

Untersuchungen zum Tragverhalten von leistungsfähigen Hirnholzanschlüssen in Laubholz

Investigations concerning the loadbearing behaviour of end-grain joints in hardwood

Analyse de la portance d'assemblages performants sur bois de grain de feuillus

Markus Grabner
DI
Institut für Holzbau und
Holztechnologie, TU Graz
AT-Graz



Andreas Ringhofer
DI
Institut für Holzbau und
Holztechnologie, TU Graz
AT-Graz



Untersuchungen zum Tragverhalten von leistungsfähigen Hirnholzanschlüssen in Laubholz

1. Einleitung und Motivation

Österreichs „Brotbaum“, die Fichte, wird mit den Folgen der Klimaänderungen und damit einhergehenden häufiger auftretenden Extremereignissen zu kämpfen haben. Folglich wird eine zukunftsorientierte Waldbewirtschaftung auf den Einsatz angepasster Baumarten abzielen. Monokulturen werden widerstandsfähigeren Mischkulturen weichen, wodurch zukünftig in Österreich und Mitteleuropa mit einem Rückgang der zur Verfügung stehenden Ressource Nadelholz zu rechnen ist. Damit einhergehend, steigt das Interesse insbesondere der Holzindustrie, deren Fertigungsprozesse bis dato fast ausschließlich auf Nadelholzprodukte abgestimmt sind, an innovativen und konkurrenzfähigen Produkten aus Laubholz.

Für einen breiteren Einsatz von Laubholz im konstruktiven Bereich sprechen neben der Verfügbarkeit und der Vielfalt der Verwendungsmöglichkeiten, das aus statischen Gesichtspunkten große Potential, welche einige Laubhölzer im Vergleich zu traditionell verwendeten Nadelhölzern aufweisen. Demgegenüber steht der derzeit noch höhere Aufwand in der Ver-, Be- und Weiterverarbeitung von Laubholz. In Anbetracht dessen erscheint ein Einsatz von neuen Bauteilen aus Laubholz in Kombination mit leistungsfähigen Verbindungstechnologien hinsichtlich nachhaltiger und effizienter Rohstoffnutzung in Form von leichten und filigranen Tragstrukturen als sinnvoll. Die Einzelkomponenten solcher aufgelöster Strukturen bestehen meist aus stabförmigen, geraden Bauteilen und werden durch deren eindimensionale Tragwirkung (Tragwirkung in Längsrichtung der Bauteilachse) charakterisiert. Die größte Herausforderung stellt dabei die Bauteilverbindung dar, denn die hohen mechanischen Eigenschaften des Ausgangsmaterials ermöglichen eine Reduktion des Bauteilquerschnitts bei im Vergleich zu Bauteilen aus Nadelholz gleichbleibender Tragfähigkeit.

Demzufolge steht bei annähernd gleichen Randbedingungen weniger Platzangebot zur Unterbringung von Verbindungsmitteln zur Verfügung. Um nun eine leistungsfähige Verbindung – d.h. eine möglichst hohe Ausnutzung der natürlichen Eigenschaften des Ausgangsmaterials – zu erreichen, ist auf eine optimale Krafteinleitung zu achten.

Untersuchungen in [1] und in [2] bestätigten bereits das hohe Potential der Holzschraube für den Einsatz in Laubholz der Holzarten Esche, Robinie und Buche. Im Gegensatz zu den drei genannten Holzarten, gibt es für Brettbasierte Holzwerkstoffe aus Birkenholz, welches insbesondere in Nord- und Osteuropa weit verbreitet ist, nur wenig Kenntnisse im Bereich der Verbindungstechnik. Neben der Ermittlung des Ausziehparameters f_{ax} für $\alpha = 0^\circ$ der Holzart Birke stehen folgende drei Fragen in der weiteren Betrachtung im Vordergrund:

- Welcher Wirkungsgrad η (Verhältnis der Tragfähigkeit der Verbindung zu jener des Bruttoquerschnitts) ist mittels faserparalleler Verschraubung in Birken-BSH möglich?
- Wie groß ist die wirksame Verbindungsmittellanzahl der Schraubengruppe?
- Bei welcher Querschnittsdimension und welcher Eindrehlänge ist ein Stahlbruchversagen der Schraubengruppe maßgebend?

2. Stand der Technik

Im Hinblick auf den Einsatz selbstbohrender Holzschrauben in Vollholz und Brettschichtholz liegen umfangreiche Arbeiten vor, die sich in erster Linie mit dem axialen Tragverhalten der Einzelschraube (siehe u. a. [3], [4], [5], [6]) und der Schraubengruppe (siehe u. a. [7], [8], [9], [10]) befassen. Die Anzahl der Arbeiten, die sich in diesem Zusammenhang mit Laubholz beschäftigen ist jedoch überschaubar [11], [12], [1], [13].

Jablonkay [11] führte 900 Ausziehprüfungen zum Einfluss der Holzfeuchte, der Rohdichte und des Winkels zwischen Schraubenachse und Faserrichtung auf den axialen Ausziehstand von EJOT-Rahmenankern durch.

Hübner tätigte in seinen Arbeiten in [12] und [1] umfangreiche Untersuchungen zum Thema Ausziehfestigkeit selbstbohrender Holzschrauben in Laubholz und entwickelte auf Grundlage von rund 3.000 Ausziehprüfungen unter Variation relevanter Einflussparameter (u.a. Winkel, Durchmesser, effektiver Eindrehlänge, Schraubenspitze, Holzfeuchte) Modelle zur Ermittlung des axialen Ausziehwidestands R_{ax} und der charakteristischen axialen Ausziehfestigkeit $f_{ax,k}$ für Esche, Buche und Robinie der Einzelschraube.

Gehri verwies in seinen Studien bereits in den 80iger Jahren auf die hohe Leistungsfähigkeit von auf Laubholz zugeschnittenen Verbindungen [14] und beschäftigte sich in weiterführenden Arbeiten u.a. mit Hirnholzverschraubungen in Eschen- und Fichtenholz [15], [13], [2], wobei neben dem Gruppeneffekt insbesondere die Abstände von Schrauben innerhalb axial beanspruchter Schraubengruppen, die parallel zur Faserrichtung eingebracht wurden, im Fokus der Untersuchungen standen. Er empfiehlt die Berücksichtigung eines Grenzwertes für den Abstand von faserparallel situierten und axial beanspruchten Schrauben, bei Einhaltung dessen keine Reduktion erforderlich wird und gibt diesen mit $a_{\text{threshold}} = 5 d$ (d entspricht dem Gewindeaußendurchmesser der Schraube) an. Bei geringeren Abständen wird eine Abminderung des axialen Ausziehwidestandes der Schraubengruppe vorgeschlagen.

Im Laufe des Jahres 2014 wurde von Obermayr im Rahmen von [16] eine erste Vorversuchsreihe zur Thematik der Hirnholzverschraubung von schlanken Birken-BSH-Querschnitten am Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz durchgeführt. Neben der Entwicklung der Prüfkonfiguration für die im Rahmen dieses Beitrages diskutierten Gruppenversuche, erfolgte auch eine Vorversuchsserie mit dem Ziel, sämtliche Versagensmechanismen einer Hirnholz-Schraubenverbindung durch Variation der Schraubenanzahl, der effektiven Gewindelänge sowie der Einbindetiefe beobachten zu können (Versagensmechanismen: Schraubenbruch, Ausziehen, Aufspalten, Mischbruch). Zum Stand der Technik ist zudem erwähnenswert, das sich derzeit nur eine europäisch technische Zulassung (ETA) eines Schraubenherstellers findet, welche einen Einsatz der Holzschraube für tragende Laubholz-Bauteile aus Buche und Eiche unter faserparalleler Anordnung beinhaltet, siehe [17].

Dies mag auf den ersten Blick verwundern, da Untersuchungen in [1] ein Erreichen hoher Tragwiderstände selbstbohrender Holzschrauben in Laubholz belegen, doch bei näherer Betrachtung erscheint vor allem die erforderliche Vorbohrung aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften von Laubholz als nachteilig. Solange diese für Laubholz notwendig ist, wird die Holzschraube, welche sich gerade für ihre universelle und einfache Handhabung (selbstbohrend) auszeichnet, nach Meinung der Verfasser nur sehr schwer im konstruktiven Einsatz Einzug halten. Ausnahme sind auf Effizienz und Hochleistung optimierte Anschlüsse, welche einen entsprechenden Aufwand in ihrer Herstellung rechtfertigen können. Bei hohen Anschlusskräften und geringem Platzbedarf stellt Laubholz eine durchaus konkurrenzfähige Alternative zu anderen Materialien dar. Vor allem, wenn diese Bauteile bereits im Werk unter kontrollierten Bedingungen (Drehmoment, Vorbohrung) vorgefertigt werden.

Obwohl die Anwendung faserparalleler Verschraubung in den Zulassungen einiger Schraubenhersteller explizit gestattet ist (wenn auch mit signifikanter Abminderung der Ausziehfestigkeit einhergehend), soll an dieser Stelle auf die Problematik des Dauersstandsverhaltens („Duration of Load“-Effekt) bei dieser Art der Applikation hingewiesen werden. Gemäß [18] weist diese für das in diesem Projekt untersuchte Fichten-Vollholz (Versagen auf Herausziehen) nur sehr kurze ertragbare Beanspruchungsdauern auf, bis es zum schlagartigen Versagen der Verbindung kommt. Empfehlungen zur Verbesserung der Zeitstandfestigkeit sind nach [18] hauptsächlich geometrischer Natur (Versenken des Gewindes um mind. $2 d$ im Holz) und wurden in [12] bereits für einen Bemessungsvorschlag von Schrauben in Laubholz und im neuen Entwurf der ÖNORM B 1995-1-1 für die Bemessung in den Schmalflächen von Brettsperrholz berücksichtigt.

3. Material und Methoden

3.1. Prüfprogramm

Um Aussagen zum Wirkungsgrad η und zur effektiven Verbindungsmittellanzahl n_{ef} der Schraubenverbindung treffen zu können, wurden zu Beginn die in [16] durchgeführten Untersuchungen mittels Referenzprüfungen an der Einzelschraube neu bewertet und analysiert. Im nächsten Schritt konnte auf Grundlage dieser Beobachtungen ein Prüfkonzept erstellt werden, welches auf die Ermittlung des maximalen Wirkungsgrades einer Hirnholzverschraubung abzielt.

Da die mechanischen Eigenschaften des Ausgangsmaterials Stahl der Holzschraube erfahrungsgemäß im Vergleich zum natürlichen Rohstoff Holz äußerst geringen Streuungen unterliegen (Variationskoeffizient $CoV \approx 1,5\%$), ist zu erwarten, dass bei auf Stahlbruch abgestimmte Versagensmechanismen besser abgeschätzt werden können. Daher erfolgte eine Abstimmung des Prüfprogrammes auf das Erreichen der Schraubenstahlzugfestigkeit in der Verbindung. Neben der Durchführung von Stahlzugprüfungen an der Einzelschraube, dienten Zugprüfungen am Einzelbrett gemäß EN 408 [19] zur Ermittlung der Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials Holz, wodurch eine Abschätzung des Wirkungsgrades der Bauteilverbindung ermöglicht wird. Zur Frage, welche Querschnittsdimension unter Berücksichtigung davon abhängiger geometrischer Randbedingungen (Abstände zwischen den Schrauben und zum Rand) zu einer optimalen – im Sinne der Leistungsfähigkeit der Verbindung – Anschlussgeometrie führt, wurden Einzelausziehprüfungen (vergl. Abbildung 2) durchgeführt. Diese Prüfserie erfolgte in Anlehnung an [13] und diente im Wesentlichen der Ermittlung eines Mindestabstandes bzw. Mindestquerschnitts, bei welchem kein Aufspaltversagen mehr beobachtet wird. Durch Variation der Seitenlänge $a = 2,5 d \mid 3,5 d \mid 5,0 d \mid 10,0 d$ des quadratischen Querschnitts konnte somit ein Mindestquerschnitt definiert werden, welcher in der Hauptprüfserie „Schraubengruppe“ bei Einhaltung und Wahl entsprechender Eindrehlänge zu einem reinen Stahlzugversagen der Schraubengruppe führen sollte.

Abbildung 1 zeigt schematisch die dem Prüfkonzept zu Grunde liegende Vorgangsweise zur Ermittlung der Parameter:

- $f_{t,0}$ Zugfestigkeit parallel zur Faser des Ausgangsmaterials Brett
- f_{tens} Stahl-Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials Schraube
- $f_{ax}(a)$ Ausziehparameter parallel zur Faser des Ausgangsmaterials Brett, abhängig von der Seitenlänge des Prüfquerschnitts
- $R_{t,0}$ Tragwiderstand der Bauteilverbindung entlang der Bauteilachse
- η Wirkungsgrad der Bauteilverbindung
- n_{ef} effektive wirksame Verbindungsmittellanzahl

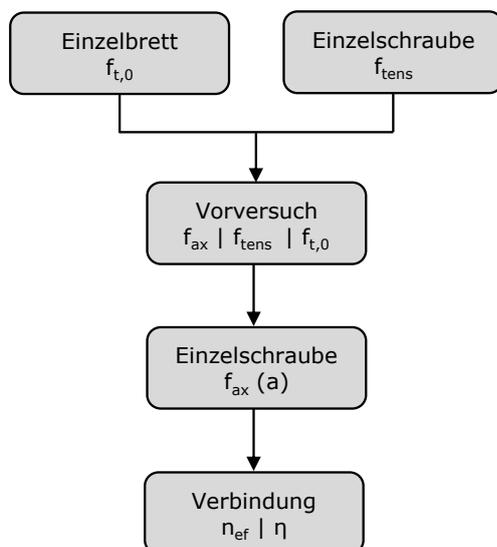


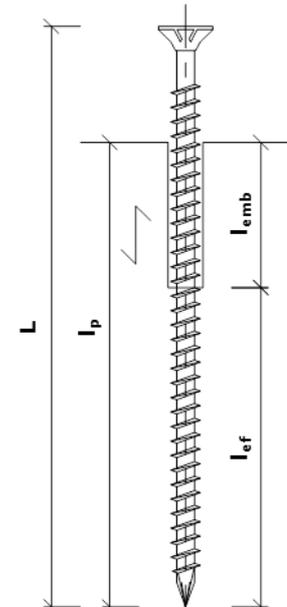
Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prüfprogramms

3.2. Verwendete Holzschrauben und Applikation

Im Rahmen der Untersuchungen wurden drei Schraubentypen mit Nenndurchmessern $d = 8$ und 10 mm verwendet. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Parameter der verwendeten Holzschrauben angeführt. Vor Applikation der Schraube wurden sämtliche Prüfkörper vorgebohrt. Der Durchmesser der Vorbohrung wurde entsprechend dem Nenndurchmesser bzw. Kerndurchmesser der verwendeten Holzschraube auf Millimeter gerundet und ist in Tabelle 1 angeführt.

Tabelle 1: Parameter der verwendeten Holzschrauben, aus [20] und [21]

Schraube	RAPID	SPAX-S
Hersteller	Schmid Schrauben Heinfeld GmbH	SPAX International GmbH & Co. KG
Zulassung	ETA-12/0373	ETA-12/0114
Nenndurchmesser d	8,0 10,0	10,0
Kerndurchmesser d_1	5,3 6,0	6,0
Durchmesser Vorbohrung d_{VB}	5,0 6,0	6,0
Gesamtlänge L	240 280 300 360	300
Eindrehlänge l_{ef}	80 120 170 190	190
Einbindetiefe l_{emb}	50	50
Gewinde	Vollgewinde	



Während der Applikation der Schraubengruppe wurden die Einzelschrauben in Anlehnung an [22] mit einem Drehmoment von rund 20 Nm angezogen, um ein über die gesamte Schraubengruppe mögliches gleichmäßiges Anpressen des Senkkopfes in der Aufnahme der Stahlplatte zu erreichen.

3.3. Prüfkörper

Für die Herstellung der Prüfkörper wurde ausschließlich Brettware der Holzart Birke (*Betula Pendula*) verwendet. Das Ausgangsmaterial mit den Nennabmessungen $L|b|h = 4000|128|42$ mm wurde in Russland im Sägewerk der Firma Hasslacher erzeugt. Aus rund 1000 Brettern wurden 80 möglichst merkmalsfreie Bretter entnommen und zur Fertigung der Prüfkörper der Prüfserien „Zugprüfung am Einzelbrett“ und „Abstandsvariation“ verwendet.

Die Prüfkörper der Prüfserie „Abstandsvariation“ sind in Abbildung 2, links dargestellt und wurden aus 20 Brettern mit $L|b|h = 4000|143|43$ mm mit Seitenlängen $a_i = 20|28|40$ mm und einer Länge von $l = 300$ mm entnommen. Für Prüfungen am größeren Querschnitt mit einer Seitenlänge von $a = 80$ mm wurden drei Brettabschnitte aus dem selben Bereich des Ausgangsbrettes entnommen und miteinander verklebt.

Zur Prüfung der Bauteilverbindung wurden aus Birken BSH-Trägern 12 möglichst merkmalsfreie Prüfkörper mit quadratischem Querschnitt der Seitenlänge $a = 115$ mm und einer Länge $l = 1000$ mm entnommen. Vor der Applikation der Schrauben wurden sämtliche Prüfkörper beidseitig vorgebohrt. Zunächst erfolgte die Vorbohrung der Einbindetiefe von $l_{emb} = 50$ mm mit Durchmesser $d_{VB,emb} = 12$ mm. Im zweiten Schritt wurde die Eindrehlänge mit $l_{ef} = 190$ mm und Durchmesser $d_{VB} = 6$ mm vorgebohrt (siehe Tabelle 1 und Abbildung 2, rechts).

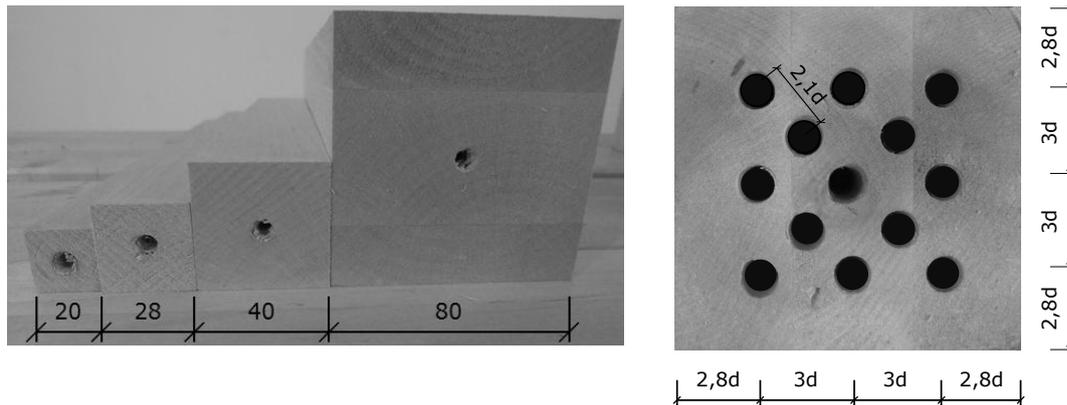


Abbildung 2: Links: Prüfkörper für Prüfserie "Abstandsvariation" (Seitenlänge a in mm)
Rechts: Schraubenbild der Hirnholzverschraubung bei den Gruppenversuchen

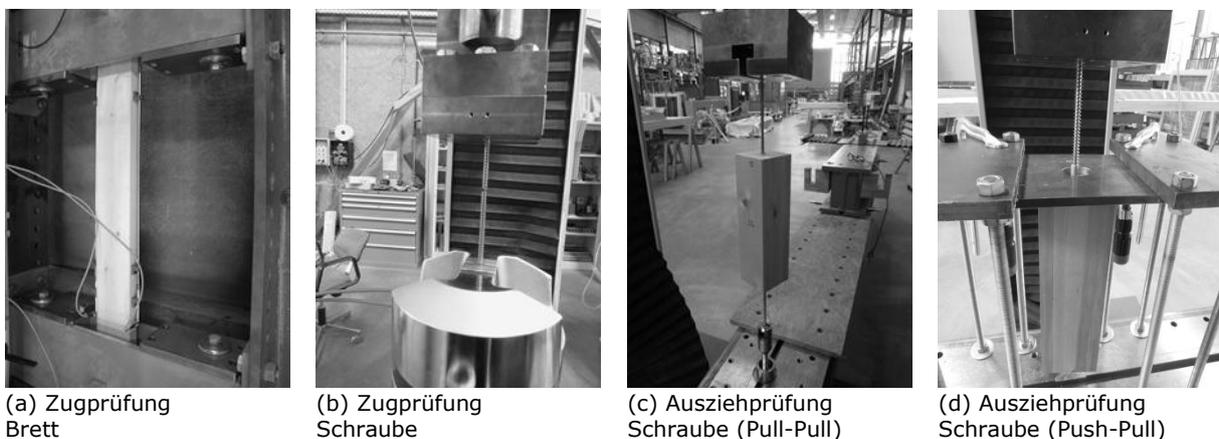
3.4. Klimatisierung

Alle Prüfkörper wurden vor der Durchführung der Prüfungen bis zur Massekonstanz bei einer relativen Luftfeuchte von $65 \pm 5\%$ und einer Temperatur von $20 \pm 1\text{ °C}$ gelagert.

4. Prüfeinrichtung

Die Zugprüfung des Einzelbrettes erfolgte gemäß ÖNORM EN 408 [19] an der Zugprüfmaschine LIGNUM_Z_850, die eine, mittels Öldruck, stufenlose und steuerbare Aufbringung von Kräften bis maximal 850 kN gewährleistet. Die verwendete Belastungsvorrichtung erlaubte es, die auf den Prüfkörper aufgebrachte Last mit einer Fehlergrenze von weniger als 1 % zu messen (siehe Abbildung 3 (a)).

Die Referenzversuche an den Einzelschrauben wurden allesamt am Prüfgerüst LIGNUM_UNI_275 (Universalprüfmaschine der Firma Zwick/Roell, Prüfkraft bis maximal 275 kN) durchgeführt (siehe Abbildung 3 (b, c, d)). Die Bestimmung der Stahlzugtragfähigkeit der Einzelschrauben erfolgte in Anlehnung an ÖNORM EN 14592 [23], die Probe wurde durch eine monoton ansteigende Belastung beansprucht, auf eine Hysterese wurde verzichtet. Das untere Auflager bildete dabei die starre Klemmung des Schraubengewindes mittels hydraulischer Klemmbacken; das obere Auflager, welches zufolge vertikalem Vorschub auch die weggesteuerte Belastung in die Schraube einleitete, wurde mittels Einhängen des Schraubenkopfes in einem speziell hierfür vorgesehenen, gelenkigen Adapter realisiert. Derselbe wurde auch für die Lasteinleitung der Prüfungen zur Bestimmung der Ausziehtragfähigkeit in Anlehnung an EN 1382 [24] (ebenfalls monoton ansteigende Belastung ohne Hysterese) verwendet, während das untere Auflager in Abhängigkeit der Prüfkonfiguration durch eine Gegenschraube („Pull-Pull“) oder einer Gegenplatte („Push-Pull“) ausgebildet wurde.



(a) Zugprüfung
Brett

(b) Zugprüfung
Schraube

(c) Ausziehprüfung
Schraube (Pull-Pull)

(d) Ausziehprüfung
Schraube (Push-Pull)

Abbildung 3: Prüfkonfigurationen der Einzelkomponenten Brett und Schraube

Die Prüfungen der Schraubengruppe in Form eines Hirnholzanschlusses wurden wiederum an der Zugprüfmaschine LIGNUM_Z_850 durchgeführt. Die Einleitung der Zugkraft erfolgte beidseitig durch horizontale und vertikale Bolzenverbindungen, die über Stahlflaschen an die Schraubenaufnahme durch vier Schrauben angeschlossen werden können. Im Bereich der Lasteinleitung wurden die Stahlteile auf Teflonplatten gelagert, um eine etwaige Momentenbeanspruchung aus dem Eigengewicht des Bauteils und somit einen Einfluss des Prüfaufbaus auf das Tragverhalten der Bauteilverbindung soweit als möglich zu vermeiden.

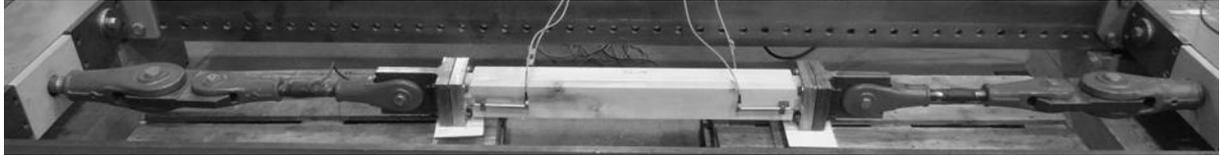


Abbildung 4: Prüfkonfiguration für Bauteilverbindung - Hirnholzverschraubung

4.1. Ausziehfestigkeit der Holzschrauben

In den weiteren Betrachtungen wird im Gegensatz zur Ermittlung des Ausziehparameters nach EN 1382 [24] die Ausziehfestigkeit als Mantelfestigkeit verwendet, welche mittels folgender Funktion berechnet wird:

$$f_{ax,exp,i} = \frac{F_{ax,exp,i}}{d \cdot l_{ef} \cdot \pi} ,$$

mit

$f_{ax,exp,i}$	Ausziehfestigkeit der Prüfung i in $[N/mm^2]$,
$F_{ax,exp,i}$	gemessene maximale Kraft der Prüfung i in $[N]$,
d	Nenn Durchmesser der Schraube in $[mm]$ und
l_{ef}	effektive Länge der Schraube im Holz in $[mm]$, abzüglich der Schraubenspitze.

5. Ergebnisse und Diskussion

Abweichend von der chronologischen Reihenfolge der Prüfungen, werden in diesem Abschnitt zur besseren Übersicht zuerst die Prüfergebnisse am einzelnen Verbindungsmittel bzw. am Einzelbrett und in weiterer Folge jene der Gruppenversuche dargelegt und diskutiert. Abbildung 5 (Einzelversuche) und Abbildung 6 (Gruppenversuche) geben einen ersten Überblick der beobachteten Versagensmechanismen.



Schraubenbruch



Aufspalten



Ausziehen

Abbildung 5: Beobachtete Versagensmechanismen für die Einzelschraube

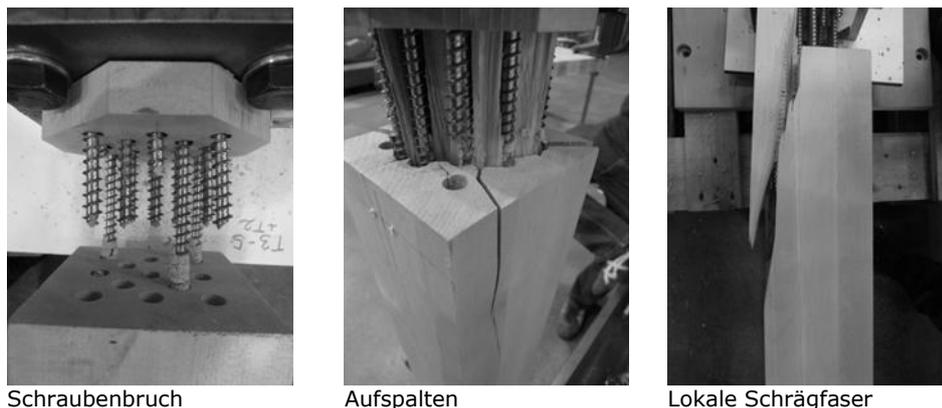


Abbildung 6: Beobachtete Versagensmechanismen für die Schraubengruppe

5.1. Holzfeuchte und Rohdichte

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Erwartungswerte E und Variationskoeffizienten CoV der Holzfeuchte und Rohdichte (auf eine Holzfeuchte von 12% referenziert) für sämtliche Prüfungen, welche im Rahmen dieses Beitrages diskutiert werden. Zudem sind die (empirischen) 5%-Quantilwerte der Rohdichte ausgewiesen. Es ist ersichtlich, dass der mittlere Feuchtegehalt sämtlicher Proben in einer schmalen Bandbreite zwischen 10,1 % und 11,2 % variierte. Dasselbe gilt prinzipiell für die Erwartungswerte der Rohdichte, welche für die betrachteten Serien nahezu ident sind. Von einer holzfeuchte- oder rohrichteabhängigen Korrektur der Festigkeitskennwerte wurde daher abgesehen.

Tabelle 2: Statistische Kennwerte der Holzfeuchte und Rohdichte für sämtliche Prüfungen

Serie	Holzfeuchte u [%]			Rohdichte ρ_{12} [kg/m ³]		
	Einzelbrett	Einzel-schraube	Gruppe	Einzelbrett	Einzel-schraube	Gruppe
n	77	80	13	77	80	13
E[X]	10,1	11,2	10,8	619	618	617
CoV[X]	4,88	4,24	1,81	5,92	4,87	3,24
X_{05,emp}	-	-	-	562	572	587

5.2. Stahlzugtragfähigkeit der Einzelschraube

In Tabelle 3 sind die wesentlichen statistischen Kenngrößen (Erwartungswert, Variationskoeffizient und 5%-Quantilwert) der Stahlzugtragfähigkeit f_{tens} (Bezeichnung gemäß ÖNORM EN 1995-1-1[25]) der für die Gruppenversuche verwendete SPAX-S-Schraube dargestellt. Auffallend ist hierbei die große, für Stahlzugversagen von Schrauben unverhältnismäßig hohe Streuung (siehe auch Abschnitt 3.1), was zur Folge hat, dass der (empirisch ermittelte) 5%-Quantilwert relativ gering ausfällt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Prüfungen zur Ermittlung der Stahlzugtragfähigkeit der Einzelschraube

Schraube	SPAX-S
d [mm]	10
n [-]	16
E[f_{tens}] [N]	30.589
CoV[f_{tens}] [%]	11,3
f_{tens,05,emp} [N]	25.593

5.3. Zugfestigkeit am Einzelbrett

Zur Ermittlung der Zugfestigkeit am Einzelbrett dienten 77 Zugprüfungen. Der Erwartungswert der Zugfestigkeit $E[f_{t,0}]$ resultierte zu $51,4 \text{ N/mm}^2$. Der Variationskoeffizient ergab sich zu $\text{CoV}[f_{t,0}] = 24,8 \%$ und entspricht den Erwartungen aus vorangegangenen Untersuchungen nach [16]. Der empirische 5%-Quantilwert konnte mit $f_{t,0,05,\text{emp}} = 30,0 \text{ N/mm}^2$ ermittelt werden.

5.4. Abstandsvariation

Wie in Abschnitt 3.3 bereits angesprochen, wurden für die Untersuchungen des Auszieh-widerstandes in Abhängigkeit der vorhandenen Querschnittsfläche selbstbohrende Holz-schrauben in quadratischen Birken-Querschnitten mit den Seitenlängen $a = 20 | 28 | 40$ und 80 mm auf Herausziehen geprüft. Als Grundlage für die Gruppenversuche, betrug auch hier der Winkel zwischen Kraft- bzw. Schraubenachse und Faserrichtung 0° . Im Gegensatz zu den Gruppenversuchen wiederum, wurde für die in diesem Abschnitt diskutierten Prüfserie ein Schraubendurchmesser von 8 mm verwendet. Der Vergleich der Ausziehfestigkeit mit der Seitenlänge a erfolgt jedoch relativ (a als Vielfaches von d) und wird daher - sofern durchgehend Ausziehversagen zu beobachten ist - als repräsentativ für sämtliche Durchmesser selbstbohrender Holzschrauben gesehen.

Wie in Abbildung 7 und Tabelle 4, welche die wesentlichen statistischen Kenngrößen dieser Prüfserie wiedergeben, ersichtlich, kann für die Erwartungswerte von f_{ax} und vor allem für dessen 5%-Quantilwerte eine leicht abfallende (jedoch auf Basis überlappender Boxplot-Einschnürungen als 95 %-Konfidenzintervallgrenzen von $f_{ax,50}$ nicht signifikante) Tendenz bei kleiner werdendem Verhältnis a/d beobachtet werden. Zudem versagte bei $a/d = 2,5$ bei zwei Prüfungen der Holzquerschnitt auf Aufspalten, was auf eine zu hohe Querkzugbeanspruchung, selbst bei dem geringen vorhandenen Wert für l_{ef} von 80 mm , zurückzuführen ist. Ab einem Verhältnis a/d von rund $3,5$ (Erwartungswert) bzw. $5 d$ (5%-Quantilwert) ist mit wachsendem a/d kein Unterschied mehr in der Größe der Ausziehfestigkeit zu erkennen, was auch in Untersuchungen von Gehri in Fichtenholz beobachtet wurde, siehe [13]. Dies gilt auch für die Prüfserie mit $a/d = 20$, welche im Rahmen von [26] mittels „Push-Pull“-Prüfkonfiguration in Birkenholz der gleichen Grundpopulation (Rohdichte nahezu ident, Holzfeuchte $12 \pm 2 \%$) durchgeführt worden ist. Somit bestätigt sich auch hier die in [27] für Fichtenholz festgestellte Erkenntnis des zu vernachlässigenden Einflusses der Prüfkonfiguration auf die Ausziehfestigkeit selbstbohrender Holzschrauben.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ab einer Holz-Querschnittsfläche von $a \times a = 25 d^2$ je Schraube, diese in der Lage ist, ihre volle Leistungsfähigkeit bei axialer Beanspruchung abzurufen. Dies entspricht auch den Erkenntnissen aus [8] für axial beanspruchte Schraubengruppen in Fichtenholz ($\alpha = 90^\circ$). Voraussetzung hierbei ist jedoch der Ausschluss von Versagensmechanismen des Holzes, wie etwa Blockscheren (Querkzug-Schub-Rollschub-Interaktion) oder Aufspalten (Querkzug).

Tabelle 4: Statistische Kennwerte der Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit der Holzquerschnittsdimension und Prüfkonfiguration

Prüfkonfiguration	Pull-Pull				Push-Pull*
	20	28	40	80	
a [mm]	20	28	40	80	160
a/d [-]	2,5	3,5	5,0	10,0	20,0
n [-]	20	20	20	19	11
E[X] [N/mm²]	6,05	6,31	6,28	6,20	6,24
CoV[X] [%]	19,6	25,0	18,7	13,3	20,1
$x_{50,\text{emp}}$ [N/mm²]	5,91	6,03	5,98	6,24	5,64
$x_{05,\text{emp}}$ [N/mm²]	4,60	4,80	5,02	4,97	4,93
* Daten aus [26]					

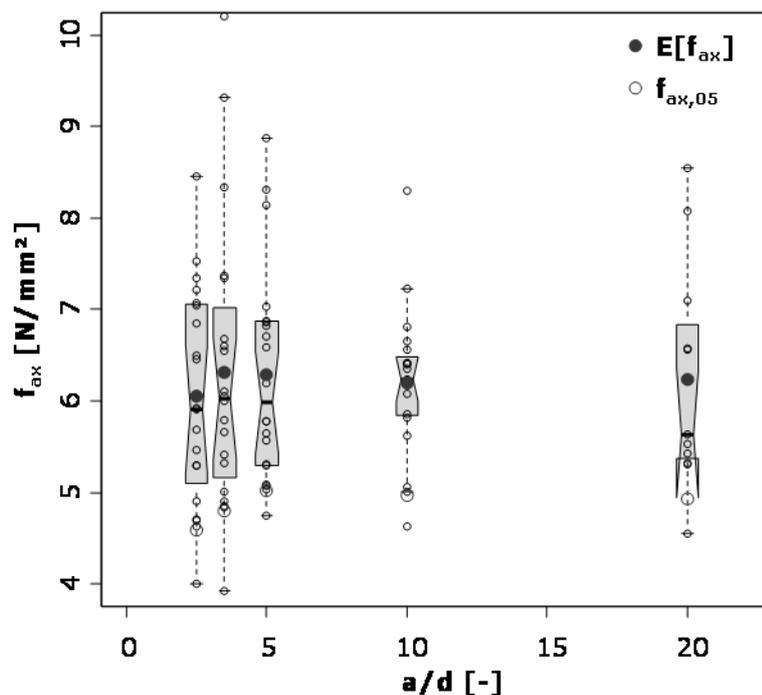


Abbildung 7: Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Verhältnisse a/d

5.5. Referenzprüfungen zu den Gruppenversuchen aus [16]

Wie in Abschnitt 2 angeführt, wurden im Rahmen von [16] unter anderem zwei Prüfungen durchgeführt, welche zufolge der Wahl einer geringen effektiven Gewindelänge von 120 mm gezielt auf Herausziehen versagten (n = 9). Um für beide Versuche die effektiv wirksame Anzahl an Verbindungsmittel bestimmen zu können, wurden, wie in Abbildung 8 dargestellt, Referenz-Ausziehversuche von Einzelschrauben in exakt denselben Lagen der damals verwendeten Probekörper durchgeführt. Der Vergleich erfolgt mit der Formel

$$n_{ef,i} = \frac{\sum_{i=1}^m F_{ref,i}}{F_{exp,n}}$$

mit

- $F_{ref,i}$ als Referenzwert der Ausziehtragfähigkeit für die betreffende Lage i,
- m als Anzahl Schrauben je Lage und
- $F_{exp,n}$ als Auszieh widerstand der Schraubengruppe, aus [16]

und ist in Tabelle 5 ausgewiesen. Wenn gleich aufgrund der geringen Versuchsanzahl nur als grober Richtwert zu verstehen, ist für beide Prüfungen die effektiv wirksame mit der tatsächlichen Zahl der eingesetzten Schrauben gleichzusetzen. Dasselbe Verhalten wurde in [10] unter ähnlichen Bedingungen (genügend große Querschnitte, geringe Eindrehlängen und Lastniveaus, um Ausziehversagen zu erreichen) für Schraubengruppen in den Schmalflächen von Brettsperrholz aus Fichte festgestellt.

Tabelle 5: Effektiv wirksame Verbindungsmittel bei Herausziehen für Prüfungen aus [16]

Name	$F_{exp,n}$ [kN]	l_{ef} [mm]	$F_{ref,i}$ [kN]	m	$\sum F_{ref,i}$ [kN]	$n_{ef,i}$
T001_2	201,8	120	25,7	3	203,0	0,99
			25,6	3		
			16,4	3		
T004_2	232,8	120	30,2	3	233,9	1,00
			24,9	3		
			23,0	3		

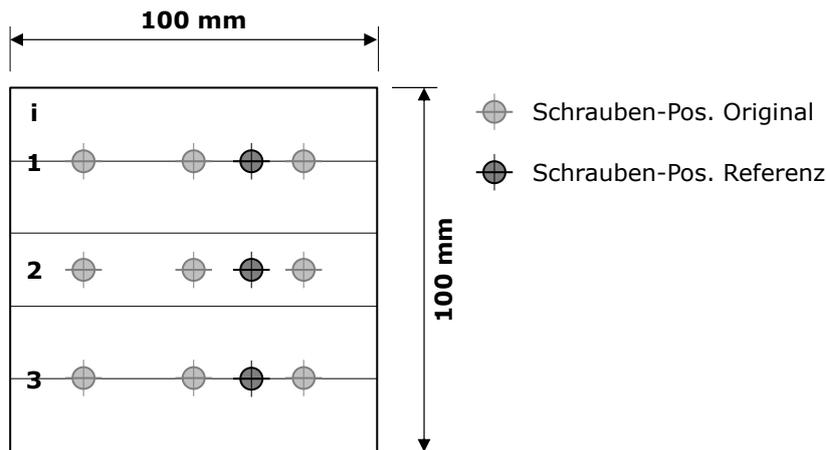


Abbildung 8: Position der Referenz-Schraubenversuche am geprüften Birken-BSH-Querschnitt, aus [16]

5.6. Schraubengruppe

Zur Ermittlung der effektiv wirksamen Verbindungsmittelanzahl n_{ef} und des Wirkungsgrades η der Hirnholzverschraubung wurden 13 Prüfungen mit jeweils 13 Schrauben des Nenndurchmessers $d = 10$ mm innerhalb der Verbindungsmittelgruppe durchgeführt. Auf Basis der in Abschnitt 5.2 angeführten Stahlzugtragfähigkeit der Einzelschraube, wurde die effektive Gewindelänge mit $l_{ef} = 190$ mm (exkl. einer Einbindetiefe von 50 mm) festgelegt, um den in Abschnitt 3.1 angestrebten Versagensmechanismus Schraubenbruch zu erzielen.

Dies konnte bei 10 der 13 Prüfungen auch erreicht werden. Die betreffenden statistischen Kenngrößen sind in Tabelle 6 ausgewiesen. Die verbleibenden 3 Prüfwerte wurden von der weiteren Betrachtung ausgenommen, da bei zwei Prüfkörpern ein Aufspalten zu beobachten war (die Abstände zwischen den Schrauben und zum Rand waren auf ein absolutes Minimum reduziert worden, siehe Abbildung 2, rechts) und bei einem eine einseitige lokale Schrägfaser zum Versagen führte. Es ist anzumerken, dass die dabei erreichten Tragwiderstände auf demselben Traglastniveau der Prüfwerte bei Schraubenbruch liegen, siehe Tabelle 6, rechts. Unter Zugrundelegung der in Abschnitt 5.2 dargelegten Stahlzugtragfähigkeit der Einzelschraube errechnet sich n_{ef} zu:

$$n_{ef} = \frac{E[R_{t,0}]}{n \cdot E[f_{tens}]} = \frac{364.000}{13 \cdot 30.600} = 0,92$$

mit

n_{ef}	als effektiv wirksame Verbindungsmittelanzahl,
n	als Verbindungsmittelanzahl,
$E[R_{t,0}]$	als Erwartungswert der maximal erreichten Tragwiderstände der Schraubengruppe in [N] und
$E[f_{tens}]$	als Erwartungswert der maximal erreichten Tragwiderstände der Einzelschraube für Schraubenbruch in [N].

Somit ist n_{ef} kleiner als die vorhandene Anzahl der Verbindungsmittel. Dies könnte auf die in Abschnitt 5.2 bereits erwähnte, hohe Streuung der Stahlzugtragfähigkeit der Einzelschraube zurückzuführen sein. Das Versagen einer bzw. der schwächsten Einzelschraube, deren Zugfestigkeit mit steigender Streuung statistisch abnimmt, auf Schraubenbruch führt durch fehlende Umlagerungsmöglichkeit zufolge der vergleichsweise starren Stirnplatte zum Versagen des gesamten Anschlusses. In einer vorangegangenen Studie [2] zu dieser Thematik wurde von Gehri zudem ein ähnliches Verhältnis zwischen tatsächlich vorhandenen und effektiv wirksamen Verbindungsmitteln beobachtet ($n_{ef} = 0,85 - 0,90$). Abschließend sei in dieser Thematik noch zu ergänzen, dass zufolge der in Abbildung 4 gezeigten Prüfkongfiguration mit zwei Anschlüssen je Prüfung und des Umstandes, dass immer nur eine Verbindung (links oder rechts) versagte bzw. die andere Verbindung zumindest diese Bruchlast ertrug, streng genommen ein rechts zensierter Datensatz vorliegt. D. h. in

einer zukünftigen Auswertung sollte diese Tatsache mitberücksichtigt werden, wobei zufolge [28] und [29] für Streuungen dieser Größenordnung ein mäßiger Anstieg von n_{ef} zu erwarten ist.

In weiterer Folge wurde auf Basis der Prüfungen am Einzelbrett die Tragfähigkeit des Bruttoquerschnitts abgeschätzt, indem die Bruttoquerschnittsfläche des BSH-Prüfkörpers mit der Zugfestigkeit des Einzelbrettes multipliziert wurde. Üblicherweise ist aufgrund des Aufbaues des BSH-Prüfkörpers aus unterschiedlichen Brettlamellen von einem Homogenisierungseffekt auszugehen, welcher zu einem vergleichsweise höheren 5%-Quantilwert führen würde, siehe [30]. Da dieser Effekt jedoch bei merkmalsfreiem und gering streuendem Material, wie in diesem Fall, nur zu geringen Änderungen führen würde und insbesondere auf Mittelwertniveau anzunehmen ist, dass daraus keine Erhöhung des Erwartungswertes resultiert, wurde von einer Berücksichtigung einer solchen Vergütung des Mittelwertes durch Multiplikation eines k_{sys} -Faktors abgesehen. Der Wirkungsgrad η wird somit durch folgende Funktion abgeschätzt:

$$\eta = \frac{E[R_{t,0}]}{A_{brutto} \cdot E[f_{t,0}]} = \frac{364.000}{115^2 \cdot 51,4} = 0,54$$

Die wesentlichen Ergebnisse der Gruppenversuche sind abschließend in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Ergebnisse der Gruppenversuche

b/h [mm]	115/115	
n [-]	13	
E[R_{t,0}] [kN]*	364	
CoV[R_{t,0}] [%]	6,54	
R_{t,0,05,emp} [kN]	338	
n_{ef} [-]	0,92	
η	0,54	
* R_{t,0} entspricht F_{max}		

6. Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf einer in [16] durchgeführten Serie an Pilotversuchen sowie einer Reihe an Referenzprüfungen von Einzelschrauben, war im Rahmen dieses Beitrages das Hauptaugenmerk auf die Maximierung der Tragfähigkeit eines Hirnholzanschlusses mit axial beanspruchten, selbstbohrenden Holzschrauben in Birken-Brettschichtholz gelegt worden. In Form von Prüfungen an Schraubengruppen, deren effektive Eindrehlängen den Stahlzugbruch der Schraube und somit ihr gesamtes Leistungspotential abrufen sollen, konnte nicht nur ein repräsentativer Wert effektiv wirksamer Verbindungsmittel $n_{ef} = 0,92$ für diese Art des Anschlusses bestimmt (bzw. das Ergebnis aus [2] für Esche bestätigt), sondern auch der maximal mögliche Wirkungsgrad η der Verbindung als Verhältnis zwischen der Tragfähigkeit der Verbindung und der geschätzten Brutto-QS-Tragfähigkeit mit rund $\eta = 0,54$ abgeschätzt werden. Anhand der Tatsache, dass die, zufolge der Maximierung dieses Kennwertes auf ein absolutes Minimum reduzierten Abstände bzw. anteilige Querschnittsflächen der Schrauben bereits bei rund einem Viertel der Prüfungen das nicht anzustrebende Versagen der Verbindung auf Aufspalten provozierten, ist eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades mittels faserparalleler Schraubenverbindung aus Sicht der Verfasser nur schwer vorstellbar. Nicht unerwähnt bleiben soll jedoch, dass dieselbe Verbindung im selben Querschnitt in Nadelholz bei gleichen geometrischen Bedingungen aufgrund der geringeren Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials einen weitaus höheren Wirkungsgrad aufweisen würde.

Neben der Steigerung der grundlegenden Kenntnis des Verhaltens selbstbohrender Holzschrauben in Laubholz, wie etwa einer vertieften Auswertung der vorhandenen Daten oder einem Vergleich der ermittelten Ausziehkennwerte mit bekannten Vorhersagemodellen, wird der zukünftige Fokus verstärkt auf die Entwicklung und Prüfung von Klebeverbindungen zur Ausbildung systematischer Verbindungsknoten von schlanken, dreidimensionalen Laubholz-Fachwerkstrukturen gelegt werden, siehe Abbildung 9, unten. Erste diesbezügliche Untersuchungen wurden ebenfalls in [16] durchgeführt.

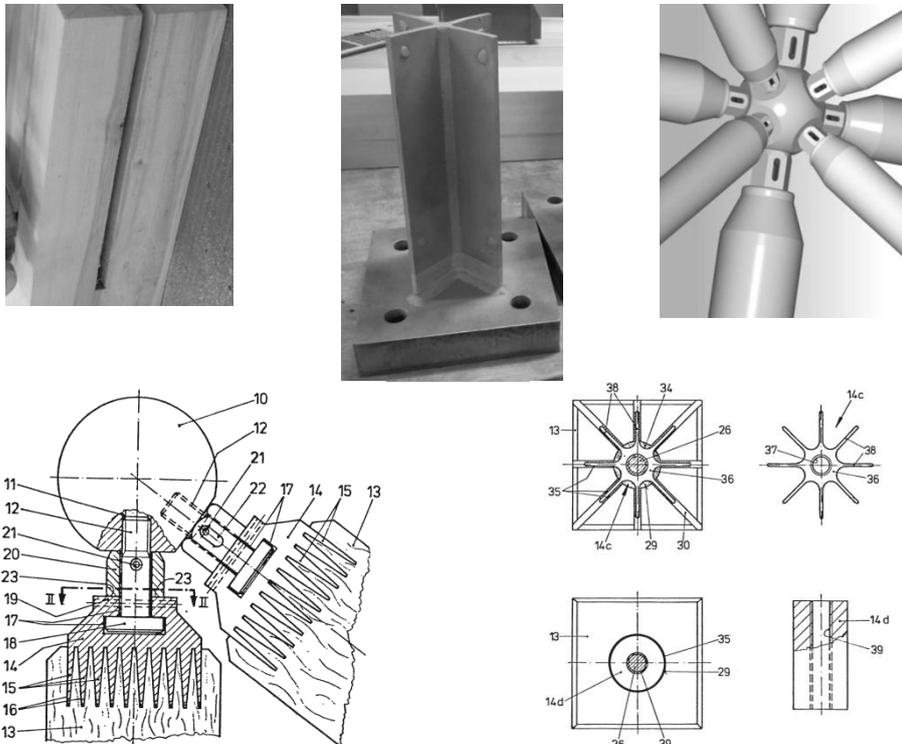


Abbildung 9: Oben links und Mitte: Entwurf eines Hirnholzanschluss mittels eingeklebten Stahl-Kreuzprofils [16], oben rechts: Verbindungsknoten des Systems „MERO“
Unten: Knotenpunktverbindung für Holzstäbe, System „MERO“ (Patent, 1981)

7. Danksagung

Die Verfasser möchten sich bei Schmid Schrauben Hainfeld GmbH für die kostenfreie Bereitstellung eines Teils der Holzschrauben, sowie bei Frau Dipl.-Ing. Irene Obermayr und Herrn Ing. Bernd Heissenberger für die Vorbereitung der Prüfkörper und Durchführung der Vorversuche herzlich bedanken.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Projektes H4 „innovative Laubholzverwendung“ der Doktoratsinitiative DokInHolz durchgeführt. In diesem Zusammenhang bedanken sich die Verfasser für die finanzielle Unterstützung seitens der Fördergeber, des Fachverbandes der Holzindustrie Österreichs (FHP) sowie dem Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (BMWF).

8. Literatur

- [1] Hübner, U.: Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile. Dissertation, TU Graz, Graz (2013)
- [2] Gehri, E.: Schraubenverbindungen für Laubholzkonstruktionen. Beitrag im Rahmen des 16. Internationalen Holzbau-Forums 10 (16. IHF 2010), Garmisch-Partenkirchen, Deutschland (Dezember 2010)
- [3] Blaß, H. J.; Bejtka, I.; Uibel, T.: Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde. Band 4 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, Deutschland (2006)

- [4] Pirnbacher, G., Brandner, R., Schickhofer, G.: Base Parameters of self-tapping Screws. Paper präsentiert im Rahmen des 42. CIB-Meetings, Dübendorf, Schweiz (August 2009)
- [5] Frese, M.; Fellmoser, P.; Blaß, H. J.: Modelle für die Berechnung der Ausziehtragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben. European Journal of Wood and Wood Products. DOI 10.1007/s00107-009-0378-1 (2009)
- [6] Ringhofer, A.; Brandner, R.; Schickhofer, G.: Withdrawal resistance of self-tapping screws in unidirectional and orthogonal layered timber products. Materials and Structures. DOI 10.1617/s11527-013-0244-9 (2013).
- [7] Krenn, H.; Schickhofer, G.: Joints with inclined screws and steel plates as outer members. Paper präsentiert im Rahmen des 42. CIB-Meetings, Dübendorf, Schweiz (August 2009)
- [8] Plieschounig, S.: Ausziehverhalten axial beanspruchter Schraubengruppen. Masterarbeit, TU Graz, Graz (2010)
- [9] Mahlknecht, U.; Brandner, R.; Ringhofer, A.; Schickhofer, G.: Resistance and Failure Modes of Axially Loaded Groups of Screws. In: Aicher, S. et al. (eds.): Materials and Joints in Timber Structures, RILEM Bookseries 9. DOI 10.1007/978-94-007-7811-5_27
- [10] Plüss, Y.: Prüftechnische Ermittlung des Tragverhaltens von Schraubengruppen in der BSP-Schmalfläche. Masterarbeit, TU Graz, Graz (2014)
- [11] Jablonkay, Peter: Schrauben unter Ausziehbeanspruchung. Diplomarbeit an der Professur für Holztechnologie, ETH Zürich 1999
- [12] Hübner, U.: Withdrawal strength of self-tapping screws in hardwoods. Paper präsentiert im Rahmen des 46. CIB-Meetings, Vancouver, Kanada (August 2013)
- [13] Gehri, E.: Influence of fasteners spacings on joint performance - experimental results and codification. Paper präsentiert im Rahmen des 42. CIB-Meetings, Dübendorf, Schweiz (August 2009)
- [14] Gehri, E.: Verbindungstechniken mit hoher Leistungsfähigkeit - Stand der Entwicklung. Holz als Roh- und Werkstoff 43:83-88 (1985)
- [15] Gehri, E.: Einfluss von Stabquerschnitt und Rohdichte auf den Ausziehwiderstand parallel zur Faser von Fichtenholz. Forschungsbericht, Schweiz (2001)
- [16] Obermayr, I.: Leistungsfähige Hirnholz-Schrauben- und Klebeverbindungen für schlanke Birken-Laubholzkonstruktionen, Masterarbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz 2014
- [17] ETA-11/0190: Würth Schrauben – Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungs-mittel
- [18] Pirnbacher, G.; Schickhofer, G.: Zeitabhängige Entwicklung der Traglast und des Kriechverhaltens von axial beanspruchten, selbstbohrenden Holzschrauben. Forschungsbericht, holz.bau forschungs gmbh, Graz, 2012
- [19] ÖNORM EN 408: Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften.
- [20] ETA-12/0373: Schmid Schrauben RAPID, SATRDRIVE und SP – Selbstbohrende Schrauben zur Verwendung im Holzbau
- [21] ETA-12/0114: SPAX Schrauben – Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungs-mittel in tragenden Holzkonstruktionen
- [22] Krenn, H.: Selbstbohrende Holzschrauben in hoch beanspruchten Bereichen, Forschungsbericht, holz.bau forschungs gmbh, Graz, 2009
- [23] ÖNORM EN 14592: Holzbauwerke – Stiftförmige Verbindungsmittel – Anforderungen

- [24] ÖNORM EN 1382: Holzbauwerke – Prüfverfahren – Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmiteln
- [25] ÖNORM EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
- [26] Schickhofer, G.; Sieder, R.; Wallner, B.: Prüfbericht PB12-112-6-01. TU Graz, 2014 (unveröffentlicht)
- [27] Ringhofer, A.; Schickhofer G.: Influencing parameters on the experimental determination of the withdrawal capacity of self-tapping screws. Paper präsentiert im Rahmen der WCTE 2014, Quebec, Kanada (2014)
- [28] Steiger, R; Köhler, J: Analysis of censored data - examples in timber engineering research. Paper präsentiert im Rahmen des 38.CIB-Meetings, Karlsruhe, Deutschland (August 2005)
- [29] Ringhofer, A.; Grabner, M.; Silva, C. V.; Branco, J.; Schickhofer, G.: The influence of moisture content variation on the withdrawal capacity of self-tapping screws. Holztechnologie 56(3):33-40 (2014)
- [30] Brandner, R.: Stochastic System Actions and Effects in Engineered Timber Products and Structures. Dissertation, TU Graz, Graz (2012)