



Klaus Schweiger, BSc

**Verhalten von axial
beanspruchten
Schraubengruppen in Laubholz –
Hirnholzanschluss und
Zuglaschenstoß**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer
Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Ringhofer
Assoc.Prof. Dipl.-Ing.(FH) Dr.techn. Reinhard Brandner
Dipl.-Ing. Ursula Mahlknecht
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, April 2021

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 Personen bedanken, die mich während meines Studiums und der Verfassung dieser Arbeit begleitet, unterstützt und motiviert haben.

So möchte ich mich für die gute Betreuung und stetige Ansprechbereitschaft meiner Betreuer bedanken. Insbesondere für die anregenden und hilfestellenden Diskussionen, welche von Beginn bis zur Vollendung der Masterarbeit eine Selbstverständlichkeit darstellten. Ein großer Dank gilt hierbei meinem Betreuungsteam bestehend aus dem Hauptbetreuer Andreas Ringhofer, Reinhard Brandner und Ursula Mahlknecht. Durch Ihre freundliche, hilfsbereite und kompetente Arbeitsweise wurde die Vollendung dieser Masterarbeit sehr erleichtert.

Auch möchte ich mich bei sämtlichen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Institut für Holzbau und Holztechnologie sowie der holz.bau forschungs GmbH bedanken. Während der Vorbereitung und der Durchführung meiner Versuche herrschte stets ein angenehmes Arbeitsklima. In diesem Zusammenhang möchte ich mich besonders bei Bernd Heissenberger für die Unterstützung und Beratung bei der Herstellung und Nachbereitung der Prüfkörper bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei sämtlichen Studienkollegen und Studienkolleginnen bedanken, welche mich während meiner Studienzeit begleitet und unterstützt haben. Hierbei möchte ich insbesondere Konrad Hubmann hervorheben, welcher stets eine Stütze während meines Studiums war. Auch möchte ich mich im Speziellen bei Mathias Luef für die Unterstützung im Zuge meiner Masterarbeit bedanken.

Ein großer Dank gilt zudem meiner Familie. Sie hat mich während meiner gesamten Ausbildungszeit in vielfältiger Weise unterstützt und mir so ein geregelteres Studium ermöglicht. Durch ihre Hilfe haben sie mir geholfen die Motivation daran nicht zu verlieren und mir stets einen sicheren Rückhalt zu bieten.

Kurzfassung

Durch den in den letzten Jahrzehnten stetig wachsenden Vorrat an Laubhölzern in den europäischen Ertragswäldern, kommt es zu einem erhöhten wirtschaftlichen Interesse diese Hölzer auch vermehrt in der Bauindustrie einzusetzen. Aufgrund ihrer höheren mechanischen Kenngrößen als die herkömmlich eingesetzten Nadelhölzer weisen Hartlaubhölzer wesentliche Vorteile auf. So sind schlankere Konstruktionen bei der Verwendung von Laubholz möglich. Für die Herstellung dieser Konstruktionen sind jedoch auch effiziente Lösungen im Anschlussbereich der Tragelemente von Nöten, weshalb eine Überprüfung und eine eventuelle Anpassung der bestehenden Regelwerke welche für Nadelholz optimiert wurden, unumgänglich scheinen.

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit Verbindungen aus axial beanspruchten Schraubengruppen, welche unter einem Winkel von 0° oder 45° zur Faserrichtung in Trägern aus Buche sowie Birke und Furnierschichtholzträgern aus Buche appliziert wurden. Im Zuge dieser Arbeit wurden Versuche mit einer Einzelschraube und mit Verbindungen aus 19 Schrauben 0° zur Faser als Hirnholzanschlüsse durchgeführt. Dabei wurden die Abstände zwischen den Schrauben a_2 und der Randabstand $a_{2, cg}$ bei den Versuchen konstant gehalten und die Einschraub- und Einbindetiefe variiert. Anschließend wurden die Tragfähigkeiten, Steifigkeiten und Versagensmechanismen der Verbindung analysiert. Zusätzlich wurden Versuche mit Zuglaschenverbindungen bestehend aus drei geneigt angeordneten Schrauben pro Scherfuge vorbemessen und geplant. Bei diesen Versuchen wurde der Schraubenabstand in Faserrichtung a_1 und zum Hirnholze $a_{1, cg}$, sowie die Einschraub- und Einbindetiefe variiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Tragfähigkeit und der Versagensmechanismus der Verbindung neben dem Abstand der Schrauben a_2 und dem Randabstand $a_{2, cg}$, auch in hohem Maße von der Einbindetiefe der Schrauben abhängt. Das Zielversagen Herausziehen, als jenes mit dem höchsten zu erwartenden Widerstand gegenüber anderen spröden Holzversagen bei gleicher Eindringtiefe und Gruppengröße der Schrauben, ist in Birke und Buche bei $a_2 = a_{2, cg} = 3 d$ und $l_{emb} = 10 d$ erreichbar. Ein Aufspalten wie dies in der Literatur bei Hirnholzanschlüssen mit axial beanspruchten Schraubengruppen in Laubholz berichtet wird kann somit verhindert werden. In den diskutierten Untersuchungen führte dies neben dem Zielversagen auch zu einem Verhältnis der effektiven zur tatsächlichen Verbindungsmittellanzahl von $> 0,91$ und zu einem Ausnutzungsgrad von 74 % als Verhältnis des 5 %-Quantil-Widerstandes der Gruppe zur berechneten charakteristischen Nettozugtragfähigkeit des Trägers.

Mit den Abständen $a_2 = 3 d$ und $4 d$, $a_{2, cg} = 3 d$ und $l_{emb} = 11 d$ konnte mit den Furnierschichtholzträgern aus Buche zwar eine effektive Verbindungsmittellanzahl von $0,80 \times n$, aber nur ein Wirkungsgrad von 39 % realisiert werden.

Die Auswertung der Steifigkeit zeigte eine durch den Prüfaufbau bedingte Abhängigkeit der Anfangssteifigkeit der Anschlüsse in Hirnholz und einer im Zuge des Anziehens der Schrauben aufgebauten Vorspannwirkung der Verbindung. Dieser Umstand führte in vorangegangenen Untersuchungen zu einer Fehleinschätzung der Steifigkeiten der geprüften Verbindungen.

Eine wesentliche Erkenntnis des Zuglaschenstoßes mit einer Schraubenreihe zeigte, dass der Verbindungsmittelabstand von $a_1 = a_{1, cg} = 5 d$, wie dies beispielsweise in diversen ETAs für rein axial beanspruchte Schraubengruppen zu finden ist, auch in den Laubholzarten Buche und Birke zum Ausziehversagen in der Gruppe führen kann.

Die Arbeit leistet einen wertvollen Beitrag zur Betrachtung des gesamten Anwendungsgebietes von Anschlüssen mit vorwiegend axial beanspruchten Schraubengruppen in Laubholz.

Abstract

Due to the continuous growing stocks of hardwoods in European high-yield forests over the past few decades, there is an increased economic interest in using these woods in the construction industry. Due to their higher mechanical parameters than the commonly used softwoods, hardwoods have significant advantages. This means that leaner constructions are possible when using hardwood. For the production of these constructions, however, efficient solutions are required in the connection area of the supporting elements, which is why a review and possible adaptation of the existing regulations is necessary. This has to be done because of the fact that these regulations were optimized for softwood.

This master thesis focuses on connections with axially-loaded groups of screws, which were applied at an angle of 0° or 45° to the grain direction in beams made of beech as well as birch and laminated veneer lumber beams made of beech. In the course of this master thesis, tests were carried out with a single screw and also connections of 19 screws 0° to the grain. The distances between the screws a_2 and the edge distance $a_{2, \text{cg}}$ were kept constant during the tests and the penetration and embedment depth were varied. The load-carrying capacities, stiffnesses and failure mechanisms of the connection were then analyzed. In addition, tests with pull tab connections consisting of three inclined screws per shear joint were pre-measured and planned. In these tests, the screw spacing in the grain direction a_1 and to the edge $a_{1, \text{cg}}$ as well as the penetration and embedment depth were varied.

The results show that the load-carrying capacity and the failure mechanism of the connection with screws 0° to the grain depend not only on the spacings between the screws a_2 and the spacings to the edge $a_{2, \text{cg}}$, but also to a large extent on the embedment depth of the screws. The target failure pulling out, as the one with the highest expected resistance to other brittle wood failures with the same penetration depth and group size of the screws, can be achieved in birch and beech with $a_2 = a_{2, \text{cg}} = 3 d$ and $l_{\text{emb}} = 10 d$. Splitting, as reported in the literature for end-grain connections with axially-loaded screw groups in hardwood, can thus be prevented. In the investigations discussed, this led not only to target failure but also to a ratio of the effective to the actual number of fasteners of > 0.91 and to a degree of utilization of 80% as the ratio of the 5 % quantile resistance of the group to the calculated characteristic net tensile strength of the beam.

With the distances $a_2 = 3 d$ and $4 d$, $a_{2, \text{cg}} = 3 d$ and $l_{\text{emb}} = 11 d$, an effective number of fasteners of $0.80 \times n$ could be achieved with the laminated veneer lumber beams made of beech, but only an efficiency of 41%.

The evaluation of the stiffness showed a dependency of the initial stiffness of the connections in end-grain and a pretensioning effect of the connection built up in the course of tightening the screws. In previous investigations, this fact led to a miscalculation of the stiffness of the tested connections.

An essential conclusion of the pull tab joint with a row of screws showed that the fastener spacing of $a_1 = a_{1, \text{cg}} = 5 d$, as can be found, for example, in various ETAs for purely axially loaded groups of screws, also can lead in the hardwood species beech and birch to a pull-out failure.

This master thesis makes a valuable contribution to the consideration of the entire area of application of connections with predominantly axially loaded groups of screws in hardwood.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: EINLEITUNG	1
1-1 MOTIVATION.....	1
1-2 GLIEDERUNG	4
KAPITEL 2: STAND DES WISSENS	5
2-1 LAUBHOLZ.....	5
2-2 SCHRAUBEN FÜR ANWENDUNGEN IN LAUBHOLZ.....	9
2-2.1 Applikation von Holzbauschrauben in Laubholz	10
2-2.2 Schraubengeometrie	10
2-3 ANFORDERUNGEN AN VERBINDUNGEN	12
2-3.1 Tragfähigkeit	12
2-3.2 Steifigkeit	12
2-3.3 Duktilität.....	12
2-4 ANSCHLÜSSE IN HIRNHOLZ.....	14
2-4.1 Allgemeines.....	14
2-4.2 Design und Herstellung von Hirnholzanschlüssen	14
2-4.3 Versagensmechanismen	15
2-4.4 Geometrische und weitere relevante Parameter	20
2-4.5 Arbeiten in der Literatur	21
2-5 GENEIGT ANGEORDNETE SCHRAUBENGRUPPEN.....	38
2-5.1 Design und Herstellung	38
2-5.2 Versagensmechanismen	41
2-5.3 Geometrische und weitere relevante Parameter	47
2-5.4 Arbeiten in der Literatur	52
KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN	73
3-1 PRÜFKONZEPT	73
3-2 MATERIAL	75
3-2.1 Herstellung der Prüfkörper	76
3-3 METHODEN.....	85
3-3.1 Prüfaufbau/Prüfablauf	85
3-3.2 Vorbemessung	92
3-3.3 Auswertung der Ergebnisse	100
KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION	112
4-1 HIRNHOLZVERBINDUNGEN	112
4-1.1 Feuchtigkeit und Rohdichte.....	112
4-1.2 Einzelversuche.....	114
4-1.3 Referenzversuche der Steifigkeit.....	116
4-1.4 Gruppenversuche der Hirnholzanschlüsse.....	117

4-2	VERSUCHE MIT GENEIGT ANGEORDNETEN SCHRAUBENGRUPPEN	134
4-2.1	Feuchtigkeit und Rohdichte	134
4-2.2	Beobachtungen und Versagensmechanismen	136
4-2.3	Tragfähigkeit.....	138
4-2.4	Steifigkeit.....	141
KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK		143
5-1	ZUSAMMENFASSUNG	143
5-2	WICHTIGE ERKENNTNISSE	144
5-3	AUSBLICK	146
ANHANG A	VERZEICHNISSE.....	I
ANHANG B	GRUPPENVERSUCHE 0°	VI
ANHANG C	EINZELVERSUCHE 0°.....	XVI
ANHANG D	SCHRAUBENZUGPRÜFUNGEN.....	XXIII

KAPITEL 1: EINLEITUNG

1-1 MOTIVATION

Da sich Laubhölzer gegenüber Veränderungen der klimatischen Bedingungen einfacher anpassen können, steigt der Vorrat an Hartlaubhölzern europaweit stetig. Die bessere Anpassungsfähigkeit von Laubhölzern zeigt sich in mehreren Bereichen. So sind sie weniger anfällig gegen eine zunehmende Sommertrockenheit aber auch resistenter gegen die durch das wärmere Klima häufiger auftretenden Waldschädlinge wie den Borkenkäfer. Durch die merkbaren klimatischen Veränderungen ist es in naher Zukunft wahrscheinlich, dass Nadelhölzer auf höher gelegene Gebiete wie den Alpen oder den nordeuropäischen Gebieten zurückgedrängt werden. Gemäß der Zwischenauswertung für die Jahre 2016 bis 2018 der österreichischen Waldinventur des Bundesforschungszentrums für Wald [1] beträgt der Waldbestand in Österreich 4,02 Millionen Hektar. Die Fichtenfläche beträgt demnach rund 49 % der Ertragswaldfläche in Österreich, was einen erheblichen Rückgang gegenüber den 1980er Jahren bedeutet, wo dieser noch bei mehr als 56 % lag. Auch die Weißkiefer, die Lärche und sonstige Nadelhölzer zeigen eine rückläufige Tendenz, womit das Nadelholz insgesamt seit der Erhebungsperiode 1986/1990 um rund acht Prozentpunkte im Ertragswald abgenommen hat und nur noch rund 68 % am Ertragswald stellt. Im selben Zeitraum nahm die mit Laubhölzern bestockte Ertragswaldfläche um mehr als 130.000 ha zu, wodurch Laubholz und Mischbestände rund 40 % am österreichischen Ertragswald stellen. In der Erhebungsperiode 1986/1990 lag dieser Anteil noch bei rund 32 %. [2] Die Folge dieser Entwicklungen ist ein steigendes wirtschaftliches Interesse, diese Holzarten auch im Baubereich vermehrt einzusetzen.

Vielversprechend für die Nutzung dieser Hölzer sind ihre zum Teil sehr hohen mechanischen Eigenschaften. Um die volle Leistungsfähigkeit der daraus hergestellten Bauprodukte zu entfalten, sind jedoch auch adäquate und zuverlässige Lösungen für die Gestaltung ihrer Anschlussbereiche von Nöten. In diesem Bereich gelten geschraubte Verbindungen, neben geklebten Verbindungen und solchen mit lateral beanspruchten Verbindungsmitteln wie Stabdübel, als vielversprechend. Die normativen Vorgaben für diese Verbindungen, insbesondere die geometrischen Parameter, wie Randabstände, Verbindungsmittelabstände und Eindringtiefen, sind jedoch für Nadelholz optimiert. Durch die hohe Widerstandsfähigkeit von Laubhölzern und den daraus hergestellten Bauprodukten folgt jedoch eine signifikante Reduktion der benötigten Querschnittsdimensionen bei gleicher Tragfähigkeit gegenüber Nadelhölzern. Daraus folgt eine deutliche Einschränkung des zur Verfügung stehenden Raumes für die einzelnen Verbindungsmittel der genannten Anschlusslösungen.

Um den Vergleich der benötigten Querschnittsdimensionen für das Erreichen einer bestimmten Traglast zu verdeutlichen, ist in Abbildung 1-1, ausgehend von Nadelvollholz C24 nach EN 338 [3] die Materialeinsparung in Form einer variierten Querschnittsbreite bei konstanter Querschnittshöhe bei der Verwendung der Holzwerkstoffe Brettschichtholz aus Nadelholz GL28 nach EN 14080 [4], Buchenvollholz D50 nach EN 338 [3] und BauBuche GL75 nach [5] dargestellt. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Berechnung nach EN 1995-1-1 [6]
- Verwendung in der Nutzungsklasse 1
- Klasse der Lasteinwirkungsdauer: mittel

Es ist ersichtlich, dass für vorwiegend biegebeanspruchte Bauteile von einer Materialeinsparung von rund 70 % ausgegangen werden kann, falls eine Verwendung des Buchen-Furnierschichtholzproduktes BauBuche gegenüber dem Einbau eines herkömmlichen Nadelvollholzes der Festigkeitsklasse C24 vorgezogen wird. Die mittlere Rohdichte der BauBuche ist mit 800 kg/m^3 [5] wesentlich größer als jene des Vollholzes mit 420 kg/m^3 [3]. Die Gewichtseinsparung ist in diesem Fall mit 43 % wesentlich geringer als jene der Volumeneinsparung mit 70 %.

Durch die Verwendung von Bauteilen aus Laubholz und den daraus hergestellten Bauprodukten ist es daher nicht nur möglich, wesentlich schlankere bzw. leichtere Konstruktionen zu erstellen, sondern auch den Arbeits- und Logistikaufwand durch die Volumen- und Gewichtseinsparungen zu verringern.

	Vollholz C24	BSH GL28	Vollholz D50	BauBuche GL75
Biegung f_m	 200/100 %	 165/82 %	 96/48 %	 57/29 %
Schub f_v	 200/100 %	 178/89 %	 154/77 %	 72/36 %
Druck II $f_{c,0}$	 200/100 %	 144/72 %	 140/70 %	 47/23 %
Zug II $f_{t,0}$	 200/100 %	 125/63 %	 97/48 %	 43/22 %
E-Modul E_{mean}	 200/100 %	 175/87 %	 157/79 %	 131/66 %

Erforderliche Breite in mm bei gleicher Beanspruchung
 % Materialverbrauch

Abbildung 1-1 Vergleich benötigter Querschnittsbreiten ausgesuchter Nadel- und Laubholzprodukte bei konstanter Höhe in Anlehnung an [7]

Im Zuge des Forschungsprojektes „hardwood_joint“ sollen Möglichkeiten für die Realisierung von Verbindungslösungen im Laubholz untersucht werden. Dieses Forschungsprojekt ist ein Teil des von der Europäischen Union initiierten Forschungs- und Innovationsprogramms „ForestValue“ im Rahmenprogramm Horizon 2020, mit dem Ziel, eine breite Anwendung von Laubholzkonstruktionen zu ermöglichen. Neben dem Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz, das speziell axial beanspruchte Schraubengruppen betrachtet, sind weitere Universitäten und Industriepartner aus Schweden, Deutschland, Frankreich und Österreich an „hardwood_joint“ unter der Projektleitung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) beteiligt. Die Hauptuntersuchungen des Projektes finden dabei mit der Holzart Buche statt, da diese in Mitteleuropa die häufigste Laubholzart darstellt. Die Erkenntnisse daraus werden zudem in Birkenvoll- bzw. Brettschichtholz bzw. in Furnierschichtholz aus Buche überprüft.

Abbildung 1-2 zeigt hierbei die prinzipiellen Verbindungsarten, die bei axial beanspruchten Schraubengruppen unterschieden werden können. Die Einteilung erfolgt durch die beiden Winkel α und γ . Der Achs-Faser-Winkel α gibt den Winkel zwischen der Achse der im Holz applizierten Schraube und der Faserrichtung des Holzes an. Der Last-Faser-Winkel γ bezieht sich auf den Winkel zwischen der Belastungsrichtung und der Faserrichtung des Holzes. In Verbindungen, in welchen $\alpha = \gamma$ ist, werden die Schrauben rein axial belastet, während bei Verbindungen mit $\alpha \neq \gamma$ die Belastung der Schrauben lateral und axial erfolgt.

Bei den Verbindungen muss zudem zwischen „freier Oberfläche“ und „gesperrter Oberfläche“ unterschieden werden. Diese Einteilung erfolgt in Bezug auf die lokale Oberflächenverformung des Bauteils in Folge der Beanspruchung der Verbindung. Prinzipiell kann die Verbindung als Holz-Holz- oder als Stahlblech-Holzverbindung mit außenliegendem Stahlblech ausgeführt werden, wobei sich diese Masterarbeit auf die Untersuchung von Stahlblech-

Holz Verbindungen beschränkt. Bei einer freien Oberfläche sind die Verformungen der Holzoberfläche nicht eingeschränkt, während es bei einer gesperrten Oberfläche infolge der Belastung zu einer Anpressung des Stahlbleches an die Holzoberfläche kommt und somit zu einer Aktivierung von Reibungskräften, welche die Tragfähigkeit des Anschlusses erhöhen.

Diese Arbeit behandelt Hirnholzanschlüsse und geneigt angeordnete Schraubengruppen. Bei den betrachteten Hirnholzanschlüssen handelt es sich um Verbindungen mit freier Oberfläche, bei welchen der Achs-Faser-Winkel $\alpha = 0^\circ$ beträgt. Bei den betrachteten Verbindungen mit geneigt angeordneten Schraubengruppen handelt es sich um gesperrte Oberflächen, bei welchen der Achs-Faser-Winkel zwischen 0° und 90° liegt.

Das Ziel des Projektes ist es, die relevanten geometrischen Parameter zu bestimmen, welche für die Herstellung eines leistungsfähigen Anschlusses von Nöten sind und die Herstellung des Anschlusses zu untersuchen. Dies geschieht prinzipiell durch ein schrittweises Variieren der Parameter, u. a. Schraubenabstände, in Kombination mit der Beobachtung des dabei resultierenden Versagensmechanismus sowie der Tragfähigkeit und Steifigkeit der Verbindung relativ zu jenen Ausziehkenngößen der Einzelschraube. Zu diesem Zweck werden in Prüfkörpern, bestehend aus den Laubhölzern Birke, Buche oder dem Furnierschichtholz BauBuche, Hartholzschrauben eingebracht und diese Verbindungen bis zum Versagen belastet.

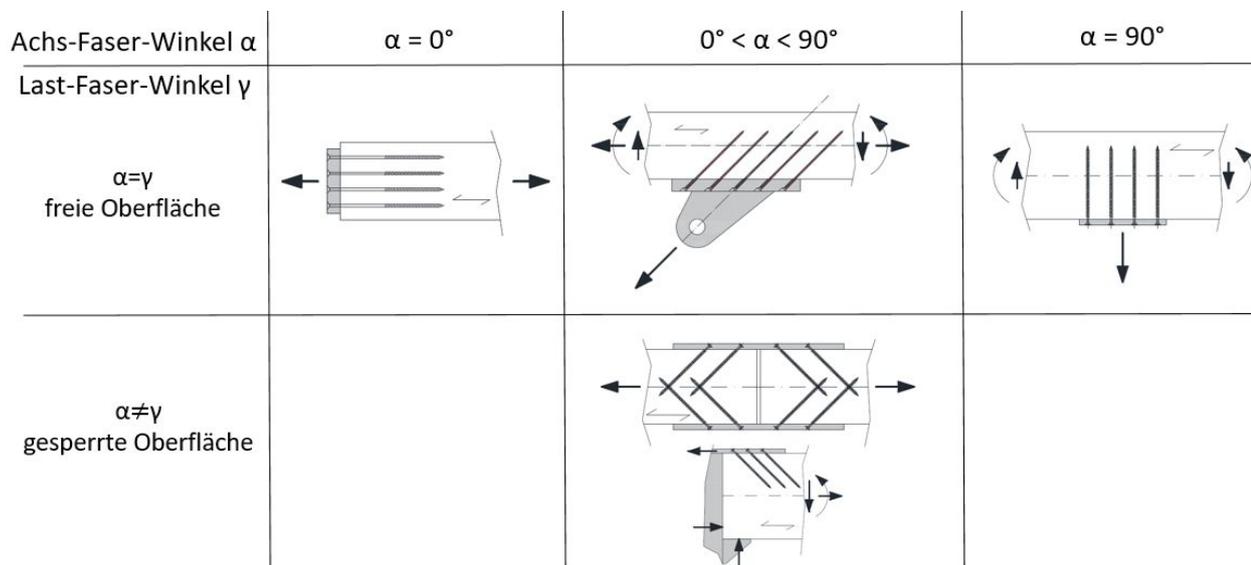


Abbildung 1-2 Einteilung axial belasteter Schraubengruppen in Abhängigkeit des Achs-Faser- und Last-Faser-Winkels; Abbildungen aus [8]

1-2 GLIEDERUNG

In Kapitel 1 wird auf die Motivation und das Ziel dieser Arbeit eingegangen. Es wird unter anderem auf die positiven Eigenschaften des verwendeten Baustoffes Laubholz eingegangen, sowie Möglichkeiten für die Verwendung von axial beanspruchten Schraubengruppen erläutert. Des Weiteren werden das Forschungsprojekt „hardwood_joint“ und für in dieser Masterarbeit durchgeführten Untersuchungen relevanten Parameter vorgestellt.

In Kapitel 2 werden bisherige Erkenntnisse aus Forschungsarbeiten und normative Regelungen dargelegt. In diesem Zusammenhang wird auf den Werkstoff Holz, im speziellen Hartlaubholz, und auf Schrauben für die Anwendung in Hartlaubholz eingegangen. Einen weiteren Eingang finden allgemeine Anforderungen an Verbindungen im Holzbau. Abschließend wird auf die in dieser Arbeit behandelten Verbindungssysteme eingegangen, im speziellen auf relevante Parameter, Versagensmechanismen und dem Design dieser Verbindungen. Zusätzlich werden bisherige Forschungsarbeiten in diesem Bereich kurz präsentiert.

Das im Rahmen der Arbeit durchgeführte experimentelle Programm wird in Kapitel 3 vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird auf sämtliche Arbeitsschritte von der Vorbemessung, über die Herstellung der Prüfkörper bis zum Prüfablauf und die Auswertung der Ergebnisse eingegangen.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse schließlich vorgestellt und diskutiert.

Abschließend wird der Untersuchungsbereich dieser Arbeit in Kapitel 5 zusammengefasst. Hier wird auch auf die gewonnenen Erkenntnisse eingegangen und ein Ausblick für weitere Forschungstätigkeiten gegeben.

KAPITEL 2: STAND DES WISSENS

2-1 LAUBHOLZ

Dieser Abschnitt soll kurz die wesentlichen Unterschiede zwischen Laubhölzern und Nadelhölzern aufzeigen. Zudem sollen einzelne Begriffe definiert und abgegrenzt werden und die in dieser Arbeit behandelnden Holzarten Buche und Birke sowie das Buchenfurnierschichtholz BauBuche vorgestellt werden. Die Entwicklung der Nadel- und Laubhölzer sowie deren unterschiedlichen Eigenschaften in den behandelnden Strukturebenen wurden dabei überwiegend aus [9], [10], [11], [12] und [13] aufgearbeitet und gekürzt übernommen. Die Vorstellung der in dieser Arbeit behandelnden Materialien Buche, Birke und BauBuche wurde auf Basis von [14], [15] und [11] erarbeitet.

Die Vorläufer der heutigen Laub- und Nadelbäume bildeten die Farne, die Schachtelhalm- und die Bärlappgewächse vor 299 Millionen Jahren. Nadelhölzer unterscheiden sich von diesen Gewächsen u. a. durch die Ausbildung von Samen und durch Bilden eines Stammes aus Lignin und Markstrahlen und erreichten vor etwa 200 Millionen Jahren ihre größte Artenvielfalt. Vor ca. 60 Millionen Jahren kam mit den Bedecktsamern eine weitere Gruppe hinzu, welche durch die Inanspruchnahme ihres benötigten Raumes die vorherrschende Dominanz der Nadelhölzer schwächte. Die bedeutendsten Unterklassen bilden hierbei die heute wichtigsten Laubholzgewächse, wie die Buchengewächse, die Birkengewächse, die Nussbäume, sowie die Ulmen und die Maulbeergewächse. Heute gibt es auf der Welt etwa 25.000 bis 30.000 Holzarten, von denen 3.000 bis 5.000 für gewerbliche Zwecke geeignet sind. Hierbei ist eine weitaus größere Vielfalt bei den Laubhölzern gegeben, bei denen weltweit 40- bis 50-mal so viele Arten bekannt sind als bei den Nadelhölzern.

Grundsätzlich kann bei den Holzarten eine Unterscheidung zwischen Weich- und Hartholz vorgenommen werden. Die Einordnung erfolgt hierbei über die Darrdichte des Holzes, wobei die Grenze der beiden Zuordnungsklassen bei 550 kg/m^3 [16] liegt. Die heimischen Nadelhölzer sind bis auf wenige Ausnahmen den Weichhölzern zuzuschreiben. Die überwiegende Anzahl der einheimischen Laubhölzer sind dem Hartholz zuzuordnen und werden in weiterer Folge ab einer Darrdichte von 550 kg/m^3 als Hartlaubholz bezeichnet.

Der Aufbau des Holzes kann grundsätzlich in fünf Strukturebenen unterschieden werden:

- Molekularebene (Elemente und Moleküle)
- Nanoebene (Zellwandaufbau)
- Mikroebene (verschiedene Zellarten und deren Verbindung)
- Makroebene (mit freiem Auge sichtbare Struktur)
- Stammebene (Lage im Stamm)

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Holzarten beruhen vor allem auf den in Mikro- und Makroebene entstehenden unterschiedlichen Struktur, weshalb auf diese im Folgenden näher eingegangen wird.

Mikroebene

Die Nadelhölzer weisen, wie man Abbildung 2-1 entnehmen kann, einen einfachen und regelmäßigen Holzaufbau auf. So setzt sich ihr Gewebe weitgehend nur aus 2 Zellarten zusammen: Den Tracheiden und den Parenchymzellen. Hierbei sind die Tracheiden innerhalb des Holzes für die Wasserleitung und die Festigkeit verantwortlich und die Parenchymzellen für die Speicherspeicherung. Die Holzstrahlen durchziehen den Holzkörper als schmale Bänder in radialer Richtung und sind für die Stoffleitung und Speicherung zuständig. Diese bestehen entweder ausschließlich aus Parenchymzellen oder auch noch zusätzlich aus Quertracheiden. Durch das Auseinanderweichen der Parenchymzellen entsteht bei vielen Nadelholzarten zusätzlich noch im Spätholz ein dreidimensionales Netz von Harzkanälen, welche innen mit harzausscheidenden Epithelzellen ausgekleidet sind. Dieses Harz dient der Abschottung von Wunden bei Insekten- und/oder Pilzbefall.

Laubhölzer zeigen in ihrem Aufbau eine größere Vielfalt als Nadelhölzer. Hier existieren keine Gewebetypen, welche Doppelfunktionen zu erfüllen haben, weshalb weitere Zellelemente wie die Gefäße und die Libriformfasern hinzukommen. Die Gefäße übernehmen hierbei die Wasserleitung und die Libriformfasern gemeinsam mit den Fasertracheiden bilden das Festigungsgewebe. Die Parenchyme übernehmen auch hier die Speicherung der Nährstoffe, wobei deren Anteil deutlich höher ist als bei den Nadelhölzern. Die Zusammensetzung der Holzstrahlen variiert bei den Laubhölzern im Gegensatz zu den Nadelhölzern sehr stark. Die Fasern (Fasertracheiden und Libriformfasern) bilden den Hauptanteil bei den meisten Laubholzarten und bestimmen je nach Anteil an der Holzmasse weitestgehend die Rohdichte sowie die Festigkeitseigenschaften.

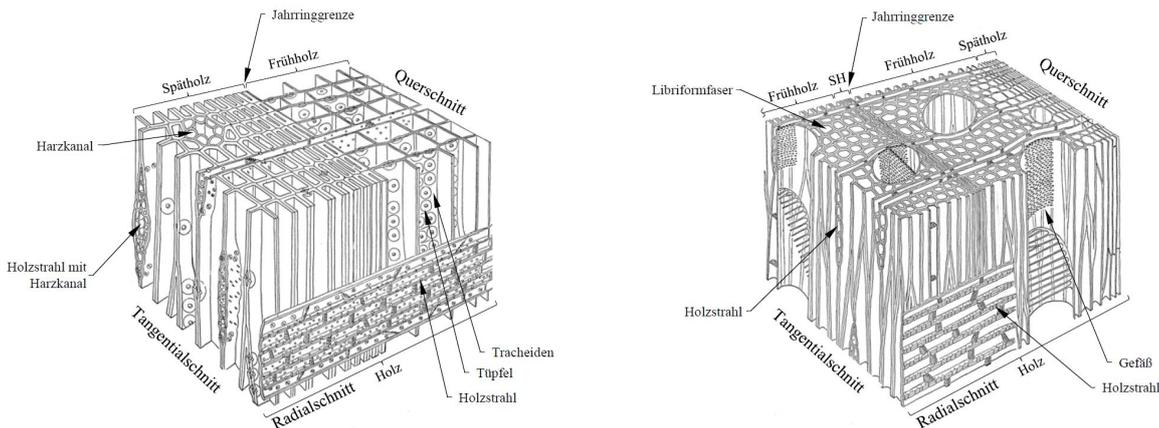
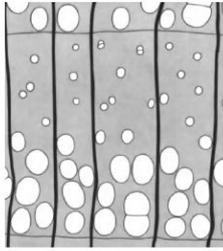
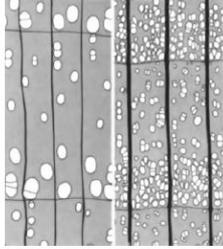
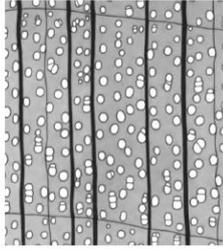


Abbildung 2-1 Exemplarische Darstellung der Holzstruktur auf Mikroebene eines Nadel- und eines Laubholzes links: Querschnitt einer Lärche (Nadelholz); rechts: Querschnitt einer Birke (Laubholz); aus [9] übernommen von [10]

Makroebene

Die Makroebene ist die mit bloßem Auge oder mit Lupenvergrößerung erkennbare Struktur des Holzes. Sie wird bestimmt durch die Aufbaucharakteristik, Anordnung, Form und Größe der Gewebe. Hier zählen unter anderem auch die Jahrringe des Holzes hinzu, welche den jährlichen Zuwachsraten in Gebieten mit ausgeprägten Jahreszeiten entspricht. Bedingt durch die unterschiedliche Art der Zellen zu Beginn und zum Ende der Vegetationsperiode wird hier in Früh- und Spätholz unterschieden. Das Spätholz dient hierbei der Festigung des Holzes, weshalb dieses auch eine höhere Rohdichte und Festigkeit besitzt. Daraus resultieren auch dementsprechende Änderungen der mechanischen Eigenschaften in den jeweiligen Jahrringabschnitten. Bei den Laubhölzern werden aufgrund der unterschiedlichen Anordnung und Größe der Gefäße über die Jahrringbreite drei Gruppen unterschieden: Ringporige, zerstreutporige und halbringporige Hölzer. (vgl. Abbildung 2-2) Zerstreutporige Hölzer zeichnen sich dadurch aus, dass über die gesamte Jahrringbreite die Gefäße zirka gleich groß und gleichmäßig verteilt sind. Im Gegensatz dazu beginnt das Frühholz bei den ringporigen Hölzern mit auffallend großen Gefäßen, welchen kleinere Spätholzgefäße folgen. Halbringporige Holzarten nehmen eine Mittelstellung ein.

Anordnung	Frühholz	Spätholz	Abbildung *	Beispiele
ringporig (Jahringgrenze deutlich)	besonders weite und zu einem ein-, bis mehrreihigen Ring angeordnete Gefäße	sehr viele kleine und enge Gefäße; mehr oder weniger übergangslos zum Frühholz		Edelkastanie, Esche, Eiche, Robinie
halbringporig (Jahringgrenze noch deutlich)	Gefäße reichlicher oder größer als im Spätholz, Durchmesser zum Spätholz hin i. d. R. abnehmend	Gefäße spärlicher oder mit geringerem Durchmesser als im Frühholz		Kirschbaum, Nussbaum, einige tropische Holzarten
zerstreutporig (Jahringgrenze oft undeutlich)	über den gesamten Jahrring wenige oder keine Unterschiede hinsichtlich der Verteilung und Größe der Gefäße			Pappel, Birke, Rotbuche

* alle Abbildungen aus (Grosser, 1977)

Abbildung 2-2 Einteilung der Laubhölzer in Abhängigkeit der Porigkeit auf Makroebene; aus [9], [11], Abbildungen aus [13]

Die in dieser Arbeit untersuchten Holzarten Buche und Birke sind den zerstreutporigen Hölzern zuzuordnen.

Birke

Die Birke gehört zu den ältesten Bäumen Europas. Aufgrund ihrer schwachen Konkurrenzfähigkeit in den gemäßigten Zonen ist ihr Anteil am österreichischen Ertragswald jedoch sehr gering. In der Forstwirtschaft werden Birken zudem aufgrund ihrer ungünstigen Eigenschaft „Peitschen“ frühzeitig entnommen. Dieses „Peitschen“ ist auf ihre langen, herabhängenden und dünnen Äste zurückzuführen, durch die sie umliegende junge Bäume bei starkem Wind beschädigen und somit deren Wipfeltrieb abtöten können. Birken sind jedoch auf der gesamten Nordhalbkugel zu finden und in Europa besonders in den Wäldern Skandinaviens, des Baltikums und Russlands häufig anzutreffen. In Österreich wachsen in freier Natur vier von rund 60 Birkenarten. Dies sind die Zwergbirke, die Strauchbirke, die Moorbirke und die Sand- bzw. Hängebirke. Die Birke benötigt sehr viel Licht, weshalb sie an beschatteten Orten verschwindet und deshalb häufig an Waldlichtungen und Waldrändern anzutreffen ist. Bedingt durch den hohen Lichtbedarf benötigt sie auch sehr viel Wasser und ist somit häufig in Moor- und Bruchwäldern beheimatet. Die Birke ist aufgrund dieser Eigenschaften und ihrer Samen, welche mit dem Wind sehr weit fliegen, ein Pioniergehölz. Sie besitzen eine geringe Lebensdauer mit jedoch schnellem Wachstum und haben somit die Aufgabe einen Wald vorzubereiten. In ihrem lichten Schatten können sich dann geduldigere Baumarten wie Buchen oder Eichen ansiedeln, wodurch mit ihrer Hilfe ein Mischwald entsteht.

Buche

Die Buche ist nach der Fichte mit einem Anteil von 10 % an der Waldfläche die zweithäufigste Baumart in Österreich. Hier kommt sie auf 330.000 ha als Leitbaumart vor, ist jedoch viel häufiger beigemischt u. a. in Fichten-Tannenwäldern anzutreffen. Die Buche zeichnet sich durch eine sehr hohe Schattentoleranz aus und kann deswegen auch lange Zeit in der Kraut- und Strauchschicht gut wachsen. Diese Schattentoleranz nimmt jedoch mit dem Alter ab. In Österreich dominiert die Buche vor allem in tieferen Lagen, so liegen 70 % ihres Vorkommens zwischen 300

und 900 m ü. A. Bei der Verwendung der Buche in der Bauindustrie bestand eine große Herausforderung darin, das ausgeprägte Quell- und Schwindverhalten in den Griff zu bekommen. Dieses wirkt sich insbesondere auf die Verklebung aus, weshalb eine funktionierende Verklebung erst nach langjähriger Forschung sichergestellt werden konnte. Die erste allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-679 (2013) [17] erfolgte im Jahre 2013 für eine dauerhafte Verklebung im Einsatzgebiet der Nutzungsklasse 1.

BauBuche

BauBuche ist ein Bauprodukt der Firma Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH. Es ist ein Furnierschichtholz bestehend aus Buchen-Starkfurnieren. Hierbei wird bei der Herstellung zunächst der natürliche Werkstoff Buche in Furniere mit 3 mm Stärke geschält und entsprechend sortiert, sodass Fehlstellen im Material entfernt bzw. deutlich verteilt werden. Anschließend werden diese Furniere wieder miteinander verklebt, womit ein hochleistungsfähiges Bauprodukt entsteht. Die Firma Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH besitzt seit 2013 zwei Technische Bewertungen für dieses Bauprodukt. Dies ist zum einen die Allgemeine Bauartgenehmigung Z-9.1-838 [18] für BauBuche Platte S und Q. Bei der Platte S werden die Buchenfurniere stets mit Faserrichtung in die äquivalente Richtung verklebt. Im Gegensatz dazu werden bei der Platte Q auch Furniere mit Faserrichtung in Querrichtung verklebt, um eine höhere Tragfähigkeit in dieser Richtung zu erreichen. Die zweite Bewertung ist die Europäische Technische Bewertung (ETB bzw. in Englisch ETA) ETA-14/0354 [5] für die BauBuche Träger (GL75). Bei diesem Bauprodukt werden äquivalent zu BauBuche Platte S die Furniere ebenfalls ausschließlich in Längsrichtung verklebt.

2-2 SCHRAUBEN FÜR ANWENDUNGEN IN LAUBHOLZ

Verbindungen mit Holzbauschrauben stellen eine sehr flexible und wirtschaftliche Möglichkeit zur Fügung von Holzbauteilen dar. Bei der Verwendung dieser Verbindungen ist jedoch eine einfache und ordnungsgemäße Applikation der Schrauben sicherzustellen.

Gemäß [19] sind dabei die folgenden Anforderungen an die verwendeten Schrauben zu stellen:

- Eine entsprechende Schraubenspitze, um ein schnelles und sauberes Eingreifen des Gewindes sicherzustellen, was insbesondere bei selbstbohrenden Holzbauschrauben und bei Applizierung der Schrauben ohne vorzubohren wichtig ist,
- ein Verhindern einer Überbeanspruchung der Schrauben auf Torsion,
- ein möglichst geringer Eindrehwiderstand, um einerseits das Versetzen der Schrauben durch handelsübliche Schraubgeräte zu ermöglichen, sowie andererseits eine zu starke Temperaturentwicklung im umgebenden Holzwerkstoff zu verhindern, und
- die Minimierung von Querkräften, um eine übermäßige Rissinitierung und –ausbreitung bis zum Aufspalten der Bauteile zu unterbinden.

Bei der Verwendung von Holzbauschrauben in Laubholz stellt insbesondere die Anforderung nach einem Verhindern der Überbeanspruchung auf Torsion eine Herausforderung dar. Gemäß EAD 130118-00-0603 (2016) [20] ist hierfür ein Verhältnis zwischen dem charakteristischen Wert des maximalen Torsionswiderstandes und dem Mittelwert des maximalen Eindrehwiderstandes der Schraube in das Holzprodukt, $f_{tor, k} / R_{tor, mean}$, ein Faktor von mindestens 1,5 einzuhalten. Der Eindrehwiderstand der Schraube steigt jedoch mit zunehmender Rohdichte des Holzproduktes, weshalb aus diesem Grund der Grenzwert von 1,5 in den überwiegenden Fällen nicht eingehalten werden kann und somit um die Spaltneigung des Holzes zu verringern vorgebohrt werden muss. Diese Notwendigkeit verringert jedoch aus Sicht der Ausführenden die Attraktivität dieser Verbindung, da dieser zusätzliche Arbeitsschritt und die damit verbundenen längere Arbeitszeit die Wirtschaftlichkeit dieser Ausführung mindern.

Die Entwicklung einer zuverlässigen selbstbohrenden Holzbauschraube für die Applikation in Holzbauprodukten hoher Rohdichte stellt daher ein großes wirtschaftliches Interesse dar, weshalb im Rahmen des Forschungsprojektes „hardwood_SCREWS“ an so einer Entwicklung gearbeitet wurde. Die daraus hervorgegangene Schraubenentwicklung wird unter dem Namen RAPID® Hardwood der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH gehandelt, in der europäisch technischen Bewertung ETA-12/0373 [21] geregelt und auch in den Versuchen dieser Arbeit verwendet. Der wesentlichste Unterschied dieses Schraubentypes etwa gegenüber der handelsüblichen Referenzschraube RAPID®, ebenfalls von der Firma Schmid Hainfeld GmbH, ist ein um 17 % stärkerer Gewindekerndurchmesser. (vgl. Abbildung 2-3) Weitere für die Anwendung in Laubholz geregelten Schrauben sind jene nach ETA-11/0190 [22] der Firma Adolf Würth GmbH & Co KG und jene nach ETA-11/0030 [23] der Firma Rotho Blaas s.r.l.

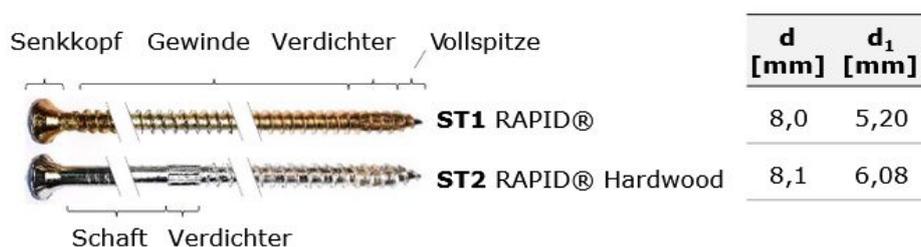


Abbildung 2-3 Gegenüberstellung der beiden Schraubentypen RAPID® Hardwood und RAPID® der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH, aus [19]

Bei den u.a. in [19] zusammengefassten, experimentellen Untersuchungen konnte beim Schraubentyp RAPID® Hardwood ein um 52 % höherer Torsionswiderstand und eine um 36 % höhere Stahlzugtragfähigkeit gegenüber dem Schraubentyp RAPID® festgestellt werden, was insbesondere auf den erwähnten, höheren Gewindekerndurchmesser zurückzuführen ist. Bei den Ausziehfestigkeiten ohne vorherigem Vorbohren konnten bei einem Achs-Faser-Winkel von $\alpha = 90^\circ$ keine nennenswerten Unterschiede erkannt werden, wohingegen für $\alpha = 0^\circ$ die Ausziehfestigkeiten des

Schraubentypen RAPID® Hardwood im Mittel um 10 % niedriger lagen. Als Grund wird hierbei die deutlich höhere Verdichtung bei nicht vorgebohrter Applikation in Folge des stärkeren Gewindekerndurchmessers gesehen. Bei einer Applikation mit Vorbohren verschwindet dieser Unterschied bei den Ausziehfestigkeiten jedoch.

2-2.1 APPLIKATION VON HOLZBAUSCHRAUBEN IN LAUBHOLZ

Bei der Herstellung der Verbindungen in Laubholz ist laut Eurocode 5 [6] bei Applikation der Schrauben vorzubohren. Die Vorbohrung soll dabei im Bereich des Schaftes den gleichen Durchmesser wie der Schaft und im Bereich des Gewindeteiles 70% des Schaftdurchmessers aufweisen. Diese Regelungen gelten für Schrauben mit einem Durchmesser größer als 6 mm. Laut ETA-12/0373 [21] können Schrauben des Typs RAPID Hardwood mit einem Gewindaußendurchmesser von $d = 8$ mm ohne Vorbohren in Furnierschichtholz aus Buche oder ähnlichen Produkten aus Laubholz getrieben werden. Die übrigen Schraubentypen mit $5 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$ müssen jedoch vorgebohrt werden. Bei Schrauben mit Längen über 800 mm wird eine Führungsbohrung von $5 d$ empfohlen.

Da die Vorbohrung mit kleinerem Durchmesser als der Nenndurchmesser der Schraube erfolgt, besitzt der Bohrer eine größere Schlankheit als die Schraube. Aus diesem Grund ist das ausgeführte Bohrloch meist verzogen und die Schraube biegt sich entsprechend dem Bohrloch. Ein Vorbohren ist jedoch von Nöten, um die erhöhte Spaltneigung bei Laubhölzern mit ihrer höheren Rohdichte zu verringern und ein Abdrehen der Schrauben beim Einbringen zu verhindern. In [19] wird berichtet, dass sich der Eindrehwiderstand bereits durch ein Vorbohren mit dem Gewindekerndurchmesser der in dieser Arbeit verwendeten Schrauben der Firma Schmid Hainfeld GmbH der Produktlinie „RAPID® Hardwood“ halbiert. Obwohl dieser weitere Arbeitsschritt oft aus wirtschaftlichen Gründen unerwünscht ist, wird insbesondere das Versetzen der Schrauben bei der Fertigung sehr erleichtert.

2-2.2 SCHRAUBENGEOMETRIE

Eine Holzbauschraube besteht im Wesentlichen aus einem Schraubenkopf inkl. Antrieb, einem Schaft, einem Schraubengewinde und einer Schraubenspitze. Je nachdem ob das Gewinde nur über einen Teil der Schraubenlänge reicht oder vom Kopf der Schraube bis zur Spitze, spricht man bei ersterem von Teilgewindeschrauben und bei letzterem von Vollgewindeschrauben.

Für die Berechnung der Ausziehfestigkeit von Schrauben wird die effektive Gewindelänge l_{ef} benötigt. In der vorliegenden Arbeit wird bei diesem Wert von der nominalen Gewindelänge, das ist jene Gewindelänge die in das Holz appliziert ist, (in Abbildung 2-4 äquivalent mit der Gewindelänge l_g) die Länge der Schraubenspitze l_{tip} abgezogen. Bei Holz-Holz-Verbindungen muss die effektive Gewindelänge getrennt für die beiden Holzbauteile berechnet bzw. berücksichtigt werden.

Durch mehrere Forschungsarbeiten wurde bereits versucht, einen Wert für l_{tip} festzulegen. Ein Ansatz für l_{tip} liefert die Europäische technische Bewertung [21] der in dieser Arbeit benutzten Schrauben. Hier wird für Schrauben des Nenndurchmessers 8 mm ein Wert von 8,2 mm vorgeschlagen. Pirnbacher [24] führte Versuche mit Fichtenholz durch und legte einen Wert für l_{tip} von 1,17 mal dem Nenndurchmesser d der Schraube fest. Hübner [12] führte Versuche mit Eschenholz durch und legte den Wert für l_{tip} mit dem 1,1-fachen Nenndurchmesser fest. In Westermayer [25], diese Arbeit wird in Abschnitt 2-4.5.8 näher behandelt, wurden ebenfalls Untersuchungen hierfür durchgeführt, wobei die Länge von l_{tip} mit dem einfachen Außendurchmesser der Schraube d als gute Annäherung beschrieben wird. Bei sämtlichen Berechnungen dieser Arbeit wurde daher ebenfalls dieser letztgenannte Wert für l_{tip} herangezogen.

Unter der Einbindetiefe l_{emb} versteht man die Tiefe, wie weit der Gewindebeginn im Material versenkt ist. Ein Verdichter kann sich hinter der Spitze im Gewinde befinden, um bei selbstbohrenden Schrauben das Bohrmaterial zu verdichten, um so den Eindrehwiderstand zu reduzieren. Der Reibschaf hat die Funktion den Freilauf des nachlaufenden Schaftbereiches sicherzustellen, sodass eine Minderung des Eindrehwiderstandes erreicht wird. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Schrauben des Typs RAPID® Hardwood ist statt des klassischen Reibschafes der in Abbildung 2-4 dargestellten Schraube ein zweiter Verdichter nach dem Ende des Gewindes angebracht.

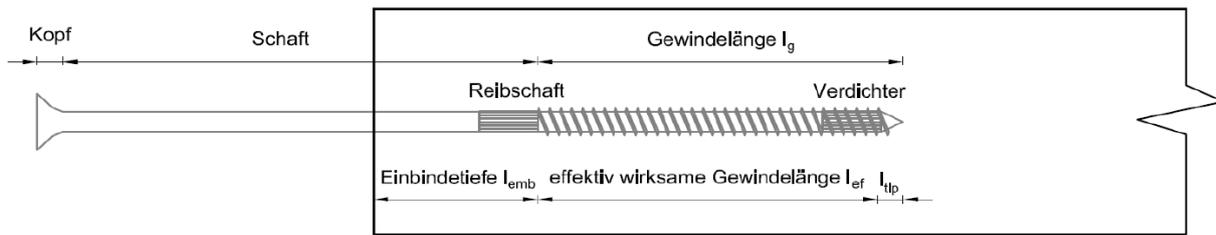


Abbildung 2-4 *Bezeichnungen der Schraubengeometrie anhand einer in einem Holzbauteil eingedrehten Holzbauschraube aus [26]*

2-3 ANFORDERUNGEN AN VERBINDUNGEN

Der nachfolgende Abschnitt behandelt die grundlegenden Anforderungen an Verbindungen im Holzbau und wurde basierend auf den Arbeiten [27], [26] und [28] ausgearbeitet. Bei der Konstruktion eines Tragwerkes mit Holz werden die Abmessungen der einzelnen Bauteile in vielen Fällen nicht von den zu übertragenden Kräften bestimmt, sondern von den Verbindungen der einzelnen Bauteile. Jede Verbindung im Holzbau wird hierbei nach den drei wesentlichen Kriterien Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität bewertet. Bei der Tragwerksplanung steht meist die Tragfähigkeit der Verbindung im Vordergrund, obwohl alle drei Kriterien von hoher Bedeutung sind. Die Steifigkeit einer Verbindung spielt insbesondere bei Verformungsberechnungen oder bei Stabilitätsproblemen von Bauteilen eine sehr wichtige Rolle. Die Duktilität ist ein wichtiges Maß für die Möglichkeit einer Versagensvorhersage und in der Bemessung des Tragwerkes bei einer Erdbebenbeanspruchung.

2-3.1 TRAGFÄHIGKEIT

2-3.1.1 Allgemeines

Die Tragfähigkeit einer Verbindung gibt den Widerstand an, welche die Verbindung gegenüber äußeren Belastungen aufbringen kann. Sie wird über den charakteristischen Wert R_k angegeben, welcher i.d.R. einen 5%-Fraktilwert eines Merkmals darstellt, der z. B. mittels einer Auswertung von Versuchen bestimmt wird. Die Tragfähigkeit wird insbesondere durch die Festigkeit der zu verbindenden Holzbauteile begrenzt und somit von der Holzart, der Holzrohddichte und Strukturstörungen im Holz, wie Äste oder Schwindrisse, beeinflusst. Weitere Einflussparameter sind die Herstellungsqualität der Verbindung und die Eigenschaften der Verbindungsmittel, wie die Zugfestigkeit oder die Fließgrenze.

2-3.1.2 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad η gibt das Verhältnis der Tragwiderstände des Bauteils mit der Verbindung zur Tragfähigkeit des Bauteils ohne Verbindung an. Er ist somit eine wichtige Kennzahl, um die Leistungsfähigkeit einer Verbindung zu bewerten und sollte so hoch wie möglich sein. Da Verbindungen jedoch stets Umlenkungen der Kräfte bzw. zusätzliche Beanspruchungen in den zu verbindenden Bauteilen verursachen, liegt der Wirkungsgrad der meisten Verbindungen unter 1,0. Lediglich bei Verklebungen kann ein Wert von 1,0 erreicht werden.

2-3.2 STEIFIGKEIT

Die Steifigkeit gibt als Kehrwert die Nachgiebigkeit einer Verbindung unter mechanischer Beanspruchung an. Die Steifigkeit der Verbindungen ist relevant für die Verformungsberechnung von Tragwerken. Bei statisch unbestimmten Systemen, bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen und bei einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung beeinflussen sie zudem auch die Schnittgrößen. Wird eine Verbindung unbeabsichtigt zu steif ausgeführt, führt das zu einer ungeplanten Anziehung von Kräften zu dieser Verbindung und somit zu einer größeren Kraft, die diese Verbindung übertragen muss. Weist die Verbindung jedoch eine geringe Steifigkeit auf, kann das zu größeren Verformungen des Bauwerkes führen und somit das Erscheinungsbild beeinträchtigen oder zu Schäden an Konstruktionen geringeren Ranges führen.

Die Steifigkeit einer Verbindung wird über eine Auswertung von Kraft-Weg-Diagrammen bestimmt. Hierbei wird sie über den Verschiebungsmodul K , welcher die Steigung der Tangente an den linear-elastischen Bereich der Arbeitslinie angibt, definiert und quantifiziert. Bei dem Verschiebungsmodul wird zwischen K_{ser} für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und K_u für den Grenzzustand der Tragfähigkeit unterschieden. Bei K_u handelt es sich dabei lediglich um einen Rechenwert, der in den aktuellen Normenwerken [6] mit zwei Drittel von K_{ser} definiert ist.

2-3.3 DUKTILITÄT

Die Duktilität beschreibt das plastische Verformungsvermögen von Verbindungen und spielt im Holzbau eine nicht zu verachtende Rolle, da das Holz bei Biegezug-, Längszug-, Querzug- und Schubbelastungen ein sehr sprödes Versagensverhalten aufweist. Dieses Verhalten ist bei Konstruktionen im Bauwesen jedoch nicht erwünscht. Ein

Versagen soll sich hier durch bereits beobachtbare größere Verformungen ankündigen und nicht schlagartig geschehen, weshalb insbesondere auch für Erdbebenbemessungen hohe Duktilitätswerte erforderlich sind. Dieses Verhalten kann im Holzbau lediglich über eine entsprechende Duktilität der Verbindungen erreicht werden, was im Allgemeinen durch die Verwendung von dahingehend ausgelegten, metallischen Verbindungsmitteln gewährleistet wird. Abbildung 2-5 zeigt anhand eines Last-Verschiebungsdiagrammes das Verhalten eines optimalen Verbindungsmittels, bei dem der Bruch erst nach einer größeren plastischen Verformung auftritt. Das darin gezeigte, statische Duktilitätsmaß D_s , welches das Verformungsverhalten einer Verbindung beschreibt, ist das Verhältnis aus der Bruchverformung w_u und elastischer Verformung w_y .

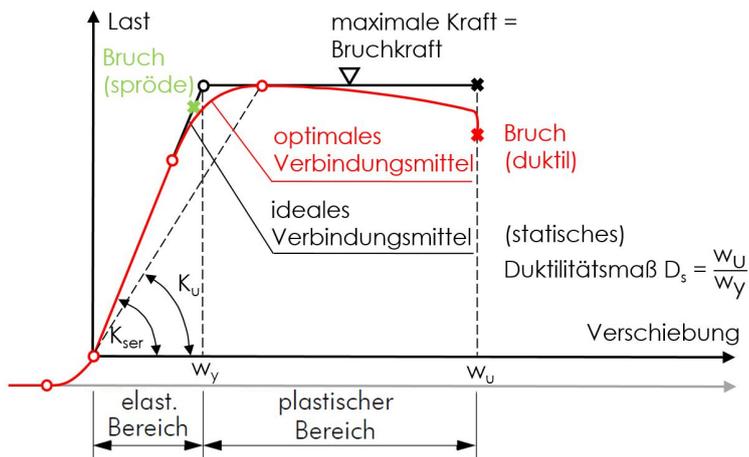


Abbildung 2-5 Last-Verformungskurve eines optimalen Verbindungsmittels mit aufgetragenem Duktilitätsmaß D_s , sowie Definition der Verschiebungsmodule K_{ser} und K_u ; Abbildung überarbeitet aus [28]

Ein hohes Duktilitätsmaß hat dabei noch weitere positive Auswirkungen. So wird durch eine hohe Duktilität der Verbindung eine mögliche Schnittkraftumlagerung ermöglicht, wodurch sich in der Regel eine höhere Belastbarkeit und somit ein besseres Gesamttragverhalten des Tragwerkes ergeben. Weiters wird durch eine größere Duktilität eines einzelnen Verbindungsmittels ein besseres Tragverhalten einer Gruppe von Verbindungsmitteln ermöglicht, da durch die plastischen Verformungen der Verbindungsmittel Einwirkungen gleichmäßiger aufgeteilt und auch Zwängungskräfte abgebaut werden. Bei einem Verbindungsmittel sollten alle drei Kenngrößen so groß als möglich sein. Im Holzbau besitzen jedoch Holzbauschrauben zwar eine hohe Festigkeit bei axialer Beanspruchung und eine große Steifigkeit, jedoch nur ein geringes duktiles Verhalten.

2-4 ANSCHLÜSSE IN HIRNHOLZ

2-4.1 ALLGEMEINES

Bei axial beanspruchten Anschlüssen in Hirnholz erfolgt eine Krafteinleitung der Verbindung in Faserrichtung des Holzbauteils. Für diese Verbindungsart gibt es mehrere Ausführungsmöglichkeiten. Eine Möglichkeit der Ausführung ist, dass die Krafteinleitung über in das Hirnholz eingeklebte Gewindestangen oder Stahlbleche erfolgt. Eine weitere Möglichkeit ist es, dass man Holzschrauben für die Ausführung verwendet, worauf im Folgenden eingegangen wird. Dabei handelt es sich stets um stabförmige Bauteile, welche axial belastet werden. Der Hirnholzanschluss ist hierbei für die Übertragung von Zugkräften verantwortlich. Eine Beanspruchung auf Druck wird vorwiegend über Kontakt in der Stirnfläche übertragen, weshalb die Hirnholzverschraubung in diesem Fall lediglich der Lagesicherung dient.

2-4.2 DESIGN UND HERSTELLUNG VON HIRNHOLZANSCHLÜSSEN

In [29] werden verschiedene Verbindungsmöglichkeiten zugbeanspruchter Bauteile mit Holzschrauben vorgestellt und diskutiert. Hier wird betont, dass bei Hirnholzverschraubungen durch die stetige Kraftübertragung zwischen Schraube und Holz ein relativ günstiger Kraftfluss bei Krafteinleitungen parallel zur Faser möglich ist. Um die volle Leistungsfähigkeit einer solchen Verbindung zu erreichen, sind demnach ein weitgehend ungestörter und stetiger Kraftfluss zwischen Holz und Schraube anzustreben. Des Weiteren sollte die Beanspruchung des Holzes vorwiegend parallel zur Faser und jene der Schraube axial erfolgen, um die höchste Leistungsfähigkeit zu erreichen.

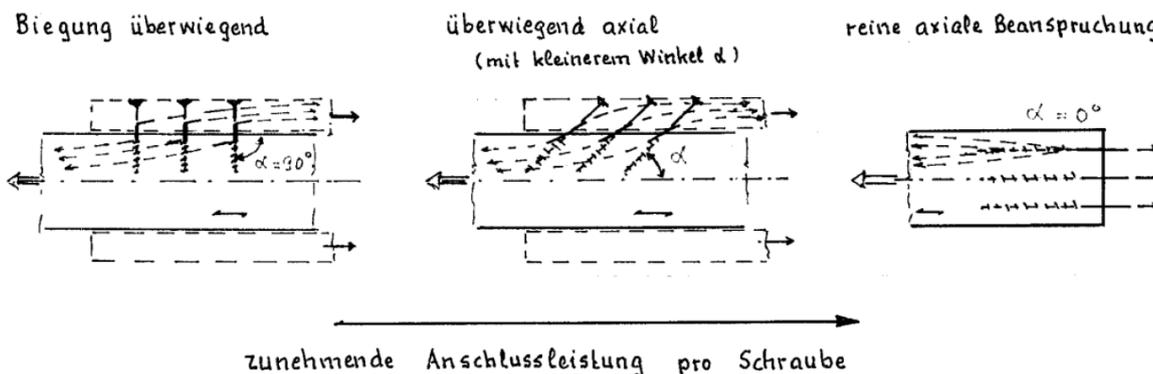


Abbildung 2-6 Veranschaulichung des günstigen Kraftflusses von Hirnholzverschraubungen bei $\gamma = 0^\circ$ im Vergleich zu geneigt angeordneten Schrauben; aus [29]

Hirnholzverschraubungen können ihre Vorteile am besten bei auf Zug beanspruchten Bauteilen zur Geltung bringen. Insbesondere bei Laubholzkonstruktionen mit ihren bereits angesprochenen geringeren Querschnittsdimensionen haben Hirnholzanschlüsse den Vorteil, dass bei dieser Verbindung im Vergleich zu geneigt angeordneten Schrauben die Einzelschraube ein weitaus geringeres Holzvolumen beansprucht. Ein Nachteil ist jedoch, dass durch die geringe Scherfestigkeit des Holzes in Faserrichtung wesentlich größere Einschraubtiefen im Vergleich zu geneigt angeordneten Schrauben erforderlich sind.

Hirnholzverschraubungen weisen generell ein sehr steifes Verbindungsverhalten auf und besitzen eine sehr geringe Duktilität. Diese Verbindungen versagen sowohl beim Herausziehen der Schraube als auch beim Schraubenbruch vergleichsweise spröde.

Wie in Abschnitt 2-3 bereits erläutert, ist eine Anforderung an eine Verbindung jedoch eine ausreichende Duktilität sicherzustellen. In [19] etwa wird ein Konzept vorgestellt, um diese Anforderung zu erfüllen. Es wurde hierbei der Ansatz gewählt, den Anschluss in zwei Bereiche zu unterteilen: in einen bereits werksseitig vormontierten Holzanschluss und in einen Montagestoß zum Fügen der Bauteile vor Ort. Der Hirnholzanschluss, konzeptioniert mit einer Kopfplatte aus Stahl, erlaubt eine hohe Anschlusskapazität und –steifigkeit. Die Duktilität der Verbindung wird mit einem Stahl-Stahl-Montagestoß sichergestellt, welcher hier als Bolzenverbindung ausgeführt ist. Aufgrund des

spröden Versagens der Hirnholzverschraubung ist diese gegenüber der auf duktiles Versagen zu bemessenden Stahl-Stahl-Verbindung mit einer Überkapazität ausgestattet.

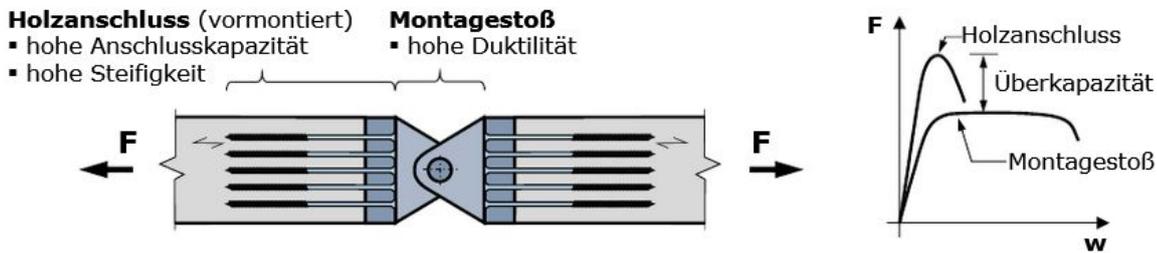


Abbildung 2-7 Konzept eines Hirnholzanschlusses: Holzanschluss mit axial-beanspruchten Holzbauschrauben und Stirnplatte und duktil versagender Stahl-Stahl Montagestoß, aus [19]

2-4.3 VERSAGENSMECHANISMEN

2-4.3.1 Allgemeines

Der nachfolgende Abschnitt behandelt die Versagensmechanismen, welche prinzipiell bei Hirnholzverschraubungen auftreten können und wurde basierend auf [26], [15] und [28] ausgearbeitet.

Bei Hirnholzverschraubungen mit rein axial beanspruchten Holzschrauben können mehrere Versagensszenarien auftreten. Diese Szenarien können einerseits eingeteilt werden in Versagenstypen bei welchen das Verbindungsmittel versagt und somit ein Stahlversagen vorliegt. Andererseits kann durch lokale Überbeanspruchungen im Verbindungsbereich ein Versagen im Holz auftreten, wodurch wiederum ein Holzversagen vorliegt. Die möglichen Versagensszenarien sind in Tabelle 2-1 aufgelistet.

Tabelle 2-1 Versagensmechanismen bei Hirnholzverschraubungen

Versagensmechanismus	Art des Versagens
Ausziehen der Schraube	Holzversagen
Stahlbruch der Schraube	Stahlversagen
Aufspalten	Holzversagen
Kopfdurchziehen	Holzversagen
Stabilitätsversagen der Schraube	Stahlversagen
Blockscheren	Holzversagen
Netto-Querschnittversagen	Holzversagen

Das Versagen des Netto-Querschnitts kann dadurch verhindert werden, dass bei der Bauteilbemessung auf eine lokal ausgeglichene Leistungsfähigkeit zwischen Verbindungsmittelgruppe und dem geschwächten Querschnitt geachtet wird, um somit Reserven für den geschwächten Nettoquerschnitt bereitzustellen. Dieser Nettoquerschnitt muss dabei auf Zugbeanspruchung nachgewiesen werden. Beim Kopfdurchziehen (Abbildung 2-8) kommt es zu einer lokalen Überschreitung der Holzfestigkeit im Bereich des Schraubenkopfes, wodurch es zu einem Einziehen des Kopfes in das Holz kommt. Beim Blockscheren kommt es im Gegensatz zum Nettobruch nur zu einem teilweisen Versagen im Holzquerschnitt. Im Bereich der Umrisslinie der Verbindungsmittelgruppe kommt es hier zu einem Herausscheren des von der Gruppe umschlossenen Holzvolumens längs zur Faser. Diese Versagensart kann durch die Wahl der richtigen Schraubenabstände verhindert werden.

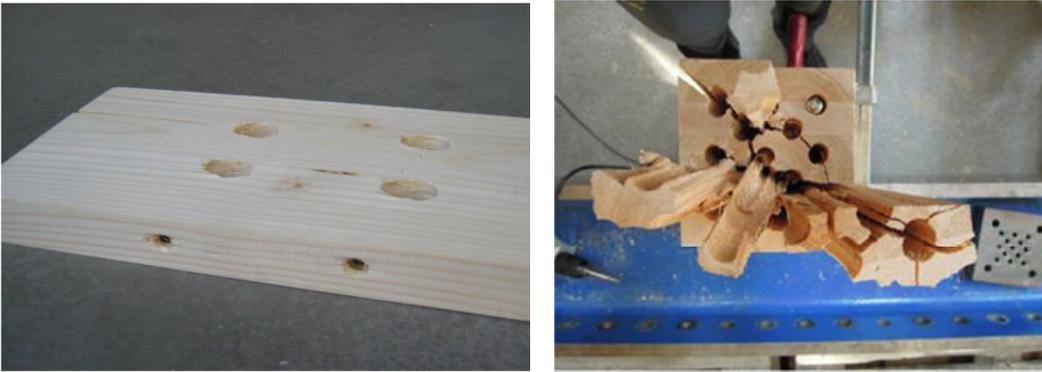


Abbildung 2-8 Versagensbilder; links: Kopfdurchziehen aus [28]; rechts: Blockscheren aus [15]

Bei axial zugbeanspruchten Hirnholzverschraubungen mit außenliegenden Stahlblechen zur Lasteinleitung, welche in dieser Arbeit untersucht werden, sind nicht alle angeführten Versagensmechanismen relevant bzw. maßgebend. So ist die Versagensart „Kopfdurchziehen“, bei der es bereits vor dem Versagen auf Herausziehen zu einem Einziehen des Schraubenkopfes in das Holz kommt, durch die außenliegenden Stahlbleche auszuschließen. Ein Stabilitätsversagen der Schrauben ist ebenfalls auszuschließen, wenn die Hirnholzverschraubung zentrisch auf Zug belastet wird und es so zu keiner axialen Druckbeanspruchung der Schrauben kommen kann.

Somit verbleiben für die untersuchten Hirnholzanschlüsse noch drei relevante Versagensmechanismen. Dies sind (i) der Stahlbruch der Schraube, (ii) das Ausziehen der Schraube und (iii) das Aufspalten des Holzes. Hierbei weisen (ii) das Ausziehen der Schraube und (i) der Stahlbruch der Schraube einen Zusammenhang auf. So wird das Ausziehen der Schraube durch eine Erhöhung der effektiven Gewindelänge bzw. der Eindringtiefe der Schraube verhindert, wodurch es in weiterer Folge zu einem Stahlbruch der Schraube kommt. Um den Stahlbruch der Schraube zu verhindern, muss wiederum die effektive Gewindelänge bzw. die Eindringtiefe der Schraube reduziert werden, wodurch in weiterer Folge die Verbindung durch ein Ausziehen der Schraube versagt. Diese Beziehung gilt natürlich nur falls kein anderes Versagen der Verbindung auftritt.

2-4.3.2 Stahlbruch der Schraube

Durch den sehr homogenen Aufbau des Werkstoffes Stahl sind seine Festigkeitseigenschaften sehr geringen Streuungen unterworfen. Ein Stahlbruch tritt auf, wenn die Belastung der Schraube ihre Zugtragfähigkeit $f_{\text{tens},k}$ überschreitet. Die Zugtragfähigkeit der Schrauben kann den jeweiligen technischen Unterlagen der Hersteller entnommen oder, wie im Zuge dieser Arbeit, anhand von Schraubenzugprüfungen gemäß ON EN 1383 [30] bestimmt werden.

2-4.3.3 Ausziehen der Schraube

Beim Ausziehen der Schraube kommt es zu einem Scherversagen des Holzes entlang des Gewindes der Schraube, wodurch die Schraube gemeinsam mit dem zwischen dem Gewinde liegenden Holz aus dem Tragelement gezogen wird. Für die Abschätzung des Ausziehwiderstandes einer Schraube wurden bereits viele Forschungsarbeiten durchgeführt, unter anderem von Hübner [12], der ca. 2600 Schraubenausziehprüfungen in Buchen-, Eschen- und Robinien-Brettschichtholz durchführte. Auf Basis eigener Daten und unter Einbeziehung der Untersuchungen aus Hübner [12] veröffentlichten Brandner et al. [31] ein Modell aufbauend auf Ringhofer [32] und Ringhofer et al. [33] zur Berechnung der Ausziehfestigkeit von Schrauben in Abhängigkeit der Gruppe der Holz Anatomie, des Achs-Faser-Winkels α , des Außendurchmessers d und der Rohdichte des Holzes.

$$f_{ax,mean} = f_{ax,ref,mean} \cdot k_{ax,mean} \cdot k_{sys,mean} \cdot \left(\frac{\rho_{mean}}{\rho_{ref,mean}}\right)^{k_{\rho}} \quad (2.1)$$

$$f_{ax,05} = f_{ax,ref,05} \cdot k_{ax,05} \cdot k_{sys,05} \cdot \left(\frac{\rho_{05}}{\rho_{ref,05}}\right)^{k_{\rho}} \quad (2.2)$$

$$f_{ax,ref,mean} = \begin{cases} 0,01400 \cdot \rho_{ref,mean}^{1,10} \cdot d^{-0,33} & \text{für Nadelholz} \\ 0,00310 \cdot \rho_{ref,mean}^{1,40} \cdot d^{-0,33} & \text{für ringporiges Laubholz} \\ 0,00042 \cdot \rho_{ref,mean}^{1,70} \cdot d^{-0,33} & \text{für zerstreutporiges Laubholz} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$f_{ax,ref,05} = \begin{cases} 0,0130 \cdot \rho_{ref,05}^{1,10} \cdot d^{-0,33} & \text{für Nadelholz} \\ 0,0029 \cdot \rho_{ref,05}^{1,40} \cdot d^{-0,33} & \text{für ringporiges Laubholz} \\ 0,0004 \cdot \rho_{ref,05}^{1,70} \cdot d^{-0,33} & \text{für zerstreutporiges Laubholz} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$k_{ax,mean} = \begin{cases} 1,0 & \text{für } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 0,75 \cdot k_{gap,mean} + \alpha \cdot \frac{1-0,75 \cdot k_{gap,mean}}{30} & \text{für } 0^\circ \leq \alpha < 30^\circ \end{cases} \quad (2.5)$$

$$k_{ax,05} = \begin{cases} 1,0 & \text{für } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 0,7 \cdot k_{gap,05} + \alpha \cdot \frac{1-0,75 \cdot k_{gap,05}}{30} & \text{für } 0^\circ \leq \alpha < 30^\circ \end{cases} \quad (2.6)$$

$$k_{gap,mean} = \begin{cases} 0,85 & \text{für BSP Schmalseite} \\ 1,0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$k_{gap,05} = \begin{cases} 0,90 & \text{für BSP Schmalseite} \\ 1,0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$k_{sys,mean} = \begin{cases} 1,00 & \text{für Vollholz; } n = 1 \\ 1,07 & \text{für BSP Seitenfläche; } n \geq 3 \\ 1,10 & \text{für BSH; } n \geq 5 \end{cases} \quad (2.9)$$

$$k_{sys,05} = \begin{cases} 1,00 & \text{für Vollholz; } n = 1 \\ 1,10 & \text{für BSP Seitenfläche; } n \geq 3 \\ 1,13 & \text{für BSH; } n \geq 5 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$k_\rho = \begin{cases} 1,10 & \text{für Nadelholz } 15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 1,25 - 0,05 \cdot d & \text{für Nadelholz } 0^\circ \leq \alpha < 15^\circ \\ 1,40 & \text{für ringporiges Laubholz } 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 1,70 & \text{für zerstreutporiges Laubholz } 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.11)$$

$f_{ax,mean}; f_{ax,05} \dots$	Mittelwert und 5-%-Quantil der Ausziehfestigkeit [kN/mm ²]
$f_{ax,ref,mean}; f_{ax,ref,05}$	Referenzwert des Mittelwertes und des 5-%-Quantiles der Referenz-Ausziehfestigkeit [kN/mm ²]
$\rho_{mean}; \rho_{05} \dots$	Mittelwert und 5-%-Quantil der Rohdichte des betrachteten Holzes [kg/m ³]
$\rho_{ref,mean}; \rho_{ref,05} \dots$	Referenzwert des Mittelwertes und des 5-%-Quantiles der Rohdichte [kg/m ³]; mit $\rho_{ref,mean} = 451, 644$ und 621 [kg/m ³] für Nadelholz, ringporiges Laubholz und zerstreutporiges Laubholz; CV[ρ_{ref}] = 8%
$k_{ax,mean}; k_{ax,05}$	Koeffizient zur Berücksichtigung des Winkels α auf die Ausziehfestigkeit
$k_{gap,mean}; k_{gap,05}$	Koeffizient zur Reduktion des Ausziehwerstandes bei Positionierung der Schrauben in der BSP Schmalseite
$k_{sys,mean}; k_{sys,05}$	Koeffizient zu Berücksichtigung von System-Effekten beim Durchdringen der Schrauben von $n > 1$ Lamellen
k_ρ	Koeffizient zur Berücksichtigung einer anderen Dichte als die Referenzdichte

In [34] wird zudem vorgeschlagen, den Beiwert k_p für Laubholz auf den Wert 1,6 und auch die Ausziehfestigkeit für Ring- und Zerstreutporer nach Gleichung 2.12 zu vereinheitlichen.

$$f_{ax,ref,RP\&DP,05} = 0.0007 \cdot \rho_{05}^{1.60} \cdot d^{-0.33} \quad (2.12)$$

Diese Ausziehfestigkeit bezieht sich hierbei auf die Scherfläche, welche als Mantelfläche des ins Holz eingebetteten Gewindes definiert ist. Diese Mantelfläche wird als Zylinder mit dem Außendurchmesser der Schraube d und der effektiven Länge l_{ef} berechnet und ist sehr gut an dem dargestellten Versagensbild in Abbildung 2-9 ersichtlich. Die Bereiche der Spitze und falls vorhanden des Reibschaftes sind für die Berechnung der Mantelfläche in der Regel nicht zu berücksichtigen.

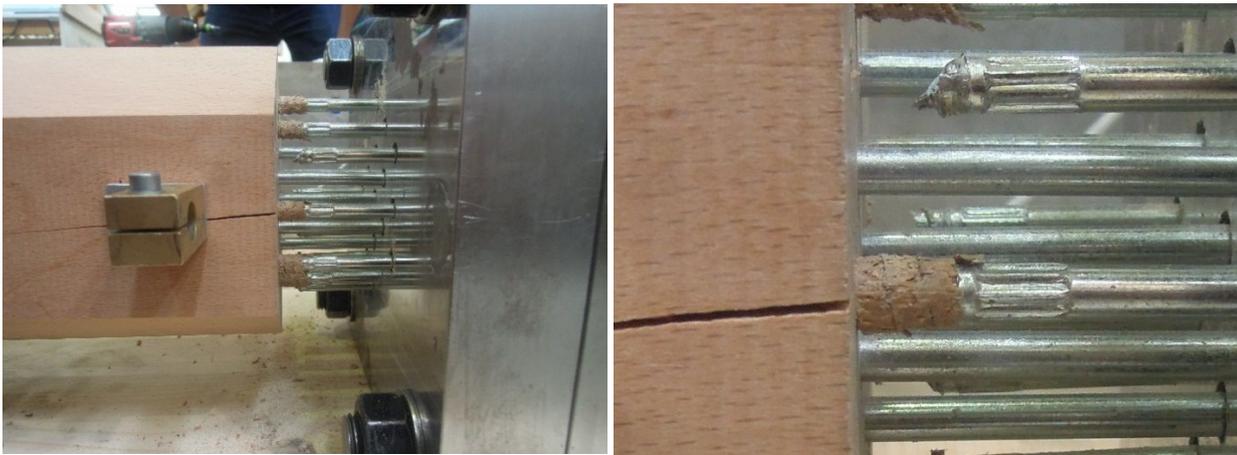


Abbildung 2-9 Kombiniertes Versagen Ausziehen der Schraube und Schraubenbrüche; links: Überblick versagte Verbindung; rechts: Detailansicht

2-4.3.4 Aufspalten

Durch das Einschrauben, Anziehen und bei axialer Zugbeanspruchung im Bereich eines Trägers entstehen im Holz durch die lokalen Gewindeflanken lokale Schrägdruckkräfte und in weiterer Folge aus diesen Druckkräften bei einer Kraftumlenkung im Holz Querszugkräfte. Diese Querszugkräfte können zu einem Aufspalten des Holzes führen. Die Spaltneigung kann hierbei durch lokale Wuchsmerkmale, wie Äste bzw. / oder lokale Schrägfaser, oder durch zu klein gewählte Mindestabstände zwischen den Schrauben oder zum Bauteilrand und damit einhergehend einer Spannungsüberlagerung oder -konzentration begünstigt werden.

Im Zuge erster Versuche in [15] konnte festgestellt werden, dass eine Erhöhung der Einbindetiefe der Schraube bei axial belasteten Hirnholzverschraubungen die Spaltneigung des Holzes bei Beanspruchung reduzieren kann. (vgl. Abschnitt 2-4.5.4). Weiters zeigt Koppauer [26] in Einschraubversuchen, dass bei dem Winkel $\alpha = 0^\circ$ die Spaltneigung des Holzes durch das Vorbohren der Holzprüfkörper vermindert werden kann, weil das zu verdrängende Holz an die Oberfläche gefördert wird und somit weniger Holz lokal verdichtet wird.

Eine weitere Überlegung warum das Einschrauben ohne Vorbohren gegenüber der axialen Zugbeanspruchung zu einer höheren Spaltbeanspruchung führt, zeigten Untersuchungen mit Hilfe von in der unmittelbaren Nähe der selbstbohrenden Schrauben aufgetragenen Messschrauben nach Uibel und Blaß [35]. So wurden in [36] und [9] bei Einschraub- und Ausziehversuchen 0° zur Faser die auftretenden Spaltkräfte mit Messschrauben gemessen. Das Ergebnis war, dass die auftretenden Spaltkräfte beim Eindrehen der Schrauben zwei- bis viermal höher lagen als jene bei den Ausziehversuchen. Zusätzlich wurde festgestellt, dass sich diese Spaltkräfte sehr rasch abbauen, weshalb bei [36] bereits 5 Minuten nach dem Eindrehen der Schrauben 12 bis 18 % der Spaltkräfte abgebaut waren. Bei [9] waren die aufgetretenen Spaltkräfte bei Verschraubungen 0° zur Faser des Holzes bereits nach sechs Stunden nach Applikation der Schrauben komplett abgebaut.

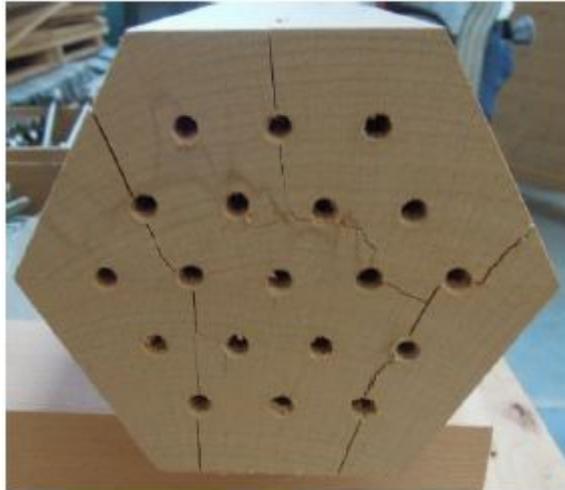


Abbildung 2-10 Versagensbild Aufspalten eines auf Zug beanspruchten Holzbauteils mit einer Hirnholzverschraubung, aus [26]

2-4.4 GEOMETRISCHE UND WEITERE RELEVANTE PARAMETER

Bei der Bemessung eines Hirnholzanschlusses ist auf einige Einflussparameter Rücksicht zu nehmen. In diesem Abschnitt wird auf diese kurz eingegangen.

2-4.4.1 Mindestabstände

Da bei Hirnholzanschlüssen die Schrauben in Faserrichtung des Holzes appliziert sind, sind für diese Verbindungen lediglich zwei Abstände von Relevanz.

Durch die Ausführung von Hirnholzverschraubungen ist der Abstand der im Holz applizierten Schrauben untereinander stets quer zur Faserrichtung des Holzbauteiles. Nach Definition der ÖNORM EN 1995-1-1 [6] handelt es sich bei diesen Abständen daher um a_2 , Abstand rechtwinklig zu einer parallel zur Faserrichtung und Schraubenachse liegenden Ebene, und es müsste daher lt. [6] ein Mindestabstand von $a_2 = 5 d$ eingehalten werden.

Der zweite relevante Abstand ist der Abstand der Schrauben zum Rand. Nach der ÖNORM EN 1995-1-1 [6] handelt es sich bei diesem Abstand um $a_{2,cg}$ und es müsste hier ein Wert von $a_{2,cg} = 4 d$ eingehalten werden. Des Weiteren wird eine Mindestholzdicke von $12 d$ und eine Einbindetiefe des Gewindeteils auf der Seite der Schraubenspitze von $6 d$ gefordert.

Die Europäische Technische Bewertung der in dieser Arbeit verwendeten Schrauben [21] gibt für die Mindestabstände von a_2 und $a_{2,cg}$ die äquivalenten Werte wie die ÖNORM EN 1995-1-1 [6] an. Hier wird auch eine Mindestholzdicke von $12 d$, ein Mindestwert der Einschraubtiefe von $4 d$ und eine Eindringtiefe des Gewindeteils von $20 d$ gefordert

Die ÖNORM EN 1995-1-1 [6] regelt derzeit nur Verschraubungen mit einem Winkel α größer als 30° . Die Europäische Technische Bewertung [21] und die ÖNORM EN 1995-1-1 [6] bilden derzeit jedoch den Stand der Technik bei Verbindungen mit Holzbauschrauben. Um den aktuellen Stand des Wissens ebenfalls zu berücksichtigen, werden hier für die Mindestabstände andere Forschungsarbeiten vorgestellt. Diese Forschungsarbeiten werden in Abschnitt 2-4.5 behandelt und diskutiert.

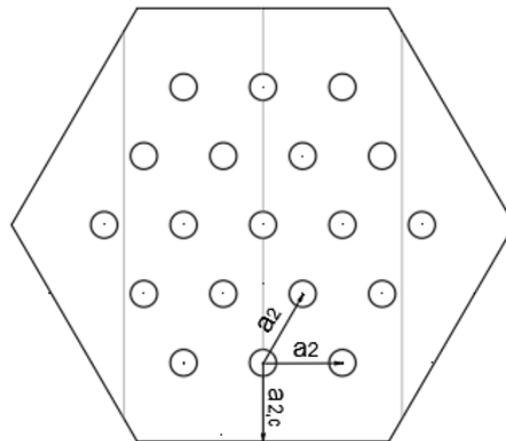


Abbildung 2-11 Relevante Abstände bei Hirnholzanschlüssen anhand eines in dieser Arbeit verwendeten Prüfkörperquerschnitts

2-4.4.2 Effektive Verbindungsmittellanzahl

Um die Tragfähigkeit einer Verbindung zu ermitteln, ist zunächst die Kenntnis der Tragfähigkeit des einzelnen Verbindungsmittels erforderlich. Für die Bestimmung der Tragfähigkeit der Gruppe der Verbindungsmittel ist zusätzlich der Gruppeneffekt zu berücksichtigen. Dieser Effekt tritt u.a. wegen unvermeidbarer Ungenauigkeiten in der Herstellung und weiterer Einflussfaktoren (vgl. Abschnitt 2-5.3.2) auf, weshalb es unplanmäßig zu ungleichmäßigen Beanspruchungen der Verbindungsmittel kommen kann. Um diesen Effekt in der Bemessung zu berücksichtigen, wird die effektive Verbindungsmittellanzahl n_{ef} eingeführt. Die Tragfähigkeit der Gruppe der Verbindungsmittel ist somit die Tragfähigkeit eines einzelnen Verbindungsmittels multipliziert mit n_{ef} . Bei der Betrachtung der Steifigkeit der Verbindung sollte ebenfalls eine effektive Anzahl an Verbindungsmitteln

berücksichtigt werden. Diese effektive Verbindungsmittellanzahl muss jedoch nicht zwingend gleich jener der Tragfähigkeit entsprechen, da auf Gebrauchslastniveau (SLS) die Beanspruchung der Verbindung wesentlich geringer als im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) ist und somit eine andere Beanspruchungssituation vorliegt.

In der ÖNORM EN 1995-1-1 [6] wird $n_{ef} = n^{0,9}$ für eine Schraubengruppe, die in Schaftrichtung belastet wird, angegeben. Auf die Definitionen von n_{ef} bei weiteren Belastungssituationen wird in Abschnitt 2-5.3.2 eingegangen.

2-4.5 ARBEITEN IN DER LITERATUR

2-4.5.1 Gehri 2001/2009

Gehri [37] [38] untersuchte Verbindungen aus eingeklebten Ankern und Schrauben, welche parallel zur Faser in Fichtenholz eingebracht und axial belastet wurden. In diesem Zusammenhang befasste er sich insbesondere mit dem Gruppeneffekt der Verbindungsmittel und untersuchte ab welchem Zwischenabstand keine Interaktion mehr unter ihnen stattfindet.

Versuche bei Verbindungen aus eingeklebten Ankern zeigten, dass das optimale Verhältnis zwischen Abstand und Durchmesser in Bezug auf die Tragfähigkeit bei ungefähr 5 liegt. Größere Abstände erhöhen dabei das Tragvermögen der Verbindung nicht und kleinere Abstände resultieren in einer Reduktion des Tragvermögens. Dieser Abstand ist bei einem Wirkungsgrad für eingeklebte Anker von gerade einmal 40 % aber zu unwirtschaftlich. Abbildung 2-12 zeigt dabei die Leistungssteigerung in Abhängigkeit vom Verhältnis des Ankerabstandes a zum Durchmesser d . Gehri schlägt einen Abstand von 2,6 bis 3,3 d als optimalen Ankerabstand vor, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen.

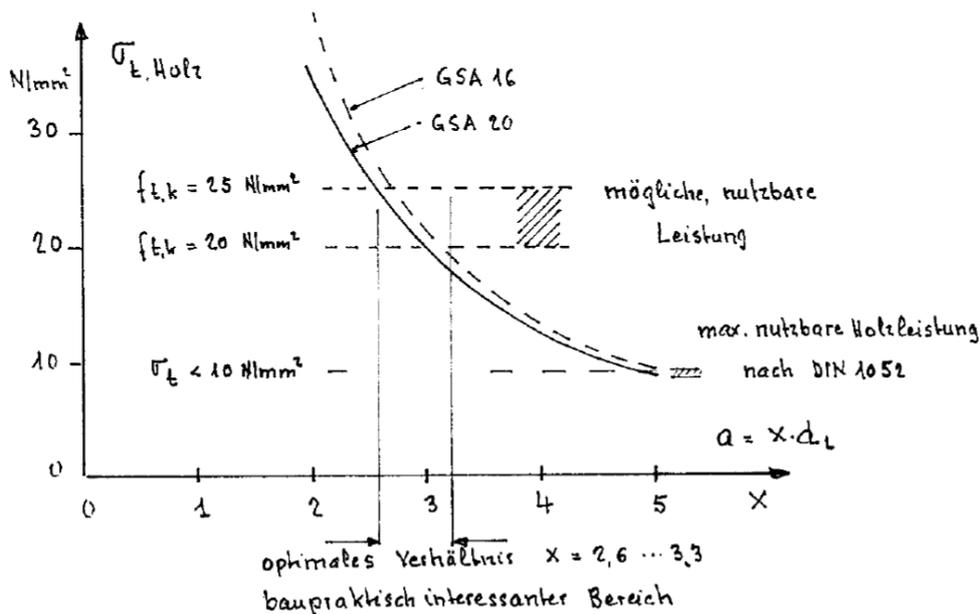


Abbildung 2-12 Leistungssteigerung in Abhängigkeit des Verhältnisses von Ankerabstand zu Ankerdurchmesser in Fichtenholz; Abszisse: Verhältnis von Ankerabstand zu Ankerdurchmesser; Ordinate: Zugfestigkeit des Holzes; aus [38]

Gehri analysiert den Gruppeneffekt indem er beim Vergleich der Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels mit jener der Gruppe voraussetzt, dass auch dem einzelnen Verbindungsmittel dasselbe Holzvolumen zur Verfügung steht. (vgl. Abbildung 2-13)

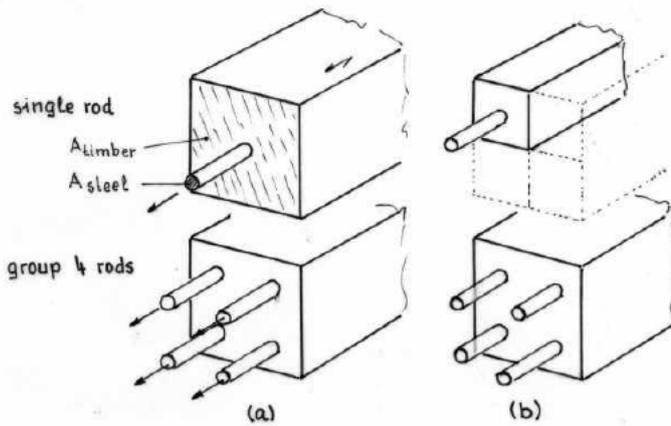


Abbildung 2-13 Gegenüberstellung Einzelverbindungs- vs. Gruppe: (a) unterschiedliches Verhältnis von A_{timber} zu A_{steel} – keine korrekte Vergleichsbasis; (b) äquivalentes Verhältnis von A_{timber} zu A_{steel} – korrekte Vergleichsbasis; aus [38]

Anhand dieser Erkenntnisse wurden Versuche an Prüfkörpern mit einer Schraube und mit Gruppen von Schrauben jeweils parallel zur Faser in Fichtenholz mit einer Variation des Verhältnisses von A_{timber} zu A_{steel} durchgeführt. (vgl. Abbildung 2-14) Als Verbindungsmittel wurden selbstbohrende Schrauben des Durchmessers 10 mm verwendet. Sämtliche Verschraubungen wurden dabei mit 6 mm vorgebohrt. Alle Schrauben hatten in allen untersuchten Prüfkonfigurationen eine effektive Länge von 130 mm.

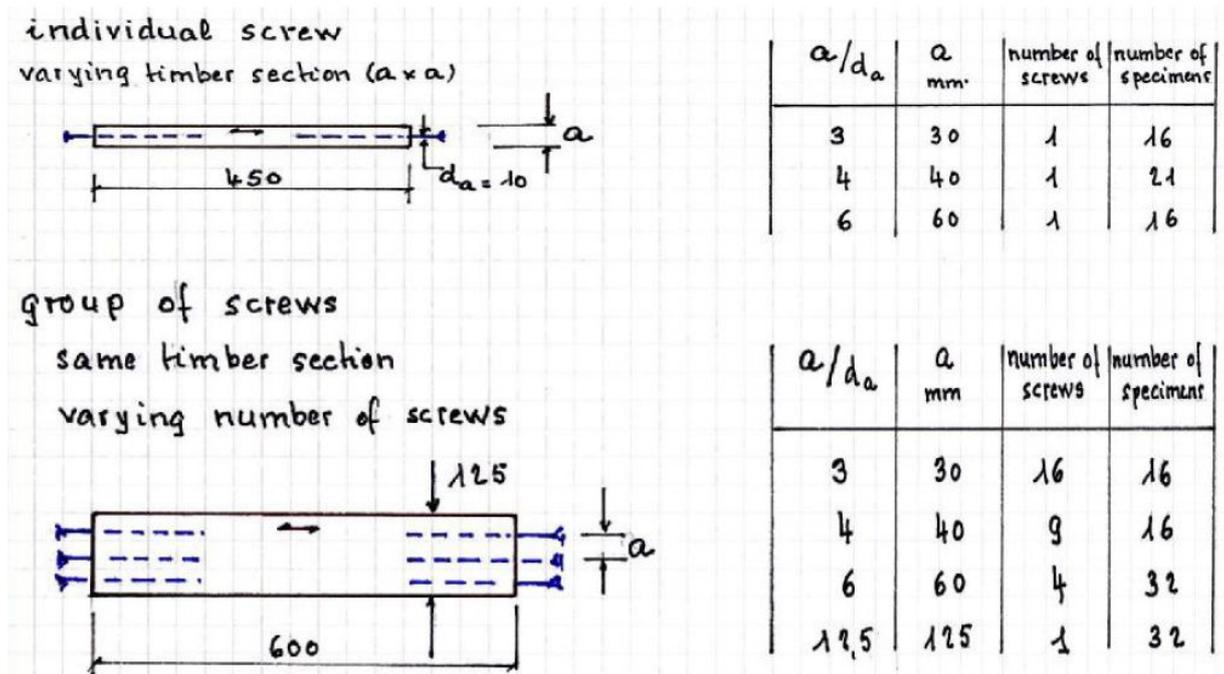


Abbildung 2-14 Untersuchte Prüfkonfigurationen mit variierendem Verhältnis von A_{timber} zu A_{steel} bei Hirnholzverschraubungen in [38]

Bei diesen Versuchen konnte eine Beziehung nach Abbildung 2-15 gefunden werden. Demnach sind, je kleiner die Holzfläche ist, desto größer die auftretenden Spannungen im Holz und dadurch auch die Differenzen in den Spannungen von Holz und Verbindungsmittel, was zu einer geringeren effektiven Scherfestigkeit des Holzes führt

und in weiterer Folge zu einer verminderten Ausziehfestigkeit. Bei sämtlichen Versuchen versagten hierbei die Verbindungen durch Herausziehen der Schrauben.

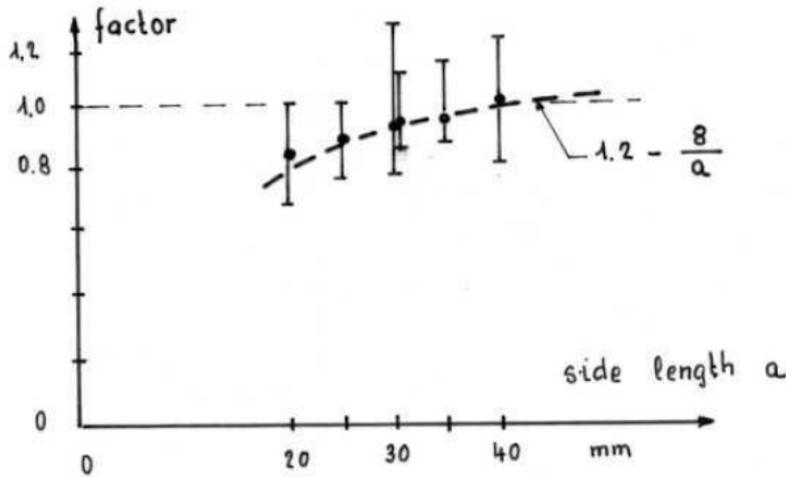


Abbildung 2-15 Effekt der Querschnittsabmessung a auf die Ausziehfestigkeit von Schrauben bei einer Hirnholzverschraubung, in Beziehung auf einen Querschnitt von 40 mm im Quadrat, in [38]

Die Beziehung in Abbildung 2-15 wurde anhand von Schrauben des Durchmessers 8 mm festgelegt. In generalisierter Form kann es zu Gleichung 2.13 dargestellt werden.

$$k_{red} = 0,57 \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0,35} \leq 1 \quad (2.13)$$

Gehri schließt aus diesen Studien, dass bei axial beanspruchten Schrauben und eingeklebten Gewindestangen parallel zur Faser des Holzes kein Gruppeneffekt berücksichtigt werden muss und der Einfluss von kleineren Abständen als $5d$ gering ist und durch eine Reduzierung der Ausziehtragfähigkeit mittels Gleichung 2.13 in Rechnung gestellt werden kann, womit n_{ef} durch k_{red} ersetzt werden kann.

2-4.5.2 Gehri 2010

Gehri veröffentlichte beim Internationalen Holzbau-Forum 2010 eine Ausarbeitung über die Verbindungsmöglichkeiten von Laubhölzern. In dieser betont er, dass durch die stetige Kraftübertragung zwischen Schraube und Holz ein relativ günstiger Kraftfluss bei Krafteinleitungen parallel zur Faser möglich ist. Anzustreben seien zudem geringe Dehnungsspitzen, was eine Verwendung einer Vielzahl von Verbindungsmitteln und eine Abstimmung der Dehnsteifigkeiten von Schraube und Holz erforderlich mache.

Dadurch, dass das Holz parallel zur Faser eine geringe Scherfestigkeit aufweist, sind bei Hirnholzanschlüssen jedoch höhere Einschraubtiefen erforderlich. Die Verbindungen weisen zudem ein sprödes Versagen mit geringer Duktilität sowohl beim Ausziehen der Schrauben als auch beim Schraubenbruch auf. Exemplarisch ist hierbei in Abbildung 2-16 ein Vergleich der Kraft-Verformungskurve von Verbindungen senkrecht bzw. parallel zur Faser in Fichtenholz dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass bereits bei relativ geringen Verformungen von 0,5 bis 1 mm ein Versagen parallel zur Faser auftritt.

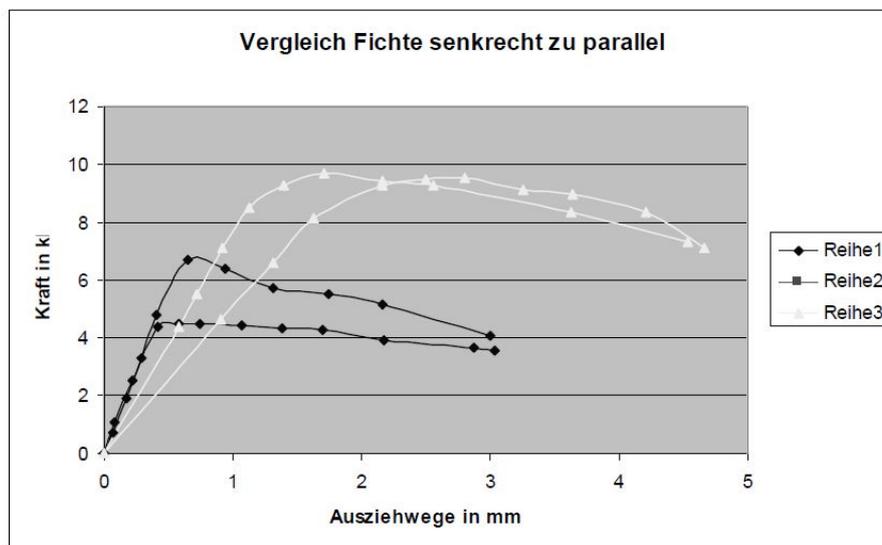


Abbildung 2-16 Vergleich der Arbeitslinie von Hirnholzverbindungen parallel zu senkrecht zur Faser in Fichte; Reihe 1: Verschraubung parallel zur Faser; Reihe 3: Verschraubung senkrecht zur Faser; aus [29]

Ein Vergleich der Kraft-Verformungskurven zwischen Esche und Fichte in Abbildung 2-17 zeigt zudem die wesentlich besseren Eigenschaften des Laubholzes gegenüber der Fichte bei Verschraubungen parallel zur Faser. Das Versagen tritt, wie man erkennen kann bei dem Laubholz bei mehr als der 3-fachen Last auf.

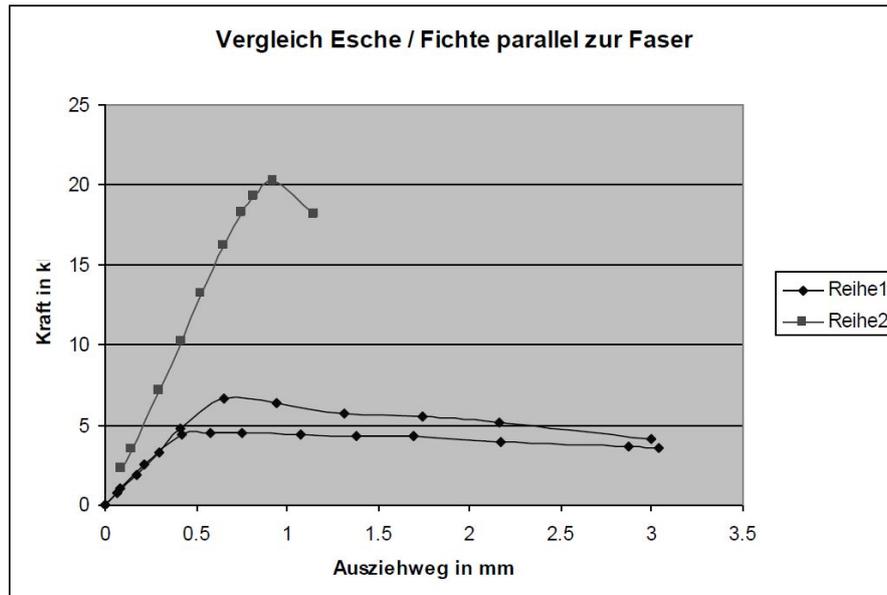


Abbildung 2-17 Vergleich der Arbeitslinie von Hirnholzverbindungen parallel zur Faser in Esche und Fichte; Reihe 1: Esche; Reihe 2: Fichte; aus [29]

2-4.5.3 Gatternig 2010

Gatternig [39] untersuchte den Einfluss des Randabstandes $a_{2,cg}$ auf den Auszieh Widerstand von selbstbohrenden Schrauben bei einer Variation des Achs-Faser-Winkels. Er führte dabei Versuche in Fichte mit Schrauben des Durchmessers 6 mm durch. Er variierte dabei die Randabstände zwischen $0,5 d$ und $7,5 d$. In Abbildung 2-18 ist die Abhängigkeit der Bruchkraft vom Randabstand der Schrauben bei einer Verschraubung von 0° zur Faser dargestellt. Es ist zu erkennen, dass erst bei einem Randabstand von $0,5 d$ ein signifikanter Abfall der Bruchkraft gegeben ist. Im Bereich von $2 d$ bis $5 d$ ist keine nachweisbare Änderung der aufnehmbaren Kraft zu erkennen. Somit ergibt sich als geringster Randabstand $a_{2,cg} = 2 d$.

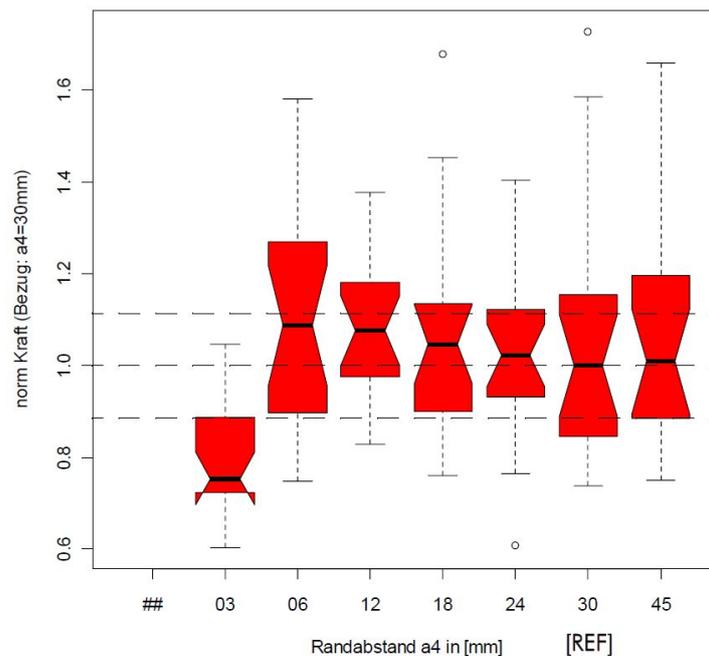


Abbildung 2-18 Abhängigkeit der Bruchkraft vom Randabstand bei einer Einschraubung einer Einzelschraube 0° zur Faser aus [39]

2-4.5.4 Obermayer 2014

Um das Verhalten von Anschlüssen von Zugstreben für Fachwerke zu untersuchen, führte Obermayer [15] Versuche an in Birken-Brettschichtholz faserparallel eingebrachten Schraubengruppen und eingeklebten Blechen durch.

Die untersuchten Brettschichtholzträger hatten einen Querschnitt von 100 mm x 100 mm und bestanden aus fünf verklebten Birken-Lamellen. Für die Hirnholzverschraubungen wurden Vollgewindeschrauben mit einer Halbspitze und einem Senkkopf des Herstellers Schmid Schrauben Hainfeld GmbH mit einem Nenndurchmesser von 10 mm verwendet. Die Länge der Schrauben variierte zwischen 240 mm bis 350 mm.

Es wurden insgesamt zehn Zugprüfungen von Anschlüssen mit faserparallelen Hirnholzverschraubungen durchgeführt. Bei den Hirnholzverschraubungen wurden 4 Prüfkongfigurationen untersucht, welche sich durch die Anzahl der Schrauben und somit dem Schraubenabstand a , der effektiven Schraubenlänge l_{ef} und der Einbindelänge l_{emb} unterschieden. Bei einer Prüfkongfiguration wurde zusätzlich das Schraubenbild abgestuft, um Auswirkungen auf die Krafteinleitung und somit auch auf das Versagen zu untersuchen. (vgl. Abbildung 2-19) Jede Prüfkongfiguration wurde dabei so vorbemessen, dass die möglichen Versagensmechanismen Herausziehen der Schrauben und Schraubenbruch abgedeckt werden.

Tabelle 2-2 *Untersuchte Prüfkongfigurationen der Versuche mit Hirnholzverschraubungen mit variierten Parametern in [15]*

Prüfkongfiguration		# PK [-]	d [mm]	a_2 [mm]	$a_{2,eg}$ [mm]	l [mm]	n [-]	l_{emb} [mm]	l_{ef} [mm]
1	Max. Krafteinleitung	2	10	21,2	20	300	13	50	190
1	Max. Krafteinleitung	2	10	21,2	20	280	13	50	170
2	Herausziehen	2	10	30	20	240	9	60	120
3	Schraubenbruch	2	10	30	20	280	9	50	170
4	Lasteinleitung über unterschiedliche Einbindetiefe	1	10	30	20	5x280 8x350	13	50	5x170 8x240
4	Lasteinleitung über unterschiedliche Einbindetiefe	1	10	30	20	5x280 8x350	13	50	5x170 8x240

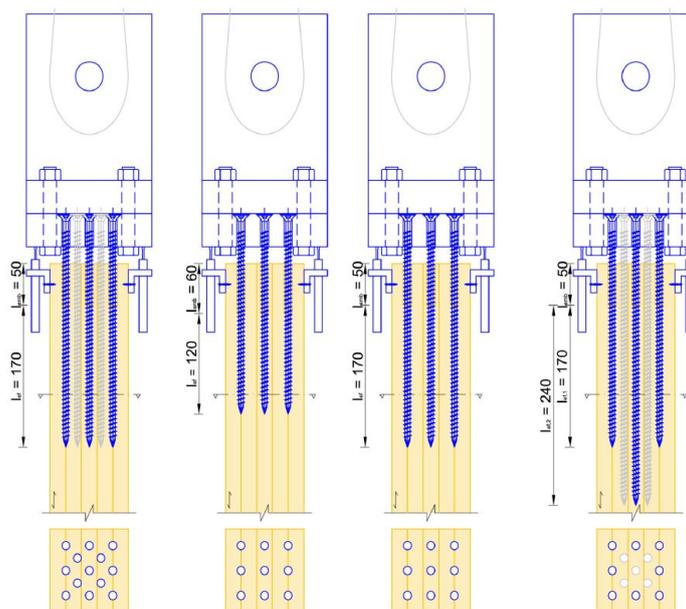


Abbildung 2-19 Untersuchte Prüfkongfigurationen der Hirnholzverschraubungen von links nach rechts: Prüfkongfiguration 1, Prüfkongfiguration 2, Prüfkongfiguration 3, Prüfkongfiguration 4 [15]

In Tabelle 2-3 sind die Ergebnisse der Versuche tabellarisch dargestellt. Der maximale Ausnutzungsgrad bezogen auf den Nettoquerschnitt lag bei 86 % bei jenem Versuch mit der höchsten Schraubenanzahl und dem höchsten Wert von l_{ef} . Die effektive Verbindungsmittelanzahl der einzelnen Prüfungen variierte zwischen $0,69 \times n$ und $0,85 \times n$, womit in keiner Prüfkongfiguration die vorgemessenen Versagenslasten erreicht werden konnten und somit die Empfehlung, welche in [27] gemacht wird, dass n_{ef} gleich n entspricht, für diese Prüfungen nicht zutrif. Es ist jedoch anzumerken, dass die berechneten Werte für n_{ef} sich auf die vorgemessenen Versagenslasten beziehen und nicht auf Referenzwerte für den Auszieh widerstand einer Einzelschraube. Somit ist die Ermittlung von n_{ef} als eine Schätzung einzustufen und nicht als eine exakte Ermittlung. Der Ausnutzungsgrad bezogen auf den Nettoquerschnitt der Verbindung mit Schraubenbruch war mit lediglich 59 % nicht zufriedenstellend. Der Verfasser dieser Arbeit sieht deshalb in Bezug auf Ergebnisse anderer Arbeiten in Laubholz ein wesentliches Steigerungspotenzial dieser Verbindungen.

Tabelle 2-3 Ergebnisse der Versuche mit Hirnholzverschraubungen in [15]

Prüfkongfiguration	Prüfkörper	$n_s^{1)}$ [-]	Versagen ¹⁾	ρ [kg/m ³]	F_{max} [kN]	K_{ser} [N/mm]	F_{max}/n_s [kN]	η_{netto} [%]
1	T002_1	13	ASP	615	429	243	33	86
1	T001_1	13	ASP	611	344	232	26	69
1	T003_1	13	A/S	645	396	260	30	80
1	T004_1	13	ASP	665	345	266	27	69
2	T001_2	9	AZ	611	202	199	22	39
2	T004_2	9	AZ	665	233	173	26	45
3	T003_3	9	SB	645	304	206	34	59
3	T002_2	9	AZ	644	264	208	29	51
4	T003_2	13	ASP	645	413	290	32	83

¹⁾ n_s ...Anzahl der Schrauben; ASP...Aufspalten; A/S...Mischbruch aus Aufspalten und Schraubenbruch; AZ...Ausziehen; SB...Schraubenbruch

Bei der Auswertung der Verschiebungsmodule, zwischen 10 % und 40 % der Bruchlast, konnte zudem festgestellt werden, dass diese bei den Prüfungen mit 13 Schrauben im Mittel um 34 % höher lag als bei jenen mit 9 Schrauben. In der Prüfkongfiguration mit abgestuften Schraubenbild konnte zudem ein wesentlich steiferes Verhalten der Verbindung beobachtet werden. Hier war der Verschiebungsmodul um 16 % höher als der Mittelwert der Prüfkongfiguration 1. Die Begründung des steiferen Verhaltens dieser Verbindungen mit dem abgestuften Schraubenbild scheint dem Verfasser dieser Arbeit jedoch als nicht zulässig, da in Prüfkongfiguration 4 ebenfalls die effektive Schraubenlänge wesentlich höher ist.

2-4.5.5 Grabner et al. 2014

Bei Grabner et al. [40] wurden die Untersuchungen von Obermayer [15] weitergeführt, indem zunächst Referenzprüfungen an Einzelschrauben durchgeführt wurden, um die Ergebnisse von Obermayer [15] neu zu analysieren und zu bewerten. Auf Grundlage dieser Beobachtungen erstellten sie ein Prüfkongzept, welches auf die Ermittlung des maximalen Wirkungsgrades einer Hirnholzverschraubung abzielte. (vgl. Abbildung 2-20)

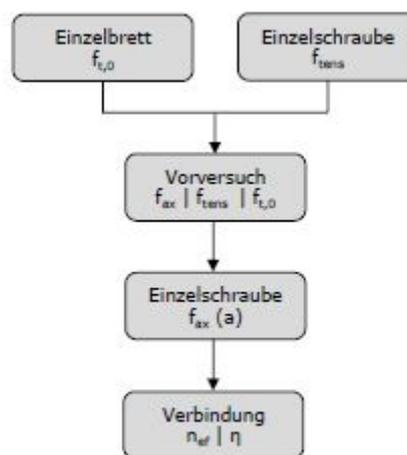


Abbildung 2-20 *Oben: Schematische Darstellung des Prüfprogramms; Unten von links nach rechts: Zugprüfung Brett, Zugprüfung Schraube, Ausziehprüfung Schraube (pull-pull), Ausziehprüfung Schraube (push-pull), aus [40]*

Die Prüfkörper der Versuche bestanden ausschließlich aus Brettware der Holzart Birke. Diese Prüfkörper wurden bei den Gruppenprüfungen vor der Applikation der Schrauben beidseitig vorgebohrt. Hierbei wurde zunächst die Einbindetiefe $l_{emb} = 50$ mm mit einem Durchmesser von 12 mm und anschließend die Eindrehlänge mit $l_{ef} = 190$ mm mit einem Durchmesser von 6 mm vorgebohrt. Die Holzfeuchte sämtlicher Prüfkörper aller Untersuchungen lag in einer schmalen Bandbreite zwischen 10,1 % und 11,2 %. Der Mittelwert der Rohdichte war für alle betrachteten Prüferien ebenfalls nahezu ident und lag bei ungefähr 618 kg/m^3 . Die mittlere Zugfestigkeit der Zugprüfungen am Einzelbrett resultierte zu $51,4 \text{ N/mm}^2$ bei einem Variationskoeffizienten von 24,8 %. Der empirische 5%-Quantilwert lag bei 30 N/mm^2 .

Für die Prüfungen wurden die Schraubentypen RAPID® der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH mit den Nenndurchmessern $d = 8|10$ mm nach der Europäischen Technischen Bewertung ETA-12/0373 [21] und SPAX-S® der Firma SPAX International GmbH & Co. KG nach der Europäischen Technischen Bewertung ETA-12/0114 [41] verwendet. Die Stahlzugtragfähigkeit wurde für die bei den Gruppenversuchen verwendeten SPAX-S-Schrauben ermittelt. Hierbei konnte bei einem Erwartungswert von 30,6 kN eine unverhältnismäßig hohe Streuung der Ergebnisse festgestellt werden, weshalb der 5-%-Quantilwert mit 25,6 kN relativ gering ausfiel.

Vorversuche

Bei dieser Prüfserie wurde im Gegensatz zu den anderen Untersuchungen ein Schraubendurchmesser von 8 mm verwendet. Die Prüfungen wurden an einem quadratischen Querschnitt ($a \times a$) mit einer Einzelschraube durchgeführt. Bei den erzielten Ausziehfestigkeiten konnte eine leicht abfallende Tendenz bei kleiner werdendem Verhältnis a/d beobachtet werden. Bei $a/d = 2,5$ versagten zwei Prüfkörper auf Aufspalten, was auf eine zu hohe Querkzugbeanspruchung, selbst bei dem geringen vorhandenen Wert für l_{ef} von 80 mm schließen ließ. Ab einem Verhältnis a/d von rund 5 ist mit wachsendem a/d kein Unterschied mehr in den erzielten Ausziehfestigkeiten zu erkennen. Durch diese Erkenntnisse wurden die Ergebnisse der Untersuchungen von Gehri [37] in Fichtenholz (siehe Abschnitt 2-4.5.1) bestätigt.

Einzelschraube - Referenzprüfungen zu den Gruppenversuchen aus [15]

In [15] wurden zwei Prüfungen durchgeführt, welche durch die Wahl einer geringen effektiven Gewindelänge von 120 mm gezielt auf Herausziehen versagten. Um die effektive Verbindungsmittellanzahl zu bestimmen, wurden Referenz-Ausziehversuche von Einzelschrauben in den verwendeten Probekörpern von [15] durchgeführt. Die effektive Verbindungsmittellanzahl wurde nun über das Verhältnis der erzielten Ausziehtragfähigkeit der Referenzprüfungen zu dem Ausziehwiderstand der Schraubengruppe aus [15] berechnet. Bei beiden Prüfungen konnte die effektiv wirksame mit der tatsächlichen Zahl der eingesetzten Schrauben gleichgesetzt werden.

Verbindung - Gruppenprüfungen

Es wurden insgesamt 13 Prüfungen mit jeweils 13 Schrauben des Nenndurchmessers $d = 10$ mm und einer effektiven Gewindelänge von 190 mm durchgeführt. Der verwendete Querschnitt war, abgesehen von einem erhöhten Abstand der Schrauben zum Rand von $2,8 d$, äquivalent zu jenem in [15]. Abgesehen von 3 Prüfkörpern, welche von der weiteren Betrachtung ausgenommen wurden, konnte bei allen Prüfkörpern der angestrebte Versagensmechanismus Schraubenbruch erreicht werden. Das Verhältnis der effektiven Verbindungsmittellanzahl, berechnet über das Verhältnis des Erwartungswertes der erreichten Tragwiderstände der Schraubengruppe zu dem Erwartungswert der erreichten Tragwiderstände der Einzelschraube multipliziert mit der Anzahl der Schrauben, zur vorhandenen Anzahl der Schrauben ergab sich dadurch zu 0,92. Der erreichte Wirkungsgrad bezogen auf den Bruttoquerschnitt konnte mit 0,54 errechnet werden. Der geschätzte Erwartungswert der maximal erreichten Tragwiderstände der 10 Prüfungen auf Schraubenbruch lag bei 364 kN mit einem Variationskoeffizienten von 6,54 %.

2-4.5.6 Koppauer 2017/Eckerstorfer 2019

Von Koppauer [26] wurde zunächst mittels einer FE-Studie untersucht, wie sich verschiedene Schraubenanordnungen auf die Querkzugsspannungen im Anschlussbereich des Holzes auswirken. Der Zweck dieser Studie war es, die Möglichkeit einer Optimierung der Spannungsverteilung mittels einer Gewindeabstufung der Schrauben zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden zunächst die in Abbildung 2-21 dargestellten kaskadenförmigen Abstufungen und eine parabelförmige Abstufung untersucht. Als Schrauben wurden hierbei der von Pöll [36] ursprünglich untersuchte „Prototyp 1“ (P 1), welche nun von der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH unter dem Namen RAPID® Hardwood mit der Europäischen Technischen Bewertung ETA-12/0373 [21] vertrieben wird, mit einem Außendurchmesser von 8 mm und einer Gewindelänge von 100 mm verwendet und in einem 6 x 6 Raster angeordnet.

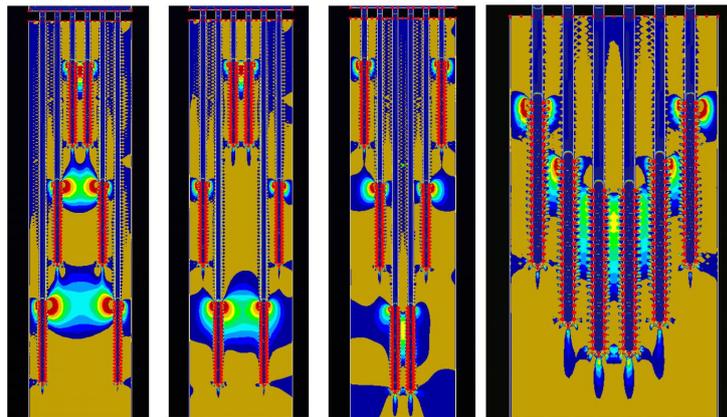


Abbildung 2-21 Qualitativer Verlauf der Querkzugsspannungen der untersuchten Abstufungen bei der FE-Studie: links: System 1 der kaskadenförmigen Abstufung; Mitte: System 2 und System 3 der kaskadenförmigen Abstufung; rechts: parabelförmige Abstufung in [26]

Die Ergebnisse zeigten, dass durch die gewindeversetzten kaskadenförmigen Abstufungen keine Reduktion der Querkzugsspannungen erreicht werden konnte. Bei der parabelförmigen Abstufung, welche dem Kraftfluss im Querschnitt angepasst wurde, konnten die Querkzugsspannungen zwischen den Schrauben deutlich verringert werden. Hier traten jedoch im Randbereich des Holzquerschnittes leicht erhöhte Querkzugsspannungen auf, welche aber unterhalb der maximal auftretenden Spannungen im Referenzsystem lagen, wodurch diese eine Verbesserung gegenüber einer gleichmäßigen Anordnung der Schrauben darstellt. Eine Erhöhung der Schraubenabstände von $a_2 = 2,2 d$ auf $a_2 = 2,5 d$ brachte zudem eine Verringerung der Querkzugsspannungen um 40 %.

Diese FE-Simulationen deuten somit an, dass durch eine parabelförmige Abstufung der Schrauben eine Verbesserung des Querspannungszustandes innerhalb des Holzes erzielt werden kann. Wodurch gegenüber einer gleichmäßig eingebundenen Schraubenanordnung die Spaltneigung vermindert und folglich die Tragfähigkeit der Verbindung erhöht werden kann.

Einschraubversuche

Als Grundlage für seine weiteren Versuche führte Koppauer [26] zunächst Einschraubversuche durch, um festzustellen, bei welchen Querschnittsdimensionen das Holz bereits beim Eindrehen der Schraube aufspaltet. Das Ergebnis dieser Versuche war es, dass ein Querschnitt aus Buche bei einer Einzelschraube mindestens $5 d \times 5 d$ groß sein muss und bei BauBuche mindestens $7,5 d \times 7,5 d$. Diese Abmessungen gelten bei einem Applizieren der Schrauben ohne vorherigem Vorbohren. Mit vorherigem Vorbohren verringern sich die benötigten Abmessungen auf $2,5 d \times 2,5 d$ bei Buche und $4 d \times 4 d$ bei BauBuche.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse führte Koppauer [26] ebenfalls Einschraubversuche mit Schraubengruppen in BauBuche durch. Hier konnte er feststellen, dass mit vorherigem Vorbohren bereits ein Schraubenabstand untereinander von $a_2 = 2 d$ und ein Randabstand von $a_{2,cg} = 2 d$ ausreicht damit das Holz nicht spaltet.

Vorversuche

Um die Rand- und Schraubenabstände für die Gruppenversuche zu ermitteln, bei denen es im Mittel zu keinem Abfall der Ausziehtragfähigkeit der Schrauben kommt, führte Koppauer [26] Ausziehversuche mit Schraubengruppen bestehend aus drei Schrauben 0° zur Faser in Buche und BauBuche durch. Diese Versuche zeigten, dass für Verschraubungen 0° zur Faser für Buchenvollholz mindestens ein Schraubenabstand von $a_2 = 2 d$ mit einer Einbindtiefe von $2 d$ von Nöten ist und ein Abstand von $a_2 = 3 d$ falls keine Einbindung gewählt wird. Ein Randabstand von $a_{2,cg} = 1,5 d$ reichte bei den Versuchen nicht aus und führte zu Aufspalterscheinungen. Bei einem Applizieren der Schrauben ohne Vorbohren musste der Schraubenabstand mindestens $5 d$ betragen.

Bei den Versuchen in BauBuche stellte sich heraus, dass man hier die Richtung der Furnierlagen beachten muss. Bei einer Einbindtiefe von $2 d$ muss der Schraubenabstand normal zu den Furnierlagen mindestens $4 d$ oder mindestens $5 d$ ohne Einbindtiefe betragen. In Richtung der Furnierlagen reicht ein Schraubenabstand von $a_2 = 3 d$. Bei den Versuchen stellte sich ein Wert von $a_{2,cg} = 3 d$ als Mindestabstand zu den Rändern als ausreichend heraus.

Gruppenversuche

Koppauer [26] führte Untersuchungen in Buchenvollholz und BauBuche durch. Die untersuchten Anschlüsse bestanden jeweils aus 19 Schrauben. Die Schraubenabstände folgten dabei aus den Ergebnissen der Vorversuche und wurden bei der Buche mit $a_2 = 3 d$ gewählt. Bei der BauBuche folgte eine Unterscheidung in Abstand in Richtung der Furnierlagen $a_{2,f} = 3 d$ und quer zu den Furnierlagen $a_{2,q} = 4 d$. Die Randabstände wurden mit $a_{2,cg} = 3 d$ gewählt. Eine Versuchsreihe wurde zudem mit BauBuche durchgeführt bei welcher zwischen den Schraubenreihen Querlagen eingeklebt wurden, um zu untersuchen, ob dadurch ein Abstand quer zu den Furnierlagen von $a_{2,q} = 3 d$ ausreichend ist. Die Schraubenreihen wurden zusätzlich versetzt angeordnet, wodurch sich der in Abbildung 2-22 dargestellte Querschnitt ergibt. Die Schrauben wurden mit einem Anziehdrehmoment von 40 Nm appliziert.

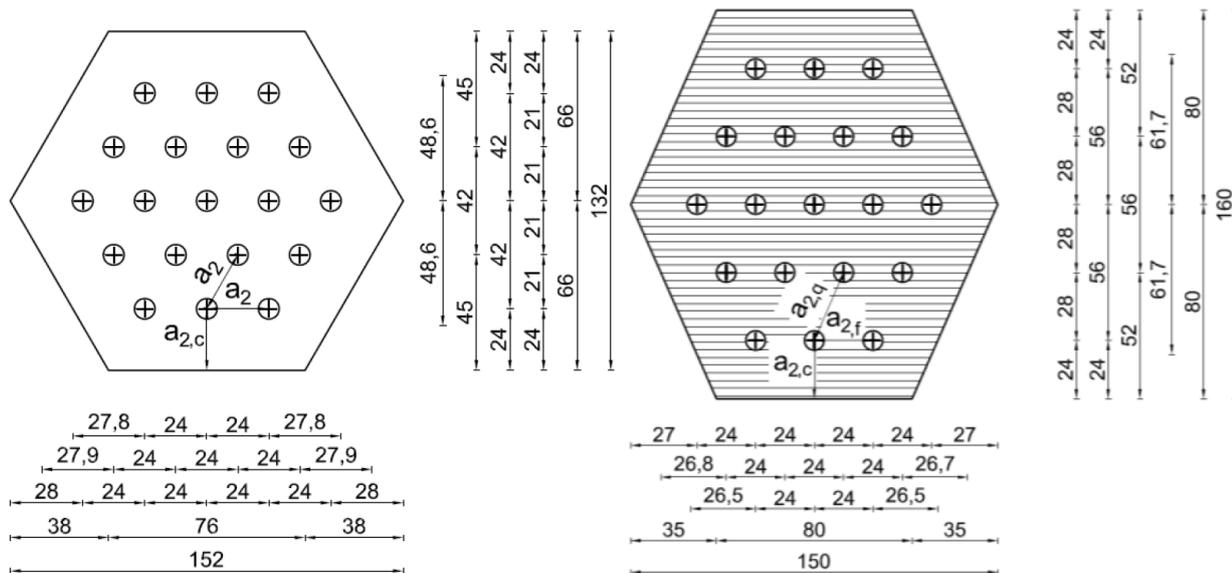


Abbildung 2-22 *Verwendete Querschnitte der Gruppenprüfungen mit Hirnholzverschraubungen in [26] und [42]; links: Buche und BauBuche mit eingeklebten Querlagen; rechts: BauBuche; alle Maße in mm*

Von den insgesamt fünf Prüfserien wurde jeweils eine Prüfserie in Buche und BauBuche mit konstanter Einbindetiefe geprüft und jeweils eine Prüfserie mit parabelförmiger Abstufung der Einbindetiefen. Eckerstorfer [42] führte die Untersuchungen von Koppauer weiter, indem sie ebenfalls Prüfserien durchführte bei denen jedoch die Einbindetiefe der Schrauben erhöht wurde. Alle Prüfserien bestanden aus sechs Prüfungen.

Tabelle 2-4 *Untersuchte Prüfserien sowie die Mittelwerte der Holzfeuchtigkeit u und Rohdichte ρ der Prüfserien in [26] und [42]*

Prüfserie	Material	a_2	$a_{2,cg}$	l_{emb}	u [%]	ρ [kg/m ³]	Anordnung
1_01 [26]	Buche	3 d	2 d	2 d	9,5	700	gleichmäßig
1_02 [26]	Buche	3 d	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d	9,3	699	abgestuft
2_01 [26]	BauBuche	3 d 4 d	2 d	2 d	6,9	832	gleichmäßig
2_02 [26]	BauBuche	3 d 4 d	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d	7,0	822	abgestuft
3_01 [26]	BauBuche mit eingeklebten Querlagen	3 d	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d	8,7	837	abgestuft
Eckerstorfer [42]	Buche	3 d	2 d	8,4 d	8,0	744	gleichmäßig
Eckerstorfer [42]	BauBuche	3 d 4 d	2 d	8,4 d	6,3	866	gleichmäßig

Bei den Prüfungen mit Buche konnte von Koppauer [26] durch die parabelförmige Abstufung der Schrauben eine Steigerung der axialen Traglast um 8 % im Vergleich zur (gleichmäßigen) Referenz erreicht werden, wodurch ein n_{ef}/n von 0,94 in dieser Prüfserie erreicht werden konnte. Der Ausnutzungsgrad bezogen auf den Nettoquerschnitt η_{netto} lag hier bei 0,66. Bei sämtlichen Versuchen spalteten alle Prüfkörper bis auf einen der Serie 1_01 mindestens einmal auf. Von Eckerstorfer [42] konnte eine deutliche Leistungssteigerung von 10,3 % gegenüber den Prüfungen von Koppauer [26] erreicht werden. Hier versagten sämtliche Verbindungen durch Herausziehen der Schrauben bzw. Stahlbruch

Bei den Prüfungen mit BauBuche konnte von Koppauer [26] durch die parabelförmige Abstufung der Schrauben ebenfalls eine Steigerung der axialen Traglast um 4 % im Vergleich zur (gleichmäßigen) Referenz erreicht werden, wodurch ein n_{ef}/n von 0,80 in dieser Prüfserie erreicht werden konnte. Auch hier spalteten bei sämtlichen Versuchen die Prüfkörper mindestens einmal auf. Von Eckerstorfer [42] konnte hier lediglich eine Leistungssteigerung gegenüber Koppauer von 4,5 % erreicht werden, womit die geschätzten Tragfähigkeiten deutlich unterschritten wurden. Hier versagten drei von sechs Prüfkörpern durch Aufspalten.

Bei der Prüfserie mit eingeklebten Querlagen konnte von Koppauer [26] ein Aufspalten der Prüfkörper ebenfalls nicht verhindert werden, weshalb hier die mittlere axiale Traglast sogar unter jene der Serie 2_02 lag. quer zur Furnierichtung zwischen den eingeklebten Querlagen.

Auswertung von K_{ser}

Bei der Auswertung von K_{ser} ergab sich bei Koppauer [26], dass bei einer parabelförmigen Abstufung der Schrauben ein zwei- bis dreimal so steifes Verhalten der Verbindung auftrat als bei einer konstanten Einbindung der Schrauben. In [26] wird dies mit einer möglichen Kraftumlagerung der äußeren Schraubenreihe zu den weiter inneren Schrauben mit höherer Einbindetiefe kommt. Begründet wird dies mit dem nahezu linearen Verlauf des Kraft-Weg-Diagrammes bei konstanter Einbindetiefe und einem deutlich steileren und sehr frühen nichtlinearen Verlauf bei einer parabelförmigen Abstufung. (vgl. Abbildung 2-6) Bei Eckerstorfer [42] konnte die Auswertung aufgrund dieses nicht-linearen Verlaufs nicht durchgeführt werden.

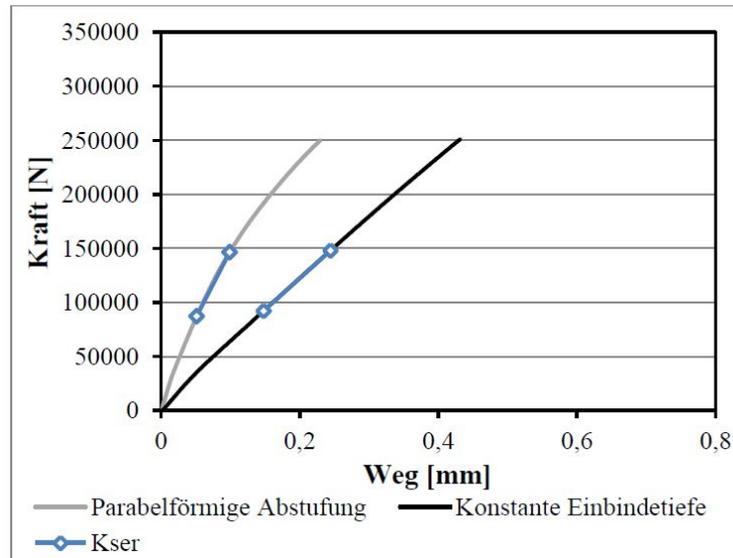


Abbildung 2-23 Vergleich der Kraft-Weg-Diagramme in [26]

2-4.5.7 Meyer 2016

Meyer untersuchte faserparallele eingeklebte Gewindestangen und zudem axial beanspruchte Schrauben parallel zur Faser in Buchenfurnierschichtholz (GL70) gem. ETA-14/0354 (2015) [43]. Hierbei führte er insgesamt fünf Versuche mit Schrauben in stabförmigen Prüfkörpern mit einem Querschnitt von 55 x 55 mm² durch. Je Prüfkörper wurden beidseitig je 4 Vollgewindeschrauben mit einem Nenndurchmesser von 10 mm und einer Einschraublänge von 150 mm in das Hirnholz appliziert. Die Einbindelänge betrug konstant 50 mm. Der Schraubenabstand a_2 wurde mit $2,5 d$ und der Randabstand $a_{2, \text{cg}}$ mit $1,5 d$ gewählt. Angaben zu Rohdichte und Feuchtigkeitsgehalt der untersuchten Prüfkörper sind in [44] nicht angegeben.

Mit Ausnahme eines Prüfkörpers (Prüfkörper 5 in Tabelle 2-5) wurde bei sämtlichen Versuchen die Stahlzugfestigkeit der Schrauben erreicht. Bei einem Prüfkörper kam es zu einem frühzeitigen Zug-Scherversagen entlang der Klebefuge über die gesamte Prüfkörperlänge.

Tabelle 2-5 Maximale Prüfkraft, erzielte mittlere Auszugsfestigkeit und erzielte mittlere Schraubenkraft der Versuche mit je vier Schrauben parallel zur Faser in [44]

Prüfkörper	F_{max} [kN]	f_{ax} [N/mm ²]	f_{tens} [kN]
1	162	8,8	41,5
2	166	8,6	40,6
3	165	8,8	41,4
4	166	8,8	41,6
5	106	5,6	26,5

Der Vergleich der Ergebnisse mit jenen der Versuchsreihen mit eingeklebten Gewindestangen mit einem Durchmesser von 16 mm der Festigkeitsklasse 8.8 ergibt eine um 34 % höhere Kurzzeittragfähigkeit der Schraubenverbindung mit Holzbauschrauben des Nenndurchmessers 10 mm bei 63 % der benötigten effektiven Einbindelänge. Die Tragfähigkeiten der Schraubenverbindung konnten erst durch die Wahl der Festigkeitsklasse 10.9 bei den Versuchen mit Gewindestangen erreicht werden.

2-4.5.8 Westermayer et al. 2019

In Westermayer et al. [25] wurden ebenfalls Hirnholzanschlüsse in Prüfkörpern aus Brettschichtholz der Holzart Buche untersucht. Die Prüfungen wurden mit selbstbohrenden Holzschrauben ausgeführt, wobei diese in sechs Gruppen unterteilt wurden (vgl. Abbildung 2-24). Die Hirnholzanschlüsse wurden ausschließlich mit Schrauben des Typs 1 durchgeführt. Zusätzlich wurden Untersuchungen durchgeführt um die Einflüsse des Schraubentyps, der Schraubenlänge und des Durchmessers zu untersuchen. Ebenfalls wurden Prüfungen zur Festlegung der Mindestabstände unter den Schrauben und zu den Rändern durchgeführt.



Abbildung 2-24 Verwendete Schrauben, aus [25]

Einfluss des Schraubentyps

Hier wurden Ausziehversuche für jeden Schraubentyp durchgeführt, bei welchen die Spitze der Schrauben innerhalb bzw. außerhalb des Holzes lag. In Tabelle 2-6 sind die dabei erzielten Auszieh Widerstände aufgelistet. Die unterschiedlichen Schraubentypen hatten bei den Versuchen ähnliche Werte bei den Ausziehfestigkeiten erreicht. Der berechnete Wert x stellt in der Auflistung den Faktor dar mit welchem der Durchmesser der Schrauben d von der nominalen Schraubenlänge l_{nom} abgezogen wird um die effektive Schraubenlänge l_{eff} zu erhalten. Dieser Wert hatte einen Mittelwert von 0,91 unabhängig des Schraubentyps, was eine Subtraktion von d multipliziert mit 1,0 von l_{nom} als eine gute Annäherung für l_{eff} impliziert.

Tabelle 2-6 Erzielte Auszieh Widerstände der unterschiedlichen Schraubentypen und daraus abgeleiteter Faktor x in

Schraube	$f_{ax,mean}$ – Schraube innerhalb des Holzes [N/mm ²]	$f_{ax,mean}$ – Schraube innerhalb des Holzes [N/mm ²]	$\Delta f_{ax,mean}$ [%]	x [-]
Type1+2	11,0	12,4	11	0,94
Type3	8,7	9,8	12	1,06
Type4	9,6	10,4	11	0,70
Type5	10,5	11,6	8	0,82
Type6	8,9	10,0	9	0,97
All types	9,7	10,8	10	0,91

Einfluss der Schraubenlänge und des Durchmessers

Um mögliche Einflüsse der effektiven Schraubenlänge l_{eff} auf die Ausziehfestigkeit zu untersuchen, wurden Versuche mit unterschiedlichen effektiven Schraubenlängen durchgeführt. Für die bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse

benutzte er die Schlankheit der Schrauben λ als Verhältnis von l_{eff} zu d . Die Ergebnisse zeigten bei einer Schlankheit $\lambda > 9$ Stahlbrüche der Schrauben und zwischen $\lambda = 3,5 - 7,5$ einen linearen Anstieg der Ausziehfestigkeit. Die linearen Funktionen können demnach nach Gleichung 2.14 beschrieben werden.

$$f_{ax,mean} = 10,35 + 0,39 \cdot \lambda; f_{ax,k} = 8,44 + 0,23 \cdot \lambda; \lambda = \frac{l_{eff}}{d} \quad (2.14)$$

Schraubenabstände

Die Versuche zur Festlegung der Mindestabstände unter den Schrauben und dem Abstand der Schrauben zum Rand wurden mit Schrauben des Durchmessers 11 mm und einer nominalen Schraubenlänge von 70 mm durchgeführt. Es konnte dabei festgestellt werden, dass die Ausziehfestigkeit bei $a_2 = 3,0 d$ und $a_{2,cg} = 1,0 d$ im Mittel äquivalente Ergebnisse liefern wie die Referenzversuche, bei welchen die Schrauben in der Mitte der Prüfkörper eingedreht wurden und somit kein Einfluss anderer Schrauben oder des Randes gegeben waren. Die Ausziehfestigkeit zeigte jedoch bei geringeren Abständen eine erhöhte Variabilität.

Hirnholzanschlüsse

Die Prüfkörper für die Hirnholzanschlüsse hatten eine Länge von 1200 mm und einen Querschnitt von 78 x 78 mm². Der Anschluss bestand jeweils aus neun Schrauben vom Typ 1 mit $d = 11$ mm mit einem Abstand untereinander von $a_2 = 2 d$ und zu den Rändern von $a_{2,cg} = 1,5 d$. Die Vorbohrungen wurden bis zu einer Länge von 75 % von l_{ef} ausgeführt. Die Einbindetiefe l_{emb} variierte unter den Serien mit 0 mm und 50 mm.

In Abbildung 2-25 sind die Ergebnisse der untersuchten Hirnholzanschlüsse in [25] dargestellt. Die erste Zahl der Bezeichnungen der einzelnen Serie gibt dabei l_{emb} an, die zweite Zahl l_{nom} und die letzte Zahl d_c . Die Referenzversuche wurden an einer Schraube mit $d = 11$ mm und $l_{nom} = 70$ mm durchgeführt. Ob die Referenzversuche mit oder ohne einer Einbindetiefe durchgeführt wurden, wird in [25] nicht angegeben. In der Prüfkonfiguration 0_70_7 traten vermehrt Risse zwischen den einzelnen Schrauben und zum Rand auf. Bei der Konfiguration 0_70_9 wurden die Vorbohrungen 2 mm größer durchgeführt, was zur Folge hatte, dass die Ausziehfestigkeit sank, es aber zu keinen Rissen in den Prüfkörpern gekommen ist. Die Ausziehfestigkeit stieg erst mit Erhöhung der Einbindetiefe l_{emb} in den Prüferien 50_70_7 und 0+50_70_7. Eine Erhöhung von l_{nom} führte in 50_90_7 und 50_110_7 zu konstant bleibenden Ausziehfestigkeiten. In 50_110_7 kam es bereits zu einzelnen Schraubenbrüchen bei den Versuchen. Die relativ geringen erzielten Ergebnisse in 50_150_7 sind darauf zurückzuführen, dass es hier bereits zu Schraubenbrüchen bei allen Prüfungen gekommen ist. Die Prüfungen von Westermayer et al. [25] weisen generell eine sehr geringe effektive Verbindungsmittellanzahl auf. Diese besitzt ihren Höchstwert bei der Serie 0+50_70_7 mit 76 % der vorhandenen Verbindungsmittel und ist damit um rund 5 % geringer als der Mittelwert anderer hier vorgestellten Untersuchungen. (vgl. Abschnitt 2-4.5.9)

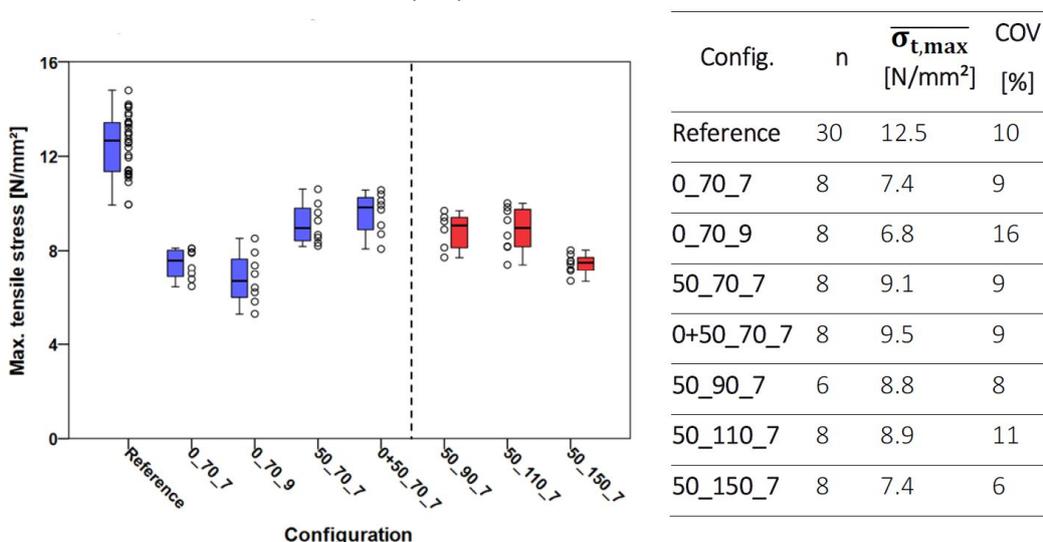


Abbildung 2-25 Links: Boxplot der erzielten Ausziehfestigkeiten der untersuchten Hirnholzanschlüsse in [25]; Rechts: Prüferien mit Anzahl der Prüfungen, Mittelwert der Ausziehfestigkeiten und Variationskoeffizienten

2-4.5.9 Zusammenfassung der Literaturrecherche

In Tabelle 2-7 sind zusammenfassend die maßgebenden Erkenntnisse der Gruppenversuche der in diesem Abschnitt diskutierten Arbeiten dargestellt. In Tabelle 2-8 sind zudem die Ergebnisse der Versuche mit Abstandsvariationen aufgelistet.

Tabelle 2-7 Ergebnisse der maßgebenden Gruppenprüfungen der vorgestellten Arbeiten in der Literatur

	Mat.	d [mm]	n [-]	# [-]	a_2	$a_{2,cg}$	l_{emb}	l_{ef}	η_{netto}	n_{ef}	Versagen ¹⁾
Obermayer [15]	BI	10	13	1	2,1 d	2 d	5 d	19 d	0,86	(0,85)	ASP
Grabner et al. [40]	BI	10	13	13	2,1 d	2,8 d	5 d	19 d	-	0,92	SB/ASP
Koppauer [26]	BU	8	19	6	3 d	2 d	2 d	11,5 d	0,61	0,87	ASP
Koppauer [26]	BU	8	19	6	3 d	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d	11,5 d	0,66	0,94	ASP
Koppauer [26]	BB	8	19	6	3 d 4 d	2 d	2 d	11,5 d	0,43	0,77	ASP
Koppauer [26]	BB	8	19	6	3 d 4 d	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d	11,5 d	0,45	0,80	ASP
Eckerstorfer [42]	BU	8	19	6	3 d	2 d	8,4 d	11,5 d	\sim 0,72	-	HZ
Eckerstorfer [42]	BB	8	19	6	3 d 4 d	2 d	8,4 d	11,5 d	\sim 0,48	-	HZ/ASP
Westermayer et al. [25]	BU	11	9	8	2 d	1,5 d	0	6 d	-	0,59	ASP
Westermayer et al. [25]	BU	11	9	8	2 d	1,5 d	4,5 d	6 d	-	0,73	HZ
Meyer [44]	BB	10	4	5	2,5 d	1,5 d	5 d	14 d	-	-	SB

¹⁾ ASP...Aufspalten; SB...Schraubenbruch; HZ...Herausziehen; BI...Birke; BU...Buche; BB...BauBuche

Tabelle 2-8 Ergebnisse der Versuche mit Abstandsvariationen der vorgestellten Arbeiten in der Literatur

	Material	d [mm]	n [-]	# [-]	a_2	$a_{2,cg}$	l_{emb}	l_{ef}	Anmerkung
Koppauer [26]	Buche	8	3	10	2 d	1,5 d	2 d	11,5 d	Aufspalten, $a_{2,cg}$ zu gering
Koppauer [26]	Buche	8	3	10	3 d	1,5 d	0	11,5 d	Aufspalten, $a_{2,cg}$ zu gering
Koppauer [26]	BauBuche	8	3	10	3 d 4 d	3 d	2 d	11,5 d	Kein Aufspalten
Westermayer et al. [25]	Buche	11	9	8	3 d	1 d	0	6 d	Ausziehfestigkeit im Mittel gleich wie Referenzversuche, kein Aufspalten
Gatternig [39]	Fichte	6	-	-	-	2 d	-	10 d	

Das Ziel im Design und der Herstellung eines wirtschaftlich und mechanisch optimierten Hirnholzanschlusses ist es, eine maximale Tragfähigkeit und einen hohen Wirkungsgrad der Verbindung zu erreichen. Eine Steigerung des Wirkungsgrades bezogen auf den Bruttoquerschnitt kann bei Verschraubungen im Holzbau ohne Verstärkungsmaßnahmen nur durch eine Erhöhung der Einschraublänge, der Einbindetiefe, der Leistungsfähigkeit der Schraube oder durch eine erhöhte Verbindungsmittellanzahl erreicht werden. Aus einer Erhöhung der Verbindungsmittellanzahl folgen jedoch engere Abstände der Verbindungsmittel im gleichen Querschnitt und somit die Gefahr, dass die Verbindung ein verändertes Versagensverhalten (z. B. Aufspalten) aufweist, was wiederum zu einer Reduktion der Tragfähigkeit führt.

Eine Optimierung der Verbindung kann daher nur durch Herantasten und Variation der für die Tragfähigkeit bestimmenden Parameter an die optimalen Abmessungen erfolgen.

Koppauer [26] zeigte mit Einschraubversuchen die Mindestmaße des Holzbauteiles auf, die erforderlich sind, damit es zu keinem Aufspalten des Holzkörpers bereits bei der Herstellung bzw. beim Einschrauben der Schrauben kommt. Hier konnte bereits die Notwendigkeit des Vorbohrens aufgezeigt werden, da sich dadurch die Mindestabstände deutlich verringern.

Gehri [37] schlägt einen Verbindungsmittelabstand von $2,6 d$ bis $3,3 d$ als optimalen Abstand vor, um eine Verbindung hinsichtlich des Ausnutzungsgrades und somit auch der Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Er zeigte jedoch auf, dass für eine maximale Tragfähigkeit der Verbindung je Schraube eine Holzfläche von Nöten ist, die mindestens $5 d$ im Quadrat beträgt. Eine Reduktion dieser Fläche geht mit einer verringerten Festigkeit einher. Auch bei der Bestimmung der Referenzeinzeltragfähigkeit muss demnach die Fläche pro Schraube berücksichtigt werden. Diese Erkenntnisse sind auch im aktuellen EC 5 [6] als Mindestabstand für a_2 verankert.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung optimierter Abstände ist die Variation des Abstandes zwischen zwei oder drei Schrauben mit Bezug darauf, dass der Einzelschraube ausreichend Volumen zur Verfügung steht. (vgl. Tabelle 2-8) Hier konnte bereits aufgezeigt werden, dass nicht nur die Abstände a_2 und $a_{2,CG}$ die Tragfähigkeit beeinflussen sondern auch die Einbindetiefe der Schraube l_{emb} .

Bei den Gruppenversuchen (vgl. Tabelle 2-7) stehen Versuchsergebnisse für Buche, Birke und BauBuche zur Verfügung mit verschiedenen beobachteten Versagensmechanismen. Das generelle Ziel ist es, ein Aufspalten des Holzkörpers zu verhindern, da dieser Versagensmechanismus generell große Streuungen des Widerstandes aufweist und im Vorfeld schwer zu lokalisieren ist. Demzufolge ist es auch schwierig festzustellen an welcher Stelle ein Nachweis erfolgen oder gar eine Verstärkung angebracht werden sollte. Das Ziel im Design einer Hirnholzverbindung ist somit stets den Versagensmechanismus Ausziehversagen oder Schraubenbruch zu erreichen. Deren Unterscheidung ist rein auf den Einfluss von l_{ef} zurückzuführen.

Bei einem Abstand von $a_2 = 2,5 d$ und einer Einbindetiefe von $4,5 d$ konnte von Westermeyer [25] bereits ein Ausziehversagen erreicht werden. Jedoch war die effektive Verbindungsmittellanzahl mit rund 70 % sehr gering. Von Eckerstorfer [42] konnte durch einen Abstand von $a_2 = 3 d$ bei Versuchen mit Buche eine wesentlich höhere effektive Verbindungsmittellanzahl erreicht werden, jedoch führte die Erhöhung von a_2 zu einer Verringerung des Wirkungsgrades. Bei Versuchen mit BauBuche konnte hingegen ein Aufspalten der Versuchskörper nicht verhindert werden, weshalb hier weitere Untersuchungen mit erhöhter Einbindetiefe l_{emb} von Nöten sind. Bei den Versuchen mit den vielversprechenden Abstufungen der Schrauben in Koppauer [26] konnte ebenfalls das Aufspalten der Versuchskörper nicht verhindert werden, weshalb hier ebenfalls weitere Untersuchungen mit erhöhter Einbindetiefe erforderlich sind. Diese Aspekte sind Teil bzw. Ziel dieser Arbeit.

In Koppauer [26] und Eckerstorfer [42] zeigten die Last-Verformungskurven der Gruppenuntersuchungen zudem ein atypisches Verhalten, weshalb die Auswertung des Verschiebungsmoduls K_{ser} nicht möglich war oder unerwartete Ergebnisse lieferte. Auch auf mögliche Gründe hierfür soll im Zuge dieser Arbeit eingegangen werden.

2-5 GENEIGT ANGEORDNETE SCHRAUBENGRUPPEN

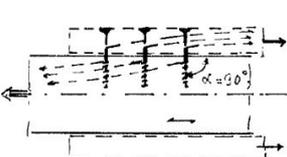
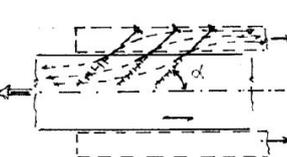
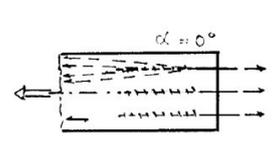
Dieser Abschnitt gibt eine Einleitung über wesentlich Aspekte und Anforderungen von Verbindungen mit geneigt angeordneten Schraubengruppen. Im Rahmen des Projektes „hardwood_joint“ wird ein Teilbereich dieser Verbindungen untersucht. Es liegt hier der Fokus auf die Herstellbarkeit und den erforderlichen Mindestabständen $a_{1,t}$ und $a_{3,t}$ bei einem Holz-Holz-Zuglaschenstoß mit einer Schraubenreihe.

2-5.1 DESIGN UND HERSTELLUNG

Ein Anschluss mit geneigt angeordneten selbstbohrenden Holzschrauben ist bestens geeignet, die in Abschnitt 2-3 genannten Anforderungen an Verbindungen in hohem Maße erfüllen zu können. Dabei kann das Verhalten der Schraubenverbindung durch eine Variation der Schraubenneigung sowie die Anordnung von Stahlteilen in der Verbindung hinsichtlich der Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität gesteuert werden.

Bei Anordnung der Schrauben rechtwinklig zur Faserrichtung werden die Schrauben fast ausschließlich auf Abscheren beansprucht, was dazu führt, dass die Verbindung zwar sehr duktil, jedoch weniger leistungsfähig hinsichtlich Tragwiderstand und ganz besonders bezüglich Steifigkeit ausgebildet werden kann. Wird der Einschraubwinkel α zwischen Schraubenachse und Faserrichtung bei gleichbleibendem Beanspruchungswinkel γ zwischen Kraft- und Faserrichtung verringert, so ergibt sich dadurch eine Steigerung der Tragfähigkeit und der Steifigkeit, jedoch wird die Duktilität der Verbindung verringert.

In [29] wird die Möglichkeit der Steuerung des Verbindungsverhaltens durch eine Variation des Einschraubwinkels α anschaulich demonstriert. Gehri geht hierbei insbesondere auf den Bereich zwischen 45° und 90° des Einschraubwinkels ein und zeigt auf, dass die gewünschte Duktilität zwischen 90° und 75° auftritt. Im Bereich der Schraubenneigung von 45° bis 60° ergeben sich zwar sehr steife Verbindungen mit hoher Tragfähigkeit, jedoch versagen diese Verbindungen spröde. (vgl. Abschnitt 2-5.4.4)

	Einschraubwinkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung		
	$\beta = 90^\circ$	$90^\circ > \beta > 0^\circ$	$\beta = 0^\circ$
Anschluss-Geometrie			
Beanspruchung	überwiegend auf Biegung	überwiegend axial (mit sinkendem Winkel β)	rein axial
Tragfähigkeit	normal	steuerbares Verhalten in Abhängigkeit des Winkels β	maximal
Steifigkeit	weich		sehr steif
Duktilität	duktil ¹		spröd
Versagen	plastisches Biegeversagen		Herausziehen oder Schraubenbruch
Zusatzeffekte	Aufspalten des Holzes entlang der Schraubenreihe	Querzug des Holzes in der Stabachse	Aufspalten Blockscheren

1. Falls das Aufspalten des Holzes durch Einhaltung der Mindestabstände ausgeschlossen ist.

Abbildung 2-26 Einfluss des Einschraubwinkels α auf das Verbindungsverhalten bei einem Last-Faser-Winkel $\gamma = 0^\circ$ aus [27] (Der Winkel β entspricht dem Winkel α nach Notation dieser Arbeit)

Die Tragwirkung der Schrauben setzt sich bei dem vorliegenden Verbindungssystem nicht nur aus einem Tragvermögen gegen Herausziehen der Schrauben zusammen, sondern auch aus einer Komponente infolge der Beanspruchung der Schrauben auf Abscheren.

Auf Abscheren beanspruchte Holz-Holz- bzw. Holz-Stahlblech-Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben werden in der Bemessung nach ÖNORM EN 1995-1-1 [6] abhängig vom Nenndurchmesser der Schraube behandelt wie andere Verbindungen mit vergleichbaren stiftförmigen Verbindungsmitteln. Schrauben mit einem wirksamen Durchmesser größer oder gleich 6 mm sind wie Bolzen zu behandeln; bei einem kleineren wirksamen Durchmesser gelten die Regelungen der Nagelverbindungen. Durch die Schrägstellung der Schrauben infolge der Belastung tritt bei diesen Verbindungen zusätzlich der sogenannte „Seileffekt“ auf. Durch Verformungen der Holzbauteile infolge der Belastung werden über die Verzahnung der Schrauben und durch Mantelreibung Zugkräfte in den Verbindungsmitteln aufgebaut. Dadurch entstehen Druckspannungen in der Scherfuge der zu verbindenden Bauteile, wodurch Reibungseffekte auftreten, welche eine Erhöhung der Tragfähigkeit zur Folge haben. Die Größe dieser Tragfähigkeitssteigerung hängt dabei von dem Reibbeiwert der beiden Bauteile ab. In Abbildung 2-27 ist die schematische Wirkung des Seileffekts für eine Bolzenverbindung mit dem Versagensmechanismus III nach Johansen dargestellt. Prinzipiell tritt der Seileffekt auch bei den anderen Versagensmechanismen nach Johansen mit einer Schrägstellung der Verbindungsmittel auf. Der Seileffekt unterscheidet sich bei Schraubenverbindungen dahingehend von jenen mit Bolzen, dass durch die Verzahnung der Schrauben und der damit einhergehenden besseren Einleitung der Kräfte in die Verbindungsmittel ein höherer Anteil des Seileffekts bei der Bemessung in Rechnung gestellt werden kann.

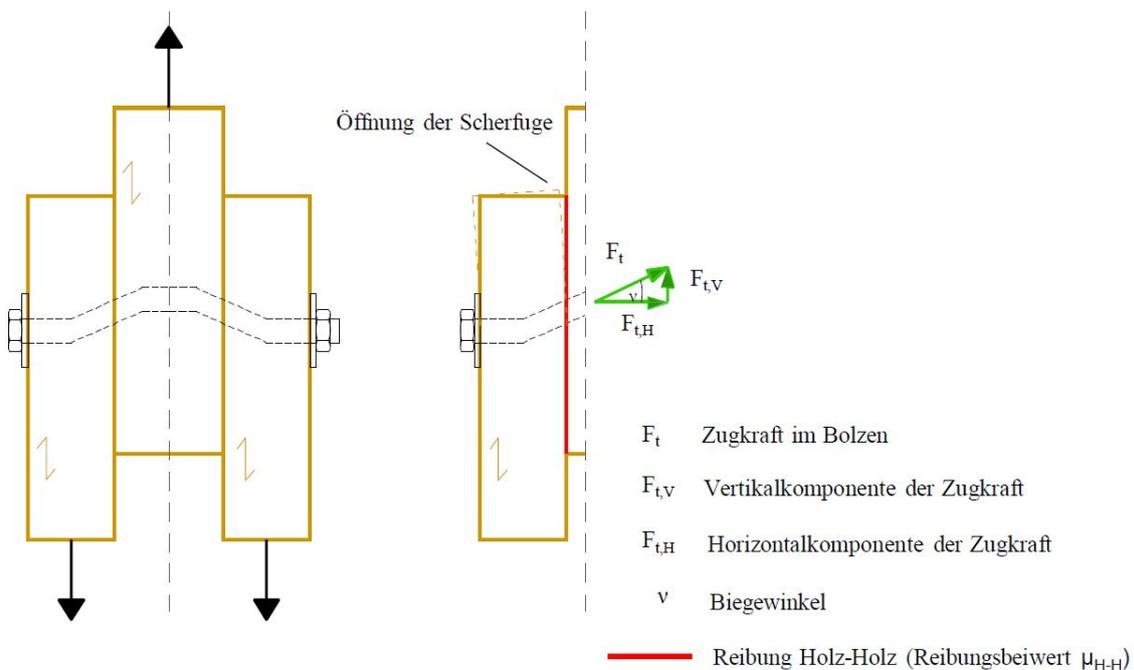


Abbildung 2-27 Schematische Darstellung des Seileffekts bei einer zweischnittigen Holz-Holz-Verbindung mit einem Bolzen bei Auftreten des Versagensmechanismus III nach Johansen aus [45]

Eine Aufteilung der beiden Lastanteile Abscheren und Herausziehen ist laut [27] nur schwer möglich. Demnach stellt sich alleine wegen der großen Steifigkeitsunterschiede zwischen den jeweiligen Versagensarten die Frage nach der Notwendigkeit dieser Aufteilung. Auf der sicheren Seite liegend kann die Tragfähigkeit mit einer quadratischen Interaktionsbedingung abgebildet werden. (vgl. Gleichung 2.15 nach ÖNORM EN 1995-1-1 [6]) Die Bestimmung der rechnerischen Steifigkeit ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet, weshalb hier diese klare Beziehung nicht erkennbar sei.

$$\left(\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (2.15)$$

$F_{ax,Rd}$ Bemessungswert der Tragfähigkeiten der Verbindung in Richtung der Schraubenachse [kN]
 $F_{v,Rd}$ Bemessungswert der Tragfähigkeiten der Verbindung rechtwinklig zur Schraubenachse [kN]

$F_{ax,Ed}$ Bemessungswert der Beanspruchungen der Verbindung in Richtung der Schraubenachse [kN]
 $F_{v,Ed}$ Bemessungswert der Beanspruchungen der Verbindung rechtwinklig zur Schraubenachse [kN]

Nach [26] ist die Betrachtung der kombinierten Beanspruchung jedoch aus mehreren Gründen vernachlässigbar:

- In Abhängigkeit der Schraubenlänge und mit sinkendem Einschraubwinkel wird der Anteil der lateralen Tragfähigkeit immer kleiner. Der überwiegende Teil der Kräfte im Verbindungssystem wird daher durch die Verankerung des Gewindes in das Holz eingeleitet.
- Infolge axialer Beanspruchung kommt es zwar zu einer Reduktion des Lochleibungswiderstandes, doch sind die Bereiche in denen die Höchstwerte der Lochleibungsspannung auftreten lokal sehr begrenzt. Der überwiegende Teil des Schraubengewindes liegt somit außerhalb der lochleibungsbeanspruchten Bereiche.
- Aufgrund der großen Steifigkeitsunterschiede der beiden Beanspruchungsarten sollte eine der Grundregeln der Baustatik angewendet werden, wonach ein gleichzeitiges Wirken von mehreren Komponenten nur dann berücksichtigt werden sollte, wenn sie ein ähnliches Last-Verformungs-Verhalten aufweisen.

Auch unter Berücksichtigung der rein axialen Tragfähigkeit und bei $\alpha \neq \gamma$ entsteht eine Reibungskomponente, die die gesperrte Oberflächenverformung bewirkt. (vgl. Abbildung 2-28) Infolge der Schraubenneigung tritt eine vertikale Komponente der Kraft in der Schraube auf und damit in weiterer Folge die Aktivierung einer Reibungskraft zwischen den verbundenen Bauteilen.

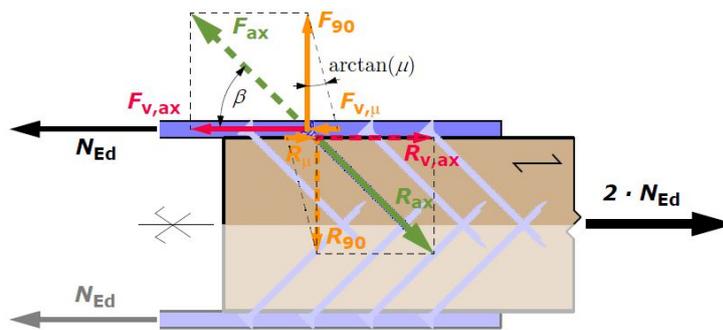


Abbildung 2-28 Reibungswirkung bei Berücksichtigung rein axialer Tragfähigkeit geneigt angeordneter Schraubengruppen anhand einer Zuglaschenverbindung mit außenliegenden Stahlblechen aus [27]

2-5.2 VERSAGENSMECHANISMEN

Die maßgebenden Versagensmechanismen, welche bei geneigt angeordneten Schrauben auftreten können, sind in Tabelle 2-9 aufgelistet.

Tabelle 2-9 *Versagensmechanismen bei geneigt angeordneten Schraubengruppen*

Versagensmechanismus	Art des Versagens
Ausziehen der Schraube	Holzversagen
Stahlbruch der Schraube	Stahlversagen
Aufspalten	Holzversagen
Kopfdurchziehen	Holzversagen
Stabilitätsversagen der Schraube	Stahlversagen
Blockscheren	Holzversagen
Reihenscheren	Holzversagen
Zug-Netto-Bruch	Holzversagen
Querzugversagen	Holzversagen
Lochleibungsversagen	Holzversagen

Auf die Versagensmechanismen Stahlbruch der Schraube, Ausziehen der Schraube, Aufspalten und Kopfdurchziehen wurde bereits in Abschnitt 2-3 eingegangen. Diese Versagensmechanismen unterscheiden sich grundsätzlich bei Verbindungen mit geneigt angeordneten Schrauben nicht von den Hirnholzanschlüssen. Durch die mögliche unterschiedliche Neigung der Schraube zur Faserrichtung und der Neigung zwischen Belastungsrichtung des Anschlusses und Faserrichtung, kommt es bei diesen Verbindungen im Gegensatz zu den Hirnholzanschlüssen zu einer zusätzlichen Beanspruchung der Schrauben auf Abscheren. Weiters ist die Beanspruchung des Holzbauteils durch die Kräfteinleitung der Schrauben nicht ausschließlich in Faserrichtung des Holzes. Eine zusätzliche Unterscheidung in Abhängigkeit der Position der Verbindung im Träger beeinflusst die möglichen Versagensmechanismen. Abbildung 2-29 zeigt auf Abscheren beanspruchte VM im Endbereich eines stabförmigen Trägers. Diese können beispielsweise bei symmetrischen Zuglaschenstößen auftreten. Abbildung 2-30 zeigt Versagensmechanismen für Verbindungen für rein axiale Beanspruchung der Schrauben, einseitige Queranschlüsse mit geneigt angeordneten Schraubengruppen und abhebendem Blech.

Durch diesen Umstand können die Versagensmechanismen Reihenscheren, Zug-Netto-Versagen, Querzugversagen und Lochleibungsversagen für diese Verbindungen u. U. relevant werden. Auf diese Versagensmechanismen wird hier kurz eingegangen.

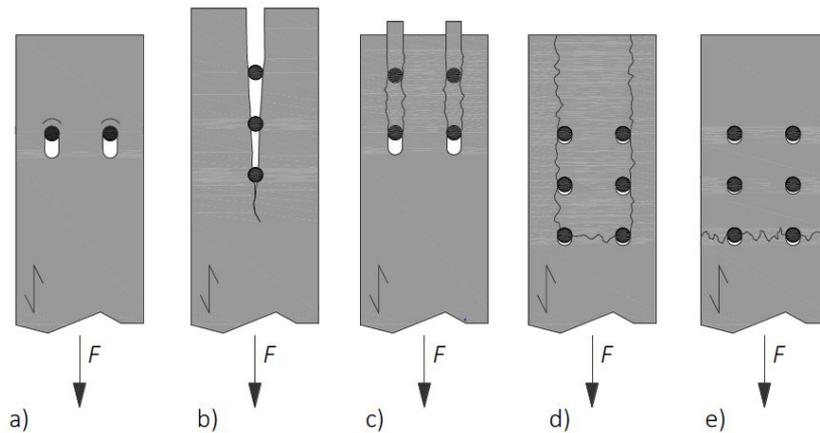


Abbildung 2-29 Versagensmechanismen bei auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmitteln bei einer Beanspruchung in Faserrichtung im Endbereich eines stabförmigen Trägers; a) Lochleibung; b) Aufspalten; c) Reihenscheren; d) Blockscheren; e) Zug-Netto-Bruch; aus [46]

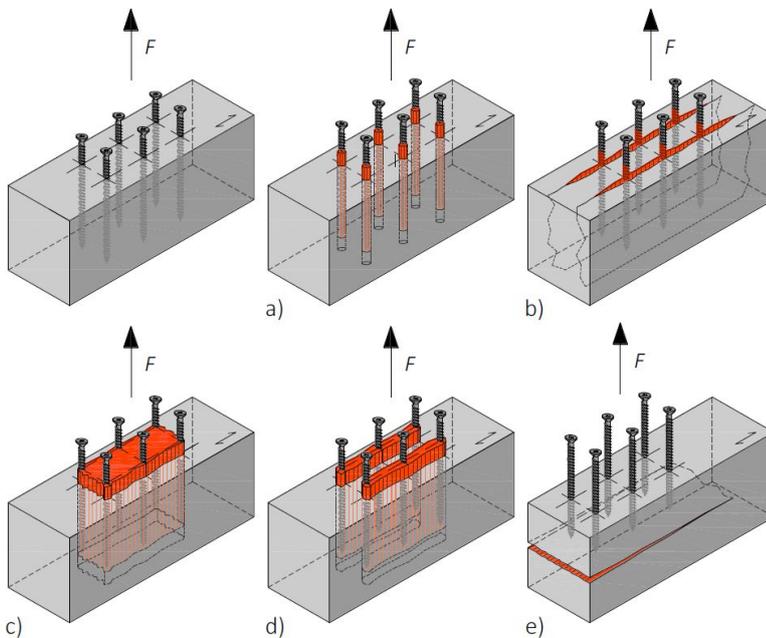


Abbildung 2-30 Versagensmechanismen des Holzes bei auf Herausziehen beanspruchten stiftförmigen Verbindungsmitteln rechtwinklig zur Faserrichtung; a) Ausziehen der Schrauben; b) Aufspalten; c) Blockscheren; d) Reihenscheren; e) Querkzugversagen aus [47]

2-5.2.1 Blockscheren/Querkzugversagen

Beim Blockscheren kommt es im Bereich der Umrisslinie der Verbindungsmittelgruppe zu einem Herausscheren des von der Gruppe umschlossenen Holzvolumens.

Für lateral beanspruchte Verbindungsmittel werden beim Blockscheren zwei Fälle unterschieden. Man unterscheidet dabei „block shear“, wo es zu einem Versagen über die komplette Holzdicke kommt und „plug shear“, wo das Versagen nur über einen Teil der Holzdicke auftritt. (vgl. Abbildung 2-31) Dies kann auch sinngemäß für geeigt angeordnete, symmetrische oder einseitige Zuganschlüsse angewendet werden. Die ÖNORM EN 1995-1-1 [6] (Anhang A) beinhaltet ein Nachweisverfahren für Stahlblech-Holz-Verbindungen mit mehreren stiftförmigen Verbindungsmitteln, die durch eine Kraftkomponente in Faserrichtung nahe am Hirnholzende beansprucht werden.

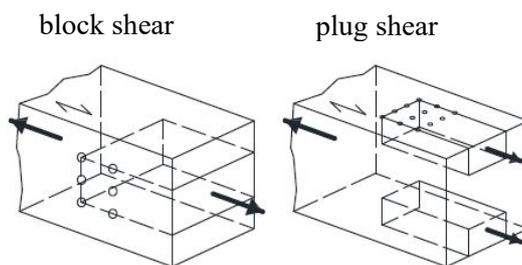


Abbildung 2-31 Unterscheidung der beiden Fälle "block shear" und "plug shear" bei Blockscherversagen, aus [48]

Blockscheren im Sinne eines Herausscheren des Holzvolumens quer zu Faserrichtung, durch Überschreiten der Querkzug-, Rollschub- und Schubfestigkeiten entlang der Außenflächen des Volumens kann bei einseitigen Queranschlüssen auftreten, siehe Abbildung 2-32.

Mahlknecht und Brandner [49] untersuchten das Tragverhalten von Anschlüssen mit axial beanspruchten Schraubengruppen an Prüfkörpern aus Brettschichtholz (BSH) und Brettspertholz (BSP). Die Versuche wurden für die Krafrichtungen von 45° und 90° zur Faserrichtung durchgeführt. Aus diesen Versuchen schlagen Mahlknecht und Brandner [49] ein Bemessungsmodell zur Berücksichtigung des Blockscherversagens vor. In diesem Modell werden die Steifigkeiten der auf Querkzug, Rollschub oder Schub beanspruchten Flächen des Quaders als lineare Federsteifigkeiten ermittelt. Anschließend wird jene Fläche bestimmt für die das Verhältnis aus Tragfähigkeit zu Steifigkeit und somit die Bruchverformung am geringsten ist. Nach dem Versagen dieser gedanklichen Fläche wird die Beanspruchung über die noch intakten Flächen umgelagert. Dadurch wird ein sukzessives Versagen beschrieben. Bei den von Mahlknecht und Brandner [49] durchgeführten Versuchen wurde ein Abscheren der Fasern in Längsrichtung, im Modell das Scherversagen der Flächen $A_{s,s}$, nicht beobachtet. Jedoch wurden Risse in Faserrichtung entlang der äußeren Schraubenreihen festgestellt, die über die Quaderlänge hinausreichen. Im Modell entspricht dies den Rollschubflächen. Bei bestimmten geometrischen Konfigurationen werden andere Versagensflächen als die Umhüllungsflächen des Quaders maßgebend. So tritt ein Querkzugversagen wie in Abbildung 2-32 dargestellt bei einem geringen Verhältnis der Einschraubtiefe l_{ef} zur Bauteilhöhe H und einer großen Breite der Gruppe bzw. einzelne Schraubenreihen des Anschlusses auf. Das Modell von Mahlknecht und Brandner [49] bietet derzeit keinen Bemessungsvorschlag für geneigt angeordnete Schraubengruppen, da dieses Modell für Verbindungen mit Schrauben rechtwinklig zur Faserrichtung definiert wurde.

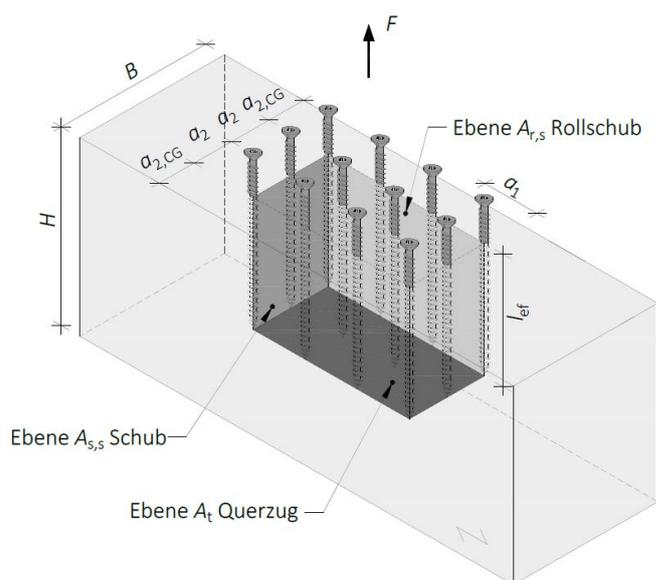


Abbildung 2-32 Auf Querkzug, Rollschub oder Schub beanspruchten Flächen des die Schraubengruppe umhüllenden Quaders aus [46]

Dass dieses Versagen jedoch auch bei geneigt angeordnete Schraubengruppen in einseitigen Anschlüssen auftreten kann, wurde von Mahlknecht und Brandner [49] gezeigt. Dabei wurde eine Gruppe von 14 Schrauben mit dem Durchmesser $d = 8$ mm mit einem Winkel von 45° in Brettschichtholz aus Fichte eingebracht. Der Träger wurde beidseitig gelagert.



Abbildung 2-33 *Blockscherversagen bei einseitigen Queranschlüssen mit geneigt angeordneten Schraubengruppen; rechts: Versuchsaufbau; links: Risse im aufgetrennten Querschnitt; aus [49]*

Ein weiteres Modell, um den Versagensfall Blockscheren zu bemessen, wird von Blaß et al. [47] vorgestellt. Hier wird explizit neben rechtwinklig zur Faserrichtung eingedrehten Schrauben auch auf geneigt angeordnete Schraubengruppen eingegangen. Um den komplexen Versagensmechanismus Blockscheren mit einem Berechnungsmodell abdecken zu können, wird von Blaß et al. [47] der Kraftanteil im rechten Winkel zur Faserrichtung herangezogen und der charakteristische Widerstand einer Gruppe von Schrauben unter einer Neigung zur Faserrichtung des Holzes aus dem Mindestwiderstand, der folgenden vier Versagensmechanismen berechnet: Ausziehversagen, Schraubenbruch, Querkzugversagen und Rollschubversagen über die gesamte Trägerhöhe. Womit auch das Blockscheren und Reihenscheren abgedeckt sind.

2-5.2.2 Reihenscheren

Bei diesem Versagensmechanismus gemäß Abbildung 2-30 d) kommt es im Gegensatz zum Blockscheren nicht zu einem kompletten Ausscheren der Verbindungsmittelgruppe sondern lediglich zu einem Ausscheren des Holzes zwischen einer Schraubenreihe in Faserrichtung. Im Falle einer Anordnung der Schrauben 90° zur Faser wird die Rollschubfestigkeit des Holzes entlang des Versagensumrisses durch die Belastung überschritten, wodurch es zu einem „Abrollen“ der Fasern untereinander kommt und in weiterer Folge zum Versagen der Verbindung. Bei geneigt angeordneten Schrauben ist es eine Interaktion von Rollschub- und Schubversagen des Holzes.

In [50] wurden zwei Gewindestangen unter einem Winkel von 45° und 90° zur Faserrichtung in BauBuche eingeklebt und anschließend belastet. Die Gewindestangen hatten dabei einen Durchmesser von 12 mm und der Abstand a_1 betrug $3,5 d$. In Abbildung 2-34 sind die dabei aufgetretenen Versagensbilder dargestellt. Es ist dabei das lokale Versagen innerhalb der Verbindungsmittelreihe gut zu erkennen.

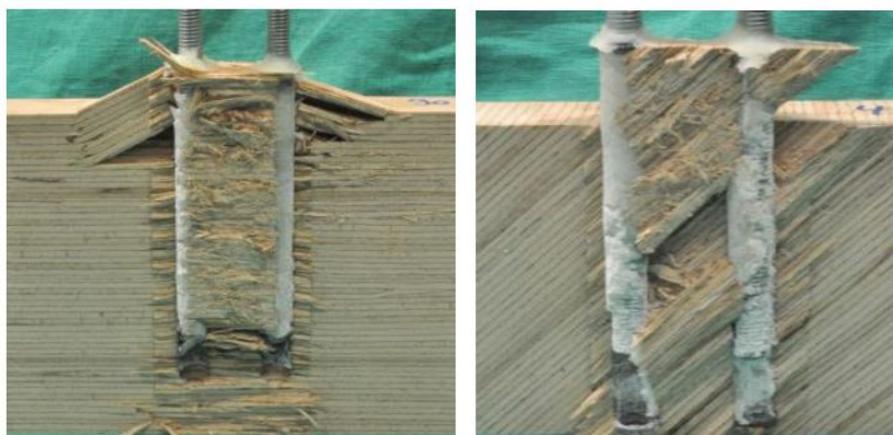


Abbildung 2-34 Versagen durch Reihenscheren einer Verbindungsmittelgruppe aus zwei Schrauben appliziert in BauBuche; links: $\alpha = 90^\circ$; rechts: $\alpha = 45^\circ$; aus [50]

Abhängig vom Anschlussstyp ist genauso ein Reihenscheren im Sinne nach Abbildung 2-29 c) möglich. Dies entspricht einem Schubversagen in Faserrichtung.

2-5.2.3 Zug-Netto-Bruch

Dieses spröde Versagen des Holzquerschnitts ist insbesondere bei Verbindungen mit hohem Wirkungsgrad von Bedeutung. Hier wird die Bauteiltragfähigkeit in Folge der Querschnittsschwächung durch die applizierten Verbindungsmittel hinsichtlich Zug oder Biegung überschritten. Insbesondere lokale Exzentrizitäten – und damit unerwünschte zusätzlich auftretende Biegemomente – können zu Überbeanspruchung im Holz führen. Der Nachweis dieses Versagensmechanismus muss am Nettoquerschnitt durchgeführt werden. Bei Schrägschraubverbindungen ist dieser Querschnitt schwerer zu definieren als etwa bei den Hirnholzanschlüssen weshalb unter anderem Brandl [51] wichtige Forschungsarbeiten in diesem Bereich durchführte. (siehe Abschnitt 2-5.4.5)



Abbildung 2-35 Versagensbilder des Zug-Netto-Bruchs bei einer Verbindung mit geneigt angeordneter Schraubengruppe mit hohem Wirkungsgrad aus [51]

2-5.2.4 Lochleibungsversagen

Durch die Beanspruchung der Schrauben auf Abscheren wird das Holzbauteil auch auf Lochleibung beansprucht. Durch ein Überschreiten der Lochleibungsfestigkeit kann es so zu einem lokalen Versagen im Holzbauteil kommen. Bei vorwiegend axial beanspruchten Schrauben ist dieser Versagensmechanismus aufgrund der meist großen Schlankheit der Schrauben, l_{ef} / d , eher für den oberflächennahen Bereich relevant.

Die Lochleibungsfestigkeit des Holzes ist laut ON EN 1995-1-1 [6] nach den folgenden Formeln definiert.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (2.16)$$

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (2.17)$$

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 \cdot d & \text{für Nadelhölzer} \\ 1,30 + 0,015 \cdot d & \text{für Furnierschichtholz LVL} \\ 0,90 + 0,015 \cdot d & \text{für Laubhölzer} \end{cases} \quad (2.18)$$

- $f_{h,0,k}$ charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung des Holzes [N/mm²]
- $f_{h,\alpha,k}$ charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit unter dem Winkel α zur Faserrichtung des Holzes [N/mm²]
- α Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung [°]
- d Bolzendurchmesser bzw. effektiver Schraubendurchmesser [mm]
- ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzes [kg/m³]

2-5.3 GEOMETRISCHE UND WEITERE RELEVANTE PARAMETER

2-5.3.1 Mindestabstände

Im Gegensatz zu den Hirnholzanschlüssen sind bei geneigt angeordneten Schraubengruppen mehrere Schrauben- und Randabstände von Relevanz. In Abbildung 2-36 sind die relevanten Abstände für axial beanspruchte Schrauben dargestellt. Bezugspunkt dieser Abstände ist dabei stets der Schwerpunkt des im jeweiligen Holzbauteil applizierten Gewindeteils der Schraube. Bei diesen Abständen handelt es sich um:

- a_1 : Abstand in einer parallel zur Faserrichtung und Schraubenachse liegenden Ebene
- a_2 : Abstand rechtwinklig zu einer parallel zur Faserrichtung und Schraubenachse liegenden Ebene
- $a_{1,cg}$: Abstand der Holzenden zum Schwerpunkt des Schraubengewindes im Bauteil
- $a_{2,cg}$: Randabstand des Schwerpunkts des Schraubengewindes im Bauteil

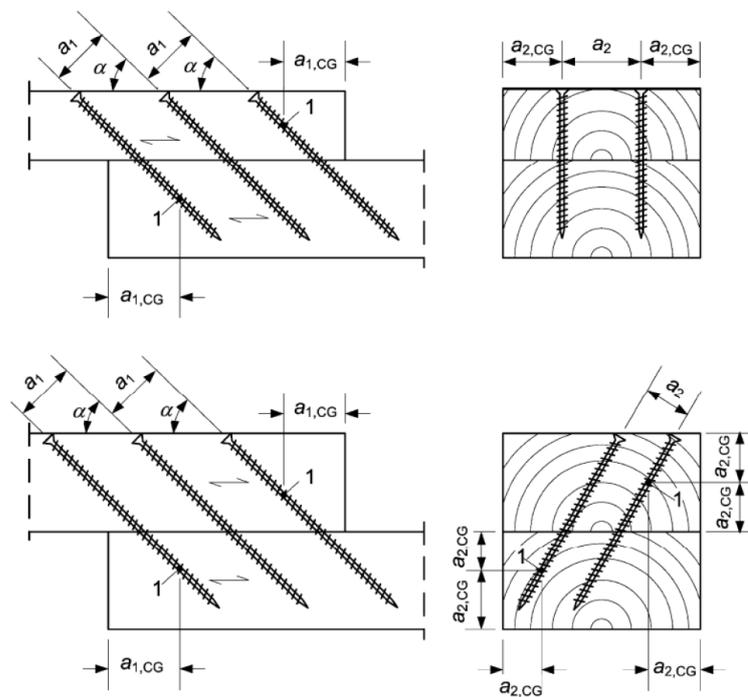


Abbildung 2-36 Relevante Abstände bei geneigt angeordneten axial beanspruchten Schraubengruppen anhand einer Holz-Holz-Verbindung aus [6]

Laut ÖNORM EN 1995-1-1 [6] sind die Mindestabstände für a_1 mit $7 d$, für a_2 mit $5 d$, $a_{1,cg}$ mit $10 d$ und für $a_{2,cg}$ mit $4 d$ definiert.

Laut der technischen Zulassung der in dieser Arbeit verwendeten Schrauben [21] sind die Mindestabstände für a_1 mit $5 d$, für a_2 mit $5 d$, $a_{1,cg}$ mit $5 d$ und für $a_{2,cg}$ mit $4 d$ definiert, unter der Voraussetzung, dass $d \leq 8 \text{ mm}$ ist und eine Mindestholzdicke von $12 d$ bei nicht vorgebohrten Löchern vorhanden ist. Der Abstand a_2 kann auf $2,5 d$ ($3,0 d$) reduziert werden, falls das Produkt von a_1 und a_2 mit $25 d^2$ ($21 d^2$) für jede Schraube eingehalten werden kann.

Tabelle 2-10 Gegenüberstellung der erforderlichen Mindestabstände bei axial belasteten Schraubengruppen nach ÖNORM EN 1995-1-1 [6] und ETA-12/0373 [21]

	ÖNORM EN 1995-1-1 [6]	ETA-12/0373 [21]*
a_1	$7 d$	$5 d$
a_2	$5 d$	$5 d$ $a_1 \cdot a_2 \geq 25 \cdot d^2$ ($21 \cdot d^2$): $2,5 d$ ($3 d$)
$a_{1,cg}$	$10 d$	$5 d$
$a_{2,cg}$	$4 d$	$4 d$

*... $d \leq 8 \text{ mm}$; $t \geq 12 d$

Bei einer Beanspruchung der Schrauben auf Abscheren werden neben den bereits aufgezählten Abständen bei einer reinen axialen Beanspruchung der Schrauben weitere Abstände relevant. Hier erfolgt eine Unterscheidung nach der Beanspruchungsrichtung, weshalb man von belasteten und unbelasteten Rändern bzw. Hirnholzenden spricht. (vgl. Abbildung 2-37)

$a_{3,t}$: Abstand des belasteten Hirnholzendes zum Schwerpunkt des Schraubengewindes im Bauteil

$a_{3,c}$: Abstand des unbelasteten Hirnholzendes zum Schwerpunkt des Schraubengewindes im Bauteil

$a_{4,t}$: Abstand des belasteten Randes zum Schwerpunkt des Schraubengewindes im Bauteil

$a_{4,c}$: Abstand des unbelasteten Randes zum Schwerpunkt des Schraubengewindes im Bauteil

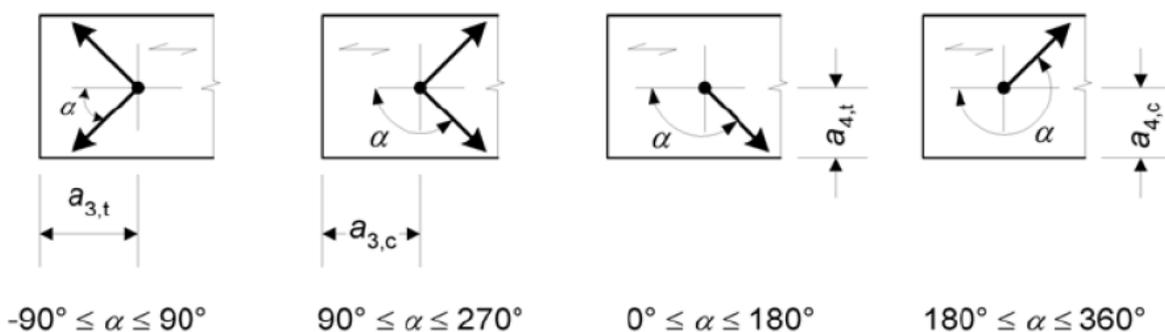


Abbildung 2-37 Relevante Abstände bei auf Abscheren beanspruchte Schraubengruppen in Abhängigkeit von der Beanspruchungsrichtung aus [6]

Nach ÖNORM EN 1995-1-1 [6] sind die Mindestabstände dabei abhängig vom effektiven Durchmesser der Schraube d_{ef} , der dem Durchmesser des glatten Schaftes bzw. dem 1,1-fachen Kerndurchmesser entspricht. Ist $d_{ef} \geq 6 \text{ mm}$ so gelten die Bestimmungen für Bolzen ist d_{ef} kleiner als 6 mm so gelten die Bestimmungen für Nägel. (vgl. Tabelle 2-11)

Laut der technischen Zulassung der in dieser Arbeit verwendeten Schrauben [21] muss $a_{4,c}$ und $a_{4,t}$ bei nicht vorgebohrten Löchern mindestens $15 d$ betragen, bei einem Schraubendurchmesser von $d > 8$ mm und einer Holzdicke kleiner als $5 d$. Weiters wird für $d < 8$ mm eine Mindestholzbauteildicke von 24 mm vorgegeben und für $d \geq 8$ mm die Mindestdicken laut Tabelle 2-12.

Tabelle 2-11 Mindestabstände für auf Abscheren beanspruchte Holzbauschrauben in Abhängigkeit des effektiven Schraubendurchmessers d_{ef} und des Belastungswinkels α laut ÖNORM EN 1995-1-1 [6] und ETA-12/0373 [21]

	Winkel	Mindestabstände für Bolzen [6] $d_{ef} \geq 6$ mm	Mindestabstände für Nägel [6] $d_{ef} < 6$ mm	Zusatzanforderungen laut [21]
a_1	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + \cos \alpha) \cdot d$	$(4 + \cos \alpha) \cdot d$	-
a_2	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4 \cdot d$	$(3 + \sin \alpha) \cdot d$	-
$a_{3,t}$	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7 \cdot d; 80 \text{ mm})$	$(7 + 5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	-
$a_{3,c}$	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	$(1 + 6 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$7 \cdot d$	-
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	$4 \cdot d$		
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$(1 + 6 \cdot \sin \alpha) \cdot d$		
$a_{4,t}$	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max[(2 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d; 3 \cdot d]$	$d < 5$ mm: $(3 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d \geq 5$ mm: $(3 + 4 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	Nicht vorgebohrt, $d > 8$ mm & $t < 5 \cdot d$: $15 \cdot d$
$a_{4,c}$	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3 \cdot d$	$3 \cdot d$	Nicht vorgebohrt, $d > 8$ mm & $t < 5 \cdot d$: $15 \cdot d$

Tabelle 2-12 Mindestdicke für Holzbauteile in Abhängigkeit vom Schraubendurchmesser laut ETA-12/0373 [21]

Schraubendurchmesser [mm]	< 8	8	10	12
Mindestdicke t für Holzbauteile [mm]	24	30	40	80

2-5.3.2 Effektive Verbindungsmittelanzahl

In Abschnitt 2-4.4.2 wurde bereits kurz auf die Problematik der effektiven Verbindungsmittelanzahl eingegangen. Die Tragfähigkeit einer Holzverbindung setzt sich aus der Summe der Einzeltragfähigkeiten der Verbindungsmittel im Bruchzustand zusammen. Bei Holzverbindungen weisen in der Regel die Beanspruchung der einzelnen Verbindungsmittel beim Bruch der Gesamtverbindung große Unterschiede auf, weshalb einige Verbindungsmittel weit unter ihrer Tragfähigkeit belastet sind. Aus diesem Grund ist die Tragfähigkeit der Verbindung geringer als die Summe der Einzeltragfähigkeiten.

Für Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben gelten gemäß ÖNORM EN 1995-1-1 [6] für auf Abscheren beanspruchte Verbindungsmittel in Abhängigkeit des vorhandenen wirksamen Durchmessers d_{ef} entweder die Regelungen für Nägel ($d_{ef} < 6$ mm) oder für Bolzen ($d_{ef} > 6$ mm). (vgl. Gleichung (2.19)) Diese wirksame Anzahl bezieht sich dabei jeweils auf eine Reihe der Schrauben in Faserrichtung. Dies ist auf die Erkenntnisse von unter anderem Lantos [52], welcher Holz-Holz-Zuglaschenverbindungen untersuchte, und den Nietverbindungsuntersuchungen von Volkersen [53] zurückzuführen, welche festgestellt haben, dass bei mehreren angeordneten Verbindungsmitteln in Faserrichtung die Verbindungsmittel an den Enden eine größere Last aufnehmen als die in der Mitte positionierten.

$$n_{ef} = \begin{cases} n^{k_{ef}} & d_{ef} \leq 6 \text{ mm} \\ \min \left\{ n, n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d_{ef}}} \right\} & d_{ef} > 6 \text{ mm} \end{cases} \quad (2.19)$$

- n_{ef} wirksame Anzahl der Schrauben, hintereinander in Faserrichtung [-]
 n Anzahl der Schrauben, die in einer Verbindung hintereinander in Faserrichtung zusammenwirken [-]
 k_{ef} Faktor in Abhängigkeit des wirksamen Durchmessers [-]
 a_1 Abstand der Schrauben hintereinander in Faserrichtung [mm]
 d_{ef} wirksamer Durchmesser der Schraube [mm]

Für auf Herausziehen beanspruchte Gruppen von selbstbohrenden Holzschrauben ist eine Unterscheidung in Abhängigkeit des Durchmessers nicht gegeben und die wirksame Anzahl wird generell zu $n_{ef} = n^{0,9}$ bestimmt. Diese wirksame Anzahl bezieht sich dabei auf die gesamte Anzahl der Schrauben innerhalb einer gemeinsam wirkenden Gruppe.

Bei Verbindungen mit geneigt angeordneten Schrauben setzt sich die Tragwirkung zu einem überwiegenden Teil der Fälle aus einem Anteil auf Abscheren und einem Anteil auf Herausziehen zusammen. Für diesen Fall gibt die ÖNORM EN 1995-1-1 [6] keine eigene Regelung an, weshalb hier auf den Abschnitt 2-5.4 verwiesen wird. Hier wurde in [54], [55] und [27] aufgezeigt, dass für den Grenzzustand der Tragfähigkeit keine bzw. nur eine geringe Abnahme der Gesamttragfähigkeit in Bezug zur Summe der Einzeltragfähigkeiten bei den geprüften Laschenverbindungen vorhanden war. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wurde hingegen eine Abhängigkeit der Gesamtsteifigkeit der Verbindung von der Anzahl der eingesetzten Schrauben festgestellt.

Die Diskrepanz zwischen den normativen Vorgaben bezüglich der wirksamen Verbindungsmittellanzahl und den Ergebnissen der angesprochenen Forschungsarbeiten ist auf die Abhängigkeit dieser Kennzahl von mehreren Parametern zurückzuführen. Laut [27] sind die wichtigsten Einflüsse auf die Gruppenwirkung der Verbindung:

- **Elastisches oder plastisches Verhalten der Verbindung:** Verfügen alle Komponenten in der Verbindung über ein ausgeprägtes plastisches Materialverhalten, können potenzielle Differenzverformungen durch das Plastifizieren der Einzelkomponenten ausgeglichen werden.
- **Steifigkeit der Bauteile:** Verfügen die zu fügenden Bauteile der Verbindung über hohe Steifigkeitsunterschiede, führt das zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Beanspruchung für die einzelnen Verbindungsmittel.
- **Steifigkeit der Verbindungsmittel:** Bei gleichem Last-Verschiebungs-Verhalten aller Verbindungsmittel einer Verbindung steigt die ungleiche Belastung entlang der Verbindungsmittelreihe mit zunehmender Steifigkeit der Verbindungsmittel.
- **Inhomogenitäten zwischen den Verbindungsmitteln:** Wenn die Verbindungsmittel in einer Verbindung ungleiche Eigenschaften (z. B. Steifigkeit) aufweisen, kann eine gleichmäßige Beanspruchung der Verbindungsmittel nicht möglich sein.
- **Herstellungstoleranzen:** Lochspiel, unplanmäßige Lage von Verbindungsmitteln infolge unsachgemäßem Einbau oder ungenau gefertigter Stahlbleche vergrößern die Ungleichmäßigkeit der Lastverteilung zwischen den Verbindungsmitteln.
- **Schlankheitsgrad:** Ein sprödes Versagen einer Verbindung kann nur dann ausgeschlossen werden, wenn die verwendeten Verbindungsmittel eine relativ große Schlankheit (t/d) besitzen. Dies gilt in erster Linie für auf Abscheren beanspruchte Verbindungsmittel.
- **Verhältnis der Materialfestigkeiten:** Zusätzlich zum Schlankheitsgrad entscheidend welcher Versagensmodus nach Johansen auftritt.
- **Anzahl der Verbindungsmittel in einer Reihe (n):** Die Anzahl der in einer Verbindungsmittelreihe hintereinander in Faserrichtung liegenden (Richtung n) Verbindungsmittel ist bei einer äußeren Kraft, die ebenso parallel zur Faserrichtung angreift der Parameter mit dem größten Einfluss auf das Verhalten einer Verbindungsmittelgruppe. Die Reduktion des Gesamttragverhaltens fällt dabei relativ gesehen beim Schritt von einem zu zwei Verbindungsmitteln am Größten aus. Beim Hinzufügen weiterer Verbindungsmittel fällt

diese relative Reduktion immer geringer aus und nähert sich vermutlich asymptotisch einem unteren Grenzwert an.

- **Anzahl der Verbindungsmittelreihen (m):** Versuche von Jorissen [56] zeigten, dass sich die relative Tragfähigkeit bei Steigerung einer Verbindungsmittelreihe auf zwei Verbindungsmittelreihen im Mittel nicht verändert. Nach Krenn [27] ist es jedoch mechanisch nicht begründbar, dass es keinen Einfluss der Anzahl der Verbindungsmittelreihen auf die Gesamttragfähigkeit der Verbindung geben soll.
- **Winkel zwischen äußerer Kraft und der Faserrichtung:** Nach Krenn [27] hat der Winkel zwischen äußerer Kraft und der Faserrichtung einen Einfluss auf das Tragverhalten einer Gruppe, da durch die ausgeprägte Orthotropie des Holzes ein immer inhomogeneres System entsteht, je größer der Winkel α wird. Er führt dabei die Argumente an, dass bei einem rechtwinkligen Kraftangriff im Vergleich zu einem faserparallelen Kraftangriff die Lochleibungsfestigkeit um maximal 45 % abnimmt, der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit jedoch um mehr als 95 % abnimmt und auch die Streuung der Materialparameter zunimmt. Die Eigenschaften der metallischen Materialien bleiben jedoch unverändert, weshalb eine ungleichmäßige Beanspruchung der Verbindungsmittel begünstigt wird.
- **Lasteinwirkungsdauer, Holzfeuchte, Kriechen und Schwinden**
- **Rohdichte, Jahrringbreite und andere holzspezifische Einflussparameter**

2-5.3.3 Reibbeiwert

In Abschnitt 2-5.1 wurde darauf eingegangen, dass es durch den Seileffekt bzw. die axiale Beanspruchung zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit der Verbindung aufgrund einer auftretenden Reibung zwischen den Bauteilen kommt. Die Höhe des Reibbeiwertes ist dabei abhängig von der Materialkombination der beteiligten Bauteile (meist Holz-Holz oder Holz-Metall), der geometrischen Oberflächenbeschaffenheit (z.B. glatt, rau, poliert, geschliffen), der physikalischen Oberflächenbeschaffenheit (z.B. trocken, feucht, geschmiert) und der Temperatur. Bei einer Beanspruchung eines Bauteiles in Ruhe wirkt dabei zuerst die Haftreibung. Wird diese Haftreibung überwunden und kommt somit das Bauteil in Bewegung, wirkt die Gleitreibung. In Tabelle 2-13 sind vorgeschlagene Reibungsbeiwerte aus der Literatur aufgelistet.

Tabelle 2-13 Empfohlene Reibbeiwerte aus der Literatur

	Haftreibungsbeiwert μ_H [-]	Gleitreibungsbeiwert μ_G [-]
	Holz-Metall	
Sayir et al. [57]	0,5 - 0,65	0,2 - 0,5
Kessel [58]	0,3 - 0,6	0,4 - 0,5
Finke [59]	0,5	0,4
Bertram [60]	0,6 - 0,7	0,4 - 0,5
Krapfenbauer [61]	0,6	0,4
	Holz-Holz	
Mahnken [62]	0,4 - 0,6	0,2 - 0,4
Kessel [58]	0,4 - 0,6	0,2 - 0,4
Finke [59]	0,55	0,35
Bertram [60]	0,4 - 0,6	0,2 - 0,4
Krapfenbauer [61]	0,53 - 0,62	0,34 - 0,48

2-5.4 ARBEITEN IN DER LITERATUR

2-5.4.1 Blaß et al. 2002/2003

In Blaß et al. [63], Blaß et al. [64] und Blaß et al. [55] wurden zwei Modelle für die Berechnung des Last-Verformungs-Verhaltens von Verbindungen mit einsinnig geneigt oder gekreuzt geneigt angeordneten selbstbohrenden Holzschrauben veröffentlicht. Diese Berechnungsmodelle sind:

- Detailliertes Berechnungsverfahren [63]: Für die Tragwirkung der Schraube werden sowohl die Kraftkomponenten in Richtung der Schraubenachse als auch rechtwinklig dazu (Tragwirkung auf Abscheren) berücksichtigt. Zusätzlich wird die Reibung zwischen den beiden Bauteilen berücksichtigt. Anwendbar ist dieses Modell ausschließlich für einsinnig geneigt angeordnete Schrauben. Es können jedoch praktisch alle Winkel zwischen Schraubenachse und Kraftrichtung für Einschraubwinkel im Bereich von 0° bis 90° berücksichtigt werden.
- Fachwerkmodell [64]: Die Tragwirkung auf Abscheren wird vernachlässigt, die Reibung zwischen den beiden Holzbauteilen wird jedoch berücksichtigt. Dieses Modell eignet sich für geneigt oder gekreuzt angeordnete Schrauben mit Winkeln zwischen der Kraftrichtung und der Schraubenachse von kleiner gleich 45° .

Fachwerkmodell

Bei diesem Modell wird der Beitrag der Beanspruchung der Schraube auf Abscheren vernachlässigt. Somit ist für die Bestimmung des charakteristischen Wertes der Tragfähigkeit einer Verbindung lediglich der charakteristische Wert des Ausziehparameters $f_{1,k}$ (entspricht $f_{ax,k}$ nach Notation dieser Arbeit) sowie der Reibbeiwert μ von Nöten. Zu unterscheiden ist ebenfalls ob die Schrauben ausschließlich parallel zueinander angeordnet sind oder ob unterschiedliche Neigungen der Schrauben auftreten. Im ersteren Fall verursacht die Zugkraft in der Schraube eine Druckkraft in der Fuge der Verbindung, was eine günstig wirkende Reibungskraft bewirkt. (vgl. Abbildung 2-38)

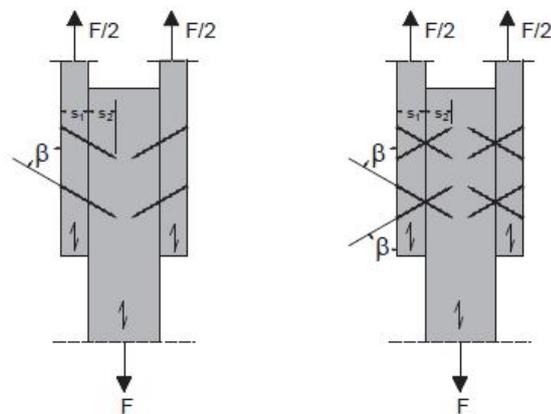


Abbildung 2-38 Zu unterscheidende Fälle bei Verbindungen mit geneigt angeordneten Schrauben bei Verwendung des Fachwerkmodells; links: parallel angeordnete Schrauben; rechts: gekreuzt angeordnete Schrauben aus [64]

Die charakteristische Tragfähigkeit einer überwiegend auf Zug beanspruchten Schraube kann nach Gleichung (2.20) berechnet werden. Die dem Fachwerkmodell zu Grunde gelegten wirkenden Kräfte sind in Abbildung 2-40 dargestellt.

$$R_{\beta,k} = R_{ax,\beta,k} \cdot (\cos \beta + \mu \cdot \sin \beta) \quad (2.20)$$

$$R_{ax,\beta,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{1,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{\sin^2 \beta + \frac{4}{3} \cdot \cos^2 \beta} \\ R_{t,u,k} \end{array} \right. \quad \text{mit } 30^\circ \leq \beta \leq 90^\circ \quad (2.21)$$

- $R_{t,u,k}$ charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit der Schraube [N]
- $f_{1,k}$ charakteristischer Wert des Ausziehparameters [N/mm²]
- d Nenndurchmesser der Schraube [mm]
- l_{ef} kleinerer Wert der Gewindelänge im Holzteil 1 bzw. 2 [mm]
- β Winkel zwischen Schraubenachse und Krafrichtung [°]
- μ Reibbeiwert zwischen den zu verbindenden Bauteilen [-]

Zur Überprüfung dieses Modells wurden Zugscherversuche mit unterschiedlichen Einschraubwinkeln und 182 mm langen parallel angeordneten Schrauben durchgeführt. Die Schrauben hatten einen Durchmesser von 7,5 mm und es wurden pro Anschluss acht Schrauben angeordnet. Ein Teil der Prüfkörper wurde zudem mit Folien in den Scherfugen hergestellt, um die Reibungseffekte zu minimieren.

In Abbildung 2-40 sind die erzielten Traglasten und die theoretisch bestimmten Werte der Tragfähigkeit nach Gleichung (2.20) in Abhängigkeit des Winkels β dargestellt. Die ersichtliche Diskrepanz zwischen den erzielten Tragfähigkeiten und den theoretisch bestimmten Werten ist auf die Vernachlässigung der Abscherkomponente in Gleichung (2.20) zurückzuführen. So beträgt der theoretisch bestimmte mittlere Wert für $\beta = 90^\circ$ nur 40% der erzielten mittleren Tragfähigkeit. Da der Einfluss der Abscherkomponente mit abnehmendem Winkel β sinkt, beträgt diese Abweichung bei $\beta = 45^\circ$ nur noch 31 %.

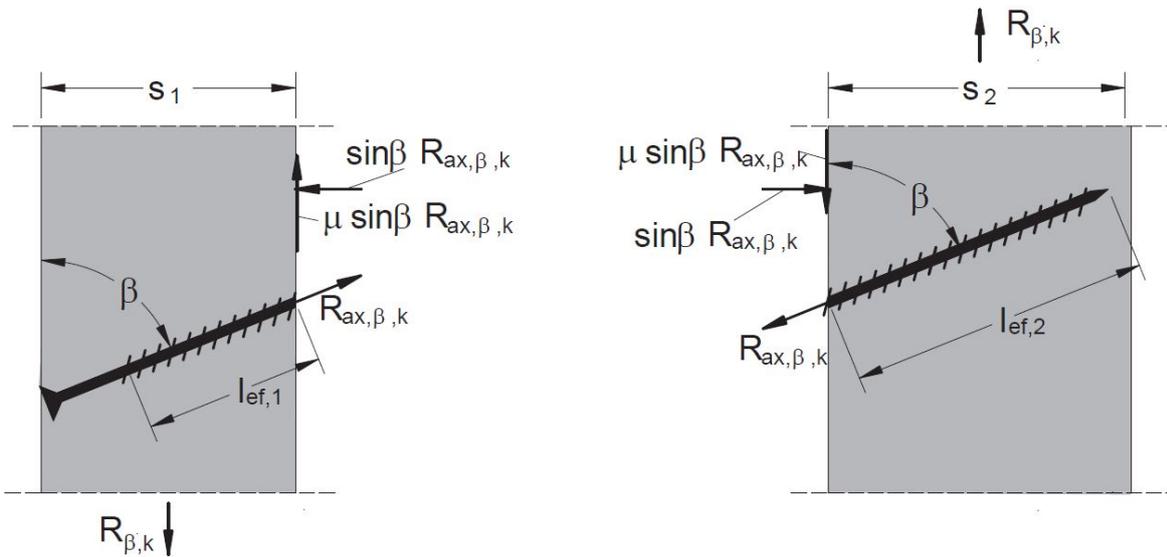


Abbildung 2-39 Kräfte in einer einschnittigen Holz-Holz-Verbindung mit einer geneigt angeordneten Holzbauschraube beim Fachwerkmodell aus [58]

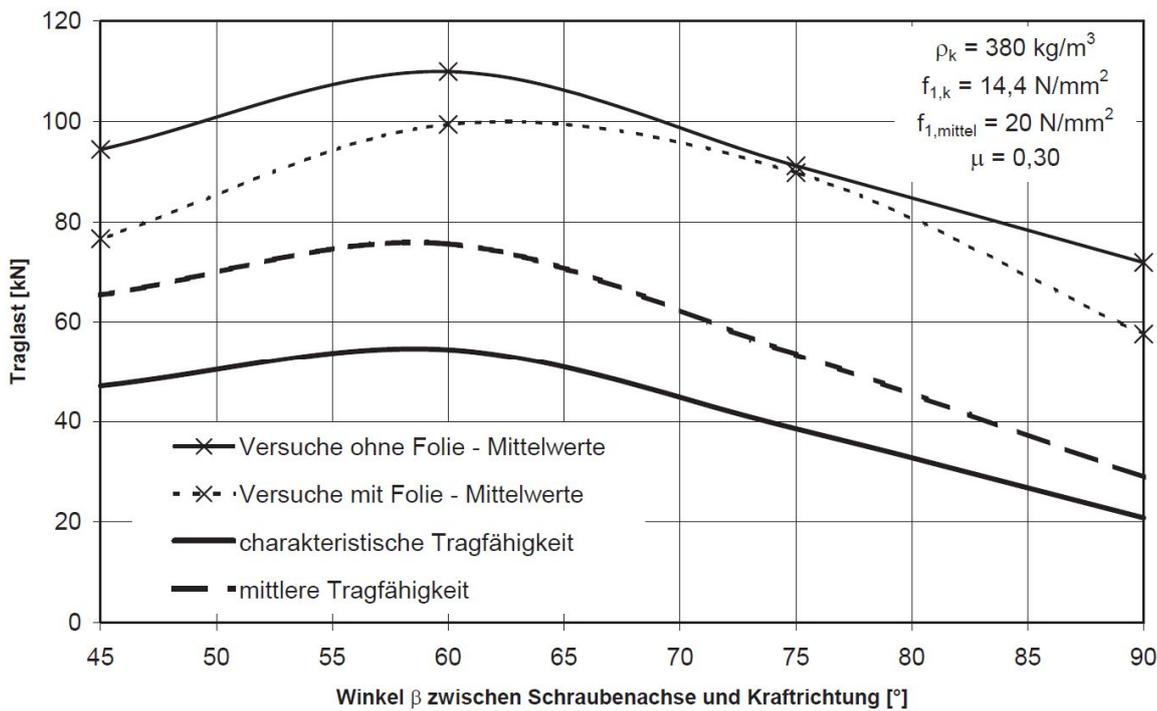


Abbildung 2-40 Traglasten in Abhängigkeit vom Winkel β aus [58]

Detailliertes Berechnungsverfahren

Bejtka und Blaß [63] führten Untersuchungen an symmetrischen Holz-Holz-Zuglaschenverbindungen mit geneigt angeordneten Vollgewindeschrauben durch, bei welchen sie die Einschraubwinkel der Schrauben zwischen 75° und 40° variierten. Das Ergebnis war ein Bemessungsvorschlag für Holz-Holz-Verbindungen mit geneigt angeordneten selbstbohrenden Holzschrauben. Die wichtigsten Einflussfaktoren für das Trag- und Verformungsverhalten stellen dabei die Lochleibungsfestigkeit des Holzes, die Biegetragfähigkeit der Schraube, das Ausziehtragverhalten der Schraube und die Reibung zwischen den Bauteilen dar.

Da die Verbindungsmittel bei geneigt angeordneten Schrauben auch auf Abscheren beansprucht werden und sich dadurch das Last-Verformungs-Verhalten von rein axial beanspruchten Schrauben stark unterscheidet, sollen diese Effekte bei der Bestimmung des Ausziehparameters berücksichtigt werden. Der Ausziehparameter ist hierbei nicht nur vom Einschraubwinkel und der auftretenden Lochleibungsspannung abhängig, sondern auch vom auftretenden Versagensmodus nach Johansen. So ist im Versagensmodus I (kein Fließgelenk) die Lochleibungsbeanspruchung über die gesamte Einbindelänge der Schraube wirksam, während sie im Versagensmodus II (1 Fließgelenk) nur bis zur Stelle x_1 bzw. x_2 im jeweiligen Holzteil, an der das Fließgelenk auftritt, wirksam ist.

In Abbildung 2-41 sind die Kräfte, Momente und Spannungen in einer einschnittigen Holz-Holz-Verbindung mit geneigt angeordneten Schrauben für den Versagensmodus III (2 Fließgelenke) abgebildet. Dieser Versagensmodus ist nach [27] für Schraubenverbindungen der ausschließlich maßgebende Versagensmodus.

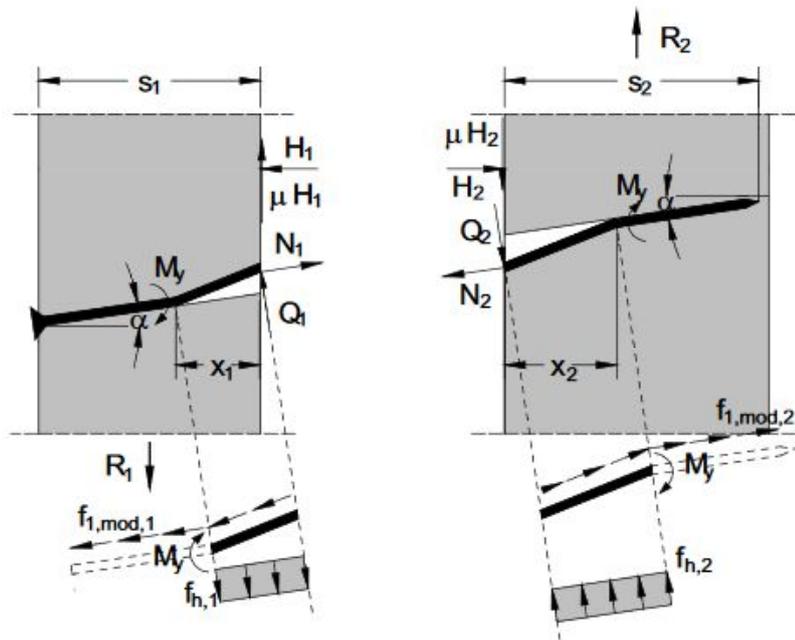


Abbildung 2-41 Kräfte, Momente und Spannungen in einer einschnittigen Holz-Holz-Verbindung mit einer geneigt angeordneten Holzbauschraube für den Versagensmodus III nach Johansen beim detaillierten Berechnungsverfahren aus [63]

Die Tragfähigkeit dieser Verbindung mit dem Versagensmodus III nach Johansen kann nach [63] mit Gleichung (2.22) berechnet werden.

$$R_{VM3} = R_{ax,3} \cdot (\mu \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + (1 - \mu \cdot \tan \alpha) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_y \cdot d \cdot f_{h,1} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (2.22)$$

$$R_{ax,3} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{1,mod,1,3} \cdot d \cdot \frac{s_1}{\cos \alpha} \\ f_{1,mod,2,3} \cdot d \cdot \frac{s_2}{\cos \alpha} \end{array} \right. \quad (2.23)$$

- R_{VM3} Tragfähigkeit der Schraube für den Versagensmodus III nach Johansen [kN]
- $f_{h,1}$ Lochleibungsfestigkeit des Holzbauteils 1 [N/mm²]
- M_y Fließmoment der Schraube [kNm]
- μ Reibbeiwert zwischen den zu verbindenden Bauteilen [-]
- d Nenndurchmesser der Schraube [mm]
- $f_{1,mod,1,3}$ modifizierter Ausziehparameter des Holzbauteils 1 [N/mm²]
- $f_{1,mod,2,3}$ modifizierter Ausziehparameter des Holzbauteils 2 [N/mm²]
- β Winkel zwischen Schraubenachse und Krafttrichtung [°]
- α Winkel zwischen Schraubenachse und der Richtung rechtwinklig zur Faserrichtung [°]

Die Tragfähigkeit der Verbindung ist anschließend das Minimum aller Versagensmodi nach Johansen. Der modifizierte Ausziehparameter $f_{1,mod,i,j}$ hängt dabei vom Versagensmodus nach Johansen und den Eigenschaften der zu verbindenden Holzteile ab. Da die Berücksichtigung all dieser Faktoren in der Praxis zu aufwendig wäre, wird eine Vereinfachung nach Gleichung (2.24) vorgeschlagen.

$$f_{1,mod,i,j} = 0,7 \cdot f_{ax,i} \quad (2.24)$$

- $f_{ax,i}$ Ausziehparameter, bestimmt durch Ausziehversuche oder aus Berechnungsmodellen [N/mm²]

Um die Anwendbarkeit der theoretischen Modelle zu untermauern, wurden experimentelle Untersuchungen an Zuglaschenverbindungen mit einer oder vier einsinnig geneigt angeordneten Schrauben des Nenndurchmessers 7,5 mm je Scherfuge für Einschraubwinkel zwischen 0° und 50° durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2-42 dargestellt.

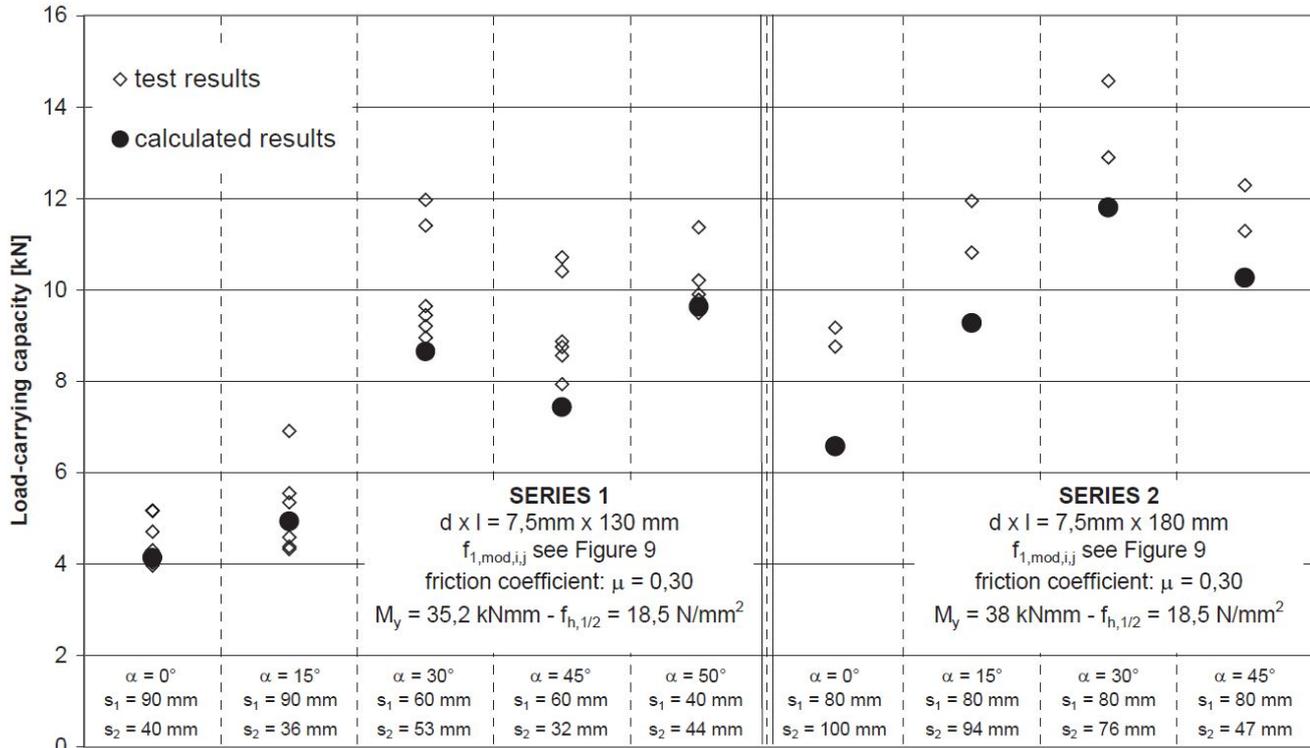


Abbildung 2-42 Vergleich der erzielten Ausziehtragfähigkeiten pro Schraube bei den Versuchen mit den berechneten Werten des detaillierten Berechnungsverfahrens für die Serie 1 (1 Schraube je Scherfuge) und für die Serie 2 (4 Schrauben je Scherfuge) aus [63]

Es ist zu erkennen, dass bei einem Winkel $\alpha = 0^\circ$ (entspricht $\alpha = 90^\circ$ nach Notation dieser Arbeit) die Tragfähigkeit lediglich 50 % der maximal erreichten Tragfähigkeit bei $\alpha = 30^\circ$ (entspricht $\alpha = 60^\circ$ nach Notation dieser Arbeit) beträgt. Die berechneten Werte nach den modifizierten Johansen-Gleichungen erzielen bei den Versuchsergebnissen mit einer Schraube eine gute Übereinstimmung.

2-5.4.2 Kevarinmäki 2002

Kevarinmäki [54] stellte ebenfalls Ergebnisse von Untersuchungen an Schraubenverbindungen mit geneigt angeordneten selbstbohrenden Holzschrauben in Schnittholz und Furnierschichtholz vor. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in Abschnitt 2-5.4.1 untersuchte er hierbei nicht nur auf Zug beanspruchte Schrauben, welche dem Kraftfluss folgend angeordnet sind, sondern auch Verbindungen mit Schraubenkreuzen. (vgl. Abbildung 2-43) Er zeigte hierbei auf, dass die Verwendung einer solchen Verbindung ebenfalls zielführend sein kann, da sich die Tragfähigkeit der Schraube auf Hineindrücken grundsätzlich nicht von jener auf Herausziehen unterscheidet, solange ein Ausknicken der Schraube verhindert werden kann. Der Vorteil von Schraubenkreuzen liegt insbesondere auch darin, dass auf dem nahezu gleichen Raum doppelt so viele Schrauben angeordnet werden können und Wechselbeanspruchung für die Verbindung unproblematisch sind.

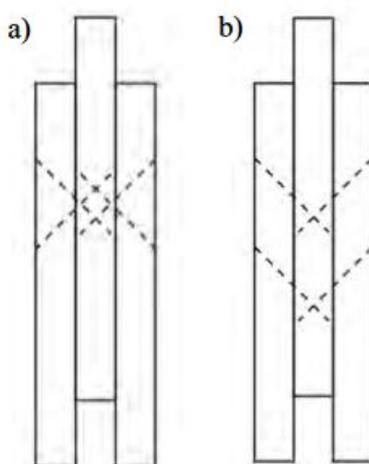


Abbildung 2-43 Schematische Darstellung der untersuchten Prüfkongfigurationen in [54]; a) Schraubenkreuz; b) reine Zugbeanspruchung

Die Versuche wurden in Vollholz der Festigkeitsklasse C24 gemäß ÖNORM EN 338 [3] und in den Furnierschichthölzern Kerto-S bzw. Kerto-Q [65] durchgeführt. Die Schrauben wurden ausschließlich unter einem Winkel von 45° zur Faserrichtung eingedreht.

In Abbildung 2-44 sind die Ergebnisse von 2 Prüferien in Vollholz als Last-Verschiebungs-Diagramme dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Verbindungen mit Schraubenkreuz eine um 20 % bis 25 % kleinere maximale Tragfähigkeit im Vergleich zu den Verbindungen mit reinen Zugschrauben aufweisen. Dies ist laut [54] auf die auftretende günstige Reibung zwischen den beiden Holzteilen bei der Konfiguration mit rein auf Zug belasteten Schrauben zurückzuführen. Der Einfluss der Schraubenanzahl ist bei gekreuzter Schraubenanordnung hinsichtlich der Tragfähigkeit dabei in einem sehr geringen Maß vorhanden und für die Steifigkeit nahezu nicht gegeben. Bei den rein auf Zug beanspruchten Schrauben sind lediglich die Ergebnisse der Prüfungen mit zwei Schrauben in [54] angegeben, weshalb hier keine Interpretation hinsichtlich des Gruppeneffektes möglich ist.

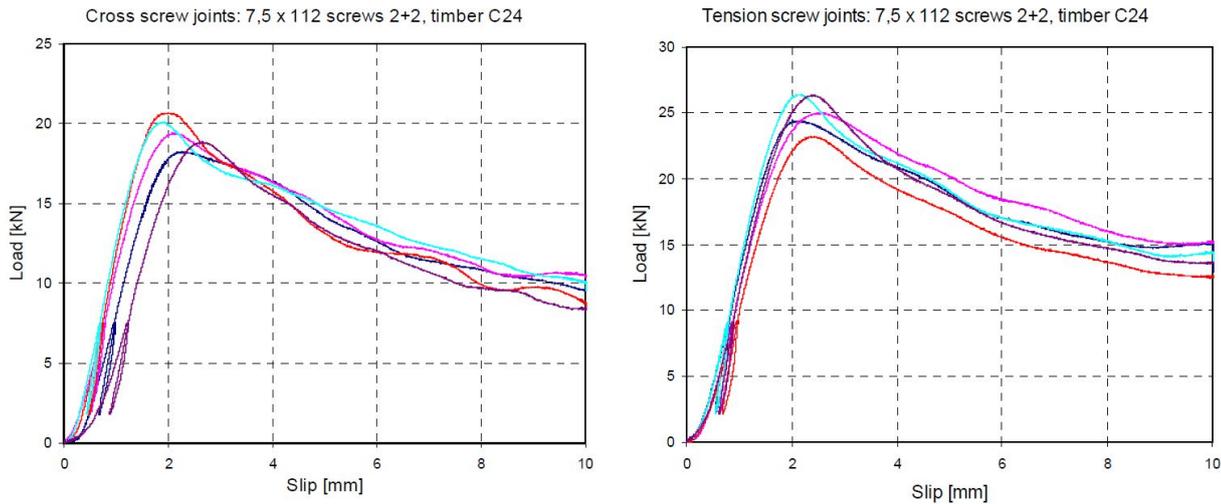


Abbildung 2-44 Last-Verschiebungs-Verhalten der Prüferien mit je 2 Schrauben pro Scherfuge in Vollholz; links: Schraubekreuz; rechts: nur zugbeanspruchte Schrauben [54]

Vorgeschlagenes Bemessungsmodell

Kevarinmäki [54] schlägt zur rechnerischen Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens ähnlich wie [64] ein Fachwerkmodell vor, das ausschließlich die axiale Tragwirkung der Schraube berücksichtigt und die Abscherkomponente der Tragwirkung vernachlässigt. Die nachfolgenden Gleichungen stellen einen Bemessungsvorschlag für Verbindungen mit unter 45° geneigt eingedrehten selbstbohrenden Holzschrauben dar.

Die folgenden Gleichungen (2.25) bis (2.27) gelten für rein auf Zug beanspruchte Schrauben.

$$R_d = n \cdot R_{T,d} \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha) \tag{2.25}$$

- R_d Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Zuglaschenverbindung [kN]
- n Anzahl der Schrauben in der Verbindung [-]
- $R_{T,d}$ Bemessungswert der Schraube auf Herausziehen [kN]
- α Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes [°]
- μ Reibungskoeffizient zwischen den Bauteilen [-]

$$R_{T,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{a,1,d} \cdot \pi \cdot d \cdot s_1 + f_{head,d} \cdot d_h^2 \\ f_{a,2,d} \cdot \pi \cdot d \cdot (s_2 - d) \\ F_{u,d} \end{array} \right. \tag{2.26}$$

- $f_{a,i,d}$ Bemessungswert der Ausziehfestigkeit im Holzteil i [N/mm²]
- $f_{head,d}$ Bemessungswert des Kopfdurchziehparameters [N/mm²]
- d Nenndurchmesser der Schraube [mm]
- s_1 Einbindetiefe auf der Seite mit dem Schraubenkopf [mm]
- s_2 Einbindetiefe auf der Seite mit der Schraubenspitze [mm]
- $F_{u,d}$ Bemessungswert der Zugtragfähigkeit der Schraube [N]

$$f_{a,i,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot f_{ax,45,k} \cdot \left(\frac{8 \cdot d}{s_i} \right)^2 \tag{2.27}$$

- k_{mod} Modifikationsbeiwert zur Berücksichtigung der Holzfeuchte und der Lasteinwirkungsdauer [-]
- γ_M Teilsicherheitsbeiwert für Verbindung [-]
- s_i Einbindetiefe des Gewindes im Holzteil i [mm]
- $f_{ax,45,k}$ charakteristischer Wert der Ausziehfestigkeit unter 45° zur Faserrichtung [N/mm²]

Für Verbindungen mit gekreuzt angeordneten Schrauben gelten die Gleichungen (2.28) und (2.29).

$$R_d = n_p \cdot (R_{C,d} + R_{T,d}) \cdot \cos \alpha \quad (2.28)$$

R_d Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Zuglaschenverbindung [kN]
 n_p Anzahl der Schraubenkreuze in der Verbindung [-]
 $R_{C,d}$ Bemessungswert der Schraube auf Hineindrücken [kN]
 $R_{T,d}$ Bemessungswert der Schraube auf Herausziehen [kN]
 α Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes [°]

$$R_{C,d} = \min \begin{cases} f_{a,1,d} \cdot \pi \cdot d \cdot s_1 \\ f_{a,2,d} \cdot \pi \cdot d \cdot s_2 \\ 0,8 \cdot F_{u,d} \end{cases} \quad (2.29)$$

Die dritte Bedingung in der Minimumfunktion von Gleichung (2.29) stellt dabei eine Abschätzung für die Tragfähigkeit der Schraube gegen Ausknicken im Holz dar.

Für die Steifigkeit der Verbindung gibt [54] zudem die folgenden Gleichungen an:

$$u_{inst} = \frac{F}{n \cdot K_s} \quad (2.30)$$

$$K_s = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} \quad (2.31)$$

$$k_1 = K_{1,ser} \cdot \pi \cdot d \cdot s_1 \quad (2.32)$$

$$k_2 = K_{1,ser} \cdot \pi \cdot d \cdot (s_2 - d) \quad (2.33)$$

$$K_{i,ser} = K_{ser} \cdot \left(\frac{8 \cdot d}{s_i}\right)^{0,3} \quad (2.34)$$

u_{inst} Anfangsverschiebung einer Verbindung mit geneigt angeordneten Schrauben [mm]
 F Einwirkung [N]
 n Anzahl der Schrauben (für Schraubenkreuze $n = 2 n_p$) [-]
 K_s Verschiebungsmodul einer axial belasteten Schraube [N/mm]
 $K_{i,ser}$ Verschiebungsmodul für den jeweiligen Gewindeteil i der Schraube [N/mm]
 K_{ser} mittlerer Verschiebungsmodul einer Schraube unter 45° zur Faserrichtung [N/mm]
 d Nenndurchmesser der Schraube [mm]
 s_i Einbindtiefe des Gewindes im Holzteil i [mm]

2-5.4.3 Blaß et al. 2006

In [55] wird das anfängliche Ziel des Forschungsvorhabens mit der Optimierung der vorgestellten Berechnungsmodelle in Abschnitt 2-5.4.1 angegeben. Mehrere Versuche hatten jedoch in der Zwischenzeit gezeigt, dass beide Berechnungsverfahren für Verbindungen mit einer geringen Anzahl geneigt bzw. gekreuzt angeordneter selbstbohrenden Holzschrauben gültig sind. Der Schwerpunkt der weiteren Untersuchungen lag nun an Verbindungen mit mehreren hintereinander angeordneten Holzschrauben und ein Modell zu erarbeiten, mit welchem die Steifigkeit von Verbindungen mit geneigt oder gekreuzt geneigt angeordneten Schrauben abgeschätzt werden kann.

Hierbei wurden jeweils 2, 6 oder 11 hintereinander geneigt angeordnete Holzschrauben untersucht, sowie Verbindungen bestehend aus 2, 5 oder 7 hintereinander angeordneten Schraubengruppen. Sämtliche Probekörper wurden aus BSH der Festigkeitsklasse GL28h nach ÖNORM EN 14080 [4] hergestellt und es kamen selbstbohrende Holzschrauben mit Vollgewinde des Nenndurchmessers 8 mm mit einer Länge von 260 mm zum Einsatz. Der Winkel zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung des Holzes betrug bei allen Prüfkörpern 45° . Der Abstand der Schrauben bzw. der Schraubengruppen in Faserrichtung des Holzes (a_1) betrug bei sämtlichen Versuchskörpern 200 mm (25 d), lediglich bei der Prüferie mit 11 hintereinander geneigt angeordneten Schrauben musste dieser Abstand auf 140 mm (17,5 d) reduziert werden.

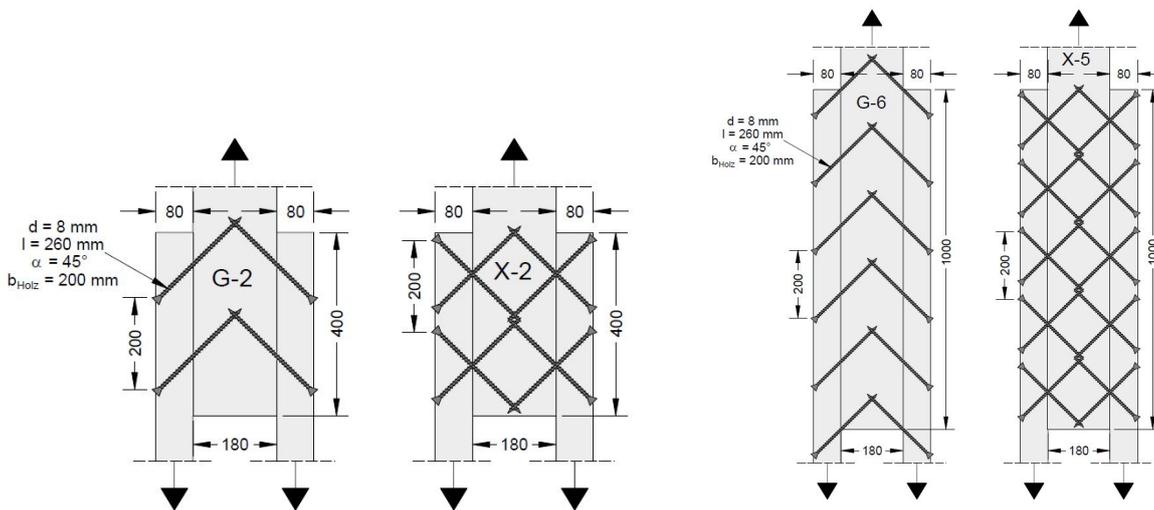


Abbildung 2-45 Untersuchte Prüfkörper; links: Prüferie G-2 und X-2; rechts: Prüferien G-6 und X-5; aus [55]

Alle Versuchskörper mit geneigt angeordneten Schrauben versagten infolge Hineinziehen auf der Seite des Schraubenkopfes. Bei den Verbindungen mit gekreuzter Schraubenanordnung versagten ebenfalls die auf Zug beanspruchten Schrauben infolge Hineinziehen und die auf Druck beanspruchten Schrauben durch Herausdrücken in bzw. aus dem Seitenholz. Diese Versagensmechanismen werden auf die kleineren Rohdichten der Seitenhölzer zurückgeführt. Bei sämtlichen Prüfvorgängen konnten jedoch keine signifikanten Biegeverformungen in den Schrauben festgestellt werden, weshalb [27] darauf schließt, dass die Tragfähigkeit der Verbindungen rein vom axialen Widerstand der Schrauben abhängig ist.

Es war hierbei kein signifikanter Abfall der Tragfähigkeit pro Schraube bzw. Schraubengruppe mit steigender Anzahl hintereinander angeordneter Schrauben erkennbar. In [27] werden mögliche Ursachen für die Unabhängigkeit der Tragfähigkeit von der Schraubenzahl bzw. der Anzahl der Schraubengruppen u.a. auf das auftretende Versagen der Schrauben auf mechanischen Herausziehen bzw. Hineindrücken zurückgeführt, was mit Lastumlagerungsmöglichkeiten verbunden ist. Weiters sind die gewählten Abstände der geprüften Verbindungen relativ groß gewählt worden, weshalb ein Aufspalten des Holzes sehr unwahrscheinlich war. Die Last-Verformungs-Diagramme zeigen zudem ein relativ ausgeprägtes gutmütiges Nachbruchverhalten, sodass Lastumlagerungen durch die vorhandene Duktilität ebenfalls begünstigt werden. (vgl. Abbildung 2-46)

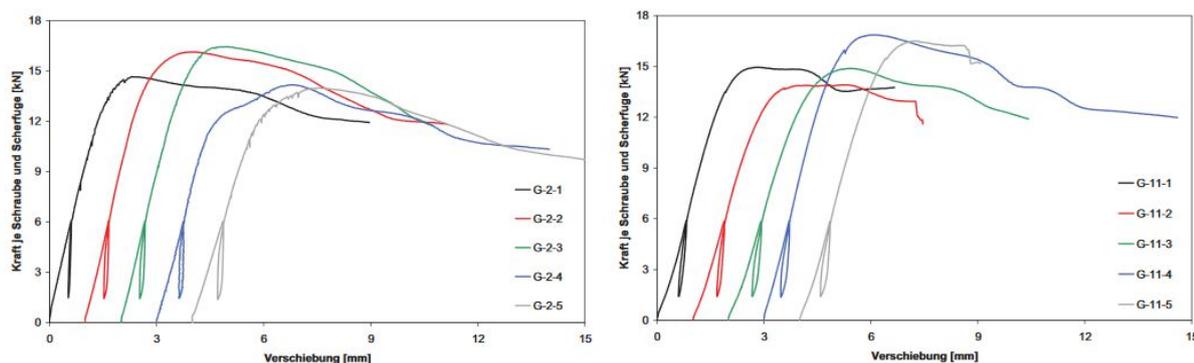


Abbildung 2-46 Last-Verschiebungs-Diagramme ausgewählter Prüferien; links: Serie G-2 mit zwei einsinnig geneigten Schrauben je Scherfuge; rechts: Serie G-11 mit elf einsinnig geneigten Schrauben je Scherfuge; aus [27]

Im Gebrauchslastbereich ist jedoch eine klare Abhängigkeit der Steifigkeit von der Verbindungsmittelanzahl erkennbar. Mit zunehmender Anzahl der Schrauben bzw. der Schraubenkreuze sinkt die Steifigkeit pro Schraube bzw. Schraubenkreuz. So beträgt das Verhältnis der mittleren Steifigkeit der Versuchsreihen mit 11 geneigt angeordneten Schrauben zu der mittleren Steifigkeit der Versuchsreihen mit 2 geneigt angeordneten Schrauben etwa 85,7 %. (vgl. Abbildung 2-47)

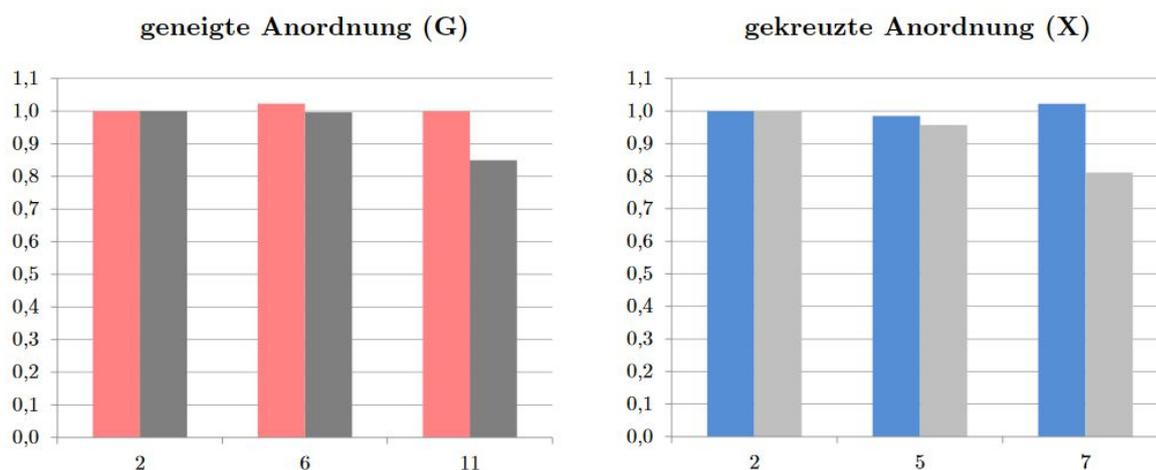


Abbildung 2-47 Graphische Darstellung der Abminderungsfunktion n_{ef}/n auf Basis von $n = 2$ der Versuche von Blaß [55]; rosa und blau: Abminderungsfunktion der Tragfähigkeiten; grau und dunkelgrau: Abminderungsfunktion der Steifigkeiten; aus [27][26]

Berechnungsmodell

Als Berechnungsmodell schlagen Blaß et al. [55] für Holz-Holz-Verbindungen mit geneigt oder gekreuzt angeordneten selbstbohrenden Schrauben ein Fachwerkmodell analog zu dem von Blaß et al. [63] im Abschnitt 2-5.4.1 erklärten Modell mit Berücksichtigung der Reibung zwischen den Bauteilen vor. Die Abscherkomponente der Tragwirkung wird jedoch aufgrund der nicht aufgetretenen plastischen Biegeverformungen in den Schrauben vernachlässigt.

Da die Versuchsergebnisse zeigten, dass im Traglastbereich die Last von den äußeren Verbindungsmitteln auf die in der Mitte der Verbindung angeordneten Schrauben umgelagert werden kann und somit die Theorie des linear-elastischen Verbundes nach Lantos [52] nicht gültig ist, wird die Gesamttragfähigkeit der Verbindung aus der Summe der Tragfähigkeiten der einzelnen Schrauben bzw. Schraubenkreuze gebildet. ($n_{ef} = n$)

$$F_{v,G,Rd} = n_G \cdot R_{ax,d} \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha) \tag{2.35}$$

$$F_{v,X,Rd} = n_X \cdot 2 \cdot R_{ax,d} \cdot \cos \alpha \quad (2.36)$$

- $F_{v,G,Rd}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Verbindung mit geneigt angeordneten Schrauben [kN]
 $F_{v,X,Rd}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Verbindung mit gekreuzt angeordneten Schrauben [kN]
 n_G Anzahl der Schrauben in der Scherfuge [-]
 n_X Anzahl der Schraubenkreuze in der Scherfuge [-]
 $R_{ax,d}$ Bemessungswert der axialen Tragfähigkeit der Schraube [kN]
 α Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung [°]
 μ Gleitreibungskoeffizient zwischen den Holzbauteilen [-]

Für die Ermittlung der Steifigkeit der Verbindung gibt Blaß die Gleichungen (2.37) und (2.38) an. Sie dienen zur Ermittlung des Verschiebungsmoduls parallel zur Kraftrichtung und gelten für Einschraubwinkel kleiner als 45°. Die wirksame Anzahl der Schrauben bzw. Schraubenkreuze ist hierbei nicht gleich der tatsächlichen Anzahl und kann nach der Theorie von Lantos [52] berechnet werden.

$$K_G = \frac{n_{ef,G} \cdot n_{SF} \cdot (1 + \mu \cdot \cot \alpha)}{\frac{1}{K_{ax,1}} + \frac{1}{K_{ax,2}}} \quad (2.37)$$

$$K_X = \frac{n_{ef,X} \cdot n_{SF} \cdot 2}{\frac{1}{K_{ax,1}} + \frac{1}{K_{ax,2}}} \quad (2.38)$$

- K_G Verschiebungsmodul einer Verbindung mit geneigt angeordneten Schrauben [N/mm]
 K_X Verschiebungsmodul einer Verbindung mit gekreuzt angeordneten Schrauben [N/mm]
 $n_{ef,G/X}$ Wirksame Anzahl der Schrauben bzw. Schraubenkreuze in der Verbindung [-]
 n_{SF} Anzahl der Scherfugen in der Verbindung [-]
 $K_{ax,i}$ Verschiebungsmodul von axial beanspruchten Schrauben in den Holzteilen [N/mm]
 α Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung [°]
 μ Gleitreibungskoeffizient zwischen den Holzbauteilen [-]

2-5.4.4 Gehri 2010

Gehri [29] berichtete 2010 von Laboruntersuchungen an Holz-Holz-Zuglaschenverbindungen mit Teilgewindeschrauben und unterschiedlichen Achs-Faser-Winkeln α . Der Hauptfokus lag dabei auf der Entwicklung einer optimalen Verbindung, die sich insbesondere neben einer maximalen Tragfähigkeit auch durch ein gutmütiges Last-Verformungs-Verhalten auszeichnet. Gehri bezeichnet hierbei eine relative Differenz zwischen Bruchlast und theoretischem Fließplateau von über 20 % als optimales Verbindungsverhalten, da dadurch eine ausreichende Duktilität der Verbindung vorhanden ist. (vgl. Abbildung 2-48)

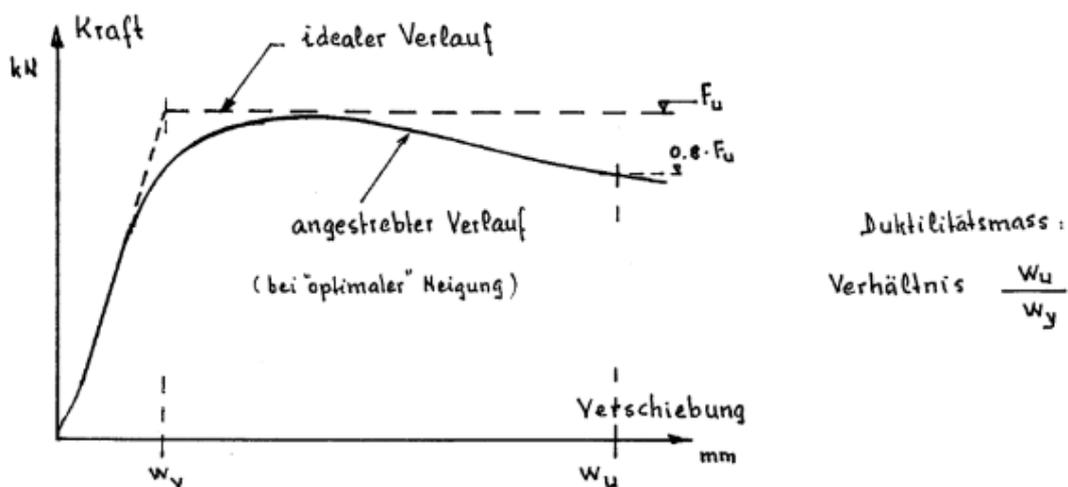


Abbildung 2-48 Idealer Verlauf der Last-Verschiebungskurve und angestrebter Verlauf der Last-Verschiebungskurve eines optimalen Verbindungsverhaltens aus [29]

Um die Steuerbarkeit dieses Verhaltens zu demonstrieren, variierte er den Einschraubwinkel zwischen 90° und 45° zur Faserrichtung. Die Zuglaschenverbindung bestand aus seitlichen Laschen aus Eschenholz, welche an dem Probekörper bestehend aus Fichte angeschraubt wurden. (vgl. Abbildung 2-49) Die Schraubenlöcher der Laschen wurden vorgebohrt und in der Scherfuge wurde eine Folie platziert, um Reibungseffekte zu vermindern.

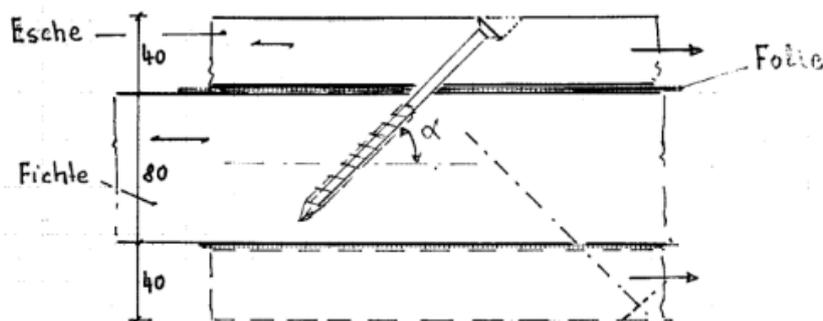


Abbildung 2-49 Prüfkonzfiguration mit Variation des Einschraubwinkels α eines Holz-Holz-Zuglaschenstoßes mit eingefügter Folie aus [29]

In Abbildung 2-50 sind die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Es ist hierbei die Steuerbarkeit des Verbindungsverhaltens sehr gut ersichtlich. So sind mit Einschraubwinkeln unter 60° sowohl hohe Tragwiderstände als auch hohe Anfangssteifigkeiten zu erreichen. Die Duktilität dieser Verbindungen ist jedoch eingeschränkt. Bei einem Einschraubwinkel von 90° werden die Schrauben ausschließlich auf Abscheren beansprucht, was zu einer erhöhten Duktilität führt, jedoch auch zu geringeren Tragfähigkeiten und vor allem zu sehr geringen Steifigkeiten.

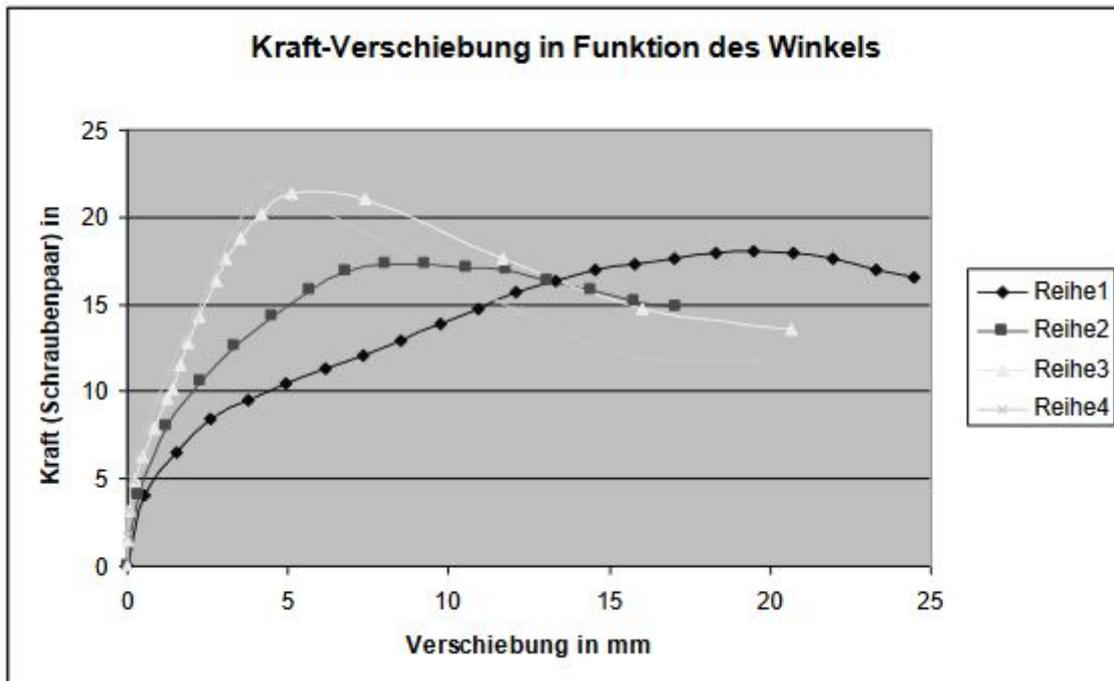


Abbildung 2-50 Last-Verschiebungs-Verhalten der Prüfungen an Holz-Holz-Zuglaschenverbindungen mit einer Variation des Einschraubwinkels α aus [29]; Reihe 1: $\alpha = 90^\circ$; Reihe 2: $\alpha = 75^\circ$; Reihe 3: $\alpha = 60^\circ$; Reihe 4: $\alpha = 45^\circ$

Um die Kapazität der Verbindung weiter zu steigern, ersetzte Gehri die Teilgewindeschrauben durch Vollgewindeschrauben und unterzog die Zuglaschenverbindungen weiteren Winkelvariationen zwischen 90° und 65° um den optimalen Einschraubwinkel zu finden. Die Verbindungen bestanden hierbei aus jeweils 8 Schrauben des Nenndurchmessers $d = 8$ mm pro Scherfuge.

In Abbildung 2-51 sind die Last-Verschiebungskurven der Versuche dargestellt. Der Versuch mit einer Schraubenneigung von 65° hatte, wie zu erwarten, die höchste Tragfähigkeit und ein sehr steifes Verhalten auf Gebrauchslastniveau. Die Duktilität dieser Verbindung war jedoch aufgrund des in Abbildung 2-48 angestrebten Verlaufes jedoch als nicht zufriedenstellend zu bewerten. Generell war die maximal übertragbare Kraft nahezu unabhängig vom Einschraubwinkel, weshalb die relative Differenz zwischen den einzelnen Reihen lediglich bei rund 20 % lag. Die erzielbaren Anschlusssteifigkeiten lassen zudem den Schluss zu, die Schrauben zumindest mit einem Winkel von 80° zur Faser einzudrehen, anstatt sie rein auf Abscheren zu belasten. Die Differenz der einzelnen Anschlusssteifigkeiten kann aus dem Diagramm ungefähr mit dem Faktor 5 abgeschätzt werden.

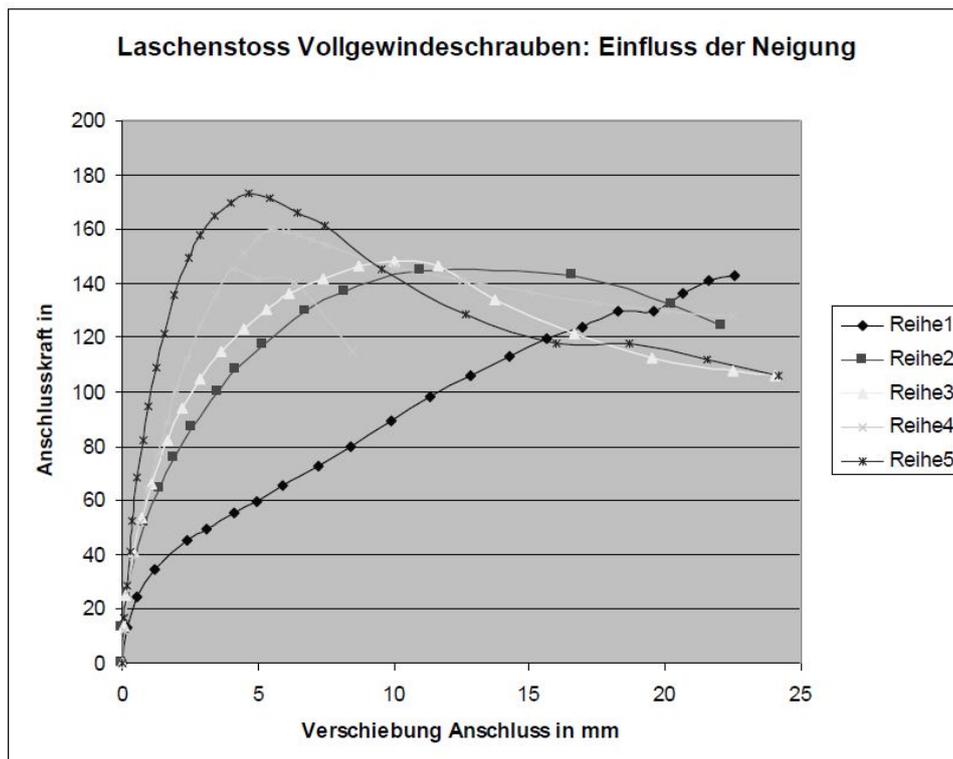


Abbildung 2-51 Last-Verschiebungs-Verhalten der Prüfungen an Holz-Holz-Zuglaschenverbindungen mit einer Variation des Einschraubwinkels α mit Vollgewindeschrauben aus [29]; Reihe 1: $\alpha = 90^\circ$; Reihe 2: $\alpha = 80^\circ$; Reihe 3: $\alpha = 75^\circ$; Reihe 4: $\alpha = 70^\circ$; Reihe 5: $\alpha = 65^\circ$

2-5.4.5 Brandl 2014

Brandl [51] führte experimentelle Untersuchungen an unterschiedlich stark geschwächten Probekörpern in Form von Stahl-Holz-Zuglaschenverbindungen durch, um das Nachweisformat für den Versagensmodus Nettoquerschnittsversagen zu überprüfen.

Die Versuche wurden an Brettschichtholzträgern aus Fichte durchgeführt und es wurden Vollgewindeschwinden des Nenndurchmessers 8 mm verwendet. Die Hauptversuche bestanden aus 4 Unterserien bei welchen jeweils mehrreihige Verbindungen untersucht wurden. Es wurden hierbei bis zu 32 Vollgewindeschrauben pro Scherfuge angeordnet. Die Länge der Schrauben variierte in den Unterserien zwischen 180 mm, 220 mm und 240 mm und das Verhältnis der Nettofläche zur Bruttofläche variierte ebenfalls zwischen 63 % und 78 %. Die Prüfkonfigurationen der Unterserien sind in Abbildung 2-52 dargestellt, dabei unterscheidet sich die Konfiguration B1 - B2 von B3 - B4 darin, dass diese ein annähernd statisch bestimmtes System darstellt und somit alle vier Scherflächen unabhängig und gleichmäßig belastet sind.

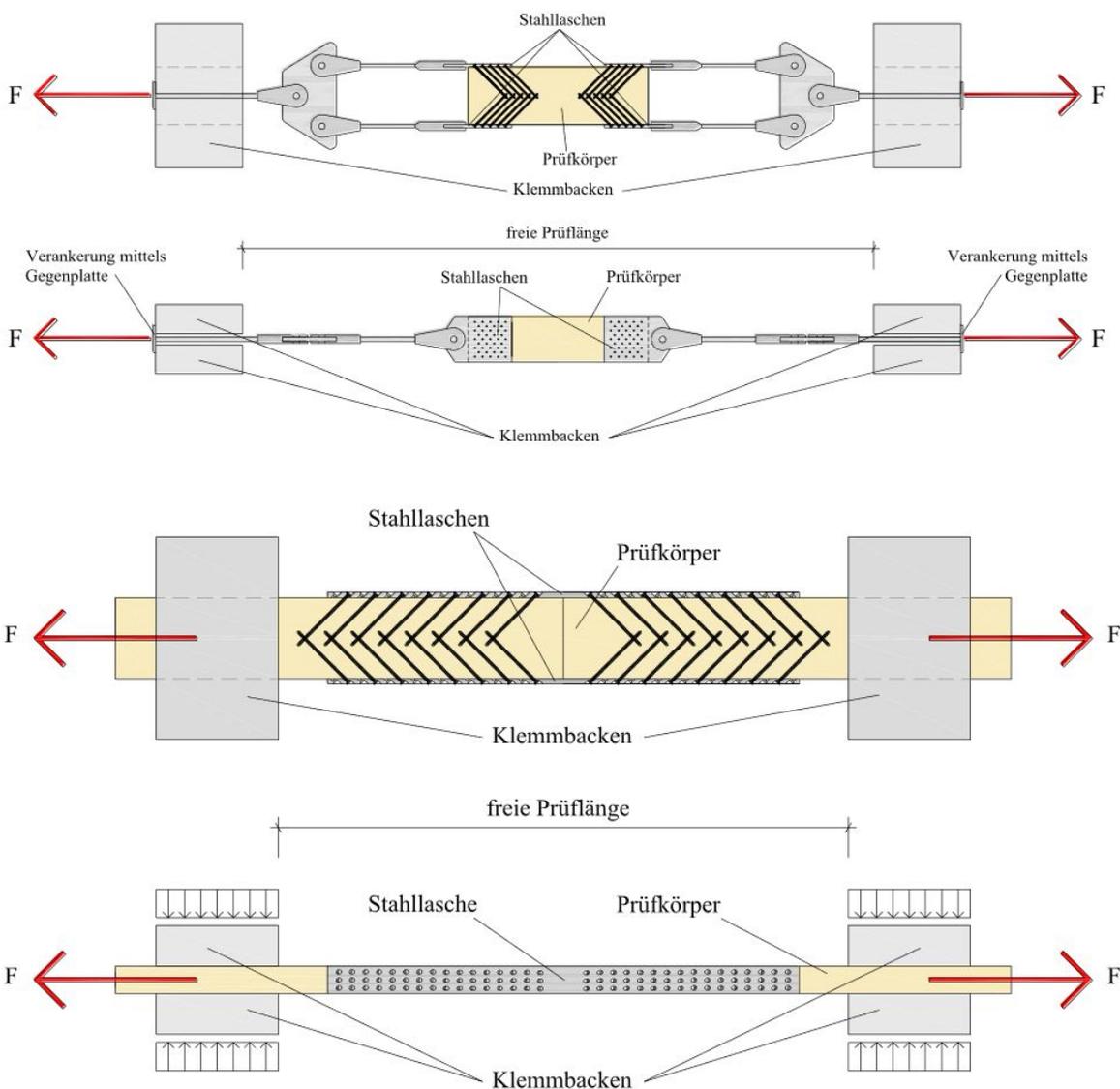


Abbildung 2-52 Prüfkonfigurationen der Prüferserie B; oben: Prüferserie B1 und B2; unten: Prüferserie B3 und B4; aus [51]

In Abbildung 2-53 sind die Nettoquerschnittsflächen von Schrägschraubverbindungen nach verschiedenen Theorien dargestellt. Oben rechts ist dabei der Flächenansatz abgebildet, bei welchem lediglich pro Schraube eine elliptische Fläche in Abhängigkeit des Schraubenkerndurchmessers vom Bruttoquerschnitt abgezogen wird. Die Versuche

zeigten jedoch, dass dieser Flächenansatz nicht dem Versagensbild entspricht. Aus diesem Grund wurde an der TU Graz ein Bemessungsvorschlag entwickelt, welcher pro Schraube die, in die Schnittfläche projizierte Schraubenfläche abzieht. Dieser Bemessungsvorschlag ist in Abbildung 2-53 unten links dargestellt. Die Firma Wiehag GmbH aus Altheim (A) modifizierte diesen Vorschlag weiter und berücksichtigt für die Querschnittsschwächung lediglich die sich überkreuzenden Teile der Schraube nur einmal.

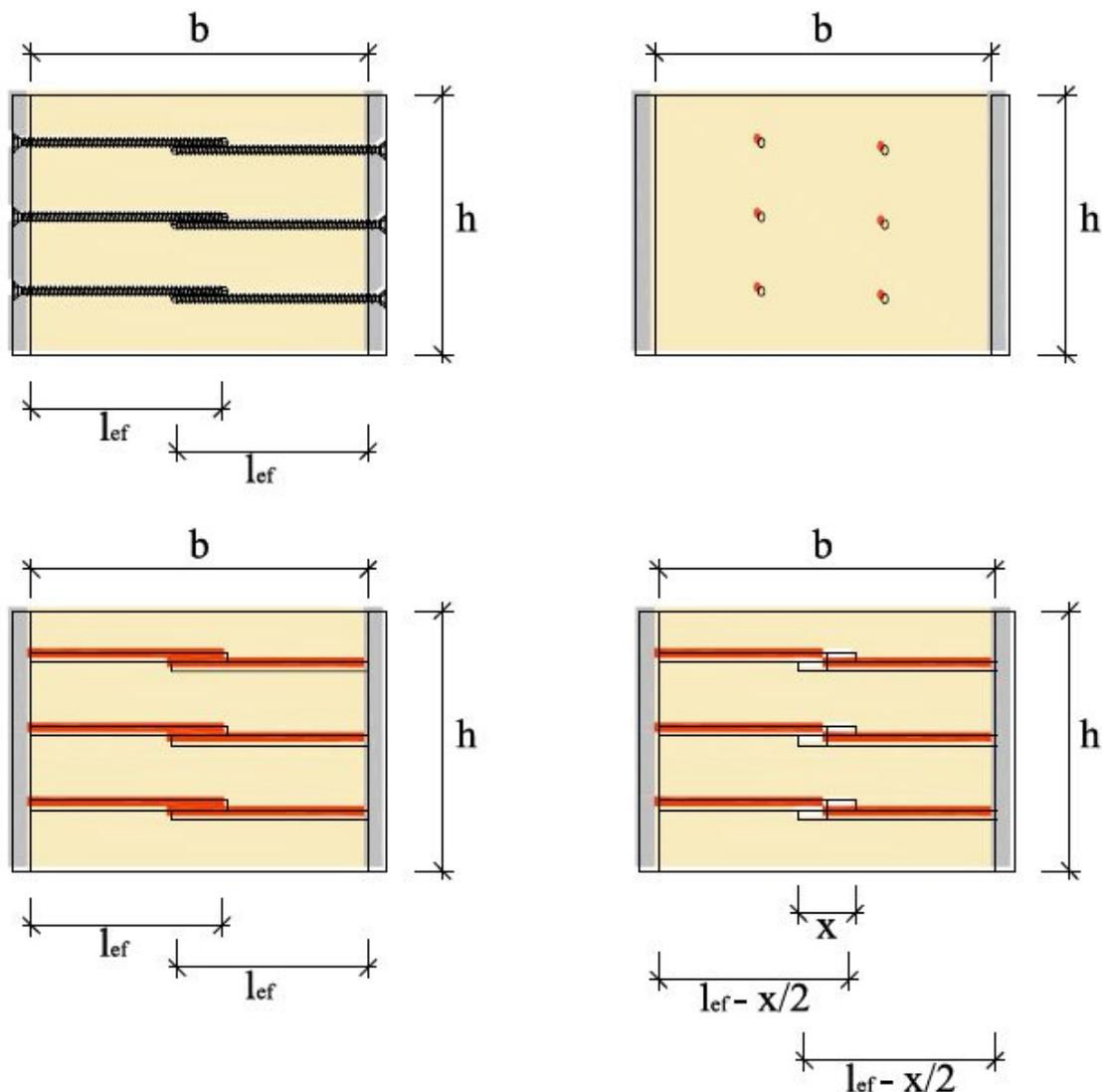


Abbildung 2-53 *Verschiedene Varianten der Nettoquerschnittsberechnung; oben links: Darstellung des Querschnitts mit in die Schnittfläche projizierten Schraubenflächen; oben rechts: Nettoquerschnitt mit Abzug der elliptischen Flächen; unten links: Nettoquerschnitt nach TU Graz; unten rechts: Nettoquerschnitt nach Firma Wiehag GmbH; aus [51]*

Die bei den Versuchen von Brandl ermittelten Spannungen zeigten in Prüfkfiguration A eine sehr gute Übereinstimmung mit den Spannungen, welche mit der Nettoquerschnittsfläche nach dem Modell der Firma Wiehag ermittelt wurden. Auch in der Prüfkfiguration B lieferte diese Theorie eine bessere Übereinstimmung mit den Ergebnissen. Brandl schließt daraus, dass ein alleiniger Abzug der elliptischen Schnittflächen des Schraubenquerschnitts vom Bruttoquerschnitt keine sichere Nachweisführung erlaubt und die Nettoquerschnittsformel nach dem Modell der Firma Wiehag GmbH eine bessere Lösung darstellt.

2-5.4.6 Krenn 2017

Krenn untersuchte Holz-Stahlblech-Zuglaschenverbindungen mit geneigt eingedrehten selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde. Dabei wurde der Winkel zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung des Holzes α für die Untersuchungen mit 30° bzw. 45° gewählt. Die Richtung der äußeren Kraft verlief dabei stets parallel zur Faserrichtung des Holzes ($\gamma = 0^\circ$).

Für die Versuche wurden sowohl selbstbohrende Holzschrauben mit Vollgewinde als auch selbstbohrende Holzschrauben mit Teilgewinde eingesetzt. Diese Schrauben hatten dabei stets einen Nenndurchmesser von 8 mm und eine Schraubenlänge von 200 mm. Die Probekörper bestanden aus Fichtenholz, welches der Brettschichtholz-Festigkeitsklasse GL28h gemäß ÖNORM EN 14080 [4] zuzuordnen war.

Es wurden dabei 3 verschiedene Schraubenarten eingesetzt:

- Typ A1: VG 8 x 200 mit Senkkopf und Bohrspitze
- Typ B: VG 8 x 200 mit Senkkopf und Bohrspitze
- Typ A2: TG 8 x 200/84 mit Senkkopf, Reibschaft und Halbspitze

Krenn führte zunächst Vorversuche zur ersten Abschätzung der erwartbaren Höchstlasten durch. Bei diesen Versuchen kam es sehr häufig zu einem Aufspalten des Holzes in der Trägerachse, da sich die Schraubenspitzen nicht überkreuzten. Aus diesem Grund wurde die Prüfkörperbreite der weiteren Versuche auf $b = 210$ mm verringert.

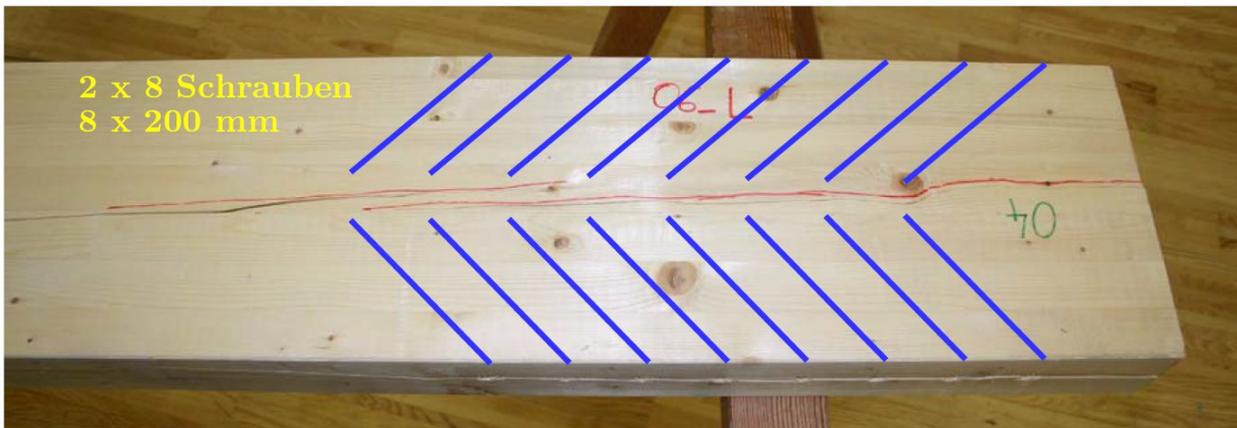


Abbildung 2-54 Querschnitt eines Prüfkörpers der Vorversuche aufgrund nicht überkreuzender Schrauben aus [27]

Anschließend wurden Versuche durchgeführt bei welchen die Verbindungen aus einer Schraubenreihe bzw. aus fünf Schraubenreihen bestanden. Bei den einreihigen Versuchen betrug der Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes 45° bzw. 30° . Bei sämtlichen Prüfungen der mehrreihigen Versuche betrug dieser Winkel 45° . Zwischen den einzelnen Versuchsreihen wurden zusätzlich der Schraubentyp, der Gewindetyp, die Dimension der Hölzer und das Vorhandensein einer Zwischenschicht zur Reduktion der Reibung variiert.

Bei den einreihigen Versuchen wurde pro Prüfvorgang ein Prüfkörper geprüft. Die Prüfkörper wurden dabei stets an demselben Holzkörper aus Esche verbunden. Es wurden dabei zwischen einer und acht Schrauben pro Scherfuge verwendet, welche einen Schraubenabstand a_1 von $5d$ aufwiesen.

Bei den mehrreihigen Versuchen wurde zwischen einer und acht Schrauben pro Scherfuge verwendet, welche einen Schraubenabstand a_1 bzw. a_2 von $5d$ aufwiesen. Die Anordnung der Schrauben wurde dabei zwischen einer parallelen, seriellen und gemischten Anordnung variiert. Eine serielle Anordnung bedeutete, dass die Schrauben ausschließlich in Faserrichtung hintereinander angeordnet wurden. Bei einer parallelen Anordnung waren diese ausschließlich rechtwinklig zur Faserrichtung versetzt angeordnet.

Bei den einreihigen Versuchen mit einem Einschraubwinkel von 45° konnte ein Wirkungsgrad von 0,92 erreicht werden und eine effektive Verbindungsmittellanzahl von mindestens 90 % der vorhandenen Verbindungsmittel. Mit zunehmender Anzahl der Schrauben je Scherfuge zeigte sich ein Trend des Versagensmodus vom Ausziehen hin zum

Kopfabreißen. Bei den Steifigkeiten war ein weitaus höheres Absinken pro Schraube mit steigender Verbindungsmittelanzahl erkennbar als bei der Tragfähigkeit.

Bei den einreihigen Versuchen mit einem Einschraubwinkel von 30° konnte ein Wirkungsgrad von über 1,0 bereits mit 4 Schrauben je Scherfuge erreicht werden und ebenfalls eine effektive Verbindungsmittelanzahl von mindestens 90 % der vorhandenen Verbindungsmittel. Bei der Auswertung der Steifigkeiten konnte ein deutlicher Unterschied zu dem Verhalten der Verbindungen mit einem Einschraubwinkel von 45° beobachtet werden. Ganz besonders der Referenzwert für eine Schraube stach durch eine nennenswert höhere Steifigkeit hervor. Das Phänomen, dass sich bei 4 Schrauben eine relative Verbesserung gegenüber 2 und 3 Schrauben einstellt, trat wie auch bei den Versuchen mit einem Einschraubwinkel von 45° auf.

Aufgrund des Prüfaufbaus der mehrreihigen Versuche mit vier Scherfugen war es möglich, mit einem einzelnen Prüfkörper vier Prüfergebnisse zu erhalten, indem nach dem Versagen einer Verbindung diese Verbindung immer mit $n + 1$ Schrauben verstärkt wurde. Dieser Vorgang wurde so oft wiederholt, bis schließlich alle 4 Scherfugen versagt hatten. Die Ergebnisse werden daher in zwei Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe der Ergebnisse beinhaltet alle gemessenen Werte und die zweite Gruppe nur jene Prüfergebnisse beim ersten Versagen einer Verbindung am Prüfkörper. Bei den Versuchen wurde ein Wert von 98 % der vorhandenen Verbindungsmittel für die effektive Verbindungsmittelanzahl nicht unterschritten.

Hinsichtlich der Steifigkeit zeigte sich eine günstige Wirkung einer Vorbelastung der Verbindung auf die Gruppenwirkung. Bei Auswertung der Daten hinsichtlich serieller oder paralleler Anordnung der Schrauben konnten keine signifikanten Einflüsse festgestellt werden. Unter Berücksichtigung aller Steifigkeitswerte zeigt sich jedoch tendenziell eine etwas größere Reduktion bei serieller Anordnung als bei paralleler Anordnung.

Vorgeschlagenes Bemessungsmodell

Krenn schlägt in Anlehnung an Blaß et al. [64] und anhand seiner Ergebnisse als baustatisches Modell für Stahlblech-Holz-Zuglaschenverbindungen mit geneigt angeordneten selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde ebenfalls ein Fachwerkmodell vor, das die Tragwirkung der Schrauben auf Abscheren vernachlässigt. Er betont jedoch, dass der Einschraubwinkel maximal 60° betragen sollte, da bei größeren Einschraubwinkeln die Dübeltragwirkung keine zu vernachlässigende Größe mehr darstelle.

Für die wirksame Anzahl n_{ef} von geneigt angeordneten selbstbohrenden Holzschrauben in Stahlblech-Holz-Zuglaschenverbindungen schlägt Krenn für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) die folgende Gleichung (2.38) vor. Als Randbedingung gibt er hierfür einen Einschraubwinkel zwischen 30° und 60° vor.

$$n_{ef,ULS} = 0,9 \cdot n \quad (2.39)$$

Für Verbindungskonfigurationen bei denen die Richtung der äußeren Kraft der Einschraubrichtung der Schrauben entspricht sollte die wirksame Anzahl nach Gleichung (2.39) berechnet werden.

$$n_{ef,ULS} = n^{0,9} \quad (2.40)$$

Für Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) empfiehlt Krenn die Möglichkeit einer auf diesem niedrigen Lastniveau vorhandenen ungleichmäßigen Lastverteilung auf die einzelnen Schrauben bei der Berechnung der Anschlusssteifigkeit zu berücksichtigen. Die wirksame Anzahl $n_{ef,SLS}$ je Stahlblech kann dabei gemäß nachstehendem Zusammenhang ermittelt werden:

$$n_{ef,SLS} = n^{0,8} \quad (2.41)$$

2-5.4.7 Schiro et al. 2018

In Schiro et al. [66] wurden Prüfungen als Druckstöße bestehend aus einem Holzbauteil mit seitlich angeschraubten Laschen ausgeführt. Diese Ausführung lag insbesondere an dem Interesse der Verbindungen als Schubverbindungen von Deckenelementen.

Bei den Untersuchungen wurden verschiedene Holzprodukte verwendet. So bestanden die mittleren Bauteile entweder aus Vollholz der Holzart Fichte, welches der Festigkeitsklasse C24 gemäß ÖNORM EN 338 [3] zuzuordnen war, oder aus Buchenfurnierschichtholz der Festigkeitsklasse GL70 [43]. Für die seitlichen Laschen wurde Brettspertholz mit einer Dicke von 57 mm und Buchenfurnierschichtholz mit einer Dicke von 40 mm verwendet.

Es wurden sowohl Schrauben mit einfachem Gewinde (ST_A und ST_B) und doppeltem Gewinde (DT_A und DT_B) verwendet. (vgl. Abbildung 2-55) Der Nenndurchmesser der Schrauben variierte dabei zwischen 8 mm und 10 mm.

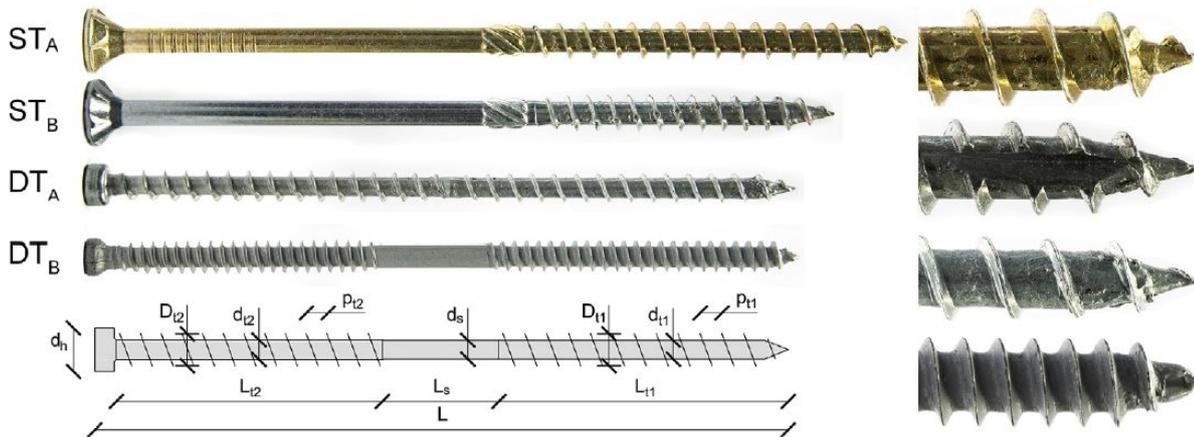


Abbildung 2-55 Verwendete Schraubentypen bei den Prüfungen in Schiro et al. [66]

In Abbildung 2-56 sind in Bild C die verwendeten Unterlegscheiben für die Schrauben mit einfachem Gewinde dargestellt. Es wurden dabei die oberen für die Schrauben des Typs ST_A und die unteren für ST_B verwendet. Für die Prüfkonfigurationen mit einem Einschraubwinkel kleiner als 90° wurden zusätzlich Versenkungen an den seitlichen Laschen angeordnet und die Winkelscheiben in Bild A verwendet. Zusätzlich wurden Prüfungen durchgeführt bei welchen keine Unterlegscheiben verwendet wurden.

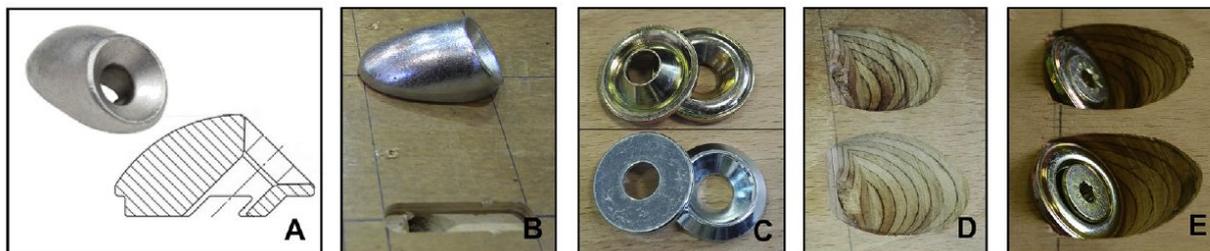
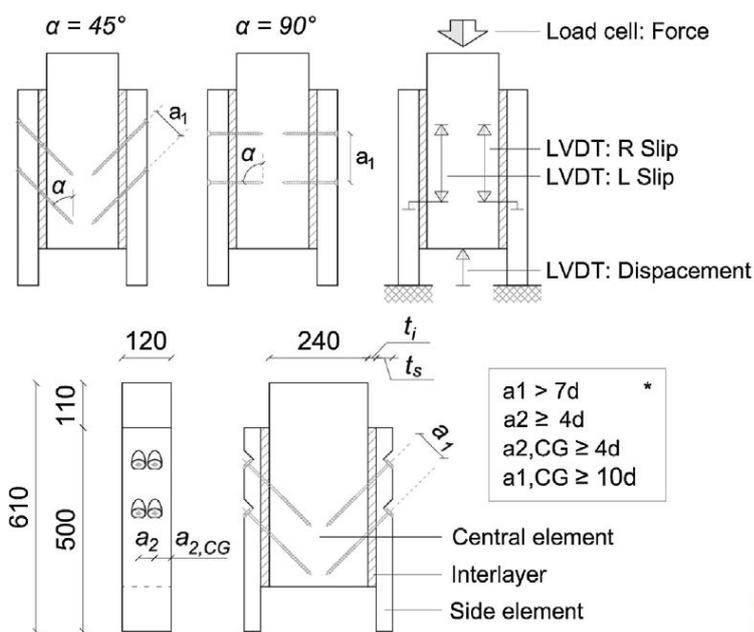


Abbildung 2-56 Bild A: Verwendete Winkelscheiben der Prüfungen in Schiro et al. [66]; Bild B: Versenkung bei Verwendung einer Winkelscheiben; Bild C: Verwendete Unterlegscheiben; Bild D und E: Versenkungen bei Schrauben ohne Unterlegscheiben; aus [66]

Es wurden ausschließlich Prüfungen durchgeführt, bei welchen pro Scherfuge jeweils vier Schrauben parallel angeordnet wurden. Der Schraubenabstand in Faserrichtung betrug dabei mindestens $7d$ und jener quer zur Faserrichtung $4d$.



* According to EN 1995:2014 or the relevant European Technical Approval (ETA)

Abbildung 2-57 Prüfaufbau und Prüfkörpergeometrie mit angegebenen Abständen der Versuche in Schiro et al. [66]

Von den insgesamt 14 geprüften Prüfserien wird hier nur auf die Serie P-C und P-D kurz eingegangen, da bei diesen sowohl die Laschen als auch die Mittelteile aus Buchenfurnierschichtholz bestand. Diese wurden mit Schrauben des Typs ST_A durchgeführt. Bei der Serie P-D wurden Winkelscheiben verwendet, während bei P-C Unterlegscheiben mit Senkbohrungen verwendet wurden. Die Schrauben wurden stets unter einem Einschraubwinkel von 45° appliziert, wobei in der Serie P-C die Schraubenlänge 160 mm und in P-D 220 mm betrug.

In der Serie P-C versagten zwei Verbindungen dabei durch Schraubenbrüche, während es in der Serie P-D zu einem Aufspalten in den Laschen kam. Die Serie P-C zeigte zudem ein um ca. 20 % steiferes Verhalten als P-D, was in etwa dem Verhältnis der Schraubenlängen entspricht. Da die Schraubenzugtragfähigkeit bei P-C bereits frühzeitig erreicht wurde, liegt die Tragfähigkeitssteigerung hier jedoch lediglich bei ca. 15 %. Durch das Auftreten der Schraubenbrüche in P-C beträgt das Duktilitätsmaß bei dieser Serie nur rund ein Drittel des Duktilitätsmaßes der Serie P-D. (vgl. Abbildung 2-58) Das Aufspalten der Laschen in der Serie P-D kann der Schwächung des Querschnittes aufgrund der Senkbohrungen zugerechnet werden.

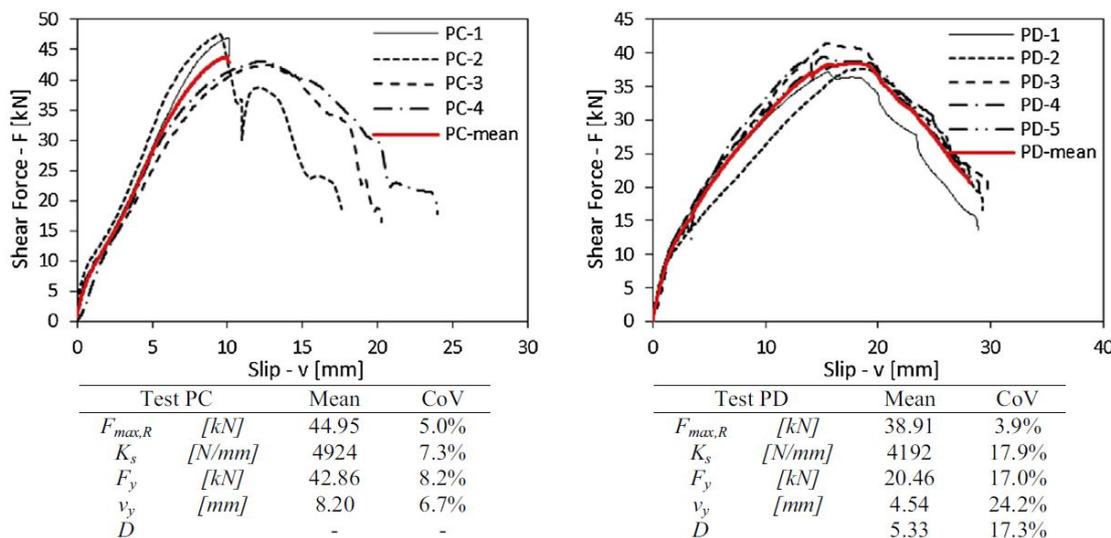


Abbildung 2-58 Kraft-Weg-Beziehungen der Prüfserien P-C und P-D in Schiro et al. [66]

2-5.4.8 Zusammenfassung der Literaturrecherche

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden zu einem Großteil mit Nadelholz und den daraus hergestellten Bauprodukten durchgeführt. Die grundlegenden Erkenntnisse welche daraus gewonnen wurden, können jedoch auch als Informationen für die prinzipiellen Eigenschaften von geneigt angeordneten Schraubengruppen in Laubholz herangezogen werden. Wissenschaftliche Arbeiten, welche vergleichbare Untersuchungen im Laubholz beschreiben, sind derzeit kaum verfügbar. Von Interesse sind nun geometrische Besonderheiten, wie die benötigten Abstände für den beanspruchten Hirnholzrand und auch das Verhalten von außenliegenden Holzlaschen bei Zuglaschenstößen, da hier die Ausführung des Kontaktes und somit die Kraftübertragung des Schraubenkopfes materialabhängig ist.

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass Schrauben über die gesamte Bandbreite des Einschraubwinkels α von 0° bis 90° sowohl axial auf Herausziehen als auch lateral auf Abscheren beansprucht werden. Auch können geneigt angeordnete Schraubengruppen sowohl mit freier als auch mit gesperrter Oberflächenverformung ausgebildet werden, weshalb auch eine Reibungskomponente in der Gesamttragfähigkeit der Verbindung miteinfließen kann. Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten liegt dabei auf jene mit gesperrter Oberflächenverformung, da diese eine häufigere Anwendung findet.

Prinzipiell werden diese Verbindungen auf Herausziehen bzw. auf Schraubenbruch ausgelegt, da diese Versagensmechanismen einfacher in der Berechnung und weniger komplex im Auftreten sind. In den experimentellen Untersuchungen wurde ein Herausziehen durch ein Einhalten der geringeren Mindestabstände nach den technischen Zulassungen der Schrauben [21] auch bei großem l_{ef} erreicht. (vgl. Krenn [27] Abschnitt 2-5.4.6)

Generell haben die in diesem Abschnitt zusammengefassten Arbeiten gezeigt, dass die Abscherkomponente der Tragwirkung für Einschraubwinkel $\alpha > 60^\circ$ [27] bzw. 75° [29] relevant ist. Für Einschraubwinkel $\alpha < 60^\circ$ überwiegt der axiale Anteil der Tragwirkung, da die Bereiche, in denen die Lochleibungsspannungen auftreten, mit geringerem Einschraubwinkel kleiner werden und somit der Großteil des Schraubengewindes außerhalb der lochleibungsbeanspruchten Bereiche liegt. In [66] wird deutlich, dass die Zugfestigkeit der Schrauben bei Laubholz mit deutlich geringerer Einschraubtiefe erreicht wird und die Ausführung mit Winkelscheiben auf der Seite des Schraubenkopfes zum Aufspalten führen kann. In [54] wurde aufgezeigt, dass bei gekreuzter Anordnung der Schrauben die Tragfähigkeit der Verbindung um rund 20 % geringer ist als bei gleicher Anzahl rein auf Zug beanspruchter Schrauben. Blaß [55], Kevarinmäki [54] und Krenn [27] stellten fest, dass der Gruppeneffekt für die Tragfähigkeit nur in sehr geringem Maße vorhanden ist. Im Gebrauchslastzustand ist jedoch eine Abhängigkeit der Steifigkeit von der Verbindungsmittellanzahl deutlich erkennbar.

Letztendlich ist die wesentliche Aufgabe der Bauingenieurin bzw. des Bauingenieurs die verschiedenen Verbindungsmöglichkeiten aufgrund der Anordnung der Schrauben (Winkel, Gruppengröße und -dimensionen, Schraubendimensionen, etc.), der Anschlussteile, der zu übertragenden Kräfte und deren Richtung in Bezug auf das Steifigkeits- und Versagensverhalten zu verstehen, um die Entscheidungen für eine entsprechende Bemessung zu treffen.

Der Inhalt des entsprechenden Arbeitspakets im Projekt `hardwood_joint` ist die Untersuchung von Verbindungen mit vorwiegend axial beanspruchten Schraubengruppen, weshalb hierfür das mehrfach diskutierte Fachwerkmodell zur Berechnung des Widerstandes relevant ist. Bei diesem Modell wird die Beanspruchung der Schraube auf Abscheren vernachlässigt. Die Tragwirkung der Verbindung im Modell setzt sich somit aus der axialen Beanspruchung der Schraube auf Herausziehen und einem Reibungsanteil infolge dem Andrücken der verbundenen Bauteile infolge der Belastung. Für die Bestimmung des charakteristischen Wertes der Tragfähigkeit der Verbindung ist somit neben den Festigkeitseigenschaften der Bauteile, der Verbindungs- und Bauteilabmessungen nur der charakteristische Wert des Ausziehparameters $f_{ax,k}$ sowie der Reibbeiwert μ von Nöten.

KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN

3-1 PRÜFKONZEPT

Um Referenzwerte für die Ausziehfestigkeit der Schrauben für die Gruppenversuche zu erhalten, wurden zunächst Versuche an Prüfkörpern mit einzelnen Schrauben durchgeführt, bei welchen die Ausziehfestigkeit bestimmt wurde.

Bei den Einzelversuchen für die Hirnholzverschraubungen wurden mit Buche dabei 21 Prüfungen durchgeführt, mit Birke 20 und mit BauBuche 16. Die Querschnittsabmessungen wurden anhand der Abmessungen des zur Verfügung gestellten Ausgangsmaterials und der Ergebnisse aus Koppauer [26] so gewählt, dass es beim Eindrehen der Schrauben zu keinem Aufspalten des Holzes kam. Um zusätzlich zu den Referenzwerten der Ausziehfestigkeit auch noch Vergleichswerte für die Steifigkeit zu erhalten, wurden weitere Ausziehversuche mit Einzelschrauben durchgeführt. Hier wurde im Gegensatz zu den vorangegangenen Einzelversuchen das Last-Verformungsverhalten der Schrauben durch aufgebrachte induktive Wegaufnehmer ebenfalls gemessen. Für diese Versuche wurden die unbeschädigten Mittelteile von zwölf Prüfkörpern aus BauBuche herangezogen, welche bereits bei den Gruppenversuchen geprüft wurden. Weitere Referenzversuche für die Steifigkeit mit Buche und Birke konnten aufgrund des zeitlichen Engpasses im Zuge der epidemiologischen Lage im Jahr 2020 nicht durchgeführt werden. In Tabelle 3-1 sind die untersuchten Prüfserien der Einzelversuche für die Hirnholzverschraubungen mit den wesentlichen Parametern aufgelistet.

Tabelle 3-1 *Untersuchte Prüfserien bei den Einzelversuchen der Hirnholzanschlüsse mit den wesentlichen Parametern*

Prüfserie	Holzart	$a_{2,eg}$	l_{emb}	l_{ef} [mm]	Länge [mm]	Anzahl PK [-]	Messung
Buche	BU	5 d	3 d	92	300	21	Ausziehfestigkeit
Birke	BI	5 d	6 d	92	420	20	Ausziehfestigkeit
BauBuche	BB	5 d	8 d	80	450	16	Ausziehfestigkeit
Ref-Steifigkeit	BB	~8,5 d	8,5 d	92	330	12	Ausziehfestigkeit + Steifigkeit

Wie in Abschnitt 2-4.5 erwähnt, konnte bei bisherigen Versuchen zu Hirnholzanschlüssen in Laubhölzern ein vermehrtes Aufspaltversagen der Prüfkörper festgestellt werden. Auf Grundlage dieser Versuche sollte nun festgestellt werden, ob eine erhöhte Einbindetiefe der Schrauben in das Holz die Spaltneigung der Prüfkörper vermindert und sich somit auch die Tragfähigkeit der Verbindungen erhöht. Hierzu wurden die Abstände der Schrauben untereinander und die Geometrie der Prüfkörper wie in Koppauer [26] gewählt. Die Schraubengruppen bestanden ebenfalls aus 19 Schrauben und wurden mit einer Neigung von 0° zur Faserrichtung des Holzes in die Prüfkörper eingeschraubt. Dabei wurden in Birke und BauBuche jeweils zwei Prüfkonfigurationen untersucht und in Buche eine. Variiert wurde unter den Prüfserien in Birke die Einbindetiefe l_{emb} und in BauBuche das Anziehdrehmoment der Schrauben. Bei der Prüfserie mit Buche wurde eine abgestufte Anordnung der Schrauben gewählt und somit die Einbindetiefe der Schrauben innerhalb des Prüfkörpers variiert. In Tabelle 3-2 sind die untersuchten Prüfserien mit den wesentlichen Parametern aufgelistet.

Tabelle 3-2 *Untersuchte Prüfserien bei den Gruppenversuchen der Hirnholzanschlüsse mit den wesentlichen Parametern*

Prüfserie	Holzart	a_2	$a_{2,cg}$	l_{emb}	Länge [mm]	Anzahl PK [-]	Anziehdrehmoment [Nm]	Anordnung
BU_01	BU	3 d	3 d	5 d 9 d 11 d	800	6	30	abgestuft
BI_01	BI	3 d	3 d	10 d	800	6	30	gleichmäßig
BI_02	BI	3 d	3 d	5 d	800	6	15	gleichmäßig
BB_01	BB	3 d 4 d	3 d	11 d	800	6	30	gleichmäßig
BB_02	BB	3 d 4 d	3 d	11 d	800	6	20 40	gleichmäßig

Die Versuche mit geneigt angeordneten Schraubengruppen konnten aufgrund der epidemiologischen Lage im Jahr 2020 vom Verfasser dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Diese Prüfungen wurden von Mahlknecht [67] anhand der hier vorgestellten Vorbemessung und Prüfplanung durchgeführt. Die Gruppenversuche wurden dabei als Zuglaschenstöße mit drei Schrauben pro Scherfuge unter einem Achs-Faser-Winkel α von 45° geplant. Die Zuglaschen bestanden aus der Buchenfurnierschichtholzplatte BauBuche Q [18]. Die Bauteile bestanden bei fünf der sechs Prüfserien aus Buchenvollholz und in einer Serie aus Birken-Duoträgern. Bei den Prüfserien wurden die Abstände a_1 und $a_{1,cg}$ variiert und anschließend aufgrund der Erkenntnisse die Art der benutzten Winkelscheibe, damit zusammenhängend die Einbindetiefe und der Prüfaufbau mit Abstandsholz. Die Abstände a_1 und $a_{1,cg}$ wurden aufgrund der Mindestwerte für axial belastete Schraubengruppen laut ÖNORM EN 1995-1-1 [6] und ETA-12/0373 [21] gewählt. (siehe Abschnitt 2-5.3.1) In Tabelle 3-3 sind die untersuchten Prüfserien mit den wesentlichen Parametern aufgelistet.

Tabelle 3-3 *Untersuchte Prüfserien bei den Gruppenversuchen mit geneigt angeordneten Schraubengruppen mit den wesentlichen Parametern*

Prüfserie	Holzart	a_1	$a_{1,cg}$	l_{emb} mit $d_{PD}^{2)}$ [mm]	$n_s^{1)}$ [-]	Zugholz $B \times H$ [mm]	Abstandsholz	Senkscheibe
a	BU	7 d	10 d	1,5 d 8	3	80 x 60	ohne	45° Stahl-Holz
b	BU	7 d	5 d	1,5 d 8	3	80 x 60	ohne	45° Stahl-Holz
c	BU	5 d	5 d	1,5 d 8	3	80 x 60	ohne	45° Stahl-Holz
d	BU	5 d	5 d	1,5 d 10	3	80 x 60	mit	45° Stahl-Holz
e	BU	5 d	5 d	3,5 d 10	3	104 x 60	mit	45° Holz-Holz
f	BI	5 d	5 d	1,5 d 10	3	80 x 60	mit	45° Stahl-Holz

¹⁾...Anzahl der Schrauben je Scherfuge

²⁾...Durchmesser der Vorbohrung

3-2 MATERIAL

Das Ausgangsmaterial für die Versuche in Buche und BauBuche wurde von der Firma Pollmeier GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt. Die gelieferten Träger aus BauBuche nach der europäisch technischen Bewertung ETA-14/0354 [5] hatten eine Höhe von 140 mm, eine Breite von 160 mm und eine Länge von 2050 mm. Die verwendeten Buchenlamellen hatten eine Stärke von 74 mm bzw. 65 mm und eine Länge von 3350 mm bzw. 2450 mm. Die Breite variierte im Bereich von 160 mm bis 200 mm. Es handelte sich um Ware der Güte SUPERIOR 52 (48,5) mm mit einer hohen Qualität ohne Rotkern und minimaler Astigkeit. (vgl. Abbildung 3-1)

Das Ausgangsmaterial für die Versuche in Birke wurde von der Firma Hasslacher Norica Timber GmbH bereitgestellt. Die gelieferten Birkenlamellen hatten eine Höhe von 46 mm, eine Breite von 170 mm und eine Länge von 3000 mm. Bei diesen Lamellen handelte es sich um kern- und kernnahe Bretter mit Braunkern und mit Wuchsmerkmalen wie Ästen. (vgl. Abbildung 3-1) Aus diesem Grund wurde beim Zuschnitt eine visuelle Sortierung nach möglichst geringen Wuchsmerkmalen durchgeführt, um ein möglichst homogenes Material zu erhalten.

Bei den Versuchen mit geneigt angeordneten Schraubengruppen wurde für die Herstellung der seitlichen Zuglaschen eine Buchenurnierschichtholzplatte BauBuche Q [18] von der Firma Pollmeier Massivholz GmbH verwendet. Durch die Querlagen in dieser Platte sollte die Gefahr von Aufspalten der seitlichen Laschen minimiert werden. Die gelieferten Platten hatten eine Stärke von 40 mm, eine Breite von 897 mm und eine Länge von 2000 mm. Bei der visuellen Begutachtung der Platten konnte eine hohe Qualität der Platten ohne augenscheinliche Schädigungen festgestellt werden.



Abbildung 3-1 Exemplarische Querschnitte von Prüfkörpern; links: Prüfkörper aus Buche; rechts: Brettchichtholzträger aus Birke

Für die Verklebung der Querschnitte wurde der MUF-Kleber Prefere 4546 der Firma Dynea AS [68] verwendet.

Als Schraube wurde der Typ „RAPID® Hardwood“ der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH [21] verwendet. Die Teilgewindeschrauben für die Hirnholzanschlüsse wiesen bei einer Länge von 240 mm eine Gewindelänge von 100 mm und einen Durchmesser von 8 mm auf (nominelle Werte). Jene für die Zuglaschenstöße hatten einen kürzeren Schaft und somit eine Gesamtlänge von 160 mm.

Für die Verankerung der Prüfkörper mit einer Holzbauschraube (Einzelversuche) in der Prüfmaschine wurden Vollgewindeschrauben der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG [69] mit einer Länge von 120 mm und einem Durchmesser von 12 mm verwendet. Die Verwendung dieser Schrauben bei den „pull-pull“-Ausziehversuchen folgte aus der Notwendigkeit ein Ausziehversagen bei den geprüften Schrauben des Typs „RAPID® Hardwood“ mit dem Nenndurchmesser von 8 mm zu erzielen und somit ein höherer Auszieh Widerstand bei der Ankerschraube von Nöten war. (vgl. Abschnitt 3-3.2.3)

Bei den Gruppenversuchen mit geneigt angeordneten Schraubengruppen wurden die Senkscheiben 45° Stahl-Holz $d = 8$ mm der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG [22] verwendet. Ebenso wurden Senkscheiben 45° Holz-Holz für ASSY Senkkopfschrauben $d = 8$ mm, ebenso von der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG [69], verwendet. Weiters wurden Unterlegscheiben mit Außendurchmesser $d_a = 50$ mm, Dicke $t_{US} = 6$ mm und Innenlochdurchmesser $d_i = 16$ mm verwendet. Die verwendeten Unterlegscheiben, Senkscheiben und die geprüften Schrauben des Typs „RAPID® Hardwood“ sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

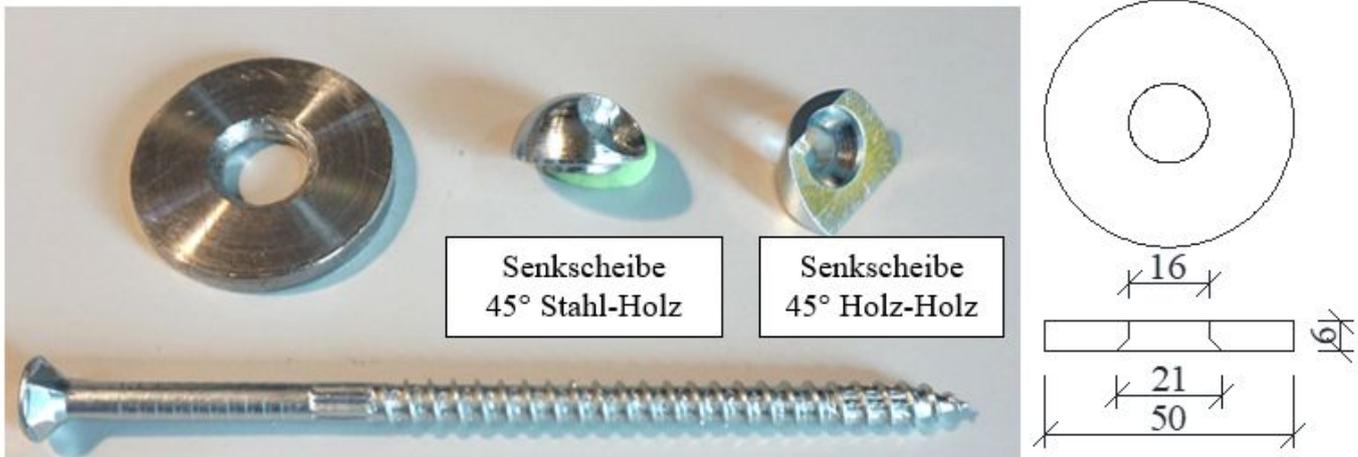


Abbildung 3-2 *Oben von links nach rechts: Verwendete Unterlegscheibe mit $d_a = 50$ mm, Senkscheibe 45° Stahl-Holz mit $d = 8$ mm und Senkscheibe 45° Holz-Holz mit $d = 8$ mm; Unten: Verwendete Schraube „RAPID® Hardwood“ mit $d = 8$ mm, einer Gesamtlänge von 160 mm und einer Gewindelänge von 100 mm; Rechts: Skizze mit Abmessungen der verwendeten Unterlegscheiben aus [67]*

3-2.1 HERSTELLUNG DER PRÜFKÖRPER

Das zur Verfügung gestellte Holz wurde von August 2019 bis zu den Prüfungen im Dezember 2019 bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach dem ersten Zuschnitt des Holzes im Oktober 2019 wurde mittels einer Widerstandsmessung (Hygronette mit Einschlagelektroden) die Holzfeuchte und die Rohdichte stichprobenartig bestimmt. Für Buche wurde eine Holzfeuchte zwischen 8,7 % und 12,4 % und für Birke zwischen 5,3 % und 11,9 % gemessen. Die mittlere Rohdichte betrug bei Buche 741 kg/m³ und bei der Birke 617 kg/m³. Eine aussagekräftige Feuchtigkeitsmessung der BauBuche konnte aufgrund fehlender Referenzdaten nicht durchgeführt werden.

Im November 2019 erfolgte der Zuschnitt auf die Länge der Prüfkörper und die Verklebung der einzelnen Lamellen. Da das zur Verfügung gestellte Birken-Vollholz zum überwiegenden Teil aus Kernholz der Birke bestand, wurde bei der Verklebung darauf geachtet, dass die Träger so angeordnet wurden, dass der Kern im äußeren Bereich des Prüfkörpers zu liegen kam. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass die verklebten Lamellen eine ähnliche Rohdichte aufwiesen. Für die Verklebung der Prüfkörper in Buche und Birke wurden je Fuge 400 g/m² eines MUF-Klebers der Firma Dynea AS [68] aufgetragen und mit einem Pressdruck von 0,8 N/mm² für sieben Stunden verklebt. Das Klebstoffgemisch bestand aus einem Verhältnis von Kleber zu Härter von 10:3.

3-2.1.1 Hirnholzanschlüsse

Einzelprüfkörper – Widerstandsprüfung

Die Querschnittsabmessungen der Prüfkörper für die Einzelversuche für die Referenzwerte der Ausziehfestigkeit der Hirnholzanschlüsse variierten zwischen den einzelnen Holzarten und können Abbildung 3-3 entnommen werden.

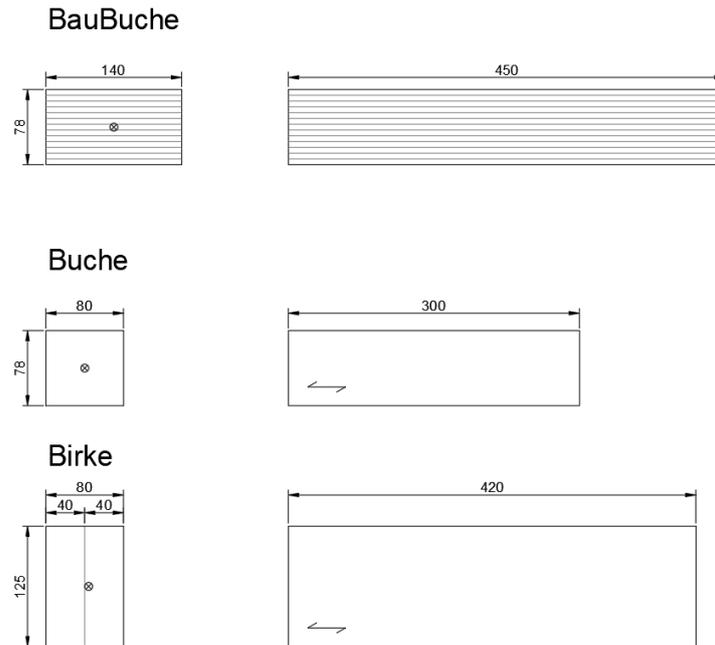


Abbildung 3-3 Querschnitte und Seitenansichten mit Abmessungen und Klebefugen der Prüfkörper der Einzelversuche für die Referenzwerte der Ausziehfestigkeit der Hirnholzverbindungen in BauBuche, Buche und Birke; Maße in [mm]

Gruppenprüfkörper

Die Querschnittsabmessungen der Prüfkörper für die Gruppenversuche der Hirnholzanschlüsse wurden gleich gewählt wie in Koppauer [26] und sind in **Abbildung 3-4 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Abbildung 3-5** dargestellt. Da die zur Verfügung gestellten Buchenbretter eine zu geringe Höhe aufwiesen, mussten jeweils zwei Bretter vor dem Zuschneiden und Hobeln zuerst an den Seitenflächen verklebt werden, um die benötigte Höhe von 132 mm der Querschnitte zu erreichen. Die Träger aus BauBuche wurden bereits mit der benötigten Höhe von 160 mm geliefert, weshalb hier ein Verkleben der Träger nicht von Nöten war. Die bereitgestellten Lamellen aus Birkenholz wiesen mit 46 mm ebenfalls eine zu geringe Höhe auf, weshalb hier vier Lamellen nach dem Hobeln an den Seitenflächen verklebt werden mussten, um die erforderliche Höhe von 132 mm zu erreichen.

Bei jeder Prüferserie wurden auf beiden Seiten des Prüfkörpers eine Schraubengruppe bestehend aus 19 Schrauben verwendet. Das Schraubenbild wurde ebenfalls analog zu Koppauer [26] so gewählt, um ein möglichst kompaktes Schraubenbild zu erhalten. Deshalb wurden die Schraubenreihen versetzt angeordnet, um die Schraubenabstände a_2 schräg einzuhalten. Die Form des sechseckigen Querschnittes ergibt sich aus dem Streben nach gleichen Randabständen sämtlicher außenliegenden Schrauben. Diese Randabstände wurden mit $a_{2, \text{cg}} = 3 d$ festgelegt. Für die Prüferserien in BauBuche ergeben sich aufgrund der Erkenntnisse aus [26] andere Abstände der Schraubenreihen quer zur Furnierrichtung. Hier wurde der Schraubenabstand in Furnierrichtung mit $a_{2, \text{f}} = 3 d$ gewählt, während quer zur Furnierrichtung eine Erhöhung auf $a_{2, \text{q}} = 4 d$ erforderlich war. Bei sämtlichen Probekörpern betrug die Länge 800 mm.

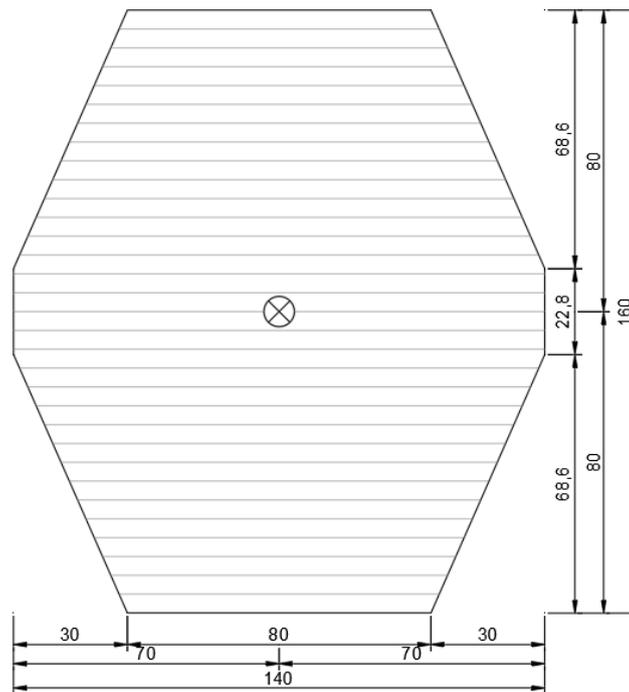


Abbildung 3-6 Querschnitt der Prüfkörper aus BauBuche der Referenzversuche für die Steifigkeit; Maße in mm

Geneigt angeordnete Schrauben

Für die Zuglaschenstöße wurden aus einem Brettabschnitt zwei Prüfkörper aus Buchenvollholz auf das Maß Höhe x Breite von $80 \times 60 \text{ mm}^2$ bzw. $120 \times 60 \text{ mm}^2$ gebracht. Für die Prüfkörper aus Birke wurden jeweils zwei Bretter mit ähnlicher Rohdichte miteinander verklebt und auf den Querschnitt $80 \times 60 \text{ mm}^2$ geschnitten. Für beide Holzarten wurden die erhaltenen Mittelhölzer jeweils paarweise im beidseitigen Anschluss eingebaut. Von der Prüfkörpern der Zuglaschenstößen wurde jeweils ein Teilstück für die Einzelreferenzprüfungen bereitgestellt. Eine detailliertere Beschreibung findet sich in [67].

Die Zuglaschen aus BauBuche-Q hatten eine Länge von 1 m, eine Höhe von 40 mm und ein Breite von 60 mm.

3-2.1.2 Vorbohren

Bei den Prüfungen der Hirnholzanschlüsse wurden bei sämtlichen Prüfungen die Löcher vorgebohrt.

Bei den Prüfkörpern der Einzelversuche erfolgte die Vorbohrung auf einer Ständerbohrmaschine. (vgl. Abbildung 3-7) Hierbei wurde die Vorbohrung auf Seite der Prüfschraube mit einem Bohrer des Durchmessers 6 mm hergestellt und auf Seiten der Verankerungsschraube mit 8 mm. (siehe Abschnitt 3-3.1) Bei den Prüfkörpern aus BauBuche wurde zusätzlich auf Seite der Prüfschrauben mit 8 mm bis zu einer Länge von 64 mm nachgebohrt, um die effektive Schraubenlänge bei diesen Versuchen zu vermindern, da es sonst laut Vorbemessung zu vermehrten Schraubenbrüchen bei den Versuchen gekommen wäre, vgl. Abschnitt 3-3.2.3. Bei der Birke erfolgte die Vorbohrung aufgrund der Klebefuge um $1 d = 8 \text{ mm}$ außermittig.

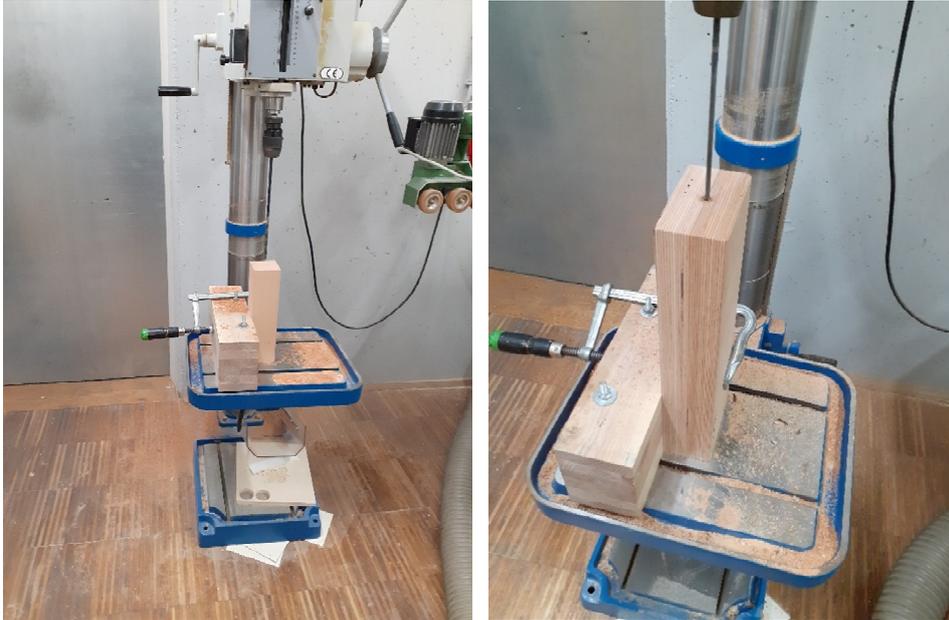


Abbildung 3-7 *Herstellung der Vorbohrungen an den Prüfkörpern der Einzelversuche der Hirnholzanschlüsse; links: Standbohrmaschine mit eingespanntem Prüfkörper aus Buche; rechts: eingespannter Prüfkörper aus BauBuche mit aufgesetztem Bohrer*

Das Schraubenbild der Gruppenversuche wurde mit mithilfe einer Langlochbohrmaschine vorgebohrt, bei welcher die Probekörper liegend eingespannt wurden und die Vorbohrung mit einem Bohrer des Durchmessers 6 mm hergestellt wurde. (vgl. Abbildung 3-8)

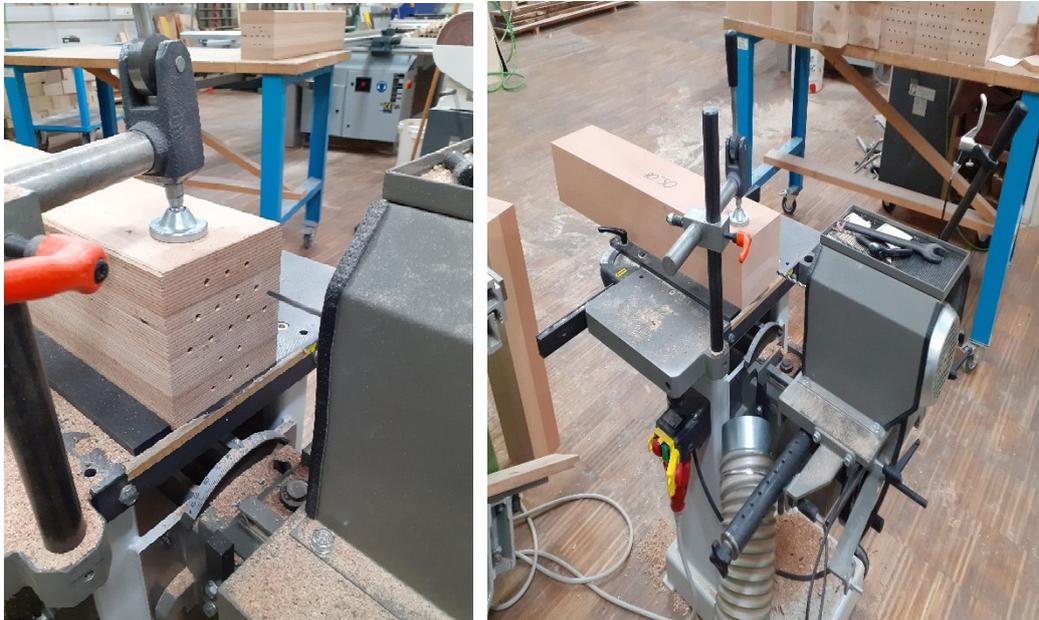


Abbildung 3-8 *Herstellung der Vorbohrungen an den Prüfkörpern der Gruppenversuche der Hirnholzanschlüsse; links: Langlochbohrmaschine mit eingespanntem Prüfkörper aus BauBuche mit teilweise fertig gestellten Lochbild; rechts: Langlochbohrmaschine mit eingespanntem Prüfkörper aus Birke*

3-2.1.3 Geneigt angeordnete Schraubengruppen

Bei diesen Versuchen sind sämtliche Prüfkörper nicht vorgebohrt, weshalb diese nach dem Verkleben lediglich auf die erforderlichen Maße (vgl. Abschnitt 3-3.1) zugeschnitten werden mussten. Bei den Zuglaschenstößen mussten

die Laschen vorgebohrt werden und Versenkungen für die Beilagscheiben hergestellt werden. Die Herstellung der Vorbohrungen der Zuglaschen mit einem Durchmesser von 8 mm und der Versenkungen für die Beilagscheiben mit einem Durchmesser von 50 mm erfolgte mithilfe einer Langlochbohrmaschine und einer Standbohrmaschine. Hierbei stellten sich jedoch Schwierigkeiten heraus, die Neigungen der Schrauben in Breitenrichtung exakt herzustellen. Aufgrund der überkreuzten Schrauben ist laut ETA-11/0190 [22] für Schrauben der Firma Würth ein Abstand von gekreuzt angeordneten Schrauben von mindestens $1,5 d$ einzuhalten. Um diesen Abstand bei der vorliegenden Prüfungsanordnung einzuhalten, ist eine Neigung der Schrauben von mindestens $\beta = 4,5^\circ$ in seitlicher Richtung von Nöten. Diese Neigung wurde mithilfe von Keilen hergestellt, welche auf diese Neigung abgeschrägt wurden. Die Zuglaschen wurden anschließend mit Hilfe einer Zwinde an diese Keile angepresst, so dass diese ebenfalls diese seitliche Neigung auf dem Tisch der Langlochbohrmaschine erhielten. Auf der Bohrseite besaß ein Keil eine Vorbohrung, welche als Führungsloch für die Bohrung der Zuglaschen diente. Dieses Führungsloch sorgte gemeinsam mit einer Führungsschiene am Tisch der Langlochbohrmaschine für die Einhaltung der Neigung der Schrauben in Längsrichtung von $\alpha = 45^\circ$. Der Aufbau des Vorbohrvorgangs ist in Abbildung 3-9 dargestellt.



Abbildung 3-9 Herstellung der Vorbohrungen der Zuglaschen mit Hilfe einer Langlochbohrmaschine und Keilen; links oben: Längsansicht mit eingezeichnetem seitlichen Neigungswinkel der Schrauben β ; rechts oben: Ansicht von oben mit eingezeichnetem Neigungswinkel der Schrauben in Längsrichtung α ; unten: Seitenansicht

Ein weiterer Schritt stellte die Herstellung der Versenkungen für die Unterlegscheiben dar. Diese erfolgte mit einer Standbohrmaschine bei welcher die Zuglaschen an einer am Bohrtisch im exakten Abstand angespannten Führungsholz angehalten wurde, um anschließend die Versenkung mit Hilfe eines in der Standbohrmaschine eingespannten Forstnerbohrers herzustellen. (vgl. Abbildung 3-10)



Abbildung 3-10 Herstellung der Versenkungen der Zuglaschen mit Hilfe einer Standbohrmaschine und eines Forstnerbohrers

Die Neigungen der Vorbohrungen in Breitenrichtung von mindestens $4,5^\circ$ konnte, wie bereits erwähnt, mit den vorhandenen Mitteln nicht exakt hergestellt werden. Um die Fehler jedoch auf ein Minimum zu reduzieren, wurden insgesamt drei Serien der Zuglaschen hergestellt, welche sich in der Abfolge und den verwendeten Arbeitsmitteln unterschieden.

Serie 1

Hier wurden bei den Zuglaschen zuerst die Versenkungen mit Hilfe der Standbohrmaschine und im zweiten Schritt die Bohrungen durchgeführt. Bei den aufgezählten Abweichungen in Tabelle 3-4 ist zu erkennen, dass das Ergebnis eine sehr hohe Streuung der Neigungen in dieser Serie war. Das nicht zufriedenstellende Ergebnis ist aller Voraussicht nach darauf zurückzuführen, dass der Bohrer sich beim Eindringen in das Holz durch die bereits vorher hergestellten Versenkungen, welche durch den Forstnerbohrer eine Vertiefung in der Mitte besitzen, leichter abrutschen.

Serie 2

In dieser Serie wurde im Gegensatz zu Serie 1 die Bohrung vor der Fräsung durchgeführt und zusätzlich die Stelle der Bohrung im Holz mit Hilfe eines Körners markiert bzw. eine Vertiefung hergestellt, was ein Verrutschen des Bohrers beim Eindringen in das Holz erschweren sollte. Das Ergebnis dieser Serie war eine signifikante Verbesserung der Abweichungen der seitlichen Neigung der Vorbohrungen gegenüber Serie 1, vgl. Tabelle 3-4.

Serie 3

Hier wurde gleich vorgegangen wie in Serie 2, nur wurde hier zusätzlich ein Holzbohrer für die Herstellung der Bohrlöcher verwendet. Im Vergleich zu Serie 2 konnte dadurch jedoch keine signifikante Erhöhung der Genauigkeit der Vorbohrungen bemerkt werden vgl. Tabelle 3-4.

Ein Einfluss auf die Abweichungen von der gewollten Neigung der Vorbohrungen konnte ebenfalls durch das Festziehen der Zuglaschen an den Keilen mit Hilfe der Zwingen festgestellt werden. Erfolgte das Festziehen zu stark, wirkte sich das nachteilig auf die angestrebte Präzision aus.

In Tabelle 3-4 und Tabelle 3-5 sind die Außermitten der hergestellten Bohrlöcher in den Zuglaschen tabellarisch dargestellt. Um die erforderliche seitliche Neigung der Schrauben zu erreichen, ist eine Differenz der Außermitten von 3 mm erforderlich. Es ist ersichtlich, dass die Serie 1 im Mittel diesen Wert um bis zu 50 % überschreitet. Die Serien 2 und 3 konnten im Mittel die anvisierte Differenz gut erzielen. Einzelne extreme Abweichungen vom Soll konnten jedoch auch in diesen Serien nicht verhindert werden.

Tabelle 3-4 *Außermitten der hergestellten Bohrlöcher in den Zuglaschen mit Mittlerer Differenz der Serien 1 und 2*

Serie	Zuglasche	Außermitte Seite A [mm]	Außermitte Seite B [mm]	Differenz [mm]	Mittlere Differenz [mm]
Serie 1	5d_1	-1	-5	4	4,33
		+1	+6	5	
		-1	-4	3	
		+1	+4	3	
		-1	-11	10	
		+1	+2	1	
	7d_1	-1	-3	2	3,58
		+2	+7	5	
		0	-2	2	
		+1	+4	3	
		-1,5	-7	5,5	
		0	+4	4	
	7d_2	0	-3	3	4,50
		+2	+8	6	
		0	-2	2	
		0	+5	5	
		-2	-8	6	
		0	+5	5	
Serie 2	5d_1	-1	-4	3	3,17
		+1	+4	3	
		-1	-4	3	
		-1	+3	4	
		-2	-6	4	
		+1	+3	2	
	7d_1	+2	+7	5	3,75
		0	-1	1	
		+0,5	+5,5	5	
		-2	-6,5	4,5	
		-1	+2	3	
		-2	-6	4	

Tabelle 3-5 *Außermitten der hergestellten Bohrlöcher in den Zuglaschen mit Mittlerer Differenz der Serie 3*

Serie	Zuglasche	Außermitte Seite A [mm]	Außermitte Seite B [mm]	Differenz [mm]	Mittlere Differenz [mm]
Serie 3	5d_1	+2	+6,5	4,5	4
		+1	-1	2	
		+1	+7	6	
		-2	-7	5	
		-1	+1	2	
		-1	-5,5	4,5	
	7d_1	+1	-1	2	2,83
		+1	+6	5	
		+1	-1	2	
		-2	+1	3	
		-2	-4	2	
		-2	+1	3	
	7d_2	+1	-1	2	2,67
		+1	+4	3	
		+1	-1	2	
		-2	+1	3	
		-2	-6	4	
		-1	+1	2	

Da bei der Durchführung der Prüfungen in [67] und durch einseitiges Versagen die Laschen stark in Mitleidenschaft gezogen wurden, mussten mehrere Laschen für die Prüfungen gefertigt werden. Zu diesem Zeitpunkt ergab sich die Möglichkeit für die Vorbohrung für die Schraube mit einem Durchmesser von 8 mm und die Senkbohrung für die Unterlegscheibe von 50 mm bzw. für die Senkscheibe 45° Holz einen bi-axial einstellbaren Schraubstock in Kombination mit einer Ständerbohrmaschine zu nutzen. Dabei wurde der Winkel von $\alpha = 45^\circ$ und eine Neigung in Breitenrichtung von 7° angewendet. Dies führte letztendlich zu einem Schraubenachsabstand von $2,5 d$.


Abbildung 3-11 *Herstellung der Bohrungen der Zuglaschen mit Hilfe einer Ständerbohrmaschine und bi-axial einstellbaren Schraubstock aus [67]*

3-3 METHODEN

3-3.1 PRÜFAUFBAU/PRÜFABLAUF

3-3.1.1 Einzelversuche der Hirnholzanschlüsse

Sämtliche Einzelversuche wurden mit der Universalprüfmaschine lignum_uni_275 durchgeführt, die über eine maximale Prüfkraft von 275 kN auf Zug und Druck verfügt. Die Versuche für die Ermittlung der Referenzwerte der Ausziehfestigkeit wurden mit einer „Pull-Pull“-Prüfkonfiguration ausgeführt.

Vor der Prüfung wurde auf der Prüfschraube die Einschraubtiefe mit einem Stift markiert. Diese Einschraubtiefe ergab sich aus der Summe der Gewindelänge und der Einbindetiefe der Schraube. Anschließend wurde die Prüfschraube in die Vorbohrung bis zur Markierung eingedreht. Die Verankerungsschraube wurde anschließend an der gegenüberliegenden Seite in die Vorbohrung bis zur vorher aufgetragenen Markierung appliziert. Die Versuchskörper wurden danach über zwei Stahlschienen mit der Prüfmaschine verbunden. Hierbei wurde die Prüfschraube an der oberen Stahlschiene, welche gelenkig mit der Prüfmaschine verbunden ist, eingefädelt. (vgl. Abbildung 3-12) Die Verankerungsschraube wurde an der unteren Führungsschiene der Prüfmaschine eingefädelt.



Abbildung 3-12 Versuchsaufbau der Einzelversuche für die Referenzwerte der Ausziehfestigkeit der Hirnholzanschlüsse; links: Prüfkörper aus Birke welcher auf der Unterseite über die Verankerungsschraube mit der Führungsschiene und an der Oberseite über die Prüfschraube mit der gelenkig angebrachten Stahlschiene verbunden ist; rechts: Detailansicht der Verbindung über die gelenkig angebrachte Stahlschiene eines Prüfkörpers aus Buche

Die Prüfmaschine zog während des Prüfvorgangs solange an der oberen Stahlschiene an, bis es zu einem Versagen auf Ausziehen der Schraube kam. Der Prüfverlauf entsprach der ÖNORM EN 1382 [70]. Als Prüfgeschwindigkeit wurde 2 mm/min bei Buche und BauBuche und 1,6 mm/min bei Birke gewählt, damit ein Versagen innerhalb von 90 ± 30 sec auftrat. (vgl. Abbildung 3-13)

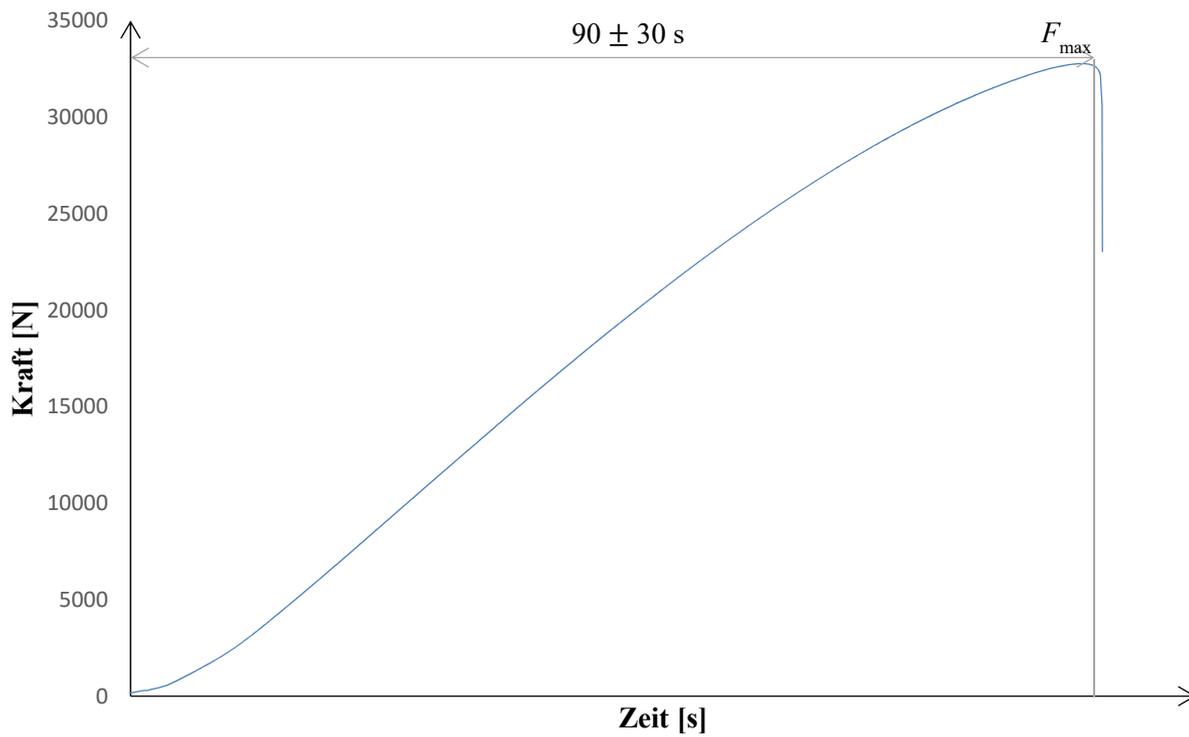


Abbildung 3-13 Exemplarischer Prüfablauf der Einzelversuche für die Referenzwerte der Ausziehfestigkeit der Hirnholzverbindungen anhand einer Prüfung mit Buche

Um zusätzlich zu den Referenzwerten der Ausziehfestigkeit auch noch Vergleichswerte für die Steifigkeit zu erhalten, wurden weitere Ausziehversuche mit Einzelschrauben durchgeführt. Hier wurde im Gegensatz zu den vorangegangenen Einzelversuchen an zwölf Prüfkörpern das Last-Verformungsverhalten der Schrauben analog zu den Gruppenprüfungen durch zwei aufgebraute induktive Wegaufnehmer zusätzlich gemessen. (vgl. Abbildung 3-14)



Abbildung 3-14 Versuchsaufbau der Referenzversuche für die Steifigkeit mit aufgebrauchten Wegaufnehmern

Der Prüfverlauf erfolgte über eine Belastung des Prüfkörpers bis 50 % der erwarteten Maximallast und einem Halten dieser Last für 30 Sekunden. Anschließend wurde der Prüfkörper für 30 Sekunden entlastet und abschließend wieder bis 50 % der erwarteten Maximallast belastet. (vgl. Abbildung 3-15)

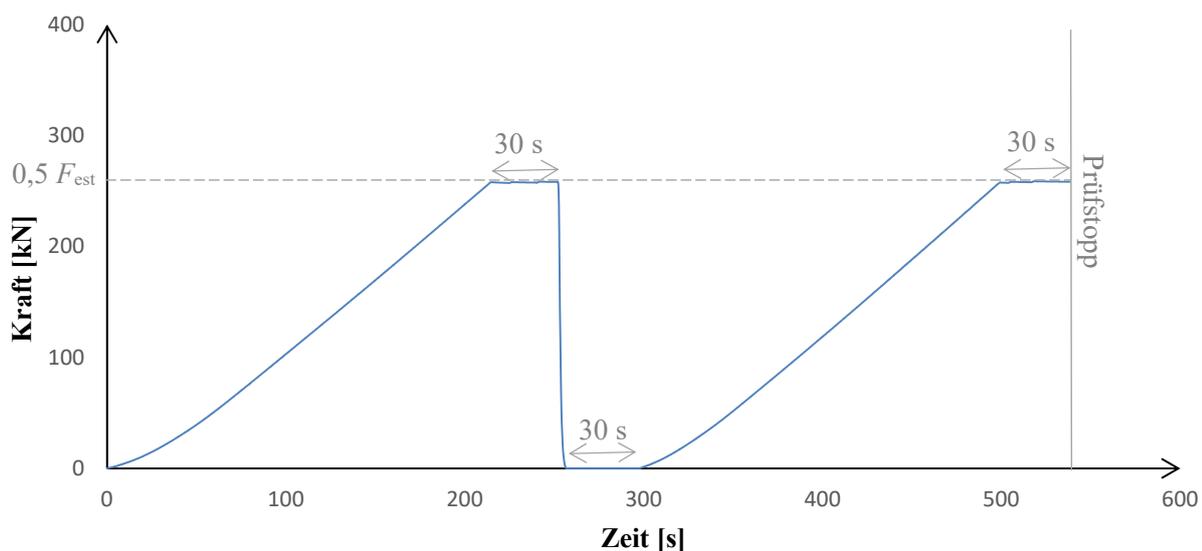


Abbildung 3-15 Exemplarischer Prüfverlauf der Einzelversuche für die Referenzwerte der Steifigkeit der Hirnholzverbindungen mit BauBuche

3-3.1.2 Gruppenversuche der Hirnholzanschlüsse

Sämtliche Gruppenversuche wurden mit der Zugprüfmaschine lignum_z_850 durchgeführt. Diese Maschine weist eine maximale Zugprüfkraft von 850 kN auf.

Beim Eindrehen der Schrauben wurde darauf geachtet, dass dies gemäß der in Abbildung 3-16 dargestellten Reihenfolge geschah. Dies hatte den Grund, um dem Holz eine gewisse Zeit zu geben die Spaltkräfte, welche durch das Eindrehen der Schrauben entstehen, abzubauen. Die Schrauben wurden mithilfe eines Akkuschraubers zunächst soweit eingedreht bis sie die Abstandshülsen (vgl. Abbildung 3-19) noch nicht ganz berührten, um sie anschließend mit einem Drehmomentschlüssel anzuziehen. Das Anzugsdrehmoment variierte dabei unter den Prüfserien. Bei den Versuchen in Birke kam es bei mehreren Prüfkörpern beim Anziehen der Schrauben zu einem Durchdrehen einzelner Schrauben. Bei einem Auftreten eines Durchdrehens wurde die Anzahl der Schrauben im Prüfprotokoll vermerkt. Bei der anschließenden Auswertung der Prüfergebnisse wurden diese Schrauben für die Tragfähigkeit der Verbindung vernachlässigt, da davon ausgegangen wurde, dass hier die Fasern bereits abgeschert waren, wie die bei Ausziehversagen geschieht.

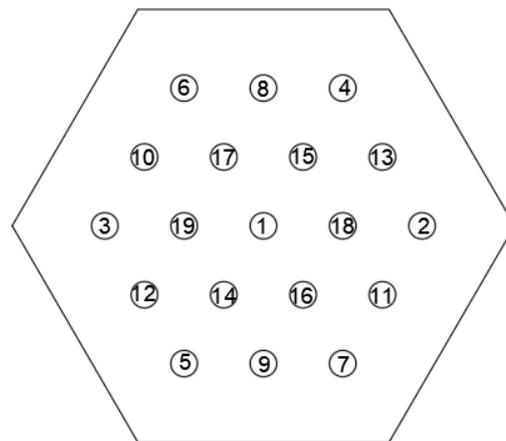


Abbildung 3-16 Querschnitt der Gruppenversuche der Hirnholzverbindungen in Buche und Birke mit Reihenfolge des Eindrehens der Schrauben

Der Versuchsaufbau wurde gleich wie bei den Gruppenversuchen in Koppauer [26] gewählt. Die Probekörper wurden beidseitig an Stahlplatten fixiert, welche wiederum über vier Gewindestangen an Zuglaschen angeschlossen sind. Damit keine Zwängungen während des Prüfungsvorganges auftreten und der Lasteintrag möglichst axial stattfinden konnte, waren die Zuglaschen doppelt gelenkig mit der Prüfmaschine verbunden. Diese Gelenkskette wurde beidseitig durch einen Zugstab mit zwei Gabelköpfen realisiert, welche jeweils ein horizontales und vertikales Gelenk sicherstellten. (vgl. Abbildung 3-17) Für die Auswertung der Steifigkeit der Verbindung (K_{ser}) wurden je Verbindung zwei induktive Wegaufnehmer an den Probekörpern angebracht. (vgl. Abbildung 3-18)

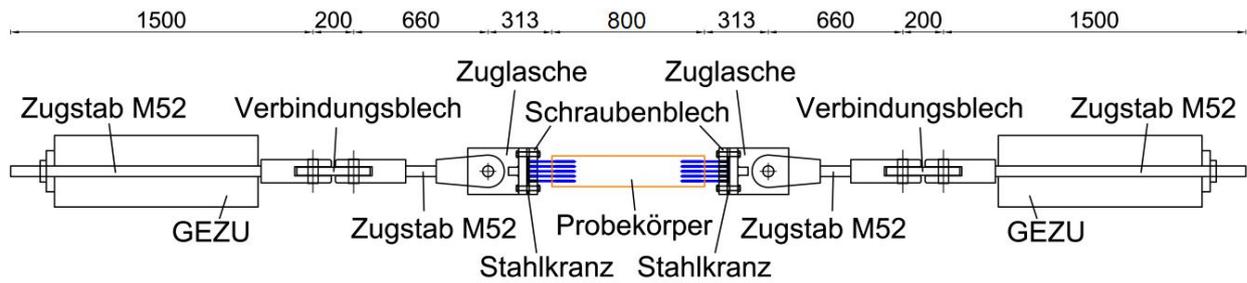


Abbildung 3-17 Versuchsaufbau der Gruppenversuche der Hirnholzverbindungen: Prüfkette

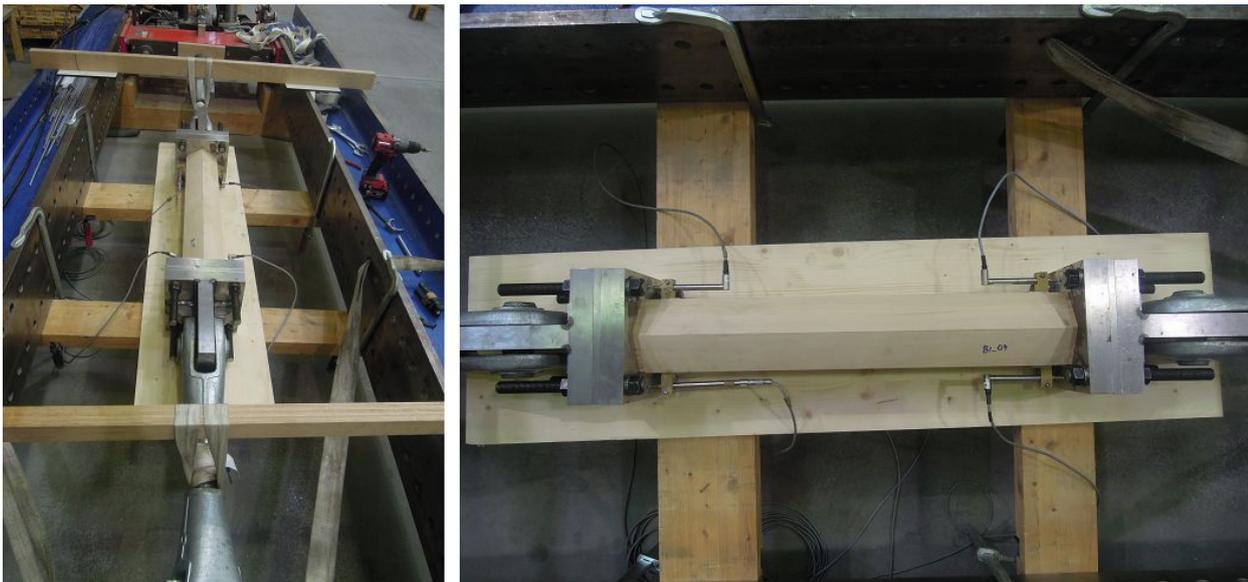


Abbildung 3-18 Versuchsaufbau der Gruppenversuche der Hirnholzverbindungen; links: Prüfkette; rechts: eingebauter Prüfkörper mit aufgebrauchten Wegaufnehmern



Abbildung 3-19 Links: Anziehen der Schrauben mit einem Drehmomentschlüssel; rechts: an einem Prüfkörper angebrachte Stahlplatte mit Distanzhülsen und eingedrehten Schrauben

Der Prüfablauf erfolgte wie in Abbildung 3-20 dargestellt in zwei Phasen. Die erste Phase der Prüfung stellte eine Belastung des Prüfkörpers auf 50 % der erwarteten Maximallast F_{est} für 30 Sekunden dar und eine anschließende komplette Entlastung für 30 Sekunden. In der zweiten Phase wurde die Prüflast wiederum auf 50 % der erwarteten Maximallast F_{est} erhöht und diese für 30 Sekunden gehalten. In dieser Zeit wurden die angebrachten Wegaufnehmer

von den Probekörpern entfernt und die Prüflast anschließend bis zum Versagen des Anschlusses erhöht. Die anvisierte Prüfzeit der Phase 2 belief sich in Anlehnung an die ON EN 26891 [71] auf $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$.

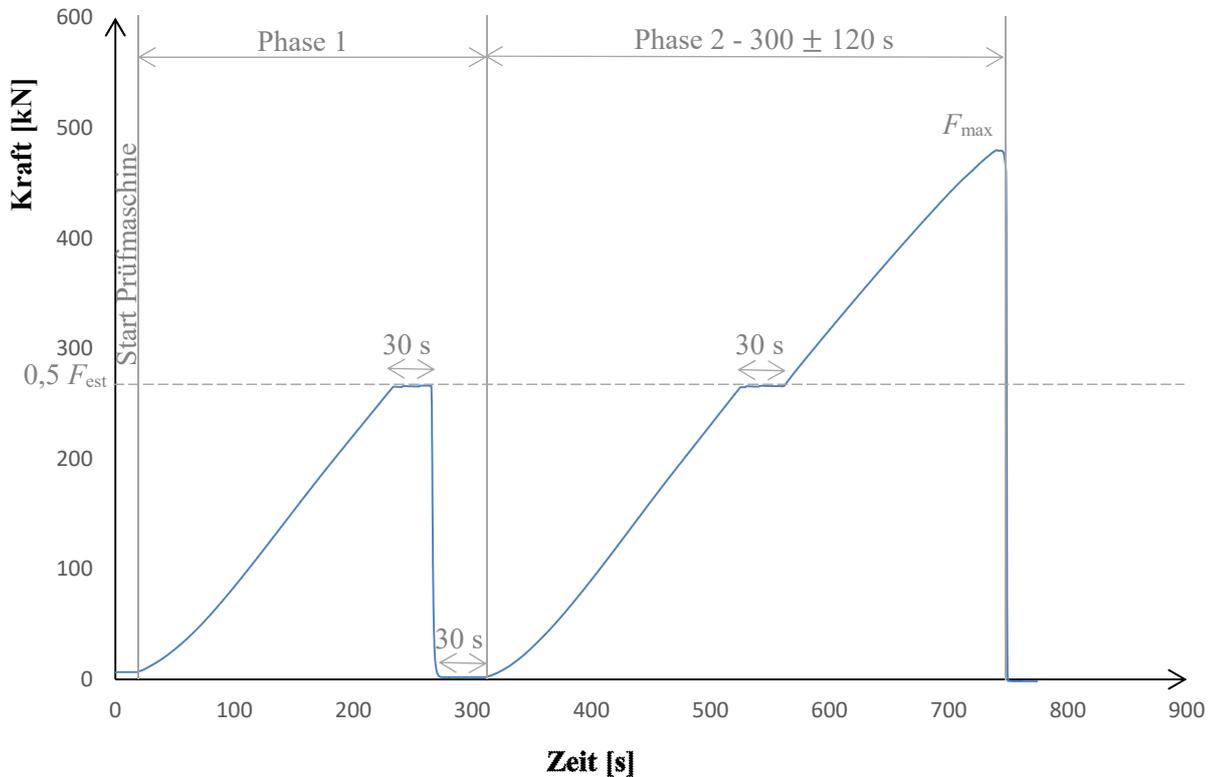


Abbildung 3-20 Exemplarischer Prüfablauf eines Gruppenversuches der Hirnholzverbindungen in BauBuche mit eingezeichneten anvisierten Zeitabschnitten

3-3.1.3 Geneigt angeordnete Schraubengruppen

In Abbildung 3-21 sind die wesentlichen Abmessungen und der Aufbau der untersuchten Zuglaschenstöße dargestellt. Der Verfasser dieser Arbeit war lediglich bei der Herstellung der in Abbildung 3-21 links dargestellten Prüfkongfiguration beteiligt.

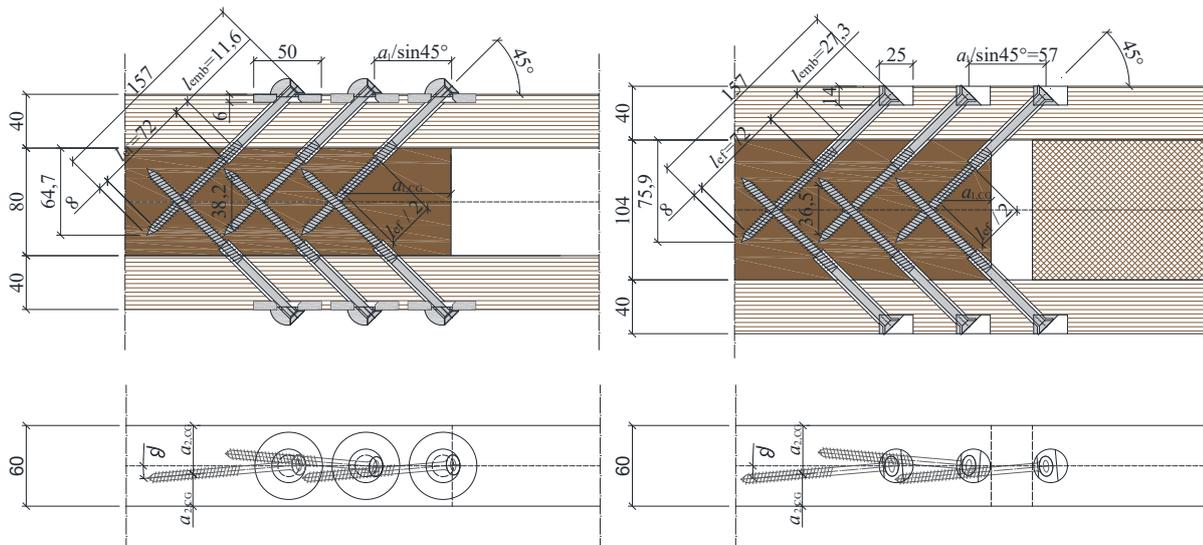


Abbildung 3-21 Abmessungen der Zuglaschenverbindungen für die Gruppenversuche; links: mit Senkscheibe 45° Stahl-Holz; rechts: mit Senkscheibe 45° Holz-Holz; aus [67]

Der Zuglaschenstoß wurde laut [67] hergestellt, indem die Schrauben bis auf 1 mm eingebracht und jeweils die drei Schrauben je Anschlussseite mit dem Drehmomentschlüssel und einem Drehmoment von 26 Nm gleichmäßig angezogen wurden. In Abbildung 3-22 ist ein hergestellter Zuglaschenstoß dargestellt. Im Zuge der Applikation der Schrauben kam es zu Relativverschiebungen zwischen den Laschen und Bauteilen zwischen 4 bis 12 mm. Diese Verschiebungen waren laut [67] bei den Versuchen in Buche weniger stark ausgeprägt.



Abbildung 3-22 Hergestellter Zuglaschenstoß ohne Abstandholz bestehend aus Mittelhölzern in Buche und Zuglaschen in BauBuche-Q mit Senkscheibe 45° Stahl-Holz aus [67]

Die Prüfungen wurden, wie in [67] erläutert, mit der Zugprüfmaschine lignum z 850 durchgeführt. Die fertiggestellten Zuglaschenstöße wurden in die Prüfmaschine eingeschoben und anschließend wurden diese mit einer Spannung von 2,1 N/mm² zwischen den Klemmböcken der Prüfmaschine geklemmt. Bei den ersten drei Serien a, b und c wurden anschließend die Wegaufnehmer an die BauBuchen-Q-Laschen befestigt und in Position gebracht. Die induktiven Wegaufnehmer zeichneten die Relativverschiebung der BauBuchen-Q-Lasche und der Mittelhölzern während der Prüfung auf. Jeweils ein Wegaufnehmer befand sich an der Seite Ost und einer an West. (vgl. Abbildung 3-23)

Die verwendete Länge der BauBuchen-Q-Laschen von 1 m führte zu einem relativ großen Abstand zwischen den Mittelhölzern. Deshalb kam es zu großen Biegeverformungen der Zuglaschen durch Eindrücken der Schraubenköpfe gegen den Bereich ohne Mittelholz zwischen den Zuglaschen. Deshalb wurde nach den Serien a, b und c ein

Abstandsholz zwischen den Zuglaschen angeordnet, um die Biegeverformungen zu reduzieren. Bei diesen Prüfungen konnte folglich keine Wegmessung durchgeführt werden.

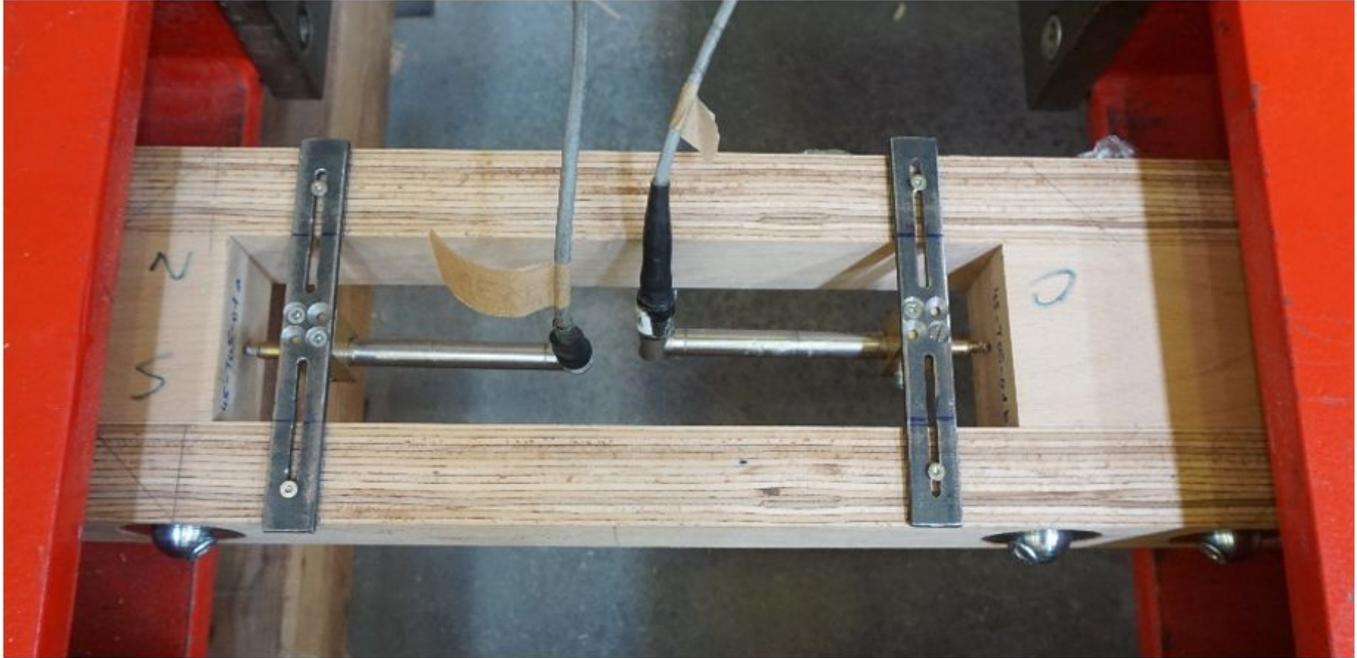


Abbildung 3-23 Eingebauter Zuglaschenstoß mit Mittelhölzern in Buche und aufgebrauchten Wegaufnehmern aus [67]

Der Prüfablauf erfolgte analog zu den Gruppenversuchen der Hirnholzverbindungen in zwei Phasen mit einer Erstbelastung bis 50 % der erwarteten Maximallast F_{est} , dem Halten der Belastung für 30 sec und einer anschließenden Entlastung. Danach wurde die Belastung wieder auf 50 % der erwarteten Maximallast F_{est} und für 30 sec gehalten. In dieser Zeit wurden die Wegaufnehmer entfernt, um sie bei einem möglichen spröden Versagen nicht zu beschädigen. Anschließend erfolgte die Laststeigerung bis zum Versagen des Anschlusses. (vgl. Abbildung 3-20)

3-3.2 VORBEMESSUNG

Die Vorbemessung hatte zum Ziel, die wesentlichen Randbedingungen der Versuche, insbesondere die Einschraublänge l_{ef} , so zu wählen, dass der maßgebende Versagensmechanismus das Ausziehen der Schraube darstellte und die Bedingungen in Gleichung (3.1) bei allen Prüferien erfüllt waren.

$$R_{ax,95} < F_{netto,k} \text{ und } R_{ax,95} < f_{tens,05,1} \quad (3.1)$$

Bei sämtlichen Berechnungen der Vorbemessung (Stahlzugtragfähigkeit f_{tens} , Auszieh Widerstand R_{ax} etc.) wurde $n_{ef} = n$ angenommen. Für die effektive Schraubenlänge l_{ef} wurde, wie bereits in Abschnitt 2-2.2 erläutert, berechnet indem von der nominalen applizierten Gewindelänge $1,0 d$ subtrahiert wurde.

Die erforderlichen mechanischen Eigenschaften des Holzes wurden aus vergangenen wissenschaftlichen Arbeiten oder aus technischen Bewertungen der Produkte übernommen. So wurde die charakteristische Zugfestigkeit in Faserrichtung der BauBuche nach Gleichung (3.2) (mit $h = 160$ mm) laut der europäisch technischen Bewertung ETA-14/0354 [5] berechnet. Die charakteristische Zugfestigkeit $f_{t,0,k,BB}$ der BauBuche ergibt sich danach zu $69,4$ N/mm².

$$f_{t,0,k,BB} = \left(\frac{600}{h}\right)^{0,1} \cdot 60 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3.2)$$

Die charakteristische Zugfestigkeit der Birke wurde aus den Ergebnissen von Jeitler et al. [72] übernommen. Hier wurden die mechanischen Eigenschaften von Brettschichtholzträgern aus Birke, welche eine vergleichbare mittlere Rohdichte von 614 kg/m^3 (vgl. Abschnitt 4-1.2 und Abschnitt 4-1.3) aufwiesen wie die in dieser Arbeit verwendeten Lamellen, von der Firma Hasslacher Norica Timber GmbH bestimmt. Die charakteristische Zugfestigkeit der Birke $f_{t,0,k,BI}$ wurde somit mit 26 N/mm^2 angenommen.

Die mittlere Zugfestigkeit der Buche wurde aus Frese [73] übernommen. Hier wurden die Festigkeitseigenschaften von Buchenvollholz untersucht und so eine mittlere Zugfestigkeit von $f_{t,0,mean,BU} = 50 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Dieser Mittelwert wurde ebenso von Koppauer [26] und Eckerstorfer [42] herangezogen. Hier wurden Versuche mit Buche des gleichen Herstellers und der gleichen Güte durchgeführt.

Die Umrechnung des mittleren Wertes auf die charakteristische Zugfestigkeit erfolgte vereinfacht durch Annahme einer Normalverteilung nach Gleichung (3.3). Hier wurde ein Variationskoeffizient $COV = 0,1$ angenommen.

$$f_{t,0,k} = f_{t,0,mean} \cdot (1 - 1,645 \cdot COV) \tag{3.3}$$

- $f_{t,0,mean}$ Mittelwert der Zugfestigkeit [N/mm^2]
- $f_{t,0,k}$ Bemessungswert [N/mm^2]
- COV Variationskoeffizient [-]

In Tabelle 3-6 sind die angenommenen Festigkeiten der Hölzer aufgelistet.

Tabelle 3-6 *Angenommene Zugfestigkeiten des Ausgangsmaterials der Prüfkörper aus Buch, Birke und BauBuche*

	$f_{t,0,k} [\text{N/mm}^2]$	$f_{t,0,50} [\text{N/mm}^2]$
Buche	41,8	50
Birke	26	-
BauBuche	68,5	-

3-3.2.1 Stahlzugtragfähigkeit f_{tens}

An den gelieferten Schrauben des Typs „RAPID® Hardwood Schrauben“ 8x240/100 der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH wurden an jeweils sechs Schrauben die Zugfestigkeit ermittelt. Diese Zugprüfungen wurden im Zuge einer parallel laufenden Arbeit gemäß ÖNORM EN 1383 [30] durchgeführt und deren Ergebnisse anschließend dem Verfasser dieser Arbeit übermittelt. Die Ergebnisse können dem Abschnitt 5-3 ANHANG D entnommen werden. Das 5 %-Quantil der Zugtragfähigkeit betrug bei den Prüfungen 35,84 kN für eine Einzelschraube.

$$f_{tens,05,1} = 35,84 \text{ kN}$$

$f_{tens,05,1}$ 5 %-Quantil der Zugtragfähigkeit einer Schraube [kN]

Für die Schraube der Zuglaschenstöße mit der Abmessungen 8x160/100 wird dieselbe Zugtragfähigkeit angenommen.

3-3.2.2 Auszieh Widerstand R_{ax}

Der Mittelwert bzw. das 5 %-Quantil des Auszieh Widerstandes R_{ax} berechnet sich aus der abgeschätzten Ausziehfestigkeit f_{ax} nach Gleichung (3.4) und Gleichung (3.5). Obwohl die Ausziehfestigkeit log-normalverteilt

angenommen wird, wurde für die Abschätzung des 95-%-Quantils von R_{ax} vereinfachend eine symmetrische Verteilung der Werte angenommen. (vgl. Gleichung (3.6))

Zur Abschätzung der Ausziehfestigkeit f_{ax} wurde das Modell nach Brandner et al. [31], welches in Abschnitt 2-4.3.3 vorgestellt wurde, benutzt. Dabei ist $k_{gap,mean} = 1,0 \mid k_{gap,05} = 1,0 \mid k_{sys,mean} = 1,0 \mid k_{sys,05} = 1,0 \mid k_p = 1,7$ einheitlich bei sämtlichen Berechnungen, da sämtliche Prüfkörper aus zerstreutporigen Laubhölzern bestehen. Die Werte für $k_{ax,mean}$ und $k_{ax,05}$ ergeben sich für die Hirnholzverbindungen mit $\alpha = 0^\circ$ zu 0,75 bzw. 0,70 und für die Zuglaschenverbindungen mit $\alpha = 45^\circ$ zu 1,0.

Die mittlere Rohdichte wurde bei Buche mit 741 kg/m^3 , bei BauBuche mit 800 kg/m^3 und bei Birke mit 617 kg/m^3 angenommen. Die charakteristische Rohdichte bei Buche mit 643 kg/m^3 , bei BauBuche mit 695 kg/m^3 und bei Birke mit 536 kg/m^3 . Diese Werte wurden bei Buche und Birke anhand der stichprobenartigen Messungen im Zuge des ersten Zuschnitts gemessen. (siehe Abschnitt 3-2.1) Die Rohdichte der BauBuche wurde anhand der Europäischen Technischen Bewertung ETA-14/0354 [5] angenommen.

$$R_{ax,mean} = f_{ax,mean} \cdot l_{ef} \cdot d \cdot \pi \quad (3.4)$$

$$R_{ax,05} = f_{ax,05} \cdot l_{ef} \cdot d \cdot \pi \quad (3.5)$$

$$R_{ax,95} \sim (R_{ax,mean} - R_{ax,05}) + R_{ax,mean} \quad (3.6)$$

$R_{ax,mean}$ Mittelwert der Ausziehtragfähigkeit einer Schraube [kN]
 $R_{ax,05}$ 5-%-Quantil der Ausziehtragfähigkeit einer Schraube [kN]
 $R_{ax,95}$ 95-%-Quantil der Ausziehtragfähigkeit einer Schraube [kN]
 l_{ef} effektive Gewindelänge der Schraube [mm]
 d Schraubendurchmesser [mm]

3-3.2.3 Einzelversuche an Hirnholzanschlüssen

Nettoquerschnittstragfähigkeit F_{netto}

Die Nettoquerschnittstragfähigkeit der Prüfkörper wurde nach Gleichung (3.7) berechnet.

$$F_{netto,k} = A_{netto} \cdot f_{t,0,k} = \left(a \cdot b - \frac{d_{VS}^2 \cdot \pi}{4} \right) \cdot f_{t,0,k} \quad (3.7)$$

$F_{netto,k}$ charakteristische Nettoquerschnittstragfähigkeit [kN]
 A_{netto} Nettoquerschnitt [mm²]
 $f_{t,0,k}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit der Prüfkörper [N/mm²]
 a Höhe des Querschnitts der Prüfkörper [mm]
 b Breite des Querschnitts der Prüfkörper [mm]
 d_{VS} Nenndurchmesser der Verankerungsschraube [mm]

Die maßgebende Stelle der Bemessung für die Nettoquerschnittstragfähigkeit ist jener an der Verankerungsschraube. (siehe Abschnitt 3-3.1.1) Hier wurden Schrauben mit einem Nenndurchmesser von 12 mm verwendet. Der Querschnittsaufbau der einzelnen Prüfkörper ist in Abschnitt 3-3.1.1 erläutert. Die Ergebnisse der Vorbemessung der Nettoquerschnittstragfähigkeit sind in Tabelle 3-7 nochmals aufgelistet.

Tabelle 3-7 Ergebnisse der Vorbemessung der Nettoquerschnittstragfähigkeit der Einzelversuche der Hirnholzverbindungen

	Buche	Birke	BauBuche
d_{VS} [mm]		12	
a [mm]	78	78	125
b [mm]	140	80	80
A_{brutto} [mm ²]	6240	6240	10920
A_{netto} [mm ²]	6127	6127	10807
$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	41,8	26	68,5
$F_{netto,k}$ [kN]	256	257	750

Auszieh widerstand R_{ax}

In Tabelle 3-8 sind die Ergebnisse die wesentlichen Parameter und die damit verbundenen Auszieh widerstände nach den Gleichungen (3.4), (3.5) und (3.6) für die Einzelversuche der Hirnholzverschraubungen aufgelistet. Damit der maßgebende Versagensmechanismus bei den Versuchen mit BauBuche das Herausziehen der Schraube und nicht der Schraubenbruch laut Vorbemessung darstellt, musste die effektive Schraubenlänge von 92 mm auf 80 mm verringert werden.

Tabelle 3-8 Ergebnisse der Vorbemessung des Auszieh widerstands für die Einzelversuche der Hirnholzverschraubungen

	Buche	Birke	BauBuche
l_{ef} [mm]	92	92	80
d [mm]		8	
α [°]		0	
$f_{ax,mean}$ [N/mm ²]	11,99	8,79	13,66
$f_{ax,05}$ [N/mm ²]	8,99	6,58	10,24
$R_{ax,mean}$ [kN]	27,7	20,3	27,5
$R_{ax,05}$ [kN]	20,8	15,2	20,6
$R_{ax,95}$ [kN]	34,7	25,4	34,4

Ergebnisse der Vorbemessung

Die Ergebnisse der Vorbemessung sind in Tabelle 3-9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Prüfkonfiguration so ausgelegt wurde, dass laut Vorbemessung der maßgebende Versagensmechanismus das Herausziehen der Schrauben aus den Prüfkörpern ist.

Tabelle 3-9 Ergebnisse der Vorbemessung der Einzelversuche der Hirnholzverbindungen

	Buche	Birke	BauBuche
$f_{tens,05,1}$ [kN]		35,8	
$F_{netto,k}$ [kN]	256	257	750
$R_{ax,95}$ [kN]	34,7	25,4	34,4

3-3.2.4 Gruppenversuche der Hirnholzanschlüsse

Auszieh widerstand R_{ax}

Im Zuge der Referenzversuche mit der Einzelschraube wurden die Auszieh widerstände für eine faserparallele Verschraubung in den bereitgestellten Ausgangsmaterialien Buche, Birke und BauBuche festgestellt und waren bei der Vorbemessung der Gruppenprüfungen bereits verfügbar. Daraus lässt sich mit Gleichung (3.8) die Ausziehtragfähigkeit der Schraubengruppe der Prüferien in Buche und Birke berechnen. Zu beachten ist, dass die Einzelversuche in BauBuche mit einer verminderten effektiven Gewindelänge durchgeführt wurden, weshalb die Ausziehtragfähigkeit der Schraubengruppe in BauBuche mit Gleichung (3.9) zu berechnen ist.

$$R_{ax,mean,n} = R_{ax,mean,1} \cdot n \quad (3.8)$$

$$R_{ax,mean,n} = R_{ax,mean,1} \cdot n \cdot \frac{l_{ef,n}}{l_{ef,1}} \quad (3.9)$$

- $R_{ax,mean,n}$ Ausziehtragfähigkeit der Schraubengruppe [kN]
 $R_{ax,mean,1}$ Ausziehtragfähigkeit einer Schraube [kN]
 n Anzahl der Schrauben [-]
 $l_{ef,n}$ effektive Gewindelänge des Gruppenversuches [mm]
 $l_{ef,1}$ effektive Gewindelänge der Einzelversuche [mm]

In Tabelle 3-10 sind die Ergebnisse die wesentlichen Parameter und die damit verbundenen Auszieh widerstände nach den Gleichungen (3.8) und (3.9) für die Gruppenversuche der Hirnholzverschraubungen aufgelistet.

Tabelle 3-10 Ergebnisse der Vorbemessung des Auszieh widerstands für die Gruppenversuche der Hirnholzverschraubungen

	BU_01	BI_01 & BI_02	BB_01 & BB_02
$l_{ef,1}$ [mm]	92	92	80
$l_{ef,n}$ [mm]	92		
n [-]	19		
$R_{ax,mean,1}$ [kN]	28,7	15,3	26,4
$R_{ax,mean,n}$ [kN]	545	291	577

Nettoquerschnittstragfähigkeit F_{netto}

Die Nettoquerschnittstragfähigkeit des Prüfkörpers wurde nach Gleichung (3.10) berechnet. Die Abmessungen der Querschnitte sind in Abschnitt 3-3.1.2 erläutert. Die Ergebnisse der Vorbemessung der Nettoquerschnittstragfähigkeit sind in Tabelle 3-11 für jede Prüferie aufgelistet.

$$F_{netto} = A_{netto} \cdot f_{t,0,k} \quad (3.10)$$

- F_{netto} Nettoquerschnittstragfähigkeit [kN]
 A_{netto} Nettoquerschnitt [mm²]
 $f_{t,0,k}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit [N/mm²]

Tabelle 3-11 Ergebnisse der Vorbemessung der Nettoquerschnittstragfähigkeit der Gruppenversuche der Hirnholzverbindungen

	BU_01	BI_01 & BI_02	BB_01 & BB_02
A_{netto} [mm ²]	14093	14093	17329
$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	41,8	26	68,5
$F_{netto,k}$ [kN]	589	366	1187

Stahlzugtragfähigkeit der Schrauben F_S

Das 5 %-Quantil der Stahlzugtragfähigkeit der Schraubengruppe wurde nach Gleichung (3.11) berechnet.

$$F_{S,05} = f_{tens,05,1} \cdot n = 35,84 \text{ kN} \cdot 19 = 684 \text{ kN} \quad (3.11)$$

Ergebnisse der Vorbemessung

Die Ergebnisse der Vorbemessung sind in Tabelle 3-12 dargestellt. Es werden hier die mittleren Auszieh Widerstände den 5 %-Quantilwerten bzw. den charakteristischen Werten der Querschnitts- und Stahlzugtragfähigkeiten gegenübergestellt, da dies als Einschätzung für die zu erwartenden Versagensmechanismen erfolgte. Es ist zu erkennen, dass die Prüfkongfiguration so ausgelegt wurde, dass laut Vorbemessung der maßgebende Versagensmechanismus das Herausziehen der Schrauben aus den Prüfkörpern ist. Zusätzlich wurden die Wirkungsgrade η aus dem mittleren Auszieh Widerstand bezogen auf den charakteristischen Brutto- und Nettoquerschnitt für jede Serie berechnet.

Tabelle 3-12 Ergebnisse der Vorbemessung der Gruppenversuche der Hirnholzverbindungen mit den Ausnutzungsgraden der Verbindungen laut Vorbemessung

Prüfserie	d [mm]	l_{ef} [mm]	l_{emb} [mm]	n [-]	$F_{s,05}$ [kN]	$R_{ax,mean}$ [kN]	$F_{netto,k}$ [kN]	$F_{brutto,k}$ [kN]	η_{brutto} [-]	η_{netto} [-]
BU_01	8	92	40 72 88	19	684	545	589	629	0,87	0,93
BI_01	8	92	80	19	684	291	366	391	0,74	0,80
BI_02	8	92	40	19	684	291	366	391	0,74	0,80
BB_01	8	92	88	19	684	577	1187	1252	0,46	0,49
BB_02	8	92	88	19	684	577	1187	1252	0,46	0,49

3-3.2.5 Geneigt angeordnete Schraubengruppen

Diese Versuche wurden an Zuglaschenstößen durchgeführt, bei welchen die Zuglaschen aus BauBuche Platte Q bestehen und die Bauteile aus Birke bzw. Buche. (vgl. Abbildung 3-21). Pro Scherfuge werden dabei jeweils drei Schrauben mit einer effektiven Gewindelänge von 72 mm angeordnet.

Auszieh Widerstand R_{ax}

Der Mittelwert des Auszieh Widerstandes R_{ax} berechnet sich aus der Ausziehfestigkeit f_{ax} in Gleichung (3.12) nach dem Model von Brandner et al. [31], welches in Abschnitt 2-4.3.3 vorgestellt wurde, das 5-%-Quantil in Gleichung (3.13) nach Brandner [34]. Für die Abschätzung des 95-%-Quantil von R_{ax} wurden die Prüfergebnisse aus den

Referenzversuchen mit der Einzelschraube in Buche und Birke mit einem Achs-Faser-Winkel von 45° herangezogen. In Tabelle 3-13 sind die Ergebnisse der Vorbemessung des Ausziehwerstandes aufgelistet.

$$R_{ax,mean} = f_{ax,mean} \cdot l_{ef} \cdot d \cdot \pi = 0,00042 \cdot l_{ef} \cdot d^{0,67} \cdot \pi \cdot \rho_{mean}^{1,7} \quad (3.12)$$

$$R_{ax,05} = f_{ax,05} \cdot l_{ef} \cdot d \cdot \pi = 0,0007 \cdot l_{ef} \cdot d^{0,67} \cdot \pi \cdot \rho_{05}^{1,6} \quad (3.13)$$

$$R_{ax,95} = f_{ax,95,Referenz} \cdot l_{ef} \cdot d \cdot \pi \quad (3.14)$$

$R_{ax,mean}$	Mittelwert der Ausziehtragfähigkeit einer Schraube [kN]
$R_{ax,05}$	5-%-Quantil der Ausziehtragfähigkeit einer Schraube [kN]
$R_{ax,95}$	95-%-Quantil der Ausziehtragfähigkeit einer Schraube [kN]
$f_{ax,95,Referenz}$..	95-%-Quantil der Ausziehtragfestigkeit der Referenzversuche [N/mm ²]
l_{ef}	effektive Gewindelänge der Schraube [mm]
d	Schraubendurchmesser [mm]

Tabelle 3-13 Ergebnisse der Vorbemessung des Ausziehwerstandes mit $l_{ef} = 72 \text{ mm}$ und $d = 8 \text{ mm}$

	ρ_{mean} [kg/m ³]	ρ_{05} [kg/m ³]	$R_{ax,mean}$ [kN]	$R_{ax,05}$ [kN]	$R_{ax,95}$ [kN]
Buche	722	667	27,7	21,0	31,0
Birke	610	566	20,8	16,2	23,4

Querdruckfestigkeit unter der Unterlegscheibe

Der Widerstand des äußeren Laschen gegen die angespressten Unterlegscheiben wurde zunächst in Anlehnung an den charakteristischen Kopfdurchziehparameter $f_{head,k}$ und mit Hilfe der in Hübner [12] angegebenen Querdruckfestigkeit $f_{c,90,k} = 7,2 \text{ N/mm}^2$ für Brettschichtholz aus Buche berechnet. Dieser Wert wurde einerseits mit den Faktoren $k_{c,90} = 1,5$ für beidseitiges Vorholz und $k_{c,90,l}$ multipliziert.

$$f_{head,k} = f_{c,90,k} \cdot k_{c,90} \cdot k_{c,90,l} = 7,2 \cdot 1,5 \cdot 1,32 = 14,2 \text{ N/mm}^2 \quad (3.15)$$

$$k_{c,90,l} = \left(\frac{150}{l}\right)^{0,25} = 1,32 \quad (3.16)$$

$f_{head,k}$	charakteristischer Kopfdurchziehparameter [N/mm ²]
$f_{c,90,k}$	charakteristische Querdruckfestigkeit [N/mm ²]
$k_{c,90,l}$	Beiwert zur Berücksichtigung der Länge der Lasteinleitung [-]
l	Länge der Lasteinleitung [mm], vereinfacht mit 50 mm angenommen

Bei der Vorbemessung wurde nun darauf geachtet, dass vor einem diesem möglichen Versagen bereits ein Herausziehen der Schraube auftreten sollte. Die charakteristische Rohdichte wurde von der allgemeinen Bauartgenehmigung Z-9.1-838 [18] übernommen.

$$R_{ax,95} \cdot \sin \alpha \leq f_{head,k} \cdot d_n^2 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)^{0,8} \quad (3.17)$$

$$31,0 \cdot \sin 45 = 21,9 \text{ kN} \leq 14,2 \cdot 50^2 \cdot \left(\frac{672}{350}\right)^{0,8} = 60,0 \text{ kN} \quad (3.18)$$

Lochleibung

Die Spannung, die sich aus dem horizontalen Kraftanteil auf der Vorholzfläche zwischen zwei Unterlegscheiben ergibt, wird als konstant angenommen. Der horizontale Kraftanteil des 95 %-Quantils der Ausziehtragfähigkeit wird um den Reibanteil mit $\mu = 0,25$ abgemindert.

$$\frac{R_{ax,95} \cdot (\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha)}{A} = \frac{31,0 \cdot 10^3 \cdot (\cos 45 - 0,25 \cdot \sin 45)}{57 \cdot 50 + 2 \cdot 57 \cdot 6 - \frac{50^2 \cdot \pi}{4}} = 9,3 \text{ N/mm}^2 \quad (3.19)$$

Laut dem Hersteller [18] wird die charakteristische Schubfestigkeit als hochkant Element $f_{v,0,edge,k} = 7,8 \text{ N/mm}^2$ um den Faktor 1,22 überschritten.

Eine weitere Abschätzung der Lochleibungstragfähigkeit wird über die Formel aus der ÖNORM EN 1995-1-1 [6] für Bolzen durchgeführt.

$$F_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \cdot d \cdot t = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot 50) \cdot 730 \cdot 50 \cdot 6 = 9,0 \text{ kN} \quad (3.20)$$

Auch hier wird die Tragfähigkeit weit überschritten.

Aufgrund von Vorversuchen wurde der Widerstand der Laschen jedoch als ausreichend befunden.

Nettoquerschnittstragfähigkeit

Die maximale Beanspruchung ergibt sich für sechs Schrauben nach Gleichung (3.1). Es wird hierbei ein Reibungsbeiwert zwischen den Zuglaschen und dem Bauteil von 0,25 angenommen.

$$F_{max} = n \cdot R_{ax,95} \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha) = 164,4 \text{ kN} \quad (3.1)$$

Die maximalen Zugspannungen in den Zuglaschen aus BauBuche Platte Q in Kombination mit der Senkscheibe 45° Stahl-Holz ergeben sich nach Gleichung (3.22) und jener in Kombination mit der Senkscheibe 45° Holz-Holz nach Gleichung (3.23)

$$\frac{F_{max}}{2 \cdot A_{netto}} = \frac{164,4 \cdot 10^3}{2 \cdot (40 \cdot 60 - 50 \cdot 6 - 10 \cdot 34)} = 46,7 \text{ N/mm}^2 \quad (3.22)$$

$$\frac{F_{max}}{2 \cdot A_{netto}} = \frac{164,4 \cdot 10^3}{2 \cdot (40 \cdot 60 - 25 \cdot 6 - 10 \cdot 26)} = 45,6 \text{ N/mm}^2 \quad (3.23)$$

Laut dem Hersteller [18] ist die charakteristische Zugfestigkeit mit 49 N/mm^2 ausreichend.

Die maximalen Zugspannungen im Zugholz aus Buche berechnen sich nach Gleichung (3.24).

$$\frac{F_{max}}{A_{netto}} = \frac{164,4 \cdot 10^3}{80 \cdot 60 - 8 \cdot 80} = 39,5 \text{ N/mm}^2 \quad (3.24)$$

Die mittlere Zugfestigkeit für die sehr homogenen Buchenhölzer wurde mit 44 N/mm^2 für den charakteristischen Wert einer Festigkeitsklasse von GL55h laut [74] angenommen.

Analog zur Berechnung der Zugspannungen im Zugholz Buche erfolgt die Berechnung für Birke nach Gleichung (3.25).

$$\frac{n \cdot R_{ax,95,BI} \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha)}{A_{netto}} = \frac{6 \cdot 23,4 \cdot 10^3 \cdot (\cos 45 + 0,25 \cdot \sin 45)}{80 \cdot 60 - 8 \cdot 80} = 29,8 \text{ N/mm}^2 \quad (3.25)$$

Die charakteristische Zugfestigkeit von Birke liegt laut [72] bei $f_{t,0,k} = 26 \text{ N/mm}^2$ und somit um 15 % darunter. Da beim Zuschnitt der Prüfkörper schwächende Holzmerkmale entfernt wurden, wird die charakteristische

Zugfestigkeit höher eingeschätzt. Aus diesem Grund und um die Ergebnisse der Birke mit jenen in Buche vergleichen zu können, wurde die effektive Gewindelänge nicht reduziert.

Schubbeanspruchung im Bereich der Klemmung

Die resultierende Schubspannung wird wie folgt berechnet und die Tragfähigkeit nachgewiesen.

Mittelholz Buche

$$\frac{F_{max}/2}{A_{klemm}} = \frac{164,4 \cdot 10^3 / 2}{80 \cdot 315} = 3,3 \text{ N/mm}^2 \quad (3.26)$$

Ehrhart [74] gibt die charakteristische Schubfestigkeit mit $f_{v,k} = 6,0 \text{ N/mm}^2$ für Brettschichtholz aus Buche an.

Mittelholz Birke

$$\frac{F_{max}/2}{A_{klemm}} = \frac{124,1 \cdot 10^3 / 2}{80 \cdot 315} = 2,5 \text{ N/mm}^2 \quad (3.27)$$

Die charakteristische Schubfestigkeit der Prüfkörper aus Birke wird ebenfalls von Jeitler et al. [72] mit $f_{v,k} = 4,5 \text{ N/mm}^2$ übernommen.

3-3.3 AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE

3-3.3.1 Bestimmung der Rohdichte

Die Rohdichte wurde mit Hilfe von Gleichung (3.28) berechnet. Hierfür wurde nach den Versuchen aus jedem Prüfkörper ein Teil ausgeschnitten, mit einer Standwaage gewogen und mit einem Messschieber abgemessen.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{b \cdot l \cdot h} \quad (3.28)$$

ρRohdichte [kg/m^3]
 mMasse des Prüfkörpers [kg]
 VVolumen des Prüfkörpers [m^3]
 bBreite des Prüfkörpers [m]
 lLänge des Prüfkörpers [m]
 hHöhe des Prüfkörpers [m]

Diese Rohdichte wurde anschließend mit Gleichung (3.29) auf eine Referenzfeuchte von 12 % nach ÖNORM EN 384 [75] korrigiert.

$$\rho_{12} = \rho \cdot (1 - 0,005 \cdot (u - 12)) \quad (3.29)$$

ρRohdichte [kg/m^3]
 ρ_{12} korrigierte Rohdichte [kg/m^3]
 uHolzfeuchte bei Prüfungsdurchführung [%]

3-3.3.2 Bestimmung der Holzfeuchte

Die Holzfeuchte wurde mit Hilfe der Darrmethode nach ÖNORM EN 13183 [76] für alle Prüfkörper ermittelt. Hierzu wurden nach den Prüfungen in der Nähe des Versagensbereiches Darrproben entnommen und diese nach erstmaligen Wiegen in einem Darrschrank getrocknet. Nach dem Trocknungsvorgang wurde die Darrprobe abermals gewogen, um anschließend mit Hilfe von Gleichung (3.30) die Holzfeuchte zu berechnen.

$$u = \frac{m_w}{m_0} = \frac{m_u - m_0}{m_0} \quad (3.30)$$

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

3-3.3.3 Bestimmung des Verschiebungsmoduls

Die Kenngröße K_{ser} gibt die Steigung der Kraft-Weg-Beziehung im linear-elastischen Bereich an und lässt sich mittels Gleichung (3.31) ermitteln. Der Weg wurde im Zuge der Versuchsdurchführung durch die vier induktiven Wegaufnehmer, welche an den Prüfkörpern der Gruppenversuche angebracht wurden, aufgenommen. Hierbei wurden die Werte jener zwei Wegaufnehmer auf derselben Prüfseite (Ost oder West) gemittelt. Dadurch ergeben sich für die zwei Verbindungen (Ost und West) zwei unabhängige Werte für den Verschiebungsmodul K_{ser} . Bei den Referenzversuchen der Steifigkeit erfolgte die Wegaufnahme durch zwei induktive Wegaufnehmer.

Die Ermittlung von K_{ser} erfolgt mittels einer Regressionsanalyse in einem Bereich zwischen 10 % und 40 % der Maximalkraft. Dabei musste für die lineare Regression eine Korrelation von $\geq 0,999$ resultieren.

$$K_{ser} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{\Delta F}{\Delta w} = \frac{F_2 - F_1}{w_2 - w_1} \quad (3.31)$$

K_{ser} Verschiebungsmodul [kN/mm]
 F Kraft [kN]
 w Weg der Schraubengruppe [mm]

3-3.3.4 Bestimmung der effektiven Verbindungsmittellanzahl

Die effektive Verbindungsmittellanzahl der Gruppenversuche wurde nach Gleichung (3.32) und Gleichung (3.33) ermittelt. Hier wurde der Mittelwert der Ausziehtragfähigkeit der Schraubengruppe durch den Mittelwert der Ausziehtragfähigkeit der Referenzversuche für eine Schraube dividiert. Bei der Berechnung wurden die geringen Rohdichteunterschiede mit Hilfe des Verhältnisfaktors nach Brandner [34] (vgl. Abschnitt 2-4.3.3) berücksichtigt.

$$n_{ef} = \frac{R_{ax,mean,n}}{R_{ax,mean,1}} \cdot \frac{1}{k_\rho} \quad (3.32)$$

$$k_\rho = \left(\frac{\rho_{12,mean,Gruppe}}{\rho_{12,mean,Einzel}} \right)^{1,6} \quad (3.33)$$

$R_{ax,mean,n}$ Ausziehtragfähigkeit der Schraubengruppe [kN]
 $R_{ax,mean,1}$ Ausziehtragfähigkeit einer Schraube [kN]
 n_{ef} effektive Anzahl der Schrauben [-]
 k_ρ Verhältnisfaktor nach Brandner [34] zur Berücksichtigung der Rohdichteunterschiede [-];

3-3.3.5 Vergleichswert für den Verschiebungsmodul K_{ser}

Die ETA-12/0373 [21] gibt einen Rechenwert des Verschiebungsmoduls K_{ser} für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis an. Dieser kann nach Gleichung (3.34) berechnet werden.

$$K_{ser} = 30 \cdot d \cdot l_{ef} = 30 \cdot 8 \cdot 92 = 22,1 \text{ in kN/mm für Laubholz} \quad (3.34)$$

d Gewindeaußendurchmesser der Schraube [mm]
 l_{ef} effektive Länge des Schraubengewindes im Holzbauteil [mm]

3-3.3.6 Statistische Kennwerte

Bei der Berechnung der statistischen Kennwerte für die Rohdichte und Holzfeuchte wird eine Normalverteilung angenommen und der Mittelwert, der Variationskoeffizient und der charakteristische Wert gemäß ÖNORM EN 14358 [77] berechnet.

Beim Widerstand und der Steifigkeit wird von einer Lognormalverteilung ausgegangen. Der charakteristische Wert, der Mittelwert und der Variationskoeffizient wird gemäß ÖNORM EN 14358 [77] berechnet.

3-3.3.7 Auswertung der Gruppenversuche

Die Auswertung der Gruppenversuche unterscheidet sich im Vergleich zu jener der Einzelversuche in mehreren Hinsichten. Auf diese Aspekte soll hier kurz eingegangen werden.

Rechtszensierte Daten

Bedingt durch den Versuchsaufbau, welcher aus einem Prüfkörper besteht, welcher an zwei Seiten mittels der zu untersuchenden Verbindung mit der Prüfmaschine verbunden ist, wird bei dem Prüfvorgang nicht nur eine Verbindung geprüft, sondern zwei idente Verbindungen (Ost und West). Da bei sämtlichen Prüfungen immer nur eine Verbindung versagte, handelt es sich bei den maximalen Kräften F_{\max} für die nicht versagte Verbindung um rechtszensierte Daten. Das bedeutet, dass davon auszugehen ist, dass jene Verbindung, welche bei der Prüfung nicht versagte, einen höheren Wert als den beobachteten Prüfwert F_{\max} der versagten Verbindung erreicht hätte. Daraus ist zu schließen, dass die Verteilung der Tragfähigkeiten der geprüften Verbindungen für eine einzelne Verbindung nicht mit jener des geprüften seriellen Systems aus zwei Verbindungen übereinstimmt sondern im Mittel etwas höher liegt und folglich auch weitere Kenngrößen der Verteilung entsprechend anzupassen sind.

Die Schätzung von Kenngrößen der Verteilung der Tragfähigkeiten einer Verbindung auf Basis der Tragfähigkeiten, ermittelt an einem seriellen System aus zwei Verbindungen, erfolgte mit Hilfe der Maximum-Likelihood Methode für rechts-zensierte Daten. Da beide Verbindungen im selben Prüfkörper verankert wurden und aus der Literatur bekannt ist, dass räumliche Abhängigkeiten von Kenngrößen im Holz durch sogenannte hierarchische Modelle in Verbindung mit einer Äquikorrelation beschrieben werden können, galt es zudem in der Bewertung der Daten auch diese Abhängigkeit zu berücksichtigen, welche allerdings auf Basis früherer Daten abgeschätzt wurde. In der Bewertung wurden somit folgende Annahmen getroffen:

- serielles System aus zwei Verbindungen;
- für die Tragfähigkeiten je Verbindung wird eine Lognormalverteilung angenommen;
- Auf Basis von [78] wird eine Äquikorrelation = 0,7 angesetzt.

Bestimmung des Verschiebungsmoduls

Bei der Auswertung der Verschiebungsmodule trat bei den Gruppenversuchen das Problem auf, dass für die Kraft-Weg-Beziehungen aller Serien, ausgenommen BI_01, kein Bereich zwischen 10 % und 40 % der Maximallast gefunden werden konnte, bei welchem ein linearer Zusammenhang zwischen Kraft und Weg gegeben war.

Bei der Analyse der Kraft-Weg-Diagramme fiel anschließend ein Knick in den Graphen dieser Beziehung auf. Dieser Knick variierte bei den Versuchen mit Buche zwischen 170 kN und 190 kN Prüflast, bei der Prüfserie BB_01 zwischen 140 kN und 160 kN und bei der Prüfserie BI_01 zwischen 20 kN und 40 kN. (vgl. Abbildung 3-24)

Dadurch entsteht ein erheblicher Unterschied der Steifigkeit der Verbindung vor bzw. nach dem Knick. In Tabelle 3-14 sind die unterschiedlichen Steigungen der Kraft-Weg-Beziehungen vor und nach dem Knick für jeweils einen Prüfkörper der Serien BU_01, BI_01 und BB_01 dargestellt. Es ergibt sich so ein Unterschied von bis zu 600 % zwischen der Anfangssteifigkeit und der Steifigkeit nach dem Knick.

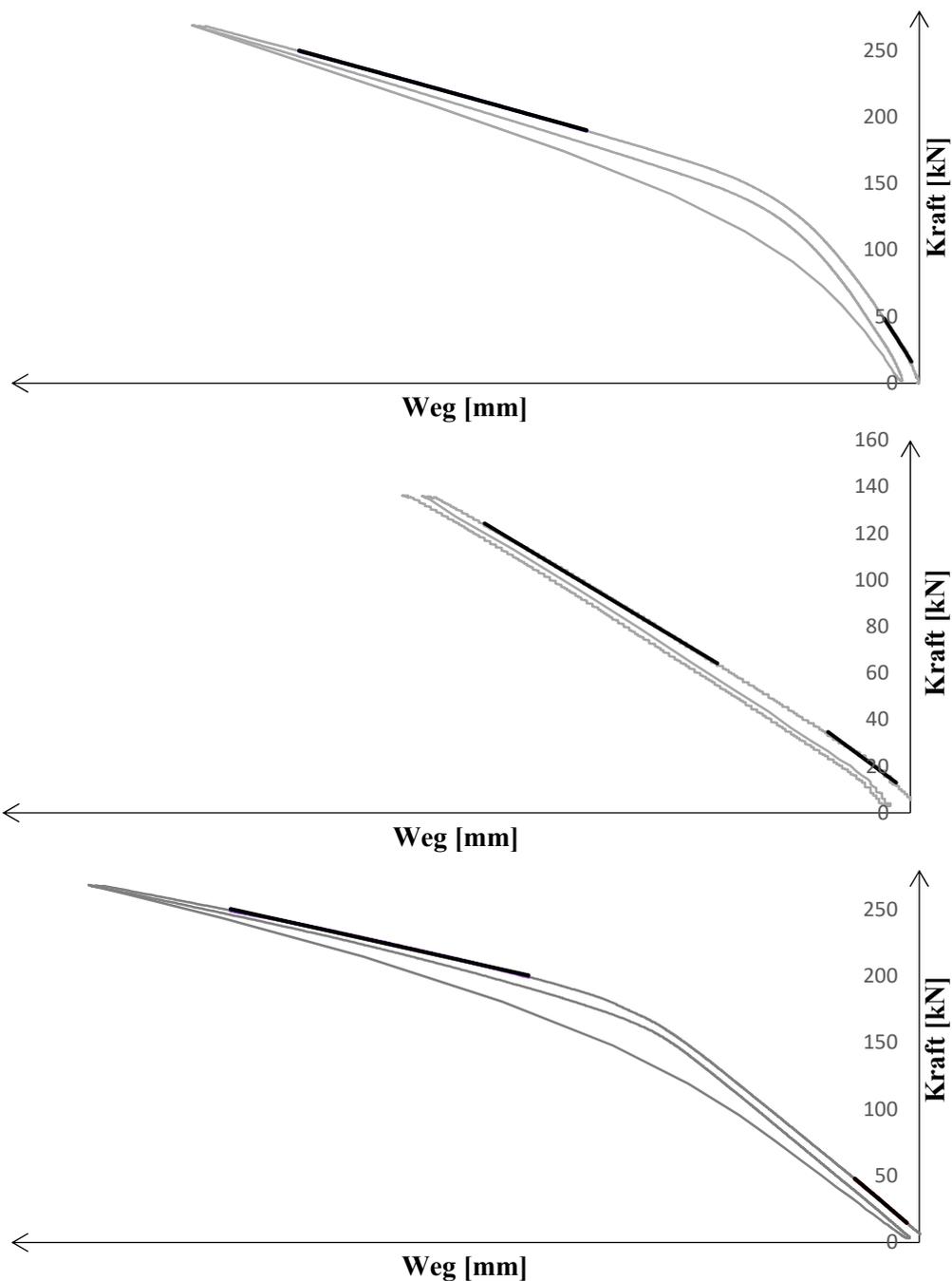


Abbildung 3-24 Exemplarische Darstellung des Kraft-Weg-Diagrammes ausgewählter Prüfungen mit schwarz markierten Auswertebereich von K_{ser} ; oben: Prüfkörper 0_BB_19_92-90_05_spT8-02 der Serie BB_01; mitte: 0_BI_19_92-80_04_sp02 der Serie BI_01; unten: Prüfkörper 0_BU_19_92-90-x_06_sp0121 der Serie BU_01

Tabelle 3-14 Exemplarische Unterschiede der Steigungen der Kraft-Weg-Beziehung vor und nach dem Knick für je einen Prüfkörper der Serien BB_01, BI_01 und BU_01

Prüfkörper	K_{ser} vor Knick [kN/mm]	K_{ser} nach Knick [kN/mm]	Verhältnis [%]
0_BB_19_92-90_05_spT8-02	2812	473	595
0_BI_19_92-80_04_sp02	3664	2139	171
0_BU_19_92-90-x_06_sp0121	1929	506	381

Da bei sämtlichen Prüfvorgängen dieser Knick sowohl bei der Belastung als auch bei der Entlastung des Prüfkörpers während des Prüfvorganges zu beobachten ist, wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass es durch eine Vorspannkraft am Beginn der Prüfung zu einem steiferen Verhalten der Verbindungen kommt. Es wurde vermutet, dass durch das Anziehen der Schrauben und dem damit verbundenen Anpressen der Schrauben an die Distanzhülsen bzw. dem Stahlkranz diese Vorspannkraft aufgebaut wird. (vgl. Abbildung 3-25) Um diese Hypothese zu überprüfen, wurden bei der Serie BB_02 die Schrauben mit unterschiedlichem Anzugsdrehmoment, 20 Nm und 40 Nm, festgezogen, in der Erwartung, dass je nach Größe des Anzugsdrehmomentes der Knick früher bzw. später auftritt. Zusätzlich wurde ein Prüfkörper für den Prüfvorgang vorbereitet. Hier wurden die Schrauben mit 40 Nm angezogen. Dieser Prüfkörper wurde jedoch nicht sofort geprüft, sondern rund acht Monate in einer Klimakammer bei 65 % relativer Luftfeuchtigkeit und 20°C gelagert. Nach dieser Zeit wurde die Prüfung an diesem Prüfkörper durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich die Vorspannwirkung in der Lagerungszeit abgebaut hat.



Phase 1	$P > F$
Situation vor dem Knick	
Phase 2	$P \cong F$
Situation bei dem Knick	
Phase 3	$P < F$
Situation nach dem Knick	

P Vorspannkraft resultierend aus dem Anzugsdrehmoment der Schrauben

F Äußere Belastung

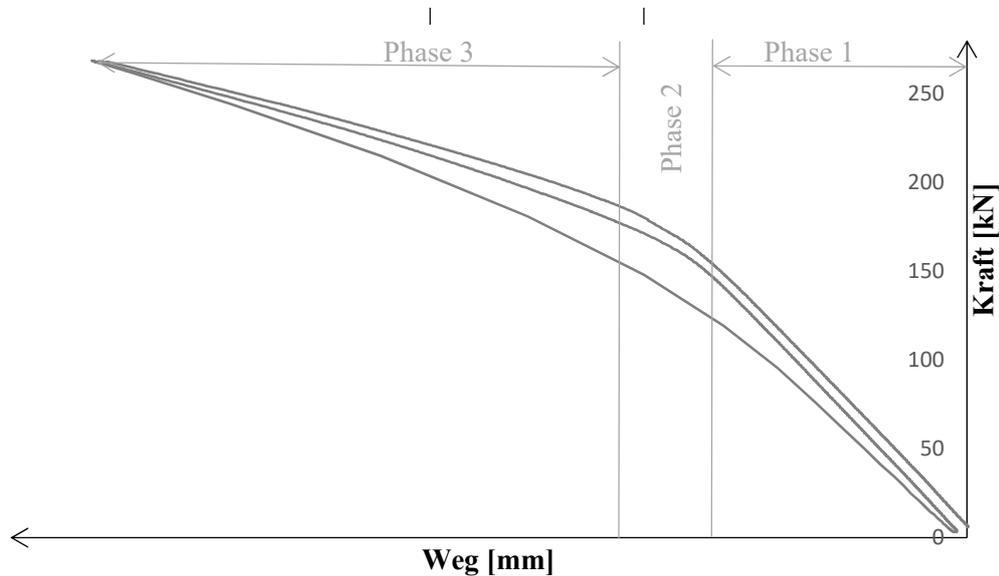


Abbildung 3-25 Schematische Prüfsituation unterteilt in drei Phasen; oben: Skizze der Prüfsituationen vor und nach dem Knick in der Kraft-Weg-Beziehung; unten: Exemplarische Kraft-Weg-Beziehung mit eingezeichneten Phasen

Die Auswertung von K_{ser} konnte aufgrund dieses Knickes nicht im Bereich von 10 % bis 40 % der maximalen Prüfkraft durchgeführt, da eine Regressionsanalyse in diesem Bereich für jede Prüfung den Mindestwert des Bestimmtheitsmaßes von 0,999 nicht erreicht hätte. Die Auswertung erfolgte daher für jede Prüferie individualisiert in einem konstanten Bereich der Prüfkraft. Dieser Bereich wurde über eine Analyse der Kraft-Weg-Beziehungen der Prüferie festgelegt, indem ein möglichst großer Bereich nach dem Knick definiert wurde, in welchem sich die Veränderung der Verformung linear und idealerweise konstant zur Veränderung der Prüfkraft verhielt.

Für die Serie BU_01 wurde die Auswertung im Bereich der Prüfkraft zwischen 200 und 250 kN, was einem Bereich von ca. 35-55 % der maximalen Prüfkraft entspricht, durchgeführt. In diesem Bereich konnte für jeden Prüfvorgang für die lineare Regression ein Bestimmtheitsmaß von mindestens 0,9961 erreicht werden.

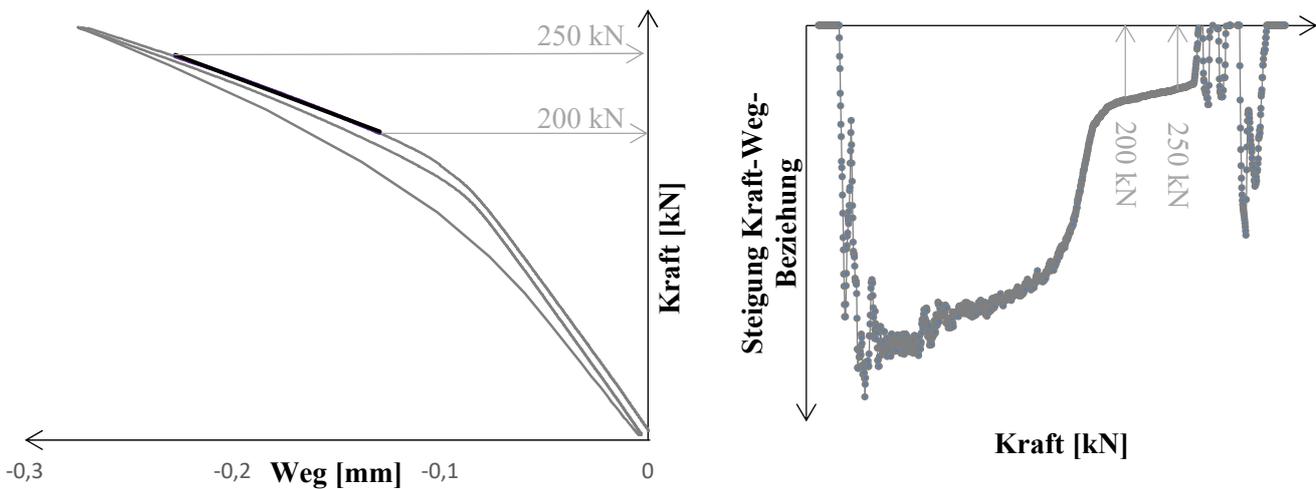


Abbildung 3-26 Bestimmung des optimalen linearen Bereiches zur Auswertung von K_{ser} der Serie BU_01; links: Exemplarische Kraft-Weg-Beziehung mit schwarz markiertem Auswertebereich; rechts: Exemplarischer Verlauf der Steigung der Kraft-Weg-Beziehung mit markiertem Auswertebereich

Die Auswertung von K_{ser} erfolgte bei der Serie BI_01 in der Lastverformungskurve im Bereich der Prüfkraft zwischen 20 % und 40 % der maximal erreichten Prüfkraft F_{max} . (vgl. Abbildung 3-27) In diesem Bereich konnte für jeden Prüfvorgang für die lineare Regression ein Bestimmtheitsmaß von mindestens 0,9991 erreicht werden.

Wie man Abbildung 3-28 entnehmen kann verhält sich die Last-Verformungskurve der Serie BI_02 in keinem Bereich linear, weshalb die Auswertung von K_{ser} bei dieser Serie nicht durchführbar war.

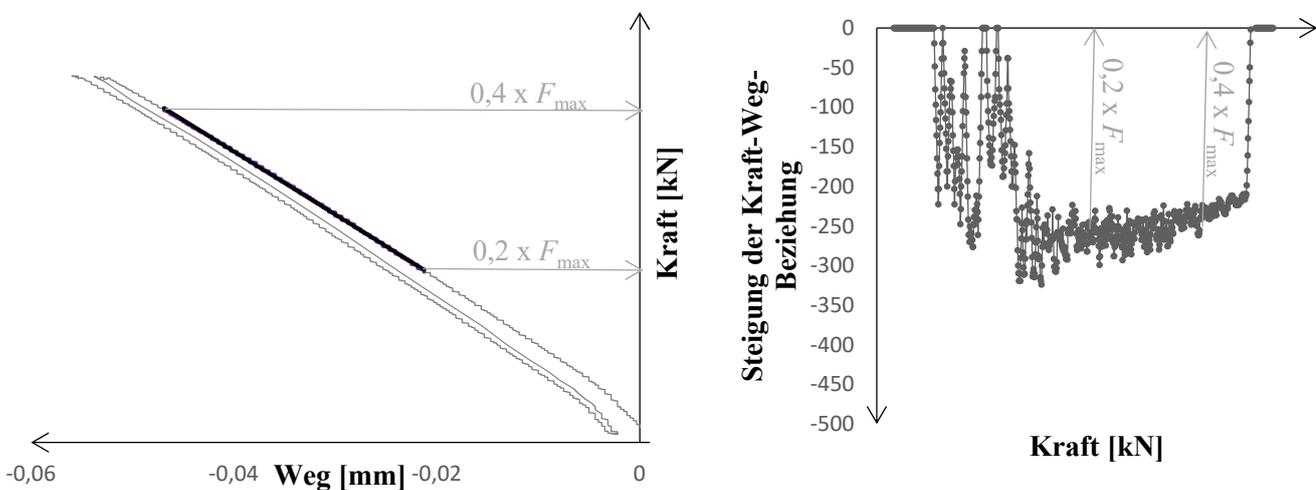


Abbildung 3-27 Bestimmung des optimalen linearen Bereiches für K_{ser} der Serie BI_01; links: Exemplarische Kraft-Weg-Beziehung mit schwarz markiertem Auswertebereich; rechts: Exemplarischer Verlauf der Steigung der Kraft-Weg-Beziehung mit markiertem Auswertebereich

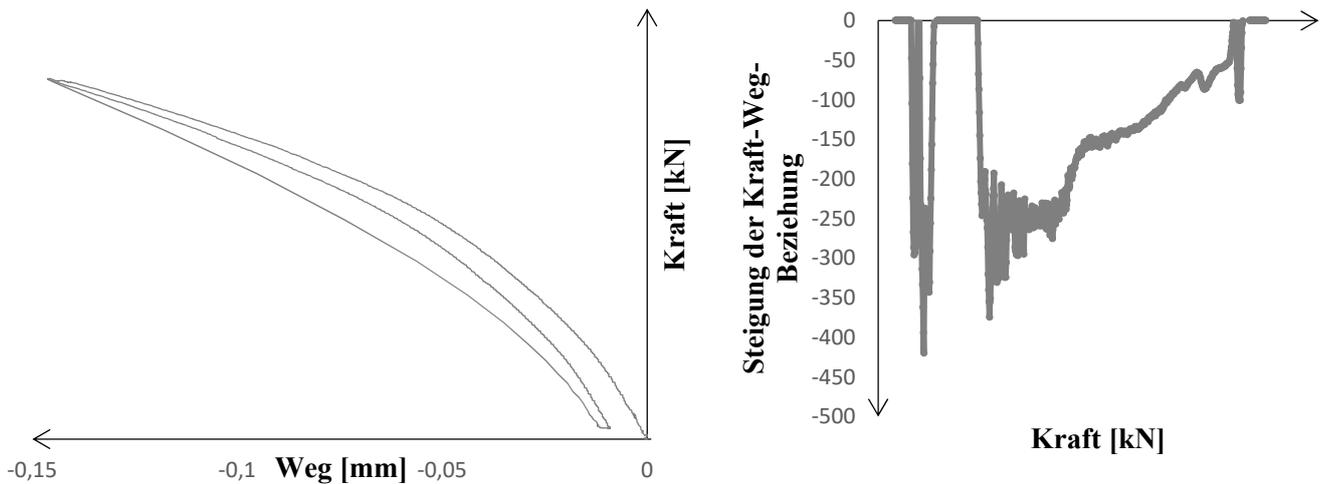


Abbildung 3-28 Bestimmung des optimalen linearen Bereiches für K_{ser} der Serie BI_02; links: Exemplarische Kraft-Weg-Beziehung; rechts: Exemplarischer Verlauf der Steigung der Kraft-Weg-Beziehung

Die Auswertung von K_{ser} erfolgte bei der Serie BB_01 in der Lastverformungskurve im Bereich der Prüfkraft zwischen 190 kN und 250 kN (vgl. Abbildung 3-29) und bei der Serie BB_02_1 zwischen 140 kN und 250 kN. (vgl. Abbildung 3-30) In diesen Bereichen konnte für jeden Prüfvorgang für die lineare Regression ein Bestimmtheitsmaß von mindestens 0,9982 in der Serie BB_01 bzw. mindestens 0,9998 in der Serie BB_02_1 erreicht werden. Wie man Abbildung 3-31 entnehmen kann, verhält sich die Last-Verformungskurve der Serie BB_02_2 in keinem Bereich linear, weshalb die Auswertung von K_{ser} bei dieser Serie nicht durchführbar war.

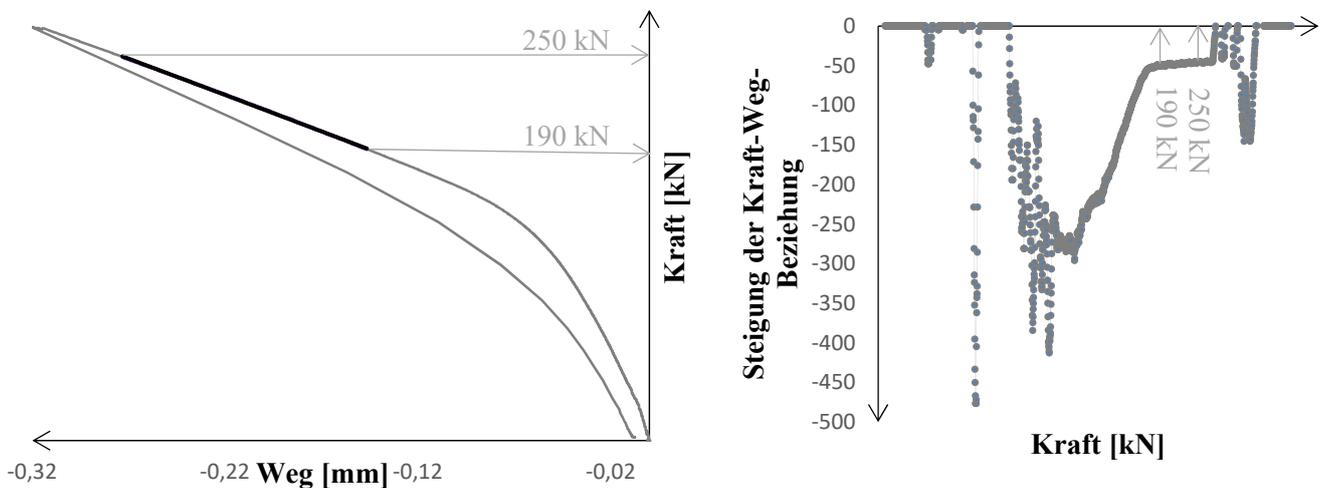


Abbildung 3-29 Bestimmung des optimalen linearen Bereiches für K_{ser} der Serie BB_01; links: Exemplarische Kraft-Weg-Beziehung mit schwarz markiertem Auswertebereich; rechts: Exemplarischer Verlauf der Steigung der Kraft-Weg-Beziehung mit markiertem Auswertebereich

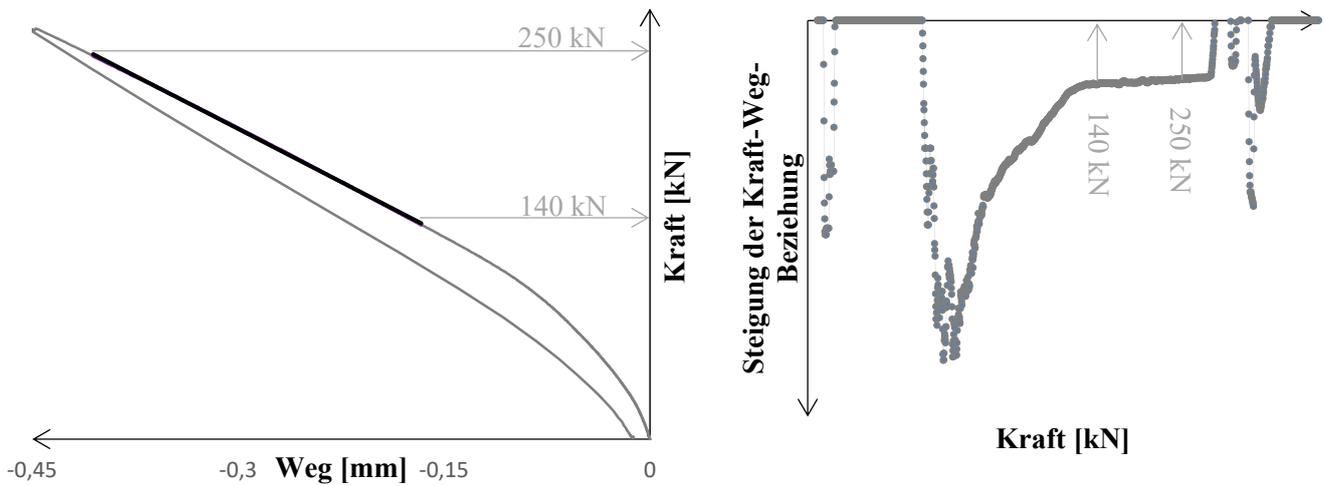


Abbildung 3-30 Bestimmung des optimalen Bereiches für K_{ser} der Serie BB_02_1; links: Exemplarische Kraft-Weg-Beziehung mit schwarz markiertem Auswertebereich; rechts: Exemplarischer Verlauf der Steigung der Kraft-Weg-Beziehung mit markiertem Auswertebereich

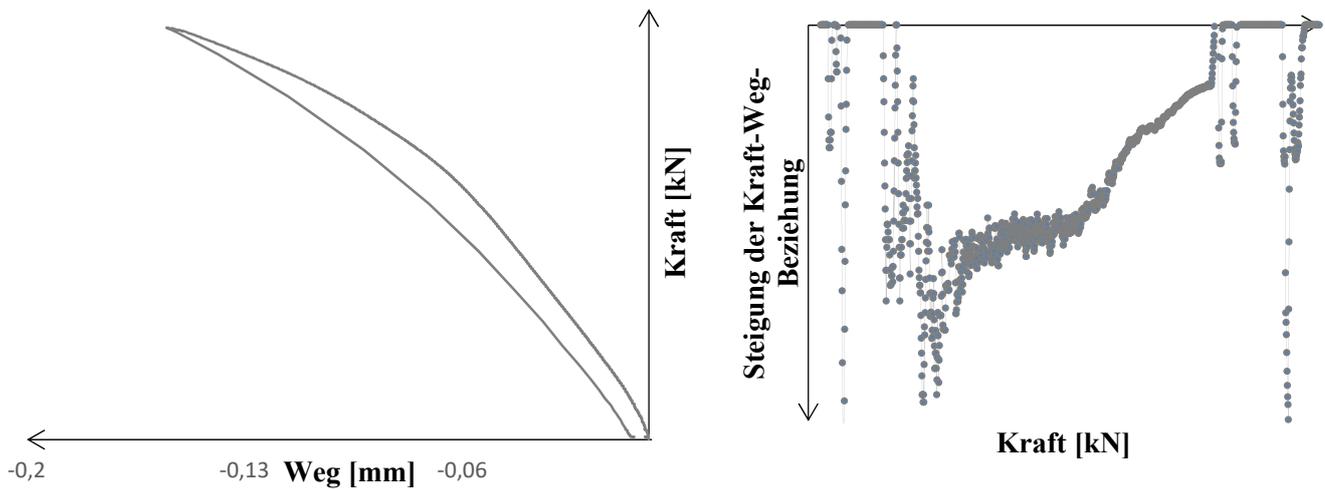


Abbildung 3-31 Bestimmung des optimalen Bereiches für K_{ser} der Serie BB_02_2; links: Exemplarische Kraft-Weg-Beziehung; rechts: Exemplarischer Verlauf der Steigung der Kraft-Weg-Beziehung

Auswirkung der Vorspannung auf die Tragfähigkeit

In [79] wurde die Auswirkung einer Vorspannung auf eine Verbindung mittels eingeklebter Gewindestangen untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass eine vorgespannte Verbindung unter einer externen Zugbelastung dieselbe maximale Tragfähigkeit aufweist wie eine nicht vorgespannte Verbindung. Zu begründen ist dieser Umstand damit, dass es durch die Zugbelastung zu einer „Öffnung“ der Fuge nach Überschreiten der Vorspannkraft zwischen Holz und Verbindungsblech kommt, woraufhin die äußeren Lasten nur noch über die Gewindestange eingeleitet werden. Die Kraftzunahme im Holz und der Gewindestange einer solchen Verbindung können demnach nach den Gleichungen (3.35) und (3.36) in Abhängigkeit der Steifigkeiten von Holz und Stahl ermittelt werden.

$$F_S = P + \frac{F}{\alpha} \quad (3.35)$$

$$F_H = -P + F \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \quad (3.36)$$

- F_S Kraft in der Gewindestange
- F_H Kraft im Holz
- P Vorspannkraft
- F von Außen aufgebrachte Kraft
- α Verhältnis der Steifigkeiten Holz/Stahl im Querschnitt ohne Verbund erhöht um den Wert 1

In Abbildung 3-32 ist folgend aus den Gleichungen (3.35) und (3.36) der schematische Kraftverlauf entlang der Verbindung laut [79] dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ab einem bestimmten Verhältnis von der außen aufgebrachten Kraft zu der Vorspannkraft, die Vorspannkraft weder auf das Holz noch auf den Stahl einwirkt. Aus diesem Grund hat diese Vorspannkraft keine Auswirkung auf die maximale Tragfähigkeit der Verbindung.

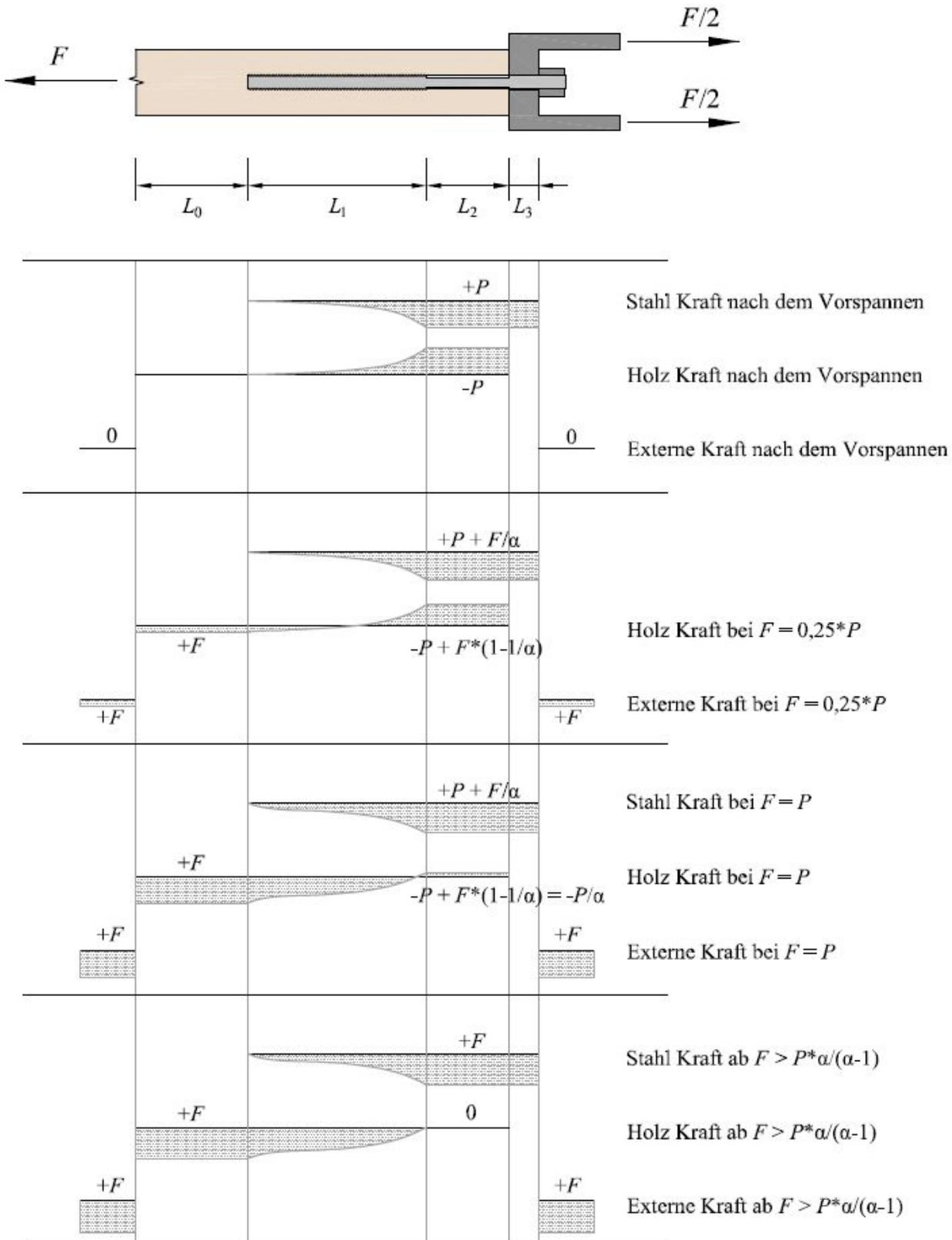


Abbildung 3-32 Schematische Kraftverteilung einer vorgespannten Verbindung unter äußerer Zugbelastung laut [79]

Auswirkung der Hülsendehnung

Bei der Auswertung des Verschiebungsmoduls der Gruppenversuche mit Hirnholzanschluss wurde über die Auswirkung der Hülsendehnung infolge der Belastung im Zuge des Prüfvorganges diskutiert. Durch den Prüfaufbau, bei welchem die Schrauben über Stahlhülsen auf den Stahlplatten aufliegen, erfolgt die Krafteinleitung von den Stahlplatten in die Schrauben zu allererst durch die aufgebrachten Hülsen. Eine Verformung der Hülsen beeinflusst dadurch auch den zurückgelegten Weg im Zuge des Prüfvorganges, der durch die aufgebrachten Wegaufnehmer erfasst wird und damit auch die Steifigkeit der Verbindung. Insbesondere stellte sich die Frage, ob die Verwendung von kurzen Hülsen ein signifikant steiferes Verhalten zur Folge hat als die Verwendung der längeren Hülsen.

Um die Größe dieses Einflusses abzuschätzen, wurde im Programm RFEM 5.19 der Firma Dlubal ein FE-Modell erstellt. Dabei wurden die Schrauben als Stabelement, welche über den Schraubenkopf als starres Flächenelement auf den Hülsen als nachgiebiges Flächenelement aufliegen, modelliert. Es wurde dabei ein Modell mit der kleinsten verwendeten Stahlhülse mit einer Höhe von 12 mm erstellt, sowie ein Modell mit der größten verwendeten Stahlhülse mit einer Höhe von 63 mm. Anschließend wurden beide Modelle mit 20 kN an der Schraubenspitze belastet.

Das Modell mit der großen Hülse verformte sich in der Simulation um 0,730 mm und die kleine Hülse um 0,713 mm in Richtung der Schraubenachse. Die Differenz von 0,017 mm entspricht einer Abweichung von 2,2 % der Verformung.

Aufgrund dieser geringen Differenz zwischen den Modellen wurde schlussgefolgert, dass die Hülsendehnung für die Auswertung der Verschiebungsmodule vernachlässigbar klein ist.

KAPITEL 4: ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4-1 HIRNHOLZVERBINDUNGEN

4-1.1 FEUCHTIGKEIT UND ROHDICHTE

Die Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Holzfeuchte und der Rohdichte der Prüfkörper sind für jede Prüferserie in Tabelle 4-1 angeführt. Die Holzfeuchte der Prüfkörper aus Buche variierte zwischen 8,9 % und 10,0 %. Zwischen den Einzelversuchen und den Gruppenversuchen zeigt sich im Mittel nur ein sehr geringer Unterschied von 0,1 %.

Die Prüfkörper aus Birke wiesen eine Holzfeuchte zwischen 9,3 % und 9,6 % bei den Gruppenversuchen auf. Bei den Einzelversuchen lagen die Holzfeuchten zwischen 9,7 % und 10,7 %. Im Mittel war dadurch die Holzfeuchte bei den Gruppenversuche um 0,9 % niedriger als bei den Einzelversuchen.

Die Holzfeuchte der BauBuche betrug zwischen 6,1 % und 6,3 % bei den Gruppenversuchen und zwischen 7,1 % und 7,4 % bei den Einzelversuchen. Im Mittel ergibt sich dadurch eine Differenz von 1,1 % zwischen den Prüferserien der Gruppenprüfungen und den Einzelversuchen bei der Holzfeuchte.

Tabelle 4-1 *Mittlere Holzfeuchte und Rohdichte aller Serien der Hirnholzverbindungen in Buche, Birke und BauBuche*

Prüferserie	Anzahl PK [-]	$\rho_{12,mean}$ [kg/m ³]		COV [%]		u_{mean} [%]	COV [%]
Einzel_BU	21	725		6,3		9,4	3,7
Einzel_BI	20	589		6,3		10,3	2,4
Einzel_BB	16	772		2,4		7,3	2,1
BU_01	6	731		5,1		9,3	2,6
BI_01	6	630	607	3,0	4,9	9,4	1,6
BI_02	6	585		3,2		9,4	0,8
BB_01	6	789	791	2,2	3,1	6,2	0,8
BB_02	6	793		4,0		6,2	1,3
Ref_K	12	791		3,1		6,2	1,2

Wie die Verteilung der Boxplots in Abbildung 4-1 zeigt liegen die Holzfeuchten der Einzelversuche über jenen der Gruppenversuche. Der Unterschied zwischen den Prüferserien ist bei der Buche am geringsten ausgebildet. Bei der Birke und BauBuche liegen die Holzfeuchten bei den Gruppenversuchen in einem vergleichbaren Bereich, lediglich bei den Einzelversuchen ist eine signifikant höhere Holzfeuchtigkeit gemessen worden. Die Zeitspanne zwischen den Gruppenprüfungen und Einzelversuchen lag bei ungefähr zwei Wochen.

Ein Vergleich der Werte mit den strichprobenartigen Messungen mit einer Hygromette im Zuge des Zuschnittes einen Monat vor den Prüfungen zeigte um etwa 1 % höhere Werte als die Bestimmung der Holzfeuchte mittels Darrprobe nach den Prüfungen von Birke und der Buche.

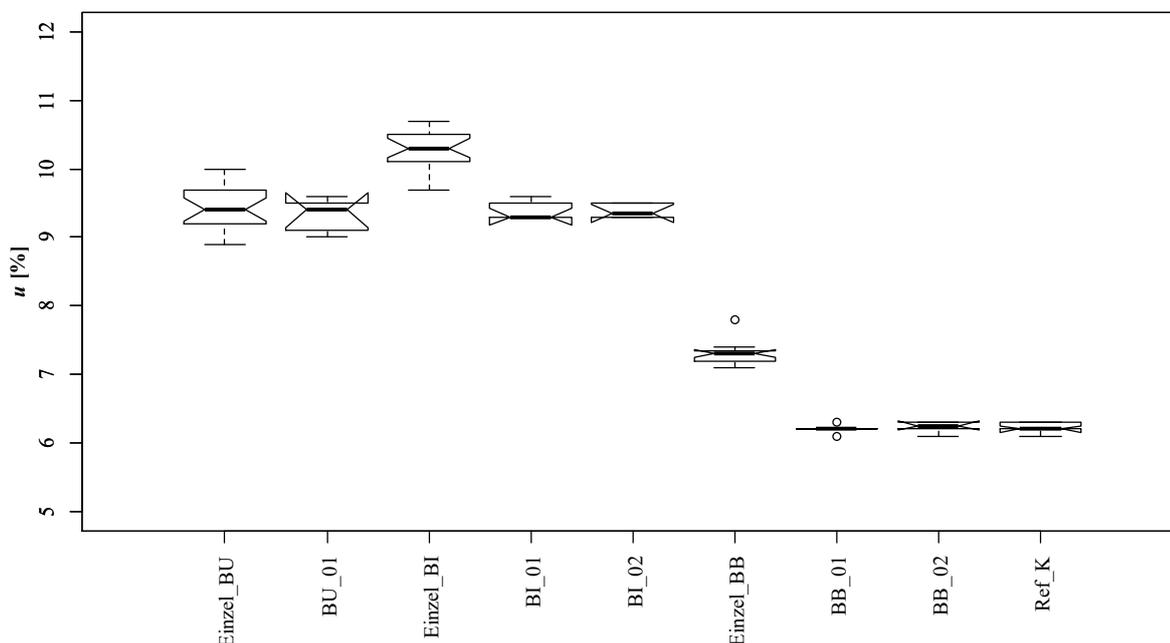


Abbildung 4-1 Boxplot der mittleren Holzfeuchte aller Serien in Buche, Birke und BauBuche

In Abbildung 4-2 ist ein Boxplot der mittleren Rohdichte jeder Prüfserie dargestellt.

Der Bereich der Rohdichte der verwendeten Prüfkörper aus Buche für die Einzelversuche liegt zwischen 675 kg/m³ und 815 kg/m³ und jener der Gruppenversuche zwischen 681 kg/m³ und 791 kg/m³. Im Mittel ist der Unterschied der Rohdichte zwischen den Einzelversuchen und den Gruppenversuchen mit lediglich 6 kg/m³ sehr gering.

Die Prüfkörper aus Birke befinden sich in einem Rohdichtebereich zwischen 516 kg/m³ und 656 kg/m³ bei den Einzelversuchen und zwischen 566 kg/m³ und 663 kg/m³ bei den Gruppenversuchen. Die Prüfserie BI_01 weist dabei einen signifikant höheren Bereich der mittleren Rohdichte auf als die Einzelversuche und die Serie BI_02. (vgl. Abbildung 4-2)

Das verwendete Material BauBuche wies aufgrund seiner Homogenität die geringste Streuung der Rohdichte auf. In Abbildung 4-2 ist ersichtlich, dass die mittlere Rohdichte aller Prüfserien dieses Materials in einem vergleichbaren Bereich liegen. Die Mittelwerte der einzelnen Prüfserien stimmen gut mit dem mittleren Wert laut Hersteller von 800 kg/m³ überein. (vgl. Abbildung 4-2)

Bei der Berechnung der Werte mit Bezug auf die Einzelprüfungen im Zuge der Auswertung der Tragfähigkeit der Gruppenversuche werden die geringen Rohdichteunterschiede zwischen den Prüfserien berücksichtigt. Dies wird mit Hilfe des Verhältnissfaktors $k_p = (\rho_{12,Gruppe-mean} / \rho_{12,Einzel-mean})^{1,6}$ von Brandner [34] (vgl. Abschnitt 2-4.3.3) durchgeführt. (vgl. Tabelle 4-2)

Tabelle 4-2 Verhältnissfaktoren nach Brandner [34] für die Ergebnisse der Tragfähigkeiten der Gruppenversuche mit Bezug auf Einzelversuche der Hirnholzverbindungen

	BU_01	BI_01	BI_02	BB_01	BB_02
k_p [-]	1,01	1,11	0,99	1,04	1,04
		1,05		1,04	

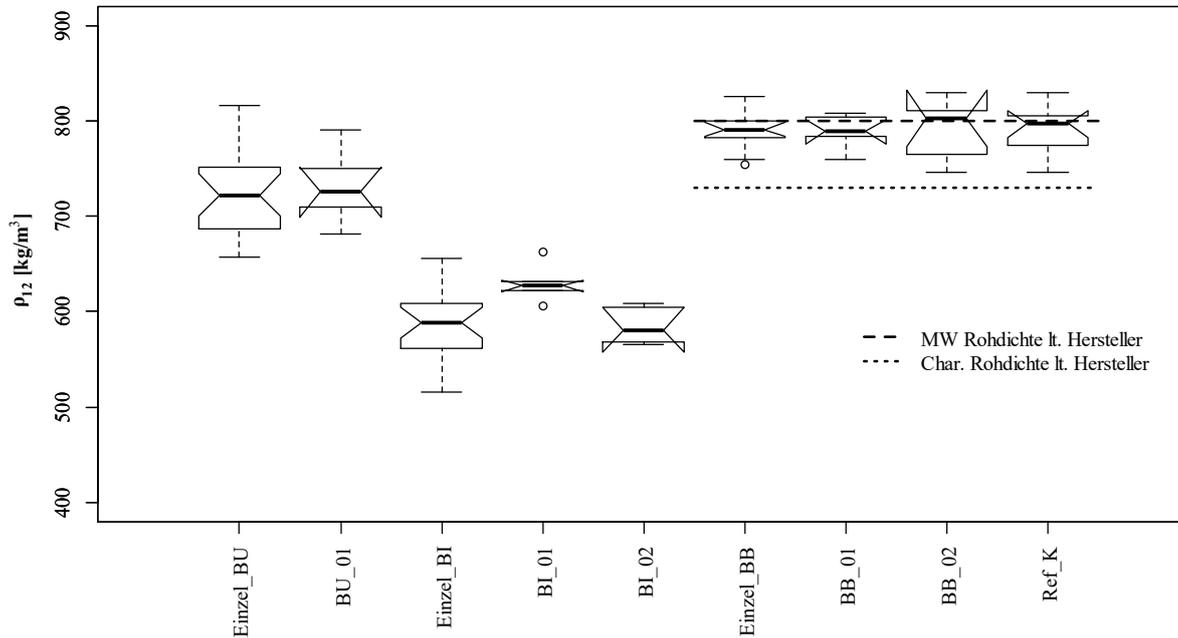


Abbildung 4-2 Boxplot der mittleren Rohdichten ρ_{12} aller Serien in Buche, Birke und BauBuche

4-1.2 EINZELVERSUCHE

In Tabelle 4-3 sind die Ergebnisse der Einzelversuche aufgelistet. Sämtliche Prüfkörper versagten bei den Versuchen durch Herausziehen der Schraube aus dem Holz. Alle Versuchskörper wiesen nach den durchgeführten Prüfungen weder Risse noch sonstige Auffälligkeiten auf.

Tabelle 4-3 Mittelwerte und charakteristischer Wert der Auszieh Widerstände und Mittelwert der Ausziehfestigkeiten der Einzelversuche der Hirnholzverbindungen

	Buche	Birke	BauBuche
$F_{\max, \text{mean}}$ [kN]	28,7	15,3	26,4
$F_{\max, 05}$ [kN]	21,1	12,3	21,9
$F_{\max, 95}$ [kN]	39,1	19,1	31,8
$f_{\text{ax, mean}}$ [N/mm ²]	12,4	6,6	13,1
COV [%]	16,3	11,6	9,5

In Abbildung 4-3 ist der Boxplot der Ergebnisse der Einzelversuche in Buche, Birke und BauBuche dargestellt und mit den Rechenwerten aus der Vorbemessung gegenübergestellt.

Die erreichten Auszieh Widerstände der Buche liegen dabei im Mittel mit $F_{\max, \text{mean}} = 28,7$ kN über der Vorbemessung mit 27,7 kN. Auch bei den charakteristischen Werten lag die Vorbemessung mit 20,6 kN unter jenem der Prüfergebnisse mit 21,1 kN. Die Vorbemessung der Ausziehfestigkeit nach Brandner et al. [31] lag somit rund 4,7 % unter den Mittelwerten. Bei der Vorbemessung wurde eine mittlere Rohdichte von 741 kg/m^3 angenommen. Die mittlere, auf eine Referenzholzfeuchte von 12 % umgerechnete Rohdichte betrug 725 kg/m^3 . Dies ergibt mit einem Verhältnisfaktor k_p nach Brandner [34] von 3,5 %, demnach müssten die Werte aus der Vorbemessung höher liegen.

Bei den Versuchen mit Birke konnten lediglich Auszieh Widerstände erzielt werden, welche rund um das 5%-Quantil der Vorbemessung nach Brandner et al. [31] lagen. Ein Extremwert der Versuche liegt knapp über dem Mittelwert

der Vorbemessung. Dieser Prüfkörper wies mit einer feuchtekorrigierten Rohdichte von 655 kg/m^3 die höchste Rohdichte unter den Prüfkörpern auf und besaß im Einschraubbereich keinen Kernholzanteil. Bei der Vorbemessung wurde eine mittlere Rohdichte der Prüfkörper von 617 kg/m^3 angenommen. Die tatsächliche feuchtekorrigierte Rohdichte betrug 589 kg/m^3 . Dies ergibt mit einem Verhältnisfaktor k_p nach Brandner [34] einen um 7,2 % geringeren Auszieh Widerstand. Die im Mittel um 25 % ($15,3 \text{ kN} / 20,3 \text{ kN}$) geringeren erzielten Auszieh Widerstände in Bezug auf die Vorbemessung nach Brandner et al. [31] sind aller Voraussicht nach auf den hohen Kernholzanteil der Versuchskörper und der Unterschätzung der Rohdichte zurückzuführen. Die genaue Lage aller Schrauben im Kernholz wurde bei den Prüfungen nicht aufgezeichnet, lediglich das kernholzfremde Material des Prüfkörpers mit dem höchsten erzielten Auszieh Widerstand wurde vermerkt.

Die Auszieh Widerstände der BauBuche stimmen im Mittel sehr gut mit der Vorbemessung überein. Der Mittelwert $F_{\text{max,mean}} = 26,4 \text{ kN}$ weicht dabei nur 3,6 % von der Vorbemessung nach Brandner et al. [31] ab. Die Abweichung der angenommenen mittleren Rohdichte der Vorbemessung von 800 kg/m^3 liegt bei 3,5 %. Das ergibt einem Verhältnisfaktor k_p nach Brandner [34] von 5,7 % und ist somit vergleichbar mit jener des Auszieh Widerstandes. Der charakteristische Wert zeigte eine Abweichung von 5,1 % ($20,8 \text{ kN} / 21,9 \text{ kN}$). Die erzielten Auszieh Widerstände wiesen eine wesentlich geringere Streuung auf als die Vorbemessung. Dieser Umstand ist auf das sehr homogene Material der Prüfkörper aus BauBuche zurückzuführen und dass im Modell nach Brandner et al. [31] der geringe Variationskoeffizient der Eigenschaften bei BauBuche für den charakteristischen Wert nicht berücksichtigt wird.

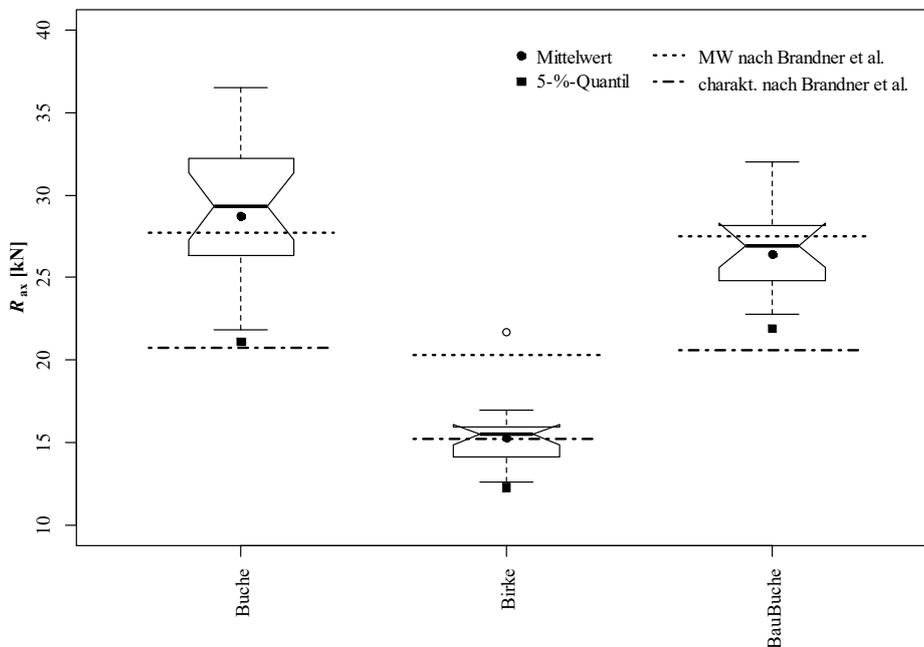


Abbildung 4-3 Boxplot der Auszieh Widerstände der Einzelschraubenversuche und Vorbemessung nach Brandner et al. [31]

In Abbildung 4-4 ist der Zusammenhang zwischen Rohdichte und Ausziehfestigkeit dargestellt. Eingetragen sind die Daten der Einzelversuche in Buche, Birke und BauBuche, sowie die Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte zur Bestimmung des charakteristischen Wertes nach Brandner [34], des Mittelwertes nach Brandner et al. [31] und des charakteristischen Wertes nach Hübner [12].

Der Anstieg der Ausziehfestigkeit ist bei Buche und BauBuche mit steigender Rohdichte deutlich zu erkennen. Bei der Birke ist jedoch im Bereich zwischen 500 kg/m^3 und 630 kg/m^3 kein Anstieg der Ausziehfestigkeit zu erkennen. Das Modell nach Brandner et al. [31] erreichte eine gute Übereinstimmung für die Buche und die BauBuche. Die Ausziehfestigkeit der Birke wurde jedoch mit dem Modell nach Brandner et al. [31] überschätzt. Hier zeigt das Modell nach Hübner [12] eine wesentlich bessere Übereinstimmung.

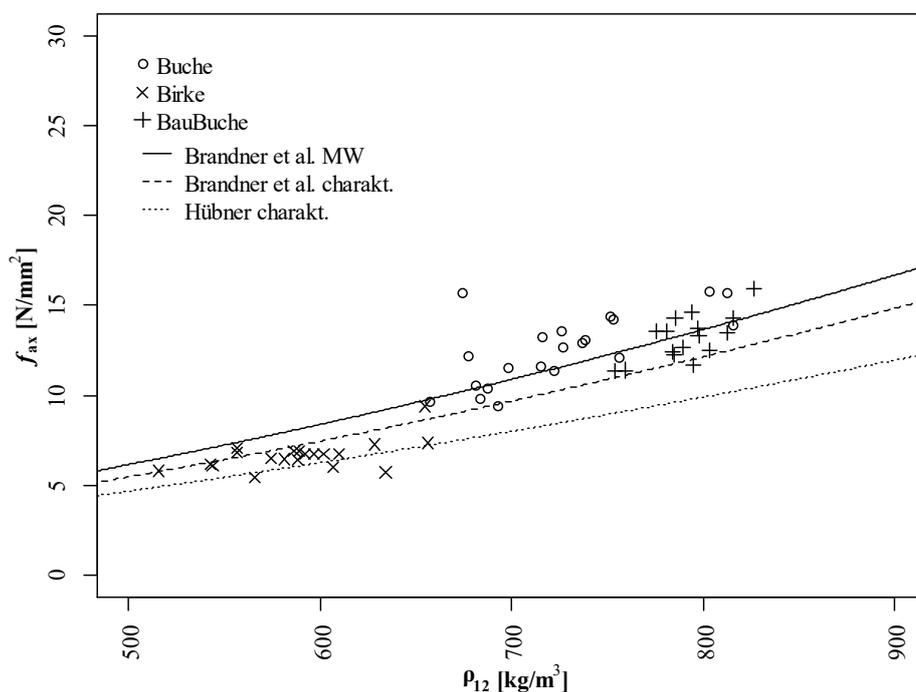


Abbildung 4-4 Ausziehfestigkeit aller Einzelschraubenprüfungen verglichen mit der Berechnung nach Brandner et al. [31] und Hübner [12]

4-1.3 REFERENZVERSUCHE DER STEIFIGKEIT

In Tabelle 4-4 sind die ermittelten Steifigkeiten der Referenzversuche mit der Einzelschraube aufgelistet.

Tabelle 4-4 Zusammenfassung der Referenzversuche der Steifigkeit

	Steifigkeit_Erstbelastung	Steifigkeit_Wiederbelastung	Gesamt
Anzahl [-]	11	10	21
Min [N/mm]	30,6	32,7	27,1
Max [N/mm]	27,1	30,4	32,7
$K_{ser,1,mean}$ [kN/mm]	28,9	31,4	30,1
Stabw [-]	1,2	0,8	1,6
COV [-]	4,3 %	2,5 %	5,5 %

In Abbildung 4-5 ist ein Boxplot der ermittelten Verschiebungsmodule dargestellt. Ebenso ist als Vergleichswert der Rechenwert von K_{ser} für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis nach Gleichung (3.34) angegeben. Dieser Rechenwert ergibt für $l_{ef} = 92$ mm und $d = 8$ mm eine Verschiebungsmodul von $K_{ser,ETA} = 22,1$ kN/mm. Die bei den Referenzversuchen ermittelten Verschiebungsmodule sind im Mittel um 36 % höher als der in der ETA-12/0373 [21] angegebene Rechenwert für den Verschiebungsmodul. Dieser ist somit sehr konservativ.

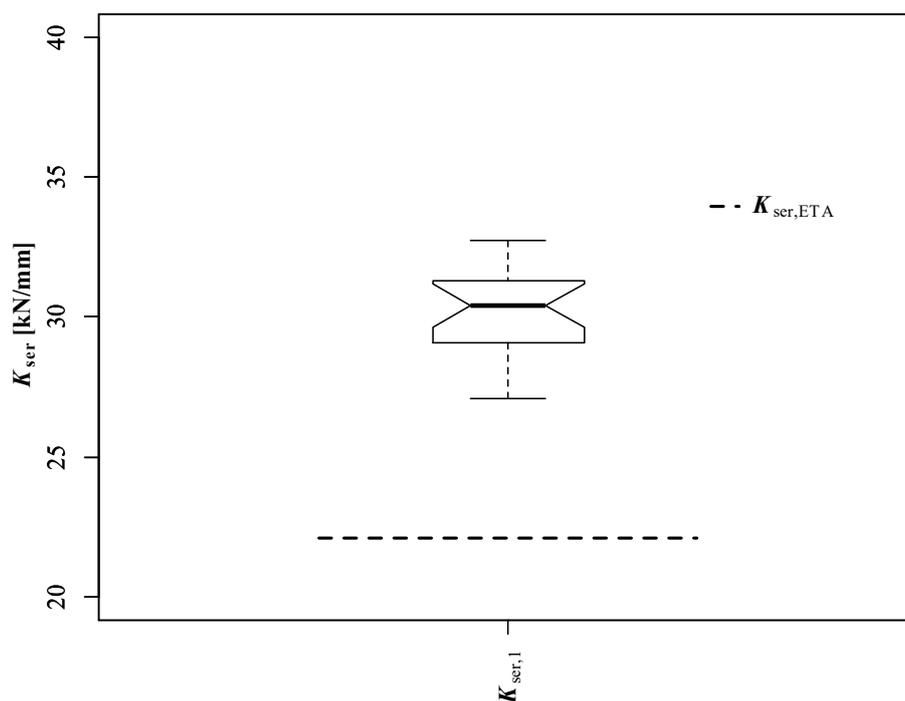


Abbildung 4-5 Boxplot der ermittelten Referenzwerte für den Verschiebungsmodul verglichen mit dem Verschiebungsmodul nach ETA-12/0373 [21]

4-1.4 GRUPPENVERSUCHE DER HIRNHOLZANSCHLÜSSE

4-1.4.1 Versagensmechanismen

In Tabelle 4-5 sind die aufgetretenen Versagensmechanismen mit den wesentlichen Parametern für jede Prüfserie aufgelistet. Bei den Prüfungen traten neben dem anvisierten Versagen durch Herausziehen der Schrauben auch ein Aufspalten der Prüfkörper und das Versagen einzelner Schrauben der Gruppe auf.

Tabelle 4-5 Aufgetretene Versagensmechanismen bei den Gruppenprüfungen der Hirnholzverbindungen mit Parametern der Prüfserien

Prüfserie	BU_01	BI_01	BI_02	BB_01	BB_02
a_2		3 d		3 d 4 d	
$a_{2,cg}$			2 d		
l_{emb}	5 d 9 d 11 d	10 d	5 d		11 d
Versagen ¹⁾	3 H 3 ASP	6 H	2 H 4 ASP	5 H 1 ASP	1 H 1 ASP 4 H/S

¹⁾ H...Herausziehen; ASP...Aufspalten; H/S...Herausziehen/Schraubenbruch

Bei den Versuchen der Prüfserie in Buche trat bei drei Probekörpern das Versagen einiger Schrauben auf. Zusätzlich konnte bei diesen Prüfkörpern Risse in radialer Richtung festgestellt werden. Hierbei konnte jedoch nicht festgestellt werden, ob diese bereits vor dem Versagen der Schrauben auf Herausziehen bzw. Schraubenbruch auftraten oder ob diese sich erst durch die dynamische Wirkung des Versagensvorgangs ereigneten. Wie man in Abbildung 4-6 erkennen kann, traten die Risse in der äußersten Schraubenreihe des Querschnittes auf. Diese Schraubenreihe besaß die geringste Einbindetiefe von $l_{emb} = 5 d$. Die aufgetretenen Schraubenbrüche ereigneten sich, wie man Abbildung 4-6 entnehmen kann, in jenen Bereichen der Prüfkörper, welche vom Aufspalten unberührt waren. Der Verfasser

geht davon aus, dass der primäre Versagensmechanismus das Aufspalten entlang der Schraubenreihe mit der geringsten Einbindetiefe war und es in weiterer Folge zu einer Umlagerung der Beanspruchung gekommen ist. In den Umlagerungsbereichen kam es anschließend zu den Stahlbrüchen und dem Ausziehversagen der Schrauben. Ein Hinweis dafür war, dass bei den Einzelschraubenprüfungen mit analoger effektiver Gewindelänge kein Schraubenversagen beobachtet wurde. Weiters wurde diese Annahme durch einen Vergleich der Versagensbilder der Prüfungen von Koppauer [26] bestärkt. Hier wurde ebenfalls eine parabelförmige Abstufung der Schrauben in Buche geprüft. Bei diesen Prüfungen traten ebenfalls die Risse zwischen den Schrauben mit geringster Einbindetiefe auf. (vgl. Abbildung 4-7) Schraubenbrüche traten jedoch in den meisten Fällen aufgrund der geringeren maximalen Prüflasten nicht auf. Folglich wurde bei diesen Prüfkörpern das Aufspalten als Versagensmechanismus festgehalten.

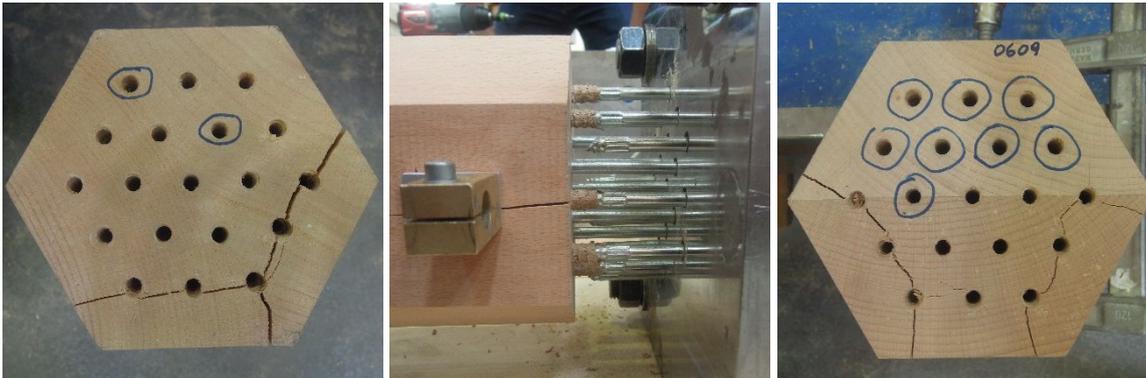


Abbildung 4-6 Versagensbilder der Prüfserie BU_01; links und rechts: Querschnitte von Prüfkörpern mit einem Versagen durch Aufspalten mit blau markierten Stellen der Schraubenbrüche; mitte: Seitenansicht des Versagensbereiches eines Prüfkörpers mit Aufspaltversagen

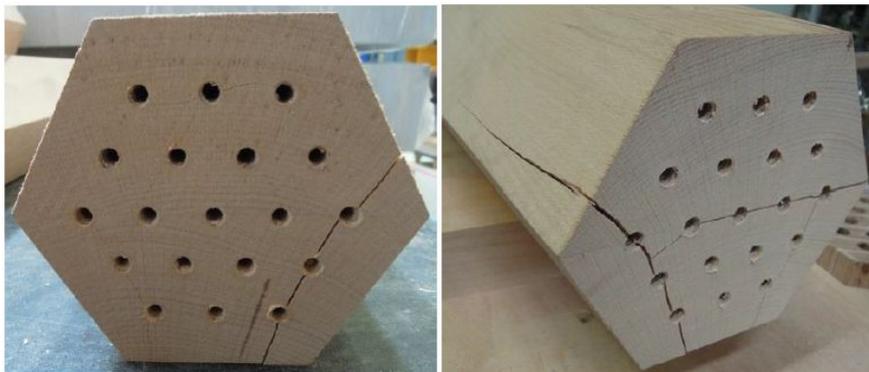


Abbildung 4-7 Versagensbilder der Prüfserie mit abgestufter Einbindetiefe der Schrauben mit Rissen in der Schraubenreihe mit geringster Einbindetiefe aus Koppauer [26]

Bei sämtlichen Versuchen der Serie BI_01 konnte ein Versagen der Verbindung durch Herausziehen der Schrauben erreicht werden. Es traten hierbei keine Risse bei den Prüfkörpern in Erscheinung. Bei einem Prüfkörper dieser Serie kam es bei der Herstellung der Vorbohrungen zu einem Abbrechen des Bohrers, weshalb dieser Prüfkörper nur mit 17 Schrauben geprüft wurde, um ein symmetrisches Schraubenbild zu erhalten (vgl. Abbildung 4-8).



Abbildung 4-8 *Versagensbilder der Prüferserie BI_01; links und rechts: Querschnitte von Prüfkörpern mit einem Versagen durch Herausziehen mit rot markierter Stelle des abgebrochenen Bohrers; Mitte: Seitenansicht des Versagensbereiches eines Prüfkörpers mit Versagen durch Herausziehen*

Bei der Prüferserie BI_02 kam es bei vier von sechs Prüfkörpern zu einem Aufspalten des Holzes. Diese Risse traten, wie man Abbildung 5-6 entnehmen kann, in radialer Richtung von der Kernlamelle beginnend auf. Es ist daher davon auszugehen, dass die verminderte Einbindetiefe von $5 d$ dieser Prüferserie zu gering ist, um ausreichend Holzvolumen bereitzustellen, sodass eine effektive Aufnahme der auftretenden Querkzugkräfte durch das Holz stattfinden konnte.



Abbildung 4-9 *Versagensbilder der Prüfkörper der Serie BI_02 mit Versagen durch Aufspalten und radial aufgetretenen Rissen*

Sämtliche Anschlüsse der Serie BB_01 versagten durch Herausziehen der Schrauben, vereinzelt versagten einzelne Schrauben. Bei einem Prüfkörper trat ein Aufreißen der obersten Schraubenreihe auf. (vgl. Abbildung 4-10)

In der Serie BB_02 trat bei fünf Prüfkörpern ein Versagen durch Herausziehen der Schrauben auf. Bei vier dieser fünf Prüfkörper traten zudem Schraubenbrüche auf. Bei einem Prüfkörper kam es zu einem Aufspalten des Holzes. Hierbei entstand ein Riss entlang der mittleren Lamelle in radialer Richtung. (vgl. Abbildung 4-10) Bei den Prüfungen mit konstanter Einbindetiefe der Schrauben von $2 d$ in BauBuche von Koppauer [26] versagten die Verbindungen durch Aufspalten des Holzkörpers. Auch hier traten die Risse in Furnierrichtung auf, jedoch in den überwiegenden Fällen entlang einer gesamten Schraubenreihe. (vgl. Abbildung 4-11) Dieses Versagensbild konnte auch bei den Versuchen von Eckerstorfer [42] mit einer Einbindetiefe von $8,4 d$ beobachtet werden. Auch hier traten die Risse bei Aufspalten über eine gesamte Schraubenreihe in Furnierrichtung über die gesamte Breite des Prüfkörpers auf. (vgl. Abbildung 4-12) In den Versuchen dieser Arbeit traten die Risse jedoch nur über einen Teil der Schraubenreihe und nicht über die gesamte Breite des Prüfkörpers. Es lässt sich daher daraus schließen, dass die geprüfte Einbindetiefe von $11 d$ zwar noch zu gering war, um bei den geprüften Schraubenabständen eine Sicherheit gegen Aufspalten zu gewährleisten, jedoch die dafür benötigte Einbindetiefe nur geringfügig höher ist.

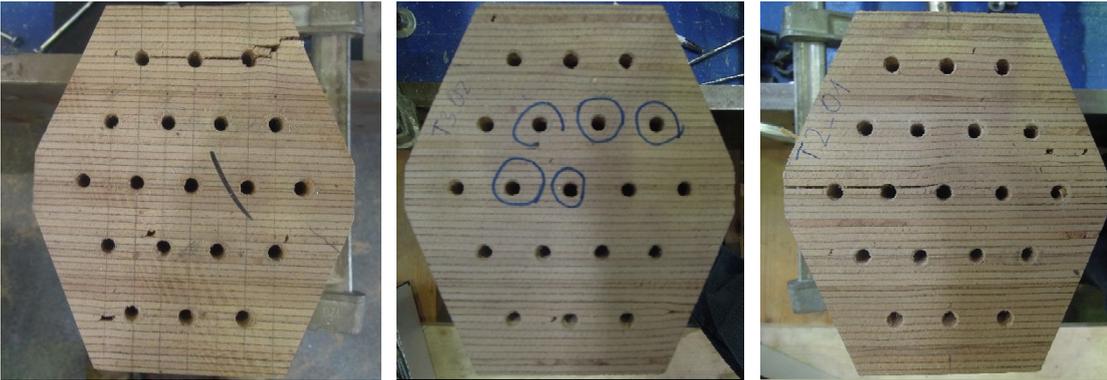


Abbildung 4-10 links: Versagensbild der Serie BB_01, Herausziehen der Schrauben mit Riss in der obersten Schraubenreihen; mitte: Versagensbild der Serie BB_02 mit Versagen durch Herausziehen mit Schraubenbruch und blau markierten Stellen der Schraubenbrüche; rechts: Versagensbild der Serie BB_02, Aufspalten des Prüfkörpers entlang der mittleren Lamelle

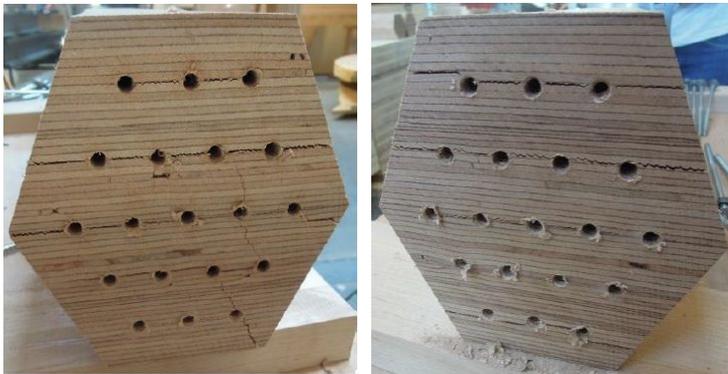


Abbildung 4-11 Versagensbilder der Versuche mit Hirnholzverbindungen in BauBuche mit $l_{emb} = 2 d$ und einem Aufspalten in Furnierichtung über die gesamte Breite des Trägers aus Koppauer [26]

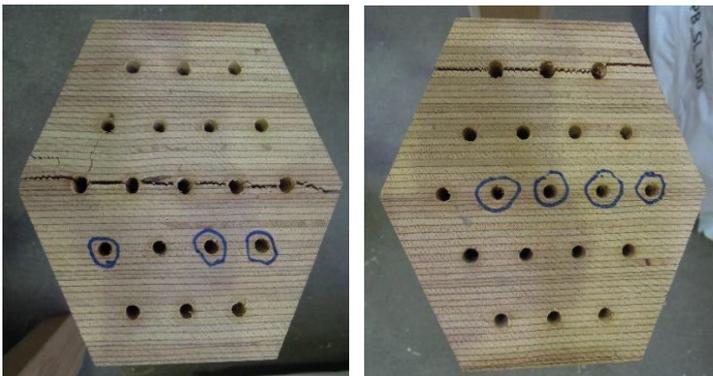


Abbildung 4-12 Versagensbilder der Versuche mit Hirnholzverbindungen in BauBuche mit $l_{emb} = 8,4 d$ und einem Aufspalten in Furnierichtung über die gesamte Breite des Trägers aus Eckerstorfer [42]

4-1.4.2 Tragfähigkeit durchgeführter Prüfungen

Sämtliche Werte, die sich auf den Auszieh Widerstand, welcher bei der Prüfung erreicht werden konnte, beziehen, sind als rechtszensierte Daten anzusehen, weshalb diese, wie in Abschnitt 3-3.3 erläutert, entsprechend aufbereitet wurden, um hier anschließend Schätzer für unzensierte, equi-korrelierende Daten anzugeben. Wie in Abschnitt 4-1.4.1 vorgestellt sind bei den Prüfungen neben dem Herausziehen der Schrauben auch die Versagensmechanismen Aufspalten und Schraubenbrüche mit anschließendem Auszugsversagen aufgetreten. Bei den unzensierten Werten wurden dabei sämtliche Prüfergebnisse berücksichtigt und mittels Maximum-Likelihood-Methode für rechtszensierte, equi-korrelierende und lognormalverteilte Daten aufbereitet. Die angegebenen unzensierten Erwartungswerte und Standardabweichungen bzw. Variationskoeffizienten des Widerstandes $f_{ax,mean,MLErc-ec}$ und $F_{max,mean,MLErc-ec}/n$ sind somit Schätzungen, für den Fall, dass alle Prüfungen der Serie mit einem Auszugsversagen enden. In den angegebenen rechtszensierten Werten von $f_{ax,mean}$ sind lediglich jene Widerstände berücksichtigt bei welchen ein Versagen durch Herausziehen erfolgte. In den rechtszensierten Werten von $F_{max,mean}/n$ sind sämtliche erzielten Widerstände der Prüfserie unabhängig vom Versagen berücksichtigt.

In diesem Abschnitt sind die Werte für den Auszieh Widerstand F_{max} bezogen auf die Schraubenanzahl n angegeben, da wie in Abschnitt 3-3.1.2 erwähnt, es bei den Versuchen mit den Prüfkörpern aus Birke vereinzelt zu einem Durchdrehen von Schrauben gekommen ist. Schrauben, bei denen ein Durchdrehen auftrat, wurden bei den angegebenen Widerständen nicht berücksichtigt. Sämtliche erhobenen Werte können für jeden Prüfkörper dem Anhang entnommen werden.

In Tabelle 4-6 sind die erzielten Widerstände und Ausziehfestigkeiten sowie die Ausnutzungsgrade und die Werte für die effektive Verbindungsmittelanzahl für jede Prüfserie angegeben.

Bei den Prüfungen in Buche konnte ein Wert von n_{ef} des unzensierten Mittelwertes von 0,95 und ein Wirkungsgrad bezogen auf den Nettoquerschnitt von 0,74 erreicht werden.

Dem gegenüber ist beim unzensierten Ausnutzungsgrad bezogen auf den Nettoquerschnitt der Versuche mit Birke kein Unterschied zu bemerken und liegt ebenfalls bei 0,74. Wie in Abschnitt 4-1.4.1 bereits vorgestellt trat bei den Versuchen der Prüfserie BI_02 durch die verringerte Einbindetiefe gegenüber BI_01 bei vier von sechs Prüfkörpern ein Aufspaltversagen auf. Die sehr guten Ergebnisse der Prüfserie BI_01 sind vor allem auf die höhere Rohdichte der Prüfkörper dieser Serie zurückzuführen. Diese lag mit 630 kg/m^3 rund 7 % über jener der Einzelversuche in Birke und der Prüfserie BI_02. Im Mittel entsprach die effektive Verbindungsmittelanzahl $n_{ef,mean,MLErc-eq} = 91 \% n$ in der Serie BI_01.

Bei den Versuchen mit BauBuche konnte ein $n_{ef,mean}$ von 80 % der Verbindungsmittelanzahl erreicht werden. Dieser relativ hohe Wert führte jedoch nicht zu einen zufriedenstellenden Ausnutzungsgrad. Dieser lag mit 41 % bezogen auf den Nettoquerschnitt um 8 % unter der Vorbemessung.

Laut ÖNORM EN-1995-1-1 [6] beträgt die effektive Verbindungsmittelanzahl $n^{0,9}$. Bei einer Verbindungsmittelanzahl von 19 Schrauben ergibt sich daraus eine Reduktion der Tragfähigkeit von $n^{0,9}/n = 19^{0,9}/19 = 74 \%$. Diese Vorgabe konnte bei allen geprüften Prüfserien auf charakteristischem Niveau eingehalten werden. Angemerkt wird in Zusammenhang mit dieser Aussage, dass nach ÖNORM EN-1995-1-1 [6] Verschraubungen mit $\alpha = 0^\circ$ nicht geregelt sind.

Tabelle 4-6 Mittelwerte der erzielten Widerstände, der erzielten Ausziehfestigkeit und des Brutto- und Nettoausnutzungsgrades sowie die charakteristische erzielte Ausziehfestigkeit und effektive Verbindungsmittellanzahl bei den Gruppenprüfungen der Hirnholzverbindungen

Prüfserie	BU_01	BI_01	BI_02	BB_01	BB_02
$F_{\max, \text{mean}, \text{MLErc-ec}}^1 / n$ [kN]	27,9	15,5	-	25,4	
$F_{\max, \text{mean}}^3 / n$ [kN]	26,7	15,2	14,2	24,9	25,4
$f_{\text{ax}, \text{mean}, \text{MLErc-ec}}^1$ [N/mm ²]	12,1	6,7	-	11,0	
$f_{\text{ax}, 05, \text{MLErc-ec}}^1$ [N/mm ²]	9,9	6,2	-	10,4	
$f_{\text{ax}, \text{mean}}^2$ [N/mm ²]	10,5	6,7	5,8	10,7	10,8
COV ¹ [%]	11,6	4,6	-	3,2	
$\eta_{05, \text{brutto}, \text{MLErc-ec}}^1$ [-]	0,69	0,69	-	0,37	
$\eta_{05, \text{netto}, \text{MLErc-ec}}^1$ [-]	0,74	0,74	-	0,39	
$\eta_{05, \text{netto}}^3$ [-]	0,71	0,73	0,66	0,38	0,38
$n_{\text{ef}, \text{mean}, \text{MLErc-ec}} / n^{1) 4)}$ [-]	0,95	0,91	-	0,80	
$n_{\text{ef}, 05, \text{MLErc-ec}} / n^{1) 4)}$ [-]	1,07	1,05	-	0,92	
$n_{\text{ef}, \text{mean}} / n^{2) 4)}$ [-]	0,91	0,91	0,94	0,79	0,80

¹⁾ unzensiert, mittels MLE für rechts-zensierte Daten – alle Prüfwerte berücksichtigt

²⁾ rechts-zensiert – nur Prüfwerte mit dem Versagensmechanismus Herausziehen berücksichtigt

³⁾ rechts-zensiert – alle Prüfwerte berücksichtigt

⁴⁾ mit Rohdichtekorrektur durch Verhältnisfaktor nach Brandner [34]

In Abbildung 4-13 sind die Ergebnisse Referenzprüfungen mit den Einzelschrauben als Boxplot und für jeden Gruppenprobekörper die maximale Kraft pro Schraube als Punkt dargestellt. Zwischen den Minimal- und Maximalwerten der Serie BU_01 zeigt sich eine Bandbreite von rund 9 kN pro Schraube. Der Mittelwert der Einzelversuche von 29,1 kN konnte im Mittel der Gruppe nicht erreicht werden. Wie in Abschnitt 4-1.4.1 bereits erläutert, traten die Risse zwischen den Schrauben mit der geringsten Einbindetiefe auf. Dies kann als vorzeitiges Versagen gegenüber möglichen Ausziehversagen betrachtet werden. Wird das 5 %-Quantil betrachtet, so liegt der Gruppenwiderstand mit 22,9 kN über jenem der Einzelschrauben mit 21,1 kN. Auffallend ist bei den erzielten Widerständen in Buche vor allem der hohe Variationskoeffizient von 11,6 %.

Zwischen den Minimal- und Maximalwerten der Serie BI_01 zeigt sich eine Bandbreite von rund 1,3 kN pro Schraube und bei der Serie BI_02 von 2,5 kN. Der Mittelwert der Einzelversuche von 15,3 kN konnte im Mittel nur durch die Serie BI_01 erreicht werden, bei der auch dasselbe Versagen Herausziehen erreicht wurde. Im Vergleich zu den Ergebnissen in Buche weisen die erzielten Widerstände eine mit 4,6 % geringere Streuung auf.

Zwischen den Minimal- und Maximalwerten der Serie BB_01 zeigt sich eine Bandbreite von rund 2,8 kN pro Schraube und bei der Serie BB_02 von 2,5 kN. Der Mittelwert der Einzelversuche von 30,5 kN (erhöhter Wert, da die Einzelversuche mit verringerter effektiver Schraubenlänge durchgeführt wurden) konnte von keinem Prüfkörper erreicht werden. Bei den Versuchen in BauBuche wurde mit einem Variationskoeffizient von 3,2 % die geringste Streuung des erzielten Widerstandes erreicht.

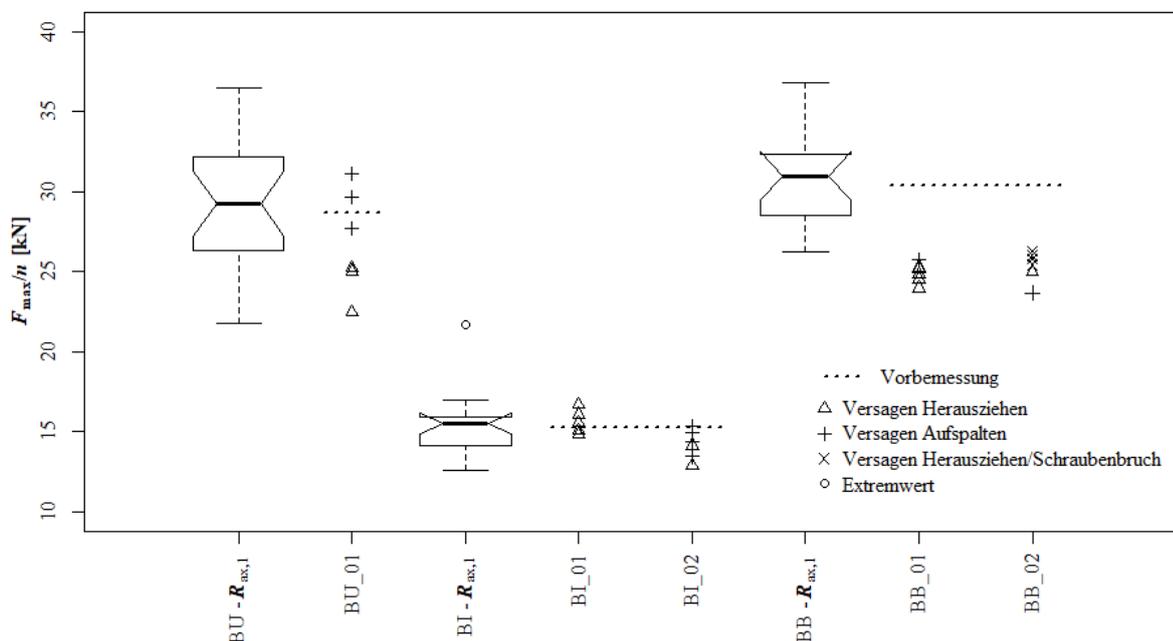


Abbildung 4-13 Gemessene maximale Kräfte pro Schraube der Einzelversuche als Boxplot und der Gruppenversuche als Punkte

In Abbildung 4-14, Abbildung 4-15 und Abbildung 4-16 sind die erzielten Ausziehfestigkeiten aller Einzelschraubenprüfungen und der Gruppenprüfungen zum Versagenszeitpunkt und die erzielbare Ausziehfestigkeit nach den Modellen von Brandner et al. [31] und Hübner [12] in Abhängigkeit der Rohdichte aufgetragen. Zu beachten ist bei dieser Betrachtung, dass für die Tragfähigkeit der Gruppe eine globale Rohdichte des Prüfkörpers zugeteilt wird. Beim Versagensverhalten und der erzielbaren Tragfähigkeit der Gruppe spielt die Variabilität der Verhältnisse je Schraube innerhalb der Gruppe jedoch eine Rolle.

In Abbildung 4-14 ist zu erkennen, dass die erzielte Ausziehfestigkeit der Serie BU_01 mit dem Modell nach Brandner et al. [31] gut angenähert werden kann. Der Mittelwert nach Brandner et al. [31] ergibt für die mittlere Rohdichte der Serie BU_01 von 731 kg/m^3 eine Ausziehfestigkeit von $11,7 \text{ N/mm}^2$. Der unzensurierte Mittelwert der Auszugsfestigkeit von $12,1 \text{ N/mm}^2$ weist demnach mit dem Mittelwert nach Brandner et al. [31] nur eine geringe Abweichung auf. Die erzielte Ausziehfestigkeit der Prüfungen mit Aufspaltversagen weisen auch im Mittel eine höhere Rohdichte auf. Es lässt sich daraus schließen, dass durch die erhöhte Ausziehfestigkeit infolge der höheren Rohdichte die damit einhergehenden höheren Querspannungen initiiert wurden und folglich die Risse in der Schraubenreihe mit der geringsten Einbindetiefe $l_{\text{emb}} = 5 d$ auftraten.

Die erzielte Ausziehfestigkeit der Prüfserien in Birke zeigen wie auch bei den Einzelversuchen eine bessere Übereinstimmung mit dem Modell nach Hübner [12]. Der Mittelwert nach Brandner et al. [31] ergibt für die mittlere Rohdichte der Serie BI_01 von 630 kg/m^3 eine Ausziehfestigkeit von $9,1 \text{ N/mm}^2$. Der unzensurierte Mittelwert der Ausziehfestigkeit von $6,7 \text{ N/mm}^2$ weist mit dem Modell nach Brandner et al. [31] demnach eine sehr hohe Abweichung von 26 % auf. Auch bei der Serie BI_02 versagten jene Prüfkörper mit höherer Rohdichte durch Aufspalten, weshalb man hier wie auch bei der Buche von einer zu geringen Einbindetiefe der Schrauben ausgehen muss.

Die gute Übereinstimmung der Einzelversuche in BauBuche mit dem Modell nach Brandner et al. [31] konnte bei den Gruppenversuchen nicht fortgesetzt werden. Hier zeigt sich ein wesentlicher Unterschied zwischen den erzielten Ausziehfestigkeiten und dem Modell. Ein Anstieg der Ausziehfestigkeit mit steigender Rohdichte ist nur in einem sehr geringen Ausmaß gegeben. Auch kann hier, im Gegensatz zu den Prüfungen von Buche und Birke, kein Zusammenhang von Spaltversagen mit höherer Rohdichte des Bauteils bemerkt werden.

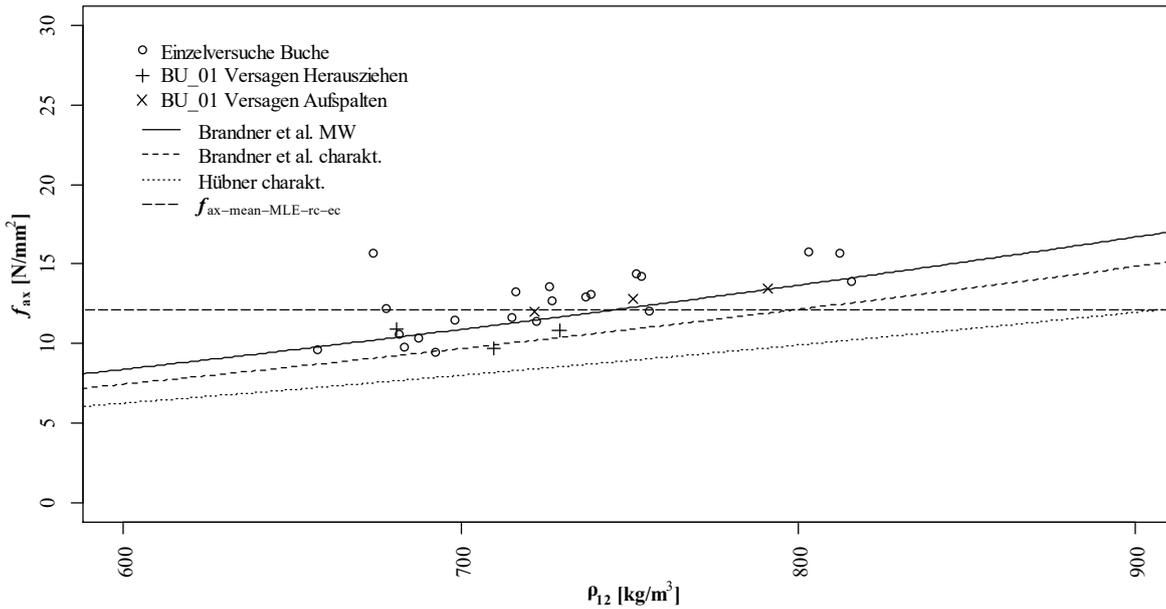


Abbildung 4-14 Ausziehfestigkeit zum Versagenszeitpunkt aller Einzelschraubenprüfungen und der Gruppenprüfungen der Hirnholzverbindungen in Buche verglichen mit der Berechnung nach Brandner et al. [31] und Hübner [12] und dem unzensierten Mittelwert der Ausziehfestigkeit der Gruppenprüfungen in Buche $f_{ax,mean,MLERC-ec}$

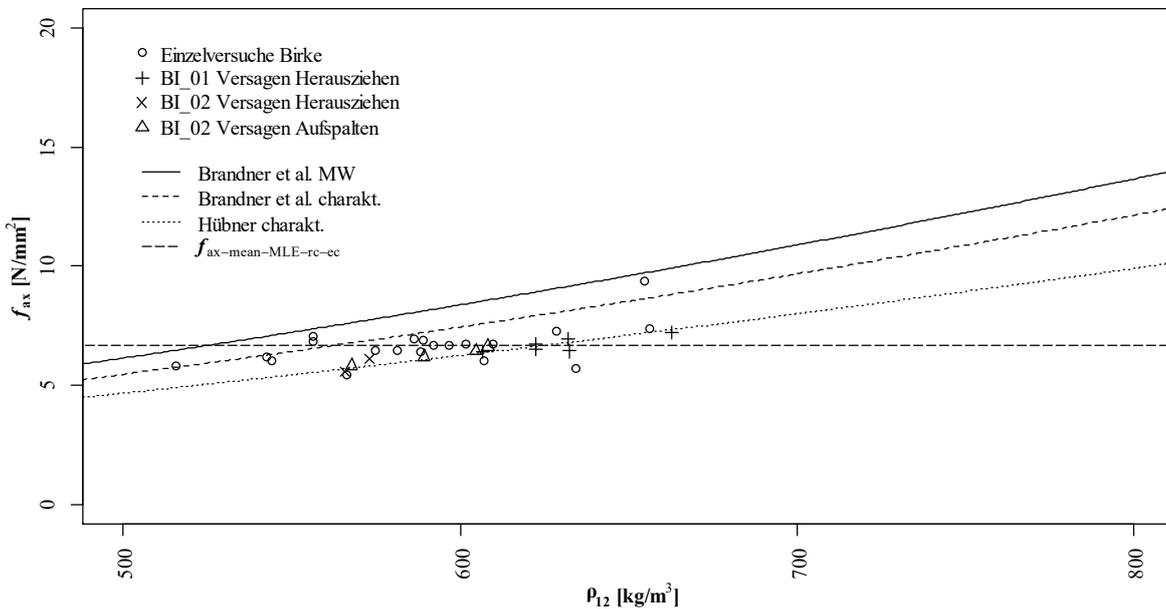


Abbildung 4-15 Ausziehfestigkeit zum Versagenszeitpunkt aller Einzelschraubenprüfungen und Gruppenprüfungen der Hirnholzverbindungen in Birke verglichen mit der Berechnung nach Brandner et al. [31] und Hübner [12] und dem unzensierten Mittelwert der Ausziehfestigkeit der Serie BI_01 $f_{ax,mean,MLERC-ec}$

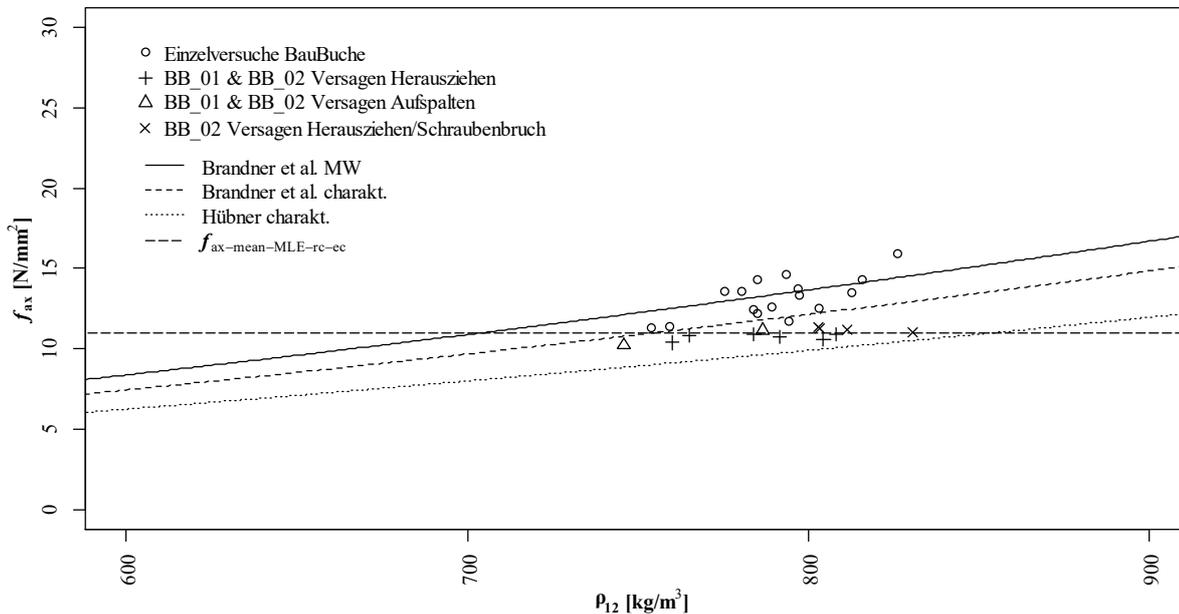


Abbildung 4-16 Ausziehfestigkeit zum Versagenszeitpunkt aller Einzelschraubenprüfungen und Gruppenprüfungen der Hirnholzverbindungen in BauBuche verglichen mit der Berechnung nach Brandner et al. [31] und Hübner [12] und dem unzensierten Mittelwert der Ausziehfestigkeit der Gruppenprüfungen $f_{ax,mean,MLERC-ec}$

4-1.4.3 Tragfähigkeit – Gegenüberstellung mit vorausgegangen Arbeiten

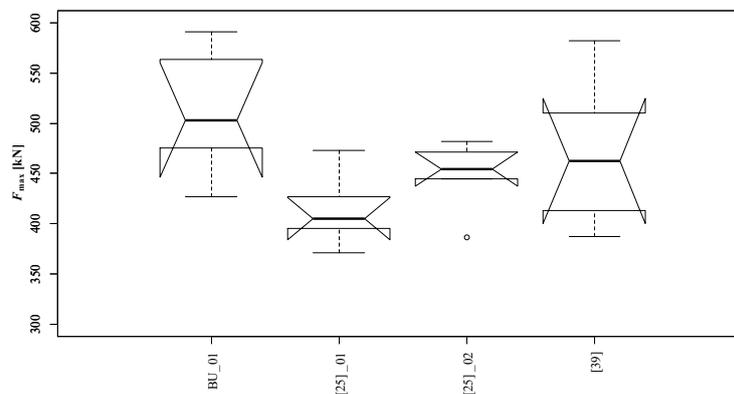
Da die in dieser Masterarbeit durchgeführten Prüfungen eine geringe Variabilität der für die Tragfähigkeit wesentlichen Parameter aufweisen, wird im Folgenden ein Vergleich der Ergebnisse von Prüfungen an Hirnholzverbindungen aus der Literatur durchgeführt, um einen besseren Eindruck der Abhängigkeit der Tragfähigkeit von den Parametern zu gewinnen. Zu diesem Zweck werden die Arbeiten von Koppauer [26] und Eckerstorfer [42] in Buche und BauBuche herangezogen und die Arbeiten von Obermayr [15] und Grabner und Ringhofer [40] in Birke.

In Tabelle 4-7 sind die Ergebnisse der Gruppenprüfungen der Hirnholzverbindung in Buche dieser Arbeit mit den Ergebnissen aus bereits durchgeführten Arbeiten der Literatur gegenübergestellt. Durch die Erhöhung der Einbindetiefe gegenüber den bereits durchgeführten Untersuchungen in Koppauer [26] mit äquivalenter Schraubengeometrie konnte das Aufspalten der Prüfkörper in drei von sechs Prüfkörpern verhindert werden. Es konnte somit eine Leistungssteigerung gegenüber der bereits durchgeführten Prüfserie mit abgestufter Einbindetiefe der Schrauben in Koppauer [26] erreicht werden. Die Untersuchungen von Koppauer haben aufgezeigt, dass durch die Abstufung der Schrauben eine Leistungssteigerung möglich ist. Ein Vergleich der Ergebnisse der Serie BU_01 mit Eckerstorfer [42] zeigt jedoch, dass die parabelförmige Abstufung der Schrauben keine signifikante Leistungssteigerung gegenüber einer konstanten Einbindetiefe der Schrauben zur Folge hat, solange eine Schraubenreihe eine zu geringe Einbindetiefe aufweist um die auftretenden Querkraftkräfte bei der Krafteinleitung aufzunehmen. (vgl. Abbildung 4-17)

Tabelle 4-7 Vergleich der Ergebnisse der Gruppenprüfungen mit Buche mit bereits durchgeführten Arbeiten in Koppauer [26] und Eckerstorfer [42]

Prüfserie	BU_01	[26]_01	[26]_02	[42]
a_2	3 d			
$a_{2,cg}$	3 d			
l_{emb}	5 d 9 d 11 d	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d	8,4 d
$\rho_{12,mean}$ [kg/m ³]	731	700	699	749
Versagen ¹⁾	3 H 3 ASP	5 ASP 1 H	6 ASP	3 H 3 S
$F_{max,mean,MLErc-ec}$ [kN]	529,7	425,7	461,2	496,6
$\eta_{netto,MLErc-ec}$ [-]	0,74	0,61	0,66	~0,72
$n_{ef,mean,MLErc-ec}/n$ [-]	0,95	0,87	0,94	-

¹⁾... H...Herausziehen; S...Schraubenbruch; ASP...Aufspalten


Abbildung 4-17 Boxplot der erzielten Widerstände der Versuche mit Buche der Prüfserie BU_01 und den Prüfserien aus Koppauer [26] und Eckerstorfer [42]

Wie man Tabelle 4-8 entnehmen kann, konnte bei den Prüfungen dieser Arbeit in BauBuche ein Aufspalten der Prüfkörper bis auf zwei Prüfkörper verhindert werden. Durch die Erhöhung der Einbindetiefe gegenüber den bereits durchgeführten Untersuchungen in Koppauer [26] und Eckerstorfer [42] konnte jedoch keine Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Verbindung erreicht werden. (vgl. Abbildung 4-18) Die effektive Verbindungsmittellanzahl lag mit 80 % der tatsächlichen Verbindungsmittellanzahl im selben Bereich wie bei den vorangegangenen Untersuchungen von Koppauer [26] und Eckerstorfer [42]. Der erzielte Auszieh widerstand lag sogar leicht unter den Ergebnissen von Eckerstorfer [42], was jedoch auch auf die um rund 8 % höhere Rohdichte der Prüfkörper bei Eckerstorfer [42], bzw. einem Verhältnisfaktor nach Brandner [34] von $k_p = 1,13$, zurückgeführt werden kann. Der niedrigere Wirkungsgrad bezogen auf den Nettoquerschnitt ist auf die veränderte charakteristische Festigkeit der BauBuche zurückzuführen. Diese war bei den Versuchen von Koppauer [26] und Eckerstorfer [42] laut Zulassung zum Zeitpunkt der Prüfungen [43] geringer als jene zum Zeitpunkt dieser Arbeit. [5] Der geringe Wirkungsgrad der geprüften Verbindungen lässt darauf schließen, dass für die Einleitung der Schraubkraft in das Furnierschichtholz BauBuche ein größeres Volumen von Nöten ist. Dies kann nach Ansicht des Verfassers einerseits durch eine Erhöhung der effektiven Schraubenlänge erfolgen und somit einem Anstreben des Versagensmechanismus Schraubenbruch bei weiteren Prüfungen mit BauBuche. Bei äquivalentem Schraubenbild, einer effektiven Verbindungsmittellanzahl von 80 % der vorhandenen Verbindungsmittellanzahl und einer charakteristischen Zugtragfähigkeit von 36 kN der Schrauben würde sich dadurch ein Ausnutzungsgrad bezogen auf den Nettoquerschnitt von 46 % ergeben. Dieser Ausnutzungsgrad ist im Vergleich zu den Ergebnissen von Buche und

Birke jedoch ebenfalls sehr gering und somit ineffizient. Für einen effizienten Hirnholzanschluss in BauBuche sind somit Schrauben mit einer höheren Zugtragfähigkeit gefragt.

Tabelle 4-8 Vergleich der Ergebnisse der Gruppenprüfungen mit BauBuche mit bereits durchgeführten Arbeiten in Koppauer [25] und Eckerstorfer [39]

Prüfserie	BB_01	BB_02	[26]_1	[26]_2	[42]
a_2	3 d 4 d				
$a_{2,cg}$	3 d				
l_{emb}	11 d	11 d	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d	8,4 d
$\rho_{12,mean}$ [kg/m ³]	791		832	822	866
Versagen ¹⁾	5 H 1 ASP	1 H 4 H/S 1 ASP	6 ASP	6 ASP	1 H 2 H/S 3 ASP
$F_{max,mean,MLErc-ec}$ [kN]	482,6		469,1	488,4	501,8
$\eta_{netto,MLErc-ec}$ [-]	0,39		0,43	0,45	~0,48
$n_{ef,mean,MLErc-ec}/n$ [-]	0,80		0,77	0,80	-

¹⁾ ... H...Herausziehen; H/S...Herausziehen/Schraubenbruch; ASP...Aufspalten

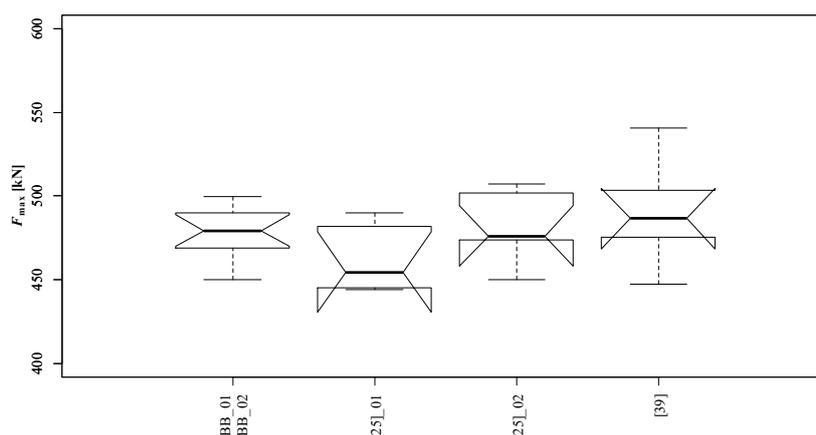


Abbildung 4-18 Boxplot der erzielten Widerstände der Versuche mit BauBuche der Prüfserien BB_01 und BB_02 und den Prüfserien aus Koppauer [26] und Eckerstorfer [42]

Bei den Prüfungen in Buche und Birke konnte ein Zusammenhang von Aufspaltversagen mit überdurchschnittlicher Rohdichte des Prüfkörpers bemerkt werden. Eine höhere Rohdichte führt demnach zu einer höheren Ausziehfestigkeit und damit zu höheren auftretenden Querspannungen im Kräfteinleitungsbereich der Schrauben. Da die Querspannungsfestigkeit des Materials Holz sehr gering mit der Rohdichte steigt, führt dies zum Aufspaltversagen bei den Prüfkörpern höherer Rohdichte. Bei den Prüfungen in BauBuche konnte dieser Zusammenhang jedoch nicht bestätigt werden. Eine Betrachtung der Ergebnisse von Eckerstorfer [42] (vgl. Abbildung 4-19) bestätigt diese Diskrepanz.

Laut Reichinger [9] kommt es aufgrund des Produktionsprozesses des Produktes BauBuche im Schälprozess der Furniere zu einer unvermeidbaren Mikrorissbildung im Holz. Die damit ohnehin bereits geringen Querspannungsfestigkeiten in tangentialer Richtung erfahren demnach somit zusätzlich eine Reduktion, welche auch durch den Systemeffekt bei der Fügung der einzelnen Furniere zum Furnierschichtholz durch Verklebung nur bedingt gemindert werden kann. Dies führt wie im Fall der BauBuche zu einer besonders geringen charakteristischen Querspannungsfestigkeit.

Die erzielten Ergebnisse zeigen auf, dass diese Schwächung unabhängig von der Rohdichte ist. Um diesen Umstand in der Bemessung von Hirnholzverbindungen in BauBuche Rechnung zu tragen sind folglich konservativere Annahmen bei der Berechnung des erzielbaren Auszieh Widerstandes erforderlich.

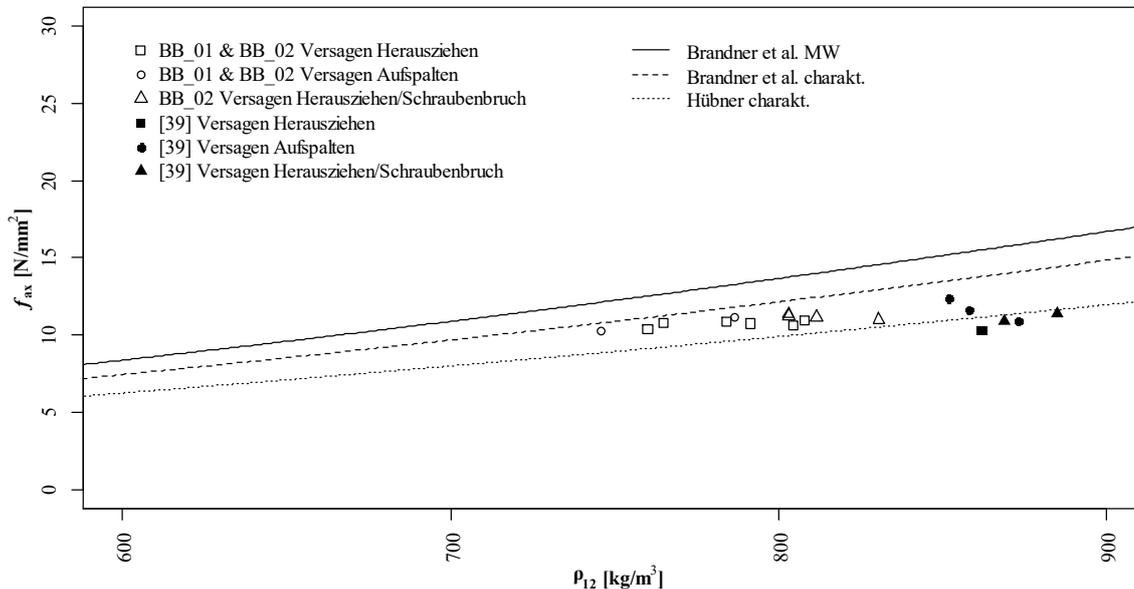


Abbildung 4-19 Ausziehfestigkeit zum Versagenszeitpunkt in Abhängigkeit der Rohdichte der Gruppenprüfungen der Hirnholzverbindungen in BauBuche der Serien BB_01 und BB_02 sowie den Prüfungen in Eckerstorfer [42] verglichen mit der Berechnung nach Brandner et al. [30] und Hübner [11]

Bei den Gruppenversuchen der Hirnholzverschraubungen in Birke konnte ein Aufspalten der Prüfkörper bei den Versuchen mit $l_{emb} = 10 d$ verhindert werden. Bei den Versuchen mit $l_{emb} = 5 d$ spalteten drei von sechs Prüfkörpern auf, was darauf schließen lässt, dass diese Einbindetiefe zu gering für eine zuverlässige Verbindung ist. Beim Vergleich mit den Ergebnissen von Grabner und Ringhofer [40] und Obermayr [15] zeigt sich, dass durch die erhöhten Schraubenabstände, Randabstände und Einbindetiefen der Schrauben eine wesentlich höhere Ausziehfestigkeit der Schrauben erreicht werden konnte. (vgl. Tabelle 4-9) Bei der Prüferserie BI_01 entsprach die effektive Verbindungsmittelanzahl 91 % der Anzahl der vorhandenen Schrauben bei reinem Versagen durch Herausziehen, wodurch sich der Schluss ziehen lässt, dass die geprüften Parameter von $l_{emb} = 10 d$, $a_2 = 3 d$ und $a_{2,cg} = 3 d$ ausreichend sind, um einen zuverlässigen und leistungsfähigen Hirnholzanschluss in Birke herzustellen.

Tabelle 4-9 Vergleich der Ergebnisse der Gruppenprüfungen mit Birke mit bereits durchgeführten Arbeiten in Grabner und Ringhofer [37] und Obermayr [14]

Prüferserie	BI_01	BI_02	[40]	[15]
d [mm]	8	8	10	10
a_2	3 d		2,1 d	2,1 d
$a_{2,cg}$	3 d		2,8 d	2 d
l_{emb}	10 d	5 d	5 d	5 d
Versagen ¹⁾	6 H	3 ASP 2 H 1 S	10 S	1 ASP
$f_{ax,mean,MLErc-ec}$ [N/mm ²]	6,7	5,8 ²⁾	4,7	5,5
$\eta_{netto,MLErc-ec}$ [-]	0,73	0,66 ²⁾	-	0,86
$n_{ef,mean}/n$ [-]	0,91	0,94 ²⁾	0,92	-

¹⁾ H...Herausziehen; S...Schraubenbruch; ASP...Aufspalten

²⁾ rechts-zensiert – nur Prüfwerte mit dem Versagensmechanismus Herausziehen berücksichtigt

4-1.4.4 Steifigkeit

In Tabelle 4-10 sind die Mittelwerte der ausgewerteten Verschiebungsmodule K_{ser} jeder Prüfserie dargestellt. Zusätzlich ist die effektive Verbindungsmittelanzahl als Mittelwert der Serie für BauBuche angegeben. Es muss weiters angemerkt werden, dass die Einzelreferenzversuche mit einer Einbindetiefe $l_{emb} = 68$ mm und die Gruppen mit $l_{emb} = 80$ mm geprüft wurden. Eine Auswertung von K_{ser} bei der Prüfserie BI_02 sowie jener Teil von BB_02 mit einem Anziehdrehmoment von 40 Nm konnte aufgrund der Auswirkungen der Vorspannwirkung auf die Arbeitslinie nicht durchgeführt werden. (vgl. Abschnitt 3-3.3.6)

Tabelle 4-10 *Ermittelte Verschiebungsmodule K_{ser} der Gruppenversuche der Hirnholzverbindungen mit angegebenem Anziehdrehmoment der Schrauben und dem Verhältnis der effektiven zur vorhandenen Verbindungsmittelanzahl*

	BU_01	BI_01	BI_02	BB_01	BB_02_1	BB_02_2	BB_LV
Anzahl Prüfkörper [-]	6	6	6	6	3	3	1
Anziehdrehmoment [Nm]	30	30	15	30	20	40	40
Zeitspanne zw. Herstellung u. Prüfung	< 1 h	< 1 h	< 1 h	< 1 h	< 1 h	< 1 h	~ 8 Monate
$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	506	2043	-	484	460	-	478
COV [%]	7,6	8,8	-	3,6	1,1	-	-
$n_{ef,mean} / n^1$ [-]	-	-	-	0,85	0,80	-	0,84

¹⁾ *Bezogen auf die Referenzversuche in BauBuche*

In Abbildung 4-20 sind die ausgewerteten Verschiebungsmodule als Boxplot dargestellt. Die Ergebnisse mit einem Variationskoeffizienten von 3,6 % der ausgewerteten Verschiebungsmodule der Serie BB_01 weisen eine sehr geringe Streuung bei BauBuche auf. Die Streuung der Ergebnisse der Buche ist mit einem Variationskoeffizienten von 7,6 % ist wesentlich höher. Dieser Umstand wird auf das homogene Material der BauBuche zurückgeführt.

Zwischen den Serien BB_01 und BB_02 ist kein signifikanter Unterschied der ausgewerteten Verschiebungsmodule zu erkennen. Das unterschiedliche Anziehdrehmoment hatte folglich keine Auswirkung auf die ausgewerteten Steifigkeiten.

Die Prüfkörper der Referenzversuche der Steifigkeit wurden den Mittelteilen der Prüfkörper der Serien BB_01 und BB_02 entnommen, weshalb man von vernachlässigbar kleinen Variabilitäten der Rohdichte der Serien ausgehen kann. Bei der BauBuche ist kein signifikanter Unterschied zwischen der effektiven Verbindungsmittelanzahl der Tragfähigkeit mit 80 % und der Gebrauchstauglichkeit mit 85 % zu erkennen.

Der ausgewertete Mittelwert von K_{ser} der Serie BI_01 ist im Vergleich zu den Serien mit Buche, BauBuche und den Referenzversuchen viermal so hoch. Diese Diskrepanz führt der Verfasser indirekt auf die Auswirkungen der Vorspannung zurück. Bei dieser Serie und der Serie BI_02 drehten vereinzelt Schrauben beim Anziehen mit 30 Nm durch. Daraus ist zu schließen, dass durch das Anziehdrehmoment eine Spannung entlang der Schraube nahe dem Ausziehversagen entstand, weshalb die aufgezeichnete Last-Verformungskurve noch den überdrückten Bereich laut Abschnitt 3-3.3.6 abbildet. Ein Vergleich der ermittelten Werte von K_{ser} der Serie BI_01 mit den Steigungen der Last-Verformungskurve im überdrückten Bereich der Serien mit Buche und BauBuche zeigten dabei, dass diese Werte eine gute Übereinstimmung liefern.

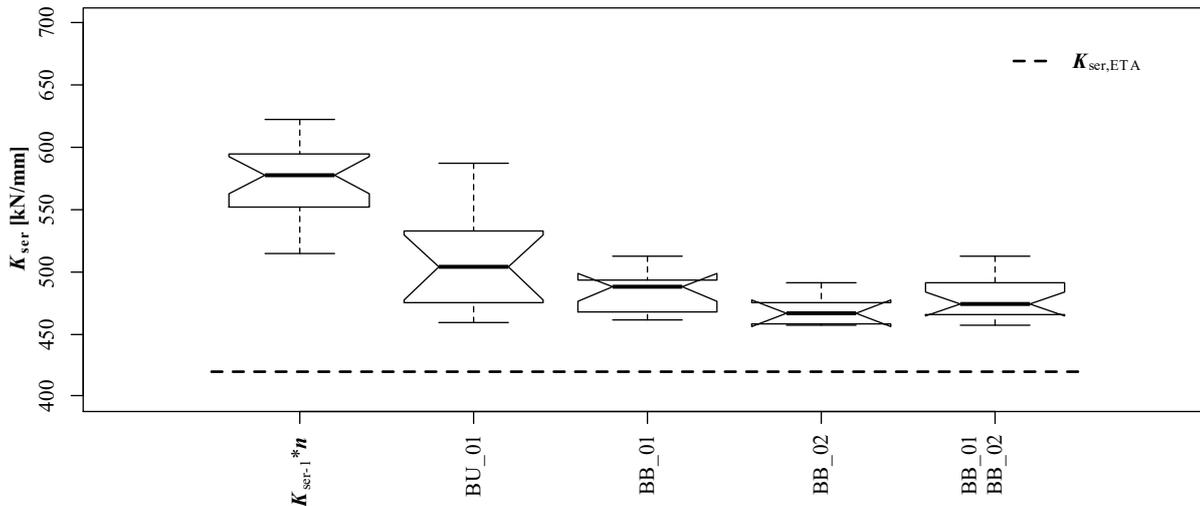


Abbildung 4-20 Boxplot der ausgewerteten Verschiebungsmodule der Gruppenversuche sowie der Referenzversuche multipliziert mit der Schraubenanzahl der Gruppenversuche $n = 19$ verglichen mit dem Verschiebungsmodul nach ETA-12/0373 [21]

Bei der Auswertung der Verschiebungsmodule konnte in dieser Arbeit ein Einfluss des Anziehdrehmoments der Schrauben auf die Steifigkeit der Verbindungen mit Hirnholzverschraubungen festgestellt werden. In den ausgewerteten Kraft-Weg-Diagrammen konnte die Abhängigkeit der Anfangssteifigkeit vom Anziehdrehmoment beobachtet werden. Die Begründung liegt in der beim Anziehen der Schrauben aufgebauten Anpressung der Stahlplatten an das Hirnholz des Prüfkörpers, was eine Vorspannungswirkung der Verbindung zur Folge hatte. Bei dem acht Monate vor der Prüfung hergestellte Anschluss mit 40 Nm angezogenen Schrauben aus BauBuche (BB_LV), konnte festgestellt werden, dass sich rund 25 % der Vorspannungswirkung in der Lagerzeit abgebaut hatten und das Kraft-Weg-Diagramm dieser Prüfung ähnlich den Kurzzeitversuchen mit einem Anziehdrehmoment von 30 Nm resultierte. (vgl. Abbildung 4-21) Daraus lässt sich schließen, dass die Vorspannungswirkung keine dauerhafte Versteifung der Verbindung zur Folge hat und deshalb bei der Bemessung von Tragwerken eine untergeordnete Rolle spielt.

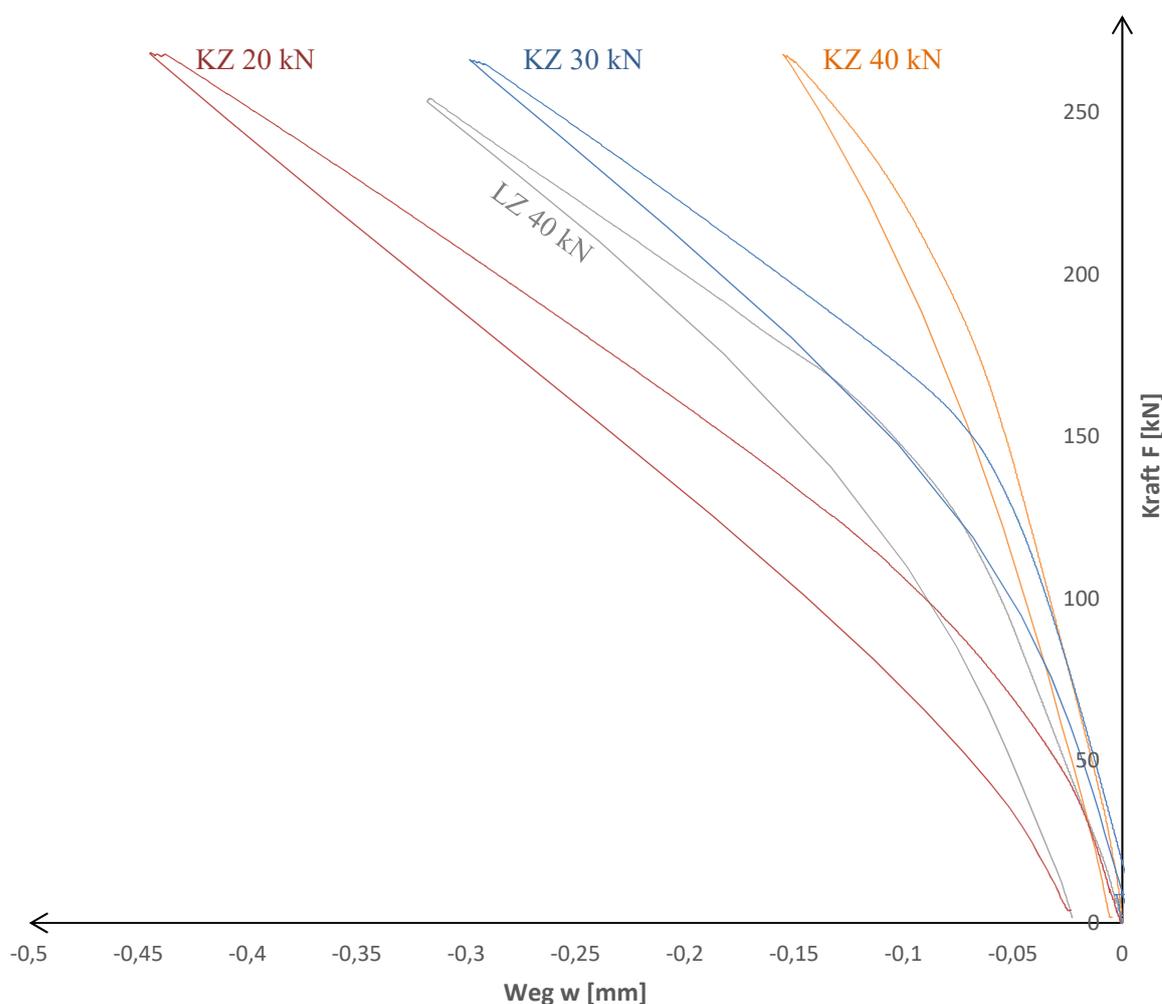


Abbildung 4-21 Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Beziehungen der Prüfserien mit variierten Anziehdrehmoment und des Langzeitversuches BB_LV mit BauBuche; rot: Kurzzeitversuch mit Anziehdrehmoment 20 Nm; blau: Kurzzeitversuch mit Anziehdrehmoment 30 Nm; gelb: Kurzzeitversuch mit Anziehdrehmoment 40 Nm; grau: Langzeitversuch mit Anziehdrehmoment 40 Nm

Anhand dieser neuen Erkenntnisse und um die in dieser Masterarbeit ausgewerteten Verschiebungsmodule zu validieren, wurde eine Neuauswertung der Verschiebungsmodule von Koppauer [26] durchgeführt. Eine Neuauswertung konnte bei Eckerstorfer [42] nicht durchgeführt werden, da hier die Schrauben mit einem Anziehdrehmoment von 40 Nm angezogen wurden und somit der komplette Aufzeichnungsbereich der Kraft-Weg-Beziehung sich im überdrückten Bereich laut Abschnitt 3-3.3.6 befand. Die Auswertung erfolgte im äquivalenten Bereich wie bei den Serien dieser Masterarbeit.

In Koppauer [26] wird das Anziehdrehmoment mit 40 Nm angegeben. Bei der Neuauswertung von K_{ser} konnte jedoch festgestellt werden, dass die Lage des Knicks in der Kraft-Verformungslinie sehr variierte. Aus diesem Grund konnte bei der Serie 02 in Buche von Koppauer [26] lediglich eine Prüfung ausgewertet werden, während bei der Serie 01 in Buche faste keine Vorspannwirkung vorhanden war. (vgl. Tabelle 4-11)

Anhand dieser Ergebnisse ist erkennbar, dass die Steifigkeit in Koppauer [26] durch eine Auswertung zwischen 10 % und 40 % der Maximallast zwar nach ÖNORM EN 26891 [71] korrekt erfolgte, aber massiv überschätzt wurde. In Koppauer [26] wurden die hohen Steifigkeiten der Prüfserien mit abgestuftem Schraubenbild auf eine mögliche Umlagerung im Belastungsfall zwischen den Schrauben zurückgeführt. In Abbildung 4-22 ist erkennbar, dass es keinen signifikanten Unterschied der Steifigkeit zwischen einem konstanten und einem abgestuften Schraubenbild gab.

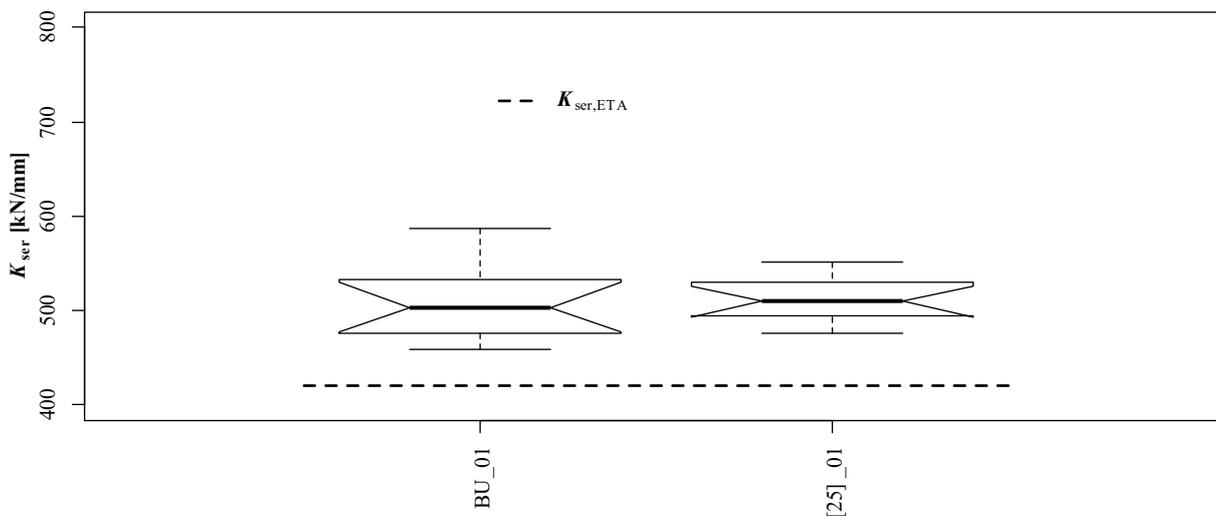
Tabelle 4-11 Vergleich der ausgewerteten Verschiebungsmodule der Serie BU_01 mit den neu ausgewerteten Ergebnissen von Koppauer [26] in Buche

	BU_01	[26]_01	[26]_02
Anzahl Prüfkörper [-]	6	6	6
l_{emb}	5 d 9 d 11 d	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d
Anziehdrehmoment [Nm]	30	(40) ¹⁾	(40) ¹⁾
Auswertungsbereich	200 kN – 250 kN ~ (35 % - 55 %) x F_{max}	200 kN – 250 kN ~ (40 % - 65 %) x F_{max}	200 kN – 250 kN ~ (40 % - 55 %) x F_{max}
$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	506	511	486 ²⁾
$K_{ser,mean}$ [kN/mm] nach Koppauer [26]	-	554	1452
COV [%]	7,6	4,9	-
$n_{ef,mean}/n^3$ [-]	0,88	0,89	0,85 ²⁾

¹⁾ Koppauer [26] gibt diesen Wert an, die Kraft-Weg-Beziehung der Prüfungen lässt jedoch auf variierende Anziehdrehmomente schließen

²⁾ Nur ein Wert

³⁾ Bezogen auf die Referenzversuche in BauBuche


Abbildung 4-22 Boxplot der ausgewerteten Verschiebungsmodule der Versuche mit Buche der Prüfserien BU_01 und der Prüfserie 01 in Buche aus Koppauer [25] verglichen mit der Steifigkeit nach ETA-12/0373 [21]

Auch bei der Neuauswertung der Steifigkeit der Versuche bei BauBuche konnte anhand der Kraft-Weg-Beziehungen festgestellt werden, dass das Anziehdrehmoment in Koppauer [26] möglicherweise nicht einheitlich gewählt wurde. Dadurch überschätzt die Auswertung zwischen 20 % und 40 % der Maximallast die Steifigkeiten. (vgl. Tabelle 4-12)

In Abbildung 4-23 ist ersichtlich, dass auch bei den Versuchen in BauBuche kein signifikanter Unterschied der Steifigkeit zwischen konstantem und abgestuftem Schraubenbild zu erkennen ist. Die erkennbaren Extremwerte der Serie 02 aus Koppauer [26] erzielte der Prüfkörper mit höchster Rohdichte und Tragfähigkeit und einem Versagen durch Aufspalten. Dem Verfasser ist nach umfangreicher Recherche der Grund dieser Extremwerte nicht ersichtlich, da insbesondere auch die Kraft-Weg-Beziehung dieser Prüfung keine Auffälligkeiten aufweist.

Tabelle 4-12 Vergleich der ausgewerteten Verschiebungsmodule der Serie BB_01 und BB_02 mit den neu ausgewerteten Ergebnissen von Koppauer [26] in BauBuche

	BB_01	BB_02_1	[25]_01	[25]_02
Anzahl Prüfkörper [-]	6	3	6	6
l_{emb}	11 d	11 d	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d
Anziehdrehmoment [Nm]	30	20	(40) ¹⁾	(40) ¹⁾
Auswertungsbereich	190 kN – 250 kN ~(40 % - 55 %) x F_{max}	140 kN – 250 kN ~(30 % - 55 %) x F_{max}	230 kN – 290 kN ~(45 % - 65 %) x F_{max}	230 kN – 290 kN ~(42 % - 53 %) x F_{max}
$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	484	460	434	476
$K_{ser,mean}$ [kN/mm] nach Koppauer [26]	-	-	566	1102
COV [%]	3,6	1,1	3,8	12,3
$n_{ef,mean}/n^2$ [-]	0,85	0,80	0,76	0,83

¹⁾ Koppauer [26] gibt diesen Wert an, die Kraft-Weg-Beziehung der Prüfungen lässt jedoch auf variierende Anziehdrehmomente schließen

²⁾ Bezogen auf die Referenzversuche in BauBuche

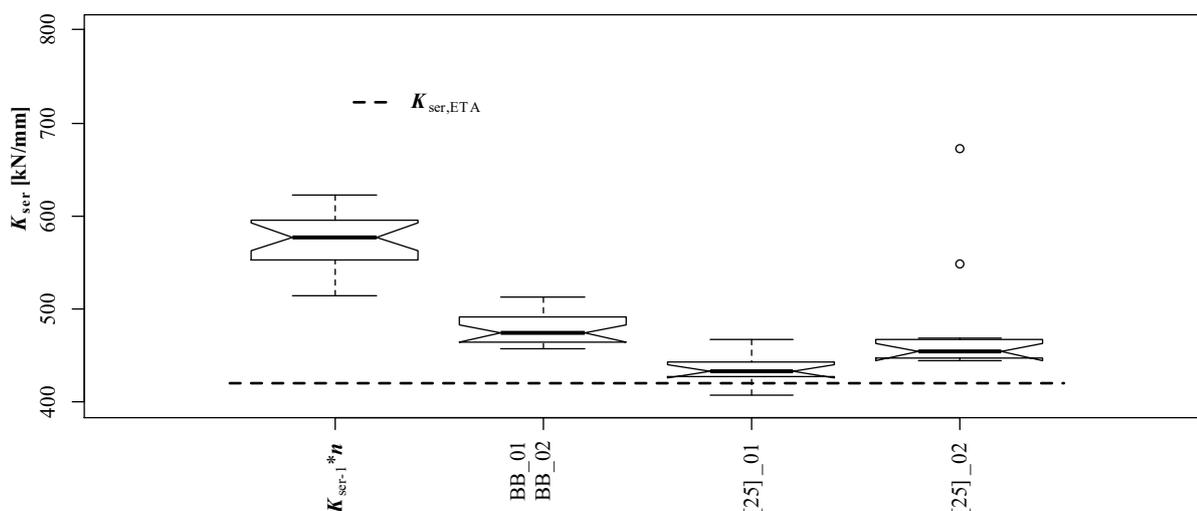


Abbildung 4-23 Boxplot der ausgewerteten Verschiebungsmodule der Versuche mit BauBuche der Prüferien BB_01, BB_02 und der Referenzversuche multipliziert mit der Schraubenanzahl $n = 19$ und der Prüferie 01 und 02 in BauBuche aus Koppauer [25] verglichen mit der Steifigkeit nach ETA-12/0373 [21]

4-2 VERSUCHE MIT GENEIGT ANGEORDNETEN SCHRAUBENGRUPPEN

Sämtliche hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Auswertungen welche in Mahlknecht [67] veröffentlicht wurden.

4-2.1 FEUCHTIGKEIT UND ROHDICHTE

Die Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Holzfeuchte und der Rohdichte der Prüfkörper sind für jede Prüfserie in Tabelle 4-13 angeführt.

Tabelle 4-13 *Mittlere Holzfeuchte und Rohdichte aller Serien der Versuche mit geneigt angeordneten Schrauben in Buche und Birke*

Prüfserie	Holzart	Anzahl PK [-]	$\rho_{12,mean}$ [kg/m ³]	COV [%]	u_{mean} [%]	COV [%]
Einzel_BU	BU	17	733	6,1	9,5	4,2
a	BU	7	716	3,9	10,2	2,5
b	BU	6	722	6,3	10,2	3,0
c	BU	7	729	5,4	10,0	2,1
d	BU	6	696	5,8	10,0	3,4
e	BU	4	678	4,0	9,7	2,7
Einzel_BI	BI	18	610	5,7	10,7	1,8
f	BI	6	594	5,5	10,7	1,0

In Abbildung 4-24 sind die Boxplots der Holzfeuchteverteilung der Prüfserien dargestellt. Die Holzfeuchte der Prüfkörper aus Buche variierte zwischen 9,7 % und 10,2 %. Zwischen den Einzelversuchen und den Gruppenversuchen zeigt sich ein Unterschied von 0,2 % bis 0,7 % der Mittelwerte. Dieser Umstand ist auf die Zeitspanne von rund drei Monaten zwischen diesen Prüfungen zurückzuführen. Der Mittelwert der Holzfeuchtigkeit aller Prüfkörper in Buche betrug 10,0 %. Die Prüfkörper aus Birke wiesen eine Holzfeuchte von 10,7 % sowohl für die Gruppen- als auch für die Einzelprüfkörper auf.

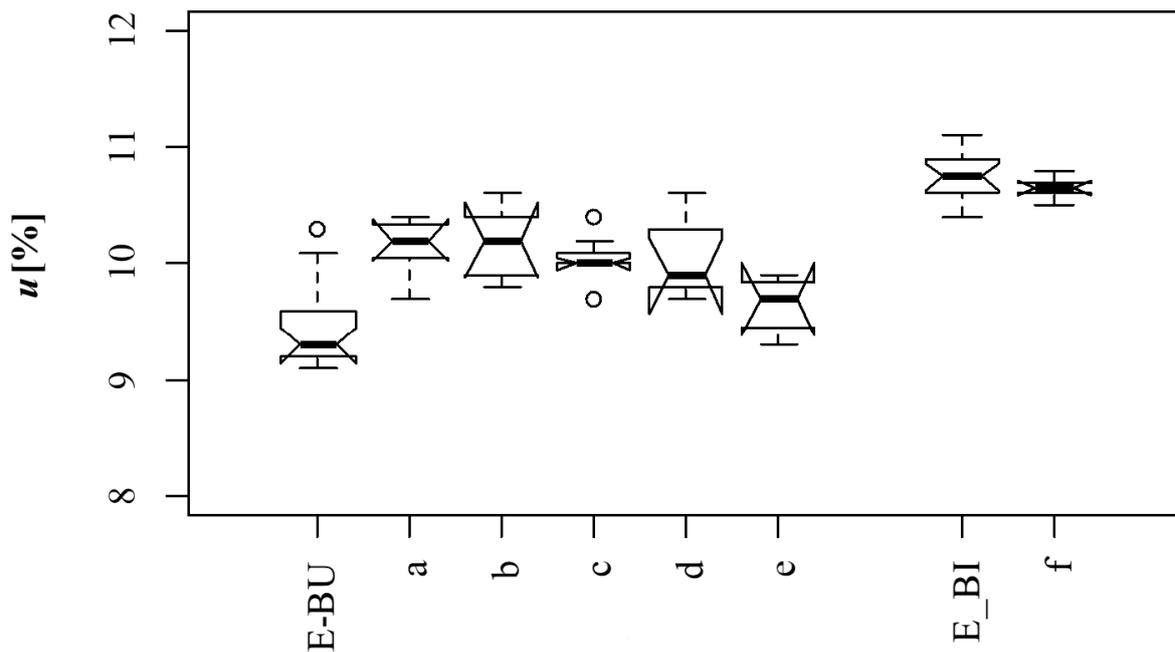


Abbildung 4-24 Boxplot der Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper der Versuche mit geneigt angeordneten Schrauben aus [67]

Bei den Prüfungen in Buche und Birke zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Rohdichtevertelung der einzelnen Prüfserien. (vgl. Abbildung 4-25) Bei der Berechnung der Werte mit Bezug auf die Referenzprüfungen im Zuge der Auswertung der Prüfdaten der Tragfähigkeit, wurde laut Mahlkecht [67] die geringen Rohdichteunterschiede berücksichtigt. Diese wurde mit Hilfe des Verhältnissfaktors von Brandner [34] (vgl. Abschnitt 2-4.3.3) durchgeführt. Dieser Faktor $k_p = (\rho_{12,Gruppe-mean} / \rho_{12,Einzel-mean})^{1,6}$ liegt beispielsweise bei der Serie a und f bei 0,96 und können Tabelle 4-14 entnommen werden.

Tabelle 4-14 Verhältnissfaktoren nach Brandner [34] für die Ergebnisse der Tragfähigkeiten der Gruppenversuche mit Bezug auf Einzelversuche der Versuche mit geneigt angeordneten Schrauben

	a	b	c	d	e	f
k_p [-]	0,96	0,98	0,99	0,92	0,88	0,96

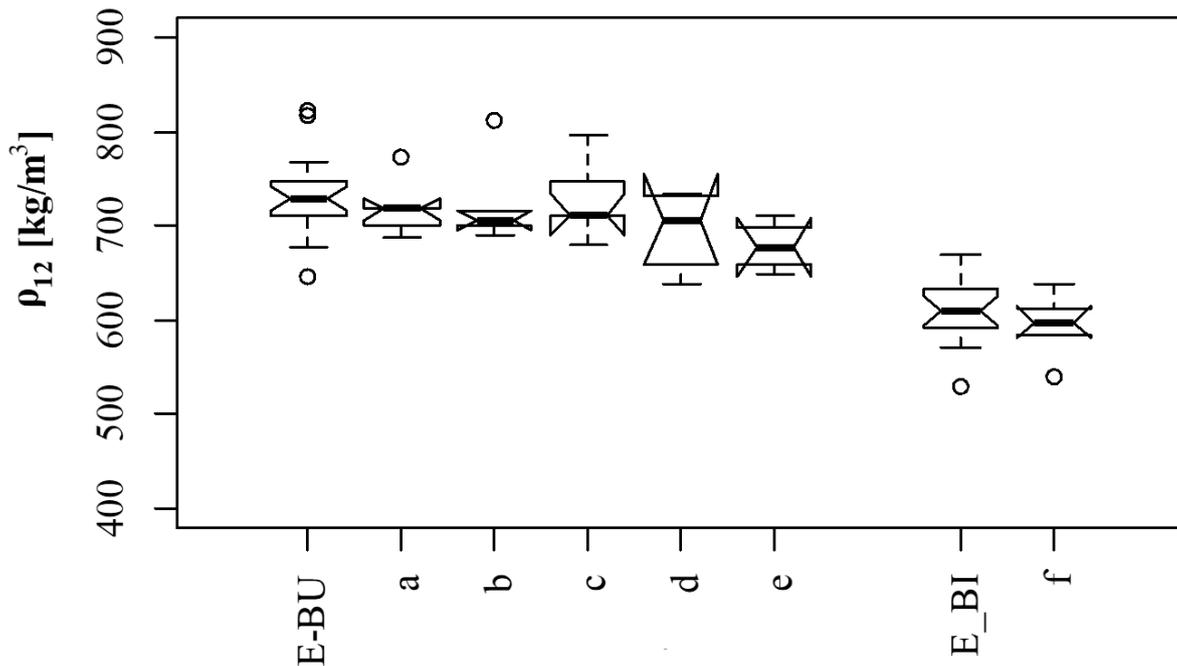


Abbildung 4-25 Boxplot der Rohdichte der Prüfkörper der Versuche mit geneigt angeordneten Schrauben aus [67]

4-2.2 BEOBACHTUNGEN UND VERSAGENSMECHANISMEN

Aufgrund der verwendeten Länge der BauBuchen-Q-Laschen ergaben sich große Abstände zwischen den Zughölzern. Im Fall des Hirnholzabstandes von $a_{1,cg} = 5 d$ drückte bei Beanspruchung der Schraubenkopf der ersten Schraube gegen den freien Bereich, jenen Bereich, in dem sich bei Serie a, b und c kein Mittelholz befand. Dadurch kam es zu starken Verformungen der Zuglaschen, siehe Abbildung 4-26. Um die Biegeverformungen der Zuglaschen zu verringern, wurden die folgenden Prüfserien d, e und f mit einem Abstandsholz durchgeführt. In diesen Prüfserien konnte aufgrund dieses Abstandsholzes die lokale Wegmessung nicht durchgeführt werden.

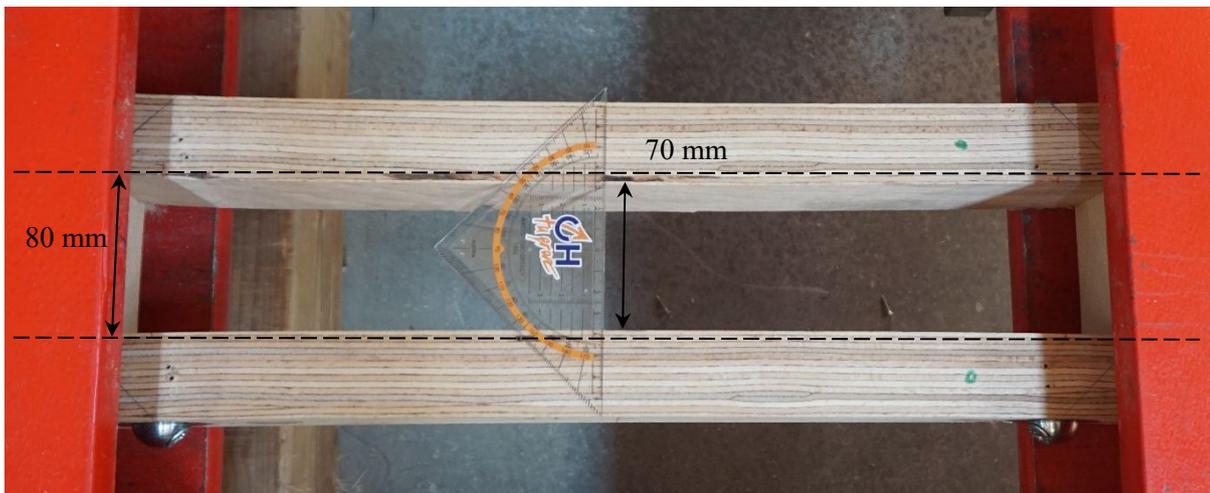


Abbildung 4-26 Verformung der Zuglaschen beim Zuglaschenstoß ohne Abstandsholz aus [67]

Bei den Prüfungen konnten laut [67] neben dem Ausziehversagen und dem Stahlbruch der Schrauben auch ein Aufspalten entlang der Schraubenreihe, Zugbrüche und Abscheversagen der BauBuche-Q-Laschen und ein Einziehen der Senkscheiben in die BauBuche-Q-Laschen beobachtet werden. Ein Reihenscheren konnte bei den Prüfungen nicht beobachtet werden.

Beim Ausziehversagen war in der vorgebohrten Einbindetiefe l_{emb} bei Serie a, b und c mit dem Vorbohrdurchmesser $d_{PD} = 8$ mm deutlich das eingedrückte Gewinde und dessen Verschiebung ersichtlich, weshalb für die folgenden Serien der Vorbohrdurchmesser auf 10 mm erhöht wurde. (vgl. Abbildung 4-27)



Abbildung 4-27 *Detailansicht Schraubenloch; Vorbohrdurchmesser $d_{PD} = 8$ mm; links: Ausziehversagen; rechts: ohne Versagen*

Das Aufspalten entlang der Schraubenreihe trat bei einigen Prüfungen mit dem Hirnholzabstand $a_{1,cg} = 5 d$ und starker Biegeverformung der BauBuche-Q-Laschen bei den Versuchen ohne Abstandsholz auf. Hier bildeten sich Risse in Faserrichtung des Holzes und meist trat nach dem Erreichen des maximalen Widerstandes auch ein Ausscheren eines kleinen Blockes nahe der Hirnholzseite auf. (vgl. Abbildung 4-28)



Abbildung 4-28 *links: Aufspalten entlang einer Schraubenreihe; rechts: Ausscheren eines kleinen Blockes an der Hirnholzseite; aus [67]*

Aufgrund der sehr knappen Dimensionierung der BauBuche-Q-Laschen kam es ebenso zu einem Zug- oder Abscherversagen der Laschen. Die Vorbemessung (vgl. Abschnitt 3-3.2) ergab durch die Abscher- und Querdruckbeanspruchung durch die Unterlegscheibe eine Ausnutzung > 1 . Laut [67] wurde bei Vorversuchen jedoch ein ausreichender Widerstand festgestellt. Bei den Prüfungen kam es bei zwei Versuchen zum Versagen der Laschen. Bei Prüfungen mit diesem Versagen wurden nur die Daten der Wegmessung ausgewertet.



Abbildung 4-29 *links: Zugversagen der BauBuche-Q-Laschen; rechts: Abscherversagen der BauBuche-Q-Laschen; aus [67]*

Bei der Verwendung der Winkelscheibe 45° Hartholz trat ein Einziehen in den BauBuche-Q-Laschen auf. In weiterer Folge kam es teilweise zum Abscheren zwischen den Senkbohrungen oder zum Bruch der BauBuche-Q-Laschen.



Abbildung 4-30 Kopfdurchziehen in den BauBuche-Q-Laschen mit teilweisen Abscheren zwischen den Senkbohrungen; aus [67]

4-2.3 TRAGFÄHIGKEIT

In Tabelle 4-15 sind die Ergebnisse der Versuche mit geneigt angeordneten Schraubengruppen dargestellt.

Tabelle 4-15 Ergebnisse der Tragfähigkeit der Versuche mit geneigt angeordneten Schraubengruppen aus [67]

Prüfserie	Einzel	a	b	c	d	e	Einzel	f
Holzart	BU	BU	BU	BU	BU	BU	BI	BI
Versagen³⁾	15 H 2 S	7 H	5 H 1 S	1 H 4 H+Sp 1 S 2 L	6 H	4 L	19 H	6 H
$F_{\max, \text{mean}}^{2)}$ [kN]	27,7 ⁴⁾	156	143	145	112	121	19,0 ⁴⁾	71,6
$F_{\max, 50}^{2)}$ [kN]	27,7 ⁴⁾	156	146	145	117	127	19,1 ⁴⁾	71,2
$F_{\max, 95}^{2)}$ [kN]	31,0 ⁴⁾	-	-	-	-	-	23,4 ⁴⁾	-
$f_{\text{ax}, \text{mean}}^{2)}$ [N/mm ²]	15,3	-	-	-	-	-	10,5	-
COV²⁾ [%]	6,9	11,6	4,5	6,8	12,6	12,8	12,9	5,0
$F_{\max, \text{mean}, \text{MLErc}}^{1)}$ [kN]	28,1	-	-	-	-	-	-	-
$F_{\max, \text{mean}, \text{MLErc-ec}}^{1)}$ [kN]	-	172	165	166	125	134	-	75
$F_{\max, 05, \text{MLErc-ec}}^{1)}$ [kN]	-	143	138	141	102	110	-	69
COV¹⁾ [%]	-	12,5	11,9	10,7	13,9	13,3	-	5,2
$n_{\text{ef}, \text{mean}, \text{MLErc-ec}} / n^{1)}$ [-] nach Gleichung (4.2)/(4.3)	-	1,08	1,02	1,01	0,91	1,02	-	0,78
Vorbemessung nach Gleichung (4.1)	-	143,5	145,5	147,7	137,2	131,5	-	96,6

¹⁾ unzensiert, mittels MLE für rechts-zensierte Daten – alle Prüfwerte berücksichtigt

²⁾ rechts-zensiert – nur Prüfwerte mit dem Versagensmechanismus Herausziehen berücksichtigt

³⁾ H...Herausziehen; S...Schraubenbruch; H+SP...Herausziehen mit Aufspalten; L...Laschenversagen

⁴⁾ umgerechnet auf eine vergleichbare, effektiv wirksame Gewindelänge mit dem Faktor $l_{\text{ef}, \text{Gruppe}} / l_{\text{ef}, \text{Einzel}} = 72/86 = 0,84$

Die Betrachtung der Widerstände der Einzelschrauben lieferte laut [67] eine gute Übereinstimmung bei den Werten der Buche mit der Berechnung nach Brandner [34]. Die Werte der Birke liegen leicht darunter. (vgl. Abbildung 4-31)

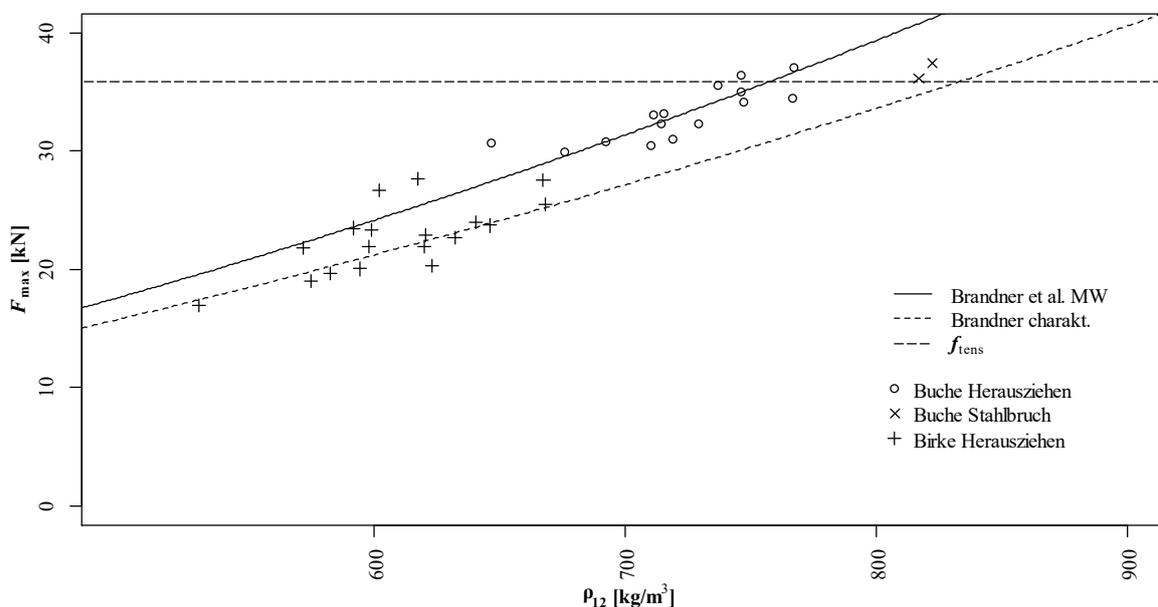


Abbildung 4-31 Boxplot der gemessenen Kräfte F_{max} der Einzelschrauben verglichen mit dem Mittelwert nach Brandner [34], dem 5%-Quantil nach Brandner et al. [31] und der Stahlzugtragfähigkeit f_{tens} überarbeitet aus [67]

Die Serie a mit den laut ÖNORM EN 1995 [6] angegebenen Mindestabständen $a_1 = 7 d$ und $a_{1,cg} = 10 d$ für axial beanspruchte Schrauben führte zu keinen signifikant höheren Widerständen im Vergleich mit der Serie b, $a_1 = 7 d$ und $a_{1,cg} = 5 d$, und Serie c, $a_1 = 5 d$ und $a_{1,cg} = 5 d$. Das Verhältnis der mittels Maximum Likelihood Estimation für rechtszensierte, equi-korrelierende und lognormalverteilte Daten statistisch geschätzten Mittelwerte $F_{max,mean,MLErc-ec,a} / F_{max,mean,MLErc-ec,c}$ ergibt 103,6 %.

Ein Vergleich der erzielten Tragwiderstände der Serien a, b und c, welche ohne Abstandsholz geprüft wurden, mit der Serie d mit Abstandsholz zeigt zudem einen wesentlichen Unterschied. So ist der Wert von $F_{max,mean,MLErc-ec}$ der Serie c um 25 % höher als jener der Serie d bei gleicher Anordnung der Schrauben. Dieser Unterschied wird in [67] auf die Erhöhung des Vorbohrdurchmessers von 8 mm auf 10 mm bei der Serie d zurückgeführt, wodurch sich ein erhöhter Auszieh Widerstand durch den Kontakt entlang der Einbindelänge in der Serie c ergab.

Die Serien d und e zeigen in der Betrachtung des maximalen Widerstandes keinen signifikanten Unterschied. Diese Serien wurden mit gleichen Abständen und mit gleicher effektiver Gewindelänge geprüft. Der Unterschied lag in den verwendeten Unterlegscheiben. Bei der Serie e wurde die Senkscheibe 45° Holz-Holz verwendet, wodurch sich größere Einbindetiefen der Schrauben und auch breitere Zughölzer ergaben. Durch die Verwendung der Senkscheibe 45° Holz-Holz versagten dabei sämtliche BauBuchen-Q-Laschen der Serie e durch ein Einziehen der Senkscheiben in die Laschen, während bei der Serie d stets ein Ausziehversagen auftrat. Die unterschiedlichen Versagensmechanismen deuten darauf hin, dass trotz der beabsichtigten gleichen Anordnung der Schrauben eine leicht höhere Ausziehtragfähigkeit in Serie e bewirkt wurde und deshalb der Widerstand der BauBuchen-Q-Laschen in Verwendung mit Senkscheibe 45° Holz-Holz maßgebend wurde. Letztendlich wurde gezeigt, dass beide Systeme in einer Verbindung funktionieren.

Die relative Betrachtung der Einzelwiderstände $F_{max,mean,BU} / F_{max,mean,BI} = 1,46$ und der Gruppenwiderstände $F_{max,mean,MLErc-ec,d} / F_{max,mean,MLErc-ec,f} = 1,60$ zeigt, dass die Buche als Gruppe bessere Ergebnisse erreichte. Ein

Vergleich der Rohdichten der Serien mit den Einzelschrauben $\rho_{\text{mean,BU}} / \rho_{\text{mean,BI}} = 1,19$ und jene der Gruppen $\rho_{\text{mean,d}} / \rho_{\text{mean,f}} = 1,16$ gab für diesen Umstand keine Begründung.

Zum Vergleich der Ergebnisse wird in Mahlknecht [67] der mittlere Widerstand der Schraubengruppe nach der Gleichung (4.1) berechnet. Dieser berechnet sich in Abhängigkeit des geschätzten Erwartungswertes der Einzelschrauben $F_{\text{max,mean,MLErc}}$ für Buche bzw. dem Mittelwert $F_{\text{max,mean}}$ für Birke und unter der Annahme eines Reibbeiwertes $\mu = 0,25$. Die Rohdichteunterschiede zwischen Einzel- und Gruppenprüfkörper werden mit Hilfe des Faktors k_ρ berücksichtigt.

$$F_{\text{ref},i,\text{mean}} = n \cdot F_{\text{max,mean,MLErc}} \cdot \cos \alpha \cdot (1 + \mu) \cdot k_\rho \quad (4.1)$$

Die zusätzliche Tragwirkung im Einbindebereich bei den Serie a, b und c durch das eingedrückte Gewinde in der Vorbohrung mit dem Durchmesser $d = 8$ mm wurde berücksichtigt, indem für die halbe Einbindetiefe l_{emb} ein Auszieh Widerstand als gegeben angenommen wird. Zusätzlich ergibt sich aus der geneigten Anordnung der Schraube, dass das Gewinde in die längere Seite der Vorbohrung gedrückt wurde. Dadurch ergibt sich eine um dem Faktor $(9d + (1,5d + 0,5d) / 2) / 9d = 1,11$ erhöhte Tragfähigkeit. Diese ist in Abbildung 4-32 als blaue strichlierte Linie eingezeichnet.

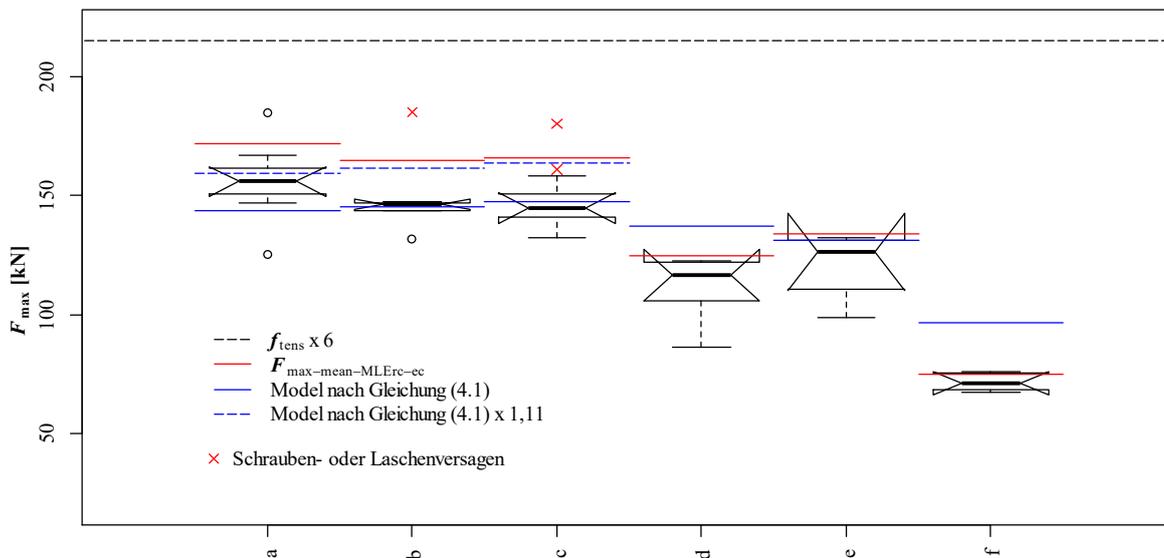


Abbildung 4-32 Boxplot der gemessenen Prüfkraft F_{max} der Gruppenserien mit geneigt angeordneten Schrauben mit Erwartungswert $F_{\text{max,mean,MLErc-ec}}$, der Stahlzugtragfähigkeit der Schrauben und Modellberechnung nach Glg. (4.1) überarbeitet aus [67]

Aus Gleichung (4.1) lässt sich durch Umformen eine Einschätzung der effektiven Verbindungsmittellanzahl der Prüfungen nach Gleichung (4.2) erstellen. In der Serie a, b und c wird die erhöhte Tragfähigkeit in der Vorbohrung berücksichtigt indem ebenfalls eine erhöhte Tragfähigkeit um den Faktor 1,11 angenommen wird. (vgl. Gleichung (4.3))

$$n_{\text{ef,mean,MLErc-ec}} / n = \frac{F_{\text{max,mean,MLErc-ec}}}{n \cdot F_{\text{max,mean,MLErc}} \cdot \cos \alpha \cdot (1 + \mu) \cdot k_\rho} \quad \text{für Serie d,e,f} \quad (4.2)$$

$$n_{\text{ef,mean,MLErc-ec}} / n = \frac{F_{\text{max,i,MLErc-ec}}}{n \cdot F_{\text{max,mean,MLErc}} \cdot \cos \alpha \cdot (1 + \mu) \cdot k_\rho} / 1,11 \quad \text{für Serie a,b,c} \quad (4.3)$$

Die Serien a, b und c in Buche erzielten demnach das Verhältnis von effektiver zu tatsächlicher Verbindungsmittelanzahl auf Niveau der Mittelwerte zwischen 108 % und 101 %, die Serie d in Buche und die Serie f in Birke lediglich 91 % und 78 %. Laut ÖNORM EN 1995-1-1 [6] beträgt die effektive Verbindungsmittelanzahl $n^{0,9}$ für jede Schraubenreihe. Für die geprüften Zuglaschenstöße ergibt das $2 \times 3^{0,9} = 5,38$ bzw. 90 % der vorhandenen Verbindungsmittelanzahl von sechs Schrauben je Seite. Demnach konnten die normativen Vorgaben der ÖNORM EN 1995-1-1 [6] auf Niveau der Mittelwerte nur bei den Versuchen in Buche eingehalten werden. Wie in Abschnitt 0 erläutert wurde von Blaß et al. [55] keine Abnahme der mittleren Tragfähigkeit pro Schraube mit zunehmender Anzahl der Schrauben pro Schraubenreihe festgestellt. Bei den hier vorgestellten Prüfungen konnte dies nur bei den Serien a, b, c und e in Buche bestätigt werden.

Letztendlich muss berücksichtigt werden, dass die Serien a, b und c ohne Abstandsholz und folglich die Zuglaschen einer zusätzlichen Biegeverformungen der Zuglaschen ausgesetzt waren. Da aufgrund dieser Biegeverformungen eine Erhöhung der Querkraft und somit auch des Reibkraftanteils nicht ausgeschlossen werden kann, ist eine Vergleichbarkeit der Prüfungen nur begrenzt möglich. Die geringeren Widerstände der Serien d und f gegenüber dem n -fachen Widerstand der Einzelschraube konnte, trotz vergleichbarem Versagen, nur unzureichend begründet werden.

4-2.4 STEIFIGKEIT

Die Mittelwerte der ausgewerteten Verschiebungsmoduln K_{ser} sind in Tabelle 4-16 aufgelistet. Eine Messung der Kraft-Weg-Beziehung konnte bei den Versuchen der Prüfserien d, e und f aufgrund des zwischen den Zuglaschen angeordneten Abstandsholzes laut [67] nicht durchgeführt werden.

Tabelle 4-16 Mittelwerte und Variationskoeffizienten der ausgewerteten Verschiebungsmoduln der Gruppenversuche mit geneigt angeordneten Schraubengruppen; Ergebnisse aus [67]

Prüfserie	a	b	c
Holzart	BU	BU	BU
Anzahl der Versuche	7+7	6+6	7+7
l_{ef}	9 d	9 d	9 d
$K_{ser-I-mean}^1$ [kN/mm]	56,3	49,6	45,4
$K_{ser-I-50}^1$ [kN/mm]	56,9	50,7	46,6
COV [%]	13,9	11,5	12,7
$K_{ser-II-mean}^2$ [kN/mm]	67,9	63,6	56,5
$K_{ser-II-50}^2$ [kN/mm]	69,1	64,6	56,2
COV [%]	14,0	8,6	10,9

¹⁾...Erstbelastung

²⁾...Wiederbelastung

Bei den Verschiebungsmoduln sind Verschiebung der Ergebnisse aufgrund der nicht auszuschließenden Biegeverformung im Gebrauchslastniveau und eine damit einhergehende verringerte Wegmessung mit nicht ausschließlich gemessenen Relativverschiebungen der Tragelemente anzunehmen. Bei starker Biegeverformung ergibt sich eine geringere Wegdifferenz und somit eine höhere Steifigkeit.

Die Ergebnisse zeigen laut [67] einen signifikanten Unterschied der Serien b und c mit $a_{1,cg} = 5 d$ zur Serie a mit $a_{1,cg} = 10 d$. Demnach sind die ausgewerteten Verschiebungsmoduln $K_{ser,I,mean}$ und $K_{ser,II,mean}$ der Serie a mit $a_1 = 7 d$ und $a_{1,cg} = 10 d$ im Mittel um 6 % und 12 % höher als jene der Serie b mit $a_1 = 7 d$ und $a_{1,cg} = 5 d$. Die Serie c mit $a_1 = 5 d$ und $a_{1,cg} = 5 d$ weisen eine um 17 % und 19 % geringere Steifigkeit auf als die Prüfserie a. (vgl. Abbildung 4-33)

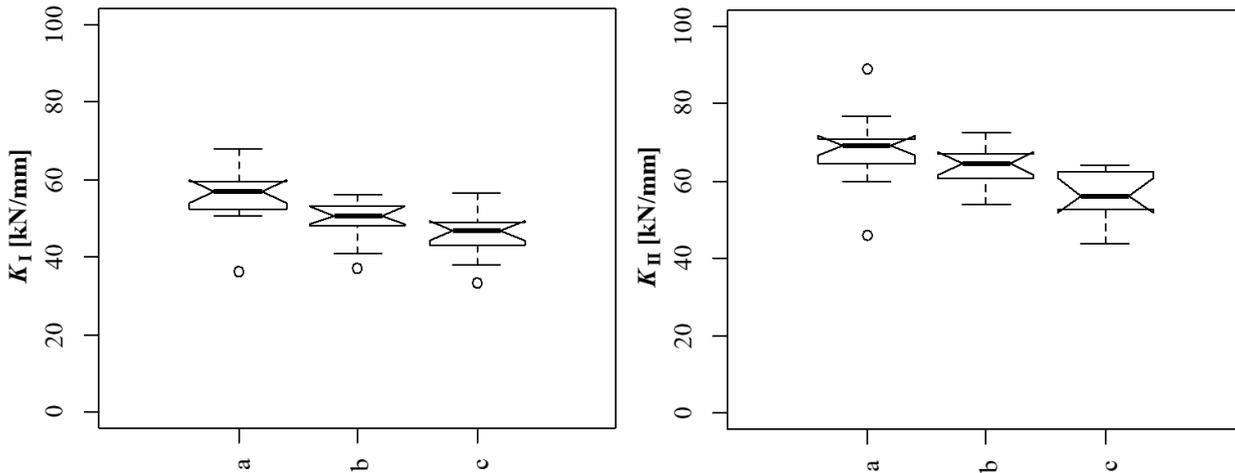


Abbildung 4-33 Boxplot der ausgewerteten Verschiebungsmodule K_{ser-I} (links) und K_{ser-II} (rechts) der Gruppenversuche mit geneigt angeordneten Schrauben aus [67]

Um die ausgewerteten Verschiebungsmodule auf eine mögliche Relevanz zu überprüfen, sollen diese nachfolgend mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen werden.

In Reichinger [9] wurden Einzelausziehprüfungen in Buche unter einem Achs-Faser-Winkel von 45° durchgeführt. Es wurden dafür die Schrauben Prototyp P1 nach Pöll [36] mit einem Durchmesser von 8 mm verwendet. Die effektive Gewindelänge betrug bei diesen Prüfungen 50 mm. Es wurde dabei ein Mittelwert des Verschiebungsmoduls K_{ser} von 43,4 kN/mm bei einem Variationskoeffizienten von 9,9 % festgestellt. Berücksichtigt man die unterschiedliche effektive Gewindelänge über ein lineares Verhältnis 72/50 ergibt sich ein Mittelwert des Verschiebungsmoduls von 62,5 kN/mm.

Laut Krenn [27] berechnet sich die effektive Verbindungsmittellanzahl bei Zuglaschenstößen auf Gebrauchslastniveau mit $n^{0,8}$. Bei einer Schraubenanzahl $n = 6$ ergibt sich dadurch eine Abminderung der Steifigkeit aufgrund des Gruppeneffektes von $n^{0,8}/n = 6^{0,8}/6 = 70\%$. Dadurch ergibt sich mit den Ergebnissen nach Reichinger ein Verschiebungsmodul von 43,8 kN/mm.

Berücksichtigt man zusätzlich die Reibung mit einem Reibbeiwert $\mu = 0,25$ nach dem Modell von Blaß [55] mit einem Faktor von $(1 + \mu \cdot \cot \alpha)$ ergibt sich ein Mittelwert des Verschiebungsmoduls von 54,8 kN/mm. Dieser Wert stimmt mit den Ergebnissen der Serie a gut überein. Dennoch muss die hier durchgeführte Überprüfung der ausgewerteten Verschiebungsmodule nur als grobe Annäherung betrachtet werden.

KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

5-1 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Masterarbeit gibt einen Einblick in die Verbindungstechnik mit axial beanspruchten Schraubengruppen appliziert in Hartlaubholz. Die untersuchten Verbindungen in diesem Zusammenhang waren Zugstöße mit einer Hirnholzverschraubung bei denen der Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes von 0° und Anschlüsse mit geneigt angeordneten Schraubengruppen, ebenfalls als Zugstoß ausgebildet.

Der Fokus dieser Masterarbeit lag dabei in der Optimierung der relevanten Anordnungsparameter, um die Zielversagen Herausziehen der Schrauben oder Stahlversagen für die beiden genannten Anschlusstypen zu erreichen. Diese Versagensmechanismen bieten einerseits einen höheren Widerstand bei gleicher Eindringtiefe und Schraubenanzahl als beispielsweise die Blockscherversagen oder Aufspalten. Letztgenannte spröde Holzversagen streuen erfahrungsgemäß mehr als die beiden Versagensmechanismen Herausziehen und Schraubenbruch. Andererseits sind diese Versagensmechanismen in der Berechnung einfacher und weniger komplex zu handhaben. Für beide Verbindungen wesentlich ist dabei der Abstand der Schrauben zueinander, bei Hirnholzanschlüssen zum seitlichen Rand hin und bei Anschlüssen mit geneigt angeordneten Schrauben der Abstand zum Hirnholzrand. Da diese Verbindungen ein sehr steifes Verhalten aufweisen, ist eine gleichmäßige Beanspruchung der Gruppe aufgrund des begrenzten Umlagerungsvermögens besonders wichtig. Um dies zu erreichen, ist eine sorgfältige Ausführung und Montage der Anschlüsse von großer Bedeutung, weshalb auch die Herstellung der Anschlüsse im Hartlaubholz Teil dieser Masterarbeit war.

Zu allererst wurde im Zuge dieser Arbeit eine Literaturrecherche durchgeführt, um die wesentlichen Anforderungen an Verbindungen im Holzbau zu definieren, die relevanten Eigenschaften der verwendeten Materialien zu eruieren, normative Regelungen für die Verbindungsarten aufzuzeigen und bereits durchgeführte Untersuchungen im Bereich der behandelten Verbindungen zu untersuchen und auszuwerten. So konnte bei den Hirnholzverbindungen festgestellt werden, dass bei den Abständen für einen wirtschaftlichen Anschluss die Einbindetiefe der Schrauben eine wichtige Rolle für die Tragfähigkeit spielt. Obwohl diese Verbindungen in der ÖNORM EN 1995-1-1 [6] nicht geregelt werden, konnte in Abschnitt 2-4 ihre vielversprechenden Eigenschaften und ihr Potenzial für innovative Verbindungslösungen aufgezeigt werden. Die Verbindungen mit geneigt angeordneten Schraubengruppen konnten als leistungsfähige und in ihrem mechanischen Verhalten sehr vielseitige Anschlüsse identifiziert werden. Eine der wesentlichsten Erkenntnisse für die Prüfvorbereitung war, dass bei diesen Anschlüssen zwar eine kombinierte Beanspruchung der Schrauben, axial und lateral, vorliegt, jedoch für Einschraubwinkel von 45° zur Faserrichtung des Holzes eine vorwiegend axiale Beanspruchung der Schrauben angenommen werden kann.

Im Zuge der Prüfvorbereitung wurde das Prüfkonzept für die Untersuchungen dieser Arbeit erarbeitet. Hierfür wurden sämtliche Prüfungen der Hirnholzverbindungen und Zuglaschenverbindungen mit geneigt angeordneten Schrauben vorbemessen und die dafür erforderlichen Prüfkörper hergestellt. Das verwendete Material aus Buchenholz und Furnierschichtholz aus Buche (BauBuche) wies eine hohe Qualität auf. Die Birkenlamellen wiesen größtenteils einen hohen Kernholzanteil inklusive fakultativem Farbkern auf. Die benötigten Prüfkörperabmessungen für die Hirnholzanschlüsse erforderten die Verklebung zu vierlagigem Birken-BSH-Trägern und Buchen-Duo-Träger. Die BauBuche wurde vom Hersteller in den gewünschten Dimensionen geliefert. Für die Zuglaschenverbindungen mit geneigt angeordneter Schraubenreihe konnten Buchenvollholz und Birken-Duo-Träger eingesetzt werden. Zur Anwendung kam die für Hartlaubholz optimierten Schrauben RAPID® Hardwood [21], welche durch ihre hohe Zugtragfähigkeit, sowie ihren optimierten Torsionswiderstand in Hartlaubholzprodukten auch ohne Vorbohren appliziert werden können. Es wurden Teilgewindeschrauben mit dem Durchmesser 8 mm mit einer Länge von 240 / 100 mm bzw. 160 / 100 mm verwendet.

Bei den Hirnholzverschraubungen wurden insgesamt 68 Referenzprüfungen mit einer Einzelschraube durchgeführt. Bei 57 dieser Prüfungen wurden Referenzwerte für die Ausziehfestigkeit in den untersuchten Materialien Buche, Birke und BauBuche ermittelt. Weitere elf Referenzprüfungen wurden zur Ermittlung von Referenzwerten für den Verschiebungsmodul K_{ser} der Einzelschraube in BauBuche durchgeführt.

Die Gruppenversuche der Hirnholzverschraubungen umfassten fünf Prüfserien mit jeweils sechs Prüfungen. Die Prüfkörper hatten dabei eine Länge von 800 mm. Die Gruppe mit 19 Schrauben befestigte eine Anschlussplatte aus Stahl, welche wiederum über Ankerstangen und Zuglaschen mit der Prüfmaschine verbunden wurden. Der sechseckige Querschnitt der Prüfkörper ergab sich aus dem Bestreben eines kompakten, versetzten Schraubenbildes mit äquivalenten Schrauben- und Randabständen und wurde von [26] übernommen. Der Abstand der Schrauben untereinander a_2 und zum Rand $a_{2,cg}$ betrug bei den Prüfungen in Birke und Buche jeweils $3 d$. Das Schraubenbild der Versuche mit BauBuche unterschied sich nach den Erkenntnissen von [26] dahingehend, dass der Schraubenabstand quer zur Furnierichtung auf $4 d$ erhöht wurde. Bei der Prüfserie mit Buche wurden die Schrauben parabelförmig abgestuft, indem die Einbindetiefe der Schrauben vom Rand zur Mitte des Prüfkörpers mit $5 d \mid 9 d \mid 11 d$ gewählt wurde. Die Einbindetiefe der Versuche mit Birke und BauBuche wurde konstant gewählt. Diese betrug bei beiden Prüfserien mit BauBuche $11 d$ und bei jenen mit Birke $5 d$ bzw. $10 d$. Bei den Versuchen mit BauBuche wurde das Anziehdrehmoment der Schrauben variiert, um den Einfluss der Vorspannung zu untersuchen.

Beim Prüfungsvorgang wurden die eingedrehten Schraubengruppen bzw. Einzelschrauben gleichmäßig mit einer Zugkraft beansprucht und bis zum Versagen der Verbindung belastet. Anschließend wurden die Holzfeuchte und Rohdichte jedes Prüfkörpers ermittelt.

Die Prüfungen der Zuglaschenstöße mit geneigt angeordneten Schraubengruppen wurden vom Verfasser aufgrund der epidemiologischen Lage im Jahr 2020 nicht selbst durchgeführt. Es wurden jedoch die bereitgestellten und bereits ausgewerteten Ergebnisse in diese Arbeit aufgenommen und kurz diskutiert.

Hierbei handelt es sich um einen symmetrischen, beidseitigen Anschluss mit je einer Reihe von drei Schrauben. Bei diesen Prüfserien waren insbesondere die Herstellbarkeit und der Einfluss der Schraubenabstände in Faserrichtung untereinander und zum Hirnholzrand hin auf das Versagen und den Widerstand von Interesse.

5-2 WICHTIGE ERKENNTNISSE

Im Zuge der Versuche mit einer Einzelschraube wurden Referenzwerte für die Ausziehfestigkeit und des Verschiebungsmoduls ermittelt. Die Vorbemessung der Versuche mit dem Modell nach [31] lieferte dabei eine gute Übereinstimmung mit den ermittelten Festigkeiten mit Buche und der BauBuche. Bei den Versuchen mit Birke wurde die Ausziehfestigkeit mit dem Modell jedoch überschätzt. Dieser Umstand wird vom Verfasser unter anderem auf den hohen Kernholzanteil der Birkenlamellen zurückgeführt.

Die Gruppenprüfungen der Hirnholzverbindungen haben gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit der Verbindung wesentlich von der Einbindetiefe der Schrauben abhängt. Mit den geprüften Abstände $a_2 = 3 d$ und $a_{2,cg} = 3 d$ und einer Einbindetiefe von $10 d$ in Birke konnte ein Ausziehversagen bei allen Gruppen und somit bei der gewählten Einschraubtiefe der maximal zu erwartende Widerstand erreicht werden. Das Verhältnis der effektiven zur tatsächlichen Verbindungsmittelanzahl lag auf 5 %-Quantil Niveau bei 105 % und der Ausnutzungsgrad als Vergleich der gemessenen 5 %-Quantil Tragfähigkeit der Verbindung mit der mittels Werten aus der Literatur berechneten Nettoquerschnittstragfähigkeit, $\eta_{05,netto,MLErc-ec}$ bei über 74 %. Die Versuche in Buche haben aufgezeigt, dass die parabelförmige Abstufung der Einbindetiefe $l_{emb} = 5 d - 9 d - 11 d$ das Aufspalten der Prüfkörper nicht verhindern konnte. Gegenüber bereits durchgeführten Prüfungen mit konstanter Einbindetiefe von $8,4 d$ der Schrauben wurde keine signifikante Leistungssteigerung erreicht. Das Verhältnis der effektiven zur tatsächlichen Verbindungsmittelanzahl lag hier auf 5 %-Quantil Niveau bei 107 % und der Ausnutzungsgrad $\eta_{05,netto,MLErc-ec}$ bei 74 %.

Zusammenfassend kann für Buche und Birke mit einer Einbindelänge von $10 d$ und Abständen $a_2 = a_{2,cg} = 3 d$ Ausziehversagen in der Gruppe mit nahezu der vollen Tragfähigkeit jeder Schrauben der Gruppe gerechnet werden. Jedoch wird zur Berücksichtigung möglicher ungleichmäßiger Beanspruchung ein Wert $n_{ef} < n$ empfohlen. Der Ausnutzungsgrad $\eta_{05,netto,MLErc-ec}$ lag in beiden Fällen über 74 %. Um diesen Wert zu erhöhen liegt noch Potential in der Verankerungstiefe und somit dem Zielversagen Schraubenbruch.

Bei den Hirnholzverbindungen in BauBuche konnte durch eine Erhöhung der Einbindetiefe auf $11 d$ gegenüber bereits durchgeführten Prüfungen mit $l_{emb} = 2 d$ und $8 d$ ein Aufspalten der Prüfkörper in den überwiegenden Fällen verhindert werden. Eine Leistungssteigerung wurde jedoch nicht erreicht. Das Verhältnis der effektiven zur tatsächlichen Verbindungsmittellanzahl lag auf 5 %-Quantil Niveau bei 92 % und der Ausnutzungsgrad $\eta_{05,netto,MLErc-ec}$ lediglich bei 39 %. Mit dem verwendeten Schraubentyp liegt kein Potential vor den Ausnutzungsgrad in der BauBuche deutlich zu erhöhen. Ein effizienter Hirnholzanschluss mit einem hohen Ausnutzungsgrad kann demnach nur durch eine Verwendung von Schrauben mit höherer Zugtragfähigkeit und durch eine Erhöhung der effektiven Gewindelänge der Schrauben erzielt werden. Es zeigte sich in den Prüfungen ebenfalls, dass die Spaltneigung in Zusammenhang mit der Querkzugfestigkeit der BauBuche aufgrund des Herstellungsprozesses (Schälung zu Furnieren) eine wesentlich andere Charakteristik besitzt als Buchen- oder Birkenvollholz.

Bei der Auswertung der Verschiebungsmodule konnte in dieser Arbeit ein Einfluss des Anziehdrehmoments der Schrauben auf die Steifigkeit der Verbindungen mit Hirnholzverschraubungen festgestellt werden. Durch das Anziehen der Schrauben wird eine Vorspannung der Verbindung erzeugt, wodurch sich eine um bis zu 600 % höhere Anfangssteifigkeit gegenüber jenem Bereich ergibt, bei dem die Vorspannung bereits überwunden ist. In einigen Prüfserien der vorliegenden Arbeit ist dieser nahezu bi-lineare Verlauf besonders ausgeprägt ersichtlich. Da sich, wie mit einem Prüfkörper in BauBuche gezeigt, die Vorspannung mit der Zeit abbaut, würde die Auswertung nach ÖNORM EN 26891 [71] im Bereich zwischen 10 % und 40 % des maximalen Widerstandes der Kurzzeitprüfungen zu zu hohen Verschiebungsmoduln führen. Die Annahme in [26], dass das beobachtete steifere Verhalten der abgestuften gegenüber der gleichmäßigen Gruppe auf die Anordnung zurückzuführen ist, konnte somit widerlegt werden. Für die Steifigkeit in BauBuche ergab sich das Verhältnis der effektiven zur vorhandenen Anzahl an Schrauben zu $> 0,8$ und lag somit in der Größenordnung des Verhältnisses bei den Widerständen.

Das anfänglich gewählte Anziehdrehmoment von 30 Nm hatte bei Montage der Anschlüsse in Birke ein vermehrtes Auftreten von einem Durchdrehen zur Folge. Dies kommt einem Versagen durch Abscheren der Fasern zwischen den Gewindegängen bereits bei Applikation der Schrauben gleich. Deshalb musste das Anziehdrehmoment in weiterer Folge auf 15 Nm bei den Versuchen mit Birke vermindert werden. Bei der Wahl des Anziehdrehmomentes ist somit allgemein Vorsicht geboten.

Bei den Zugstoßversuchen mit den geneigt angeordneten Schraubenreihen und Zielversagen Herausziehen mussten zunächst alle geometrischen Parameter zur Anordnung der Gruppe aufeinander abgestimmt und die Herstellbarkeit gezeigt werden. Dafür kam eine speziell für Zuglaschen aus Holz und einer geneigten Anordnung der Schrauben entwickelte Senkscheibe, 45° Holz-Holz [69], und ein System aus einer für Zuglaschen aus Stahl und einer geneigten Anordnung der Schrauben entwickelte Senkscheibe, 45° Stahl-Holz [69], in Kombination mit einer Unterlegscheibe mit einem Durchmesser von 50 mm zum Einsatz. Die Anschlüsse führten sowohl bei den Abständen nach ÖNORM EN 1995-1-1 [6] als auch mit auf $a_1 = a_{1,cg} = 5 d$ zum Ausziehversagen in der Gruppe, sofern es aufgrund des großen Abstandes zwischen den beiden Mittelhölzern nicht zu einem Durchbiegen der äußeren Zuglaschen aus BauBuche-Q kam. Diese untersuchten engeren Abstände sind lt. diversen ETAs für rein axiale Beanspruchung zulässig. Bei der Berechnung des Widerstandes nach dem Model lt. Gleichung (4.1) ergab sich bei den Prüfserien in Buche und Birke ein Verhältnis der effektiven zur tatsächlichen Schraubenanzahl von > 71 %.

Der Vergleich der Prüfungen mit den zwei unterschiedlichen Senkscheiben zeigt unterschiedliche maßgebende Versagensmechanismen. Die Prüfserie mit der 45° Holz-Holz Senkscheibe endete durch ein Versagen der Anschlusslaschen aus BauBuche-Q, hingegen jene mit der 45° Stahl-Holz-Lösung mit Ausziehversagen. Das deutet darauf hin, dass trotz der beabsichtigten gleichen Anordnung der Schrauben eine leicht höhere Ausziehtragfähigkeit in dieser Serie bewirkt wurde und deshalb der Widerstand der BauBuchen-Q-Laschen in Verwendung mit Senkscheibe 45° Holz-Holz maßgebend wurde. Letztendlich wurde gezeigt, dass beide Systeme in einer Verbindung funktionieren.

5-3 AUSBLICK

Bei den Hirnholzanschlüssen konnte mit den untersuchten Parametern ein hoher Wirkungsgrad und eine effektive Verbindungsmittellanzahl in etwa gleich der vorhandenen Verbindungsmittellanzahl bei den Versuchen mit Birke und Buche erreicht werden. Die Ergebnisse der Versuche mit BauBuche sind mit einem Wirkungsgrad bezogen auf den Nettoquerschnitt η_{netto} von 39 % jedoch nicht zufriedenstellend, obwohl ein Aufspalten der Prüfkörper in den überwiegenden Fällen verhindert werden konnte und der anvisierte Versagensmechanismus Ausziehen der Schrauben erreicht wurde. Hier zeigte sich, dass eine effizientere Verbindungslösung nur mit einer höheren effektiven Einschraublänge der Schrauben l_{ef} und Schrauben mit einer höheren Zugtragfähigkeit erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang sind weitere Untersuchungen von Nöten wie sich der Werkstoff BauBuche bei dem daraus folgenden höheren axialen Tragwiderstand im Versagensfall verhält und inwiefern größere Schraubenabstände und Einbindetiefen von Nöten sind, um ein eventuelles Aufspalten zu verhindern.

Der Einfluss des Anziehens der Schrauben auf das Verbindungsverhalten wurde ebenso in dieser Masterarbeit aufgezeigt. Durch die Vorspannwirkung der Schrauben ergibt sich eine wesentlich höhere Anfangssteifigkeit der Verbindung, welche sich aber mit der Zeit abbaut. Die Auswertung nach ÖNORM EN 26891 [71] im Bereich von 10 % bis 40 % würde zu höheren Werten führen und ist daher für ähnliche Anwendungen zu diskutieren.

Weiters trägt diese Arbeit zur Diskussion bei nach welchen Kriterien ein Hirnholzanschluss in Laubholz mit axial beanspruchten Schraubengruppen ausgelegt werden soll. Eine Analyse der Arbeiten aus der Literatur unter Berücksichtigung von Zielversagen und dem weiteren Ziel eines hohen Ausnutzungsgrades wird derzeit im Rahmen eines Masterprojekts am Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz bearbeitet.

Die Umsetzung der Versuche mit den Zuglaschenstößen und deren Herstellbarkeit wurde experimentell angenähert. Aufgrund der relativ großen Schlankheit der Laschen kam es zu ungewollten Biegeverformungen, welche unter anderem die aufgezeichneten Arbeitslinien beeinflussten. Daher ist die Aussagekräftigkeit der Ergebnisse hinsichtlich der Steifigkeit begrenzt. Weitere Untersuchungen auch an anderen Anschlusstypen mit geneigt angeordneten Schraubengruppen können im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt werden. Dennoch wird an einer gesamtheitlichen Betrachtung des breiten Anwendungsgebietes von vorwiegend axial beanspruchten Schraubengruppen in Laubholz gearbeitet und auch die Betrachtung von Schraubengruppen mit einem Achs-Faserwinkel von 90°, wie beispielsweise in [8] vorgenommen, miteinbezogen.

In einer parallel laufenden Betrachtung innerhalb des Forschungsprojektes wird auch die Langzeittragfähigkeit von Hirnholzverbindungen untersucht.

ANHANG A VERZEICHNISSE

- [1] Bundesforschungszentrum für Wald, Zwischenauswertung der Waldinventur 2016/18, Wien: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), 2019.
- [2] Bundesforschungszentrum für Wald, 2019. [Online]. Available: <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=10544>. [Zugriff am 21 November 2020].
- [3] ÖNORM EN 338; Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen, Austrian Standards Institute, Wien, 2016.
- [4] ÖNORM EN 14080, Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen, Wien: Austrian Standards, 2013.
- [5] ETA-14/0354; Träger Baubuche GL75, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2018.
- [6] ÖNORM EN 1995-1-1; Eurocode 5 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Austrian Standards Institute, Wien, 2015.
- [7] „Pollmeier,“ 2018. [Online]. Available: www.pollmeier.com. [Zugriff am 21 November 2020].
- [8] M. Luef, Untersuchung von rechtwinklig zur Faser eingebrachten, axial beanspruchten Schraubengruppen in Laubholz, Masterarbeit, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2020.
- [9] T. Reichinger, Ausgewählte Untersuchungen zum Tragverhalten einer für Hartlaubholz optimierten Holzbauschraube, Masterarbeit, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2017.
- [10] Mägdefrau, Botanik: Eine Einführung in das Studium der Pflanzenkunde, Heidelberg, 1951.
- [11] G. Schickhofer, Holzbau - Der Roh- und Werkstoff Holz, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2006.
- [12] U. Hübner, Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile, Dissertation, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2013.
- [13] D. Grosser, Die Hölzer Mitteleuropas: Ein mikrophotographischer Lehratlas, Berlin, Heidelberg, 1977.
- [14] P. Mayr, Einfluss konstanter Langzeitbeanspruchung (DoL) auf die Tragfähigkeit selbstbohrender Holzschrauben appliziert in Faserrichtung in Fichte, Buche und BauBuche, Masterarbeit, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2018.
- [15] I. Obermayr, Leistungsfähige Hirnholz-Schrauben- und Klebeverbindungen für schlanke Birken-Laubholzkonstruktionen, Masterarbeit, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2014.
- [16] R. Mömbacher, Holz-Lexikon: Nachschlagewerk für die Holz- und Forstwirtschaft, Stuttgart: DRWVerl., 1988.
- [17] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-679, Wuppertal: Deutsches Institut für Bautechnik, 2013.
- [18] Allgemeine Bauartgenehmigung, Z-9.1-838, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2018.
- [19] R. Brandner, A. Ringhofer und J. Scheibenreiter, Probleme und Lösungsansätze für die Verschraubung in Hartlaubholzprodukten, Innsbruck: Internationales Holzbauforum, 2019.

- [20] EOTA, EAD 130118-00-0603; Screws for use in timber constructions, EOTA, 2016.
- [21] ETA-12/0373, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2017.
- [22] ETA-11/0190, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2018.
- [23] ETA-11/0030, Nordhavn: ETA-Danmark A/S, 2019.
- [24] G. Pirnbacher, Base parameters of self-tapping screws, Duebendorf: CIB-W18 meeting forty two, 2009.
- [25] M. Westermayr und J. W. Van de Kuilen, Withdrawal strength of screws and screw groups in European beech (*Fagus s.*) parallel to the grain, Tacoma: International Network on Timber Engineering Research INTER meeting fifty two, 2019.
- [26] L. Koppauer, Optimierung von axial beanspruchten Hirnholz-Schraubverbindungen in Hartlaubholz, Masterarbeit, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2017.
- [27] H. Krenn, Die Stahlblech-Holz-Laschenverbindung mit schrägen Schrauben, Dissertation, Graz: Technische Universität Graz, 2017.
- [28] G. Schickhofer, Holzbau - Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz, Skriptum, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2009.
- [29] E. Gehri, Schraubenverbindungen für Laubholzkonstruktionen, Garmisch-Partenkirchen: 16. Internationales Holzbau-Forum, 2010.
- [30] ON EN 1383, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2016.
- [31] R. Brandner, A. Ringhofer und T. Reichinger, Performance of axially-loaded self-tapping screws in hardwood: Properties and design, *Engineering Structures* 188, 2019.
- [32] A. Ringhofer, Axially loaded self-tapping screws in solid timber and laminated timber products, Dissertation, Graz: Technische Universität Graz, 2017.
- [33] A. Ringhofer, R. Brandner und G. Schickhofer, A universal approach for withdrawal properties of self-tapping screws in solid timber and laminated timber products, Sibenik, Croatia: International network on timber engineering research (INTER), 2nd meeting, 2017.
- [34] R. Brandner, Properties of axially loaded self-tapping screws with focus on application in hardwood, *Wood Material Science & Engineering*, 2019.
- [35] H. J. Blass und T. Uibel, Determining Suitable Spacings and Distances for self-tapping Screws by Experimental and Numerical Studies, Riva Del Garda: WCTE - World Conference on Timber Engineering, 2010.
- [36] M. Pöll, Entwicklung einer Hartlaubholzschraube: Optimierung der Gewindegeometrie für die Beanspruchung auf Herausziehen, Masterarbeit, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2017.
- [37] E. Gehri, „Ductile behaviour and group effect of glued-in steel rods,“ ETH Zürich, Zürich, 2001.
- [38] E. Gehri, Influence of spacings on joint performance - experimental results and codification, Zürich: ETH Zürich, 2009.
- [39] W. Gatternig, Untersuchung der Randabstände bei selbstbohrenden Holzschrauben, Masterprojekt, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2010.

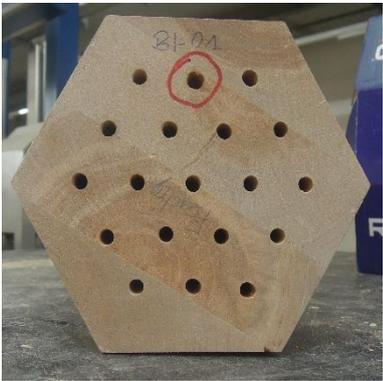
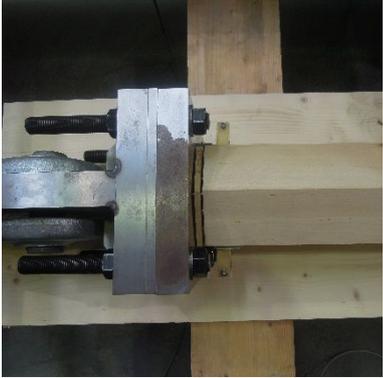
- [40] M. Grabner und A. Ringhofer, Untersuchungen zum Tragverhalten von leistungsfähigen Hirnholzanschlüssen in Laubholz, Garmisch-Partenkirchen: 20. Internationales Holzbau-Forum, 2014.
- [41] ETA-12/0114, Charlottenlund: ETA-Danmark A/S, 2012.
- [42] B. Eckerstorfer, Gruppenversuche in Hartlaubholz (Buche), Masterprojekt, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2017.
- [43] ETA-14/0354 - Träger BauBuche GL70, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015.
- [44] N. Meyer, Zugbeanspruchte Verbindungen in Buchenfunierschichtholz, Karlsruhe: Karlsruher Tage, 2016.
- [45] Z. Holic, Einflussfaktoren auf das Tragverhalten einer Stabdübelverbindung - Bestimmung des Reibungsbeiwertes zwischen Stabdübel und umgebendem Holz, Masterarbeit, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2016.
- [46] H. J. Blass und M. Flaig, Blockscheren von Holzbauteilen im Verbindungsbereich axial beanspruchter Vollgewindeschrauben, Tacoma: International Network on Timber Engineering Research INTER, 2019.
- [47] H. J. Blass, M. Flaig und N. Meyer, Row shear and block shear failure of connections with axially loaded screws, Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technologie, 2019.
- [48] U. Mahlknecht, R. Brandner und M. Augustin, Block shear failure mode of axially loaded groups of screws, Wien: WCTE - World Conference on Timber Engineering, 2016.
- [49] U. Mahlknecht und R. Brandner, Untersuchungen des mechanischen Verhaltens von Schrauben - Verbindungsmittelgruppen in VH, BSH und BSP, Forschungsbericht, Graz: Technische Universität Graz, 2013.
- [50] N. Meyer und H. J. Blass, Connections with glued-in rods in trusses made of beech-lvl, Seoul: WCTE - World Conference on Timber Engineering, 2018.
- [51] L. Brandl, Experimentelle Untersuchungen an zugbeanspruchten Schrägschraubverbindungen mit Bezug auf Versagen des Holzbauteils, Masterarbeit, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2015.
- [52] G. Lantos, Load distribution in multiple mechanical fasteners in Joints subjected to direct Load, High Wycombe: Timber Research and Development Association (TRADA), 1967.
- [53] O. Volkersen, Die Schubkraftverteilung auf die Verbindungselemente langer Laschenverbindungen, Dissertation, Wien: Technische Hochschule Wien, 1943.
- [54] A. Kevarinmäki, Joints with inclined screws, Kyoto: CIB-W18 Meeting thirty-five, 2002.
- [55] H. J. Blass, I. Bejtka und T. Uibel, Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2006.
- [56] A. Jorissen, Double shear Timber Connections with Dowel Type Fasteners, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, 1998.
- [57] M. B. Sayir, S. Dual, S. Kaufmann und E. Mazza, Ingenieurmechanik 1- Grundlagen und Statik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [58] M. H. Kessel, Bauteile aus Holz und ihre Verbindungen, Vorlesungsskriptum, Braunschweig: Institut für Baukonstruktion und Holzbau: Technische Universität Braunschweig, 2014/2015.

- [59] T. Finke, Technische Mechanik II, Vorlesungsunterlage, Frankfurt: Hessische BA, 2012.
- [60] A. Bertram, Formelsammlung Technische Mechanik I-IV, Magdeburg: Institut für Mechanik, Lehrstuhl für Festigkeitslehre, 2008.
- [61] R. Krapfenbauer und T. Krapfenbauer, Bautabellen, Wien: Verlag Jugend & Volk, 2004.
- [62] R. Mahnken, Lehrbuch der Technischen Mechanik-Statik, Berlin: Springer-Verlag, 2012.
- [63] H. J. Blass und B. I, Joints with included screws, Kyoto: CIB-W18 meeting thirty five, 2002.
- [64] H. J. Blass und I. Bejtka, Verbindungen mit geneigt angeordneten Schrauben, Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- [65] Deutsches Institut für Bautechnik, Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-100 - Zusammengesetzte Bauteile aus Furnierschichtholz "Kerto S" und "Kerto Q", Berlin, 2016.
- [66] G. Schiro, I. Giongo, S. Wendel, D. Riccadonna und M. Piazza, Testing of timber-to-timber screw-connections in hybrid configurations, Construction and Building Materials 171, 2018.
- [67] U. Mahlknecht, Zuglaschenstoß mit einer Schraubenreihe und einem Winkel $\alpha = 45^\circ$, technischer Bericht, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2020.
- [68] Dynea AS, Prefere 4546 - Liquid melamine urea adhesive for the wood industry, Lillestrom, 2018.
- [69] ETA-11/0190, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2013.
- [70] ÖNORM EN 1382 Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln, Wien: Austrian Standards Institute, 2016.
- [71] ÖNORM EN 26891 - Holzbauwerke - Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln - Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983), Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 1991.
- [72] G. Jeitler, M. Augustin und G. Schickhofer, Mechanical properties of Glued Laminated Timber and Cross Laminated Timber produced with the wood species birch, WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering, 2016.
- [73] M. Frese, Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche, Universitätsverlag Karlsruhe, 2006.
- [74] E. T., European Beech - Glued Laminated Timber, Zürich: ETH Zürich, 2019.
- [75] ÖNORM EN 384 - Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte, Wien: Austrian Standards, 2019.
- [76] ÖNORM EN 13183-1 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren, Wien: Austrian Standards Institute, 2004.
- [77] ÖNORM EN 14358 - Holzbauwerke — Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte, Wien: Austrian Standards Institute, 2016.
- [78] R. Brandner, K. Bratulic und A. Ringhofer, Serial correlation of withdrawal properties from axially loaded, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2015.
- [79] M. Fiebich, Untersuchung von Hirnholzverbindungen mit eingeklebten Stahlstäben in Brettschichtholz, Masterarbeit, Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2017.
- [80] H. J. Blaß und J. Streib, BauBuche Buchen-Furnierschichtholz - Bemessungshilfe für Entwurf und Berechnung nach Eurocode 5, Kreuzburg: Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, 2016.

- [81] H. Krenn und G. Schickhofer, Joints with inclined screws and steel plates as outer members, Duebendorf: CIB-W18 meeting forty two, 2009.

ANHANG B GRUPPENVERSUCHE 0°

Tab. Anhang B-1 Serie BI_01

Probekörper	Beschreibung		Bild
0_BI_19_92-80_06_sp01	Kraft ¹⁾ [kN]	267,12	
	$f_{ax,l}^{1)}$ [N/mm ²]	6,8	
	Rohdichte [kg/m ³]	607	
	Holzfeuchte ²⁾ [%]	9,3	
	K_{ser} [kN/mm]	1935/2184	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Herausziehen, keine Risse, Bohrspitze abgebrochen, beidseitig symmetrisch mit n = 17 geprüft, Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BI_19_92-80_04_sp02	Kraft ¹⁾ [kN]	295,44	
	$f_{ax,l}^{1)}$ [N/mm ²]	6,7	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	632	
	Holzfeuchte [%]	9,3	
	K_{ser} [kN/mm]	2139/1882	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BI_19_92-80_03_sp03	Kraft ¹⁾ [kN]	253,02	
	$f_{ax,l}^{1)}$ [N/mm ²]	6,4	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	632	
	Holzfeuchte [%]	9,3	
	K_{ser} [kN/mm]	1847/2115	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm, 2 Schrauben auf Seite Ost drehen durch	

Probekörper	Beschreibung		Bild
0_BI_19_92-80_02_sp04	Kraft ¹⁾ [kN]	306,09	306,09 
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	7,0	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	623	
	Holzfeuchte [%]	9,3	
	K_{ser} [kN/mm]	2351/2012	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BI_19_92-80_05_sp05	Kraft ¹⁾ [kN]	286,53	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	6,5	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	623	
	Holzfeuchte [%]	9,5	
	K_{ser} [kN/mm]	1825/1901	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BI_19_92-80_01_sp06	Kraft ¹⁾ [kN]	284,13	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	6,8	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	663	
	Holzfeuchte [%]	9,6	
	K_{ser} [kN/mm]	2071/2340	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Herausziehen, keine Risse, Seite Ost und West jeweils 1 Schraube die sich mit 30 Nm nicht anziehen lässt	

1) rechts-zensiert

2) auf eine Referenzfeuchte von $u_{ref} = 12\%$ nach ÖNORM EN 384 [75] korrigierter Wert

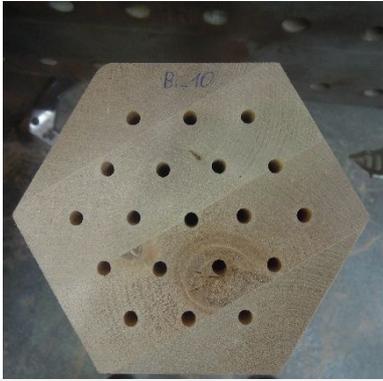
Tab. Anhang B-2 Zusammenfassung Serie BI_01

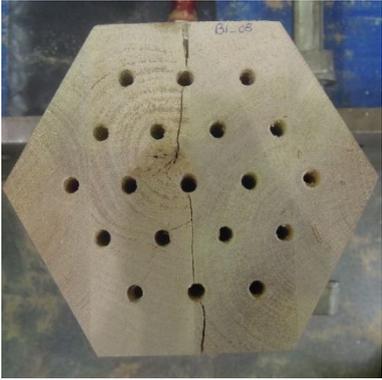
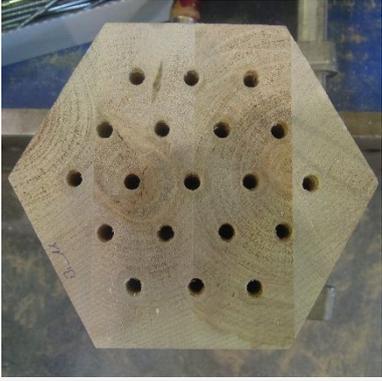
Zusammenfassung

$F_{max,mean}$ ¹⁾ [kN]	281,5	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	2042
$f_{ax,mean}$ ¹⁾ [N/mm ²]	6,7	COV [%]	8,8
$F_{max,50}$ ¹⁾ [kN]	285,33	$\eta_{netto,05}$ ¹⁾	0,73
COV [%]	6,9	$n_{ef,mean}$ ¹⁾ [-]	0,91

1) rechts-zensiert

Tab. Anhang B-3 Serie BI 02

Probekörper	Beschreibung		Bild
0_BI_19_92-40_01_sp12	Kraft ¹⁾ [kN]	201,66	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	5,8	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	568	
	Holzfeuchte [%]	9,4	
	K_{ser} [kN/mm]	-	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Aufspalten, Anziehdrehmoment 30 Nm, 4 Schrauben Seite Ost drehen durch	
0_BI_19_92-40_02_sp10	Kraft ¹⁾ [kN]	268,68	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	6,1	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	573	
	Holzfeuchte [%]	9,3	
	K_{ser} [kN/mm]	-	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Herausziehen, kein Riss, Anziehdrehmoment 15 Nm	
0_BI_19_92-40_03_sp09	Kraft ¹⁾ [kN]	272,61	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	6,2	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	589	
	Holzfeuchte [%]	9,5	
	K_{ser} [kN/mm]	-	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Aufspalten, Risse, Anziehdrehmoment 15 Nm	

Probekörper	Beschreibung		Bild
0_BI_19_92-40_04_sp08	Kraft ¹⁾ [kN]	283,59	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	6,5	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	605	
	Holzfeuchte [%]	9,3	
	K_{ser} [kN/mm]	-	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen - Schraubenbruch, Risse, Anziehdrehmoment 15 Nm	
0_BI_19_92-40_05_sp07	Kraft ¹⁾ [kN]	291,12	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	6,6	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	608	
	Holzfeuchte [%]	9,5	
	K_{ser} [kN/mm]	-	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Aufspalten, Risse, Anziehdrehmoment 15 Nm	
0_BI_19_92-40_06_sp11	Kraft ¹⁾ [kN]	244,77	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	5,6	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	566	
	Holzfeuchte [%]	9,3	
	K_{ser} [kN/mm]	-	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 15 Nm	

1) rechts-zensiert

2) auf eine Referenzfeuchte von $u_{ref} = 12\%$ nach ÖNORM EN 384 [75] korrigierter Wert

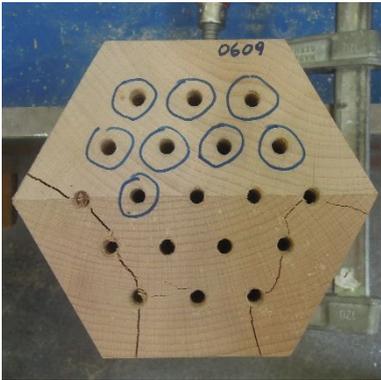
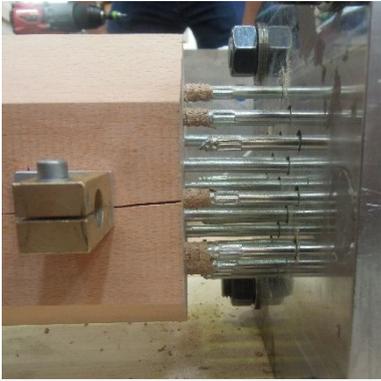
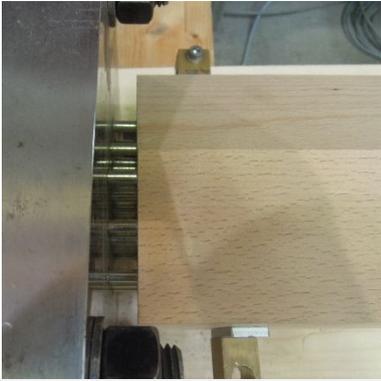
Tab. Anhang B-4 Zusammenfassung Serie BI_02

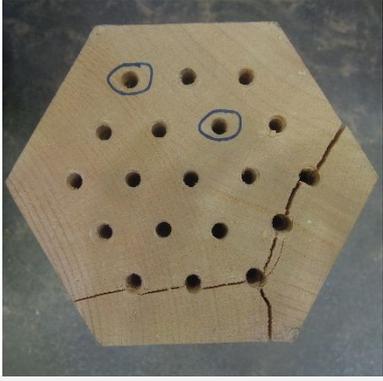
Zusammenfassung

$F_{max,mean}$ ¹⁾ [kN]	258,5	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	-
$f_{ax,mean}$ ¹⁾ [N/mm ²]	6,1	COV [%]	-
$F_{max,50}$ ¹⁾ [kN]	270,6	$\eta_{netto,05}$ ¹⁾	0,66
COV [%]	13,6	$n_{ef,mean}$ ¹⁾ [-]	0,94

1) rechts-zensiert

Tab. Anhang B-5 Serie BU 01

Probekörper	Beschreibung		Bild
0_BU_19_92-x_01_sp0609	Kraft ¹⁾ [kN]	563,88	
	$f_{ax,l}^{1)}$ [N/mm ²]	12,8	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	751	
	Holzfeuchte [%]	9,3	
	K_{ser} [kN/mm]	555/587	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen - Schraubenbruch, Risse. Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BU_19_92-x_02_sp0508	Kraft ¹⁾ [kN]	591,3	
	$f_{ax,l}^{1)}$ [N/mm ²]	13,5	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	791	
	Holzfeuchte [%]	9,5	
	K_{ser} [kN/mm]	551/490	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Herausziehen - Schraubenbruch, Risse. Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BU_19_92-x_03_sp0203	Kraft ¹⁾ [kN]	426,81	
	$f_{ax,l}^{1)}$ [N/mm ²]	9,7	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	710	
	Holzfeuchte [%]	9,5	
	K_{ser} [kN/mm]	459/467	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen, keine Risse. Anziehdrehmoment 30 Nm	

Probekörper	Beschreibung		Bild
0_BU_19_92-x_04_sp0711	Kraft ¹⁾ [kN]	479,76	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	10,9	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	681	
	Holzfeuchte [%]	9,0	
	K_{ser} [kN/mm]	470/515	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BU_19_92-x_05_sp1012	Kraft ¹⁾ [kN]	526,59	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	12,0	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	722	
	Holzfeuchte [%]	9,1	
	K_{ser} [kN/mm]	508/481	
	Anmerkungen	Versagen West, Schraubenbruch, Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BU_19_92-x_06_sp0104	Kraft ¹⁾ [kN]	475,74	
	$f_{ax,l}$ ¹⁾ [N/mm ²]	10,8	
	Rohdichte ²⁾ [kg/m ³]	729	
	Holzfeuchte [%]	9,6	
	K_{ser} [kN/mm]	506/501	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	

1) rechts-zensiert

2) auf eine Referenzfeuchte von $u_{ref} = 12\%$ nach ÖNORM EN 384 [75] korrigierter Wert

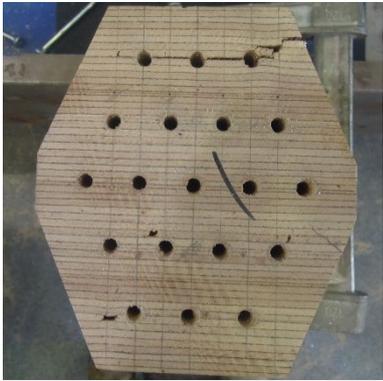
Tab. Anhang B-6 Zusammenfassung Serie BU_01

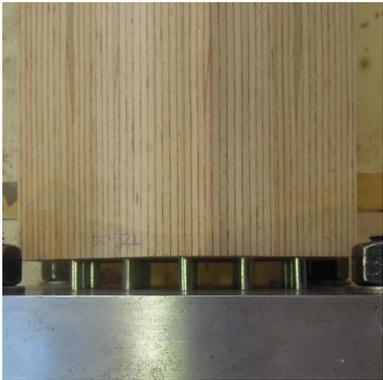
Zusammenfassung

$F_{max,mean}$ ¹⁾ [kN]	507,6	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	506,1
$f_{ax,mean}$ ¹⁾ [N/mm ²]	11,6	COV [%]	7,6
$F_{max,50}$ ¹⁾ [kN]	503,2	$\eta_{netto,05}$ ¹⁾	0,71
COV [%]	12,1	$n_{cf,mean}$ ¹⁾ [-]	0,91

1) rechts-zensiert

Tab. Anhang B-7 Serie BB 01

Probekörper	Beschreibung		Bild
0_BB_19_92-90_01_spT6-01	Kraft ¹⁾ [kN]	489,42	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	11,1	
	Rohdichte [kg/m ³]	786,5	
	Holzfeuchte [%]	6,1	
	K_{ser} [kN/mm]	511/491	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen, Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BB_19_92-90_02_spT7-02	Kraft ¹⁾ [kN]	466,21	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,6	
	Rohdichte [kg/m ³]	804,5	
	Holzfeuchte [%]	6,2	
	K_{ser} [kN/mm]	486/495	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BB_19_92-90_03_spT2-02	Kraft ¹⁾ [kN]	455,98	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,4	
	Rohdichte [kg/m ³]	760,1	
	Holzfeuchte [%]	6,2	
	K_{ser} [kN/mm]	492/513	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	

Probekörper	Beschreibung		Bild
0_BB_19_92-90_04_spT1-02	Kraft ¹⁾ [kN]	480,16	
	$f_{ax,1}$ ¹⁾ [N/mm ²]	10,9	
	Rohdichte [kg/m ³]	784,1	
	Holzfeuchte [%]	6,2	
	K_{ser} [kN/mm]	465/467	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BB_19_92-90_05_spT8-02	Kraft ¹⁾ [kN]	478,59	
	$f_{ax,1}$ ¹⁾ [N/mm ²]	10,9	
	Rohdichte [kg/m ³]	808,0	
	Holzfeuchte [%]	6,3	
	K_{ser} [kN/mm]	473/469	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	
0_BB_19_92-90_06_spT5-01	Kraft ¹⁾ [kN]	471,66	
	$f_{ax,1}$ ¹⁾ [N/mm ²]	10,7	
	Rohdichte [kg/m ³]	791,5	
	Holzfeuchte [%]	6,2	
	K_{ser} [kN/mm]	461/489	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 30 Nm	

1) rechts-zensiert

Tab. Anhang B-8 Zusammenfassung Serie BB_01

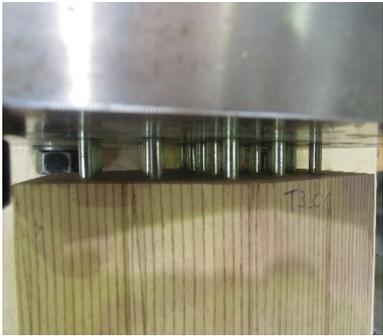
Zusammenfassung

$F_{max,mean}$ ¹⁾ [kN]	473,6	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	484
$f_{ax,mean}$ ¹⁾ [N/mm ²]	10,8	COV [%]	3,6
$F_{max,50}$ ¹⁾ [kN]	475,1	$\eta_{netto,05}$ ¹⁾	0,38
COV [%]	2,5	$n_{ef,mean}$ ¹⁾ [-]	0,79

1) rechts-zensiert

Tab. Anhang B-9 Serie BB 02 01

Probekörper	Beschreibung		Bild
0_BB_19_92-80_07_spT1-01	Kraft ¹⁾ [kN]	494,07	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	11,2	
	Rohdichte [kg/m ³]	803,2	
	Holzfeuchte [%]	6,2	
	K_{ser} [kN/mm]	459/455	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Herausziehen - Schraubenbruch, Risse, Anziehdrehmoment 20 Nm	
0_BB_19_92-80_08_spT2-01	Kraft ¹⁾ [kN]	450,09	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,2	
	Rohdichte [kg/m ³]	745,9	
	Holzfeuchte [%]	6,2	
	K_{ser} [kN/mm]	463/454	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Aufspalten, Risse, Anziehdrehmoment 20 Nm	
0_BB_19_92-80_09_spT3-02	Kraft ¹⁾ [kN]	483,48	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	11,0	
	Rohdichte [kg/m ³]	830,6	
	Holzfeuchte [%]	6,3	
	K_{ser} [kN/mm]	464/467	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen - Schraubenbruch, keine Risse, Anziehdrehmoment 20 Nm	

Probekörper	Beschreibung		Bild
0_BB_19_92-80_10_spT4-01	Kraft ¹⁾ [kN]	475,17	
	$f_{ax,1}$ ¹⁾ [N/mm ²]	10,8	
	Rohdichte [kg/m ³]	765,0	
	Holzfeuchte [%]	6,3	
	K_{ser} [kN/mm]	-	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen, keine Risse, Anziehdrehmoment 40 Nm	
0_BB_19_92-80_11_spT3-01	Kraft ¹⁾ [kN]	499,56	
	$f_{ax,1}$ ¹⁾ [N/mm ²]	11,4	
	Rohdichte [kg/m ³]	803,0	
	Holzfeuchte [%]	6,3	
	K_{ser} [kN/mm]	-	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen - Schraubenbruch, keine Risse, Anziehdrehmoment 40 Nm	
0_BB_19_92-80_12_spT5-02	Kraft ¹⁾ [kN]	490,2	
	$f_{ax,1}$ ¹⁾ [N/mm ²]	11,2	
	Rohdichte [kg/m ³]	811,5	
	Holzfeuchte [%]	6,1	
	K_{ser} [kN/mm]	-	
	Anmerkungen	Versagen West, Herausziehen - Schraubenbruch, keine Risse, Anziehdrehmoment 40 Nm	

1) rechts-zensiert

Tab. Anhang B-10 Zusammenfassung Serie BB_02

Zusammenfassung

$F_{max,mean}$ ¹⁾ [kN]	481,8	$K_{ser,mean}$ ²⁾ [kN/mm]	460
$f_{ax,mean}$ ¹⁾ [N/mm ²]	11,0	COV [%]	1,1
$F_{max,50}$ ¹⁾ [kN]	486,8	$\eta_{netto,05}$ ¹⁾	0,38
COV [%]	3,8	$n_{ef,mean}$ ¹⁾ [-]	0,80

1) rechts-zensiert

2) Nur 3 Probekörper mit Anziehdrehmoment 20 Nm

ANHANG C EINZELVERSUCHE 0°

Tab. Anhang C-1 Einzelversuche Buche

PK-Bez.	Kraft [kN]	$f_{ax,l}$ [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Holzfeuchte [%]	Versagen	Anmerkungen
0_BU_1_92-24_01	24,43	10,6	714,7	9,9	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_02	27,93	12,1	792,8	10,0	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_03	33,31	14,4	787,5	9,7	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_04	22,30	9,6	686,4	9,1	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_05	32,77	14,2	787,9	9,4	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_06	32,32	14,0	759,1	9,2	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_07	21,83	9,4	726,4	9,9	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_08	37,00	16,0	853,0	9,3	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_09	32,17	13,9	769,3	8,9	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_10	29,93	12,9	704,4	9,2	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_11	36,26	15,7	849,6	9,4	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_13	26,61	11,5	729,5	9,2	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_14	23,90	10,3	719,0	9,4	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_15	29,30	12,7	759,2	9,1	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_16	26,93	11,6	746,4	8,9	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_17	30,64	13,3	748,1	9,1	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_18	28,18	12,2	708,1	9,2	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_19	36,50	15,8	841,0	9,7	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_20	30,30	13,1	774,1	9,8	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_21	26,27	11,4	756,5	9,6	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm
0_BU_1_92-24_22	22,62	9,8	716,6	9,9	Herausziehen	$l_{emb} = 24$ mm $l = 100$ mm

Tab. Anhang C-2 Zusammenfassung Einzelversuche Buche

Zusammenfassung

	Kraft [kN]	Rohdichte [kg/m ³]	Feuchtigkeit [%]
Minimum	21,8	686,4	8,9%
arithmetischer MW	29,1	758,6	9,4%
Median	29,3	756,5	9,4%
Maximum	37,0	853,0	10,0%
Quantil 5%	22,3	704,4	8,9%
Quantil 95%	36,5	841,0	9,9%
Standardabweichung	4,7	47,6	0,35%
COV	16,0%	6,3%	3,7%
Anzahl	21		

Tab. Anhang C-3 Einzelversuche Birke

PK-Bez.	Kraft [kN]	$f_{ax,l}$ [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Holzfeuchte [%]	Versagen	Anmerkungen
0_BI_1-92-48_01	15,77	6,8	585,5	10,6	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_02	21,72	9,4	686,8	10,0	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_03	16,32	7,1	583,7	10,0	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_04	15,58	6,7	632,1	10,3	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_05	13,39	5,8	540,8	9,9	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_06	15,85	6,9	619,8	10,6	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_07	15,97	6,9	614,5	9,7	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_08	15,58	6,7	641,1	10,5	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_09	14,05	6,1	571,8	10,4	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_10	14,77	6,4	617,9	10,3	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_11	12,57	5,4	594,7	10,2	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_12	13,91	6,0	637,3	10,1	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_13	13,16	5,7	666,6	10,4	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_14	14,92	6,5	611,5	10,5	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_15	15,02	6,5	603,6	10,3	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_16	16,98	7,3	689,8	10,4	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_17	16,83	7,3	659,6	10,1	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_18	15,50	6,7	622,6	10,5	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_19	14,16	6,1	626,3	10,2	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm
0_BI_1-92-48_20	14,28	6,2	571,1	10,7	Herausziehen	$l_{emb} = 48$ mm $l = 100$ mm

Tab. Anhang C-4 Zusammenfassung Einzelversuche Birke

Zusammenfassung

	Kraft [kN]	Rohdichte [kg/m ³]	Feuchtigkeit [%]
Minimum	12,6	540,8	9,7%
arithmetischer MW	15,3	618,9	10,3%
Median	15,3	618,8	10,3%
Maximum	21,7	689,8	10,7%
Quantil 5%	13,1	569,6	9,9%
Quantil 95%	17,2	686,9	10,6%
Standardabweichung	1,9	38,7	0,2%
COV	12,6%	6,3%	2,4%
Anzahl	20		

Tab. Anhang C-5 Einzelversuche BauBuche

PK-Bez.	Kraft [kN]	$f_{ax,l}$ [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	Holzfeuchte [%]	Versagen	Anmerkungen
0_BB_1-80-64_01	31,98	15,9	806,4	7,1%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_02	27,62	13,7	778,1	7,2%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_03	24,95	12,4	766,0	7,3%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_04	27,07	13,5	793,5	7,2%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_05	22,77	11,3	735,9	7,1%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_06	28,82	14,3	797,0	7,3%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_07	29,35	14,6	775,5	7,3%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_08	24,62	12,2	766,7	7,2%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_09	25,07	12,5	785,0	7,4%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_10	27,26	13,6	757,7	7,3%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_11	25,39	12,6	771,1	7,3%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_12	28,73	14,3	767,1	7,3%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_13	22,86	11,4	743,5	7,8%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_14	26,81	13,3	779,4	7,4%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_15	27,33	13,6	762,9	7,4%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm
0_BB_1-80-64_16	23,50	11,7	776,2	7,3%	Herausziehen	$l_{emb} = 64$ mm $l = 88$ mm

Tab. Anhang C-6 Zusammenfassung Einzelversuche BauBuche

Zusammenfassung

	Kraft [kN]	Rohdichte [kg/m ³]	Feuchtigkeit [%]
Minimum	22,8	735,9	7,1%
arithmetischer MW	26,5	772,6	7,3%
Median	26,9	773,3	7,3%
Maximum	32,0	806,4	7,8%
Quantil 5%	22,8	741,6	7,1%
Quantil 95%	30,0	799,3	7,5%
Standardabweichung	2,5	18,3	0,2%
COV	9,6%	2,4%	2,1%
Anzahl	16		

Tab. Anhang B-7 *Ergebnisse der Referenzversuche der Steifigkeit*

Probekörper	Steifigkeit_Erstbelastung	Steifigkeit_Wiederbelastung
	[kN/mm]	[kN/mm]
0-BB-RefK-1-01-T3-01	30,18	30,39
0-BB-RefK-1-02-T1-01	29,80	31,31
0-BB-RefK-1-03-T5-01	27,07	31,71
0-BB-RefK-1-04-T5-02	27,91	30,43
0-BB-RefK-1-05-T6-01	29,07	31,49
0-BB-RefK-1-07-T2-02	28,67	30,89
0-BB-RefK-1-08-T7-02	28,56	32,74
0-BB-RefK-1-09-T1-02	29,24	31,67
0-BB-RefK-1-10-T8-02	30,27	-
0-BB-RefK-1-11-T3-02	30,55	32,50
0-BB-RefK-1-12-T4-01	27,07	31,00

ANHANG D SCHRAUBENZUGPRÜFUNGEN

Tabelle 5-1 *Ergebnisse der Schraubenzugprüfung*
Zusammenfassung

	Kraft [kN]
Minimum	35,81
arithmetischer MW	36,47
Median	36,2
Maximum	37,45
Quantil 5%	35,84
Quantil 95%	37,39
Standardabweichung	0,643
COV	1,8 %
Anzahl	6