



Daniel Köberl, BSc

Analysen betreffend eines hochleistungsfähigen, geschraubten Rohrverbinders für Anwendungen in Hartlaubholzprodukten

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass.Prof. DI(FH) Dr.techn. Reinhard Brandner

Institut für Holzbau und Holztechnologie

DI Dr.techn. Andreas Ringhofer

Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, November 2017

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

Kurzfassung

Die steigenden Laubholzvorräte in Europa, in Mitteleuropa vor allem jene der Holzart Buche, machen eine bauliche Nutzung immer interessanter. Hartlaubholz und die daraus entwickelten Produkte wie Brettschichtholz oder Furnierschichtholz weisen mit ihren gegenüber Nadelholz wesentlich höheren mechanischen Kenngrößen ein großes Potential hinsichtlich der Steigerung der Tragfähigkeit bzw. der Realisierung schlanker Tragelemente auf. Um die Leistungsfähigkeit von Hartlaubholz ausschöpfen zu können, muss auch der Anschluss die Fähigkeit besitzen, die Tragfähigkeit des Produktes in hohem Maße weiterzuleiten sowie aufgrund des geringeren Holzquerschnittes und im Bestreben nach einer adäquaten Querschnittsschwächung eine hohe Kompaktheit aufweisen.

Wie in dieser Arbeit dargelegt werden gegenwärtige, den Normen oder Zulassungen entsprechende Anschlusslösungen den erhöhten Ansprüchen nicht zur Gänze gerecht. Die Entwicklung einer neuartigen Verbindungslösung abseits gewohnter Wege ist somit der nächste logische Schritt.

Die vorliegende Arbeit gibt Aufschluss darüber, ob diese Anforderungen mit einer rohrförmigen Verbindung, die axial auf Herausziehen parallel zur Faser beansprucht wird, erfüllt werden können. Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit geschraubter Lösungen gilt die Weiterentwicklung dieser Technologie als vielversprechend. Ein rohrförmiger Anschluss mit Außen- und Innengewinde führt, im Vergleich zur herkömmlichen Schraubenverbindung, zu einer annähernden Verdopplung der Verankerungsfläche. Dies spiegelt sich in einer deutlich höheren Tragfähigkeit bei gleichem Bruttoquerschnitt wieder.

Anhand dieser Überlegungen wurde, auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche sowie ersten Messungen des Eindrehwiderstandes, ein vereinfachtes Berechnungsmodell zur Ermittlung der geometrischen Abmessungen erstellt. Ergebnisse der Eindreh- und Auszieh Widerstände aus weiteren Versuchen zweier geschraubter Vollquerschnitte mit den Nenndurchmessern $d = 44$ und 72 mm führten zur Optimierung des Modelles und infolgedessen zur Produktion einer ersten Prototypenreihe. Die ersten Pull–Pull–Versuche mit den angefertigten Verbindern wurden anschließend durchgeführt und führten zu zuverlässigen Ergebnissen im Hinblick der Verifizierung des Rechenmodells.

Abstract

The increasing stocks of hardwoods in Europe, especially beech in central Europe, make it more and more interesting for structural usage. Hardwoods and the products developed out from it like Glued Laminated Timber (GLT) or Laminated Veneer Lumber (LVL) have higher mechanical properties in comparison to softwoods, and therefore a potential in increasing the bearing capacity or on the other hand slenderizing carrying elements. In order to exploit the material utilisation of beech the joint has not only to have the performance to transfer the load capacity to a large extent but also a compactness to fit adequately in slender beams.

The present study shows that existent connections, which are according to present standards and approvals, do not meet the high demands. As a result the development of a new connection is the next logical step.

This work provides more details about the question if a pipe shaped joint, with an outer and inner thread, loaded axially and parallel to grain is capable of fulfilling this demands. Due to the high capacity of screwed solutions further development of this technology is highly promising. A pipe-shaped joint, with an outer and inner thread, almost doubles the fastening surface compared to a conventional screw. This leads to a higher carrying capacity while requiring the same cross-section.

Due to these considerations and based on comprehensive research and first tests of the torsional resistance, a simplified calculation-model was established to define the geometric dimensions. Results of further tests to determine the torsional and withdrawal resistance of screw-typed joints with diameters of $d = 44$ and 72 mm led to further improvement and the production of the first series of prototypes. After carrying out the first tests with the new prototypes, the results showed reasonable correlation with the calculation-model.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: MOTIVATION UND ZIEL	1
KAPITEL 2: EINLEITUNG	2
2-1 PRINZIPIELLE ANFORDERUNGEN AN EINE VERBINDUNG	2
2-2 ANSCHLUSS AUF ZUG.....	3
2-3 ANALYSE DES POTENTIALS VON HARTLAUBHOLZ UND HARTLAUBHOLZPRODUKTEN.....	8
2-3.1 Allgemeines und Definition Referenzquerschnitt	8
2-3.2 Ausgewählte Mechanische Kennwerte von merkmalsfreien Proben, Hartlaubholz und Hartlaubholzprodukten	9
2-3.2.1 Merkmalsfreie Kleinproben („clear wood“).....	9
2-3.2.2 Kennwerte für Holz in Bauteilgröße („Timber“).....	12
2-3.2.3 Ausgewählte Holzprodukte	13
2-3.2.4 Vergleich und Diskussion der Kennwerte	15
2-3.3 Stand Der Technik Möglicher Anschlusslösungen für Stäbe beansprucht auf zug parallel zur faser	17
2-3.3.1 Allgemeine Angaben, Zieldefinition und Annahmen.....	17
2-3.3.2 Verbindungslösung mit Stabdübel.....	21
2-3.3.3 Verbindungslösung Schraubengruppe im Hirnholz.....	27
2-3.3.4 Verbindungslösung mittels ins Hirnholz eingeklebter Gewindestangen	32
2-3.3.5 Verbindungslösung mit über Stirn eingeklebten Blechen	34
2-3.3.6 Verbindungslösung Zuglaschenstoß mittels Schrägverschraubung und außenliegenden Stahlblechen	38
2-3.4 Zusammenfassung und Diskussion der analysierten Anschlusslösungen	42
2-3.4.1 Anschlusslösung Stabdübel	42
2-3.4.2 Anschlusslösung Schraubengruppe im Hirnholz.....	44
2-3.4.3 Anschlusslösung mittels ins Hirnholz eingeklebter Gewindestangen	46
2-3.4.4 Anschlusslösung mit über Stirn eingeklebten Blechen	47
2-3.4.5 Anschlusslösung Zuglaschenstoß mittels Schrägverschraubung und außenliegender Stahlbleche	50
2-3.4.6 Fazit aus den recherchierten Anschlusslösungen	52
KAPITEL 3: RECHERCHE GEGENWÄRTIGER ROHRFÖRMIGER VERBINDUNGSMITTEL	54
3-1 SCHRAUBMUFFE ALS HIRNHOLZ- BZW. STÜTZENFUßANSCHLUSS.....	54
3-2 EINGEKLEBTE ROHRMUFFEN.....	58

3-3	RAMPA-MUFFE.....	60
3-4	FAZIT	62
KAPITEL 4: ENTWICKLUNG EINES ROHRVERBINDERS ALS GESCHRAUBTE LÖSUNG		63
4-1	ANFORDERUNGSPROFIL UND PRINZIPIELLE ANNAHMEN	63
4-2	DEFINITION DER QUERSCHNITTSFLÄCHEN.....	65
4-2.1	Holz.....	65
4-2.2	Verbinder	67
4-3	BEANSPRUCHUNGSSITUATION SCHEMA FÜR GENERISCHES OPTIMIERUNGSTOOL	68
4-3.1	Überblick	68
4-3.2	Exkurs Systembetrachtungen.....	69
4-3.2.1	Allgemeine Einführung.....	69
4-3.2.2	Paralleles System	70
4-4	BEANSPRUCHUNG EINDREHEN (APPLIKATION).....	72
4-4.1	Holzversagen auf Torsion	72
4-4.1.1	Torsionsmodell zur Aufteilung des einwirkenden Momentes	72
4-4.1.2	Spannungsverteilung in den beiden Holzquerschnittsteilen	77
4-4.1.3	Abschätzung des Eindrehmomentes	82
4-4.1.4	Versuchsreihe 1.....	85
4-4.2	Stahlversagen auf Torsion.....	93
4-5	BEANSPRUCHUNG HERAUSZIEHEN.....	95
4-5.1	Modell Hübner	95
4-5.2	Versuchsreihe 2.....	98
4-5.2.1	Verbinder	98
4-5.2.2	Prüfkörper	98
4-5.2.3	Durchführung der Versuche.....	99
4-5.2.4	Anpassung des Hübner-Modells und Fazit	103
4-5.3	Modell Ringhofer.....	106
4-5.3.1	Adaptierung des Ringhofer - Modells.....	107
4-5.4	Zusammenführung der Modelle.....	108
4-5.5	Holzversagen auf Zug	110
4-5.6	Stahlversagen auf Zug.....	110
4-6	GEOMETRIEFESTLEGUNG UND WERKPLANUNG	111

4-7	VERSUCHSREIHE 3	114
4-7.1	Herstellungsprozess Rohrverbinder.....	114
ANHANG A	VERZEICHNISSE	I
A-1	Abbildungsverzeichnis	I
A-2	Tabellenverzeichnis	III
A-3	Literaturverzeichnis	VI
ANHANG B	DIVERSE ANDERE ANHÄNGE ...FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.	

KAPITEL 1: MOTIVATION UND ZIEL

Die Nutzung von Hartlaubhölzern wird durch die steigenden Laubholzvorräte, einhergehend mit einer Verschiebung der Rohstoffvorräte von Nadelholz zu Laubholz, immer interessanter, wichtiger und unumgänglicher. In Österreich werden nur zwei Drittel aller Laubholzvorräte genutzt und seit einem Jahrzehnt sinken die Preise für Buchenstammholz kontinuierlich. Ähnliches gilt für die Schweiz, Deutschland und Frankreich. Speziell für mittlere Stammqualitäten fehlen bisweilen ausreichende Nutzungsmöglichkeiten, folglich werden 70 % des Laubrundholzes energetisch verwertet (Hübner 2013a). Um die Nutzung dieses hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften hervorragenden Rohstoffes im Ingenieurholzbau weiter voranzutreiben, wurden neue Produkte bzw. Substitutionsprodukte geschaffen und u.a. neue, auf Untersuchungen an Laubhölzern beruhende Modelle für Schraubverbindungen erstellt (Hübner 2013a). Aktuelle Entwicklungen von Holzwerkstoffen aus Hartlaubholz, wie z.B. die BauBuche, ein Furnierschichtholz der Fa. Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH bestehend aus Starkfurnieren der Buche, weisen gegenüber Produkten aus Nadelholz, wie z.B. Brettschichtholz aus Fichte, rund drei- bis fünffach höhere Tragfähigkeiten auf. Dies führt dazu, dass bei gleicher Tragfähigkeit eines Stabes oder eines flächigen Elementes nur 1/3 bis 1/5 des Querschnittes zur Verankerung von Verbindungsmitteln in den Anschlussbereichen zur Verfügung steht. Will man die Leistungsfähigkeit des Produktes in Konstruktionen entsprechend nutzen, besteht somit die Herausforderung in der Lösung sehr kompakter und sehr leistungsfähiger Anschlüsse.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine völlig neue Art eines auf der Schraubentechnologie basierenden Verbindungsmittels mit einer Leistungsfähigkeit zu entwickeln, welche über jener vergleichbarer Verbindungen wie Schraubengruppen bzw. eingeklebter Gewindestangen liegt und die hohe Leistungsfähigkeit von Produkten aus Hartlaubholz, insbesondere von Stäben, auch im Anschlussbereich weitgehend erhalten kann. Der Fokus der Arbeit richtet sich hier auf Hirnholzverbindungen unter axialer Zugbelastung. Basierend auf der Idee eines Rohrverbinders mit Außen- und Innengewinde, welcher in eine vorgebohrte Ring-Nut appliziert werden soll, gilt es, die Verankerungsfläche gegenüber herkömmlichen Schraubenlösungen nahezu zu verdoppeln und somit die Leistungsfähigkeit geschraubter Anschlüsse deutlich zu heben.

Die Arbeit gliedert sich in 3 Teilbereiche. In Kapitel 2 werden die Anforderungen, welche eine Verbindung erfüllen soll, aufgelistet sowie der Anschluss auf Zug näher erläutert. In weiterer Folge zeigt ein Vergleich das gegenwärtige Potential etablierter Verbindungsarten in unterschiedlichen Hartlaubholzprodukten und setzt die Ergebnisse Nadelholzprodukten aus Fichte gegenüber. Kapitel 3 zeigt in der Praxis angewandte, rohrförmige Verbindungsmittel. In Kapitel 4 wird die schrittweise Entwicklung eines geschraubten Rohrverbinders, von der Modellbildung über die Berechnung bis zur Fertigung sowie den benötigten Versuchen, beschrieben.

KAPITEL 2: EINLEITUNG

2-1 PRINZIPIELLE ANFORDERUNGEN AN EINE VERBINDUNG

Die primären Anforderungen an Verbindungen lassen sich im Allgemeinen auf die folgenden drei Bereiche begrenzen:

- hohe Tragfähigkeit
- hohe Steifigkeit
- hohe Duktilität

Die Forderung nach einer hohen Tragfähigkeit ist durch den Erhalt der Leistungsfähigkeit der Konstruktionselemente (Stab, Platte, Scheibe) am Anschlusspunkt begründet. Dieser Erhalt der Leistungsfähigkeit wird üblicherweise als Nutzungsgrad angegeben, welcher als Leistungsfähigkeit des Anschlusses im Verhältnis zu jener des Brutto-Querschnittes oder alternativ zu jener des durch den Anschluss selbst geschwächten Netto-Querschnittes des jeweiligen Konstruktionselementes definiert werden kann. Nutzungsgrade üblicher Anschlüsse im konstruktiven Ingenieurholzbau, hier bezogen auf die Leistungsfähigkeit des Brutto-Querschnittes, sind in Tabelle 2-1 dargestellt. Um den Nutzungsgrad günstig zu gestalten, sind allgemein somit einerseits eine hohe Leistungsfähigkeit der eingesetzten Verbindungsmittel und andererseits eine möglichst geringe Querschnittsschwächung durch die Anschlussausbildung im Tragelement notwendig.

Tabelle 2-1 Nutzungsgrade η einiger typischer Verbindungen im Holzbau (Schickhofer 2006a)

Wirkungsgrad (maximal)	theoretisch	praktisch
Verklebung		
-Schäftung	$\approx 1,0$	$\approx 0,9$
-Zinkung	$\approx 0,85$	$\approx 0,8$
Stiftförmige Verbindungsmittel (Stahlblech-Holz)	$\approx 0,75$	$\approx 0,6$
Stiftförmige Verbindungsmittel (Holz-Holz)	$\approx 0,6$	$\approx 0,5$

Aus Verformungs- bzw. Durchbiegungsbeschränkungen innerhalb von Tragwerken resultiert die zweite Anforderung, jene nach einer hohen Steifigkeit. Diese Anforderung ist oftmals widersprüchlich zum dritten Kriterium, einer hohen Duktilität. Letzteres ist für das Verhalten eines gesamten Tragwerkes von entscheidender Bedeutung. Zum einen, um eine gewisse „Warnfähigkeit“ des Anschlusses durch Anzeigen übermäßiger Verformungen bereits vor einem Versagen zu gewährleisten, und zum anderen, um durch das Fließen einzelner Anschlussbereiche und Anschlüsse innerhalb eines Tragwerkes andere, weniger beanspruchte Knoten zum Mittragen anzuregen und somit die Leistungsfähigkeit des Tragwerkes sowie auch das Tragwerksverhalten positiv zu beeinflussen.

2-2 ANSCHLUSS AUF ZUG

Die hohen Zugfestigkeiten von Hartlaubholz und die sich daraus resultierende Möglichkeit schlanker Querschnitte lenken den Fokus vermehrt auf stabförmige Bauteile. Die hohen Tragfähigkeiten von Stäben auf Zug-Normalkraft und Biegung stehen im Gegensatz zu niedrigen Tragfähigkeiten bei Druck-Normalkraft wegen der mit der Schlankheit zunehmenden Knickgefahr.

In der Praxisanwendung sind Fachwerke die logische Konsequenz, bestehend aus stabförmigen Bauteilen, welche, bei gelenkiger Lagerung, ausschließlich Normalkräfte aufnehmen müssen. Um das Risiko von Stabilitätsversagen niedrig zu halten, sollen druckbeanspruchte Stäbe möglichst kurz gehalten werden.

Der Ausbildung normalkraftbasierter Tragsysteme wie ebene oder räumliche Fachwerke, Tensegrity-Strukturen oder verzweigte, baumartige Tragstrukturen sind keine Grenzen gesetzt. Ein wirtschaftlicher Einsatz kann jedoch nur mit einfachen Systemen gewährleistet sein und nicht mit architektonischen Ausnahmestrukturen.

Aufgrund der mittlerweile großen Hartlaubholzvorkommen werden für diesen leistungsfähigen und oftmals vergleichsweise teuren Baustoff vorwiegend Massenwendungen benötigt. Abbildung 2-1 zeigt einige massentaugliche, ebene Fachwerkssysteme, in denen die Druckstäbe kurz und Druckstäbe lang gehalten sind.



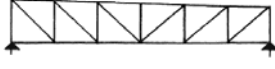

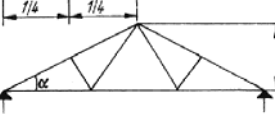
Parallelfachwerkträger mit Zugstreben		Anwendung als Windverband, Dachträger für Hallendächer, Brückenpfeiler
Strebenfachwerkträger		Siehe Abbildung 2-2 mit BauBuche
Pultfachwerkträger mit Zugstreben		Obergurt der Dachneigung angepasst
Trapezfachwerkträger mit Zugstreben		Obergurt der Dachneigung angepasst
Dreieckfachwerkbinder (W-Binder)		lange Diagonalen erhalten Zug-, die kurzen Druckkräfte

Abbildung 2-1: Auflistung einiger ebener Fachwerktragsysteme mit langen Zugstäben und kurzen Druckstäben (Mönck und Rug 2015)



Abbildung 2-2: Hallentragwerk aus Buchenurnierschichtholz (BauBuche) (Peters 2016)

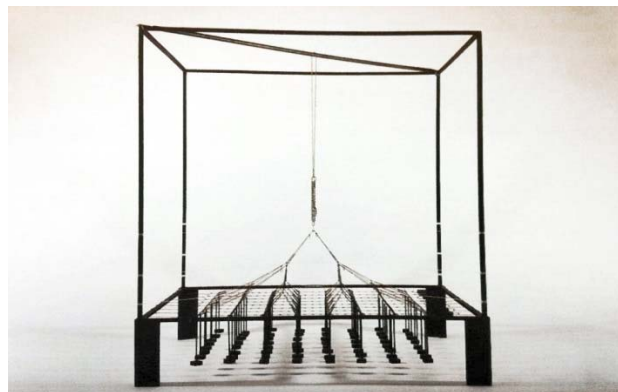
Ein Hirnholzanschluss ist für filigrane Tragwerke eine optisch ansprechende Alternative (siehe Abbildung 2-2). Auch aus brandschutztechnischer Sicht sind innerhalb des Holzquerschnittes liegende Verbindungsteile aus Stahl zu bevorzugen. Weiters gelten Montagestöße nach dem Vorbild des Bertsche-Ankers (Bertsche 1988) als optimale Möglichkeit, die Montagezeit auf der Baustelle zu verkürzen. Im Werk vormontierte Knoten sind zudem witterungsunabhängig und stellen eine rasche, saubere Lösung vor Ort dar.

Natürlicher Kraftfluss Baum

Um dem natürlichen Kraftfluss für ein optimiertes Tragsystemverhalten zu nutzen, gibt es in der Geschichte mehrere Beispiele: Antoni Gaudí etwa setzte Hängemodelle für den Entwurf seiner Bauwerke ein, unter anderem für den Bau der Sagrada Família und auch Otto Frei nutzte diese Technik in seinen Arbeiten (Abbildung 2-3).



(a)



(b)

**Abbildung 2-3: (a) Hängemodell der Sagrada Família von Antoni Gaudí (Gaudí)
(b) Hängemodell von Otto Frei (Frei)**

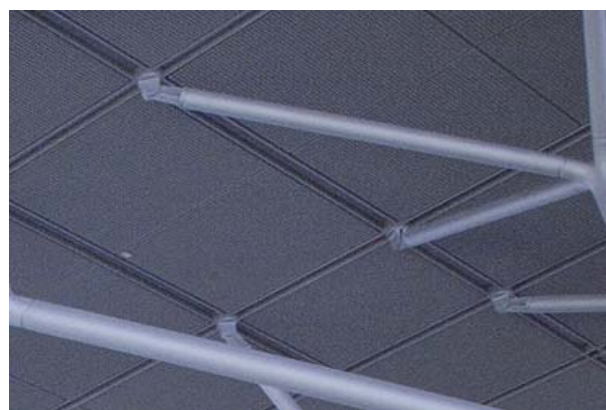
Baumartige Strukturen, insbesondere verzweigte Stützensysteme (engl. „branching structures“), haben durch die Verteilung der einwirkenden Lasten auf mehrere Bauteile einige Vorteile. Die Reduktion der Knicklängen für die primär auf Druck beanspruchten Streben sowie die großflächige Lastaufnahme und Ableitung in konzentrierter Form ermöglicht sowohl effiziente als auch, optisch ansprechende Tragwerke, siehe Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5 (Brandner 2014).



Abbildung 2-4: *Bahnhof Oriente Lissabon (Calatrava 1994)*



(a)



(b)

Abbildung 2-5: *(a) Baumstruktur der Stützen, Flughafen Stuttgart (Flughafen Stuttgart 2004)*
(b) Montagestoß (Flughafen Stuttgart 2004)

Räumliche Fachwerke

Die Canary Wharf Railway Station ist eine im Bau befindliche Zughaltestelle in London. Die Dachkonstruktion ist ein räumliches Fachwerk, bestehend aus Brettschichtholzstäben mit ins Hirnholz eingeschraubten Montagestößen (Abbildung 2-6).



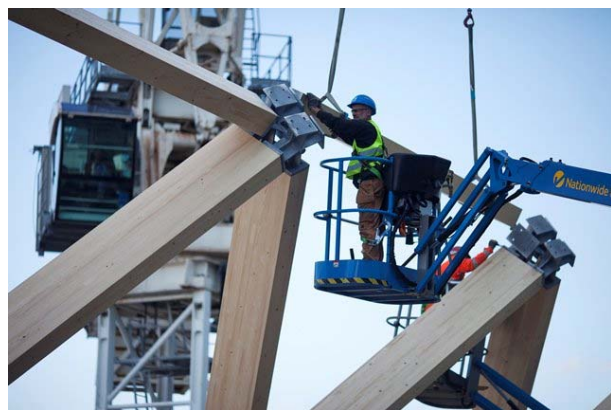
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 2-6: Canary Wharf Station in London (a) (Young), (b) (Young), (c) (Young), (d) (Young)

Die Verbindung zwischen Stahlplatte und Hirnholz wurde mittels geneigt eingedrehten Vollgewindeschrauben hergestellt. Auf diese Weise konnte das Holzteil mit dem Zentralknoten auf der Baustelle einfach mit Schraubenbolzen, gleich einem konventionellen Kopfplattenstoß, verbunden werden. Um Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, wurde die Fuge zwischen der Stahlplatte und dem Holz sowie die Senkungen für die Schraubenköpfe in den Stahlplatten mit Epoxidharz-Zweikomponentenkleber ausgespachtelt (baunetzwissen.de).

Tensegrity-Systeme

Ein weiteres Beispiel für primär (per Definition alleinig) auf Normalkraft belastete Stäbe sind sogenannte Tensegrity-Tragstrukturen. Man versteht darunter Tragstrukturen mit kontinuierlich verlaufenden Zugstäben und einzelnen, sich gegenseitig nicht berührenden Druckstäben. Tensegrity-Systeme können im Vergleich zu ihrem Eigengewicht und dem Materialeinsatz erstaunlich steife Systeme mit hoher Tragfähigkeit ergeben (Abbildung 2-7) (Brandner 2014).

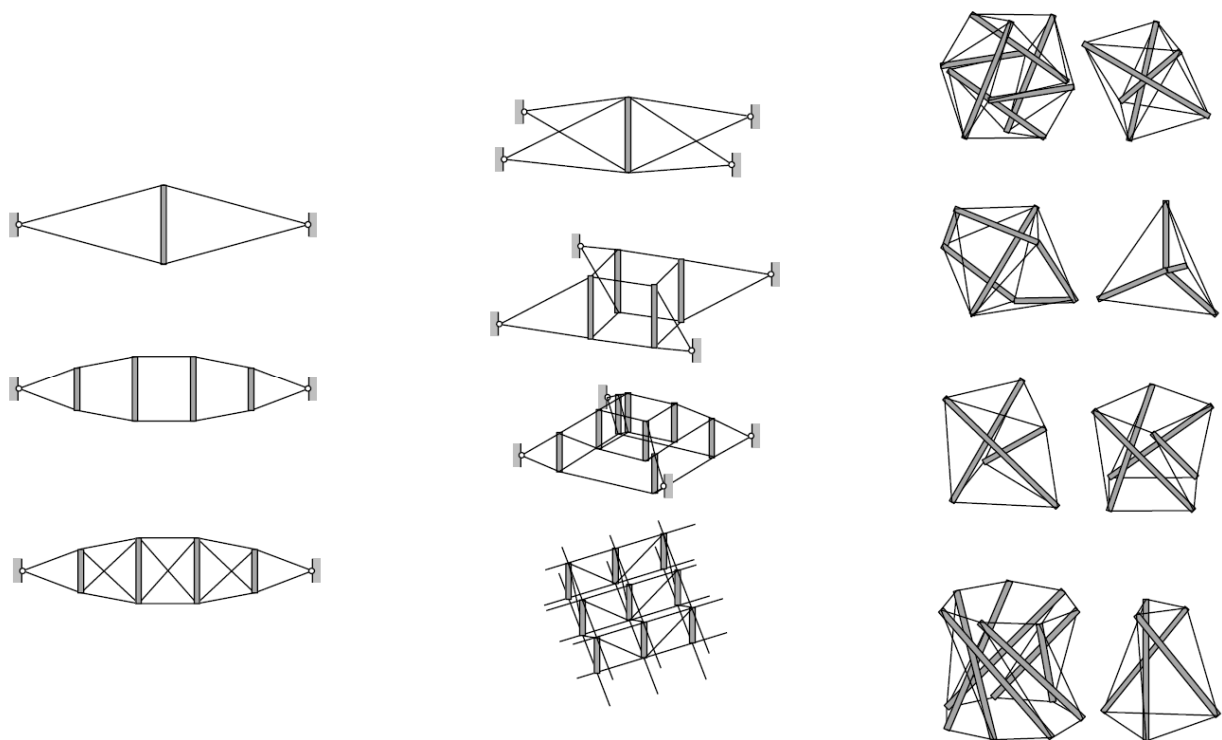


Abbildung 2-7: *Tensegrity-Systeme: offene ebene (links), offene räumliche (mittig), geschlossene räumliche Systeme (rechts) (Brandner 2014)*

Fazit aus den vorgestellten Systemen

Als Conclusio kann angemerkt werden, dass es für eine Ausnutzung des Potentials von Hartlaubholz sinnvoll ist, den Fokus auf Zugstäbe zu setzen. In den oben vorgestellten Systemen erkennt man weiters die Wichtigkeit eines guten Knotenanschlusses.

Die zahlreichen Anforderungen an einen Knoten wie Brandschutz, Montagefreundlichkeit vor Ort, Ästhetik, Kompaktheit oder Kraftübertragung und Kraftfluss machen den Hirnholzanschluss mit Montagestoß zu einem interessanten Lösungsansatz.

2-3 ANALYSE DES POTENTIALS VON HARTLAUBHOLZ UND HARTLAUBHOLZPRODUKTEN

2-3.1 ALLGEMEINES UND DEFINITION REFERENZQUERSCHNITT

Zur Definition des Anforderungsprofils für die neuartige Verbindungslösung gilt es eingangs, die Leistungsfähigkeit von Hartlaubholz und daraus hergestellte Produkte für den Einsatz im konstruktiven Ingenieurholzbau darzulegen. Dazu werden in den kommenden Abschnitten 2-3.2 - 2-3.4 die Kennwerte ausgewählter Hartlaubholzarten und -produkte erhoben und mit Fichte (*Picea abies*) vergleichend dargestellt und diskutiert.

Um das Anforderungsprofil des Rohrverbinders weiter zu konkretisieren, wird als Referenz ein Stab mit einem quadratischen Querschnitt von $A_{\text{ref}} = 80 \times 80 = 6.400 \text{ mm}^2$ Bruttoanschluss- bzw. Querschnittsfläche definiert, wobei das Maß von 80 mm und ein Vielfaches davon als durchaus gängige Querschnittgröße im heutigen konstruktiven Ingenieurholzbau identifiziert werden kann. Es wird also davon ausgegangen, dass ein zu definierender Rohrverbinder als einzelnes Verbindungsmittel sowie auch in einer Gruppe einen ebensolchen Querschnitt bzw. ein Vielfaches davon zur Verfügung haben soll.

$$A_{\text{ref}} = b \times h = 80 \times 80 \text{ mm}^2 \quad (2.1)$$

In den folgenden Abschnitten 2-3.2 - 2-3.4 werden für die zu führenden Betrachtungen zur theoretischen Analyse der Machbarkeit eines derartigen Rohrverbinders sowie für dessen geometrische Definition die folgenden Kenngrößen der Hartlaubholzarten und der daraus hergestellten Produkte betrachtet:

- Zugfestigkeit parallel zur Faser
- Schubfestigkeit (längs zur Faser) bzw. Torsionsfestigkeit
- Rohdichte

2-3.2 AUSGEWÄHLTE MECHANISCHE KENNWERTE VON MERKMALSFREIEN PROBEN, HARTLAUBHOLZ UND HARTLAUBHOLZPRODUKTEN

Um die Tragfähigkeit der Verbindung zu bestimmen, wurden für die Holzarten Rotbuche (*Fagus sylvatica*), Birke (*Betula pendula*), Robinie (*Robinia pseudoaccacia*) sowie für Furnierschichtholz (FSH) Pollmeier BauBuche GL70 die mechanischen Kenngrößen aus verschiedenen Quellen zusammengetragen. Bei der Recherche wurde unterschieden zwischen Versuchen an merkmalsfreien Kleinproben (sog. „clear wood“), welche dazu dienen, holztechnologische Kenngrößen an geradfasrigen, kleinvolumigen Proben frei von lokalen Wuchsmerkmalen wie Ästen, Schrägfaser, Reaktionsholz etc. zu bestimmen, und Versuchen an Bauholz bzw. an Proben in Bauholzdimensionen (sog. „timber“), welche, je nach Sortier- bzw. Festigkeitsklasse, Wuchsmerkmale in zulässigem Ausmaß enthalten und zur Festlegung von für den Holzbau relevanten Material- bzw. Produkt Kenngrößen dienen. Da die Kenngrößen beider Gruppen, merkmalsfreier Kleinproben wie Bauholz, unter bestimmten Prüfbedingungen in Hinblick auf Geometrie, Beschaffenheit, Prüfaufbau und Klima ermittelt werden, gilt es hier, von Potenzialen bzw. Kapazitäten zu sprechen und somit von Kenngrößen, welche je nach Erfordernis auf die entsprechende Anwendung zu adaptieren sind. Dies geschieht zum einen durch die Anpassung der Kenngrößen entsprechend der zu erwartenden klimatischen Bedingungen sowie zum anderen durch die Adaptierung dieser, entsprechend dem beanspruchten Querschnitt, Volumen bzw. Fläche und der Spannungsverteilung.

Da aus der Historie heraus Kenngrößen der meisten Holzarten nur an merkmalsfreien Kleinproben bestimmt wurden, ist auch in der nachfolgenden Zusammenstellung ausgewählter Holzarten den auf diese Weise bestimmten Kenngrößen entsprechender Raum gewidmet.

In Abschnitt 2-3.2.4 sind die Bauholz-Kennwerte (Abschnitt 2-3.2.2) und die Kennwerte der vorgestellten Holzprodukte (Abschnitt 2-3.2.3) zusammengefasst und gegenüberstellend in Tabelle 2-6 aufgelistet.

2-3.2.1 Merkmalsfreie Kleinproben („clear wood“)

Obwohl mechanische Eigenschaften merkmalsfreier Kleinproben nur sehr bedingt zur Abschätzung des mechanischen Potentials üblicher Qualitäten von Bauholz (Abschnitt 2-3.2.2) herangezogen werden können, macht der Mangel an Versuchsdaten an Bauholzdimensionen aus Laubholz es notwendig, erste Erkenntnisse aus deren Betrachtung zu ziehen. In Hinblick auf die Verbindungstechnik können Kenngrößen merkmalsfreier Kleinproben durchaus von wesentlichem Interesse sein, da Verbindungsmittel im Allgemeinen nur in einem sehr lokalen, oftmals auch nur sehr kleinräumigen Bereich von Bauteilen platziert werden.

Beispiele für die Abmessungen von „clear wood“-Proben sind unter anderem aus Niemz et al. 2015 zu entnehmen. In ihrer Arbeit ermittelten sie Festigkeitskennwerte von Rotbuche (*Fagus sylvatica*); siehe Abbildung 2-8.

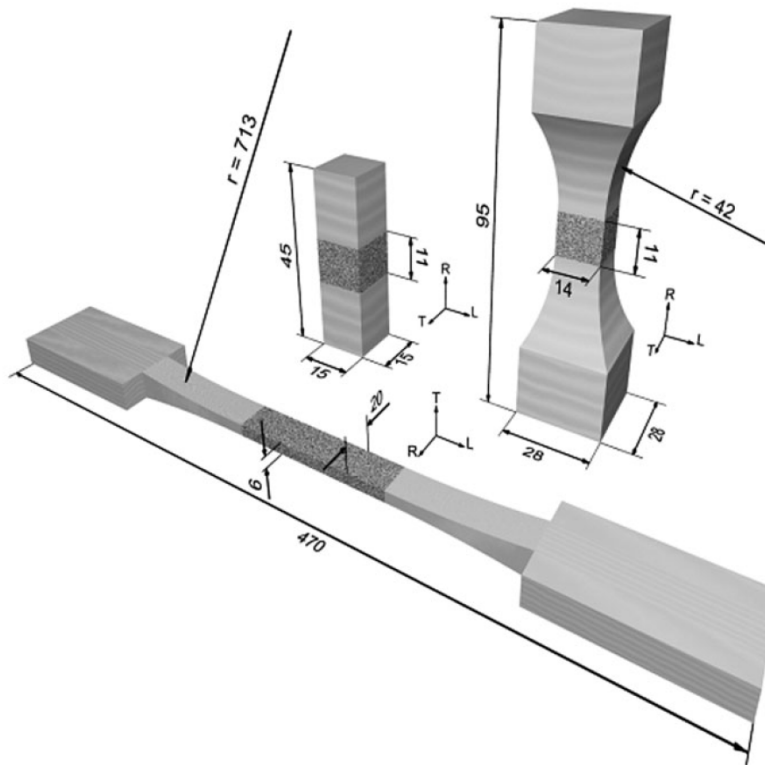


Abbildung 2-8: *Prüfkörper zur Bestimmung der E-Module, der Poissonzahlen und der Festigkeiten auf Druck (links) sowie auf Zug in Faserrichtung (unten) und quer zur Faser (rechts) (Niemz et al. 2015)*

Allgemein bekannt und bei merkmalsfreien Kleinproben gegenüber Bauholz in ausgeprägter Form darstellbar, ist eine positive Korrelation zwischen Festigkeit und Rohdichte. Im Besonderen gilt dies für Zug- und Druckfestigkeiten parallel zur Faser sowie für die Biegefestigkeit. Als Beispiel: Die Zugfestigkeit in Faserrichtung ist bei „clear wood“-Proben im Allgemeinen wesentlich höher, da die in Kapitel 2-3.2 genannten Wuchsmerkmale, wie sie für Bauholz typisch und in bestimmten Maß zulässig sind, zu einer deutlichen Reduktion dieser Kenngröße (sowie auch anderen Festigkeiten) in bauteilgroßen Proben führen. Ein weiterer, wesentlicher Einfluss, welcher zu deutlich geringeren Festigkeitswerten bei Bauholz gegenüber merkmalsfreien Kleinproben führt, sind Größeneffekte. Diese sollen hier in einem kurzen Exkurs allgemein diskutiert werden:

Exkurs Größeneffekt:

Durch das Auftreten von statistisch verteilten Diskontinuitäten kommt es zu dem Effekt, dass Probekörper mit größerem Volumen geringere Festigkeiten aufweisen. Der Effekt ist bei Vollholz größer als bei Brettschicht- bzw. Furnierschichtholz, da durch das Zerteilen und Sortieren der wuchsbedingten Merkmale des Ausgangsquerschnittes die Variabilitäten in den Festigkeitskenngrößen reduziert werden (sog. Homogenisierungsmaßnahmen) (Schickhofer 2006b).

Die Recherche der mechanischen / physikalischen Kenngrößen fokussierte sich in Hinblick auf die für die Definition und Optimierung des Rohrverbinders unter Anbetracht der möglichen Versagensszenarien bei rein axialer Beanspruchung auf die Zugfestigkeit parallel zur Faser $f_{t,0}$, die Längsschubfestigkeit f_v , die Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte ρ_{12} und den Schubmodul in Längsrichtung G_0 . Hierbei wurden primär Mittelwerte erhoben. Die recherchierten Kennwerte werden tabellarisch aufgelistet und miteinander verglichen sowie anschließend in den späteren Berechnungen verwendet.

Tabelle 2-2 listet die Ergebnisse der Recherche der „clear wood“-Kennwerte auf.

Die Schubfestigkeiten längs zur Faser wären aufgrund der zylindrischen Anisotropie des Werkstoffes Holz in längs-radial und längs-tangential zu unterscheiden. Hierfür stehen für die ausgewählten Holzarten nur Daten von „clear wood“-Versuchen mit Rotbuche (Kollmann 1951: 879-909) und mit Birke (Schwab et al. 1996) zur Verfügung.

Es wurden auch Torsionsfestigkeiten recherchiert, auffallend war dabei, dass diese immer deutlich über den Schubfestigkeiten liegen. In Abschnitt 4-4.1.2 wird der Grund dafür näher erklärt.

Tabelle 2-2: Mittlere Kennwerte merkmalsfreier Kleinproben („clear wood“)

„clear wood“ Referenzquerschnitt 20/20	$f_{t,0,mean}$ [N/mm ²]	$f_{v,mean,LT}$ [N/mm ²]	$f_{v,mean,LR}$ [N/mm ²]	$f_{t,90,mean}$ [N/mm ²]	$f_{tor,mean}$ [N/mm ²]	$\rho_{12,mean}$ [kg/m ³]
Rotbuche	135 ¹⁾	15,7 ³⁾	16,9 ³⁾	10,7 ²⁾	25,0 ³⁾	745 ⁷⁾
Birke	157 ⁴⁾	15,9 ⁴⁾	14,4 ⁴⁾	7,0 ¹⁾	20,0 ¹⁾	690 ⁷⁾
Robinie	164 ⁵⁾	18,0 ⁵⁾	18,0 ⁵⁾	4,3 ¹⁾	25,0 ⁶⁾	770 ⁷⁾

¹⁾ (Kollmann 1951: Tafel III+V)

⁴⁾ (Schwab et al. 1996)

⁷⁾ (Sell 1989)

²⁾ (Kollmann 1951: 879-909)

⁵⁾ (Richter et al. 2000)

³⁾ (Kollmann 1951: 647-708)

⁶⁾ (ON B 3012 2003)

Tabelle 2-3: Verhältniszahlen merkmalsfreier Kleinproben („clear wood“) für die Holzarten Rotbuche, Birke und Robinie

„clear wood“ Verhältniszahlen	$f_{t,0,mean} / f_{v,mean,LT}$ [-]	$f_{t,0,mean} / \rho_{12,mean}$ [-]	$f_{v,mean,LT} / \rho_{12,mean}$ [-]	$f_{t,0,mean} / f_{t,90,mean}$ [-]
Rotbuche	8,60	0,18	0,021	12,62
Birke	9,87	0,23	0,023	22,43
Robinie	9,11	0,21	0,023	38,12

In Tabelle 2-3 wird deutlich, dass die Rotbuche insgesamt in den gegenübergestellten Verhältnissen am besten abschneidet. Besonders deutlich wird der Unterschied beim Zug zu Querkzug Verhältnis $f_{t,0,mean} / f_{t,90,mean}$, hier kann eine hohe Spaltneigung von Robinienholz bei Zugbelastung abgeleitet werden.

2-3.2.2 Kennwerte für Holz in Bauteilgröße („Timber“)

Versuche an Bauholz werden üblicherweise an Proben in Bauteilgröße durchgeführt. Schickhofer berichtete beispielsweise über Timber-Versuche an Robinienholz im Zuge eines Forschungsprojektes (1999). Bei den Festigkeitskennwerten handelt es sich um charakteristische (5 %-Quantil-) Werte, da jene eine höhere baupraktische Bedeutung aufweisen. Die für die Bemessung und das Design von Holzkonstruktionen benötigten charakteristischen Werte (siehe Tabelle 2-4) präsentieren ein völlig anderes statistisches Niveau im Vergleich zu den Mittelwerten von „clear wood“ Proben. Sie sind folglich nicht miteinander vergleichbar.

Tabelle 2-4: Charakteristische Kennwerte für Proben in Bauteilgröße („Timber“)

„Timber“ Referenzquerschnitt 150/600	$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	$f_{v,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,90,k}$ [N/mm ²]	$f_{tor,k}$ [N/mm ²]	$\rho_{12,k}$ [kg/m ³]
Rotbuche	24,0 ¹⁾	3,8 ¹⁾	0,6 ¹⁾	1,6 ²⁾	700 ¹⁾⁵⁾
Birke	24,0 ³⁾	–	–	–	546 ³⁾
Robinie	30,0 ⁴⁾⁶⁾	4,6 ⁴⁾	0,6 ⁴⁾	–	700 ⁶⁾

¹⁾ (ON EN 338 2003)

³⁾ (Jeitler et al. 2016)

⁵⁾ (Kollmann 1951: Tafel III+V)

²⁾ (ON B 4100-2 2004)

⁴⁾ (Rug und Eichbaum 2012)

⁶⁾ (Schickhofer 1999)

Tabelle 2-5: Verhältnswerte für Proben in Bauteilgröße („Timber“) für die Holzarten Rotbuche, Birke und Robinie

„Timber“	$f_{t,0,k} / f_{v,k,LT}$ [-]	$f_{t,0,k} / \rho_{12,k}$ [-]	$f_{v,k,LT} / \rho_{12,k}$ [-]	$f_{t,0,k} / f_{t,90,k}$ [-]
Rotbuche	6,32	0,034	0,005	40,00
Birke	–	0,044	–	–
Robinie	6,5	0,043	0,007	50,00

In Tabelle 2-5 kann ein leichter Vorteil Robinie gegenüber Rotbuche in den dargestellten Verhältnissen festgestellt werden. Wobei mit Rug und Eichbaum (2012) nur eine Quelle für Robinie in Bauteilgröße gefunden werden konnte.

2-3.2.3 Ausgewählte Holzprodukte

Definition: Brettschichtholz BSH

Brettschichtholz ist ein Holzprodukt und besteht aus mindestens drei flächig miteinander verklebten Lagen aus parallel angeordneten (keilgezinkten) Lamellen aus Vollholz. Die Anzahl und Dicke der Lamellen kann den Anforderungen entsprechend variiert werden.

Buchenfurnierschichtholz – Pollmeier BauBuche

Das Produkt BauBuche der Fa. Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH ist ein aus Buchen-Starkfurnieren hergestelltes Furnierschicht- bzw. -sperrholz, welches sowohl als Stab als auch als Platte oder Scheibe eingesetzt werden kann.

Hier muss erwähnt werden, dass sich die Kennwerte auf einen bei der BSH-Bemessung gemäß EC 5 vorgegebenen Referenzquerschnitt von 150/600 mm beziehen und somit nicht direkt mit Festigkeiten des gewählten Referenzquerschnittes laut Gl. (2.1) vergleichbar sind. In Abschnitt 2-3.3 sind die Festigkeiten von BauBuche auf den Referenzquerschnitt laut Gl. (2.1) bezogen.

Folgende Angaben beziehen sich auf die Europäische Technische Bewertung ETA-14/0354 (ETA-14/0354 2015). In Hinblick auf die angestrebte Verbindungslösung liegt das Hauptaugenmerk auf der Darlegung der Zugfestigkeit parallel zur Faser sowie der Schubfestigkeit und der Rohdichte, welche als charakteristische Kenngrößen und bezogen auf den Referenzquerschnitt A_{ref} wie folgt geregelt sind:

$$\begin{aligned}
 f_{t,0,k} &= 55 \cdot \left(\frac{600}{h} \right)^{0,10} = 55,0 \left[\text{N/mm}^2 \right] \\
 f_{t,90,k} &= 0,6 \left[\text{N/mm}^2 \right] \\
 f_{v,k} &= 4 \cdot \left(\frac{600}{h} \right)^{0,25} = 4,0 \left[\text{N/mm}^2 \right] \\
 \rho_{12,k} &\geq 680 \left[\text{kg/m}^3 \right]
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

mit

$f_{t,0,k}$	charakteristische Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung $[\text{N/mm}^2]$
$h = 150 \text{ mm}$	Höhe bzw. Seitenlänge des Holzquerschnittes $[\text{mm}]$
$f_{v,k}$	charakteristische Schubfestigkeit $[\text{N/mm}^2]$
ρ_k	charakteristische Rohdichte $[\text{kg/m}^3]$

BSH aus Buche – Studiengemeinschaft Holzleimbau

Das hier vorgestellte, als Stab eingesetzte Produkt der Studiengemeinschaft Holzleimbau e. V. besteht aus Vollholz der Holzart Rotbuche (*Fagus sylvatica*) mit einer maximalen Höhe und Breite von $h = 600 \text{ mm}$ und $b = 160 \text{ mm}$.

Die nachfolgenden Kennwerte in Tabelle 2-6 beziehen sich auf die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-679 2014.

BSH aus Eiche – VIGAM BSH Fa. Gamiz S. A.

Das Produkt VIGAM Brettschichtholz der Fa. Elaborados y Fabricados Gamiz S. A. besteht aus Vollholz europäischer Eichenarten (Weißeichen: *Quercus robur* bzw. Traubeneichen: *Quercus petraea*) französischer Herkunft. Das als Stab eingesetzte Produkt kann mit einer maximalen Höhe $h = 400$ mm, Breite $b = 160$ mm sowie Länge $L = 12$ m verwendet werden (Z-9.1-704 2012). Die charakteristischen Werte der gesuchten Kenngrößen sind in Tabelle 2-6 eingetragen.

BSH aus Birke – Fa. Hasslacher Norica Timber

Das Produkt BSH Birke der Fa. Hasslacher Norica Timber besteht aus Vollholz verschiedener Holzarten der Birke (*Betula*) und wird als Stab eingesetzt.

Die in Tabelle 2-6 eingetragenen Kennwerte stammen aus der Richtlinie „Birken BSH“ der Fa. Hasslacher (Hasslacher Norica Timber 2017).

BSH aus Edelkastanie – Fa. Sierolam S. A.

Das Produkt „SIEROLAM – glued laminated timber of chestnut“ der Fa. Sierolam S. A. besteht aus Vollholz der Holzart Edelkastanie (*Castanea sativa*). Das als Stab eingesetzte Produkt kann mit einer maximalen Höhe $h = 400$ mm, Breite $b = 200$ mm sowie Länge $L = 13,5$ m verwendet werden.

Die in Tabelle 2-6 aufgelisteten, relevanten Kennwerte beziehen sich auf das EC-Zertifikat 0672-CPD-I 14.21.57, ausgestellt von der Materialprüfanstalt (MPA) Stuttgart (ETA 13-0646 2013).

BSH aus Esche und Buche – Fa. neue Holzbau AG

Das vorgestellte Brettschichtholzprodukt (BSH) der Fa. neue Holzbau AG besteht aus Vollholz verschiedener Holzarten der Esche (*Fraxinus*) und Buche (*Fagus*) und wird als Stab eingesetzt. Die charakteristischen Kennwerte aus der technischen Richtlinie der Fa. neue Holzbau AG gelten für Träger der Festigkeitsklasse GL 48k und sind in Tabelle 2-6 eingetragen (neue Holzbau AG 2017).

VH C24 bzw. T14 aus Fichte – gemäß EN 338

Die angeführten Festigkeitsklassen für Nadelholz dieser Norm unterscheiden sich in ihren zugrundeliegenden, festigkeitsklassenbestimmenden Kenngrößen. Die Festigkeitsklassen „Cxx“ geben die charakteristischen Festigkeits-, Steifigkeitskennwerte auf der Basis von Hochkantbiegeprüfungen wieder, wobei „Txx“ auf Zugprüfungen parallel zur Faser basiert. Dabei steht „xx“ stellvertretend für den charakteristischen Wert der Biege- bzw. Zugfestigkeit (ON EN 338 2003).

BSH GL 24h aus Fichte – gemäß ON EN 14080

Die oben genannte Festigkeitsklassenbezeichnung „Txx“ gilt als Kennwert für auf Zug geprüfte Brettschichtholzlamellen. Die Klasse T14 entspricht demnach GL 24h, der Festigkeitsklasse für Brettschichtholz gemäß (ON EN 14080 2013).

2-3.2.4 Vergleich und Diskussion der Kennwerte

In Tabelle 2-6 sind alle recherchierten Kennwerte, sowohl jene für Proben in Bauteilgröße („Timber“) als auch jene von am Markt befindlichen Hartlaubholzprodukten mit der Norm entsprechenden Kennwerten von Vollholz und Brettschichtholz aus Fichte verglichen.

Tabelle 2-6: Übersicht und Vergleich der Kennwerte von Timber, Hartlaubholzprodukten und Holzprodukten aus Fichte - in den Fußnoten sind die jeweiligen Referenzquerschnitte aufgelistet

„Timber“ ¹⁾	$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	$f_{v,0,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,90,k}$ [N/mm ²]	$\rho_{12,k}$ [kg/m ³]
Rotbuche	24,0	3,8	0,6	700
Birke	24,0	–	–	546
Robinie	36,0	5,3	0,7	700
Hartlaubholzprodukte	$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	$f_{v,0,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,90,k}$ [N/mm ²]	$\rho_{12,k}$ [kg/m ³]
BauBuche ²⁾	55,0	4,0	0,6	680
BSH Buche ¹⁾	21,0	3,4	0,5	650
BSH Eiche ³⁾	23,0	4,0	0,6	690
BSH Birke ¹⁾	26,0	4,5	0,6	600
BSH Edelkastanie ¹⁾	20,0	5,0	0,7	520
BS – Laubholz Esche und Buche ¹⁾	22,0	3,0	0,25	650
Fichte	$f_{t,0,k}$ [N/mm ²]	$f_{v,0,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,90,k}$ [N/mm ²]	$\rho_{12,k}$ [kg/m ³]
Vollholz C24 ⁴⁾	14,5	4,0	0,5	350
BSH GL 24h ¹⁾	19,2	3,5	0,5	385

¹⁾ Referenzquerschnitt 150/600 mm

²⁾ Referenzquerschnitt 150/600 mm, aber auch Erhöhung möglich

³⁾ Verweis auf DIN 1052, Referenzquerschnitt 150/600 mm mit maximaler Höhe von 400 mm

⁴⁾ Referenzquerschnitt 40(80)/150 mm

Die Kenngrößen sind bis auf VH Fichte C 24 alle auf einen Referenzquerschnitt von 150/600 mm bezogen.

Auf den ersten Blick fällt die vergleichsweise sehr hohe Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ von der in Abschnitt 2-3.2.3 vorgestellten BauBuche der Fa. Pollmeier auf. Die BauBuche weist im Vergleich zu GL 24h eine 2,8-fach höhere Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ parallel zur Faser auf. Dadurch bleibt zur Verankerung eines zugbeanspruchten Anschlusses nur mehr 35 % des Bruttoquerschnittes von Brettschichtholz aus Fichte.

Bei genauerer Betrachtung des Verhältnisses zwischen Zugfestigkeit und Rohdichte $f_{t,0,k} / \rho_{12,k}$ sieht man Unterschiede zwischen den Werkstoffgruppen.

Der Wert variiert zwischen

- 0,03 und 0,04 bei Hartlaubholz-BSH,
- 0,03 und 0,05 bei Timber,
- 0,04 und 0,05 bei Fichte.

Den höchsten Wert erzielt, trotz der hohen Rohdichte, die BauBuche mit 0,8.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Motivation und Notwendigkeit, die Leistungsfähigkeit von Verankerungen in Laubholz gegenüber Nadelholz deutlich zu steigern. Das geringere Potential der Volumenverdrängung aufgrund der hohen Rohdichte und folglich dem geringeren Lumenanteil von Hartlaubholz könnte beim Applizieren oder Belasten auf Zug zu großen Quersugspannungen, ergo zu erhöhter Spaltneigung, sowie erhöhten Mindest-Rand- und Mindest-Zwischenabständen der Verbindungsmittel führen. Aktuelle Studien an Einzelschrauben von Reichinger (2017) unterstreichen diesen Umstand, welcher zudem für Buche und BauBuche in Versuchen an über Hirnholz eingebrachten Schraubengruppen in Koppauer (2017) bestätigt wurde.

Im folgenden Abschnitt 2-3.3 wurden aktuelle Anschlusslösungen erfasst und, nach dem gegenwärtigen Stand der Technik auf die zuvor recherchierten Hartlaubholzprodukte angewendet, um die Nutzungsgrade, bezogen auf Brutto- und Nettoquerschnitt des Holzes, zu analysieren.

2-3.3 STAND DER TECHNIK MÖGLICHER ANSCHLUSSLÖSUNGEN FÜR STÄBE BEANSPRUCHT AUF ZUG PARALLEL ZUR FASER

2-3.3.1 Allgemeine Angaben, Zieldefinition und Annahmen

Varianten für den Anschluss auf Zug parallel zur Faser gibt es viele, ihre Eignung hängt jedoch von verschiedenen Parametern ab. Die Unterschiede im Grad der Querschnittsschwächung, der Anschlusslänge, welche zur Ausführung der Verbindung benötigt wird, oder die Leistungsfähigkeit des Anschlusses im Vergleich zum Brutto- bzw. Nettoquerschnitt geben Aufschluss darüber, ob eine Verbindungslösung auch für die in Abschnitt 2-1 genannten erhöhten Anforderungen durch das hohe mechanische Potential von Hartlaubholz(producten) geeignet ist oder ob es Bedarf an neuartigen, leistungsfähigeren Anschlusslösungen gibt.

Neben den hier behandelten Nachweisen der Tragfähigkeit („*ultimate limit state*“; ULS) sind nach Eurocode 5 (ON EN 1995-1-1 2015) zudem Nachweise der Gebrauchstauglichkeit („*serviceability limit state*“; SLS) sowie der Dauerhaftigkeit in die Beurteilung von Tragwerken und somit auch Anschlusslösungen miteinzubeziehen. Da es sich in dieser Arbeit vorwiegend um die theoretische wie auch experimentelle, durch Versuche unterstützte Entwicklung eines neuartigen Verbinders handelt, steht die Leistungsfähigkeit im Sinne der Tragfähigkeit im Vordergrund. Die Steifigkeit, üblicherweise ausgedrückt durch K_{ser} , ein im Holzbau primär für den SLS-Nachweis bedeutender Parameter, steigt im Allgemeinen mit der Rohdichte und kann somit bei Hartlaubholz(producten) als deutlich höher als bei Nadelholz angenommen werden. Die Dauerhaftigkeit ist, da ausschließlich bereits in den konstruktiven Holzbau etablierte Materialien und Materialkombinationen eingesetzt werden, als ebenbürtig dem aktuellen Stand der Technik anzusehen und wird daher nicht weiter betrachtet.

Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit sind für die kommenden betrachteten Anschlusslösungen folgende Nachweise zu führen:

- Nachweis der Anschlusskapazität des einzelnen Verbindungsmittels im Holzquerschnitt (Herausziehen) sowie der Gruppe (Herausziehen, Block- bzw. Linienscheren, Aufspalten, ...)
- Nachweis der Leistungsfähigkeit des Verbindungsmittels selbst und eventueller Anlussteile (Metall, Klebstoff)
- Nachweis des Holzquerschnittes im Nettoquerschnitt des Anschlussbereiches

Ziel der folgenden Betrachtungen für einen Zuganschluss ist es, verschiedene, nach gegenwärtigem Stand der Technik mögliche Anschlussvarianten zu analysieren, wobei jede dieser Varianten auf den zuvor definierten prismatischen Referenzquerschnitt von $A_{ref} = b \times h = 80 \times 80 \text{ mm}^2$ in Hinblick auf die Anschlusskapazität zu optimieren ist. Die für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) zu führenden Nachweise zusammen mit einzuhaltenden geometrischen Randbedingungen dienen als Parameter für diese Optimierung.

Zur Wahrung einer bestmöglichen Vergleichbarkeit der im Folgenden dargelegten Anschlusslösungen unter zusätzlicher Variation des verwendeten Holzproduktes werden folgende Annahmen getroffen:

- Der Brutto-Holzquerschnitt wird, wie bereits erwähnt, mit $A_{\text{ref}} = b \times h = 80 \times 80 \text{ mm}^2$ laut Gl. (2.1) festgelegt.
- Als Lasteinwirkungsdauer wird eine „kurze Einwirkung“ und als klimatische Randbedingung die Nutzungsklasse 2 angenommen. Auf Basis dieser Parameter ergibt sich gemäß (ON EN 1995-1-1 2015) für Vollholz (VH), BSH sowie LVL ein Modifikationsbeiwert von $k_{\text{mod}} = 0,9$.
- Die Teilsicherheitsbeiwerte für die jeweiligen Holzeigenschaften gemäß (ON EN 1995-1-1 2015) lauten wie folgt:

$\gamma_{M,\text{VH}}$	= 1,30	für Vollholz (VH)
$\gamma_{M,\text{BSH}}$	= 1,25	für Brettschichtholz (BSH)
$\gamma_{M,\text{LVL}}$	= 1,20	für Furnierschichtholz („ <i>laminated veneer lumber</i> “; LVL)
$\gamma_{M,\text{Verb}}$	= 1,30	für Verbindungen im Holzbau
- Als Teilsicherheitsbeiwerte für den Materialwiderstand von Stahl gilt laut (ON EN 1993-1-1 2014):

$\gamma_{M,0}$	= 1,00	für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten unabhängig von der Querschnittsklasse
$\gamma_{M,1}$	= 1,00	für die Beanspruchbarkeit von Bauteilen bei Stabilitätsversagen
$\gamma_{M,2}$	= 1,25	für die Beanspruchbarkeit von Querschnitten bei Bruchversagen infolge Zugbeanspruchung oder Abscheren

Die Nennwerte der Streckgrenzen $f_{y,b}$ und der Zugfestigkeiten $f_{u,b}$ sind für die eingeklebten Gewindestangen analog zu den Schraubenklassen gemäß ON EN 1993-1-8 2012 in Tabelle 2-7 dargestellt. Die Nennwerte f_y und f_u für warmgewalzten Baustahl ergeben sich gemäß ON EN 1993-1-1 2014 siehe Tabelle 2-8.

Tabelle 2-7: Nennwerte der Streckgrenze $f_{y,b}$ und der Zugfestigkeit $f_{u,b}$ von Schrauben (ON EN 1993-1-8 2012)

Schraubenfestigkeitsklasse	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
$f_{y,b}$ (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
$f_{u,b}$ (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

Tabelle 2-8: Nennwerte der Streckgrenze f_y und der Zugfestigkeit f_u für warmgewalzten Baustahl (ON EN 1993-1-1 2014)

Werkstoffnorm und Stahlsorte	Erzeugnisdicke t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²	f_y N/mm ²	f_u N/mm ²
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470
S 450	450	550	410	550

- Der Grad der Querschnittsschwächung η_{H-QS} gibt an, wie stark die jeweilige Anschlusslösung den Bruttoquerschnitt schwächt.

$$\eta_{\text{Holz-QS}} = \frac{A_{\text{Holz,Netto}}}{A_{\text{Holz,Brutto}}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

mit

$\eta_{\text{Holz-QS}}$ Grad der Querschnittsschwächung des Holzes [%]

$A_{\text{Holz,Netto}}$ Nettoquerschnitt [mm²]

$A_{\text{Holz,Brutto}}$ Bruttoquerschnitt [mm²]

- Die Ausnutzungsgrade η_{Brutto} und η_{Netto} , siehe Gl. (2.4), geben das Verhältnis des Bemessungswertes der maßgebenden Tragfähigkeit R_d zum Bemessungswert der Tragfähigkeit des Brutto- bzw. Nettoquerschnittes, $R_{H,\text{Brutto},d}$ bzw. $R_{H,\text{Netto},d}$, wieder.

$$\eta_{\text{brutto}} = \frac{R_d}{R_{\text{Holz,Brutto},d}} \cdot 100 \qquad \eta_{\text{netto}} = \frac{R_d}{R_{\text{Holz,Netto},d}} \cdot 100 \qquad (2.4)$$

mit

η_{Brutto} bzw. η_{Netto} Ausnutzung des Bemessungswertes der Brutto- bzw. Nettotragfähigkeit [%]

R_d Bemessungswert der maßgebenden Tragfähigkeit der Verbindung [kN]

$R_{\text{Holz,Brutto},d}$ bzw. $R_{\text{Holz,Netto},d}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit des Brutto- bzw. Nettoquerschnittes [kN]

- Als Anschlusslänge $l_{V,\text{Verbindungsart}}$ wird die im Stab benötigte Länge zur Herstellung des Anschlusses bezeichnet; siehe Gl. (2.5):

$$l_{V,\text{Verbindungsart}} = 2 \cdot l_{\text{erf}} \qquad (2.5)$$

mit

$l_{V,\text{Verbindungsart}}$ benötigte Länge eines Verbindungsstoßes zur Realisierung der Anschlusslösung [mm]

l_{erf} erforderliche Länge der Anschlusslösung je Anschlussseite [mm]

In den folgenden Abschnitten 2-3.3.2 – 2-3.3.6 werden nun einzelne Anschlusslösungen und die erforderlichen Nachweise dargelegt. In Abschnitt 2-3.4 werden die Ergebnisse dieser Betrachtungen zusammengefasst, gegenübergestellt und diskutiert.

2-3.3.2 Verbindungslösung mit Stabdübel

Im Folgenden wird eine Holz-Stahlblech-Stabdübelverbindung mit innenliegenden Stahlblechen für die zuvor definierte Beanspruchungssituation hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit optimiert. Dafür wird eine vier-schnitttige Verbindung gewählt (siehe Abbildung 2-9). Die Bemessung der Verbindung erfolgt gemäß ON EN 1995-1-1 2015.

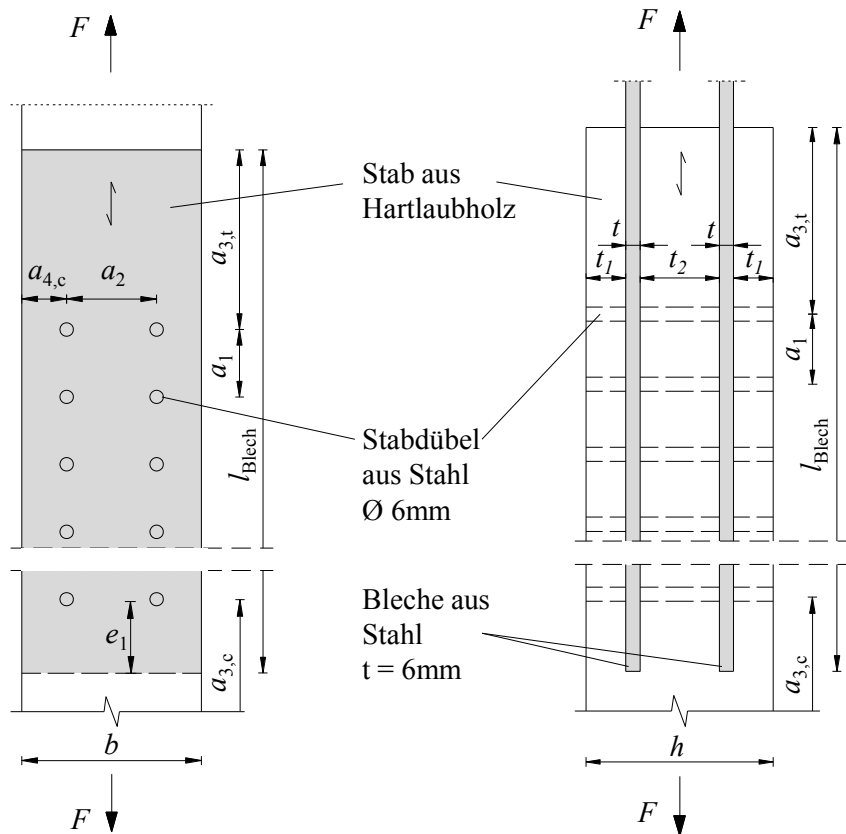


Abbildung 2-9: Verbindungslösung Zuglaschenstoß mit Stabdübel und innenliegenden Stahlblechen: Längsansichten

Die Eingabeparameter für die Bemessung sind in Tabelle 2-9 angeführt.

Tabelle 2-9: Eingabeparameter für die Stabdübelverbindung

			Ausführung nach ON EN 1995-1-1 2015	
Variable	Beschreibung	Einheit	Mindestanforderungen	Ausführung
Mindestabmessungen der Zwischen- und Randabstände sowie Holzdicken				
t_1	Stärke Außenholz	[mm]	–	17
t_2	Stärke Innenholz	[mm]	–	34
a_1	Mindest-Zwischenabstand in Faserrichtung	[mm]	$(3 + 2 \cos \alpha) d = 30$	variiert laut Abs. 2-3.4.1
a_2	Mindest-Zwischenabstand rechtwinkelig zur Faser	[mm]	$3 d = 18$	40
$a_{3,t}$	Mindest-Randabstand zum beanspruchten Hirnholzende	[mm]	$\max(7 d; 80 \text{ mm}) = 80$	80
$a_{4,c}$	Mindest-Randabstand zum unbeanspruchten Rand quer zur Faser	[mm]	$3 d = 18$	20
Stahlblech				
b_{Blech}	Blecbreite	[mm]	–	80
n_{Blech}	Anzahl der Bleche	[Stk.]	–	2
t	Blechstärke	[mm]	–	6
e_1 ¹⁾	Loch-Randabstand in Lastrichtung laut EC 3 ¹⁾	[mm]	$1,2 d = 7,2$	8
Stabdübel				
d	Stabdübeldurchmesser	[mm]	–	6
s	Anzahl der Stabdübel nebeneinander quer zur Faser (Spalten)	[Stk.]	–	2
z	Anzahl der Stabdübel hintereinander in Faserrichtung (Zeilen)	[Stk.]	variiert nach Holzprodukt	
$f_{u,k}$	Stahlbruchfestigkeit des Stabdübels auf Zug	[N/mm ²]	–	490

1) (ON EN 1993-1-8 2012)

Im Folgenden sind die erforderlichen Nachweise im *Ultimate Limit State* (ULS) für diesen Anschlussstyp angeführt:

Tragfähigkeit des Stabdübels

Die charakteristische Tragfähigkeit je Stabdübel wurde gemäß (ON EN 1995-1-1 2015) ermittelt. Die dafür benötigten materialeitigen Eingangsparameter, die charakteristische Lochleibungsfestigkeit und das charakteristische Fließmoment werden mittels Glg. (2.6) und (2.7) bestimmt:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_{12,k} \quad (2.6)$$

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (2.7)$$

mit

$f_{h,0,k}$	charakteristische Lochleibungsfestigkeit bei Beanspruchung des Holzquerschnittes parallel zur Faser [N/mm ²]
$\rho_{12,k}$	charakteristische Rohdichte des Holzes bei 12 % Holzfeuchte [kg/m ³]
$M_{y,k}$	charakteristisches Fließmoment des Stabdübels [Nmm]
$f_{u,k}$	Zugfestigkeit des Stabdübels nach Tabelle 2-8 [N/mm ²]

Die Ermittlung der Tragfähigkeit je Stabdübel und Scherfuge folgt der Theorie nach Johansen (1949), welche unter geringfügigen Adaptierungen in den Eurocode 5 (ON EN 1995-1-1 2015) aufgenommen wurde. Für mehrschnittige Verbindungen sind Betrachtungen der einzelnen, durch den Stabdübel durchdrungenen Scherfugen notwendig. Dies wird im Folgenden kurz dargelegt:

Versagen von Scherfuge I des Stabdübels nach Gl. (2.8)

$$R_{I,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

mit

$R_{I,k}$	charakteristische Tragfähigkeit pro Stabdübel in Scherfuge I [kN]
$f_{h,k}$	charakteristische Lochleibungsfestigkeit [N/mm ²]
$M_{y,Rk}$	charakteristisches Fließmoment des Stabdübels [Nmm]

Versagen von Scherfuge 2 des Stabdübels nach Gl. (2.9)

Hierzu wird zuerst das Seitenteil einer zwei-schnittigen Verbindung mit innenliegendem Stahlblech betrachtet:

$$R_{II,a,k} = \min \begin{cases} f_{h,k} \cdot t_2 \cdot d \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} \end{cases} \quad (2.9)$$

Als nächstes erfolgt die Bestimmung der Tragfähigkeit am Mittelteil einer zwei-schnittigen Verbindung mit außenliegendem Stahlblech nach Gl. (2.10):

$$R_{II,b,k} = \min \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h,k} \cdot t_2 \cdot d \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} \end{cases} \quad (2.10)$$

Aus den zuvor getätigten getrennten Betrachtungen je Scherfuge kann nun der Bemessungswert je Stabdübel nach Gl. (2.11) bestimmt werden:

$$R_k = 2 \cdot \left(R_{I,k} + \min \begin{cases} R_{II,a,k} \\ R_{II,b,k} \end{cases} \right) \quad (2.11)$$

Zur Ermittlung der Gesamttragfähigkeit der Stabdübelverbindung ist zuerst die effektiv ansetzbare Anzahl an Stabdübeln in Faserrichtung nach Gl. (2.12) zu ermitteln:

$$n_{ef} = \min \begin{cases} n \\ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \end{cases} \quad (2.12)$$

Die Gesamttragfähigkeit ergibt sich wie folgt aus Gl. (2.13):

$$R_{d,ges} = R_k \cdot n_{ef} \cdot m \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_{M,Verbindung}} \quad (2.13)$$

mit

- m Anzahl der Stabdübelspalten [-]
- $\gamma_{M,Verb}$ Materialkennwert für Verbindungen im Holzbau siehe 2-3.3.1 [-]

Netto-Querschnittsnachweis Holzprodukt

Der Netto-Querschnittsnachweis wird nach Gl. (2.14) durchgeführt:

$$A_{\text{Holz,Brutto}} = b \cdot h \qquad A_{\text{Holz,Netto}} = b \cdot h - n_{\text{Blech}} \cdot b \cdot t - m \cdot (2 \cdot t_1 + t_2) \cdot d \quad (2.14)$$

Daraus folgen die Tragwiderstände des jeweiligen Hartlaubholzstabes auf Zug parallel zur Faser, jeweils für den Brutto- und den Netto-Holzquerschnitt nach der Gl. (2.15):

$$R_{\text{Holz,Brutto,d}} = A_{\text{Holz,Brutto}} \cdot f_{t,0,k} \cdot \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_{M,\text{Holz}}} \cdot 10^{-3} \qquad R_{\text{Holz,Netto,d}} = A_{\text{Holz,Netto}} \cdot f_{t,0,k} \cdot \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_{M,\text{Holz}}} \cdot 10^{-3} \quad (2.15)$$

Versagen der Bleche auf Stahlbruch

Die Nachweisführung für zugbeanspruchte Stahlbleche wurde nach ON EN 1993-1-1 (2014) durchgeführt. Die Querschnittskenngrößen, die Tragfähigkeiten sowie der maßgebende Bemessungswert für den Nachweis des Stahlquerschnittes auf Zugbeanspruchung ergeben sich gemäß den Glg. (2.16) und Gl. (2.17):

$$A_{\text{Blech,Brutto}} = b \cdot t \qquad A_{\text{Blech,Netto}} = n_{\text{Blech}} \cdot t \cdot (b - s \cdot d) \quad (2.16)$$

$$R_{\text{Plastisch,d}} = A_{\text{Blech,Brutto}} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M,0}} \cdot 10^{-3} \qquad R_{\text{Bruch,d}} = A_{\text{Blech,Netto}} \cdot \frac{f_{u,k} \cdot 0,9}{\gamma_{M,2}} \cdot 10^{-3}$$

$$R_{\text{Blech,d}} = \min \left\{ \begin{array}{l} R_{\text{Plastisch,d}} \\ R_{\text{Bruch,d}} \end{array} \right. \quad (2.17)$$

mit

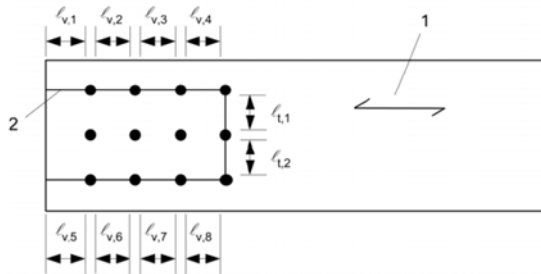
$R_{\text{Blech,d}}$	maßgebender Bemessungswert des Stahlquerschnittes [kN]
$A_{\text{Blech,Brutto}}$	Bruttoquerschnitt Stahlblech [mm ²]
$A_{\text{Blech,Netto}}$	Nettoquerschnitt Stahlblech [mm ²]
$R_{\text{Plastisch,d}}$	Bemessungswert der plastischen Zugbeanspruchbarkeit des Bruttoquerschnittes [kN]
$R_{\text{Bruch,d}}$	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit gegen lokalen Bruch des Nettoquerschnittes [kN]

Verbindungsversagen Blockscheren

In EC 5 (ON EN 1995-1-1 2015, Anhang A) ist die Berechnung des Widerstandes der Verbindung auf Blockscheren $R_{\text{BS,Rd}}$ erläutert. Die Bruchlinien entlang der äußeren Verbindungsmittelreihen infolge Zugversagens $L_{\text{net,t}}$ oder Scherversagens des Holzes $L_{\text{net,v}}$ können mit Gl. (2.18) ermittelt werden (siehe Abbildung 2-10).

$$L_{\text{net,t}} = \sum_i l_{t,i}$$

$$L_{\text{net,v}} = \sum_i l_{v,i} \quad (2.18)$$



Legende

- 1 – Faserrichtung
- 2 – Bruchlinie

Abbildung 2-10: Definition der Bruchlinien infolge Scherversagens $L_{\text{net,v}}$ oder infolge Zugversagens des Holzes $L_{\text{net,t}}$ (ON EN 1995-1-1 2015)

Die, auf Zug (horizontale Flächen) oder Abscheren (vertikale Flächen) belasteten Flächen sind in Abbildung 2-11 dargestellt und können in weiterer Folge für den vorgegebenen Fall eines dicken Bleches mit zwei Stabdübel-Spalten s gemäß Gl. (2.23) ermittelt werden.

$$A_{\text{net,t}} = L_{\text{net,t}} \cdot (2 \cdot t_1 + t_2)$$

$$A_{\text{net,v}} = L_{\text{net,v}} \cdot (2 \cdot t_1 + t_2) \quad (2.19)$$

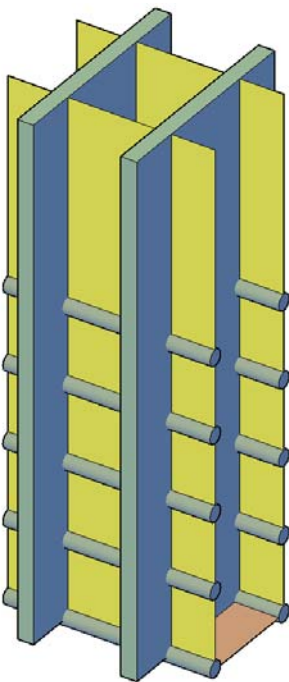


Abbildung 2-11: Modell einer Stabdübelverbindung mit den eingezeichneten, auf Abscheren (vertikal) und Zug (horizontal) belasteten Flächen

Der Widerstand auf Blockscheren $R_{\text{bs,Rk}}$ ergibt sich gemäß Gl. (2.20):

$$R_{bs,Rd} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \cdot A_{net,t} \cdot f_{t,0,k}^{1)} \\ 0,7 \cdot A_{net,v} \cdot f_{v,k} \end{array} \right\} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_{M,Verbindung}}$$

(2.20)

1) Gemäß ON B 1995-1-1 2015 ist der Faktor mit 1,0 anzusetzen wenn keine Aufspaltsicherung vorhanden ist

Maßgebende Tragfähigkeit der Verbindung

Aus den getrennt ermittelten Tragfähigkeiten, den Netto-Querschnittsnachweis für Holz und Stahlblech sowie der Tragfähigkeit des Stabdübel-Anschlusses selbst lässt sich nun die maßgebende Tragfähigkeit der Verbindung laut Gl. (2.21) bestimmen:

$$R_{d,maßgebend} = \min \left\{ \begin{array}{l} R_{d,ges} \\ R_{Holz,Netto,d} \\ R_{Blech,d} \\ R_{bs,Rd} \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Erforderliche Länge l_{erf} je Anschlussseite

Die benötigte Blechlänge und somit die Verbindungslänge je Anschlussseite ergibt sich nach Gl. (2.22):

$$l_{erf} = a_{3,t} + (z-1) \cdot a_1 + e_1 \quad (2.22)$$

2-3.3.3 Verbindungslösung Schraubengruppe im Hirnholz

Bei dieser Verbindungsart, dargestellt in Abbildung 2-12 und Abbildung 2-13, werden Schrauben stirnseitig in das Hirnholz eingeschraubt. Sie werden somit parallel zur Faser auf Zug bzw. auf Herausziehen beansprucht. Da im Eurocode 5 (ON EN 1995-1-1 2015) der Einschraubwinkel α mit mindestens 30° begrenzt ist und das Modell für die Ausziehtragfähigkeit auf Nadelholz basiert, wurde in den weiteren Betrachtungen auf die Zulassung (ETA-11/0190 2013) zurückgegriffen, welche zum einen eine Hirnholzverschraubung und zum anderen die Applikation von Schrauben in Laubholz statisch-konstruktiv zulässt.

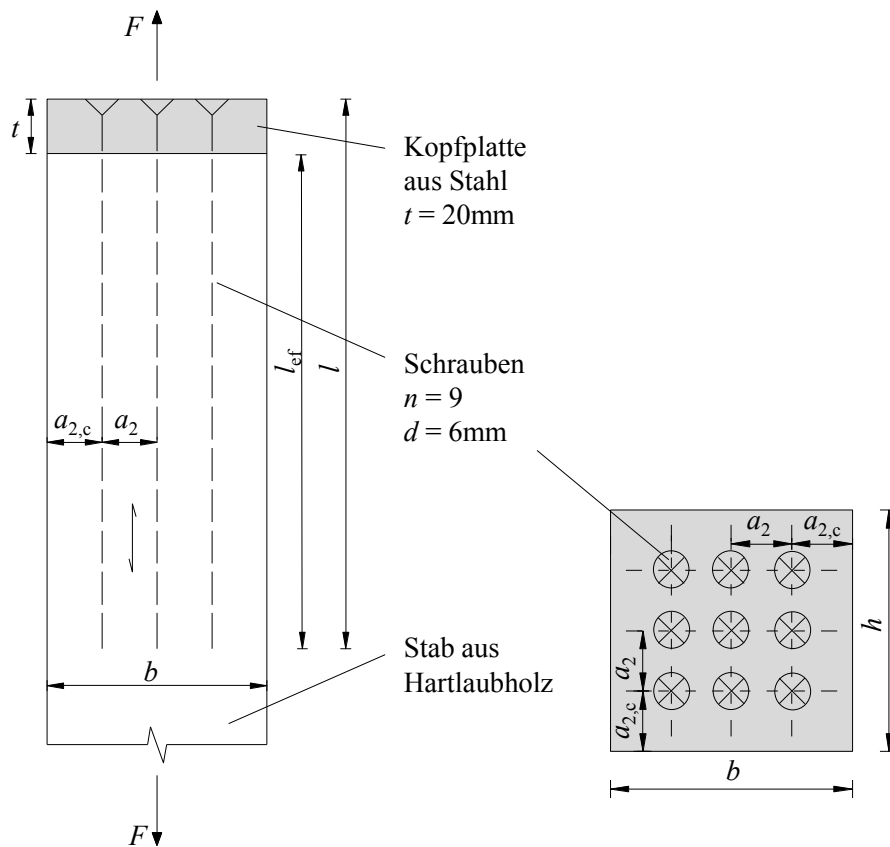


Abbildung 2-12: Verbindungslösung Schraubengruppe im Hirnholz $d = 6\text{mm}$, Längs- und Queransicht

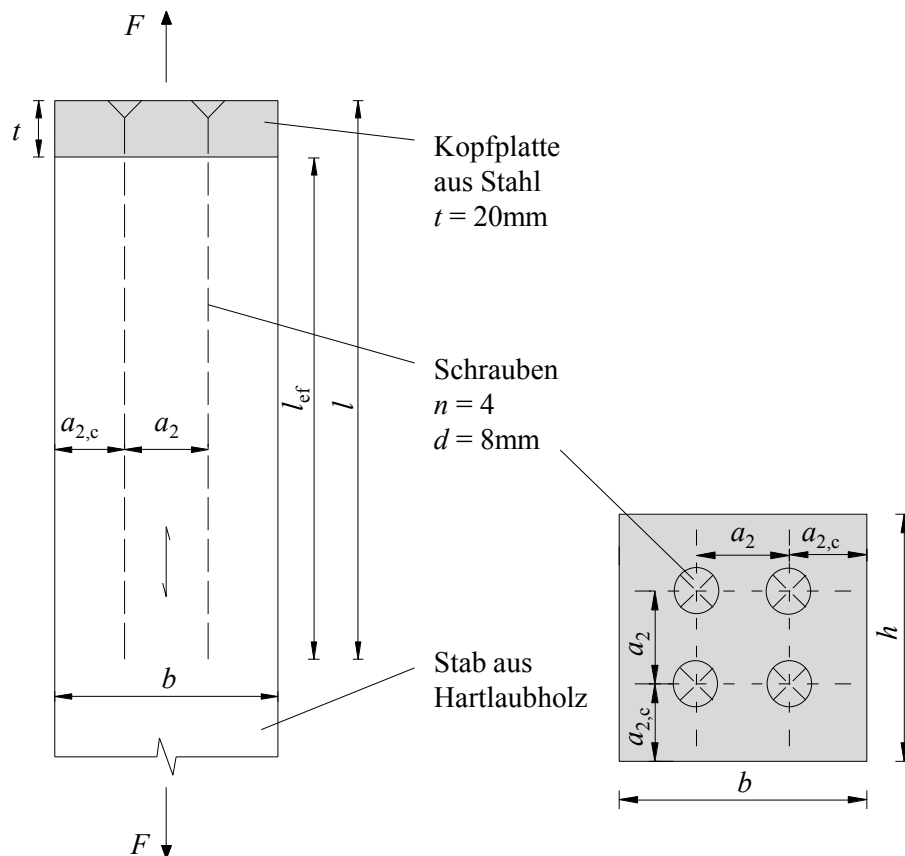


Abbildung 2-13: Verbindungslösung Schraubengruppe im Hirnholz $d = 8\text{mm}$, Längs- und Queransicht

Aufgrund der Mindestabstände laut ETA-11/0190 2013 und der vorgegebenen Breite von $b = 80\text{ mm}$ ergeben sich zwei mögliche Schraubendurchmesser: $d = 6$ bzw. 8 mm für eine Verbindung mit $n > 1$ Schrauben. Die Eingabeparameter für die Bemessung sind in Tabelle 2-10 angeführt. Es wurde bei der Wahl der effektiven Gewindelänge, laut oben genannter Zulassung, die Schraubenspitze abgezogen.

Tabelle 2-10: *Eingabeparameter für die Schrauben gruppe im Hirnholzverbindung mit $d = 6\text{mm}$ und $d = 8\text{mm}$*

			Ausführung nach ETA-11/0190 2013		
Variable	Beschreibung	Einheit	Mindestanforderungen	Ausführung	
				6mm	8mm
Mindestabmessungen					
a_2	Achsabstand der Schrauben untereinander, rechtwinkelig zu einer Ebene, parallel zur Faserrichtung	[mm]	$2,5 d = 15$ bzw. 20	20	30
$a_{2,c}$	Abstand des Schwerpunktes des im Holz eingedrehten Gewindeteils von der Seitenfläche	[mm]	$3 d = 18$ bzw. 24	20	25
Holzbauschrauben Würth ASSY® PLUS VG mit Senkkopf					
n	Schraubenanzahl	[Stk.]	–	9	4
d	Nenndurchmesser	[mm]	–	6	8
l	Schraubenlänge	[mm]	–	260	600
l_{ef}	gewählte effektive Gewindelänge für die Bemessung	[mm]	–	240	580
α	Einschraubwinkel zur Faser	[°]	–	0	0
$f_{tens,k}$	charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit der Schraube	[kN]	–	11	20

Im Folgenden sind die erforderlichen ULS Nachweise für diesen Anschlusstyp angeführt:

Tragfähigkeit der Schraube auf Herausziehen

Die Gesamttragfähigkeit der Verbindung auf Herausziehen lässt sich laut (ETA-11/0190 2013) gemäß Gl. (2.23) berechnen:

$$R_{ax,\alpha,d} = n_{ef} \cdot k_{ax} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{0,8} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_{M,Verbindung}} \cdot 10^{-3} \quad (2.23)$$

mit

$R_{ax,\alpha,d}$ Bemessungswert der Gesamttragfähigkeit der Verbindung auf Herausziehen [kN]

n_{ef} effektiv wirkende Schraubenanzahl [-]

k_{ax} Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses seitens Achs-Faserwinkel α [-]

$f_{ax,k}$ charakteristische Ausziehfestigkeit bei $\rho_{12,k} = 350 \text{ kg/m}^3$ [N/mm^2]

ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte mit einer Obergrenze von $590 \text{ [kg/m}^3]$

In vorgegebenem Fall eines sich abhebenden Stahlbleches ist die Zulassung (ETA-11/0190 2013) auf gleicher Linie mit dem Eurocode 5 (ON EN 1995-1-1 2015). Somit ergibt sich die effektiv wirkende Schraubenanzahl n_{ef} einer Schraubengruppe nach Gl. (2.24) wie folgt zu:

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (2.24)$$

Der Beiwert k_{ax} kann gemäß Gl. (2.25) bestimmt werden:

$$k_{ax} = 1,0 \quad \text{bei } 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

$$k_{ax} = 0,3 + \frac{0,7\alpha}{45^\circ} \quad \text{bei } 0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \quad (2.25)$$

Der Versagensfall „Kopfdurchziehen“ ist im Falle der hier ausgeführten Kopfplatte aus Stahl nicht möglich und wird daher nicht weiter betrachtet. Weiters zu erwähnen sind die möglichen Versagensformen von Schraubengruppen, Blockscheren und Spaltversagen. Diese sind mit zu gering gewählten Mindestabständen in Verbindung zu bringen. Blockscheren tritt auf beim Überschreiten der Querkzugspannungen und der Schubspannungen entlang der gedachten Umrisslinie der Verbindungsmittelgruppe, Spaltversagen entsteht durch zu hohe Querkzugspannungen (Obermayr 2014).

Netto-Querschnittsnachweis Holzprodukt

Der Bruttoquerschnitt $A_{\text{Holz,Brutto}}$ kann mit Gl. (2.14) berechnet werden. $A_{\text{Holz,Netto}}$ ergibt sich nach Gl. (2.26) wie folgt zu:

$$A_{\text{Holz,Netto}} = b \cdot h - n \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad (2.26)$$

Die Widerstände für den Brutto- bzw. den Netto-Holzquerschnitt $R_{\text{Holz,Brutto/Netto,d}}$ ergeben sich laut Gl. (2.15).

Versagen der Schraube auf Stahlbruch

Die Tragfähigkeit bei Stahlbruch ergibt sich laut Gl. (2.27) wie folgt:

$$R_{t,u,d} = \frac{f_{\text{tens,k}} \cdot n_{ef}}{\gamma_{M,2}} \quad (2.27)$$

mit

$R_{t,u,d}$ Tragfähigkeit der Verbindung bei Stahlbruch [kN]

Maßgebende Tragfähigkeit der Verbindung

Die maßgebende Tragfähigkeit der Verbindung ergibt sich gemäß Gl. (2.28) zu:

$$R_{d,\text{maßgebend}} = \min \begin{cases} R_{ax,\alpha,d} \\ R_{\text{Holz,Netto,d}} \\ R_{t,u,d} \end{cases} \quad (2.28)$$

Erforderliche Länge l_{erf} je Anschlussseite

Die benötigte Verbindungslänge je Anschlussseite ergibt sich nach Gl. (2.30) wie folgt zu:

$$l_{\text{erf}} = l + 5,0 \tag{2.29}$$

2-3.3.4 Verbindungslösung mittels ins Hirnholz eingeklebter Gewindestangen

Bei dieser Art von Zugverbindung werden stirnseitig Löcher gebohrt, Gewindestangen eingesetzt und anschließend der Zwischenraum zwischen Holz und Stange mit dafür geeignetem, bauaufsichtlich zugelassenem Klebstoff aufgefüllt.

Die Bemessung erfolgt gemäß ON B 1995-1-1 2015. Aufgrund der vorgegebenen Mindestabstände ergibt sich ein maximaler Nenndurchmesser von $d = 8$ mm. Die Klebefugenfestigkeit wurde laut Tabelle J.1 in ON B 1995-1-1 2015 berechnet. Die Eingabeparameter für die Bemessung sind in Tabelle 2-11 angeführt.

Tabelle 2-11: Eingabeparameter für die Verbindung mit eingeklebten Gewindestangen

			Ausführung nach ON B 1995-1-1 2015	
Variable	Beschreibung	Einheit	Mindestanforderungen	Ausführung
Mindestabmessungen				
a_2	Mindest-Zwischenabstand rechtwinkelig zur Faser	[mm]	$5d = 40$	40
$a_{4,c}$	Mindest-Randabstand zum unbeanspruchten Rand	[mm]	$2,5d = 20$	20
Gewindestangen				
d	Gewindestangendurchmesser	[mm]	–	8,0
n	Anzahl der Gewindestangen	[Stk.]	–	4
A_{ef}	Spannungsquerschnitt für $d = 8$ mm gemäß (Bossard AG 2012)	[mm ²]	–	36,6
$l_{\text{ad,max}}$	wirksame Einklebelänge laut Gl. (2.30)	[mm]	–	1000
$f_{y,b}$	Streckgrenze des Gewindestahls für die Festigkeitsklasse 8.8	[N/mm ²]	–	640
Klebstoff				
$f_{k,1,k}$	charakteristischer Wert der Klebefugenfestigkeit	[N/mm ²]	–	2,0

Die wirksame Einklebelänge $l_{ad,max}$ ergibt sich gemäß ON B 1995-1-1 2015 nach Gl. (2.30) zu:

$$l_{ad,max} = 1000 \text{ mm} \quad (2.30)$$

Im Folgenden sind die erforderlichen ULS Nachweise angeführt:

Tragfähigkeit der Gewindestangen auf Stahlbruch sowie Versagen der Klebefuge / des Holzes entlang der Bohrlochwandung

Der maßgebende Bemessungswert der Tragfähigkeit pro Gewindestange $R_{ax,Rd}$ kann gemäß ON B 1995-1-1 2015, Anhang I 3 laut Gl. (2.31) bestimmt werden:

$$R_{ax,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{y,b}}{\gamma_{M1}} \cdot A_{ef} \\ \pi \cdot d \cdot l_{ad,max} \cdot f_{k1,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_{M,Verbindung}} \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Die maßgebende Gesamttragfähigkeit auf Bemessungsniveau wird gemäß Gl. (2.32) bestimmt:

$$R_{ax,Rd,ges} = n \cdot R_{ax,Rd} \quad (2.32)$$

Netto-Querschnittsnachweis Holzprodukt

Der Bruttoholzquerschnitt berechnet sich nach Gl. (2.14) und der Netto-Holzquerschnitt nach Gl. (2.26). Die Widerstände für den Brutto- bzw. den Netto-Holzquerschnitt ergeben sich laut Gl. (2.15).

Maßgebende Tragfähigkeit der Verbindung

Der maßgebende Bemessungswert der Tragfähigkeit der Verbindung $R_{d,maßgebend}$ errechnet sich nach Gl. (2.33) zu:

$$R_{d,maßgebend} = \min \left\{ \begin{array}{l} R_{ax,Rd,ges} \\ R_{Holz,Netto,d} \end{array} \right. \quad (2.33)$$

Erforderliche Länge l_{erf} je Anschlussseite

Die benötigte Verbindungslänge je Anschlussseite ergibt sich nach Gl. (2.36) wie folgt zu:

$$l_{erf} = l_{ad,max} + 5,0 \quad (2.34)$$

2-3.3.5 Verbindungslösung mit über Stirn eingeklebten Blechen

Das Holz-Stahl-Klebeverbindingssystem (HSK-System) der Fa. TiComTec GmbH ist in Abbildung 2-14 dargestellt und besteht aus mindestens einem Metallformteil mit ausgestanzten Löchern des Durchmessers $d = 10$ mm. Die Metallformteile werden stirnseitig in eine Vertiefung im Holzprodukt eingeklebt. Die durch die Löcher entstehenden Klebstoffdübel werden im Versagensfall der Klebefuge mit 800 N pro Klebstoffdübel auf Abscheren angesetzt (Z-9.1-770 2014). Aufgrund des vorgegebenen Holzquerschnittes und der Mindestabstände können maximal zwei Bleche eingebaut werden. Die Bemessung erfolgt auf Basis der Angaben in Z-9.1-770 2014. Die maximale Einklebelänge beträgt 300 mm.

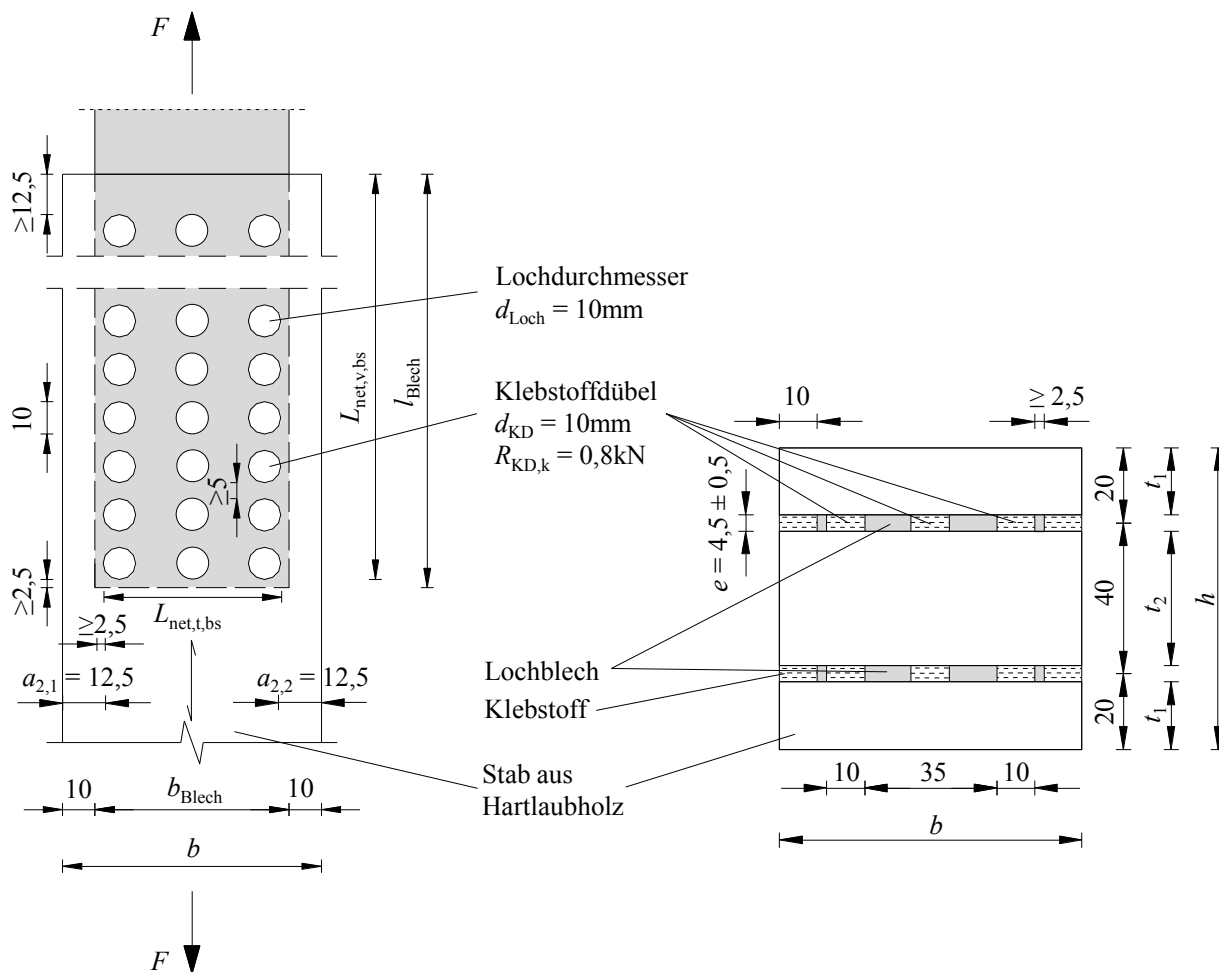


Abbildung 2-14: Verbindungslösung mit über Stirn eingeklebten Blechen: Längs- und Querschnitt

Die Eingabeparameter für die Bemessung sind in Tabelle 2-12 angeführt.

Tabelle 2-12: Eingabeparameter für die Verbindung mit eingeklebten Blechen

			Ausführung nach Z-9.1-770 2014	
Variable	Beschreibung	Einheit	Mindestanforderungen	Ausführung
Geometrie, Randabstände sowie Holzdicken				
t_1	Stärke Außenholz	[mm]	–	17,75
t_2	Stärke Innenholz	[mm]	–	35,50
$a_{2,1}$	Mindest-Randabstand von der Umrisslinie der Klebstoffdübel-Gruppe zum linken Rand quer zur Faser	[mm]	12,5	12,5
$a_{2,2}$	Mindest-Randabstand von der Umrisslinie der Klebstoffdübel-Gruppe zum rechten Rand quer zur Faser	[mm]	12,5	12,5
e	Breite des Einschnitts im Hirnholz	[mm]	4,5	4,5
Stahlblech				
b_{Blech}	Blecbreite	[mm]	$b - 2 \times 10 = 60$	60
l_{Blech}	Blechlänge	[mm]	variiert nach Holzprodukt	
t_{Blech}	Blechdicke	[mm]	–	2,5
n_{Blech}	Anzahl der Bleche	[Stk.]	–	2
s	Anzahl der Lochspalten	[–]	–	3
z	Anzahl der Lochzeilen	[–]	variiert nach Holzprodukt	
d_{Loch}	Lochdurchmesser	[mm]	–	10
$f_{y,k}$	charakteristische Fließgrenze des Bleches der Festigkeitsklasse S355	[N/mm ²]	–	355
Klebstoff				
$n_{\text{Dü}}$	Anzahl der Klebstoffdübel	[Stk.]	variiert nach Holzprodukt	
$R_{\text{KD},k}$	charakteristischer Wert der Tragfähigkeit eines Klebstoffdübels	[kN]	–	0,8

Im Folgenden sind die entsprechend erforderlichen ULS Nachweise angeführt:

Tragfähigkeit der Klebstoffdübel

Der Bemessungswert der Tragfähigkeit der Klebstoffdübel $R_{\text{HSK,d}}$ wird gemäß Zulassung Z-9.1-770 2014 und Gl. (2.35) wie folgt bestimmt:

$$R_{\text{HSK,d}} = R_{\text{KD,k}} \cdot n_{\text{KD}} \cdot \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_{\text{M,Verbindung}}} \quad (2.35)$$

Scher- und Zugversagen Holzprodukt

Für die Ermittlung des Bemessungswertes der Tragfähigkeit $F_{\text{bs,Rd}}$ nach Gl. (2.36) wird auf Zulassung Z-9.1-770 2014 verwiesen.

$$F_{\text{bs,Rd}} = F_{\text{bs,Rk}} \cdot \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_{\text{M,Verbindung}}} \quad (2.36)$$

Netto-Querschnittsnachweis Holzprodukt

Der Grad der Querschnittsschwächung kann gemäß Gl. (2.3) berechnet werden, der Bruttoquerschnitt gemäß Gl. (2.14) und der Nettoquerschnitt gemäß Gl. (2.37).

$$A_{\text{Holz,Netto}} = b \cdot (h - e \cdot n_{\text{Blech}}) \quad (2.37)$$

Die Tragfähigkeiten für den Brutto- bzw. den Netto-Holzquerschnitt ergeben sich laut Gl. (2.15).

Versagen der Bleche auf Stahlbruch

Der Nettoquerschnitt der eingeklebten Stahlbleche berechnet sich laut Gl. (2.38) zu:

$$A_{\text{Blech,Netto}} = n_{\text{Blech}} \cdot t_{\text{Blech}} \cdot (b_{\text{Blech}} - s \cdot d_{\text{Loch}}) \quad (2.38)$$

mit

$A_{\text{Blech,Netto}}$ Nettoquerschnitt Stahlbleche [mm²]

Der Bruttoquerschnitt errechnet sich mit Gl. (2.16) multipliziert mit der Anzahl an Blechen n_{Blech} . Der maßgebende Bemessungswert der Stahltragfähigkeit $R_{\text{Blech,d}}$ ergibt sich gemäß Gl. (2.17).

Maßgebende Tragfähigkeit der Verbindung

Die maßgebende Tragfähigkeit $R_{d,\text{maßgebend}}$ lässt sich mit Hilfe von Gl. (2.39) ermitteln:

$$R_{d,\text{maßgebend}} = \min \begin{cases} R_{\text{HSK},d} \\ F_{\text{bs},Rd} \\ R_{\text{Holz,Netto}} \\ R_{\text{Blech},d} \end{cases} \quad (2.39)$$

mit

$R_{\text{HSK},d}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit aller Klebstoffdübel gemäß Gl. (2.35) [kN]
$F_{\text{bs},Rd}$	charakteristische Tragfähigkeit infolge Scherversagens entlang der Begrenzung durch die äußeren Dübel (Fall a) oder infolge Zugversagens des Holzes in Anlehnung an (ON EN 1995-1-1 2015) Anhang A (Fall b) [kN]
$R_{\text{Holz,Netto}}$	Tragfähigkeit Nettoquerschnitt [kN]
$R_{\text{Blech},d}$	maßgebender Bemessungswert der Tragfähigkeit des Stahlbleches [kN]

2-3.3.6 Verbindungslösung Zuglaschenstoß mittels Schrägverschraubung und außenliegenden Stahlblechen

Bei dieser Verbindung, dargestellt in Abbildung 2-15, werden die resultierenden Zugkräfte der zuvor definierten Beanspruchungssituation über seitlich angeschraubte Stahlbleche übertragen, die Schrauben werden mit einem Winkel von $\alpha = 45^\circ$ zur Faser eingeschraubt.

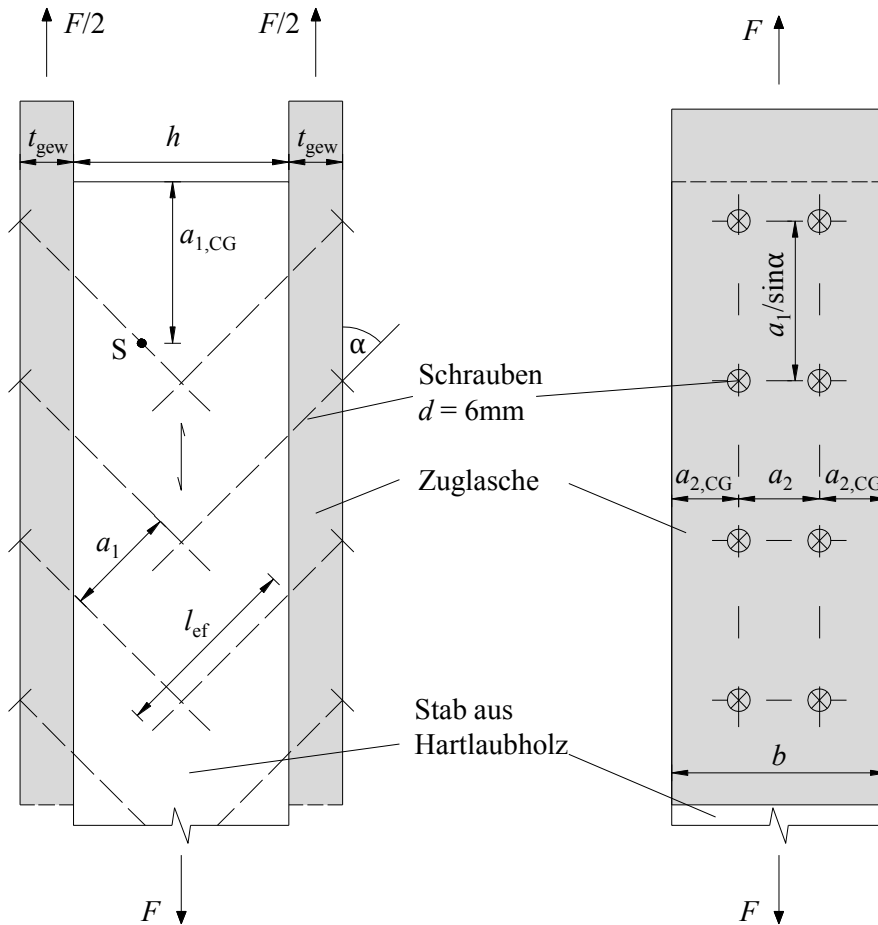


Abbildung 2-15: Verbindungslösung Zuglaschenstoß: Längsansichten

Aufgrund der Mindestabstände laut ETA-11/0190 2013 und der vorgegebenen Breite von $b = 80$ mm ergibt sich der maximale Schrauben-Nenndurchmesser zu $d = 6$ mm. Die Eingabeparameter für die Bemessung sind in Tabelle 2-13 angeführt.

Tabelle 2-13: Eingabeparameter für die Verbindung mittels Schrägverschraubung und außenliegenden Zuglaschen

			Ausführung nach ETA-11/0190 2013	
Variable	Beschreibung	Einheit	Mindestanforderungen	Ausführung
Geometrie, Randabstände sowie Holzdicken				
a_1	Mindest-Schraubenabstand in einer parallel zur Faserrichtung und Schraubenachse liegenden Ebene	[mm]	$5d = 30$	30
$a_{1,CG}$	Mindest-Schraubenabstand des Hirnholzenden zum Schwerpunkt des Schraubengewindes im Bauteil	[mm]	$5d = 30$	30
a_2	Mindest-Schraubenabstand rechtwinkelig zu einer parallel zur Faserrichtung und Schraubenachse liegenden Ebene	[mm]	$2,5d = 15$	30
$a_{2,CG}$	Mindestrandabstand des Schwerpunkts des Schraubengewindes im Bauteil	[mm]	$3d = 18$	25
Schrauben Würth Assy Plus VG				
d	Nenndurchmesser	[mm]	–	6
l	Schraubenlänge	[mm]	–	120
l_{ef}	effektive Gewindelänge	[mm]	variiert je nach Blechstärke	
$f_{tens,k}$	charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit	[kN]	–	11
α	Einschraubwinkel zur Faser	[°]	–	45
s	Anzahl der Schraubenspalten	[Stk.]	–	2
Stahlblech S 235 bzw. S 355				
$f_{y,k}$	Streckgrenze	[N/mm ²]	variiert je nach Holzprodukt	
$f_{u,k}$	Zugfestigkeit	[N/mm ²]	variiert je nach Holzprodukt	
$\mu_{Holz-Stahl}$	Reibbeiwert	[–]	–	0,25
t	Blechstärke	[mm]	variiert je nach Holzprodukt	

Nachstehend die entsprechend erforderlichen ULS Nachweise gemäß ETA-11/0190 2013:

Versagen der Schraube auf Herausziehen bzw. Stahlbruch

Die gewählte Schraubenanzahl n pro Seite wird nach der Zulassung auf eine effektiv wirkende Schraubenanzahl n_{ef} mit Gl. (2.40) reduziert.

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

Ein Faktor k_{ax} für den Last-Faser Winkel kann für einen Winkel von $\alpha = 45^\circ$ mit $k_{ax} = 1,0$ angenommen werden. Der charakteristische Ausziehparameter $f_{ax,k}$ für Schrauben mit $d = 6,0\text{mm}$ wird mit $f_{ax,k} = 11,5\text{N/mm}^2$ veranschlagt.

Der Bemessungswert der Ausziehfestigkeit einer Schraube im Laubholz lässt sich laut oben genannter Zulassung gemäß Gl. (2.41) wie folgt ermitteln:

$$R_{ax,\alpha,Rd} = n_{ef} \cdot k_{ax} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{0,8} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_{M,Verbindung}} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \quad (2.41)$$

mit

ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte, darf laut Zulassung mit maximal 590kg/m^3 angenommen werden [kg/m^3]

Die maximale Tragfähigkeit bei Stahlbruch einer Schraube wird in der jeweiligen Zulassung abhängig vom Nenndurchmesser angegeben; siehe Gl. (2.42):

$$R_{t,u,d} = \frac{f_{tens,k} \cdot n_{ef} \cdot 2}{\gamma_{M,2}} \quad (2.42)$$

mit

$f_{tens,k}$ charakteristischer Wert der Stahl-Zugtragfähigkeit nach ETA-11/0190 2013 [kN]

Da bei einem Stahlblech der Nachweis auf Kopfdurchziehen nicht geführt wird, ist der Mindestwert aus Herausziehen und Stahlbruch der Schraube maßgebend. Die Einzeltragfähigkeit in Achsrichtung ergibt sich aus den Kraftanteilen parallel zur Faser und einem Reibungsanteil aus der Pressung des Stahlbleches an die Holzoberfläche gemäß Gl. (2.43):

$$R_d = \min \left\{ \begin{array}{l} R_{ax,\alpha,d} \\ R_{t,u,d} \end{array} \right\} \cdot (\cos \alpha + \mu_{\text{Holz,Stahlblech}} \cdot \sin \alpha) \quad (2.43)$$

mit

R_d Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Schraubenverbindung parallel zur Faser [kN]

Netto-Querschnittsnachweis Holzprodukt

Der Grad der Querschnittsschwächung kann gemäß Gl. (2.3) berechnet werden, der Brutto-Holzquerschnitt laut Gl. (2.14) und der Netto-Holzquerschnitt gemäß Lignum TU Graz 2015 mit Gl. (2.44). Die Tragfähigkeiten für den Brutto- bzw. den Netto-Holzquerschnitt ergeben sich laut Gl. (2.15).

$$A_{\text{Holz,Netto}} = b \cdot h - m \cdot d \cdot h \quad (2.44)$$

mit

m Anzahl an projizierten Schrauben im Querschnitt [mm]

Versagen der Bleche auf Stahlbruch

Die Nachweisführung für zugbeanspruchte Stahlbleche wurde nach (ON EN 1993-1-1 2014) durchgeführt. Die Querschnittskenngrößen, die Tragfähigkeiten sowie der maßgebende Bemessungswert für den Nachweis des Stahlquerschnittes auf Zugbeanspruchung errechnen sich gemäß Gl. (2.16) und Gl. (2.17).

Maßgebende Tragfähigkeit der Verbindung

Das Minimum aus den Bemessungswerten der Tragfähigkeiten aus Herausziehen und Stahlbruch, Holz-Nettoquerschnitt sowie Versagen der Zuglaschen ergibt den maßgebenden Bemessungswert der Tragfähigkeit der Anschlusslösung; siehe Gl. (2.45):

$$R_{d,\text{maßgebend}} = \min \begin{cases} R_d \\ R_{\text{Holz,Netto},d} \\ R_{\text{Blech},d} \end{cases} \quad (2.45)$$

2-3.4 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ANALYSIERTEN ANSCHLUSSLÖSUNGEN

Ziel bei der Berechnung der einzelnen Verbindungslösungen war es, eine Optimierung hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Kompaktheit zu erreichen. Vorgaben wie ein ausschließliches Versagen eines Anschlussmaterials (Holz, Stahl) wurden für diese Analyse vernachlässigt und ermöglichen dadurch einen besseren Vergleich.

In den folgenden Abschnitten 2-3.4.1 - 2-3.4.5 werden einige verbindungscharakteristische Parameter sowie folgende Berechnungsergebnisse tabellarisch aufgelistet:

- Tragfähigkeit der Verbindung [kN]
- Querschnittsschwächung [%]
- Ausnutzungsgrade im Vergleich zum Brutto- und Netto-Holzquerschnitt [%]
- Länge der Verbindung, Kompaktheit [mm]
- limitierender Versagensfaktor [-]

Aufgelistet wird nach der Tragfähigkeit des Bruttoquerschnittes $R_{\text{Holz,Brutto}}$ der untersuchten Holzwerkstoffe. Anknüpfend erfolgt eine vergleichende Betrachtung und Diskussion. Für eine vereinfachte Betrachtungsweise werden in weiterer Folge die wichtigsten Eingangsparameter aus Abschnitt 2-3.3 zu Beginn jeder Anschlusslösung in gekürzter Form wiedergegeben.

2-3.4.1 Anschlusslösung Stabdübel

Als Eingangsparameter für die Ermittlung der Bemessungswerte der Tragfähigkeit der in Abschnitt 2-3.3.2 dargelegten Stabdübelverbindung dienen jene der Tabelle 2-14.

Tabelle 2-14: *Übersicht der wichtigsten Eingangsparameter einer Stabdübelverbindung für die behandelten Holzwerkstoffe*

			Ausführung nach ON EN 1995-1-1 2015	
Variable	Beschreibung	Einheit	Mindestanforderungen	Ausführung
Stahlblech S 355				
n_{Blech}	Anzahl der Bleche	[Stk.]	–	2
t	Blechstärke	[mm]	–	6
Stabdübel S 355				
d	Stabdübeldurchmesser	[mm]	–	6
s	Anzahl der Stabdübel nebeneinander quer zur Faser (Spalten)	[Stk.]	–	2

In Tabelle 2-15 sind die Ergebnisse einer Verbindungslösung mit Stabdübel optimiert nach der Tragfähigkeit dargestellt.

Tabelle 2-15: Übersicht der Ergebniswerte einer Verbindungslösung mit Stabdübel in den untersuchten Holzprodukten, der Vollständigkeit halber sind Dübelanzahl $n_{\text{Dübel}}$ sowie Abstand in Faserrichtung a_1 inbegriffen

Stabdübel	R_d [kN]	$R_{H,btto}$ [kN]	$l_{V,Std}$ [mm]	η_{H-QS} [%]	η_{bttoQS} [%]	η_{nttoQS} [%]	a_1 [mm]	$n_{\text{Dübel}}$ [Stk.]	lim. Faktor
BauBuche	233,3	322,9	1296,0				35,0	34	
BSH Birke	86,6	119,8	526,0				35,0	12	
BSH Eiche	76,6	106,0	526,0				35,0	12	
BSH Laubholz	73,2	101,4	656,0	72,3	72,3	100,0	60,0	10	Holz Netto-QS
BSH Buche	69,9	96,8	536,0				60,0	8	
BSH Edelkastanie	66,6	92,2	456,0				35,0	10	
BSH Fichte Gl 24h	63,9	88,5	536,0					14	
VH Fichte C 24	46,4	64,2	416,0	72,3	72,3	100,0	30,0	10	Holz Netto-QS

Fazit zur Verbindungslösung mit Stabdübel

Bei den Ergebnissen der Stabdübelverbindung laut Tabelle 2-15 ist vorwiegend der Holz - Nettoquerschnitt der limitierende Faktor, da beliebig viele Dübel eingebaut werden können und somit die Zugtragfähigkeit des Anschlusses quasi beliebig gesteuert werden kann. Aus Tabelle 2-15 geht weiters hervor, dass je höher die Zugfestigkeit des Holzproduktes ist, desto mehr Dübel werden benötigt, um Holzversagen zu erreichen, und desto größer wird die Verbindungslänge $l_{V,Verbindungsart}$ gemäß Gl. (2.5), welche benötigt wird, um die Verbindung zu realisieren.

Eine Ausnahme bilden die Holzwerkstoffe BSH Laubholz und BSH Buche. Mit den niedrigsten Schubfestigkeiten aller untersuchten Holzprodukte benötigen sie die größten Dübelabstände in Faserrichtung a_1 um Blockscheren zu vermeiden.

Zudem ist zu erkennen, dass aufgrund der Querschnittsschwächung durch Stabdübel und Bleche max. 72 % der Leistungsfähigkeit des Bruttoquerschnittes genutzt werden kann.

2-3.4.2 Anschlusslösung Schraubengruppe im Hirnholz

Die wichtigsten Eingangsparameter zur Ermittlung der Ergebniswerte der in Abschnitt 2-3.3.3 dargelegten Schraubengruppe im Hirnholz sind in Tabelle 2-16 aufgelistet.

Tabelle 2-16: Übersicht der wichtigsten Eingangsparameter der Hirnholz-Schraubenverbindung für die behandelten Holzwerkstoffe

			Ausführung nach ETA-11/0190 2013		
Variable	Beschreibung	Einheit	Mindestanforderungen	Ausführung	
Holzbauschrauben Würth ASSY® PLUS VG mit Senkkopf				6mm	8mm
n	Schraubenanzahl	[Stk.]	–	9	4
d	Nenn Durchmesser	[mm]	–	6	8
l	Schraubenlänge	[mm]	–	260	600
l_{ef}	gewählte effektive Gewindelänge für die Bemessung	[mm]	–	240	580
$f_{tens,k}$	charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit der Schraube	[kN]	–	11	20

In Tabelle 2-17 und Tabelle 2-18 sind die Ergebniswerte einer geschraubten Hirnholzverbindung, optimiert nach der Tragfähigkeit abgebildet.

Tabelle 2-17: Übersicht der Ergebniswerte einer Hirnholz-Schraubenverbindung mit $d = 6\text{mm}$ für die untersuchten Holzwerkstoffe

Hirnholz- verbindung 6mm	R_d [kN]	$R_{H,btto}$ [kN]	$l_{V,HH}$ [mm]	η_{H-QS} [%]	η_{bttoQS} [%]	η_{attoQS} [%]	lim. Faktor
BauBuche		322,9			11,7	12,2	
BSH Birke		119,8			31,5	32,8	
BSH Eiche		106,0			35,6	37,1	
BSH Laubholz	37,7	101,4	530,0	96,0	37,2	38,8	Herausziehen Schraube
BSH Buche		96,8			39,0	40,6	
BSH Edelkastanie	34,1	92,2			37,0	38,5	
BSH Fichte Gl 24h	26,8	88,5			30,3	31,6	
VH Fichte C 24	24,8	64,2	530,0	96,0	38,7	40,3	Herausziehen Schraube

Tabelle 2-18: Übersicht der Ergebniswerte einer Hirnholz-Schraubenverbindung mit $d = 8\text{mm}$ für die untersuchten Holzwerkstoffe

Hirnholz- verbindung 8mm	R_d [kN]	$R_{H,btto}$ [kN]	$l_{V,HH}$ [mm]	η_{H-QS} [%]	η_{bttoQS} [%]	η_{nttoQS} [%]	lim. Faktor
BauBuche		322,9			17,3	17,8	
BSH Birke		119,8			46,5	48,0	
BSH Eiche		106,0			52,6	54,3	Stahlbruch Schraube
BSH Laubholz	55,7	101,4	1210,0	96,9	55,0	56,7	
BSH Buche		96,8			57,6	59,4	
BSH Edelkastanie	50,7	92,2			55,0	56,8	Herausziehen Schraube
BSH Fichte Gl 24h	39,8	88,5	1210,0	96,9	45,0	46,5	Herausziehen Schraube
VH Fichte C 24	36,9	64,2			57,5	59,3	

Fazit zur Anschlusslösung Schraubengruppe im Hirnholz

Da die Berechnung des Auszieh Widerstandes von Schrauben in Laubholz mit null Grad zur Faser nicht im Eurocode 5 behandelt wird und es nur vereinzelt Zulassungen dafür gibt, sind die vorhandenen Modelle auf der stark konservativen Seite.

Der Widerstand auf Herausziehen wird durch die Deckelung der Rohdichte in ETA-11/0190 2013 mit maximal 590 kN/m^3 , den vorgestellten Faktor k_{ax} (70 % Abminderung) sowie durch den niedrigen Potenzfaktor von 0,8 bei der Berechnung von $R_{ax,a,d}$ in Gl. (2.23) als sehr konservativ berechnet. In weiterer Folge versagt die Schraubengruppe nach diesem Modell selbst bei Einbindetiefen von 40 bzw. $72,5d$ noch immer auf Herausziehen, in der Realität ist bei Einbindetiefen von $12d$ schon mit Stahlbruch der Schraube zu rechnen.

Die Ausnutzungsgrade der Tragfähigkeiten $\eta_{Brutto/Netto}$ sinken mit der Zunahme der Zugfestigkeit der Hartlaubholz (produkte).

2-3.4.3 Anschlusslösung mittels ins Hirnholz eingeklebter Gewindestangen

Die wichtigsten Eingangsparameter zur Ermittlung der Ergebniswerte der in Abschnitt 2-3.3.4 dargelegten Verbindung mit eingeklebten Gewindestangen sind in Tabelle 2-19 aufgezählt.

Tabelle 2-19: *Übersicht der wichtigsten Eingangsparameter der Verbindungslösung mit ins Hirnholz eingeklebten Gewindestangen für die behandelten Holzwerkstoffe*

			Ausführung nach ON B 1995-1-1 2015	
Variable	Beschreibung	Einheit	Mindestanforderungen	Ausführung
Gewindestangen 10.9 oder 8.8				
d	Gewindestangendurchmesser	[mm]	–	8,0
d_{Bohrloch}	Bohrlochdurchmesser	[mm]	–	11,0
n	Anzahl der Gewindestangen	[Stk.]	–	4
$l_{\text{ad,max}}$	wirksame Einklebelänge laut Gl. (2.30)	[mm]	–	1000,0
Klebstoff				
$f_{k,1,k}$	charakteristischer Wert der Klebefugenfestigkeit	[N/mm ²]	–	2,0

Tabelle 2-20 enthält die darauf basierenden Ergebniswerte einer Verbindung mit eingeklebten Gewindestangen, optimiert nach der Tragfähigkeit.

Tabelle 2-20: Übersicht der Ergebniswerte einer Hirnholzverbindung mit eingeklebten Gewindestangen für die untersuchten Holzwerkstoffe

Eingeklebte Gewindestangen 8mm	R_d [kN]	$R_{H,btto}$ [kN]	$l_{V,GST}$ [mm]	η_{H-QS} [%]	η_{bttoQS} [%]	η_{nttoQS} [%]	Stahl-güte	lim. Faktor
BauBuche	131,8	322,9	2000,0	94,1	40,8	43,4	10.9	Stahlbruch GST
BSH Birke	112,7	119,8			94,1	100,0	10.9	Holz Netto-QS
BSH Eiche	99,7	106,0			94,1	100,0	10.9	Holz Netto-QS
BSH Laubholz	95,4	101,4			94,1	100,0	10.9	Holz Netto-QS
BSH Buche	91,0	96,8			94,1	100,0	8.8	Holz Netto-QS
BSH Edelkastanie	86,7	92,2			94,1	100,0	8.8	Holz Netto-QS
BSH Fichte GI 24h	83,2	88,5			94,1	94,1	100,0	8.8
VH Fichte C 24	60,4	64,2						

Fazit zur Verbindungslösung eingeklebte Gewindestangen

Der limitierte Einsatz von eingeklebten Gewindestangen aufgrund vorgegebener Mindest-Rand- und -Zwischenabstände führt zu selbigen Erkenntnissen wie bei der Verbindung Schraubengruppe im Hirnholz: Annähernd gleiche Tragfähigkeiten der Verbindung führen zu sinkenden Ausnutzungsgraden $\eta_{Brutto/Netto}$ bei höher werdender Zugfestigkeit des Holzproduktes. Nur bei BauBuche kommt es zu einem Stahlbruchversagen der Gewindestangen aufgrund der hohen Tragfähigkeit des Holzproduktes. Bei allen anderen untersuchten Holzwerkstoffen tritt Netto-Querschnittversagen auf. Auffallend ist, dass die Stahlgüte mit der Zugfestigkeit des Holzproduktes steigt.

2-3.4.4 Anschlusslösung mit über Stirn eingeklebten Blechen

Wichtige Eingangsparameter für die Ermittlung der Ergebniswerte der in Abschnitt 2-3.3.5 dargelegten Verbindung mit eingeklebten Blechen sind in Tabelle 2-21 dargestellt.

Tabelle 2-21 Übersicht der wichtigsten Eingangsparameter der Verbindungslösung mit ins Hirnholz eingeklebten, gelochten Blechen für die behandelten Holzwerkstoffe

			Ausführung nach Z-9.1-770 2014	
Variable	Beschreibung	Einheit	Mindestanforderungen	Ausführung
Stahlblech S 355 bzw. S 450				
b_{Blech}	Blechbreite	[mm]	$b - 2 \times 10 = 60$	60

l_{Blech}	Blechlänge	[mm]	variiert nach Holzprodukt	
t_{Blech}	Blechdicke	[mm]	–	2,5
n_{Blech}	Anzahl der Bleche	[Stk.]	–	2
s	Anzahl der Lochspalten	[–]	–	3
z	Anzahl der Lochzeilen	[–]	variiert nach Holzprodukt	
d_{Loch}	Lochdurchmesser	[mm]	–	10
Klebstoff				
$n_{\text{Dü}}$	Anzahl der Klebstoffdübel	[Stk.]	variiert nach Holzprodukt	
$R_{\text{KD,k}}$	charakteristischer Wert der Tragfähigkeit eines Klebstoffdübels	[kN]	–	0,8

Tabelle 2-22 enthält die darauf basierenden Ergebniswerte einer Verbindung mit ins Hirnholz eingeklebten, gelochten Blechen, optimiert nach der Tragfähigkeit und Kompaktheit.

Tabelle 2-22: Übersicht der Ergebniswerte einer Hirnholzverbindung mit eingeklebten, gelochten Blechen für die untersuchten Holzwerkstoffe

Eingeklebte Bleche	R_d [kN]	$R_{H,btto}$ [kN]	$l_{v,eingBl}$ [mm]	η_{H-QS} [%]	η_{bttoQS} [%]	η_{nttoQS} [%]	Stahl- güte	$n_{\text{Dübel}}$ [Stk.]	lim. Faktor
BauBuche	59,4	322,9			18,4	25,9			
BSH Birke	59,4	119,8			49,6	69,8			
BSH Eiche	59,4	106,0			56,0	78,9			
BSH Laubholz	59,4	101,4	590,0	88,8	58,6	82,5	S 450	114	Stahl Netto-QS Bruch
BSH Buche	59,4	96,8			61,4	86,5			
BSH Edelkastanie	59,4	92,2			64,5	90,8			
BSH Fichte Gl 24h	59,4	88,5	590,0		67,1	94,6	S 450	114	Stahl Netto-QS Bruch
VH Fichte C 24	45,6	64,2	440,0	88,8	94,1	100,0	S 355	84	Holz NettoQS

Fazit zur Anschlusslösung mit über Stirn eingeklebten Blechen

Wie bei der Anschlusslösung mit Stabdübel kann die Verbindung auch hier in Achsrichtung verlängert werden, im aktuellen Fall, um Klebstoffdübel-Versagen zu verhindern. Der Querschnitt der eingeklebten Bleche wird durch die ausgestanzten Löcher abgeschwächt, dadurch erweist sich der Stahl-Nettoquerschnitt als der zielführend primär anvisierte limitierende Faktor der Verbindung. Bei Fichten-Vollholz C 24 limitiert der Nettoquerschnitt des Holzes, bedingt durch die vergleichsweise geringe Zugfestigkeit, die Tragfähigkeit der Verbindung. Das mehrheitliche Stahlversagen wird zur maßgebenden Tragfähigkeit, unabhängig vom Holzprodukt. Der Ausnutzungsgrad der Tragfähigkeiten $\eta_{\text{Brutto/Netto}}$ sinkt demnach wieder mit steigender Zugfestigkeit des Holzproduktes.

2-3.4.5 Anschlusslösung Zuglaschenstoß mittels Schrägverschraubung und außenliegender Stahlbleche

Die wichtigsten Eingangsparameter für die Ermittlung der Ergebniswerte des in Abschnitt 2-3.3.6 dargelegten Anschlusses einer Zuglaschen-Verbindung mittels Schrägverschraubung sind in Tabelle 2-23 dargestellt.

Tabelle 2-23: *Übersicht der wichtigsten Eingangsparameter der Verbindungslösung mittels Schrägverschraubung außenliegender Zuglaschen für die behandelten Holzwerkstoffe*

Variable	Beschreibung	Einheit	Ausführung nach ETA-11/0190 2013	
			Mindestanforderungen	Ausführung
Schrauben Würth Assy Plus VG				
d	Nenndurchmesser	[mm]	–	6
l	Schraubenlänge	[mm]	–	120
n_{Schrau}	Anzahl Schrauben je Seite	[Stk.]	variiert je nach Holzprodukt	
$f_{\text{tens,k}}$	charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit	[kN]	–	11,0
α	Einschraubwinkel zur Faser	[°]	–	45,0
s	Anzahl der Schraubenspalten	[Stk.]	–	2
Stahlblech				
$\mu_{\text{Holz-Stahl}}$	Reibbeiwert	[–]	–	0,25
t	Blechstärke	[mm]	variiert je nach Holzprodukt	

Tabelle 2-24 enthält die darauf basierenden Ergebniswerte einer Zuglaschen-Verbindung, optimiert nach der Tragfähigkeit und Kompaktheit.

Tabelle 2-24: *Übersicht der Ergebniswerte der Verbindungslösung mittels Schrägverschraubung aufliegender Zuglaschen für die behandelten Holzwerkstoffe*

Zuglaschen- verbindung 6mm	R_d [kN]	$R_{H,btto}$ [kN]	$l_{V,Zugla}$ [mm]	η_{H-QS} [%]	η_{bttoQS} [%]	η_{nttoQS} [%]	Stahl- güte	n_{Schrau} [Stk.]	t [mm]	lim. Faktor
BauBuche	226,1	322,9	918,5				S 355	22	10	
BSH Birke	83,9	119,8	324,6					8		
BSH Eiche	74,2	106,0	324,6					8		
BSH Laubholz	71,0	101,4	324,6	70,0	70,0	100,0	S 235	8	5	Holz Netto-QS
BSH Buche	67,7	96,8	239,7					6		
BSH Edelkastanie	64,5	92,2	239,7					6		
BSH Fichte Gl 24h	61,9	88,5	324,6					8		
VH Fichte C 24	45,0	64,2	239,7	70,0	70,0	100,0	S 235	6	5	Holz Netto-QS

Fazit zur Anschlusslösung Zuglaschen-Verbindung mittels Schrägverschraubung und aufliegender Stahlbleche

Wie bei der Anschlusslösung der Schraubengruppe im Hirnholz in Abschnitt 2-3.4.2 wurde die Zulassung ETA-11/0190 2013 für die Berechnung verwendet. Durch die beliebige Erhöhung der Schraubenzahl bei dieser Anschlusslösung kann der Netto-Holzquerschnitt zu 100% ausgenutzt werden, $\eta_{NettoQS} = 100\%$. Die Tragfähigkeit R_d steigt demnach mit der Zugfestigkeit des untersuchten Holzproduktes. Durch die hohe Zugfestigkeit der „BauBuche“ steigt die Verbindungslänge $l_{V,Zugla}$, die Stahlgüte, die Blechstärke t sowie die Anzahl der benötigten Schrauben pro Seite n_{Schrau} .

2-3.4.6 Fazit aus den recherchierten Anschlusslösungen

Man kann die vorgestellten Anschlusslösungen in Hinblick auf den Kraftfluss in zwei Gruppen einteilen:

- Verbindungen mit deutlichen Umlenkungen im Kraftfluss (deutliche indirekte Kraftflussanteile), wie die Anschlusslösung mit Stabdübeln (Abschnitt 2-3.3.2 und 2-3.4.1) und der Zuglaschenstoß mit seitlichen Stahlblechen und Schrägverschraubung (Abschnitt 2-3.3.6 und 2-3.4.5)
- Verbindungen mit weitgehend direktem Kraftfluss, wie Schraubengruppen im Hirnholz (Abschnitt 2-3.3.3 und 2-3.4.2), eingeklebte Gewindestangen im Hirnholz (Abschnitt 2-3.3.4 und 2-3.4.3) und eingeklebte Bleche (Abschnitt 2-3.3.5 und 2-3.4.4).

Insgesamt kann festgestellt werden, dass Verbindungen der ersten Gruppe, mit deutlich indirekten Kraftflussanteilen, eine weitaus höhere Querschnittsschwächung η_{HolzQS} aufweisen als Anschlusslösungen mit weitgehend direktem Kraftfluss (zweite Gruppe) (30 % vs. 3 - 11%), wobei zur Steigerung der Gesamttragfähigkeit der Verbindung in der ersten Gruppe eine Erhöhung der Verbindungsmittelanzahl in Längsrichtung zu keiner weiteren Schwächung des Holzquerschnittes führt. Bei der zweiten Gruppe ist die Anzahl der einsetzbaren Verbindungsmittel aufgrund der vorgegebenen Mindestabstände begrenzt. Zudem: Während Anschlüsse der zweiten Gruppe die hohe Tragfähigkeit des Bruttoquerschnittes der BauBuche gemäß Tabelle 2-25 nur marginal ausnutzen ($\eta_{\text{BruttoQS}} = 11,7 - 40,8\%$), sind, zur Erzielung eines hohen Ausnutzungsgrades, die Anschlusslängen l_V der ersten Gruppe deutlich über jenen der zweiten Gruppe, da die benötigten Dübel- bzw. Schraubenstückzahlen sehr hoch sind.

Tabelle 2-25: *Ergebniswerte aller Anschlusslösungen für den Holzwerkstoff Baubuche, aufgelistet nach der Tragfähigkeit*

BauBuche	R_d [kN]	$R_{H,btto}$ [kN]	l_V [mm]	η_{H-QS} [%]	η_{bttoQS} [%]	η_{attoQS} [%]	lim. Faktor
Stabdübel 6mm	233,3	322,9	1296,0	72,3	72,3	100,0	Holz Netto-QS
Zuglasche 6mm	226,1	322,9	918,5	70,0	70,0	100,0	Holz Netto-QS
Eingekl. GST 8mm	131,8	322,9	2000,0	94,1	40,8	43,4	Stahlbruch GST
Eingekl. Bleche	59,4	322,9	590,0	88,8	18,4	25,9	Stahl Netto-QS Bruch
HH Schraube 8mm	55,7	322,9	1210,0	96,9	17,3	17,8	Stahlbruch Schraube
HH Schraube 6mm	37,7	322,9	530,0	96,0	11,7	12,2	Herausziehen Schraube

In Anbetracht der analysierten Hartlaubholz(produkte) sticht die BauBuche durch ihre hohe charakteristische Rohdichte und ihre überragend hohe charakteristische Zugfestigkeit parallel zur Faser gegenüber den anderen Produkten hervor. Folglich können zwar für Verbindungsmittel auf Abscheren sowie auf Herausziehen sehr hohe Anschlusskapazitäten erreicht werden, allerdings ist der Anstieg in der Rohdichte, bedingt durch die ausgeprägte Homogenisierung in den Festigkeitskenngrößen, unterproportional zum Anstieg der Zugfestigkeit. Folglich gilt dieses Bauprodukt im Vergleich zu den anderen Hartlaubholz(produkten) und im Benchmark zu Nadelholz als besonders herausfordernd, will man die Leistungsfähigkeit des Stabes unter Zug maximal am Anschlusspunkt erhalten. Man beachte: Die Zugfestigkeit der BauBuche (siehe Abschnitt 2-3.2) übertrifft die restlichen Holzprodukte aus

Hartlaubholz um den Faktor drei. Dahingehend motiviert, ergibt sich die maximale Anschlussleistung für den hier untersuchten Referenzstab mit $A_{\text{ref}} = 80 \times 80 \text{ mm}^2$ bei einem vier-schnittigen Stabdübelanschluss in Kombination mit innenliegenden Blechen. Hierbei kann, bei einem Ausnutzungsgrad des Holzquerschnittes und der Brutto-Tragfähigkeit auf Bemessungsniveau von $\eta_{\text{HolzQS}} = \eta_{\text{BruttoQS}} = 72 \%$ und einer Anschlusslänge von $l_v = 1296 \text{ mm}$, eine Tragfähigkeit von maximal $R_{\text{maßg}} = 233,3 \text{ kN}$ erzielt werden.

Aufbauend auf der durchgeführten Recherche und den dargelegten Ergebnissen können folgende Ziele zur weiteren Leistungssteigerung und Optimierung des IST-Zustandes definiert werden:

- Erhöhung des Ausnutzungsgrades der Brutto-Tragfähigkeit η_{BruttoQS} durch Maximierung des Ausnutzungsgrades der Netto-Tragfähigkeit; $\eta_{\text{NettoQS}} \rightarrow 1,00$;
- Minimierung der Querschnittsschwächung durch Verbindungsmittel und Anschlussteile, um die Leistungsfähigkeit des ungeschwächten Stabes maximal zu nutzen; $\eta_{\text{HolzQS}} \rightarrow 1,00$;
- Maximierung der Kompaktheit einer Anschlusslösung durch Optimierung der Verbindungslänge; $l_v \rightarrow \ll$;
- Maximierung des Vorfertigungsgrades und der Montagefreundlichkeit vor Ort durch vormontierte Anschlüsse und Fügung der Stäbe inkl. Anschlüsse vor Ort mittels Montagestößen, was zudem eine Trennung in die beiden Bereiche vormontierter Holz-Metall-Anschluss (\rightarrow mit hoher Tragfähigkeit und Steifigkeit) und Metall-Metall-Montagestoß (\rightarrow mit zusätzlich hoher Duktilität) ermöglicht.

Die genannten Ziele lassen sich mit dem Vorhaben der Entwicklung einer rohrförmigen, geschraubten Anschlusslösung verbinden. Ein ringförmiger Querschnitt mit großer Mantelfläche aufgrund des Gewindes an der Innen- sowie Außenseite besitzt einerseits hohes Potential in der Frage der Ausziehtragfähigkeit und andererseits, bei dünner Rohrwandstärke und Flankentiefe, eine relativ gering zu erwartende Querschnittsfläche, was in Folge zu einer geringen Querschnittsschwächung führt.

KAPITEL 3: RECHERCHE GEGENWÄRTIGER ROHRFÖRMIGER VERBINDUNGSMITTEL

In diesem Kapitel werden gegenwärtige rohrförmige Verbindungslösungen sowie Schrauben größerer Durchmesser, wie sie für den konstruktiven Einsatz im Holzbau entwickelt wurden bzw. als solche im Einsatz sind, dargelegt. Allgemein gilt, dass es nur wenige Arten rohrförmiger Verbindungsmittel im Holzbau gibt. Neben einer Zulassung für einen Hirnholz- bzw. Stützenfußanschluss mit Innen- und Außengewinde als geschraubte Verbindungslösung (Z-9.1-264 2016) sind noch die Entwicklungen betreffend eingeklebter, dünnwandiger Metallhülsen zu nennen; siehe u.a. (TiComTech HSK 2010). Da es sich bei der anvisierten Entwicklung eines Rohrverbinders um eine Schraublösung mit größerem Durchmesser handelt, wird auch die sogenannte RAMPA-Muffe (ETA-12/0481 2013) in die Recherche miteinbezogen. Diese drei genannten Entwicklungen werden in den Abschnitten 3-1 - 3-2 kurz vorgestellt und diskutiert.

3-1 SCHRAUBMUFFE ALS HIRNHOLZ- BZW. STÜTZENFUßANSCHLUSS

Der Merk-Gewindeanschluss ist laut Z-9.1-264 2016 sowohl als Hirnholz-Verbindungsmittel als auch als Stützenfußanschluss (siehe Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2) konzipiert. Die Anschlusslösung kann für Nadelhölzer, im Speziellen für Vollholz (mindestens Festigkeitsklasse C24 nach (ON EN 14081-3 2012)), Brettschichtholz (mit einer Festigkeit der Lamellen von mindestens T14 nach ON EN 14080 2013 und Furnierschichtholz nach (ON EN 14374 2005) gefertigt werden. Der Verbinder besteht aus Stahl der Festigkeitsklasse S 235.

Der für die faserparallele Einbringung definierte Verbinder mit einem Außen- bzw. Nenndurchmesser von 50 mm und einer Gewindewandstärke (Nettowandstärke abzüglich der Gewindetiefen innen und außen) von rd. 3,5 mm hat eine Innen- und Außengewindetiefe von rd. 2,25mm. Die Einschraubtiefe beträgt maximal 100 mm, wobei eine Mindest-Einschraubtiefe von 70 mm einzuhalten ist (siehe Tabelle 3-1). Der Verbinder wird mit einer Länge von 210 bis 610 mm gefertigt, wobei die Gewindelänge innen sowie außen maximal 110 mm beträgt. Die vollständige Gewindegeometrie ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-1: Tragfähigkeit MGA gemäß (Z-9.1-264 2016)

Charakteristische Tragfähigkeitswerte bei einer Beanspruchung		
In Achsrichtung der Merk-Gewindeanschlüsse		Rechtwinklig zur Achse der Merk-Gewindeanschlüsse
Zug $R_{t,k}$ in N	Druck $R_{c,k}$ in N	$R_{la,k}$ in N
$300 \times l$	$450 \times l$	18500
$l =$ Einschraubtiefe in mm ($70 \text{ mm} \leq l \leq 100 \text{ mm}$)		

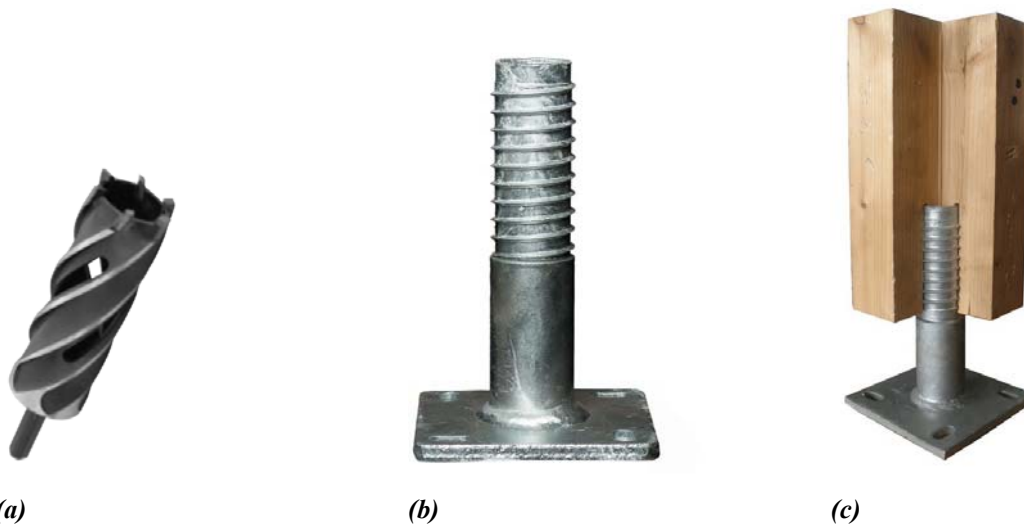


Abbildung 3-1 (a) Bohrkrone (Merk Timber GmbH 2017),
 (b) MGA Typ (Merk Timber GmbH 2017)A,
 (c) MGA Stützenfuß (Merk Timber GmbH 2017)

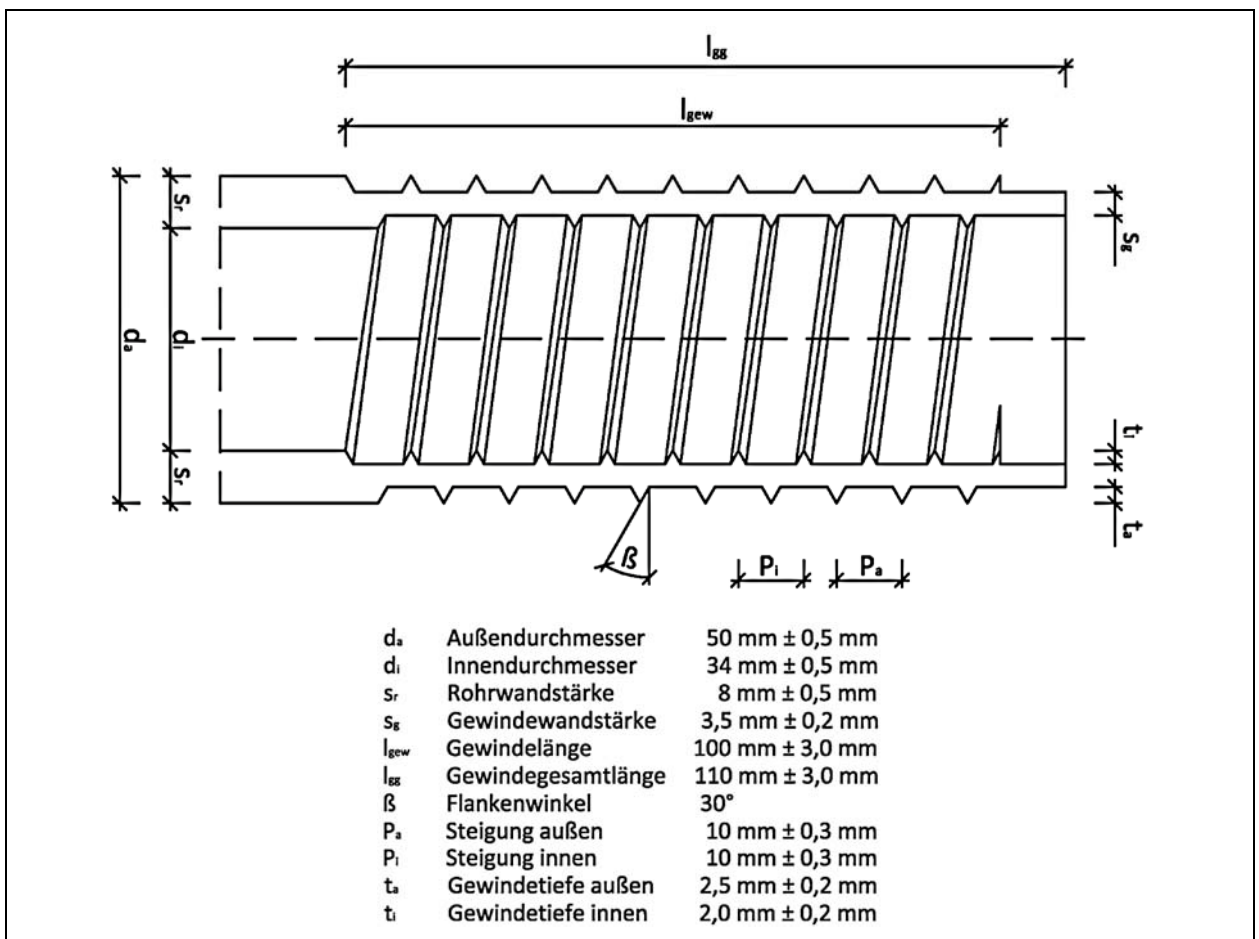


Abbildung 3-2: Gewindegeometrie MGA Stützenfuß (Z-9.1-264 2016)

Die maximale charakteristische Zugtragfähigkeit ergibt sich nach Tabelle 3-1 mit $R_{t,k} = 300 \cdot l$ zu maximal 30 kN. Beim Einbau muss mit einem speziellen Bohrer mit den Durchmessern 47/34 mm (siehe Abbildung 3-1) zuerst stirnseitig eine 5,5 cm breite Ringnut erstellt werden. Bei der Applikation ergibt sich ein innerer Gewindeeinschnitt von 1 mm und ein äußerer von 1,5 mm. Beim Einbau selbst ist auf eine zentrische Applikation zu achten (Z-9.1-264 2016).

Bei der Bemessung des Stützenfußanschlusses wird in der Zulassung (Z-9.1-264 2016) auf Eurocode 5 und den deutschen Nationalen Anhang des Eurocode 5 verwiesen (ON EN 1995-1-1 2015 und (DIN EN 1995-1-1/NA 2013)), wobei im EC 5 axial belastete Schrauben nur bis zu einem Last-Faser-Winkel von $\alpha \geq 30^\circ$ zugelassen sind. Trotz dieser Einschränkung wurde, um abzuschätzen, welchen Anteil das Innen- und Außengewinde auf die Gesamtausziehtragfähigkeit hat, die Ausziehungskraft des Außen- und Innengewindes laut (ON EN 1995-1-1 2015) berechnet und mit den Werten der Zulassung (Z-9.1-264 2016, Tabelle 3-1) verglichen (siehe Tabelle 3-2). Um einen weiteren Vergleichswert zu erhalten, wurde auf die, für 0° zur Faser freigegebene, Zulassung der Holzschraube Würth ASSY PLUS VG laut Abschnitt 2-3.3.3 zurückgegriffen (ETA-11/0190 2013). Hierbei muss angemerkt werden, dass sowohl der Eurocode 5 als auch die auf Europäische Anwendungsdokumente basierenden ETA-Dokumente Obergrenzen beim Durchmesser aufweisen und die nachfolgenden Annahmen diese weit überschreiten.

Folgende Annahmen wurden dabei getroffen:

d	= 50	Außendurchmesser MGA-Rohrverbinder [mm]
$\rho_{12,k}$	= 385	charakteristische Rohdichte [kg/m ³]
l_{ef}	= 100	effektive Gewindelänge [mm]
n_{ef}	= 1	effektive Verbindungsmittellanzahl [-]

Für ETA-11/0190 2013:

k_{ax}	= 0,3	Faktor, der den Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung berücksichtigt [-]
$f_{ax,k}$	= 10,0	charakteristischer Ausziehparameter bei einer charakteristischen Rohdichte von 350 kg/m ³ [N/mm ²]

Tabelle 3-2: *Vergleich der charakteristischen Ausziehtragfähigkeiten, Merk-Gewindeanschluss (Z-9.1-264 2016) verglichen mit dem EC 5 (ON EN 1995-1-1 2015) und der Schraube Würth ASSY Plus VG (ETA-11/0190 2013)[kN]*

Quelle	$F_{ax,k}$ [kN] bei $d = d_a = 50$ mm	$F_{ax,k}$ [kN] bei $d = d_i = 34$ mm	Σ ¹⁾ [kN]
ON EN 1995-1-1 2015	22,6 ²⁾	18,7 ²⁾	41,3
ETA-11/0190 2013	16,2	11,0	27,2
Z-9.1-264 2016	Zug	–	30,0
	Druck	–	45,0
Holzstütze Fichte C 24 160 × 160 mm	Zug	–	370,0
	Druck	–	537,6 ³⁾

1) Die Summe aus beiden Durchmessern gilt nur unter der Annahme, dass sowohl Außen- als auch Innengewinde ihre volle Leistungsfähigkeit erreichen.

2) Hier ist zu beachten, dass das Berechnungsmodell des Eurocode 5 normalerweise nur Einschraubwinkel ab mind. 30 ° zur Faser erlaubt.

3) $f_{c,90,k} = 21,0$ N/mm² nach (ON EN 338_2016 2016) (ETA-11/0190 2013)

Fazit zum Merk-Gewindeanschluss

Trotz der großen Durchmesser kommen die Würth-Zulassung (ETA-11/0190 2013) und der EC 5 (ON EN 1995-1-1 2015) in die Nähe der Ausziehfestigkeiten des MGA-Verbinders. Im Vergleich zur Brutto-Tragfähigkeit einer herkömmlichen Holzstütze aus Fichte sind die Ausziehtragfähigkeiten noch immer weitaus niedriger.

3-2 EINGEKLEBTE ROHRMUFFEN

Neben eingeklebten Gewindestangen und Blechen gibt es auch Entwicklungen betreffend eingeklebter, rohrförmiger Verbindungsmittel siehe Abbildung 3-3. Angaben zu Prüfungen an einzelnen eingeklebten Rohrverbindern sowie auch an Verbindergruppen sind u.a. aus Bathon 2008 zu entnehmen.



(a)

(b)

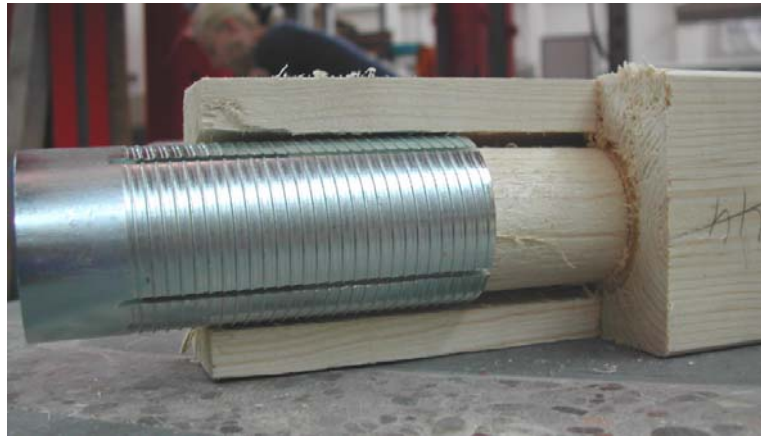
Abbildung 3-3: (a) Blockscheren einer Verbindungsmittelgruppe bei einer Last von 450 kN,
 (b) Prüfkörper
 (Schwaner et al. 2009)

Die Geometriefindung, Oberflächenbeschaffenheit, Randabstände und Anordnung der Verbinder sind Themengebiete, welche auch in der Entwicklung des Rohrverbinders dieser Arbeit von Bedeutung sind. Durch die Rohrform kann eine weitaus größere Oberfläche für eine Klebeverbindung im Vergleich zu eingeklebten Gewindestangen aktiviert werden, ohne dabei erhöhte Verluste des Holzquerschnittes hinnehmen zu müssen (Schwaner et al. 2009).

Der HSK-Rohrverbinder, wie er in der Forschungsgruppe um Bathon bezeichnet wird (siehe Abbildung 3-3), ist ein Ergebnis der Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet der eingeklebten Rohrmuffen. Das beidseitige, 100 mm lange Gewinde wird aus einem 3 mm dicken Stahlrohr (S 235 oder S 355) herausgefräst. Die Einklebelänge beträgt 100 mm und der Nenndurchmesser 50 mm. Die Ringnut wird mit einer Breite von 5 mm vorgebohrt. Die Oberfläche der Muffe kann anstatt des Gewindes auch mit Rillen oder Löchern gefertigt werden siehe Abbildung 3-4 (a). Um beim Einfüllen des Klebstoffes Luftblasen zu vermeiden, verfügt der Verbinder über längsseitige Schlitze siehe Abbildung 3-4 (b). (TiComTech HSK 2010).



(a)



(b)



(c)

Abbildung 3-4: (a) HSK Rohrverbinder (TiComTech HSK 2010)
(b) HSK Rohrverbindung, längs aufgeschnitten (TiComTech HSK 2010)
(c) Anwendungsbeispiel HSK Rohrverbinder (TiComTech HSK 2010)

Die größten Muffentypen BL und SKL weisen laut Tabelle 3-3 folgende Abmessungen auf:

Tabelle 3-3: Eigenschaften Rampa Muffen BL und SKL

Muffentyp M16	Gesamtlänge [mm]	Nenn Durchmesser [mm]	Antrieb
BL	100	25	metrisches Gewinde
SKL	100	25	Sechskant / metrisches Gewinde

Das Verhältnis Kern- zu Außendurchmesser d_1/d , liegt zwischen 0,75 und 0,86, steigt mit dem Durchmesser und ist somit deutlich höher als bei üblichen Holzschrauben. In Folge ergeben sich eine projizierte Gewindetiefe s des Gewindes von 1,5 – 2,5 mm und eine Ganghöhe p von 3-5 mm, beide Abmessungen steigen mit dem Durchmesser. Die Muffe wird vorgebohrt eingebracht. Der Bohrlochdurchmesser ist mit $d_1 + 1$ mm einzuhalten; d.h., beim größten Muffentyp M 16 mit einem Außendurchmesser $d = 25$ mm und einem Kerndurchmesser $d_1 = 20$ mm beträgt der Bohrlochdurchmesser somit max. 21 mm (ETA-12/0481 2013).

Pöll (2017) hat in seiner Arbeit die Bandbreiten verschiedener Geometrieparameter (siehe Abbildung 3-6) für Holzschrauben europäischer Zulassungen zusammengetragen. Tabelle 3-4 listet die Kennwerte im Vergleich zu den Rampa-Muffentypen BL und SKL auf.

Tabelle 3-4: Vergleich Geometrieparameter Rampa-Muffen BL und SKL mit Holzschrauben

	d_1/d [-]	p [mm]	s/p ¹⁾ [-]	Flanken- neigung φ [°]
ETAs für Holzschrauben mit $d = 5-12$ mm²⁾	0,57 - 0,75	1,98 - 8,25	0,17 - 0,48	35-40
Rampa BL mit $d = 10-25$ mm³⁾	0,75 – 0,80	3 - 5	0,41 – 0,50	50
Rampa SKL mit $d = 12-25$ mm³⁾	0,75 – 0,86	4 - 5	0,38 – 0,35	30

1) Projizierte Gewindetiefe s (Pöll 2017)

2) Pöll 2017

3) ETA-12/0481 2013

Fazit zu Rampa Muffen

Für die Ausziehtragfähigkeit in Achsrichtung wird in der Zulassung (ETA-12/0481 2013) auf den EC 5 verwiesen (ON EN 1995-1-1 2015). Der gegenüber Holzschrauben weitaus größere Nenn Durchmesser ist einem geschraubten Rohrdurchmesser ähnlich, trotzdem ist die Rampa-Muffe in ihren Abmessungen zu klein, um sie mit gedachtem Rohrverbinder vergleichen zu können. Die geschraubte Lösung sowie das metrische Gewinde bilden jedoch gute Ansätze für die weitere Entwicklung.

3-4 FAZIT

Wie in Abschnitt 3-1 und 3-2 erläutert, ist die annähernd doppelt so große Verankerungsfläche im Vergleich zu herkömmlichen, geschraubten oder geklebten Verbindern ein Vorteil, der in der Praxis schon einige Beispiele hervorgebracht hat. Das Potential einer Optimierung, zum Beispiel durch eine verbesserte Gewindegeometrie oder einer höheren effektiven Gewindelänge, ist jedoch durchaus gegeben.

Die Kombination eines Holzgewindes mit einem metrischen Gewinde wie bei der Rampa-Muffe (Abschnitt 0) sowie der eingeklebten Rohrmuffe (Abschnitt 3-2) ist eine einfache Lösung hin zur Umsetzung eines Anschlusspunktes für Montagestoßlösungen. Das Ziel sollte es sein, ein definiertes duktilen Verhalten im Montagestoß einer Verbindung zu realisieren, um neben der hohen Leistungsfähigkeit und hohen Steifigkeit, welche mit geschraubten oder geklebten Lösungen im Holzbau erzielt werden können, auch die dritte allgemeine Anforderungen an Verbindungen zu erfüllen.

Die querkraftfreie Applikation einer geklebten Verbindung, in dem Sinne, dass während des Einbringens des Verbindungsmittels dadurch keine Spalt- bzw. Querkräfte im Stoßbereich initiiert werden, im Vergleich zur geschraubten Rohrmuffe sowie die verbesserte Tragfähigkeit bei Beanspruchung auf Herausziehen von geklebten Lösungen aufgrund einer gewissen Verbundwirkung zwischen Holz-Klebstoff und Verbinder-Klebstoff sind als Vorteile geklebter Lösungen gegenüber geschraubten Lösungen zu nennen. Weiters ist der starre Verbund einer geklebten Verbindung und die damit verbundene hohe Steifigkeit geklebter Anschlüsse gegenüber geschraubten Lösungen zu nennen. Als Vorteile geschraubter Lösungen gelten die relativ einfache Montage, auch unabhängig klimatischer Bedingungen, die sofortige Belastbarkeit und eine prinzipielle Möglichkeit des einfacheren Rückbaus bzw. stofflicher Trennung. Der Klebstoff bzw. die Verklebung als neben dem Holz und dem Metallverbinder dritten Komponente in geklebten Anschlusslösungen birgt auch das Potential zusätzlicher Variabilität und Unsicherheit in den Tragfähigkeiten und somit eine geringere Nutzung des mittleren Potentials in der Bemessung in sich.

Im weiteren (Kapitel 4:) liegt der Fokus auf geschraubten Anschlusslösungen. Zur Entwicklung eines möglichen Rohrverbinders gilt es Eingangs, das Anforderungsprofil zu benennen und entsprechende Geometrie- und Ausführungsparameter zu festzulegen, welche unter Beachtung der Beanspruchungszustände Applikation und Herausziehen zu definieren sind.

KAPITEL 4: ENTWICKLUNG EINES ROHRVERBINDERS ALS GESCHRAUBTE LÖSUNG

Kapitel 4 stellt die Entwicklung eines geschraubten Rohrverbinders Schritt für Schritt dar. In Abschnitt 4-1 ist eine Auflistung der grundsätzlichen Anforderungen und Annahmen dargestellt. Resultierend daraus sind die Querschnitte der beiden Anschlusselemente Holz und Verbinder definiert (Abschnitt 4-2). Die beiden Beanspruchungsarten, Applikation und Herausziehen des Rohrverbinders, sind anschließend in den Abschnitten 4-3 und 4-5 erklärt. Die während der Erstellung eines generischen Optimierungstools benötigten Versuche zur Ermittlung der Eindrehwiderstände und Ausziehtragfähigkeiten von Schraubverbindern mit den Durchmessern $d = 44$ und 72 sind chronologisch in den o. a. Abschnitten ebenso eingebaut (Abschnitte 4-3 und 4-5). Abschließend ist in Abschnitt 4-6 die vollständige Berechnung sowie ein Werkplan eines Rohrverbinders auf Basis des Anforderungsprofils abgebildet.

4-1 ANFORDERUNGSPROFIL UND PRINZIPIELLE ANNAHMEN

Basierend auf den bisherigen Kapiteln kann ein Anforderungsprofil für den Entwurf eines Rohrverbinders nach Abbildung 4-1 erstellt werden. Als Einsatzzweck sind vorwiegend, auf Normalkraft belastete, Stäbe (Zug aber auch Druck) angedacht, sowie es in Abschnitt 2-2 schon näher erläutert wurde. Der definierte Referenzquerschnitt $A_{ref} = 80 \times 80 \text{ mm}^2$ laut Gl. (2.1) wird als Stabquerschnitt angenommen und erfordert eine hohe Kompaktheit hinsichtlich des Rohrverbinder-Querschnittes. Damit die hohe Leistungsfähigkeit von Hartlaubholz effizient ausgenutzt wird, der Ausnutzungsgrad der Brutto-Tragfähigkeit $\eta_{BruttoQS}$ somit hoch ist, muss die Querschnittsschwächung durch die Verbindung gering gehalten werden (hoher Ausnutzungsgrad des Holzquerschnittes η_{HolzQS}). Die Rohrform führt, mit Innen- und Außengewinde ausgestattet, zu einer hohen Tragfähigkeit sowie Steifigkeit der Verbindung, erhöht dadurch den Ausnutzungsgrad der Netto-Tragfähigkeit $\eta_{NettoQS}$ und soll zu einer kompakten Verbindungslänge l_V führen. Ein Montagestoß eignet sich hervorragend dazu die primären Anforderungen an eine Verbindung in die Bereiche Holz-Stahl-Anschluss (hohe Tragfähigkeit, hohe Steifigkeit) und Stahl-Stahl-Anschluss im Montagestoß (hohe Duktilität) aufzuteilen. Der, zur Applikation des Verbinders, benötigte Außenangriff soll, in Anlehnung an die Rampa Muffe, als Außensechskantangriff ausgeführt werden, ein Ansetzstutzen ident der Wandstärke des Verbinders dient als Zentriertool während der Applikation. Die, bei Rampa Muffen eingesetzte, Kombination von Holzgewinde und metrischem Gewinde soll auch dem geplanten Rohrverbinder als vereinfachte Anschlussmöglichkeit hinsichtlich eines Montagestoßes dienen.

Überblicksweise können folgende Anforderungen zusammengefasst werden:

- Einsatz als Zugstab (eventuell auch Druck) mit Belastung parallel zur Faser
- Eingesetzter Stabquerschnitt laut Referenzquerschnitt $A_{ref} = 80 \times 80 \text{ mm}^2$
- Kompakter Verbinder mit minimaler Wandstärke \rightarrow hochfester Stahl und kurzer Verbindungslänge $l_v = 200 \text{ mm}$
- Hoher Wirkungsgrad bezogen auf die Brutto- wie Netto-Querschnittstragfähigkeit; d.h. zum einen möglichst geringe Querschnitts-Schwächung, zum anderen hohe Anschlussleistung
- Beidseitiges Gewinde für eine hohe Steifigkeit sowie Tragfähigkeit
- Applikation durch Einschrauben in vorgebohrte Ringnut, Ansatzstutzen dient als Zentriertool
- Applikation über Außenangriff Sechskant, metrisches Gewinde für einen zentrischen Anschluss von Montagelösungen

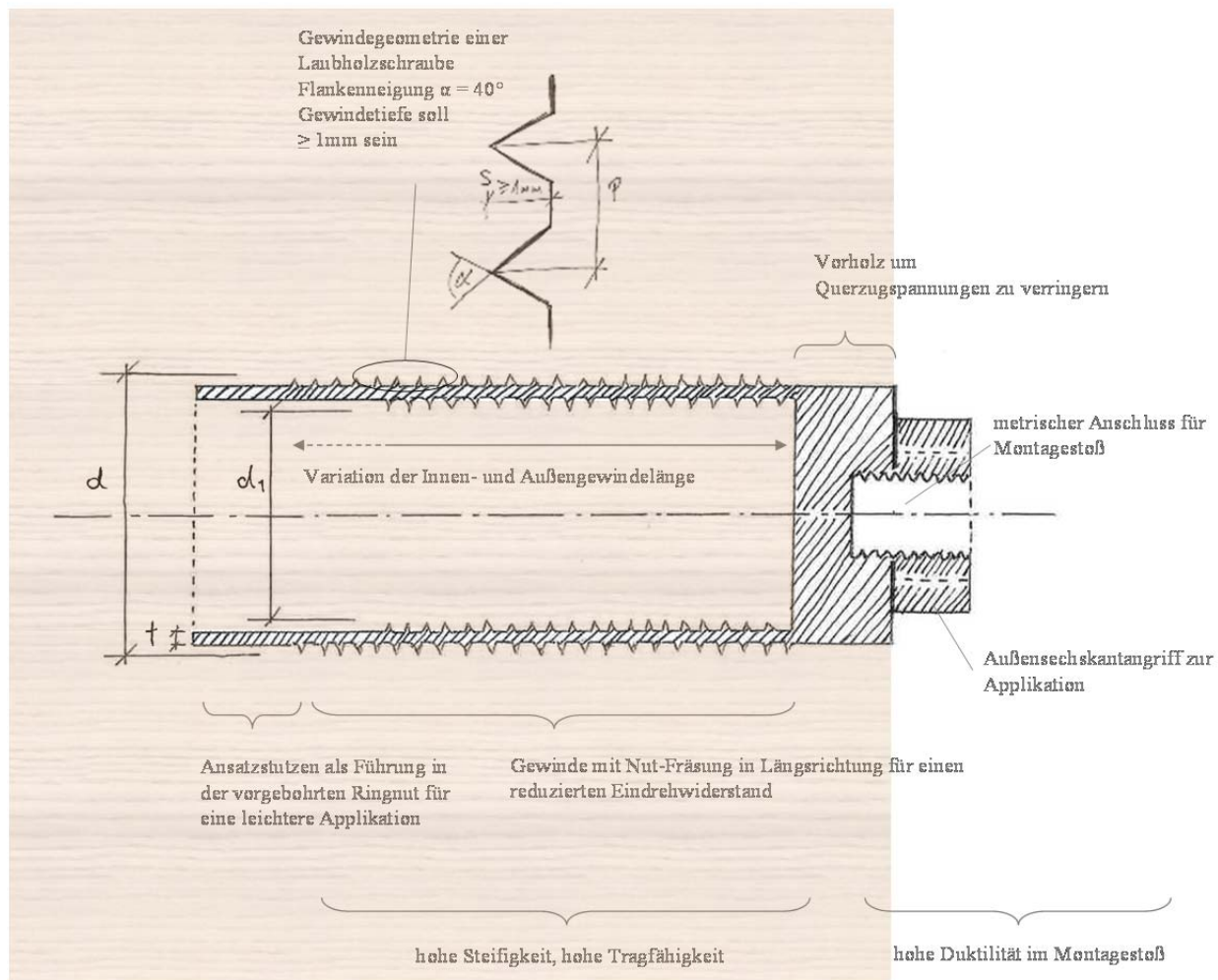


Abbildung 4-1: Geometrische und konstruktive Überlegungen zu den verschiedenen Bestandteilen eines geschraubten Rohrverbinders

Tabelle 4-1: Wichtige Geometriekennwerte, welche für die Entwicklung eines Rohrverbinders berücksichtigt werden müssen

Variable	Beschreibung	Einheit
$l_{ef,a}$	effektive Länge des Außengewindes	[mm]
$l_{ef,i}$	effektive Länge des Innengewindes	[mm]
d	Nenndurchmesser	[mm]
d_1	Innendurchmesser	[mm]
t	Stärke der Rohrwand	[mm]
s	Gewindetiefe	[mm]
p	Gewindesteigung	[mm]
α	Flankenneigung	[°]

Die Bezeichnungen der wichtigsten geometrischen Kennwerte sowie der Kennwerte der Gewindegeometrie sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Die Gewindegeometrie wurde in Anlehnung an Arbeiten zur Geometrieoptimierung von Hartlaubholzschrauben (Pöll 2017) gewählt.

4-2 DEFINITION DER QUERSCHNITTSFLÄCHEN

Zur Erklärung wird in Abschnitt 4-2.1 und 4-2.2 die Ermittlung der benötigten Querschnitte, sowohl für das Holz als auch den Verbinder, dargestellt.

4-2.1 HOLZ

Der Bruttoquerschnitt $A_{Holz,Brutto}$ wurde gemäß der in Abschnitt 2-3.1 angeführten Gleichung (2.1) angenommen mit:

$$A_{ref} = A_{Holz,Brutto} = b \times h = 80 \times 80 = 6400 \text{ mm}^2$$

Der Nettoquerschnitt des Holzes $A_{Holz,Netto}$ nach Gl. (4.1) wird durch Abzug des Rohrverbinder-Querschnittes von $A_{Holz,Brutto}$ berechnet.

$$A_{Holz,Netto} = A_{Holz} - \frac{\pi}{4}(d^2 - d_1^2) \quad (4.1)$$

Es handelt sich dabei um die Bruttoquerschnittsfläche des Rohrverbinders, definiert als Fläche der Rohrverbinder-Wand $A_{Stahl,Netto}$ plus der beidseitigen Gewinde. Weil die Gewinde des Rohrverbinders die Holzfasern durchtrennen müssen die beanspruchten Flächen jeweils an der Stelle der ersten durchgehenden Fasern angenommen werden. Damit ergeben sich die Durchmesser für den Brutto-Rohrquerschnitt mit d gleich dem Nenndurchmesser und d_1 gleich dem Innendurchmesser (Abbildung 4-2).

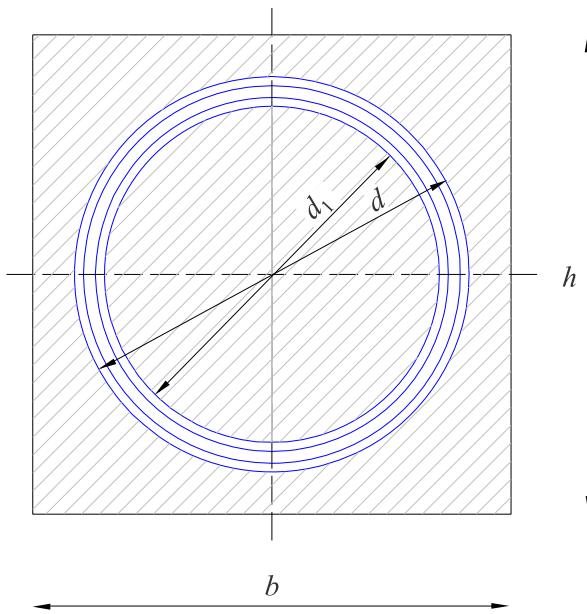


Abbildung 4-2: Holz-Nettoquerschnitt $A_{\text{Holz,Netto}}$ (schraffiert), Bruttoquerschnitt des Rohrverbinders $A_{\text{Stahl,Brutto}}$ definiert durch die beiden Durchmesser d und d_1

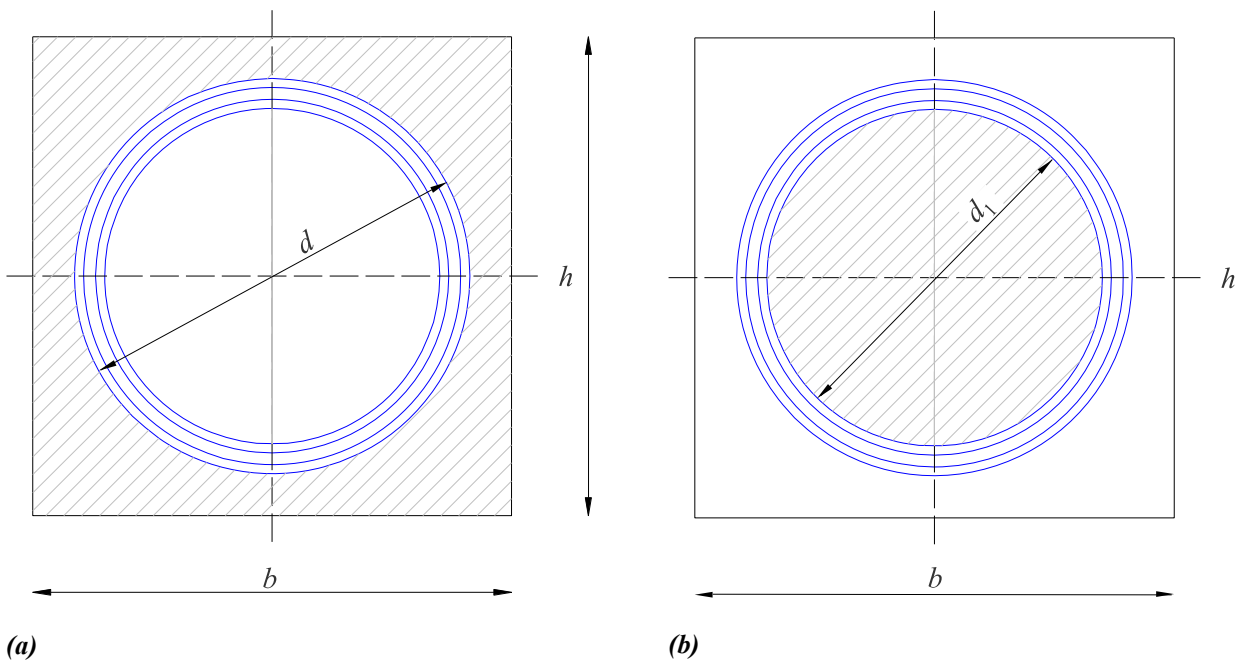


Abbildung 4-3: Definierte Holz-Querschnittsflächen schraffiert
 (a) Holz-Außenquerschnitt $A_{\text{Holz,a}}$
 (b) Zapfenquerschnitt $A_{\text{Holz,i}}$

Der Nettoquerschnitt des Holzes wurde in weiterer Folge in Holzzapfen- und Außenquerschnitt aufgeteilt (Abbildung 4-3). Bei der Ermittlung des Holz-Außenquerschnittes $A_{\text{Holz,a}}$ wurde nach Gl. (4.2) vereinfachend und wie auch bei Holzschrauben üblich der Querschnitt des Verbinders plus Gewinde abgezogen um ausschließlich die durchgehenden Holzfasern zu belasten (Abbildung 4-2).

$$A_{\text{Holz,a}} = A_{\text{Holz,Brutto}} - \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad (4.2)$$

Selbiger Vorgang wurde analog bei der Bestimmung des Holzzapfenquerschnittes durchgeführt. Der Querschnitt des Zapfens, definiert sich somit nach Gl. (4.3) über den Innkreisdurchmesser d_1 des Rohrverbinders.

$$A_{\text{Holz},i} = \frac{d_1^2 \cdot \pi}{4} \quad (4.3)$$

4-2.2 VERBINDER

Zur Berechnung der Torsionsspannung (Abschnitt 4-4.2) sowie der vorhandenen Zugspannung (Abschnitt 4-5.6) wird der Rohrquerschnitt des Verbinders benötigt. Durch die beiden Holzgewinde ist die exakte Berechnung der Querschnittsfläche, bei Schrauben als Spannungsquerschnitt nach Abbildung 4-4 (a) definiert (Unterweger 2010), von erhöhtem Rechenaufwand. Für eine praxisnahe Anwendung wurde vereinfachend der Querschnitt der Rohrwand gemäß Gl. (4.4) angenommen, die Gewinde wurden nicht berücksichtigt (siehe Abbildung 4-4 (b)).

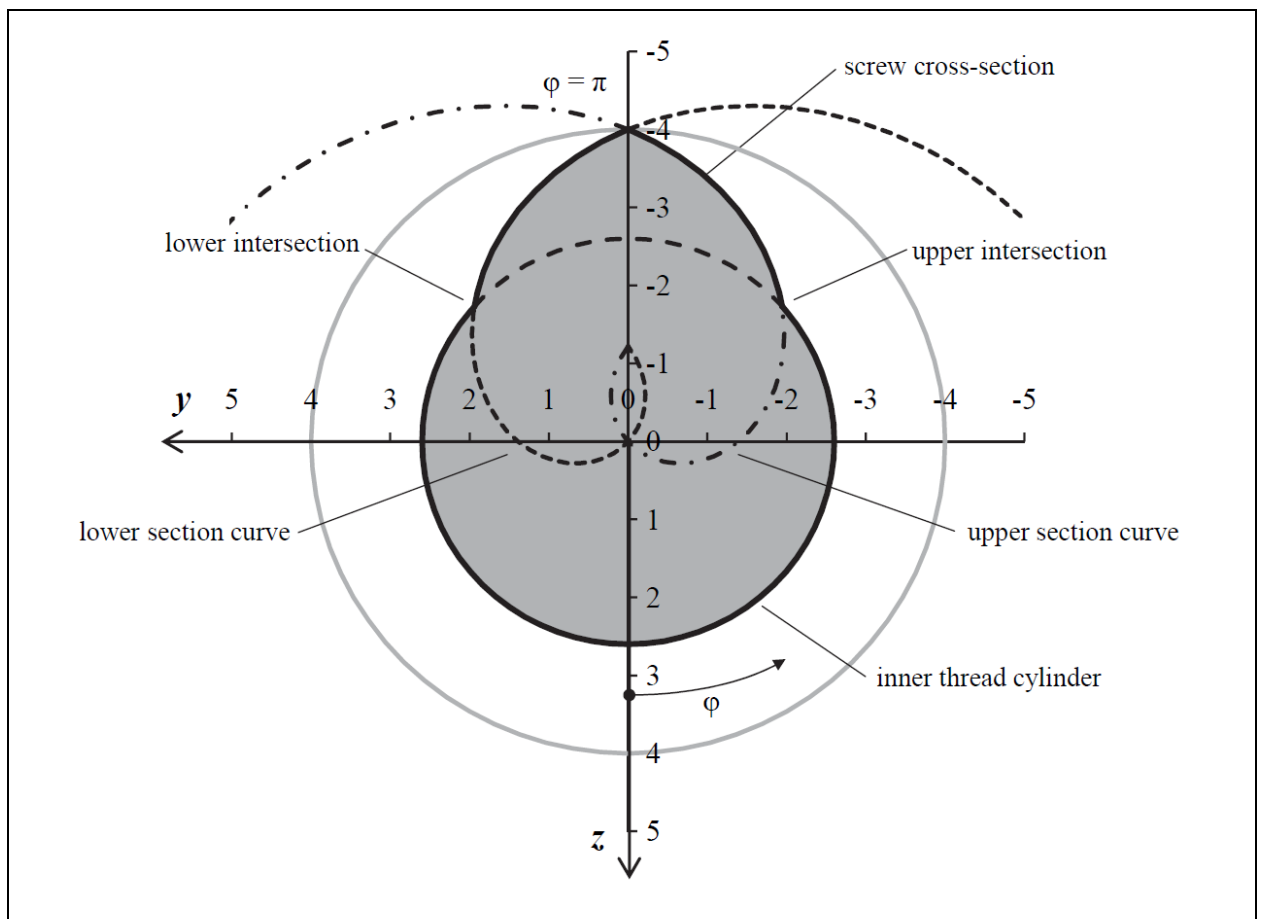


Abbildung 4-4: (a) Querschnittsform des Gewindeteiles einer Holzschraube bei $x = p/2$ (Ringhofer 2017)
 (b) schraffiert der verwendete Verbinderquerschnitt nach Gl. (4.4)

Nettoquerschnitt bzw. Rohrwand des Verbinders

$$A_{\text{Stahl,Netto}} = \frac{\pi}{4} \cdot \left((d - 2s)^2 - (d_1 + 2s)^2 \right) \quad (4.4)$$

4-3 BEANSPRUCHUNGSSITUATION SCHEMA FÜR GENERISCHES OPTIMIERUNGSTOOL

4-3.1 ÜBERBLICK

Für die Entwicklung der Geometrie des Rohrverbinders sowie des umgebenden Materials Holz (vgl. Ringnutbreite in Abschnitt 3-1 und 3-2) ist eine umfassende Analyse der Beanspruchungssituationen von Nöten. Zusammenfassend sind in Abbildung 4-5 die Beziehungen untereinander sowie zwischen Einwirkungen und Versagensmechanismen mit zugehörigen Geometriedaten und Parametern dargestellt.

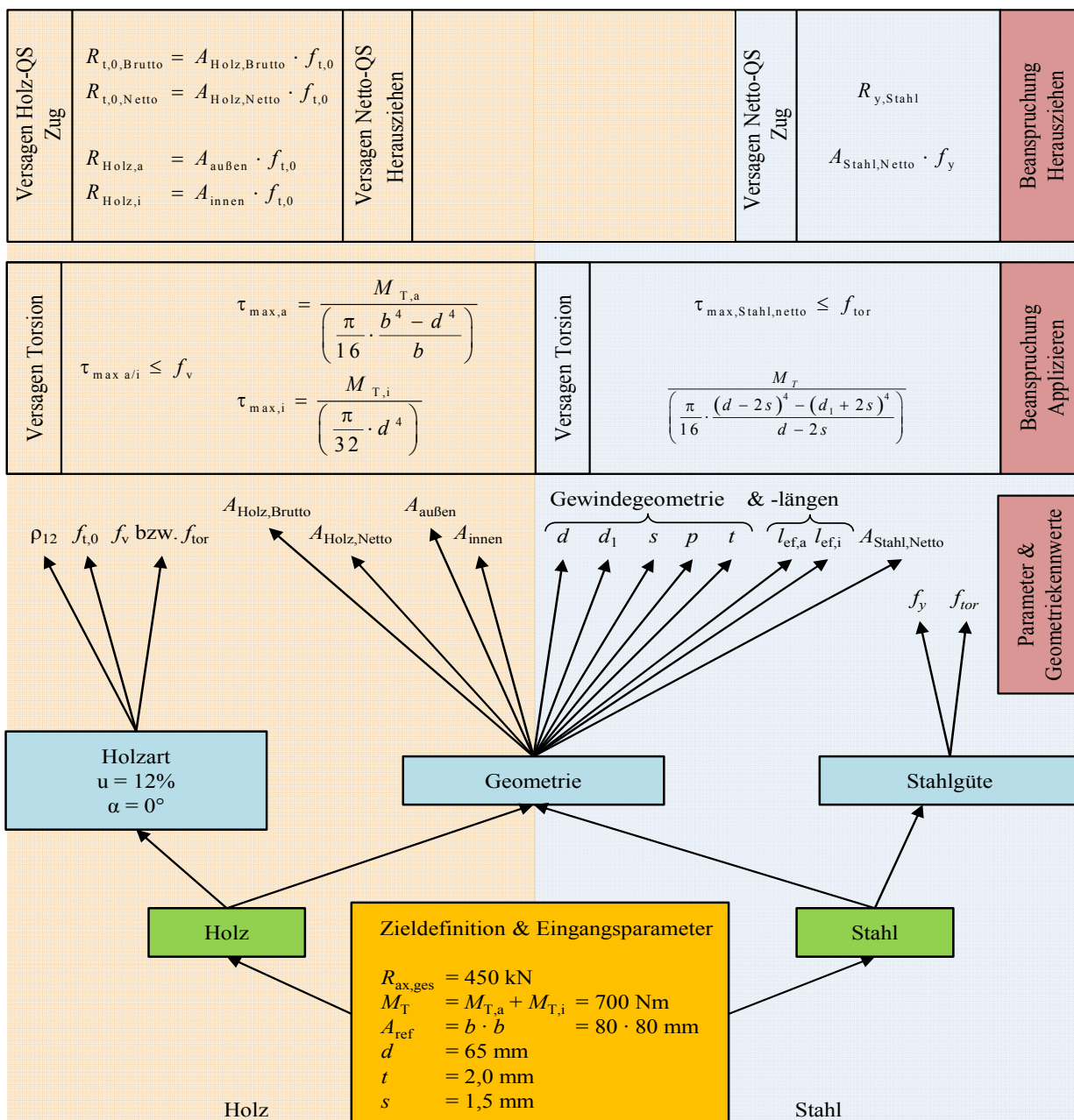


Abbildung 4-5: Auflistung von Einwirkungen / Versagensszenarien mit zugehörigen Materialien und Parametern und ihre Beziehungen zueinander (Rechenansätze auszugsweise)

4-3.2 EXKURS SYSTEMBETRACHTUNGEN

Dieser Abschnitt enthält eine kurze Einführung in die Modellbildung von Tragsystemen, im speziellen das für einen laut Abschnitt 4-1 definierten Rohrverbinder entscheidende Tragverhalten eines parallelen Systems.

4-3.2.1 Allgemeine Einführung

Man unterscheidet bei den Systemmodellen zwischen seriellen (in einer Reihe geschalteten) und parallelen Systemen. Abbildung 4-6 zeigt links das Grundprinzip eines seriellen Systems mit hintereinander verbunden wirkenden Federn. Bei Belastung in x-Richtung wirkt der gleiche Betrag der Kraft unabhängig von der Federkonstante k und Abmessung der jeweiligen Feder. Die Sprödbrechtheorie von Weibull (1939) steht für eine rein serielle Wirkung und ein ideal sprödes Versagen („weakest link“). In einem parallelen System (Abbildung 4-6) wird, bei Belastung in x-Richtung, die Kraft verhältnismäßig nach der jeweiligen Federkonstante k auf die, nebeneinander angeordneten Federn, aufgeteilt. Daniels (1945) Faserbündelmodell wirkt rein parallel, man spricht von Umlagerungspotential nach Teilversagen („global load sharing“ GLS). Die Arbeiten von Weibull (1939) und Daniels (1945) bilden die Extremwerte bei der Betrachtung der Lastverteilung nachdem ein Material versagt.

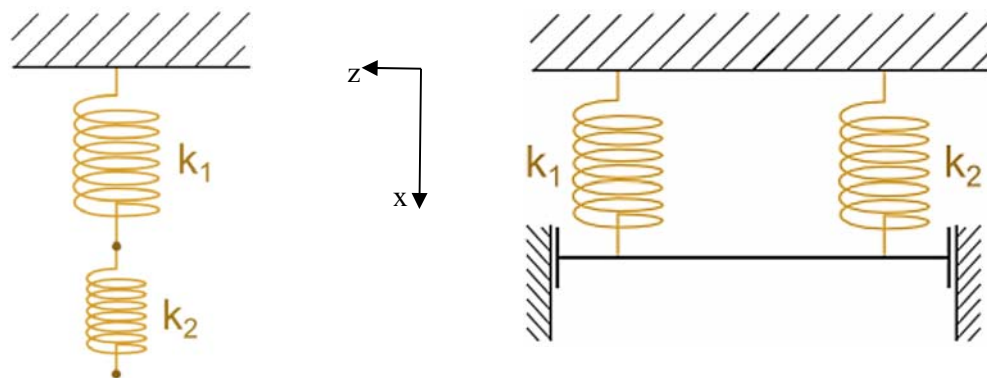


Abbildung 4-6: Prinzipielle Unterschiede zwischen einem seriellen (links) und einem parallelen System (rechts)

Das Federbeispiel steht sinnbildlich für die Steifigkeiten unterschiedlicher Materialien und / oder Geometrien.

Im Falle der Rohrverbindung kann man holzseitig von zweierlei parallelen Systemen ausgehen, zum einen im Belastungsfall der Applikation nach Abschnitt 4-4.1 und zum anderen bei der Belastung des Rohrverbinders auf Herausziehen nach Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** nehmen holzseitig der innere Holzzapfen und der Außenquerschnitt die Belastung auf.

Als Beispiel für ein serielles System wäre keilgezinktes Vollholz (KVH) zu nennen, ein paralleles System ergibt sich wiederum wenn ausschließlich der Keilzinkenstoß betrachtet wird, der Maßstab der Betrachtung ist somit bei der Definition einer Tragsystems von Bedeutung. Weitere Beispiele für parallele Systeme sind gestapelte Holzprodukte wie Brettschichtholz oder Furnierschichtholz.

4-3.2.2 Paralleles System

Im Gegensatz zu seriellen Systemen spielt das Materialverhalten (elastisch spröd, plastisch duktil) bei parallelen Systemen eine wesentliche Rolle. Die Kenntnis der Festigkeiten und Steifigkeiten einzelner Elemente des Systems zueinander ist notwendig. Holz ist ein heterogenes, anisotropes (richtungsabhängig, mit den drei Hauptrichtungen axial, radial und tangential) sowie vereinfacht orthotropes Material. Die Hauptbestandteile sind das Grundmaterial „clear wood“ sowie lokal auftretende Wuchsmerkmale (Äste) (Brandner 2017).

Für ein besseres Verständnis des Versagensverhaltens ist es, zusätzlich zum Materialverhalten von Bedeutung die unterschiedlichen Arten der Lastverteilung genauer zu betrachten. Anders als bei weggesteuerten Prüfmaschinen sind statische Belastungen vorwiegend kraftgesteuert. Eine beispielsweise Zusatzbelastung durch Schnee wird bei einem Teilversagen nicht abnehmen sondern impulsartig an den Nachbar weitergeleitet. Diese dynamische Lastverteilung wird als ELLS („extreme local load sharing“) bezeichnet.

Zur Veranschaulichung ist das Tragverhalten eines parallelen Systems am Beispiel der gleichzeitigen Wirkung von Außen- und Innengewinde auf Herausziehen in Abbildung 4-7 dargestellt. Anhand eines linear-elastischen, ideal-spröden Modelles wird das Lastverteilungsverhalten von Beginn der Belastung bis zum Gesamtversagen abgebildet. Abschließend erfolgt der Vergleich mit dem realem Bruchverhalten (Abbildung 4-7 unten).

Das Modell eines linear-elastischen, ideal-spröden Bruchverhaltens (Abbildung 4-7 oben) ist eine stark vereinfachte sowie konservative Annahme. Die linearen Kraft-Verschiebungs Geraden der beiden Querschnittsteile sind strichliert bzw. strichpunktliert aufgetragen. Die ungleichen Steigungen der Geraden resultieren aus den Unterschieden in den Verbundsteifigkeit $K_{ser,1}$ und $K_{ser,2}$. Zusammenwirkend ergibt die Verbindung eine höhere Verbundsteifigkeit $K_{ser,ges}$. Die Verbundsteifigkeiten können wie in Abschnitt 4-3.2.1 dargelegt, als parallel wirkende Federkonstanten gesehen werden.

Nach linear-elastischem Verlauf beider Elemente versagt der erste Querschnittsteil bei Punkt 1, das parallele System hat seine Grenze erreicht und ein ideal-sprödes Verhalten würde dazu führen, dass die Maximaltragfähigkeit der Verbindung erreicht ist (Abbildung 4-7, oben). Abhängig von der Variabilität der Kenngrößen sowie dem Materialverhalten und der Art der Lastaufbringung hat das reale Bruchverhalten zu diesem Zeitpunkt noch Potential auf Steigerung der Tragfähigkeit (Abbildung 4-7, unten). Ab Punkt 2 bis Punkt 3 weist die Verbindung dieselbe Steifigkeit und Tragfähigkeit wie das noch intakte Querschnittselement auf.

Das Modell soll zeigen, dass, kurz vor Erreichen von Punkt 1, der erste Querschnittsteil an seiner Grenze angelangt ist. Ein paralleles System hat dann seine Berechtigung, wenn auch der zweite Querschnittsteil optimal ausgenutzt wird und beide Teile zusammen eine mindestens 20% höhere Tragfähigkeit, als die maximale Tragfähigkeit aus beiden Teilen nach Gl (4.44), erreichen.

Zur Erstellung eines Berechnungsmodelles wurde vereinfachend von ersterem Modell ausgegangen. Hier soll nur aufgezeigt werden, dass die Annahmen auf einem sehr konservativen Konzept beruhen und eine höhere Tragfähigkeit durchaus möglich ist.

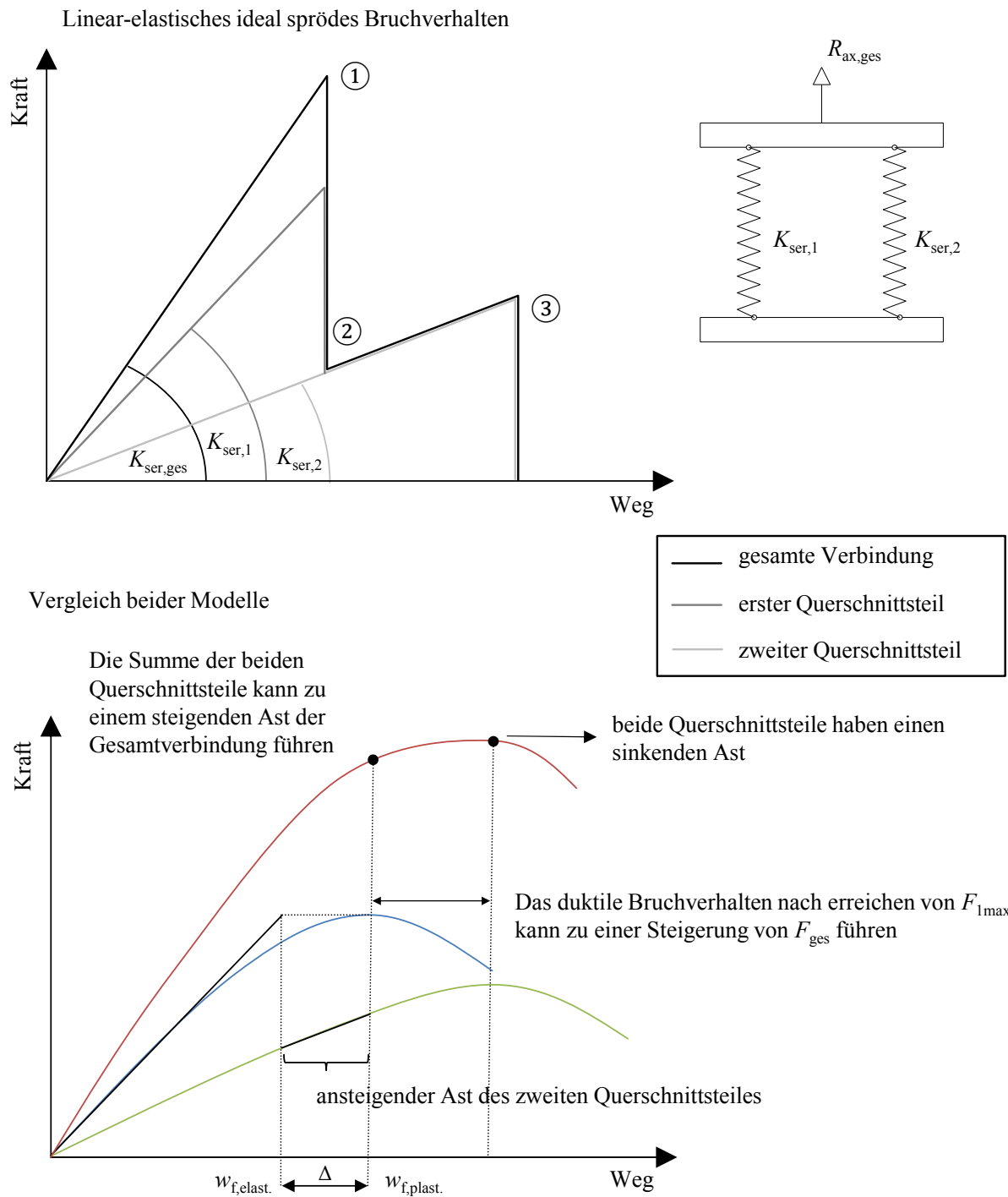


Abbildung 4-7: Vergleich des vereinfachten parallel wirkenden Modells eines Rohrverbinders (oben) mit dem realen Tragverhalten (unten)

4-4 BEANSPRUCHUNG EINDREHEN (APPLIKATION)

4-4.1 HOLZVERSAGEN AUF TORSION

Durch das Eindrehen des Rohrverbinders wird auf der Einwirkungsseite ein Torsionsmoment M_T in den Holzquerschnitt eingebracht. Auf der Widerstandsseite hält ein parallel wirkendes System, bestehend aus innenliegendem Holzapfen und Holz-Außenquerschnitt, dagegen. Das Verhältnis dieser anteilmäßigen Momenten-Aufteilung hängt einerseits ab von der Torsionssteifigkeit der beiden Holzquerschnitte und andererseits von der Länge des jeweiligen Gewindes, über welches das Torsionsmoment in das Holz eingebracht wird siehe Abschnitt 4-4.1.1. Die im Abschnitt 4-4.1.2 behandelte Berechnung der Torsionsspannungen des Holz-Außenquerschnittes basiert auf vereinfachenden Annahmen der Querschnittsgeometrie nach Abbildung 4-14 (c).

4-4.1.1 Torsionsmodell zur Aufteilung des einwirkenden Momentes

Belastungs-Verdrehungs Relation & Verdrehwinkel

Um die Formel zur Bestimmung des Verdrehwinkels ϕ herleiten zu können wird angenommen, dass der Querschnitt kreisförmig ist und ein linear-elastisches Verhalten aufweist wenn ein Torsionsmoment wirkt.

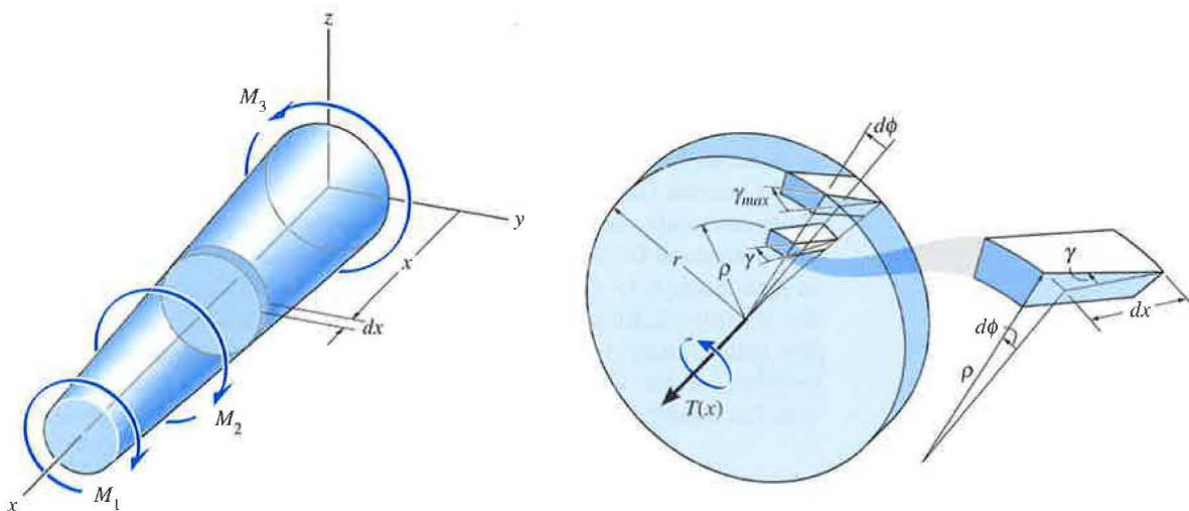


Abbildung 4-8: Belastungs-Verdrehungsrelation an einer Welle (Hibbeler und Wauer 2010- S.237)

Abbildung 4-8 zeigt einen infinitesimal kleinen Ausschnitt einer Welle mit der Länge dx , wobei die Endquerschnitte relativ zueinander um $d\phi$ verdreht sind. Ein Element an einem beliebigen Radius ρ erfährt demnach die Gleitung γ . Daraus ergibt sich folgende Beziehung nach Gl. (4.5):

$$d\Phi = \gamma \cdot \frac{dx}{\rho} \quad (4.5)$$

mit

$d\phi$ Relativverdrehung der beiden Endquerschnitte

γ Relativverschiebung der beiden Endquerschnitte eines infinitesimal kleinen Ausschnittes

dx Länge eines infinitesimal kleinen Ausschnittes

ρ beliebiger Radius eines betrachteten Elementes

Unter Voraussetzung des Hook'schen Gesetzes nach Gl. (4.6):

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (4.6)$$

mit

τ Schubspannung [N/mm²]

G_0 Schubmodul parallel zur Faser [N/mm²]

und der Schubspannung aufgrund von Torsion, welche für Kreisquerschnitte nach Gl. (4.7) als

$$\tau = \frac{T(x) \cdot \rho}{I_T(x)} \quad (4.7)$$

mit

$T(x)$ inneres resultierendes Torsionsmoment freigeschnitten an der Stelle x [Nm]

$I_T(x)$ Torsionsträgheitsmoment an der Stelle x [mm⁴]

formuliert werden kann, ergibt sich nach Einsetzen in Formel (4.5) der differenzielle Verdrehwinkel nach Gl. (4.8) zu:

$$d\Phi = \frac{T(x)}{I_T(x) \cdot G} \cdot dx \quad (4.8)$$

Integriert man über die ganze Länge der Welle bzw. des Bereiches mit Innen- und Außengewinde erhält man den Verdrehwinkel ϕ für diesen Abschnitt nach Gl. (4.9):

$$\Phi = \int \frac{T(x)}{I_T(x) \cdot G} \cdot dx \quad (4.9)$$

mit

ϕ Verdrehwinkel der Endquerschnitte eines Abschnittes

$I_T(x)$ Torsionsträgheitsmoment an der Stelle x [mm⁴], für den Rohrverbinder konstant

Folgende Annahmen wurden getroffen um die Kompatibilitätsbedingung laut Gl. (4.10) zu erfüllen:

- der Rohrverbinder ist vollständig eingedreht
- rutschen zwischen Rohrverbinder und Holz ist nicht möglich solange das maximale Torsionsmoment M_T noch nicht erreicht ist
- Eindrehwinkel steigt mit zunehmender Eindrehlänge weil Reibungsfläche steigt
- Beginn mit Torsionsmoment: woher kommt das eigentlich? → Material Verdrängen durch Gewinde wird das Holz verformt, nachlaufendes Gewinde welches im Prinzip diesen vorgeformten Gewindegang hat reibt an der Oberfläche → Vorgang sauber beschreiben → danach fällt mir bei den Prüfungen die Erklärung der verschieden hohen Eindrehmomente leichter und die Entscheidung für eine Schneidnut! Schneidnut schneidet über das vorgeformte Gewinde da ohne Schneidnut das Holz zwar verformt ist, der elastische Teil jedoch noch immer gegen den Stahl drückt und Reibung erzeugt (bei der Holzverdrängung plastischer und elastischer Anteil, plastischer Anteil das gestauchte Holz hat auf das nachlaufende Gewinde keinen Einfluss einmal verformt bleibt; der elastische Teil drückt dagegen)
- Jetzt folgt nachweis des Torsionsmoment

Der Verdrehwinkel ϕ ist für den Zapfen, den Rohrverbinder und den äußeren Querschnittsteil gleich.

$$\phi_{\text{Rohr}} = \phi_{\text{Zapfen}} = \phi_{\text{Außenquerschnitt}} \quad (4.10)$$

Das Momenten Gleichgewicht ergibt sich zu

$$\sum M_x = 0 \quad M_{T,\text{Ges}} = M_{T,\text{Zapfen}} + M_{T,\text{außen}} \quad (4.11)$$

Auf Basis des Beispiels auf S.251 im Buch „Technische Mechanik 2 - Festigkeitslehre“, sowie den Formeln (4.10) und (4.11) ergibt sich folgende Gl. (4.12) und Gl. (4.13) (Hibbeler und Wauer 2010):

$$M_{T,\text{Zapfen}} = \frac{M_{T,\text{Ges}}}{(1 + \phi)} \quad (4.12)$$

mit

$M_{T,\text{Zapfen}}$ inneres Torsionsmoment [Nm]

$M_{T,\text{Ges}}$ gesamtes Torsionsmoment [Nm]

$$\phi = \frac{G_{0,\text{außen}} \cdot I_{T,\text{außen}} \cdot l_{\text{ef,innen}}}{G_{0,\text{innen}} \cdot I_{T,\text{innen}} \cdot l_{\text{ef,außen}}} \quad (4.13)$$

mit

$G_{0,\text{außen}}$ Schubmodul parallel zur Faser für den äußeren Querschnittsteil [N/mm²]

$G_{0,\text{innen}}$ Schubmodul parallel zur Faser für den inneren Querschnittsteil [N/mm²]

$I_{T,\text{außen}}$ Torsionsträgheitsmoment für den äußeren Querschnittsteil [mm⁴]

$I_{T,\text{innen}}$ Torsionsträgheitsmoment für den inneren Querschnittsteil [mm⁴]

$l_{\text{ef,außen}}$	effektive Gewindelänge außen [mm]
$l_{\text{ef,innen}}$	effektive Gewindelänge innen [mm]

Mit den in (4.12) und (4.13) vorgestellten Gleichungen ist es nun möglich das einwirkende Torsionsmoment auf die beiden Holzquerschnitte aufzuteilen. Das, zur Ermittlung von Gl. (4.13), benötigte Torsionsträgheitsmoment des Außenquerschnittes $I_{T,\text{außen}}$ errechnete sich vereinfacht aus der Differenz zwischen den Torsionsträgheitsmomenten des Referenzquerschnittes nach Gl. (2.1) und einem Kreisquerschnitt mit Nenndurchmesser d nach Gl. (4.14) zu:

$$I_{T,\text{außen}} = I_{T,\square} - I_{T,\circ} \quad (4.14)$$

$I_{T,\text{außen}}$	Torsionsträgheitsmoment des Holz-Außenquerschnittes [mm ⁴]
$I_{T,\square}$	Torsionsträgheitsmoment des Referenzquerschnittes [mm ⁴]
$I_{T,\circ}$	Torsionsträgheitsmoment des Loches mit Nenndurchmesser d [mm ⁴]

Fallunterscheidungen

Zur Abschätzung ob der Holzzapfen oder der Außenquerschnitt versagt bzw. um den Nutzungsgrad beider Querschnittsteile zu steigern wurden Fallunterscheidungen gemacht. Da die effektiven Gewindelängen $l_{\text{ef,a}}$ und $l_{\text{ef,i}}$ nicht gleich lang sind, ergeben sich drei mögliche Fälle den Rohrverbinder in Bereiche zu unterteilen.

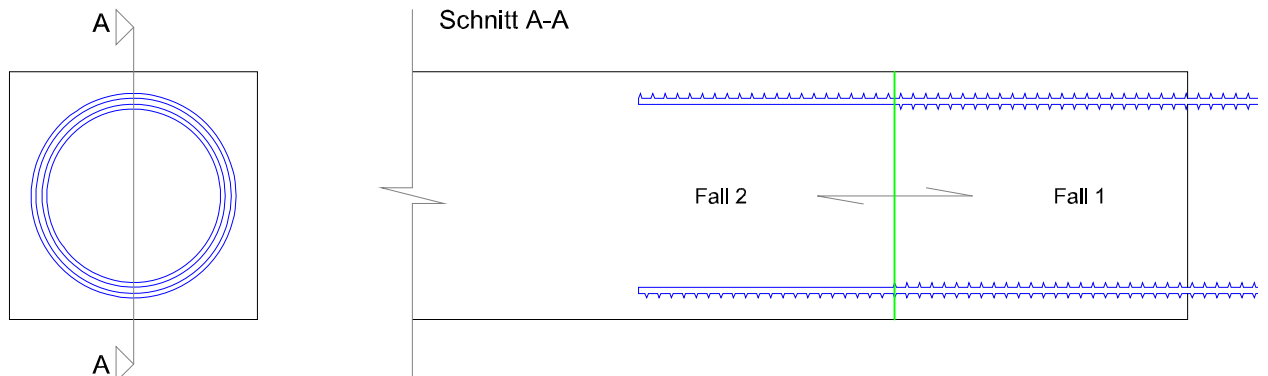


Abbildung 4-9: Torsion Holz, Aufteilung in Bereiche

Fall 1: Innen- und Außengewinde

Im ersten Fall wird der Bereich mit Innen- und Außengewinde betrachtet (Abbildung 4-9). Für diesen speziellen Fall muss das Torsionsmoment $M_{T,\text{Ges}}$ auf den Holzzapfen innen $M_{T,\text{Zapfen}}$ sowie den Außenquerschnitt $M_{T,\text{Außen}}$ aufgeteilt werden. Diese Aufteilung erfolgt gemäß den Erläuterungen in Abschnitt 4-4.1.1 sowie im speziellen den Gleichungen (4.12), (4.13) und (4.14).

Die Schubmoduli und die Gewindelängen sind im Fall 1 gleich und können somit herausgekürzt werden. Für $I_{T,\text{außen}}$ nach Gl. (4.15) wird vereinfachend ein Kreisring mit dem Außendurchmesser b und dem Innendurchmesser d angenommen (Abbildung 4-10), der Querschnitt zur Berechnung von $I_{T,\text{innen}}$ nach Gl. (4.15) ist ein Kreis mit dem Durchmesser d_1 (Abbildung 4-11):

$$I_{T,\text{außen}} = \frac{\pi}{32} \cdot (b^4 - d^4) \qquad I_{T,\text{innen}} = \frac{\pi}{32} \cdot (d_1^4) \qquad (4.15)$$

mit

- $I_{T,\text{außen}}$ Torsionsträgheitsmoment für den äußeren Querschnittsteil [mm⁴]
- b Außendurchmesser des Kreisrings [mm]
- d Innendurchmesser des Kreisrings [mm]
- $I_{T,\text{innen}}$ Torsionsträgheitsmoment für den inneren Querschnittsteil [mm⁴]
- d_1 Radius für den inneren Querschnittsteil gleich dem Zapfenradius [mm]

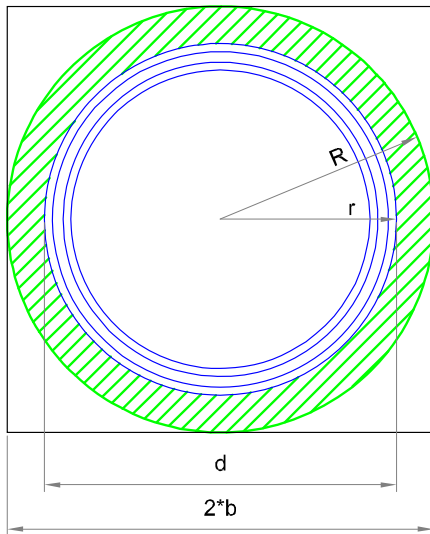


Abbildung 4-10: Außenquerschnitt auf Torsion beansprucht, grün markiert die vereinfachende Annahme als Kreisring

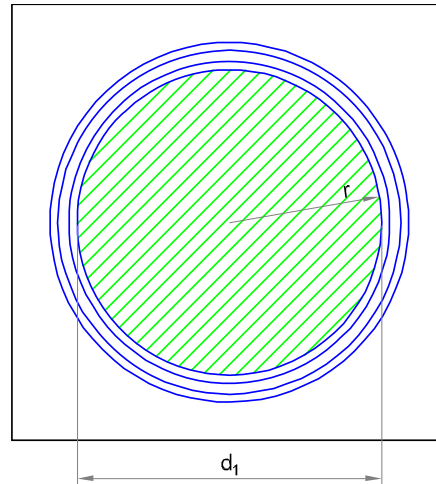


Abbildung 4-11: Innerer Querschnitt auf Torsion beansprucht

Die Torsionsschubspannung kann laut (4.16) allgemein für Kreis- und Kreisringquerschnitte geschrieben werden als (Hibbeler und Wauer 2010):

$$\tau_{\text{max}} = \frac{T \cdot r}{I_T} \qquad (4.16)$$

mit

- τ_{max} maximale Schubspannung [N/mm²]
- M_T resultierendes Torsionsmoment des jeweiligen Querschnittes [Nmm]
- r maximaler Abstand von der Schwerachse zum Rand [mm]
- I_T Torsionsträgheitsmoment [mm⁴]

Der Nutzungsgrad $\eta_{\text{tor,a}}$ bzw. $\eta_{\text{tor,i}}$ für den jeweiligen Querschnittsteil kann nach Gl. (4.17) folglich geschrieben werden als:

$$\eta_{\text{tor},a/i} = \frac{\tau_{\text{max}}}{f_v} \leq 1,0 \quad (4.17)$$

mit

$\eta_{\text{tor},i/a}$	Nutzungsgrad des inneren- bzw. äußeren Querschnittes auf Torsion beansprucht [-]
τ_{max}	maximale Schubspannung [N/mm ²]
f_v	Schubfestigkeit [N/mm ²]

Fall 2: Nur Außengewinde

Im zweiten Fall ist das Außengewinde länger und somit wird das Torsionsmoment $M_{T,\text{Ges}}$ von Beginn des Eindrehens bis zum Erreichen des Innengewindes ausschließlich über den äußeren Querschnittsteil aufgenommen.

Folglich ist für diesen Fall $M_{T,\text{Zapfen}} = 0$ und $M_{T,\text{außen}} = M_{T,\text{Tor}}$.

Für den äußeren Querschnittsteil wird analog zu Fall 1 ein Kreisring angenommen. Die maximale Schubspannung τ_{max} errechnet sich entsprechend Fall 1 mit Formel (4.16) und der Wirkungsgrad $\eta_{\text{tor},a}$ mit Formel (4.17).

Fall 3: Nur Innengewinde

Im dritten Fall ist das Innengewinde länger, dadurch nimmt der Zapfen von Beginn des Eindrehens bis zum Erreichen des Außengewindes das Torsionsmoment $M_{T,\text{Ges}}$ auf.

Folglich ist für diesen Fall $M_{T,\text{Zapfen}} = M_{T,\text{Tor}}$ und $M_{T,\text{außen}} = 0$.

Die maximale Schubspannung τ_{max} sowie der Wirkungsgrad $\eta_{\text{tor},i}$ errechnen sich entsprechend Fall 1 mit Formel (4.16) bzw. (4.17).

4-4.1.2 Spannungsverteilung in den beiden Holzquerschnittsteilen

Die Ermittlung der Spannungen infolge einer Torsionsbeanspruchung sind abhängig von der Querschnittsform. Im, in Abschnitt 4-4.1.1 vorgestellten, Torsionsmodell wurde gezeigt, dass bei Torsionseinwirkung auf einen kreisförmigen, also achsensymmetrischen Querschnitt, die Gleitungen linear von null in der Stabachsenmitte bis zu ihren Maximum an der Mantelfläche ändern. Aufgrund der Gleichförmigkeit der Gleitungen in allen Punkten desselben Radius kann sich der Querschnitt nicht deformieren und bleibt eben, die Torsionsberechnung wird dadurch in der Konsequenz erheblich erleichtert (Hibbeler und Wauer 2010).

Spannungsverteilung im Holz-Außenquerschnitt

Wölbkrafttorsion

Nicht - achsensymmetrische Querschnitte unterscheiden sich insofern von Kreisquerschnitten, dass zum Beispiel bei einem quadratischen Querschnitt die Schubspannung in sehr komplexer Weise über den Querschnitt verteilt ist und entlang radialer Linien unterschiedlich ausfällt (Abbildung 4-12). In weiterer

Folge verwölbt sich der Querschnitt (Abbildung 4-12), die Berechnung erschwert sich dadurch zunehmend. Mithilfe einer Berechnungsmethode, auf Basis der Elastizitätstheorie, lassen sich einfache nicht - achsensymmetrische Querschnitte wie Quadrate oder quadratische Hohlprofile jedoch berechnen (Hibbeler und Wauer 2010).

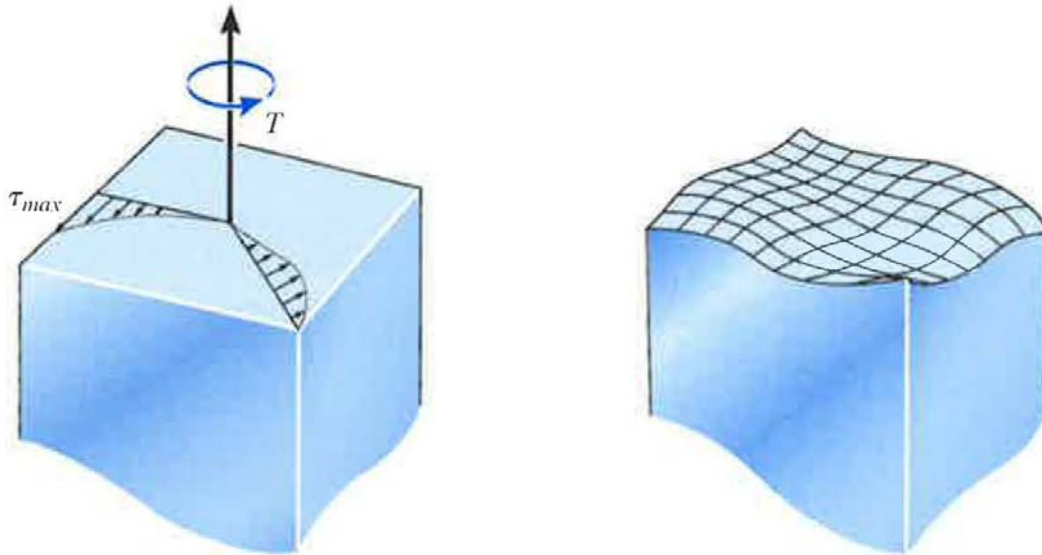


Abbildung 4-12: Radiale Schubspannungsverteilung und Verwölbung eines quadratischen Querschnittes (Hibbeler und Wauer 2010)

Numerisches Modell

Zur Ermittlung der Spannungen betrachtete man den Referenzquerschnitt von $A_{\text{ref}} = b \times h = 80 \times 80 \text{ mm}$ nach Gl. (2.1) mit einer kreisförmigen Öffnung von $d = 60 \text{ mm}$. Das Torsionsträgheitsmoment ergibt sich folgend zu $I_{T,\text{num}} = 4435 \times 10^3 \text{ mm}^4$. Der Querschnitt wurde mit einem Torsionsmoment von $M_T = 10 \text{ Nm}$ belastet. Die maximale Schubspannung infolge Torsion beträgt gemäß Gl. (4.18):

$$\tau_{\text{max}} = 0,1267 \text{ N/mm}^2 \quad (4.18)$$

mit der nach Gl. (4.19) beschriebenen Grundgleichung zur Torsionsspannung:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{M_T}{W_T} \quad (4.19)$$

Der charakteristische Wert der Schub- bzw. Torsionsfestigkeit von BauBuche ermittelt sich nach Gl (2.2) und lautet für den Referenzquerschnitt nach Gl. (2.1) $f_{v,k} = 6,62 \text{ N/mm}^2$. Folgend ergibt sich ein maximal aufnehmbares, charakteristisches Torsionsmoment von 522 Nm.

Exkurs Torsionsfestigkeit

Zum einen sind Torsionsspannungen, im Vergleich zu Schubspannungen, nur am Rand maximal und gehen in Richtung ihrer Schwerachse auf null zurück. Die Spannungsverteilung ist also nicht homogen über den Querschnitt sondern nur maximal in den Rändern.

Wenn man so will kann man von einem sogenannten „Spannungsverteilungs-Größeneffekt“ sprechen wie beim Völligkeitsgrad der das Verhältnis Biege- zu Zugwiderstand beschreibt. Zum anderen führt eine Verdrehung beispielsweise eines nassen Tuches zu Kompression und herauspressen des

Wassers, abgeleitet auf Holz kann, bei Torsionsbeanspruchung von auftretendem Querdruck in Kombination mit Schub ausgegangen werden was zur erhöhten Torsionsfestigkeiten gegenüber der Schubfestigkeit führt.

Diese Überlegung gilt nur für Vollquerschnitte wie dem Holzapfen, der Außenquerschnitt hat durch seine schmale Mindestwanddicke auch an der Innenseite der Wand schon hohe Spannungen ergo auch keine so hohe Volligkeitsdifferenz.

Bei einer numerischen Berechnung muss immer berücksichtigt werden, dass von einem homogenen Querschnitt ausgegangen wird. Weiters lässt sich der Belastungszustand des Applizierens bzw. die daraus folgenden Spannungen nur sehr schwer modellieren. Das Finite-Elemente Netz im Querschnitt, zeigt erwartungsgemäß in den schattierten Elementen die höchsten Spannungen auf (siehe Abbildung 4-13).

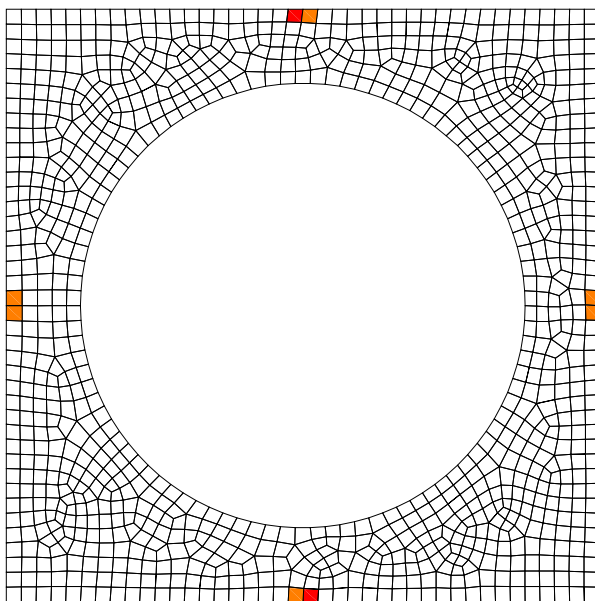


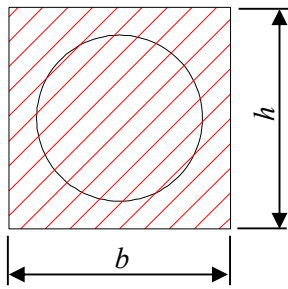
Abbildung 4-13: Finite Elemente Netz im Querschnitt, numerische Berechnung

Vereinfachende Betrachtung des Holz-Außenquerschnittes

Da das Torsionswiderstandsmoment W_T , benötigt für die Ermittlung der Torsionsspannungen im Holz-Außenquerschnitt gemäß Gl. (4.19), nicht mit einer universal anwendbaren Gleichung zu berechnen ist war es von Bedeutung verschiedene vereinfachende Betrachtungen des Querschnittes zu erstellen und miteinander zu vergleichen (siehe Abbildung 4-14). In Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15 sind das Torsionsträgheitsmoment und die -spannung für jeden Querschnitt vergleichend dargestellt. Die Torsionssteifigkeit lässt sich anhand von Gl. (4.20) ermitteln:

$$\text{Torsionssteifigkeit} = G \cdot I_T \quad [\text{Nmm}^2] \quad (4.20)$$

Die Belastung der vereinfachten Querschnitte in Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15 erfolgte wie beim numerischen Modell mit $M_T = 10 \text{ Nm}$.



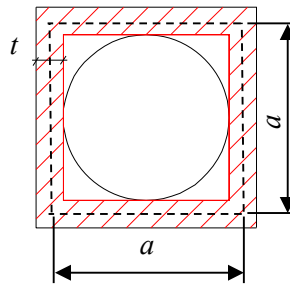
(a)

$$I_T = 0,141 \cdot b^4$$

$$I_T = 5775 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$W_T = 0,208 \cdot b^3$$

$$\tau_{\max} = 0,0939 \text{ N/mm}^2$$



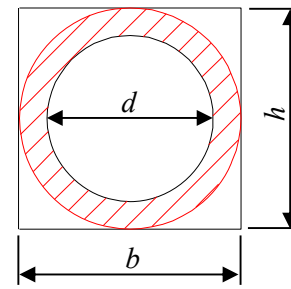
(b)

$$I_T = a^3 \cdot t$$

$$I_T = 3430 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$\tau_{\max} = \frac{M_T}{2 \cdot A_m \cdot t_{\min}}$$

$$\tau_{\max} = 0,1020 \text{ N/mm}^2$$



(c)

$$I_T = \frac{\pi}{32} \cdot (b^4 - d^4)$$

$$I_T = 2749 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$W_T = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{b^4 - d^4}{b}$$

$$\tau_{\max} = 0,1455 \text{ N/mm}^2$$

Abbildung 4-14: Vereinfachte Betrachtung des Holz-Außenquerschnittes

(a) quadratischer Querschnitt

(b) Hohlprofilquerschnitt

(c) Kreisquerschnitt

(a) – (c) gemäß Hibbeler und Wauer (2010)

mit

$b = 80$ Breite Holz-Außenquerschnitt [mm]

$h = 80$ Höhe Holz-Außenquerschnitt [mm]

$d = 60$ Durchmesser Ausnehmung [mm]

$t = 20$ Wandstärke Querschnitt (b) [mm]

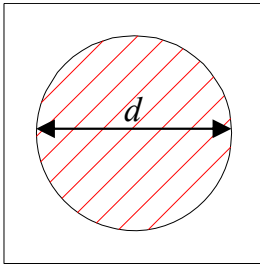
$a = 70$ Seitenlänge der Mittellinie der Hohlprofilwand [mm]

$A_m = a^2 = 70^2 = 4900$ durch die Mittellinie der Hohlprofilwand umschlossene Fläche [mm²]

Infolge der Annäherung an die numerische Berechnung der maximalen Torsionsspannung ist erkennbar, dass Querschnitt (c) in Abbildung 4-14 leicht auf der konservativen Seite (4.18) liegt und somit eine gute Option, in der Frage der Spannungsberechnung darstellt.

Spannungsverteilung im Holzzapfen

Wie in Abschnitt 4-4.1.2 wurde auch, zur Vergleichbarkeit, bei der Ermittlung der Torsionsspannungen im Holzzapfen das Torsionsmoment $M_T = 10 \text{ Nm}$ eingesetzt.



$$I_T = \frac{\pi}{32} \cdot d^4 = 1272 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$\tau_{\max} = \frac{M_T \cdot d}{2I_T} = 0,2358 \text{ N/mm}^2$$

Abbildung 4-15: Querschnittsfläche des Holzapfens (Hibbeler und Wauer 2010)

Abbildung 4-15 zeigt den, zur Ermittlung der Torsionssteifigkeit angenommenen, Querschnitt des Holzapfens nach Gl. (4.20). Für die BauBuche ergibt sich ein maximales charakteristisches Torsionsmoment von 280 Nm.

Materialseitig aufnehmbares Torsionsmoment

Zusammenfassend gibt Tabelle 4-2 einen Überblick über die aufnehmbaren Torsionsmomente der beiden Querschnitte, der Außenquerschnitt wird einerseits anhand der numerischen Berechnung und andererseits mit dem vereinfachten Querschnitt (c) aus Abbildung 4-14 angegeben.

Tabelle 4-2: Maximal aufnehmbare Torsionsmomente des Holzproduktes BauBuche bei gegebenem Querschnitt, beim Außenquerschnitt wird $M_{\text{tor,a}}$ auf Basis der numerischen Berechnung und des Querschnittes (c) laut Abbildung 4-14 aufgelistet

Material	Höhe h [mm]	$f_{v,\max}$ [N/mm ²]	$M_{\text{tor,a}}$ [Nm]		$M_{\text{tor,i}}$ [Nm]
			numerisch	QS (c)	
BauBuche	80	6,62	522	455	280
			Σ 735 – 802		

4-4.1.3 Abschätzung des Eindrehmomentes

Im nächsten Schritt muss überprüft werden ob die bei der Applikation auftretenden Eindrehmomente die in Tabelle 4-2 eingetragenen Momente überschreiten. Da es im Durchmesserbereich von 40-70 mm keine Untersuchungen gibt war es von Nöten vorhandene Eindrehmessungen mit herkömmlichen Schraubendurchmessern heranzuziehen.

Die ersten Abschätzungen führte man auf Basis von Ergebnissen mehrerer Prüfserien aus der Datenbank des Lignum Test Centers des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz. In den Prüfserien wurden Messungen des Eindrehmomentes bei selbstbohrenden Holzschrauben in Fichtenholz durchgeführt. Schrauben mit den Durchmessern $d\{4; 6; 8; 10; 12\}$ wurden eingedreht und die Änderung des Eindrehmomentes abhängig von der Eindringtiefe gemessen. Mithilfe der Schlankheit λ verglich man die einzelnen Schraubentypen mit dem Rohrverbinder wobei die maximale Eindrehtiefe des Rohrverbinders mit 200 mm beschränkt wurde um (siehe Abschnitt 4-1).

$$\lambda = \frac{L}{d} \quad (4.21)$$

mit

λ Schlankheit

L Eindrehtiefe der Schraube bzw. Länge des Rohrverbinders [mm]

d Durchmesser der Schraube bzw. des Rohrverbinders [mm]

Der Rohrverbinder wurde mit Außendurchmesser $d = 60$ mm und Innendurchmesser $d_1 = 47$ mm angenommen, die Schlankheit wurde mit $\lambda = 6$ konservativ angesetzt. Unter Anwendung von Gl. (4.21) würde die resultierende Eindrehtiefe je nach Durchmesser zwischen 282 – 360 mm variieren, deutlich tiefer als die gewünschte maximale Eindrehtiefe. Die zu vergleichende Schlankheit von $\lambda = 6$ wird bei den Schrauben abhängig vom Durchmesser in einer bestimmten Eindrehtiefe erreicht. Diese übersteigt jedoch nie die Gesamtlänge der Schraube, da Schrauben im Vergleich zum Rohrverbinder eine wesentlich größere Schlankheit aufweisen. Die Anzahl der Eindrehversuche variierte je nach Schraubendurchmesser zwischen mindestens 11 bzw. maximal 27.

Abbildung 4-16 veranschaulicht die Eindrehtiefen der Schrauben im Vergleich zum Rohrverbinder bei gleicher Schlankheit.

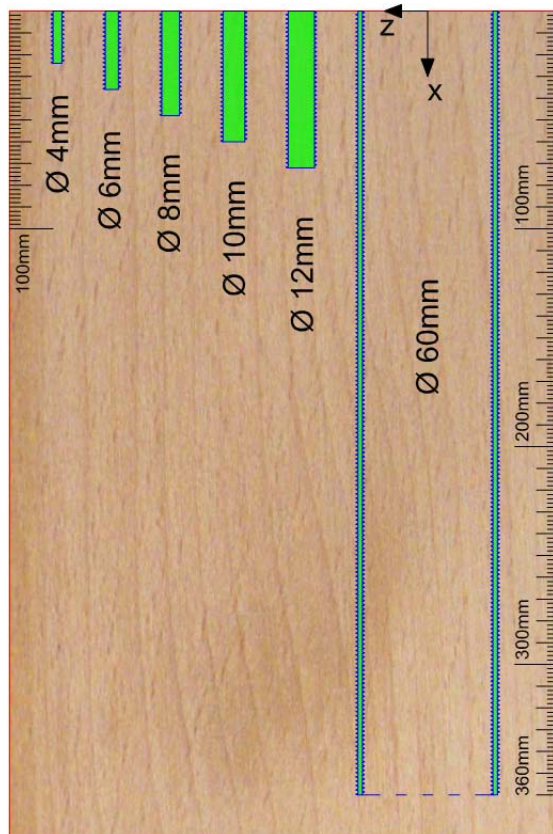


Abbildung 4-16: Vergleich der Eindrehtiefen der unterschiedlichen Durchmesser bei gleicher Schlankheit

In Diagramm 4-1 wurden die fünf gemittelten Eindrehmomente der verschiedenen Schraubendurchmesser eingetragen und eine Trendlinie hinzugefügt. Die beste Näherung bringt eine Potenzfunktion. Logarithmiert man die Achsen ergibt sich eine lineare Funktion und die Parameter k und d können, mit den in Excel implementierten Funktionen, berechnet werden.

$$y = k \cdot x + d \quad (4.22)$$

Durch Einsetzen der logarithmierten Werte d und d_1 in (4.22) erhält man $\ln(M_{T,Ges})$, potenziert zur Basis e , der Euler Zahl, erhält man $M_{T,Ges}$ für d bzw. d_1 . Bei dieser Annahme muss berücksichtigt werden, dass die Eindrehversuche ohne Vorbohren und in Fichtenholz durchgeführt wurden, im konkreten Fall des Rohrverbinders jedoch ausschließlich Laubholz betrachtet wird.

Zur Veranschaulichung der Unterschiede zwischen dem Eindrehwiderstand in Fichte, Buchenvollholz und BauBuche wird auf Reichinger (2017) verwiesen (siehe Tabelle 4-3), die Ergebnisse für Buchen Vollholz und BauBauche aus seiner Arbeit sind in Diagramm 4-1 eingetragen.

Tabelle 4-3: Eindrehwiderstände in [Nm] von Fichte, Buche, BauBuche (Reichinger 2017)

Referenzschraube RF		Fichte [Nm]			Buche VH [Nm]	BauBuche [Nm]
Ø 8	$\alpha = 0^\circ$	A ρ_{358}	B ρ_{441}	C ρ_{539}	ρ_{740}	ρ_{840}
$l_{ef} = 50 \text{ mm}$		2,75	3,31	4,85	8,48	12,4

Prognose und Konfidenzintervall 95% S238 β_1 und β_2 Verbundsteifigkeit K_{ser} XXXXXXXXXXXX

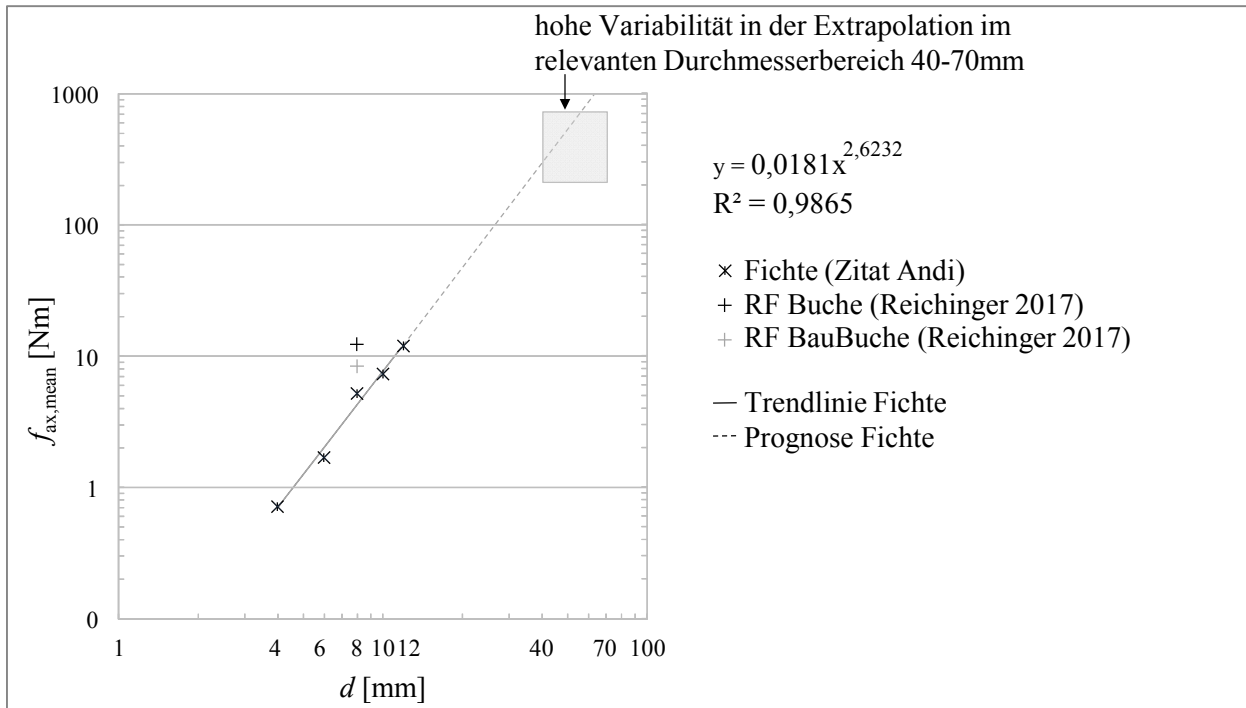


Diagramm 4-1: *Ergebniswerte für M_{tor} , für Fichte mit $d = 4-12$ mm aus Messungen am Lignum Test Center des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz für Buchen Vollholz und BauBuche mit $d = 8$ mm nach Reichinger (2017)*

Fazit zur Abschätzung des Eindrehmomentes

Wie in Diagramm 4-1 ersichtlich ist kann der, auf Fichte basierende Trend nur mit einer hohen Variabilität vorhergesagt werden. Nicht vorgebohrte Prüfungen mit Buchen Vollholz und BauBuche ($d = 8$ mm) zeigen zudem erhöhte Werte auf, es darf also nicht ausgeschlossen werden, dass die Eindrehmomente in Laubholz höher sind als der Trend in Diagramm 4-1. Es ist nicht klar feststellbar ob die Grenzen des Baustoffes Holz, im speziellen des Holzproduktes BauBuche ($M_{tor,a/i}$ nach Tabelle 4-2), überschritten werden.

Auf Basis dieser Erkenntnisse ist eine genauere Untersuchung im Durchmesserbereich von 40-70 mm für eine Fortsetzung des Projektes unabdingbar. In Abschnitt 4-4.1.4 werden die ersten Eindrehversuche und die daraus gewonnenen Erkenntnisse näher erläutert.

4-4.1.4 Versuchsreihe 1

Verbinder

In Versuchsreihe 1 wurden zwei Vollquerschnitte mit den Durchmessern $d = 72$ bzw. 44 mm der Fa. Schimdt Schrauben GmbH verwendet. Die beiden Vollquerschnitte dienen ausschließlich dazu einen Erkenntnisgewinn hinsichtlich der Eindrehwiderstände und in weiterer Folge eventueller Ausziehkräfte in einem größeren Durchmesserbereich von $44 - 72$ mm zu erlangen. Aus ökonomischer Sicht war es zu diesem Zeitpunkt des Projektes sinnvoller Vollquerschnitte zu verwenden, gewonnene Erkenntnisse fließen anschließend in die Entwicklung erster Prototypen eines Rohrverbinders. Die Gewindegeometrie, aufgelistet in Tabelle 4-4, orientierte sich dabei an Pöll (2017). Verwendet wurde ein hochfester Stahl mit einer Zugfestigkeit von $f_{y,k} = 1100$ N/mm², die hohe Festigkeit wird in weiterer Folge für den Rohrverbinder wegen der geringen Querschnittsfläche $A_{\text{Stahl,Netto}}$ gemäß Abschnitt 4-2.2 benötigt. Ein Außensechskantangriff zur Applikation sowie ein metrisches Gewinde für eventuelle Zug- / Durchdruckversuche entsprechen den Anforderungen aus Abschnitt 4-1.

Tabelle 4-4: Geometriekennwerte der beiden Vollquerschnitte

Bezeichnung	Nenn- durchmesser d [mm]	Kern- durchmesser d_1 [mm]	Gang- höhe p [mm]	Gewinde- tiefe s [mm]	Flanken- neigung φ [°]
Vollquerschnitt 1	72	68	4	4	40
Vollquerschnitt 2	44	40	4	4	40



(a)



(b)

Abbildung 4-17: Verbinder Vollquerschnitt
(a) $d = 72$, (b) 44 mm

Prüfkörper

Für die ersten Eindrehversuche wurde das Holzprodukt BauBuche nach Abschnitt 2-3.2.3 verwendet. Um ein Quersugversagen bei der Applikation zu vermeiden entschied man sich zunächst nicht für den Referenzquerschnitt nach Gl.(2.1) sondern für einen Querschnitt mit größeren Randabständen $A = 160 \times 160$ [mm²]. Zu Beginn wurden Versuche mit einem Gewindeeinschnitt von $s = 2$ mm durchgeführt, die ersten Prüfkörper wurden folglich mit 70 mm tiefen Sacklöchern mit einem Durchmesser von $d = 68$ bzw. 40 mm hergestellt.

Bei der Fertigung entstanden zunächst erhebliche Schwierigkeiten, da die BauBuche ein sehr hartes Holz ist und darüber hinaus stirnseitig ins Hirnholz gebohrt wurde. Die verwendete Standbohrmaschine war nicht im Stande das Torsionsmoment im Zuge des Einbohrens aufzunehmen, der Bohrer drehte durch (Abbildung 4-18 (c)). Die Fräsung eines Sackloches war nur bis zu einem Durchmesser des Forstnerbohrers von $d = 30$ mm möglich, jegliche Steigerung des Durchmessers führte zur Verklemmung des Bohrers im Holz bzw. zum Rutschen des Keilriemens. Selbst bei einer niedrigen Drehzahl musste man sehr vorsichtig bohren, um das Holz nicht zu verbrennen. Es stellte sich schnell heraus, dass nur durch das Wegnehmen von Holz ein Einbohren mit einem Forstnerbohrer möglich ist. Der relativ aufwendige Arbeitsablauf für eine Sacklochbohrung lautete demnach wie folgt:

- Vorbohren mit einem Kernbohrer, um den Durchmesser zu markieren
- Mehrmaliges Bohren innerhalb des Durchmessers mit einem gewöhnlichen Holzbohrer mit $d = 12$ mm um Holz wegzunehmen BILD (A)
- mehrmaliges Nachbohren mit einem Forstnerbohrer $d = 30$ mm innerhalb des Durchmessers um stehengelassene Holzstücke zu entfernen

Im Zuge der Bearbeitung eröffnete sich die Gelegenheit die Sacklöcher mit einem, dem Institut für Tragwerksentwurf der TU Graz zugehörigen, Fräsröbter zu erstellen Bild (b). Durch die computerbasierte Steuerung des Roboters konnten Löcher bis zu 100 mm Tiefe und mit einer hohen Genauigkeit angefertigt werden, die Vorlaufzeit für die Einstellung des Roboters und des Prüfkörpers auf der Werkbank sowie die Fräszeit dürfen hierbei jedoch nicht unterschätzt werden.

Forstnerbohrer schwarz	Lösung Schweizer käse	Rutschen des Keilriemens
------------------------	-----------------------	--------------------------

Abbildung 4-18: Bohr- und Fräsversuche des Sackloches
 (a) verbranntes Holz/ verklemmter Bohrer nach Bohrversuchen mit Forstnerbohrer
 (b)wegnehmen von Holz mit herkömmlichen Holzbohrer
 (c)Rutschen des Keilriemens der Standbohrmaschine

Einstellung des Werkstückes	Roboter1	Roboter2
-----------------------------	----------	----------

Abbildung 4-19: Fräsen mittels Roboter
 (a) verbranntes Holz/ verklemmter Bohrer nach Bohrversuchen mit Forstnerbohrer
 (b)wegnehmen von Holz mit herkömmlichen Holzbohrer
 (c)Rutschen des Keilriemens der Standbohrmaschine

Durchführung der Versuche

In Abbildung 4-20 (a) ist der Versuchsaufbau dargestellt, in (b) der Drehmomentschlüssel zur Messung des Eindrehmomentes. Der Prüfkörper wurde mit Stahlplatten und Gewindestangen am Verdrehen gehindert, eine eigens angefertigte U-förmige Holzlehre hindert den Verbinder am Ausweichen und sorgt

für ein zentrisches Eindrehen, da durch die händische Applikation mittels eines Drehmomentschlüssels Querkräfte auftreten. Einen ersten Erfahrungswert stellte das zentrische Eindrehen des Verbinders dar. Nur mit einer exakten Holzlehre aus Hartlaubholz um plastische Verformung zu vermeiden und einer genauen Voreinstellung des Prüfaufbaues konnte zentrisches Eindrehen gewährleistet werden. Die geringste Schrägstellung des Vollquerschnittes führte zu Holzquetschungen, Materialvorschub, teilweise fehlendem Gewindeeinschnitt und in letzter Folge zu einer erheblichen Erhöhung des Eindrehmomentes.

Der Drehmomentschlüssel der Firma Gedore kann für bis zu 760 Nm verwendet werden, zur Applizierung benötigten die beiden Verbinder eine Stecknuss mit einer Schlüsselweite von 55 bzw. 27 mm. Der Torsionswiderstand musste am Drehmomentschlüssel eingestellt werden, begonnen wurde mit 100 Nm und kontinuierlich in 50 Nm-Schritten gesteigert. Erreichte man das eingestellte Torsionsmoment klickt es im Drehmomentschlüssel, die Eindrehtiefe und das zugehörige Eindrehmoment M_T wurden notiert. Der Vorgang wiederholte sich bis die Lochtiefe erreicht wurde, Querkzugrisse auftraten oder das Eindrehmoment zu hoch wurde.



(a)



(b)

Abbildung 4-20 (a) Versuchsaufbau für Verbinder $d = 44 \text{ mm}$

(b) Drehmomentschlüssel bis 750 kN und Stecknüsse mit 55 bzw. 27 mm Schlüsselweite

Um Reibung zu vermindern wurden im Laufe der Versuchsreihe verschiedene Gleitmittel eingesetzt. Zu Beginn setzte man das speziell für die Beschichtung von Schrauben verwendete Gleitmittel MicroGleit DF 911 ein, mit Wasser verdünnt und mittels eintauchen aufgetragen musste die überschüssige Flüssigkeit danach abgeföhnt werden und 24 h Stunden trocknen (Abbildung 4-21 (a) und (b)). Der gewünschte Effekt einer Verringerung des Eindrehmomentes blieb jedoch aus, zudem nutzte sich die Beschichtung bei der Applizierung stark ab siehe Abbildung 4-21 (c).

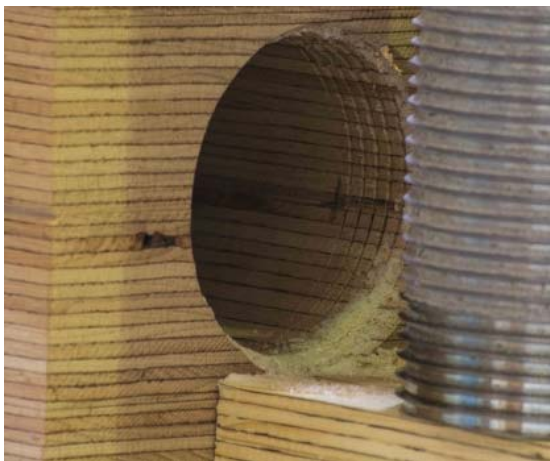
Flüssigseife sowie Speiseöl wurden vor dem Eindrehen mit einem Pinsel im Bohrloch verteilt. Beim Eindrehen mit Öl ist aufgefallen, dass der Unterschied zwischen Haft- und Gleitreibung verstärkt wurde, war der Verbinder bei der Applikation in Bewegung sank das Eindrehmoment drastisch, sobald die Bewegung stoppte musste zunächst die relativ hohe Haftreibung überwunden werden Abbildung 4-21 (d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 4-21: (a) Eintauchen in MicroGleit-Suspension
 (b) Trocknung der Beschichtung mit MicroGleit
 (c) Abnutzung beim Applizieren
 (d) In Öl getränktes Bohrloch

Nach den ersten Versuchen der Prüferie 1 stellte sich heraus, dass der geplante Gewindeeinschnitt von 2,0 mm aufgrund von Querschlüssen (Abbildung 4-22 (a)) und sehr hohen Eindrehmomenten beim Applizieren verringert werden muss.

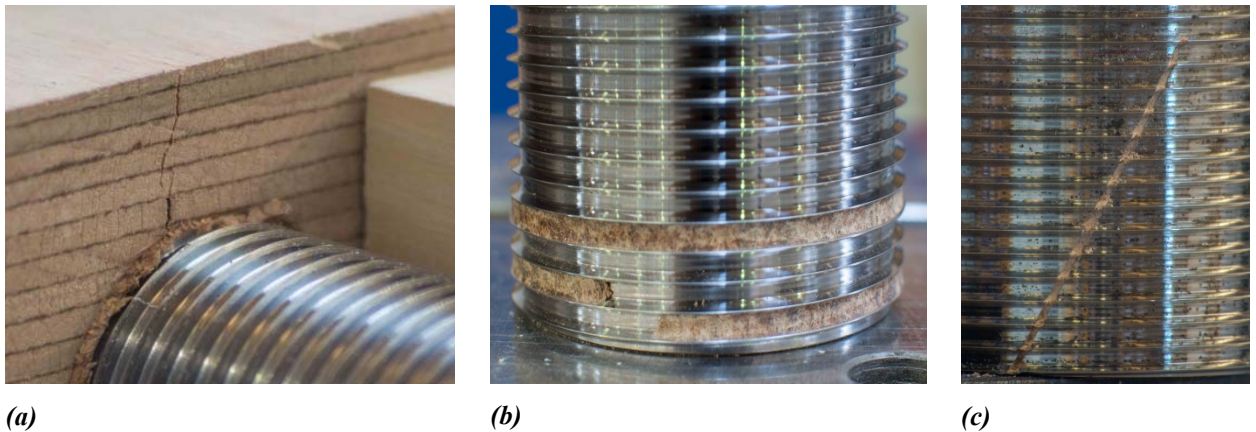


Abbildung 4-22: (a) *Querzugrisse infolge geringer Randabstände und 2mm Gewindeeinschnitt*
(b) *Verstopfter Gewindengang*
(c) *Spiral-förmige Einschnitte gefüllt mit Holzspänen*

Zudem verstopften die ersten Gewindgänge (Abbildung 4-22 (b)), dadurch konnte sich das Gewinde nicht mehr einschneiden. Da die Holzfasern nicht geschnitten sondern nur verdrängt werden kommt es nur zu einer elastischen und keiner plastischen Verformung, die Folge ist ein erhöhtes Eindrehmoment da das Holz stark auf den Verbinder drückt. Weiters führt die hohe Rohdichte von Pollmeier Baubuche zu einem geringeren Potential der Volumenverdrängung. Die weiteren Werkstücke der Prüferserie 1 wurden folgend mit einem 2 mm größeren Bohrdurchmesser vorgebohrt um einen Gewindeeinschnitt von 1 mm zu erhalten.

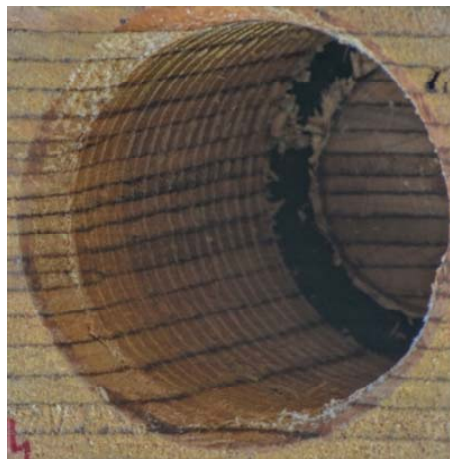
Das Schnittbild hat sich dadurch deutlich verbessert, Abbildung 4-23 zeigt den klaren Unterschied des Schnittbildes zwischen 2mm und 1mm Gewindeeinschnitt, oben der Verbinder mit $d = 44\text{mm}$ bzw. unten mit $d = 72\text{mm}$. Die hohen Eindrehmomente welche teilweise sogar die prognostizierten Werte überschritten führten jedoch zu der Erkenntnis, dass ein Verbinder in diesem Durchmesserbereich unbedingt Schneidnuten benötigt.

Exkurs zu Schneidnuten

Um die Gewindgänge freizubekommen erhielten die Verbinder in Achsrichtung spiralförmige Einschnitte mit dem Winkelschneider siehe Abbildung 4-22 (c), die dadurch entstandene scharfe Kante entlang der Einschnitte reißt das Holz auf und verhindert somit ein reines Verdrängen der Holzfasern. Die Schneidnuten räumen den Gewindengang frei, transportieren die Späne weg vom Gewinde und verhindern somit ein Verstopfen. Die spiralförmigen Einschnitte führten zu einer drastischen Verringerung des Eindrehmomentes.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 4-23: Unterschiede beim Gewindeeinschnitt 2 mm (a und c) zu 1 mm (b und d)

Fazit und Ergebnis

Der Einsatz von, zuerst 4 und in weiterer Folge 8, Schneidnuten je Verbinder führte zu einer extremen Reduktion des Eindrehmomentes. In den letzten Versuchen V 14 – V 16 dieser Versuchsreihe 1 wurden die gesammelten Erkenntnisse zusammengeführt:

- Gewindeeinschnitt $s = 1 \text{ mm}$
- Behandlung des Bohrloches und des Verbinders mit Speiseöl
- 8 Schneidnuten je Verbinder

Werden diese Vorgaben eingehalten verringert sich der Eindrehwiderstand bei Baubuche um den Faktor 3-4 gegenüber den ersten Versuchen.

Eindrehmomente des Vollquerschnittes 1 von maximal 250 Nm in einer Tiefe von 70 mm sind dadurch erreicht worden.

In Diagramm 4-2 sind die Werte von Diagramm 4-1 mit den Ergebnissen aus Versuchsreihe 1 erweiternd eingetragen.

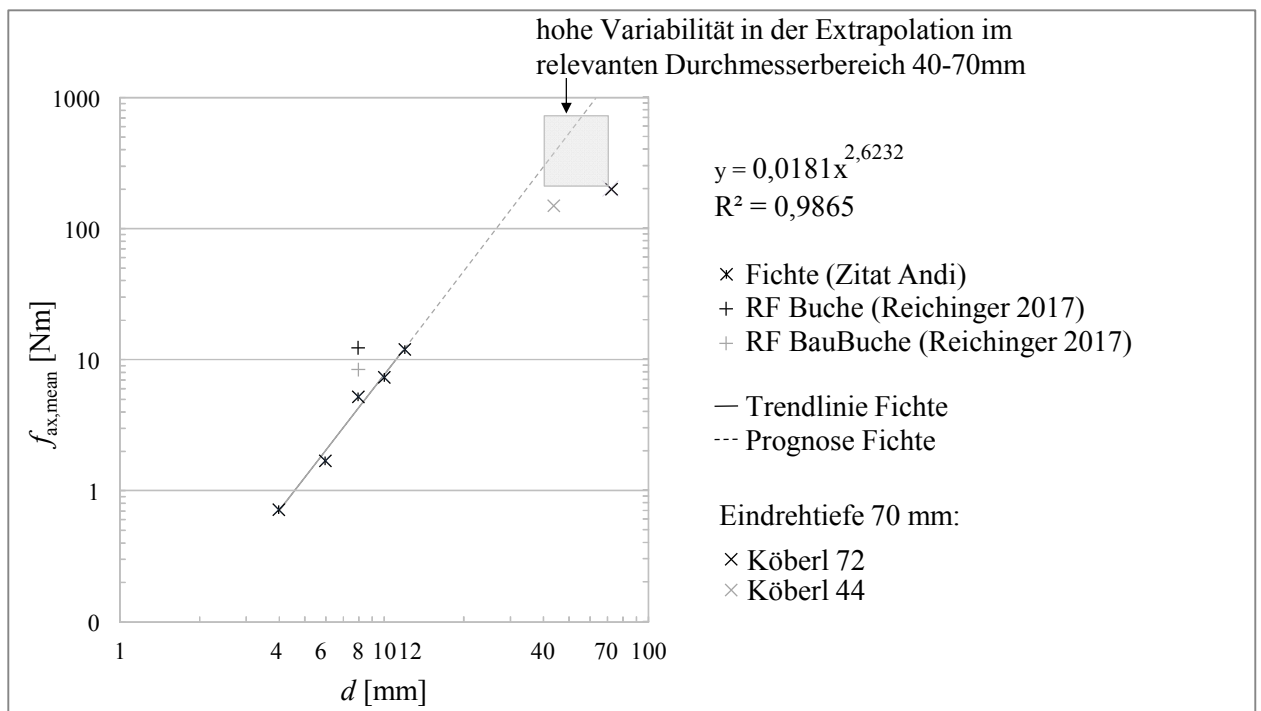


Diagramm 4-2: Aktualisierte Version von Diagramm 4-1, Ergebnisse von Versuchsreihe 1 deutlich geringer als prognostizierte Werte

Zusammengefasst in Tabelle 4-5 sind die Eigenschaften, Abmessungen und Ergebnisse der ersten Prüfsreihe abgebildet:

Tabelle 4-5: Eigenschaften, Abmessungen und Ergebnisse von Versuchsreihe 1

Bezeichnung	d_{Nenn} [mm]	d_{Bohrloch} [mm]	Gewinde- einschnitt [mm]	Schneid- nuten [mm]	Behandlung	Anm.	Moment bei 5cm [Nm]
V1	44	40,0	2,0	keine	trocken	Riss	-
V2	44	40,0	2,0	keine	trocken	Riss	-
V3	72	70,0	1,0-1,5	keine	trocken	-	1000
V4	72	70,0	1,0-1,5	keine	microGleit DF 911 3:1	bei 2,6cm abgebrochen	>700
V5	44	40,0	2,0	keine	microGleit DF 911 3:1	Riss	-
V6	72	70,0	1,0-1,5	keine	microGleit DF 911 1:1	Bei 2,7cm abgebrochen	>750
V7	72	70,0	1,0	4	trocken	-	580
V8	72	68,0	2	4	trocken	Bei 2,2cm abgebrochen	>750
V9	72	70,0	1,0	8	trocken	-	390
V10	72	70,0	1,0	8	Flüssigseife	schief eingedreht	520
V11	72	70,0	1,0	8	Öl	-	280
V12	44	42,8	0,6	keine	trocken	-	250
V13	44	42,0	1,0	keine	Öl	-	250
V14	72	69,9	1,0	8	Öl	-	150
V15	72	69,9	1,0	8	Öl	-	200
V16	72	70,0	1,0	8	Öl	-	200

4-4.2 STAHLVERSAGEN AUF TORSION

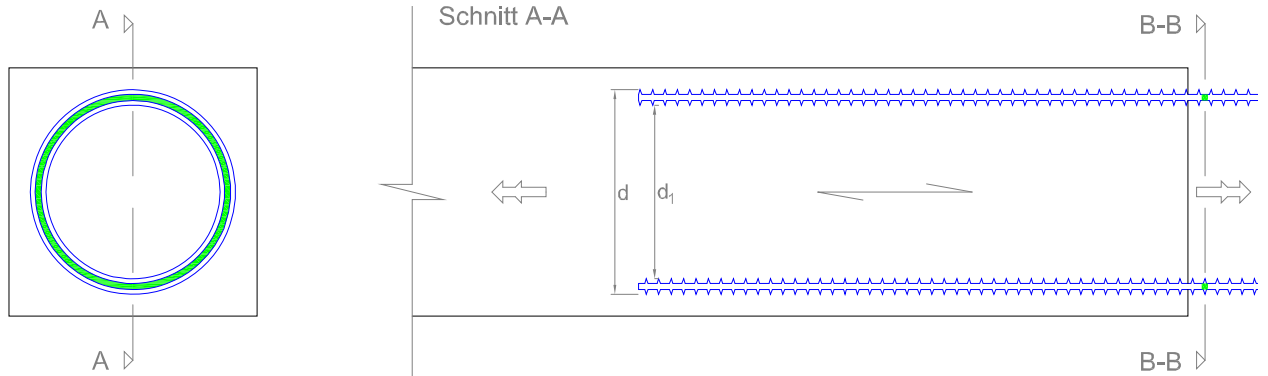


Abbildung 4-24: Versagensbild Rohrquerschnitt auf Torsion, die beanspruchte Fläche ist grün markiert

Die Vereinfachte Annahme des Verbinderquerschnittes nach Gl. (4.4), wie in Abschnitt 4-2.2 erläutert, wird hier verwendet um

Das in Abschnitt 4-4.1.3 und 4-4.1.4 erwähnte, durch den Einbau auftretende, Eindrehmoment $M_{T,Ges}$ muss auch der Rohrverbinder aufnehmen können, vereinfachend wurde hier für das polare Trägheitsmoment die Rohrwand (Nettorohrquerschnitt) als Kreisring herangezogen siehe Gl. (4.23):

$$I_{T,Kreisring} = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) \quad (4.23)$$

mit

$I_{T,Kreisring}$	Torsionsträgheitsmoment für den Kreisring-Querschnitt der Rohrwand [mm ⁴]
D	Außendurchmesser $d - 2s$ des Netto-Rohrquerschnittes [mm]
d	Innendurchmesser $d_1 + 2s$ des Netto-Rohrquerschnittes [mm]

Die vorhandene maximale Torsionsspannung rechnet sich nach Gl. (4.24) zu:

$$\tau_{\max,vorh} = \frac{M_{T,Ges}}{I_{T,Kreisring}} \cdot D \quad (4.24)$$

mit

$\tau_{\max,vorh}$	maximal vorhandene Torsionsspannung in der Rohrwand [N/mm ²]
$M_{T,ges}$	maximales Eindrehmoment [Nm]
$I_{T,Kreisring}$	Torsionsträgheitsmoment für den Kreisring-Querschnitt der Rohrwand [mm ⁴]
D	Außendurchmesser $d - 2s$ der Rohrwand [mm]

Die Torsionsfestigkeit ist die maximal aufnehmbare Schubspannung und errechnet sich wie folgt nach Gl. (4.25) (Unterweger 2010):

$$\tau_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (4.25)$$

mit

τ_{Rd} Torsionsfestigkeit des Stahls [N/mm²]

f_y Zugfestigkeit des Stahls [N/mm²]

Folglich kann der Wirkungsgrad $\eta_{\text{Stahl,Torsion}}$ nach Gl. (4.26) wie folgt berechnet werden

$$\eta_{\text{Stahl,Torsion}} = \frac{\tau_{\text{max,vorh}}}{\tau_{Rd}} \cdot 100 \quad (4.26)$$

mit

$\eta_{\text{Stahl,Torsion}}$ Wirkungsgrad des Rohrquerschnittes auf Torsion [%]

$\tau_{\text{max,vorh}}$ maximal vorhandene Torsionsspannung in der Rohrwand [N/mm²]

τ_{Rd} Torsionsfestigkeit des Stahls [N/mm²]

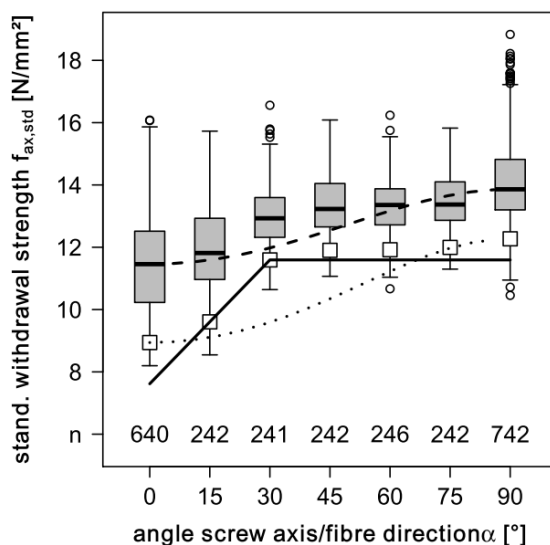
4-5 BEANSPRUCHUNG HERAUSZIEHEN

Für den Lastfall Herausziehen einer Schraube in Hartlaubholz mit einem Last-Faser Winkel von $\alpha = 0^\circ$ gibt es laut aktuellem Stand kein Normenwerk und nur vereinzelt Zulassungen. Würth besitzt für einen Schraubentyp eine Zulassung (ETA-11/0190 2013). Das darin enthaltene Bemessungsmodell ist jedoch angelehnt an ON EN 1995-1-1 2015 und verhält sich konservativ bei der Berechnung mit hohen Rohdichten ($\rho_k > 590 \text{ kg/m}^3$) und einem Winkel $\alpha = 0^\circ$ siehe Abschnitt 2-3.3.3 Verbindungslösung Schraubengruppe im Hirnholz.

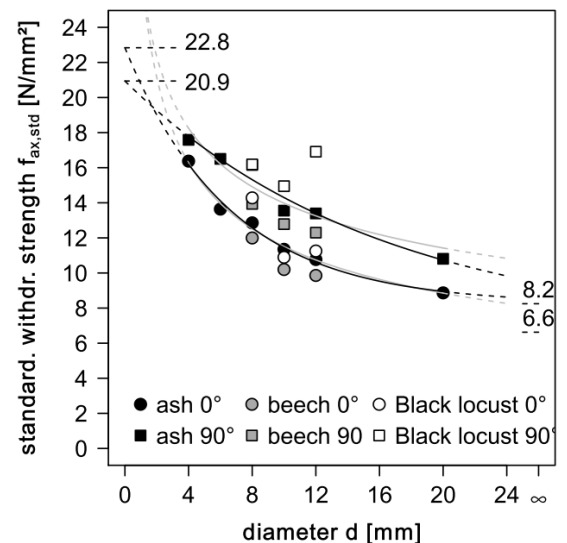
Hübner (2013b) erstellte ein, speziell auf Hartlaubholz ausgerichtetes, Berechnungsmodell zur Ermittlung der Ausziehfestigkeiten nach Gl. (4.30) welches auch den Einfluss des Durchmessers auf die Festigkeit berücksichtigt. Prüfungen von Pöll (2017) und Reichinger (2017) mit Durchmesser von $d = 8$ bzw. $8,1 \text{ mm}$ bestätigen Hübner sein Modell, wenn auch nicht den Durchmesser einfluss (siehe Diagramm 4-4).

4-5.1 MODELL HÜBNER

Hübner (2013a) entwickelte ein bilineares Bemessungsmodell mit einer konstanten Ausziehtragfähigkeit bei einem Last-Faser Winkel α von 30° - 90° und einem linearen Abfall der Ausziehtragfähigkeit von 30° auf 0° (Diagramm 4-3 (a)).



(a)



(b)

Diagramm 4-3: (a) Boxplots der standardisierten Auszieh-festigkeiten $f_{ax,std}$ aufgeteilt nach Last-Faser Winkel α , durchgängig eingezeichnet das Bilineare Bemessungs-modell von Hübner
(b) Standardisierte Ausziehfestigkeit $f_{ax,std}$ im Vergleich zum Durchmesser d , die Grenz-werte basieren auf logarithmischer Funktion

Es wurden Versuche mit verschiedenen Laubholzarten durchgeführt. Europäisches Eschenholz wurde größtenteils verwendet ($n = 2657$), die Last-Faser Winkel betragen 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° und 90° bei Durchmessern von 4 - 20 mm . Versuche an Buchen- und Robinienholz (ca. $n = 300$ je Holzart) wurden bei Last-Faser Winkeln von 0° und 90° durchgeführt, die Durchmesser variierten zwischen 6 , 8 , 10 und 12 mm . Zudem berücksichtigte Hübner in seinen Untersuchungen den Einfluss der Holzfeuchte, der Rohdichte sowie der Schraubenspitze.

Den Durchmesser einfluss beschrieb Hübner anhand der Beziehung zwischen den standardisierten Werten der Ausziehfestigkeit $f_{ax, std}$ [N/mm²] zum Durchmesser d [mm]. In Diagramm 4-3 (b) sind die Trendlinien als Potenz- und als Logarithmischen Funktion (Grenzwerte) getrennt nach Last-Faserwinkel (0°, 90°) dargestellt. Logarithmische Funktionen neigen zu realistischeren Grenzwerten (0°, 90°), wohingegen Potenzfunktionen oft zur Abbildung von Größeneffekten genutzt werden. Die Bruchzone bei Ausziehversuchen parallel zur Faser verläuft um die Schraube und liegt nicht notwendigerweise an der schwächsten Stelle, daher ist der Grenzwert mit 8,2 N/mm² größer als die Schubfestigkeit $f_{v, mean}$.

Es folgte die Berechnung der Regressionskurve basierend auf einer Potenzfunktion der 5 %-Fraktilewerte aller Proben mit $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ siehe Gl. (4.27).

$$f_{ax, 05} = 23,3 \cdot d^{-0,340} \quad (4.27)$$

Der Exponent von $1 - 0,34 = 0,660$ beschreibt den Durchmesser einfluss auf die Ausziehtragfähigkeit R_{ax} . Das Bemessungsmodell zur Bestimmung der Ausziehtragfähigkeit gemäß ON EN 1995-1-1 (2009) basiert auf $d^{0,5}$, laut der Arbeit von (Bejtka 2005, S.21) für Schraubendurchmesser von 6-12mm. Die größere Variation des Umfangs bei Hübner (4-20 mm) erlaubt eine genauere Regressionsanalyse.

Den Zusammenhang zwischen Ausziehtragfähigkeit R_{ax} und Ausziehfestigkeit f_{ax} zeigt Gl. (4.28):

$$f_{ax} = \frac{R_{ax}}{U \cdot l_{ef}} = \frac{R_{ax}}{d \cdot \pi \cdot l_{ef}} \quad (4.28)$$

Der Ausziehwiderstand $R_{ax, mean}$ bzw. die Ausziehfestigkeit $f_{ax, mean}$ ergeben sich laut Hübner nach den Glg. (4.29) und (4.30) (2013b) zu:

$$R_{ax, mean} = 2,39 \cdot 10^{-3} l_{ef}^{1,6} \rho_{mean}^{1,6} d^{0,66} \begin{cases} 1 - 0,006(30^\circ - \alpha) & \text{für } 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \\ 1 & \text{für } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4.29)$$

$$f_{ax, mean} = \frac{1}{\pi} \cdot 2,39 \cdot 10^{-3} \rho_{mean}^{1,6} d^{-0,34} \begin{cases} 1 - 0,006(30^\circ - \alpha) & \text{für } 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \\ 1 & \text{für } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4.30)$$

mit

$R_{ax, mean}$	mittlere Ausziehtragfähigkeit [N]
l_{ef}	effektive Gewindelänge [mm]
$\rho_{mean, 12}$	mittlere Rohdichte des Holzes bei 12 % Ausgleichsfeuchte [kg/m ³]
d	Nenndurchmesser der Schraube [mm]
α	Last-Faserwinkel [°]
$f_{ax, mean}$	mittlere Ausziehfestigkeit [N/mm ²]

Fazit

Das Bemessungsmodell nach Hübner (2013b) nach Gl. (4.30) bietet eine gute Grundlage für die Berechnung der Ausziehfestigkeiten des Rohrverbinders. Wie bei der Abschätzung des Eindrehmomentes in Abschnitt 4-4.1.3 hat jedoch auch dieses Modell Grenzen. Es basiert auf Schrauben- bzw. Schraubstangendurchmesser von maximal 20 mm; der für den Rohrverbinder interessant erscheinende Durchmesserbereich von 40 bis 70 mm überschreitet die obere Modellgrenze vielfach. Die Ergebniswerte

von Reichinger (2017), basierend auf Versuchen zur Ermittlung der Ausziehfestigkeit $f_{ax,mean}$ in Buche und BauBuche, sind in Diagramm 4-4 dargestellt und bestätigen das Modell von Hübner (2013b)xxx.

Wie in Diagramm 4-1 für das Eindrehmoment M_{tor} gibt es auch für die Ausziehfestigkeit keine Ergebniswerte im Durchmesserbereich 40 bis 70 mm, eine Extrapolation ist wiederum mit einer hohen Unsicherheit verbunden. Versuche zur Ermittlung der Ausziehfestigkeit f_{ax} in einem Durchmesserbereich von 40 bis 70 mm sind somit für die Weiterentwicklung des Rohrverbinders notwendig.

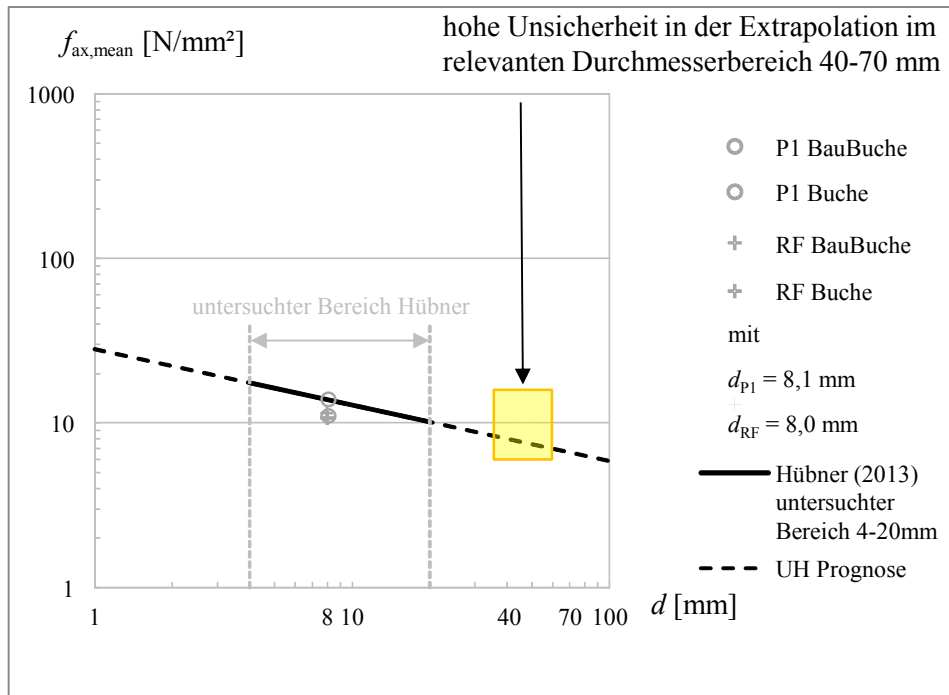


Diagramm 4-4: Ausziehfestigkeiten f_{ax} zweier Schraubentypen RF und P1 mit unterschiedlicher Gewindegeometrie nach Reichinger (2017) – dargestellt sind Mittelwerte für Buche und BauBuche bei einem Last-Faser-Winkel von $\alpha = 0^\circ$.

Ein Vorteil ist, dass im Unterschied zur Trendlinie des Eindrehwiderstandes in Abschnitt 4-4.1.3, das Modell nach Hübner (2013b) bereits für Hartlaubholz entwickelt wurde.

4-5.2 VERSUCHSREIHE 2

4-5.2.1 Verbinder

Zur Verwendung kamen Vollquerschnitt 1 mit acht Schneidnuten und Vollquerschnitt 2 mit vier Schneidnuten aus Versuchsreihe 1 (siehe Abschnitt 4-4.1.4).

4-5.2.2 Prüfkörper

Für die insgesamt zehn Prüfkörper in Versuchsreihe 2 (siehe Abbildung 4-25) verwendete man wiederum BauBuche. Die Querschnittsabmessungen wurden mit $A = 160 \times 160$ [mm²] gegenüber der Versuchsreihe 1 beibehalten, die Höhe betrug 70 mm. Jeweils fünf Prüfkörper wurden mit einem Bohrlochdurchmesser von $d_{\text{Loch}} = 42$ bzw. 70 mm versehen wobei das Bohrloch durch den gesamten Prüfkörper führte. Die effektive Verankerungslänge des Gewindes betrug somit $l_{\text{ef}} = 70$ mm, der Gewindeeinschnitt war mit $s = 1$ mm festgelegt.

Der Ablauf der Bohrlochherstellung gleicht Versuchsreihe 1; mehrmaliges Bohren mit geringem Durchmesser um Holz wegzunehmen und anschließendes Nachbohren mit einem Forstnerbohrer bzw. Kernbohrer um den endgültigen Durchmesser zu erhalten.



(a)



(b)

Abbildung 4-25: (a) Prüfkörper mit eingedrehtem Vollquerschnitt, der Verbinder ragt 10 mm aus dem Bohrloch heraus
(b) Schubversagen der Holzfasern in der Umrisslinie des Vollquerschnittes

In der Prüfkörpervorbereitung wurde der Verbinder in den Prüfkörper eingedreht und ragte, um ausschließlich das Gewinde zu belasten, 10 mm aus dem gegenüberliegenden Bohrloch heraus (Abbildung 4-25).

4-5.2.3 Durchführung der Versuche

Bei Versuchsreihe 2 wurden das Eindrehmoment M_T sowie der Auszieh Widerstand F_{ax} bestimmt. Zur Verwendung kam bei der Prüfung der Auszieh Kenngrößen die Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z 250; es wurde weggesteuert geprüft.

Die Abschätzung des Eindrehwiderstandes erfolgte analog zu Versuchsreihe 1, wie in Abschnitt 4-4.1.4 beschrieben. Ergänzend kann erwähnt werden, dass alle Eindrehversuche mit Öl als Gleitmittel unter einem Eindrehmoment von 150 Nm geblieben sind (siehe Tabelle 4-7). Der Eindrehwiderstand verringerte sich auch wenn die aufgebrachte Druckkraft seitens der zur Fixierung vorgesehenen Stahlplatten gering gehalten wurde.

Der Auszieh Widerstand ermittelte sich durch Herausdrücken des Vollquerschnittes, in Anlehnung an die Prüfkfiguration von Blaß et al. (2006) nach Abbildung 4-26. Blaß et al. haben gezeigt, dass die Tragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben gleich ist, unabhängig davon ob die Beanspruchung auf Herausziehen oder Herausdrücken aufgebracht wird (2006). Die Prüfmaschine drückt dabei von oben auf den Verbinder, der Versuchsaufbau ist in (Abbildung 4-27) dargestellt. Die HPL-Platte „Max Compact“ der Fa. Funder Max zwischen Verbinder und Prüfmaschine hatte ausschließlich schützende Funktion, die Stauchung der Platte muss jedoch bei der Ermittlung von K_{ser} berücksichtigt werden (E-Modul = 10.000 N/mm²; siehe FunderMax 2016). Unter dem Prüfkörper mit eingedrehtem Verbinder befand sich eine Holzplatte mit geringfügig größerer Ausnehmung als der Durchmesser des Verbinders, um Biegespannungen zu vermeiden.

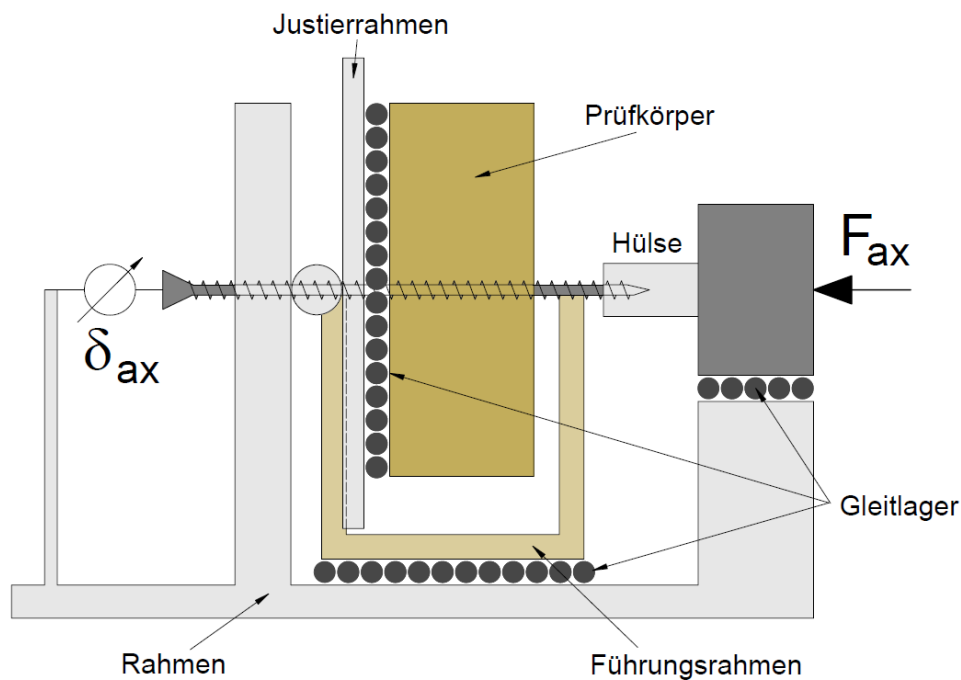


Abbildung 4-26: Prüfkfiguration zur Ermittlung des Auszieh Widerstandes F_{ax} bzw. der Ausziehfestigkeit f_{ax} nach Blaß et al. (2006)

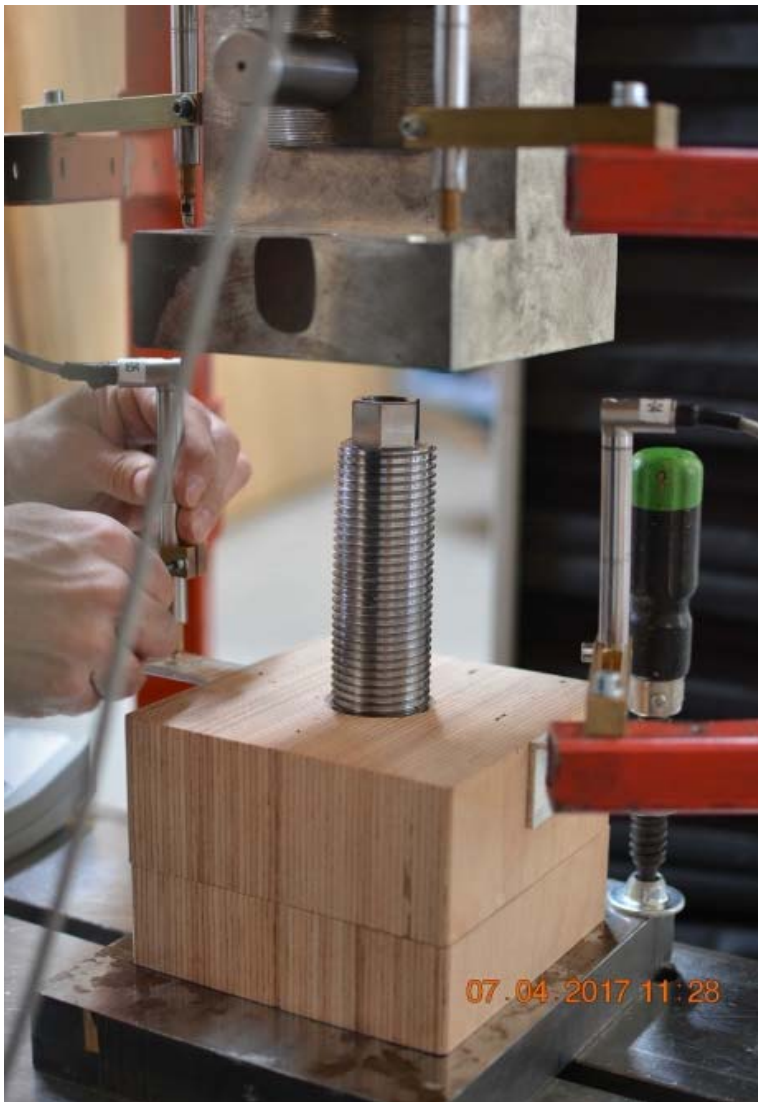


Abbildung 4-27: Prüfaufbau der Versuchsreihe 2, Druckversuch zur Bestimmung der Ausziehkenngrößen

Zur Ermittlung der Steifigkeit K_{ser} der Verbindung installierte man je zwei induktive Wegaufnehmer am Prüfkörper *Holz-Ost / West* und an der Prüfmaschine *Stahl-Ost / West*. Für die Relativverschiebung w_{Netto} des Gewindes im Holz bildet man nach Gl. (4.31) die Differenz der gemittelten Wege von Prüfmaschine zu Prüfkörper und zieht davon die Stauchung Δl des herausragenden oberen Teils des Verbinders sowie der HPL-Platte ab. Zur Ermittlung der Stauchung Δl muss der Abschnitt des herausragenden Verbinders plus der HPL-Platte bereichsweise bei jeder Querschnittsänderung unterteilt werden, in Abbildung 4-28 sind die Bereiche dargestellt.

$$\Delta l = \varepsilon \cdot l = \frac{F \cdot l}{E \cdot A}$$

$$\Delta l = \frac{F}{E_{\text{Stahl}}} \cdot \left(\frac{l_1}{A_1} + \frac{l_2}{A_2} + \frac{l_3}{A_3} \right) + \frac{F}{E_{\text{HPL}}} \cdot \left(\frac{l_4}{A_4} \right) \quad (4.31)$$

$$w_{\text{Netto}} = \left(\frac{\text{Stahl Ost} + \text{Stahl West}}{2} \right) - \left(\frac{\text{Holz Ost} + \text{Holz West}}{2} \right) - \Delta l$$

mit

E_{Stahl} E-Modul Stahl [N/mm²]

E_{HPL} E-Modul HPL-Platte Max Compact (FunderMax 2016) [N/mm²]

l_{1-4} Längen der, für die Berechnung von Δl benötigten, Bereiche nach Abbildung 4-28 [mm]

A_{1-4} Querschnittsflächen der, für die Berechnung von Δl benötigten, Bereiche nach Abbildung 4-28 [mm²]

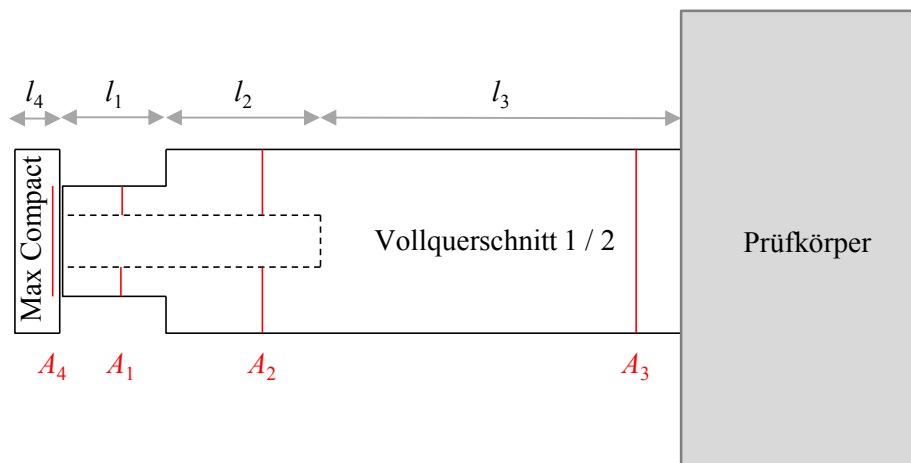
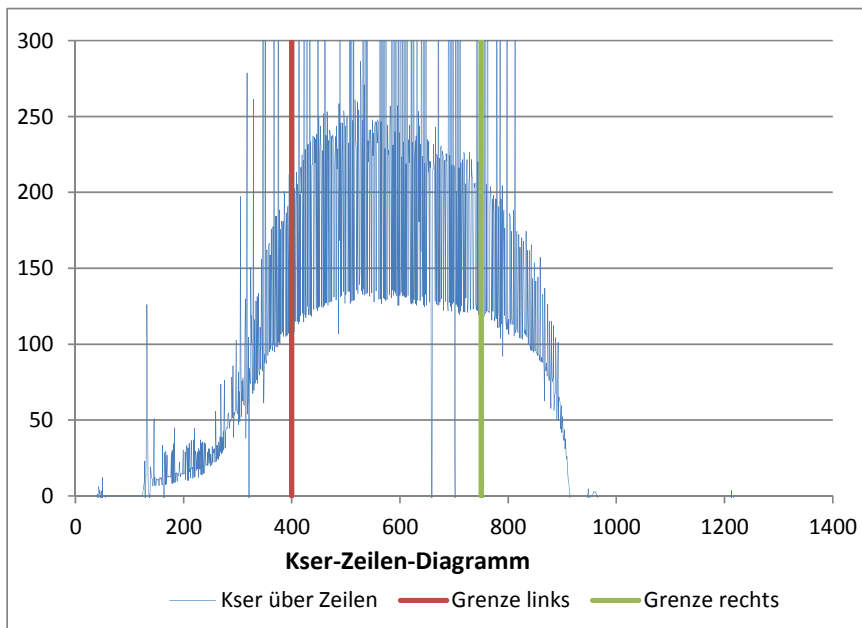


Abbildung 4-28: Herausragender Verbinderabschnitt plus HPL-Platte unterteilt in Bereiche zur Ermittlung von Δl

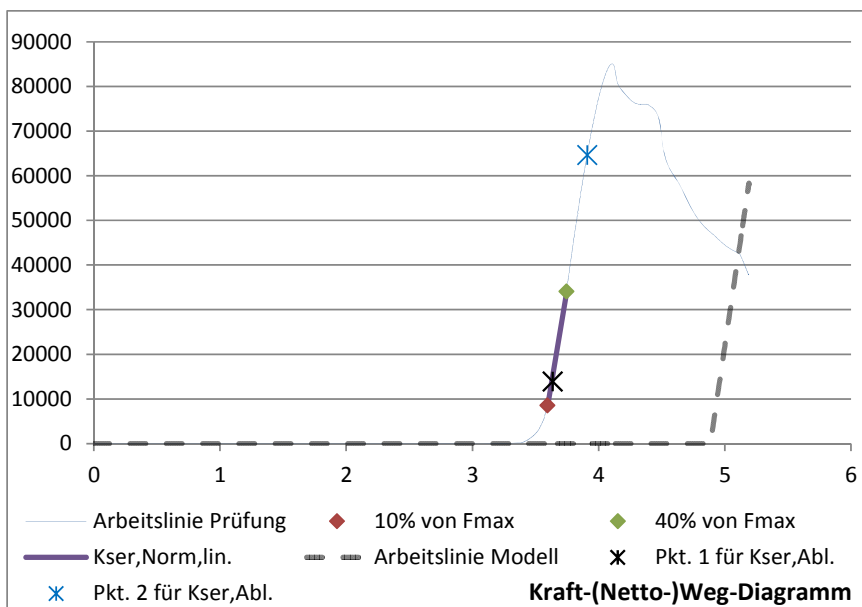
Die Abtastrate der Prüfmaschine betrug 5 Hz, alle 0,2 Sekunden wird also im Ausgabefile die aktuelle Kraft F sowie die aktuellen lokalen sowie der globale Verschiebeweg(e) in einer neuen Zeile dargestellt. Um die inkrementelle Relativverschiebung Δw_{Netto} zwischen zwei Signalen zu erhalten wird das w_{Netto} der nächsten Zeile von dem der aktuellen Zeile abgezogen. Dasselbe gilt für die relative Kraftänderung ΔF zwischen zwei Signalen. Zur Ermittlung des inkrementellen K_{ser} bildet man schließlich den Quotienten aus ΔF und Δw_{Netto} , siehe Gl. (4.32):

$$\Delta K_{\text{ser}} = \frac{\Delta F}{\Delta w_{\text{Netto}}} \quad (4.32)$$

Die Steifigkeit K_{ser} variiert im Verlauf der Prüfung (siehe Diagramm 4-5 (a)). Um aussagekräftige Werte zu erhalten wird nur der Bereich mit linearer Kraftsteigerung bzw. konstantem K_{ser} betrachtet. Mithilfe eines K_{ser} -Zeilen-Diagramms, dargestellt in Diagramm 4-5 (a), kann der Bereich mit weitgehend konstantem K_{ser} eingeschränkt werden.



(a)



(b)

Diagramm 4-5: (a) Beispiel eines K_{ser} -Zeilen-Diagramms; die beiden vertikalen Linien grenzen jenen Bereich ein in dem K_{ser} weitgehend als konstant betrachtet werden kann
(b) dazugehöriges Kraft-Weg-Diagramm; die vertikalen Linien aus (a) sind hier als Stern im linear-elastischen Bereich des Diagramms dargestellt

Im Kraft-Weg-Diagramm 4-5 (b), ist zu sehen, dass die Prüfmaschine zuerst einen Weg von ca. 3,5 mm zurücklegt bis ein Lastanstieg und sich weiters ein linear-elastisches Verhalten einstellt. Die vertikalen Linien in (a) sind in (b) als sternförmiges Zeichen eingetragen. Auf Basis dieser Zeilen-Eingrenzung eines annähernd konstanten K_{ser} -Wertes kann mit einer Regressionsanalyse, aus den Spaltenwerten von F und w_{Netto} , K_{ser} berechnet werden. Verwendet wurde dafür die RGP-Funktion in Microsoft Excel, basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate.

4-5.2.4 Anpassung des Hübner-Modells und Fazit

Basierend auf den Ergebnissen von Versuchsreihe 2 nach Tabelle 4-7 können mehrere Erkenntnisse in die bisherigen Modelle eingearbeitet werden:

Adaptierung Eindrehwiderstand

Zusätzlich zu den Ergebnissen in Versuchsreihe 1 stellte sich heraus, dass beide Vollquerschnitte, unabhängig vom Durchmesser, bei einer Kombination von

- Schneidnuten
- 1 mm Gewindeeinschnitt
- Öl als Gleitmittel
- kein zu starkes Anziehen der Schraubmuttern beim Fixieren des Prüfkörpers
- bei einer Einschraublänge von 50 mm unter dem Eindrehwiderstand von 150 Nm geblieben sind.

Adaptierung des Hübner Modells

Mit den Ergebnissen zur Ausziehfestigkeit f_{ax} aus Versuchsreihe 2 erhält der untersuchte Bereich von Hübner (2013b), bestätigt durch Reichinger (2017), zwei zusätzliche Stützstellen (Köberl 44 bzw. 72 siehe Diagramm 4-6) für die Durchmesser $d = 44$ bzw. 72 mm. Dies ist insofern von Bedeutung da es sich um sehr große Durchmesser handelt, ein großer Durchmesserbereich kann dadurch abgedeckt werden.

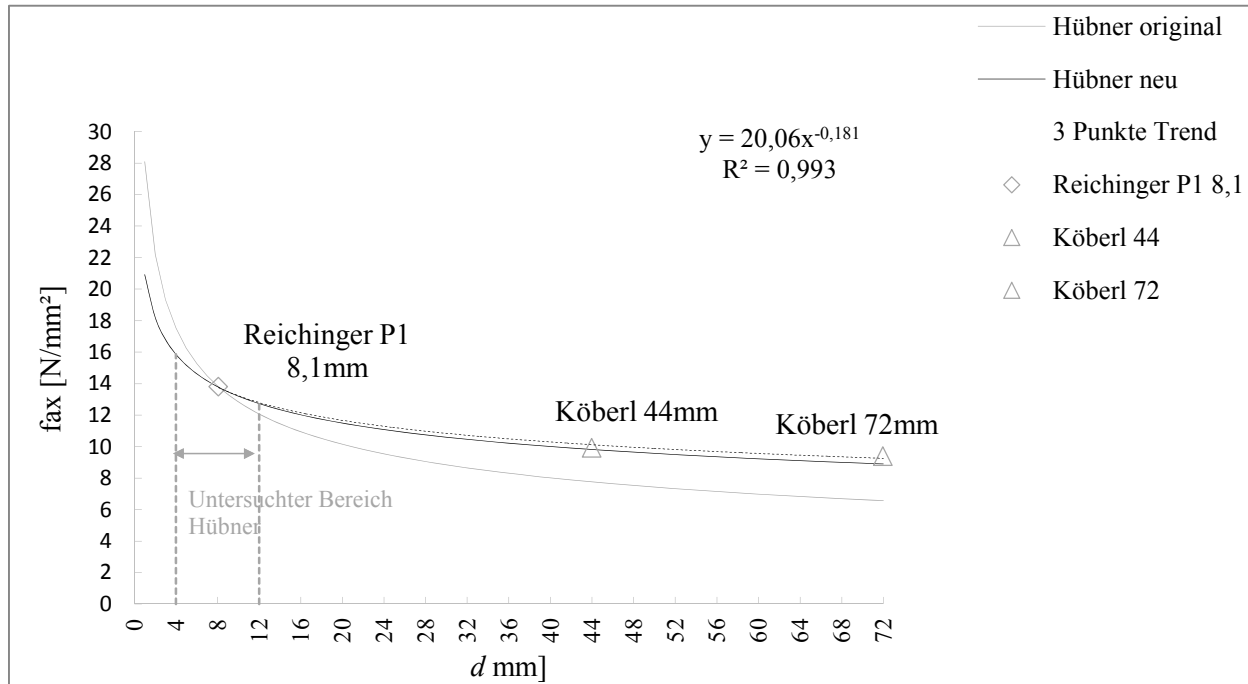


Diagramm 4-6: Adaptierung des Hübner - Modells zur Ausziehfestigkeit f_{ax} anhand der neuen Stützstellen Köberl 44 bzw. 72

Wie in Diagramm 4-6 dargestellt ist der Originalverlauf des Hübner-Modells nach Gl. (4.30) dem Verlauf der 3-Punkte Trendlinie, bestehend aus Reichinger P1 8,1 (2017), Köberl 44 und 72, angeglichen worden. Es fällt auf, dass das ursprüngliche Modell die Festigkeiten im Durchmesserbereich 40 - 70 mm konservativer bewertet als die Ergebnisse aus Versuchsreihe 2 (siehe Tabelle 4-6). Mit der Adaptierung des Modells nach Gl. (4.33) kommt die Berechnung den realen Festigkeitswerten näher.

$$f_{ax,mean} = \frac{1}{\pi} \cdot 1,78 \cdot 10^{-3} \rho_{mean}^{1,6} d^{-0,2} \begin{cases} 1 - 0,006(30^\circ - \alpha) & \text{für } 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \\ 1 & \text{für } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4.33)$$

Tabelle 4-6: *Ergebnisse der Versuchsreihe 2, Auszieh Widerstand R_{ax} , Ausziehfestigkeit f_{ax} und Steifigkeit K_{ser}*

		n	max	min	mean	Stabw.	COV [%]
d = 44 mm	R_{ax} [kN]	5	99,52	75,46	89,18	9,47	10,6
	f_{ax} [N/mm ²]	5	11,08	8,40	9,93	1,05	10,6
	K_{ser} [N/mm]	5	198.376	159.896	177.186	16.958	9,6
d = 72 mm	R_{ax} [kN]	5	142,12	121,65	131,73	7,39	5,6
	f_{ax} [N/mm ²]	5	10,13	8,67	9,39	0,53	5,6
	K_{ser} [N/mm]	5	203.231	186.255	191.162	6.981	3,7

Die Ergebnisse aus Versuchsreihe 2 sind in Tabelle 4-7 aufgelistet.

Tabelle 4-7: *Eigenschaften, Abmessungen und Ergebnisse von Versuchsreihe 2*

Bezeichnung	d	d _{Loch}	l _{ef}	s	Schneid- nuten	Behand- lung	M _{Tor} 50 mm	K _{ser}	f _{ax}	F _{ax}
			[mm]		[-]	[-]	[Nm]	[N/mm]	[N/mm ²]	[kN]
44-01	44	42,0	65	1,0	4	trocken	< 150	172.024	10,00	89,8
44-02	44	42,0		1,0	4	trocken	< 150	190.817	9,47	85,0
44-03	44	42,0		1,0	4	trocken	< 150	198.376	11,08	99,5
44-04	44	42,0		1,0	4	Speiseöl	< 150	159.896	8,40	75,4
44-05	44	42,0		1,0	4	Trocken- seife	< 150	162.818	10,68	95,9
72-01	72	69,9	62	1,08	8	trocken	–	186.255	8,67	121,6
72-02	72	69,9		1,08	8	trocken	350	203.231	9,25	129,7
72-03	72	70,0		1,0	8	trocken	400	186.515	9,54	133,8
72-04	72	69,5		1,25	8	Speiseöl	< 150	190.360	9,36	131,3
72-05	72	69,5		1,25	8	Trocken- seife	250	189.448	10,13	142,1

4-5.3 MODELL RINGHOFER

Ringhofers (2015, 2017) Untersuchungen zu den Auszieheigenschaften von axial beanspruchten Holzschrauben in Norwegischer Fichte (*Picea abies*) für Vollholz, Brettschichtholz und Brettsperrholz konzentrieren sich neben der Ausziehfestigkeit f_{ax} (Probekörper $n = 8000$) auch auf die Verbundsteifigkeit K_{ser} (Probekörper $n = 5500$).

Der für die vorliegende Arbeit benötigte Teil beinhaltet die Ermittlung von K_{ser} in Fichten Vollholz gemäß Gl. (4.34) da derzeit festgelegte Gleichungen zur Berechnung von K_{ser} in Hartlaubhölzern die Rohdichte nicht miteinbeziehen und nur sehr konservative Ergebnisse für den *Gebrauchstauglichkeitszustand SLS* liefern (ETA-110027 2016; ETA-12/0197 2017). In Gl. (4.34) miteinbezogen sind auch Untersuchungen zum Längenkorrekturfaktor von Blaß et al. (2006).

$$K_{ser} = 24,7 \cdot \rho^{0,75} \cdot d^{-1,70} \cdot l_{ef}^{0,60} \quad (4.34)$$

mit

K_{ser}	Ausziehsteifigkeit der Schraubenverbindung [N/mm]
ρ_{12}	Rohdichte [kg/m^3]
d	Nenndurchmesser [mm]
l_{ef}	effektive Gewindelänge [mm]

Nach persönlicher Korrespondenz mit Hrn. Ringhofer und unter Berücksichtigung neuester Erkenntnisse wurde Gl. (4.34) zu Gl. (4.35)

$$K_{ser} = 24,7 \cdot \rho^{0,75} \cdot d^{0,2} \cdot l_{ef}^{0,3} \quad (4.35)$$

umgeformt.

Zur Ermittlung der Verbundsteifigkeit K_{ser} wurde sowohl die Kraft-Weg Beziehung (Abbildung 4-29 (b), K_{ser} dargestellt als Steigungskoeffizient) als auch die Kraftdifferenz $F_{1+i} - F_1$ zur Zeitdifferenz betrachtet siehe Abbildung 4-29 (c). Der Versuchsaufbau der Push-Pull Prüfungskonfiguration ist in Abbildung 4-29 (a) dargestellt. Die Versuchszeit bis F_{max} erreicht wird soll mit 90 ± 30 Sek. eingehalten werden. Die Frequenz des Signals kann manuell eingestellt werden, hier wurde mit 5 Hz geprüft.. Folglich sind die in Abbildung 4-29 (c) auf der Abszisse dargestellten Zeitschritte jeweils 0,20 Sek. lang. Schneidet die Kurve in Abbildung 4-29 (c) die Abszisse ist F_{max} erreicht, idealerweise nach 90 Sek. bzw. 450 Zeitschritten bei 5 Hz.

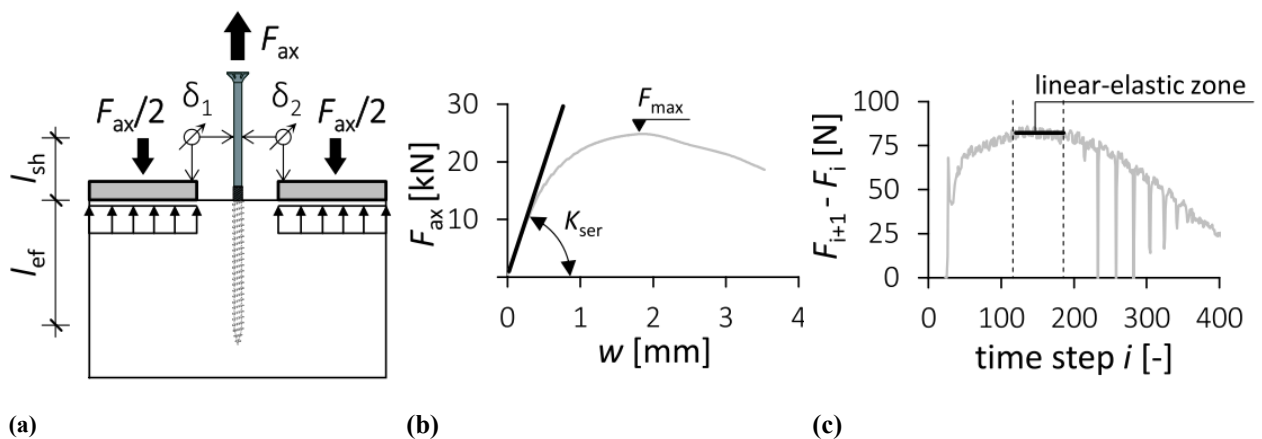


Abbildung 4-29: (a) Push-Pull Prüfungskonfiguration einschl. Messung der relativen Verschiebung
(b) typischer Last-Verformungsverlauf einer axial belasteten Schraube mit K_{ser}
(c) Last- - Zeitstufe gemäß (Brandner R. et al. 2015) und (Ringhofer 2015)

Laut Brandner et al. (2015) wurde zur Bestimmung von K_{ser} nach Abbildung 4-29 (c) der linear-elastische Teil der Testkurve betrachtet. Mithilfe von Gl. (4.36) kann der Weg der Verbindung errechnet werden, es wird nach Abbildung 4-29 (a) von der gemittelten Relativverschiebung der beiden Wegabnehmer δ_1 bzw. δ_2 die Dehnung der Schraube bis zum Wegabnehmer l_{sh} abgezogen.

$$w = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} - w(l_{sh}) = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} - \frac{\sigma_{ax}}{E} \cdot l_{sh} \quad (4.36)$$

mit

$\delta_{1/2}$	Relativverschiebung der Wegabnehmer [mm]
l_{sh}	Weg von der Prüfkörperoberkante bis zum Wegabnehmer [mm]
σ_{ax}	Zugspannung in der Schraube [N/mm ²]
E	E-Modul der Schraube [N/mm ²]

4-5.3.1 Adaptierung des Ringhofer - Modells

Nachdem das vorhandene, parallele System verformungsbasiert ist wird in weitere Folge eine Beziehung zwischen Tragfähigkeit und Steifigkeit benötigt. Das auf Fichte basierende Modell von Ringhofer (2017) und Blaß et al. (2006) liefert für Hartlaubhölzer sowie für den benötigten Durchmesserbereich von 50 - 70 mm keine genauen Ergebnisse.

Ein, für die Weiterentwicklung des Rohrverbinders benötigter Schätzwert der Verbundsteifigkeit K_{ser} muss somit durch die Adaptierung dieses Modells erreicht werden. Basierend auf, für die BauBuche, bereits vorhandenen Ergebnisse aus Reichinger (2017) für Durchmesser 8 mm und den in Versuchsreihe 2 ermittelten K_{ser} - Werten für die Durchmesser 44 bzw. 72 mm ist diese Anpassung möglich.

Reichinger (2017) führte seine Versuche mit einer effektiven Gewindelänge von $l_{ef} = 50$ mm durch, in Versuchsreihe 2 wurde mit $l_{ef} = 70$ mm geprüft. Durch einfaches Umformen und Gleichsetzen des

gesuchten $K_{ser,70}$ mit $K_{ser,50}$ gemäß Gl. (4.35) erhält man Gl. (4.37), da die Rohdichte ρ und der Durchmesser d gleich sind bleibt nur der Längenkorrekturfaktor nach Blaß et al. (2006) um den K_{ser} - Wert für 50 mm auf 70 mm umzurechnen.

$$K_{ser,70} = K_{ser,50} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{ref}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{d}{d_{ref}}\right)^{0.2} \cdot \left(\frac{l_{ef}}{l_{ef,ref}}\right)^{0.3} \quad (4.37)$$

$$K_{ser,70} = K_{ser,50} \cdot \left(\frac{810}{810}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{8,1}{8,1}\right)^{0.2} \cdot \left(\frac{70}{50}\right)^{0.3}$$

Anhand der drei Stützpunkte kann Ringhofers Modell (2017) nach Gl. (4.35) für Hartlaubholz und den benötigten Durchmesserbereich von 40 – 70 mm gemäß Gl. (4.38) adaptiert werden zu:

$$K_{ser} = 10 \cdot \rho^{0,83} \cdot d^{0,69} \cdot l_{ef}^{0,3} \quad (4.38)$$

4-5.4 ZUSAMMENFÜHRUNG DER MODELLE

Mit Gl. (4.39) kann ein Referenzwert $K_{ser,ref}$ für Fichte, basierend auf einer Referenzschraube mit $d_{ref} = 8$ mm, $\rho_{ref} = 420$ kg/m³ und $l_{ef,ref} = 40$ mm, berechnet werden zu:

$$K_{ser,ref} = 24,7 \cdot 420^{0,75} \cdot 8^{0,2} \cdot 40^{0,4} = 15191 \text{ N/mm} \hat{=} 15 \text{ kN/mm} \quad (4.39)$$

Anhand dieses Referenzwertes können $K_{ser,i}$ für das Innengewinde sowie $K_{ser,a}$ für das Außengewinde berechnet werden.

$$K_{ser,a/i} = K_{ser,ref} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{ref}}\right)^{0,83} \cdot \left(\frac{d}{d_{ref}}\right)^{0,69} \cdot \left(\frac{l_{ef}}{l_{ef,ref}}\right)^{0,3} \quad (4.40)$$

mit

$K_{ser,a/i}$	Verschiebemodul des Außen- bzw. Innengewindes [kN/mm]
$K_{ser,ref}$	Verschiebemodul der Referenzschraube gemäß Gl. (4.39) [kN/mm]
ρ_{12}	Rohdichte des Holzes bei 12% Ausgleichsfeuchte [kg/m ³]
$\rho_{ref,12}$	Rohdichte des Referenzholzes bei 12% Ausgleichsfeuchte [kg/m ³]
d	Nenndurchmesser der Schraube [mm]
d_{ref}	Nenndurchmesser der Referenzschraube [mm]
l_{ef}	effektive Gewindelänge [mm]
$l_{ef,ref}$	effektive Gewindelänge der Referenzschraube [mm]

Unter der Annahme, dass K_{ser} mit der Federsteifigkeit eines Stabes gleichgesetzt werden kann (Mahnken 2015), gilt:

$$K_{ser} = \frac{F}{\Delta l} = \frac{E \cdot A}{l} \quad (4.41)$$

mit

K_{ser}	Verschiebemodul [kN/mm]
-----------	-------------------------

F	angreifende Last [kN]
Δl	Verformung in Lastrichtung [mm]

Für die Grenzverformungen Δl des jeweiligen Gewindes wird Gl. (4.41) umgeformt zu:

$$\Delta l_{i/a} = \frac{R_{ax,i/a}}{K_{ser,i/a}} \quad (4.42)$$

In Gl. (4.42) fließen die adaptierten Modelle zur Ausziehtragfähigkeit R_{ax} gemäß Hübner (2013b) nach Gl. (4.33) und zur Verbundsteifigkeit K_{ser} laut Ringhofer (2017) nach Gl. (4.38) ein.

Wie bereits in Abschnitt 4-3.2.2 erwähnt setzt ein paralleles System voraus, dass sowohl das Innen- als auch das Außengewinde dieselbe Verformung erfährt. Da die Grenzverformungen beider Gewinde aufgrund unterschiedlicher Durchmesser und Gewindelängen nie gleich sind stellt die Grenze eines linear-elastischen ideal-spröden parallelen Systems immer die kleinere der beiden Grenzverformungen dar. Der erste Querschnittsteil versagt wenn seine Grenzverformung erreicht wird, danach kann nur noch der Restquerschnitt Lasten aufnehmen. Diese konservative Modellannahme wurde bewusst gewählt, der realistische Verlauf bei Belastung bis zur Traglast wurde in 4-3.2.2 näher erläutert. Unter der Annahme, dass Außen- und Innenquerschnitt die gleiche Verformung erfahren gilt nach Gl. (4.43):

$$\begin{aligned} K_{ser,ges} &= K_{ser,a} + K_{ser,i} \\ R_{ax,a/i} &= \frac{K_{ser,a/i}}{K_{ser,ges}} \cdot F_{ax} \end{aligned} \quad (4.43)$$

Ziel einer Optimierung ist es die Grenzverformungen der Gewinde so anzupassen, dass beide Gewinde maximal ausgenutzt werden können.

Um einen Rohrverbinder mit Innengewinde überhaupt als sinnvoll betrachten zu können, soll die kombinierte Traglast beider Gewinde zum Zeitpunkt der kleineren Grenzverformung um mindestens 20 % größer sein als die größte Traglast des jeweiligen Gewindes, siehe Gl. (4.44).

$$R_{ax,ges,lim} \geq 1,2 \cdot \max \{ R_{ax,i}; R_{ax,a} \} \quad (4.44)$$

mit

$R_{ax,ges,lim}$	maximale Ausziehtragfähigkeit eines parallelen Systems [kN]
$R_{ax,i}$	maximale Ausziehtragfähigkeit des Innenquerschnittes [kN]
$R_{ax,a}$	maximale Ausziehtragfähigkeit des Außenquerschnittes [kN]

Der Nutzungsgrad η_{Ges} des Gesamtausziehwerstandes wird definiert durch die limitierte Gesamtausziehkraft eines parallelen Systems $R_{ax,ges}$ geteilt durch die maximale Traglast des Nettoquerschnittes $F_{t,0,Netto}$.

$$F_{t,0,Netto} = A_{Holz,Netto} \cdot f_{t,0} \quad \eta_{ges} = \frac{R_{ax,ges,lim}}{F_{t,0,Netto}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.45)$$

mit

$F_{t,0,Netto}$	maximale Traglast des Nettoquerschnitts des Tragelementes (Holzquerschnitt abzüglich des Querschnittes des Rohrverbinders) [kN]
-----------------	---

$A_{\text{Holz,Netto}}$	Netto-Holzquerschnitt laut Gl. (4.1)
$f_{t,0}$	Zugfestigkeit parallel zur Faser [N/mm ²]
η_{ges}	Nutzungsgrad des Auszieh Widerstandes der Verbindung [%]
$R_{\text{ax,ges}}$	Gesamtausziehungskraft des parallelen Systems [kN]

4-5.5 HOLZVERSAGEN AUF ZUG

Für die benötigten Querschnittsflächen zur Ermittlung der maximalen Traglast auf Zug $F_{t,0,i/a}$ wird auf Abschnitt 4-2.1 verwiesen. Die benötigten Flächen $A_{\text{Holz},i/a}$ ergeben sich nach Gl. (4.2) und (4.3).

Die jeweils maximale Traglast auf Zug $F_{t,0,i/a}$ ermittelt sich aus:

$$F_{t,0,i/a} = f_{t,0} \cdot A_{\text{Holz},i/a} \quad (4.46)$$

mit

$F_{t,0,i/a}$	maximale Traglast auf Zug für Innen- bzw. Außenquerschnitt [N]
$f_{t,0,\text{mean}}$	Zugfestigkeit parallel zur Faser [N/mm ²]
$A_{\text{Holz},i/a}$	Querschnittsflächen für Innen- bzw. Außenquerschnitt [mm ²]

Die Nutzungsgrade $\eta_{\text{Zug},i}$ bzw. $\eta_{\text{Zug},a}$ ermitteln sich aus:

$$\eta_{\text{zug},i/a} = \frac{R_{\text{ax},i/a,\text{lim}}}{F_{t,0,i/a}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.47)$$

mit

$\eta_{\text{zug},i/a}$	Nutzungsgrad des inneren bzw. äußeren Holzquerschnittes auf Zug [%]
$R_{\text{ax},i/a,\text{lim}}$	limitierte Traglast zur Einhaltung eines parallelen Systems [N]
$F_{t,0,i/a}$	maximale Traglast auf Zug laut Formel (4.46) [N]

4-5.6 STAHLVERSAGEN AUF ZUG

Für die benötigte Nettoquerschnittsfläche des Stahlquerschnittes $A_{\text{Stahl,Netto}}$ wird Gl. (4.4) herangezogen.

$$R_{y,\text{mean}} = f_{y,\text{mean}} \cdot A_{\text{Stahl,Netto}} \quad (4.48)$$

mit

$R_{y,\text{mean}}$	maximale Traglast des Rohrverbinders auf Zug [N]
$f_{y,\text{mean}}$	Mittelwert der Stahl - Streckgrenze [N/mm ²]
$A_{\text{Stahl,Netto}}$	Querschnittsfläche des Rohrverbinders abzüglich der Gewindefläche nach Gl. (4.4)

Der Wirkungsgrad $\eta_{\text{Stahl,Zug}}$ wurde in der Rechnung bewusst für den Bereich $1,0 < \eta_{\text{Stahl,Zug}} < 1,2$ festgelegt; zumal ein duktiler Stahlversagen dem spröderen Holzversagen vorgezogen wird:

$$\eta_{\text{Stahl,Zug}} = \frac{F_{t,0,\text{mean,Netto}}}{R_{y,\text{mean}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.49)$$

$\eta_{\text{Stahl,Zug}}$

Wirkungsgrad der Rohrwand auf Zug

$F_{t,0,\text{mean,Netto}}$

maximale Traglast des Netto-Holzquerschnittes [N]

4-6 GEOMETRIEFESTLEGUNG UND WERKPLANUNG

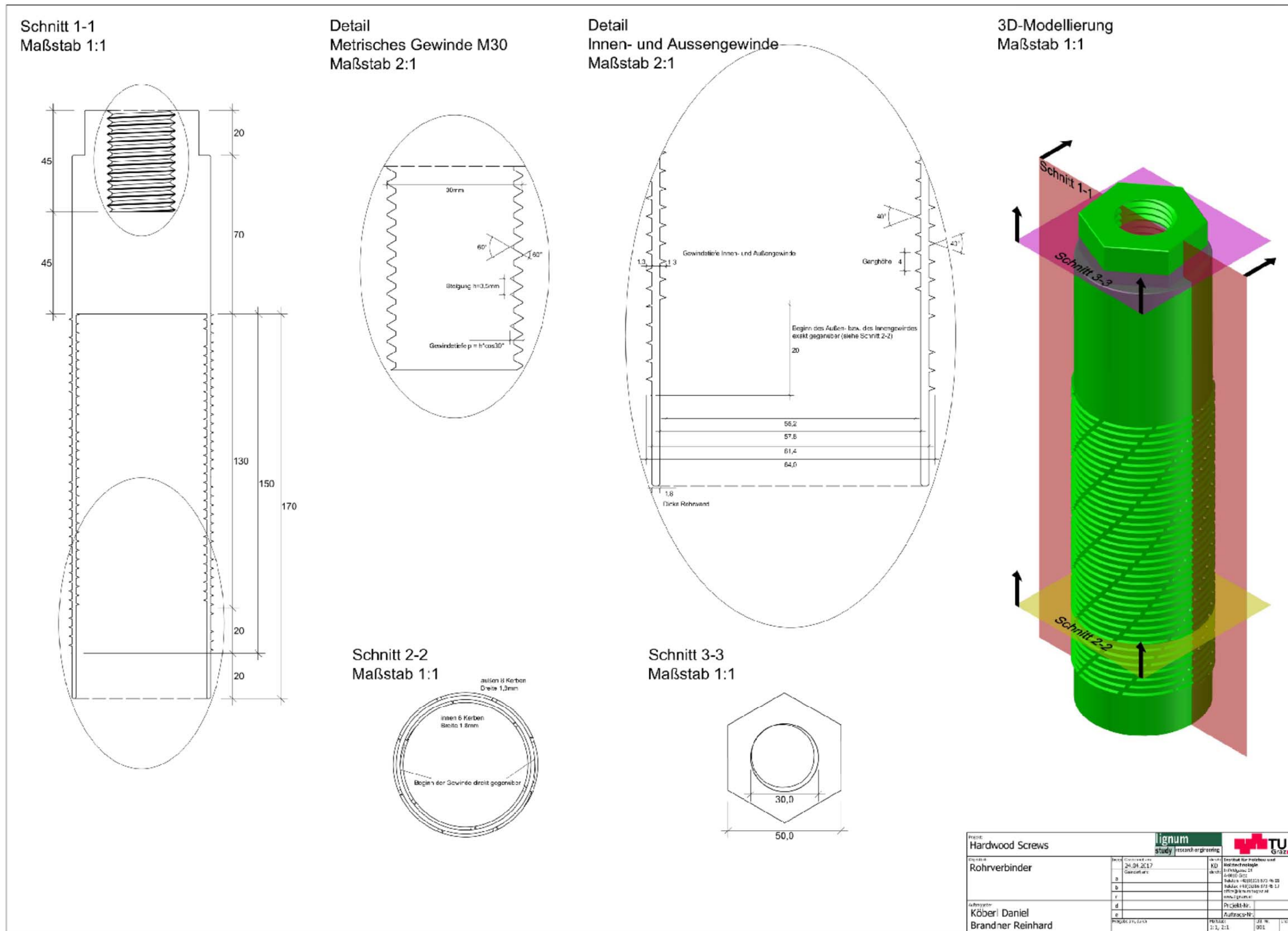
In diesem Abschnitt werden die Materialeigenschaften und Geometrieabmessungen eines Rohrverbinders sowie des Prüfkörpers festgelegt und in Tabelle 4-8 aufgelistet.

Tabelle 4-8: *Materialeigenschaften und Geometrieabmessungen des Prüfkörpers und des Rohrverbinders*

Variable	Beschreibung	Einheit	Ausführung
Holzabmessungen und Materialkennwerte			
b	Breite Holzquerschnitt	[mm]	80
h	Höhe Holzquerschnitt	[mm]	80
$\rho_{12,\text{mean}}$	char. Wert der Rohdichte von BauBuche	[mm]	810
$f_{t,05}$	char. Wert der Zugfestigkeit parallel zur Faser von BauBuche	[N/mm ²]	67,3
$f_{v,05}$	char. Wert der Schubfestigkeit von BauBuche	[N/mm ²]	6,6
$G_{0,\text{mean}}$	Schubmodul parallel zur Faser	[N/mm ²]	850
Rohrverbinder Abmessungen und Materialkennwerte			
d	Außendurchmesser	[mm]	64
d_1	Innendurchmesser	[mm]	55,2
t	Netto-Wandstärke	[mm]	1,8
$l_{ef,a}$	Gewindelänge Außen	[mm]	150
$l_{ef,i}$	Gewindelänge Innen	[mm]	130
s	Flankentiefe	[mm]	1,3
p	Ganghöhe der Gewinde	[mm]	4,0
φ	Flankenneigung	[°]	40
$f_{y,\text{mean}}$	Mittelwert der Stahl - Streckgrenze	[N/mm ²]	1.100
G_{mean}	Schubmodul Stahl	[N/mm ²]	80.769
E_{mean}	E - Modul Stahl	[N/mm ²]	210.000

Tabelle 4-9 *Tabelle 4-9: Ergebniswerte Rohrverbinder in BauBuche gemäß den Abmessungen und Eigenschaften aus Tabelle 4-8*

Variable	Beschreibung	Einheit	Ausführung
Holzquerschnitte und Ausnutzungsgrad			
$A_{\text{Holz,Brutto}}$	Brutto - Holzquerschnitt	[mm ²]	6400
$A_{\text{Holz,Netto}}$	Netto - Holzquerschnitt	[mm ²]	5576
$A_{\text{Holz,Außen}}$	Außen - Holzquerschnitt	[mm ²]	3183
$A_{\text{Holz,Innen}}$	Innen - Holzquerschnitt	[mm ²]	2393
$\eta_{\text{Holz,QS}}$	Ausnutzungsgrad Holzquerschnitt	[%]	87,0
Stahlquerschnitt			
$A_{\text{Stahl,Netto}}$	Netto - Stahlquerschnitt	[mm ²]	337
Ergebnisse der Tragfähigkeit und Steifigkeit			
$R_{\text{ax,a,Hübner}}$	Ausziehtragfähigkeit Außengewinde nach Hübner 2013	[kN]	220,5
$R_{\text{ax,i,Hübner}}$	Ausziehtragfähigkeit Innengewinde nach Hübner 2013	[kN]	169,7
$R_{\text{ax,ges,Hübner}}$	Ausziehtragfähigkeit Gesamt nach Hübner 2013	[kN]	390,2
$K_{\text{ser,a}}$	Verbundsteifigkeit Außengewinde	[kN/mm]	161,5
$K_{\text{ser,i}}$	Verbundsteifigkeit Innengewinde	[kN/mm]	139,7
$K_{\text{ser,ges}}$	Verbundsteifigkeit Gesamt	[kN/mm]	301,2
w_a	Grenzdehnung Außengewinde	[mm]	1,37
w_i	Grenzdehnung Innengewinde	[mm]	1,22
$R_{\text{ax,a,lim}}$	aufgrund der Grenzdehnung limitierte Tragfähigkeit Außen	[kN]	196,2
$R_{\text{ax,i,lim}}$	aufgrund der Grenzdehnung limitierte Tragfähigkeit Innen	[kN]	169,7
$R_{\text{ax,ges,lim}}$	Gesamttragfähigkeit unter Berücksichtigung der Grenzdehnung	[kN]	366,0
$\eta_{\text{Holz,Brutto}}$	Ausnutzungsgrad des Brutto - Holzquerschnittes	[%]	97,6
$\eta_{\text{Holz,Netto}}$	Ausnutzungsgrad des Netto - Holzquerschnittes	[%]	87,0



Projekt: Hardwood Screws		lignum study research engineering		TU Graz	
Titel: Rohrverbinder	Datum: 24.04.2017	KD: []	Projekt-Nr.: []	Blatt-Nr.: []	Blatt-Gesamt: []
Autoren: Köberl Daniel Brandner Reinhard	Projektleiter: []	Prüfer: []	Prüfung: []	Prüfung: []	Prüfung: []

4-7 VERSUCHSREIHE 3

4-7.1 HERSTELLUNGSPROZESS ROHRVERBINDER

Nach der Festlegung der Geometrie des Rohrverbinders und der Erstellung eines Werkplanes laut Abschnitt 4-6 musste überlegt werden wie eine einfache Fertigung durchführbar ist. Der dünnwandige Querschnitt in Kombination mit der hohen Stahlfestigkeit kann zu Problemen wie Vibration bei der Fertigung oder einem Verziehen des Querschnittes bei Wärmeentwicklung führen. Nach einer ersten 3-D – Modellierung des Verbinders ergab sich ein Kontakt zum Institut für Fertigungstechnik der TU Graz. Da jedes Produkt bevor es in Serie gehen kann auch in der Fertigung eine Lernkurve besitzt war die Kooperation mit dem, vorwiegend im Maschinenbau ansässigen, Institut für Fertigungstechnik eine wertvolle. Dieser interdisziplinäre Abschnitt zwischen Maschinenbau und konstruktivem Holzbau war für beide Seiten lehrreich und interessant.

Im Zuge der Fertigung von 14 Rohrverbindern war die Frage der Gewindeschärfe von Bedeutung. Ist die Flankenspitze sehr scharf bricht sie ab, die Spitze ist noch scharf aber der Nenndurchmesser verringert sich um 1 mm. Bei einem geplanten Gewindeeinschnitt s von 1 mm hat diese Veränderung große Auswirkungen, der Verbinder schneidet somit nur noch 0,5 mm ein. Die Entscheidung fiel auf vier Verbinder mit scharfem Gewinde und zehn mit einer etwas abgeflachten Flankenspitze, siehe ABBXXX.

In folgenden Abbildungen XXX (A) bis () sind mehrere Details des Fertigungsprozesses dargestellt.

Abbildung 4-30: (a)
 (b)
 (c)
 (d)
 (e)
 (f)

4-7.2 PRÜFKÖRPER

Für Prüfserie 3 wurde zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Verbindung ein Pull – Pull Prüfaufbau gewählt, dabei wird der Verbinder von beiden Seiten Stirnseitig eingedreht. Für den Prüfkörper aus BauBuche wurde vorerst um Aufspalten zu vermeiden wieder der gleiche Querschnitt von $A = 160 \times 160 \text{ mm}^2$ wie in Versuchsreihe 1 und 2 gewählt. Die Länge des Prüfkörpers wurde mit 600 mm festgelegt. Es wurden vier Prüfkörper gefertigt.

4-7.2.1 Bohrkronen

Eine genaue Fertigung der Ringnut war wichtig jedoch in den ersten Versuchen schwer zu bewerkstelligen. Die Gesamtbreite $t + 2s$ beträgt 4,4 mm, um einen Gewindeeinschnitt s von 1 mm Außen sowie Innen zu erhalten wird eine Ringnutbreite von 2,4 mm benötigt. Eine Schwierigkeit war es mit Holz in dieser Genauigkeit zu arbeiten, auf den Abbildungen XXX ist der Prüfaufbau dargestellt um diese Genauigkeit zu erhalten.

Ein weiteres Erschwernis war die Produktion einer Bohrkronen in dieser Wandstärke, die Schränkung der Schneidzähne durfte maximal 2,4 mm breit sein. Die Rohrwand musste somit sehr dünn ausgeführt werden um den Abtransport der Holzspäne zu gewährleisten. Bei Erwärmung besteht bei einer solch dünnen Rohrwand die Gefahr eines verzogenen Querschnitts. Eine deutsche Firma erklärte sich bereit die Bohrkronen zu Produzieren. Erst nach mehrmaligen nachschleifen der Zähne beim Werkzeugschleifer Salmhofer in Hausmannsstätten konnte die gewünschte Genauigkeit eingehalten werden.

Im Zuge der Bohrung musste, Stirnseitig befestigt, eine Lünette als Führung installiert werden um Bewegung vertikal zur Eindrehrichtung auszuschließen. Ein Druckluftanschluss an der Bohrkronen verhilft die Holzspäne abzutransportieren.

4-7.3 DURCHFÜHRUNG DER VERSUCHE

4-7.3.1 Eindrehen der Verbinder

Bei der Applikation des Rohrverbinders war auf ein exaktes Zentrisches eindrehen zu achten. Ein Drehmomentschlüssel wie in den vorhergegangenen Versuchsreihen 1 und 2 wurde aufgrund seiner Querkraftbelastung nicht bevorzugt. Mit einem in Abbildung XXX dargestellten Drehmomentvervielfältiger konnte ein kontinuierliches und vor allem zentrisches Eindrehen bewerkstelligt werden. Ein Planetengetriebe bewirkt bei einem Eingangsdrehmoment von 50 Nm ein Ausgangsdrehmoment von 600 Nm. Ein Abstützfuß verhindert eine Verdrehung, führt jedoch zu Querkraften welche mit dem in Abbildung XXX dargestellten Prüfaufbau entgegengewirkt werden konnte.

4-7.3.2 Prüfung

Die Pull – Pull Versuche wurden an der Zugprüfmaschine *lignum_z_850* durchgeführt. In die beidseitig eingedrehten Verbinder wurde jeweils eine Gewindestange M 30 10.9 eingedreht. Der Prüfaufbau ist in Abbildung XXX dargestellt.

Um einen Unterschied feststellen zu können wurde immer ein Verbinder mit scharfen Gewinde und einer stumpfen Gewinde eingedreht.

4-7.4 ERGEBNISSE UND FAZIT

Auffallend war, dass immer der stumpfe Verbinder versagte. Da drei von vier Querschnittsprüfungsaufnahmen aufwiesen ist die Überlegung, dass das stumpfe Gewinde nicht einschneidet sondern eher verdrängt und somit mit der Applikation erhöhte Querschnittsspannungen in den Prüfkörper eingebracht werden, berechtigt. Obwohl das scharfe Gewinde nur 0,5 mm einschneidet wurden, ohne zu Versagen, maximal 295 kN erreicht.

Prüfkörper - Bezeichnung	Gewindetyp		Traglast [kN]	Versagen
	West	Ost		
RV 1	stumpf	scharf	275,19	Aufspalten
RV 2	stumpf	scharf	294,00	Schubbruch
RV 3	scharf	stumpf	277,60	Aufspalten + Schubbruch
RV 4	scharf (schief)	stumpf	243,60	kleine Risse + Schubbruch

KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

ANHANG A VERZEICHNISSE

A-1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Auflistung einiger ebener Fachwerktragsysteme mit langen Zugstäben und kurzen Druckstäben (Mönck und Rug 2015)	3
Abbildung 2-2: Hallentragwerk aus Buchenfurnierschichtholz (BauBuche) (Peters 2016)	4
Abbildung 2-3: (a) Hängemodell der Sagrada Família von Antoni Gaudí (Gaudí) (b) Hängemodell von Otto Frei (Frei)	4
Abbildung 2-4: Bahnhof Oriente Lissabon (Calatrava 1994)	5
Abbildung 2-5: (a) Baumstruktur der Stützen, Flughafen Stuttgart (Flughafen Stuttgart 2004) (b) Montagestoß (Flughafen Stuttgart 2004)	5
Abbildung 2-6: Canary Wharf Station in London (a) (Young), (b) (Young), (c) (Young), (d) (Young)	6
Abbildung 2-7: Tensegrity-Systeme: offene ebene (links), offene räumliche (mittig), geschlossene räumliche Systeme (rechts) (Brandner 2014)	7
Abbildung 2-8: Prüfkörper zur Bestimmung der E-Module, der Poissonzahlen und der Festigkeiten auf Druck (links) sowie auf Zug in Faserrichtung (unten) und quer zur Faser (rechts) (Niemz et al. 2015)	10
Abbildung 2-9: Verbindungslösung Zuglaschenstoß mit Stabdübel und innenliegenden Stahlblechen: Längsansichten	21
Abbildung 2-10: Definition der Bruchlinien infolge Scherversagens $L_{net,v}$ oder infolge Zugversagens des Holzes $L_{net,t}$ (ON EN 1995-1-1 2015)	26
Abbildung 2-11: Modell einer Stabdübelverbindung mit den eingezeichneten, auf Abscheren (vertikal) und Zug (horizontal) belasteten Flächen	26
Abbildung 2-12: Verbindungslösung Schraubengruppe im Hirnholz $d = 6\text{mm}$, Längs- und Queransicht	28
Abbildung 2-13: Verbindungslösung Schraubengruppe im Hirnholz $d = 8\text{mm}$, Längs- und Queransicht	29
Abbildung 2-14: Verbindungslösung mit über Stirn eingeklebten Blechen: Längs- und Querschnitt	34
Abbildung 2-15: Verbindungslösung Zuglaschenstoß: Längsansichten	38
Abbildung 3-1 (a) Bohrkronen (Merk Timber GmbH 2017), (b) MGA Typ (Merk Timber GmbH 2017)A, (c) MGA Stützenfuß (Merk Timber GmbH 2017)	55
Abbildung 3-2: Gewindegeometrie MGA Stützenfuß (Z-9.1-264 2016)	55
Abbildung 3-3: (a) Blockscheren einer Verbindungsmittelgruppe bei einer Last von 450 kN, (b) Prüfkörper (Schwaner et al. 2009)	58

Abbildung 3-4: (a) HSK Rohrverbinder (TiComTech HSK 2010) (b) HSK Rohrverbindung, längs aufgeschnitten (TiComTech HSK 2010) (c) Anwendungsbeispiel HSK Rohrverbinder (TiComTech HSK 2010)	59
Abbildung 3-5: (a) Rampa Muffe, Modellfoto (Rampa Muffe 1 2017) (b) Rampa Muffe Typ SKL (Rampa Muffe 2 2017)	60
Abbildung 3-6: Geometrieparameter einer Holzschraube (Pöll 2017)	60
Abbildung 4-1: Geometrische und konstruktive Überlegungen zu den verschiedenen Bestandteilen eines geschraubten Rohrverbinders	64
Abbildung 4-2: Holz-Nettoquerschnitt $A_{\text{Holz,Netto}}$ (schraffiert), Bruttoquerschnitt des Rohrverbinders $A_{\text{Stahl,Brutto}}$ definiert durch die beiden Durchmesser d und d_1	66
Abbildung 4-3: Definierte Holz-Querschnittsflächen schraffiert (a) Holz-Außenquerschnitt $A_{\text{Holz,a}}$ (b) Zapfenquerschnitt $A_{\text{Holz,j}}$	66
Abbildung 4-4: (a) Querschnittsform des Gewindeteiles einer Holzschraube bei $x = p/2$ (Ringhofer 2017) (b) schraffiert der verwendete Verbinderquerschnitt nach Gl. (4.4)	67
Abbildung 4-5: Auflistung von Einwirkungen / Versagensszenarien mit zugehörigen Materialien und Parametern und ihre Beziehungen zueinander (Rechenansätze auszugsweise)	68
Abbildung 4-6: Prinzipielle Unterschiede zwischen einem seriellen (links) und einem parallelen System (rechts)	69
Abbildung 4-7: Vergleich des vereinfachten parallel wirkenden Modells eines Rohrverbinders (oben) mit dem realen Tragverhalten (unten)	71
Abbildung 4-8: Belastungs-Verdrehungsrelation an einer Welle (Hibbeler und Wauer 2010- S.237)	72
Abbildung 4-9: Torsion Holz, Aufteilung in Bereiche	75
Abbildung 4-10: Außenquerschnitt auf Torsion beansprucht, grün markiert die vereinfachende Annahme als Kreisring	76
Abbildung 4-11: Innerer Querschnitt auf Torsion beansprucht	76
Abbildung 4-12: Radiale Schubspannungsverteilung und Verwölbung eines quadratischen Querschnittes (Hibbeler und Wauer 2010)	78
Abbildung 4-13: Finite Elemente Netz im Querschnitt, numerische Berechnung	79
Abbildung 4-14: Vereinfachte Betrachtung des Holz-Außenquerschnittes (a) quadratischer Querschnitt (b) Hohlprofilquerschnitt (c) Kreisquerschnitt (a) – (c) gemäß Hibbeler und Wauer (2010)	80
Abbildung 4-15: Querschnittsfläche des Holzzapfens (Hibbeler und Wauer 2010)	81
Abbildung 4-16: Vergleich der Eindrehtiefen der unterschiedlichen Durchmesser bei gleicher Schlankheit	83
Abbildung 4-17: Verbinder Vollquerschnitt (a) $d = 72$, (b) 44 mm	85
Abbildung 4-18: Bohr- und Fräsversuche des Sackloches (a) verbranntes Holz/ verklemmter Bohrer nach Bohrversuchen mit Forstnerbohrer (b) wegnehmen von Holz mit herkömmlichen Holzbohrer (c) Rutschen des Keilriemens der Standbohrmaschine	86

Abbildung 4-19: Fräsen mittels Roboter (a) verbranntes Holz/ verklemmter Bohrer nach Bohrversuchen mit Forstnerbohrer (b) wegnehmen von Holz mit herkömmlichen Holzbohrer (c) Rutschen des Keilriemens der Standbohrmaschine 86

Abbildung 4-20 (a) Versuchsaufbau für Verbinder $d = 44$ mm (b) Drehmomentschlüssel bis 750 kN und Stecknüsse mit 55 bzw. 27 mm Schlüsselweite 87

Abbildung 4-21: (a) Eintauchen in MicroGleit-Suspension (b) Trocknung der Beschichtung mit MicroGleit (c) Abnutzung beim Applizieren (d) In Öl getränktes Bohrloch 88

Abbildung 4-22: (a) Quersugrisse infolge geringer Randabstände und 2mm Gewindeeinschnitt (b) Verstopfter Gewindegang (c) Spiral-förmige Einschnitte gefüllt mit Holzspänen 89

Abbildung 4-23: Unterschiede beim Gewindeeinschnitt 2 mm (a und c) zu 1 mm (b und d) 90

Abbildung 4-24: Versagensbild Rohrquerschnitt auf Torsion, die beanspruchte Fläche ist grün markiert 93

Abbildung 4-25: (a) Prüfkörper mit eingedrehtem Vollquerschnitt, der Verbinder ragt 10 mm aus dem Bohrloch heraus (b) Schubversagen der Holzfasern in der Umrisslinie des Vollquerschnittes 98

Abbildung 4-26: Prüfkfiguration zur Ermittlung des Auszieh Widerstandes F_{ax} bzw. der Ausziehfestigkeit f_{ax} nach Blaß et al. (2006) 99

Abbildung 4-27: Prüfaufbau der Versuchsreihe 2, Druckversuch zur Bestimmung der Auszieh Kenngrößen 100

Abbildung 4-28: Herausragender Verbinderabschnitt plus HPL-Platte unterteilt in Bereiche zur Ermittlung von Δl 101

Abbildung 4-29: (a) Push-Pull Prüfungskonfiguration einschl. Messung der relativen Verschiebung (b) typischer Last-Verformungsverlauf einer axial belasteten Schraube mit K_{ser} (c) Last- - Zeitstufe gemäß (Brandner R. et al. 2015) und (Ringhofer 2015) 107

A-2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Nutzungsgrade η einiger typischer Verbindungen im Holzbau (Schickhofer 2006a) 2

Tabelle 2-2: Mittlere Kennwerte merkmalsfreier Kleinproben („clear wood“) 11

Tabelle 2-3: Verhältniswerte merkmalsfreier Kleinproben („clear wood“) für die Holzarten Rotbuche, Birke und Robinie 11

Tabelle 2-4: Charakteristische Kennwerte für Proben in Bauteilgröße („Timber“) 12

Tabelle 2-5: Verhältniswerte für Proben in Bauteilgröße („Timber“) für die Holzarten Rotbuche, Birke und Robinie 12

Tabelle 2-6: Übersicht und Vergleich der Kennwerte von Timber, Hartlaubholzprodukten und Holzprodukten aus Fichte - in den Fußnoten sind die jeweiligen Referenzquerschnitte aufgelistet 15

Tabelle 2-7: Nennwerte der Streckgrenze $f_{y,b}$ und der Zugfestigkeit $f_{u,b}$ von Schrauben (ON EN 1993-1-8 2012) 19

Tabelle 2-8: Nennwerte der Streckgrenze f_y und der Zugfestigkeit f_u für warmgewalzten Baustahl (ON EN 1993-1-1 2014) 19

Tabelle 2-9:	Eingabeparameter für die Stabdübelverbindung.....	22
Tabelle 2-10:	Eingabeparameter für die Schrauben gruppe im Hirnholzverbindung mit $d = 6\text{mm}$ und $d = 8\text{mm}$	30
Tabelle 2-11:	Eingabeparameter für die Verbindung mit eingeklebten Gewindestangen	32
Tabelle 2-12:	Eingabeparameter für die Verbindung mit eingeklebten Blechen.....	35
Tabelle 2-13:	Eingabeparameter für die Verbindung mittels Schrägverschraubung und außenliegenden Zuglaschen	39
Tabelle 2-14:	Übersicht der wichtigsten Eingangparameter einer Stabdübelverbindung für die behandelten Holzwerkstoffe	42
Tabelle 2-15:	Übersicht der Ergebniswerte einer Verbindungslösung mit Stabdübel in den untersuchten Holzprodukten, der Vollständigkeit halber sind Dübelanzahl $n_{\text{Dübel}}$ sowie Abstand in Faserrichtung a_1 inbegriffen	43
Tabelle 2-16:	Übersicht der wichtigsten Eingangparameter der Hirnholz-Schraubenverbindung für die behandelten Holzwerkstoffe	44
Tabelle 2-17:	Übersicht der Ergebniswerte einer Hirnholz-Schraubenverbindung mit $d = 6\text{mm}$ für die untersuchten Holzwerkstoffe.....	44
Tabelle 2-18:	Übersicht der Ergebniswerte einer Hirnholz-Schraubenverbindung mit $d = 8\text{mm}$ für die untersuchten Holzwerkstoffe.....	45
Tabelle 2-19:	Übersicht der wichtigsten Eingangparameter der Verbindungslösung mit ins Hirnholz eingeklebten Gewindestangen für die behandelten Holzwerkstoffe.....	46
Tabelle 2-20:	Übersicht der Ergebniswerte einer Hirnholzverbindung mit eingeklebten Gewindestangen für die untersuchten Holzwerkstoffe.....	47
Tabelle 2-21:	Übersicht der wichtigsten Eingangparameter der Verbindungslösung mit ins Hirnholz eingeklebten, gelochten Blechen für die behandelten Holzwerkstoffe.....	47
Tabelle 2-22:	Übersicht der Ergebniswerte einer Hirnholzverbindung mit eingeklebten, gelochten Blechen für die untersuchten Holzwerkstoffe	48
Tabelle 2-23:	Übersicht der wichtigsten Eingangparameter der Verbindungslösung mittels Schrägverschraubung außenliegender Zuglaschen für die behandelten Holzwerkstoffe	50
Tabelle 2-24:	Übersicht der Ergebniswerte der Verbindungslösung mittels Schrägverschraubung außenliegender Zuglaschen für die behandelten Holzwerkstoffe.....	51
Tabelle 2-25:	Ergebniswerte aller Anschlusslösungen für den Holzwerkstoff Baubuche, aufgelistet nach der Tragfähigkeit.....	52
Tabelle 3-1:	Tragfähigkeit MGA gemäß (Z-9.1-264 2016)	54
Tabelle 3-2:	Vergleich der charakteristischen Ausziehtragfähigkeiten, Merk-Gewindeanschluss (Z-9.1-264 2016) verglichen mit dem EC 5 (ON EN 1995-1-1 2015) und der Schraube Würth ASSY Plus VG (ETA-11/0190 2013)[kN].....	57
Tabelle 3-3:	Eigenschaften Rampe Muffen BL und SKL	61
Tabelle 3-4:	Vergleich Geometrieparameter Rampa-Muffen BL und SKL mit Holzschrauben.....	61

Tabelle 4-1: Wichtige Geometriekennwerte, welche für die Entwicklung eines Rohrverbinders berücksichtigt werden müssen65

Tabelle 4-2: Maximal aufnehmbare Torsionsmomente des Holzproduktes BauBuche bei gegebenem Querschnitt, beim Außenquerschnitt wird $M_{tor,a}$ auf Basis der numerischen Berechnung und des Querschnittes (c) laut Abbildung 4-14 aufgelistet81

Tabelle 4-3: Eindrehwiderstände in [Nm] von Fichte, Buche, BauBuche (Reichinger 2017).....83

Tabelle 4-4: Geometriekennwerte der beiden Vollquerschnitte85

Tabelle 4-5: Eigenschaften, Abmessungen und Ergebnisse von Versuchsreihe 1.....92

Tabelle 4-6: Ergebnisse der Versuchsreihe 2, Auszieh Widerstand R_{ax} , Ausziehfestigkeit f_{ax} und Steifigkeit K_{ser} 105

Tabelle 4-7: Eigenschaften, Abmessungen und Ergebnisse von Versuchsreihe 2105

Tabelle 4-8: Materialeigenschaften und Geometrieabmessungen des Prüfkörpers und des Rohrverbinders 111

Tabelle 4-9: Ergebniswerte Rohrverbinder in BauBuche gemäß den Abmessungen und Eigenschaften aus Tabelle 4-8 112

A-3 Literaturverzeichnis

- Bathon (2008): In Holz eingeklebte Verbindungsmittel aus Metall. FH Wiesbaden.
- baunetzwissen.de (Hg.): Crossrail Station Canary Wharf in London. Hölzerne Gitterkonstruktion mit Membrankissen überwölbt öffentlichen Park. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/geeignetes-dach/objekte/verkehr/crossrail-station-canary-wharf-in-london-4746381>, zuletzt geprüft am 24.10.2017.
- Bejtka, Ireneusz (2005): Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben. Karlsruhe.
- Bertsche (1988): Der Verpressdübel. In: *Bauen mit Holz*.
- Blaß; Bejtka; Uibel (2006): Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbst bohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde. Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe.
- Bossard AG, R. Schmid (2012): Technischer Teil Bossard - Werkstoffe, Schrauben und Muttern.
- Brandner, Reinhard (2014): Gedanken und Erkenntnisse aus der Materialstruktur Holz.
- Brandner, Reinhard (2017): Klebtechnologie und Holzwerkstoffe. Technische Universität Graz.
- Brandner R.; Ringhofer, A.; Grabner M. (2015): Probabilistic Models for the Withdrawal Behaviour of Single Self-Tapping Screws in the Narrow Face of Cross Laminated Timber. Wood Science and Technology.
- Calatrava (1994): Bahnhof Oriente Lissabon. Online verfügbar unter <https://www.pinterest.at/pin/489485053223457231/>, zuletzt geprüft am 23.10.2017.
- Daniels, H. E. (1945): The Statistical Theory of the Strength of Bundles of Threads. I.
- DIN EN 1995-1-1/NA (2013): Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
- ETA 13-0646 (2013): Sierrolam Edelkastanie BSH. MPA Stuttgart.
- ETA-11/0190 (2013): Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmittel-Würth Schrauben. Deutsches Institut für Bautechnik.
- ETA-110027 (2016): fischer Power-Fast screws and fischer construction screws. Screws for use in timber constructions. ETA - Danmark.
- ETA-12/0197 (2017): SWG “Timtec”, “Timtec Isotec” and “Timtec Plus VG” screws. Screws for use in timber constructions. ETA - Danmark.
- ETA-12/0481 (2013): Gewindemuffen mit Außenholzgewinde und metrischem Innengewinde als Verbindungsmittel in Holzbauwerken. ETA-Danmark A/S.
- ETA-14/0354 (2015): Brettschichtholz aus Laubholz – Buchenfurnierschichtholz für tragende Zwecke. Pollmeier.
- Flughafen Stuttgart (2004): Flughafenterminal 3 Stuttgart. Online verfügbar unter <https://www.pinterest.at/pin/373446994077140526/>, zuletzt geprüft am 23.10.2017.
- Frei, Otto: Hängemodell. Online verfügbar unter https://designontopic.files.wordpress.com/2014/01/1604635_10151967434248445_335532559_n.jpg, zuletzt geprüft am 23.10.2017.

- FunderMax (2016): Interior Technik deutsch. E-Modul von Max Compact auf Seite acht. Online verfügbar unter https://www.fundermax.at/fileadmin/redakteure/user_upload/Technische_Information_Interior.pdf, zuletzt geprüft am 02.11.2017.
- Gaudí, Antoni: Hängemodell der Sagrada Familia. Online verfügbar unter <http://dataphys.org/list/gaudis-hanging-chain-models/>, zuletzt geprüft am 23.10.2017.
- Hasslacher Norica Timber (2017): Richtlinie Birken BSH. Online verfügbar unter https://www.hasslacher.com/data/_dateimanager/broschuere/HNT_News_Birke_BSH_DE_Web.pdf, zuletzt geprüft am 25.10.2017.
- Hibbeler, R. C.; Wauer, J. (2010): Technische Mechanik 2 - Festigkeitslehre. 5., überarb. und erw. Aufl., München.
- Hübner, U. (2013a): Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für Lastabtragende Bauteile. Technische Universität Graz.
- Hübner, U. (2013b): Withdrawal strenght of self-tapping screws in hardwood. Technische Universität Graz.
- Jeitler et al. (2016): BIRCH | GLT&CLT Mechanical properties of Glued Laminated Timber and Cross Laminated Timber produced with the wood species birch.
- Johansen, K. W. (1949): Theory of Timber Connections. Kopenhagen.
- Kollmann (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Erster Band.
- Lignum TU Graz (2015): Formelsammlung Holzbau.
- Mahnken, Rolf (2015): Lehrbuch der technischen Mechanik - Elastostatik. Mit einer Einführung in Hybridstrukturen. Berlin: Springer Vieweg.
- Merk Timber GmbH (2017): MGA A 100 Stützenfuß. Online verfügbar unter <https://www.zimmereibedarf.com/shop/at/verbindungssysteme/stuetzenfuesse/stuetzenfuesse/78/stuetzenfuss-mga-a-100>, zuletzt geprüft am 26.10.2017.
- Mönck, W.; Rug, W. (2015): Holzbau. Bemessung und Konstruktion. 16., vollst. überarb. Aufl. Berlin. neue Holzbau AG (2017): Richtlinie LH-BSH.
- Niemz et al. (2015): Zur Orthotropie der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Rotbuchenholz. In: *Bautechnik*, S. 3–8.
- Obermayr (2014): Leistungsfähige Hirnholz-Schrauben- und Klebeverbindungen für schlanke Birken-Laubholzkonstruktionen. Technische Universität Graz.
- ON B 1995-1-1 (2015): Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1 _Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Austrian Standards Institute.
- ON B 3012 (2003): Kennwerte zu den Bennennungen und Kurzzeichen der ÖNORM EN 13556. Austrian Standards Institute.
- ON B 4100-2 (2004): Holzbau-Holztragwerke Teil 2: Berechnung und Ausführung. Austrian Standards Institute.
- ON EN 14080 (2013): Holzbauwerke — Brettschichtholz und Balkenschichtholz — Anforderungen. Austrian Standards Institute.

- ON EN 14081-3 (2012): Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz fuer tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 3 Maschinelle Sortierung. Austrian Standards Institute.
- ON EN 14374 (2005): Holzbauwerke - Furnierschichtholz für tragende Zwecke - Anforderungen. Austrian Standards Institute.
- ON EN 1993-1-1 (2014): Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Austrian Standards Institute.
- ON EN 1993-1-8 (2012): Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen. Austrian Standards Institute.
- ON EN 1993-1-8_2012_03_Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8_Bemessung von Anschlüssen (2).
- ON EN 1995-1-1 (2015): Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1_Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Austrian Standards Institute.
- ON EN 338 (2003): P6__Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen. Austrian Standards Institute.
- ON EN 338_2016 (2016): Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen. Austrian Standards Institute.
- Peters, C. M. (2016): Hallenträger aus Buchenfurnierschichtholz. Online verfügbar unter <http://www.proholz.at/typo3temp/pics/6c6ab93dac.jpg>, zuletzt geprüft am 24.10.2017.
- Pöll (2017): Entwicklung einer Hartlaubholzschraube: Optimierung der Gewindegeometrie für die Beanspruchung auf Herausziehen.
- Rampa Muffe (2017): Geschichte. Online verfügbar unter <https://www.rampa.com/cgi-bin/rampashop.pl?id=1896>, zuletzt geprüft am 27.10.2017.
- Rampa Muffe 1 (2017): Bild. Online verfügbar unter <https://www.rampa.com/rampashop/images/SKD330>, zuletzt geprüft am 23.10.2017.
- Rampa Muffe 2 (2017): Bild. Online verfügbar unter https://www.picclickimg.com/d/l400/pict/371988658039_/RAMPA%C2%AE-Muffen-Typ-SKL-M8-16x50mm.jpg, zuletzt geprüft am 27.10.2017.
- Rampa Muffe 3 (2017): Bild. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Rampamuffe>, zuletzt geprüft am 27.10.2017.
- Reichinger, T. (2017): Ausgewählte Untersuchungen zum Tragverhalten einer für Hartlaubholz optimierten Holzbauschraube. Technische Universität Graz.
- Richter et al. (2000): Technology for high quality products from Black Locust (*Robinia pseudoacacia*).
- Ringhofer, A. (2015): A universal approach for withdrawal properties of self-tapping screws in solid timber and laminated timber products. Technische Universität Graz.
- Ringhofer, A. (2017): Axially Loaded Self-Tapping Screws in Solid Timber and Laminated Timber Products. Technische Universität Graz.
- Rug, W.; Eichbaum, G. (2012): Untersuchungen zur Festigkeit von Robinienholz. In: *Bautechnik*, S. 415–428.
- Schickhofer, G. (1999): FFF Projekt: Entwicklung widerstandsfähiger Holzbauprodukte mit dem Hartlaubholz Robinie. Technische Universität Graz.

Schickhofer, G. (2006a): Holzbau Teil A.

Schickhofer, G. (2006b): Holzbau Teil B.

Schwab, E.; Liesebach, M.; Stephan, B. R. (1996): Holzeigenschaften der japanischen Maximowicz-Birke von einem norddeutschen Standort. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, S. 301–306.

Schwaner et al. (2009): Zukunft Holz - Kap10-Verbindungstechniken Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotentiale.

Sell (1989): Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten.

TiComTech HSK (2010): HSK-Rohrverbinder-Dossier.

Unterweger, G. (2010): StahlbauGL. Technische Universität Graz.

Weibull (1939): A statistical theory of the strength of materials. Royal Swedish Institute for Engineering Research. Stockholm.

Young, N.: Canary Wharf Frontansicht. Foster and Partners. London. Online verfügbar unter https://c1.staticflickr.com/6/5558/14005394670_2d49c79d19_b.jpg, zuletzt geprüft am 23.10.2017.

Young, N.: Canary Wharf- Hirnholzanschluss. Foster and Partners. London. Online verfügbar unter http://74f85f59f39b887b696fab656259048fb93837ecc0ecbcf0c557.r23.cf3.rackcdn.com//assets/library/image/9/original/99921_canary%20wharf%20crossrail%20station%20september%2020131.jpg, zuletzt geprüft am 23.10.2017.

Young, N.: Canary Wharf Holzkonstruktion. Foster and Partners. London. Online verfügbar unter <https://cdn.londonreconnections.com/2013/crossrailcanarywharfroof2.jpg>, zuletzt geprüft am 23.10.2017.

Young, N.: Canary Wharf: Detaillierter Hirnholzanschluss. Foster and Partners. London. Online verfügbar unter http://www.theconstructionindex.co.uk/assets/news_articles/2013/09/1380521704_canary-wharf-crossrail-station-september-2013-1.jpg, zuletzt geprüft am 23.10.2017.

Z-9.1-264 (2016): Z-9.1-264 Merk-Gewindeanschluss (MGA) als Hirnholz-Verbindungsmittel (Stützenfußanschluss).

Z-9.1-679 (2014): Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. DIBt.

Z-9.1-704 (2012): VIGAM BSH aus Eiche. Gamiz S. A. Deutsches Institut für Bautechnik.

Z-9.1-770 (2014): DIBt - Deutsche Institut für Bautechnik.