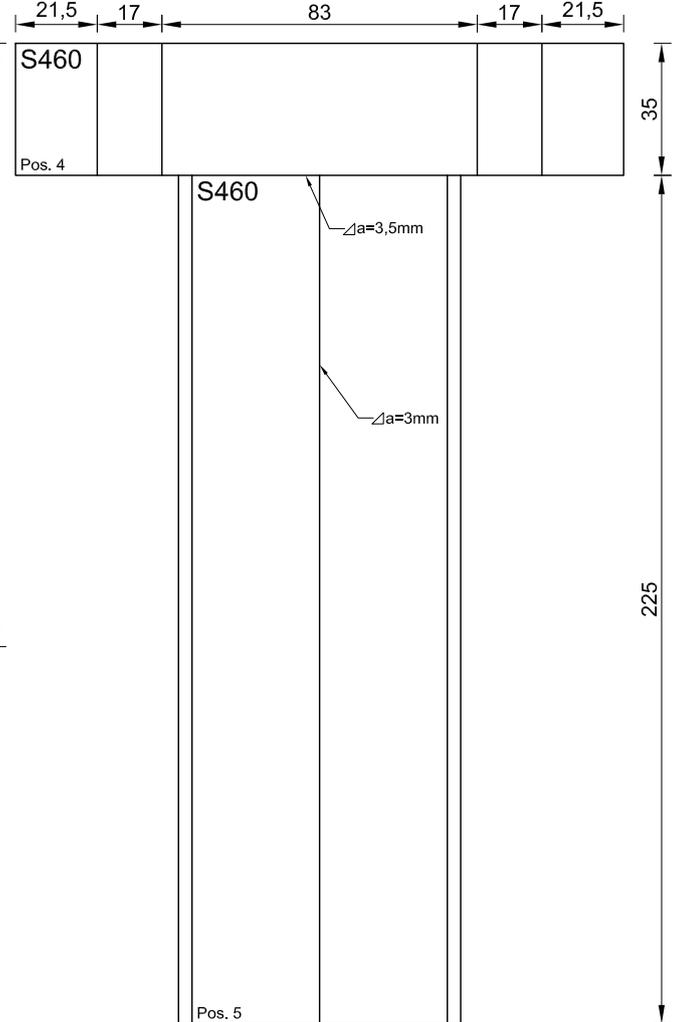
$$12,0 \text{ mm}$$

eingehalten!

6x eingeklebte Stahlbleche S460



Schnitt A-A



Maß- und Ebenheitstoleranzen sofern nicht gesondert angeführt: $\pm 0,10$ mm
alle Maße in mm

Zugversuche Birken BSH

Planinhalt: eingeklebte Stahlbleche	Plannummer: 3	Betreuer: DI Markus Grabner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 25.02.2014	Maßstab: 1:2	Planverfasser: Irene Obermayr 0175111

eingeklebte Stahlbeche QS 100/100:

Stahl S460:

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 510 \text{ N/mm}^2$$

Kleber:

max. Scherspannung:

$$f_s = \boxed{7} \div 8 \text{ N/mm}^2$$

max. geschätze Zugkraft:

$$N_Z = 400 \text{ kN}$$

Stahlbleche:

$$l = 100 \text{ mm} \quad t = 5 \text{ mm}$$

Stahlblechdicke:

$$t_{\text{gew}} = 35,0 \text{ mm}$$

erf. Scherfläche → Stahlblechlänge:

$$A_{\text{erf}} = N_Z / f_s =$$

$$57143 \text{ mm}^2$$

$$l_{\text{erf}} = A_{\text{erf}} / (l \cdot t) \cdot 4 =$$

$$150,38 \text{ mm}$$

$$l_{\text{gew}} =$$

$$200,00 \text{ mm}$$

Zugspannungsnachweis der Stahlblech:

$$A =$$

$$975 \text{ mm}^2$$

$$N_{\text{max}} =$$

$$497,25 \text{ kN}$$

$$N_{\text{max}} / N_Z =$$

$$1,24 -$$

Schweißnähte Stahlbleche an Kopfplatte:

$$a_{\text{max}} = t_{\text{max}}^{1/2} \cdot 0,5 =$$

$$5,4 \text{ mm}$$

$$a_{\text{min}} = t_{\text{min}} \cdot 0,7 =$$

$$3,5 \text{ mm}$$

$$f_{\text{vw}} =$$

$$327 \text{ N/mm}^2$$

$$a \geq N_Z / 2 \cdot l \cdot f_{\text{vw}} =$$

$$3,49 \text{ mm}$$

$$a_{\text{gew}} =$$

$$3,5 \text{ mm}$$

$$N_{\text{max}} =$$

$$447 \text{ kN}$$

$$N_{\text{max}} / N_Z =$$

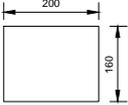
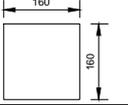
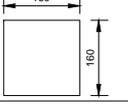
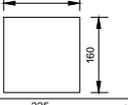
$$1,12 -$$

Schweißnähte zwischen Stahlbleche:

$$a_{\text{gew}} = \text{(geringste mögliche Schweißnahtdicke)}$$

$$3,0 \text{ mm}$$

Positionsliste

Position		Länge l	Breite b	Dicke t	Stahlgüte	Anzahl	kg/Stk	kg ges.
1		200	160	30	S355	2	7,54	15,07
2		160	160	40	S355	2	8,04	16,08
3		160	160	40	S355	2	8,04	16,08
4		160	160	35	S460	6	7,03	42,20
5		225	100	5	S460	12	0,88	10,60
gesamt:					S355			47,23
					S460			52,80

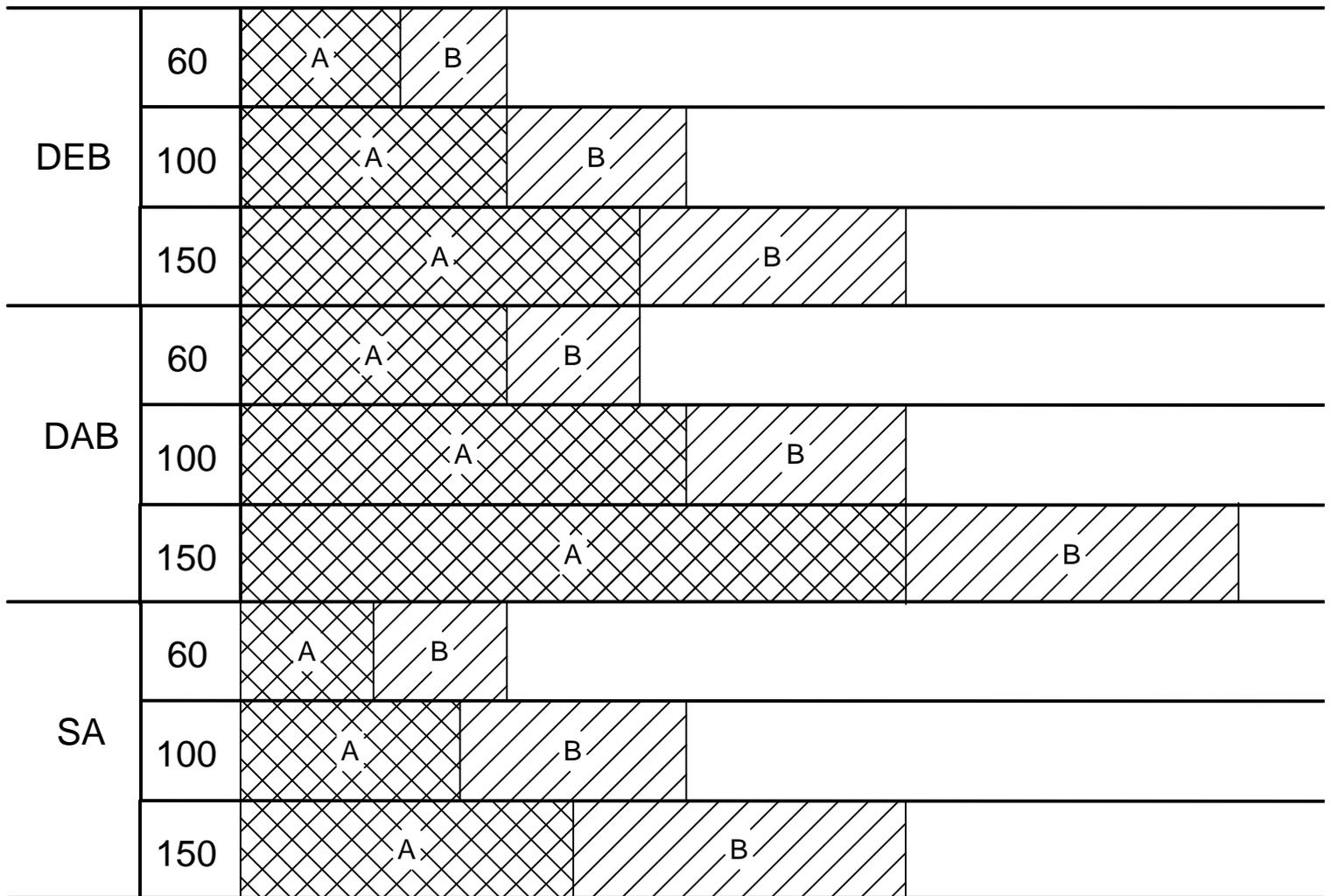
Maß- und Ebenheitstoleranzen sofern nicht gesondert angeführt: $\pm 0,10$ mm
alle Maße in mm

Zugversuche Birken BSH

Planinhalt: Positionsliste	Plannummer: 4	Betreuer: DI Markus Grabner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 25.02.2014	Maßstab: 1:2	Planverfasser: Irene Obermayr 0175111

Anhang D - Sortierfolie

Sortierkriterien nach DIN 4074-5:2008-12



	b 60 mm	b 100 mm	b 150 mm
DEB	LS10 40 mm	DEB LS10 67 mm	DEB LS10 100 mm
	LS13 24 mm	LS13 40 mm	LS13 60 mm
DAB	LS10 60 mm	DAB LS10 100 mm	DAB LS10 150 mm
	LS13 40 mm	LS13 67 mm	LS13 100 mm
SA	LS10 40 mm	SA LS10 67 mm	SA LS10 100 mm
	LS13 20 mm	LS13 33 mm	LS13 50 mm

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl