

# Probleme und Lösungsansätze für die Verschraubung in Hartlaubholzprodukten

Engl.: Challenges and Solutions for Screw Applications in Hardwood Products

Reinhard Brandner  
Institut für Holzbau und  
Holztechnologie,  
Technische Universität Graz  
Graz, Österreich



Andreas Ringhofer  
Institut für Holzbau und  
Holztechnologie,  
Technische Universität Graz  
Graz, Österreich



Johann Scheibenreiter  
Schmid Schrauben Hainfeld GmbH  
Hainfeld, Österreich





# Probleme und Lösungsansätze für die Verschraubung in Hartlaubholzprodukten

## 1. Einleitung / Motivation / Fokus

Der Anteil an Laubholz in den heimischen Wäldern ist zunehmend. In Mitteleuropa ist insbesondere der Vorrat an Buche (*Fagus sylvatica*), als eine Vertreterin der zerstreutporigen Hartlaubhölzer, als stark steigend zu verzeichnen, wohingegen jener der Fichte (*Picea abies*) in vergleichbarem Ausmaß abnimmt (siehe u.a. 3. Bundeswaldinventur 2012 in Deutschland).

Aktuelle Forschungsarbeiten zu Brettschichtholz (BSH) aus Buche, u.a. von Westermayr et al. (2018) und Ehrhart et al. (2018), sowie das seit wenigen Jahren verfügbare Bauprodukt BauBuche GL75 der Fa. Pollmeier (ETA-14/0354 2018), ein Furnierschichtholz («laminated veneer lumber»; LVL) aus Buchen-Starkfurnieren, weisen im Vergleich zu herkömmlichem BSH nach EN 14080 (2013) und LVL nach EN 14374 (2016) aus Nadelholz ein sehr hohes mechanisches Potential auf. Festigkeiten in Faserrichtung sind bei diesen Produkten aus Buche um bis zu zwei- bis dreimal so hoch wie bei vergleichbaren Produkten aus Fichte. Hingegen sind Steigerungen bei den Festigkeiten quer zur Faser (Ausnahme Querdruck) und den Elastizitäts- und Schubmodulen vergleichsweise moderat bis gering. Folglich ist der Einsatz dieser Produkte vor allem als Stab in Leichtbaukonstruktionen, wie z.B. ebenen und räumlichen Fachwerken von Interesse, wo diese primär durch Normalkräfte parallel zur Faser beansprucht werden, wohingegen wenn eingesetzt als Vollwand-Biegeträger ihr Potential nur bedingt genutzt werden kann.

Eingesetzt in solchen Leichtbaukonstruktionen gilt es, das hohe Tragvermögen des Brutto-Querschnitts dieser Produkte im Sinne eines hohen Nutzungsgrades auch an den Anschlussbereichen weitestgehend zu erhalten. Zudem sind eine hohe Steifigkeit und Duktilität weitere wesentliche Anforderungen an solche Anschlüsse, die es zu erfüllen gilt. Leichtbaukonstruktionen weisen darüber hinaus auch eine hohe Anzahl an Anschlüssen auf wodurch der Wirtschaftlichkeit in der Lösungsfindung ein erhebliches Gewicht erhält. Bekannte Lösungen des Ingenieurholzbaus für solche Anschlüsse in Nadelholz sind oftmals geklebt oder geschraubt. Beide Lösungen sind in der Lage, hohe Kräfte bei hoher Steifigkeit in die Bauteile zu übertragen, ihr Versagen ist i.d.R. allerdings als vergleichsweise spröde zu klassifizieren.

Hinzu kommt, dass die Querschnitte von z.B. BSH und LVL aus Buche bei gleicher Leistungsfähigkeit wie vergleichbare Produkte aus Fichte deutlich kleiner sind und folglich der zur Verfügung stehende Raum für Anschlusslösungen stark eingeschränkt ist. Dies trifft insbesondere auf Hirnholzanschlüsse zu, welche für die erwähnten Tragstrukturen prinzipiell als vielversprechend gelten.

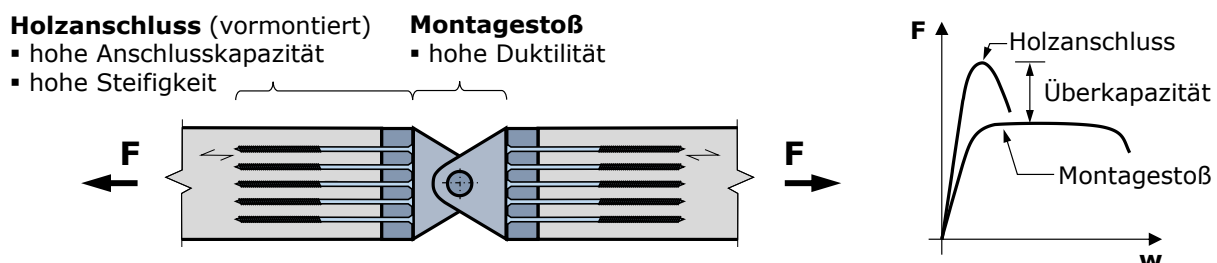


Abbildung 1: Konzept eines Hirnholzanschlusses: Holzanschluss mit axial-beanspruchten Holzbauschrauben und Stirnplatte, bemessen auf Überkapazität, und duktil versagender Stahl-Stahl Montagestoß.

Mit Fokus auf geschraubte Anschlusslösungen auf Basis von primär axial auf Zug beanspruchten, hochfesten Holzbauschrauben wird im Folgenden der Ansatz gewählt den Anschluss selbst in zwei Bereiche zu unterteilen (siehe Abbildung 1): (1) in einen bereits werksseitig im Zuge des Abbundes des Holzbauteils vormontierten Holz(system)anschluss und (2) in einen Montagestoß zum Fügen der Bauteile vor Ort. Der Holzanschluss, hier

konzeptioniert als axial-beanspruchte Schraubengruppe in Kombination mit einer Kopfplatte aus Stahl, erlaubt eine hohe Anschlusskapazität und -steifigkeit. Aufgrund des spröden Versagens ist dieser gegenüber dem auf duktilen Versagen hin zu bemessenden Montagestoß, hier konzeptioniert als Stahl-Stahl-Lösung, mit entsprechender Überkapazität auszustatten. Die Kombination aus beiden Anschlussbereichen soll, eine entsprechende Konzeptionierung und Bemessung vorausgesetzt, einen leistungsfähigen und wirtschaftlichen Anschluss ermöglichen.

Im Rahmen dieses Beitrages gilt der Fokus axial-beanspruchten, geschraubten Anschlusslösungen für Hartlaubholzprodukte. In Hinblick auf die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit dabei verwendeter Holzbauschrauben gilt es einerseits die Applikation, das Einschrauben ohne Vorbohren und Spalten der Holzbauteile sowie das Darstellen des entsprechenden Eindrehwiderstandes, und andererseits eine hohe Tragfähigkeit und Steifigkeit entsprechend experimentell zu erfassen und durch Modelle abzubilden, sowie eine entsprechende Ausführung, u.a. durch entsprechende Geometriebedingungen und weiterer Mindestanforderungen zur Gewährleistung einer maximalen Kapazität durch Vermeidung vorzeitiger, spröder Versagensmechanismen im Bereich des Anschlusses (z.B. Spalten, Herausscheren der Verbindungsmittelgruppe), sicherzustellen.

Im Folgenden wird die Applikation und axiale Beanspruchung von Holzbauschrauben über den gesamten Bereich des Achs-Faserwinkels  $\alpha$  zwischen  $0^\circ$  (faserparallel) und  $90^\circ$  (quer zur Faserrichtung) betrachtet. Gemäß EN 1995-1-1 (2014; EC 5) ist dieser Bereich gegenwärtig auf  $\alpha \geq 30^\circ$  eingeschränkt. Die Ausziehfestigkeit  $f_{ax,\alpha}$  zwischen  $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  ist mittels einem Hankinson-Ansatz auf Basis der Ausziehfestigkeit für  $\alpha = 90^\circ$ ,  $f_{ax,90}$ , entsprechend abzumindern. Das Verhältnis zwischen den charakteristischen Ausziehfestigkeiten bei  $\alpha = 90^\circ$  und  $0^\circ$  mit  $1 / k_{90,k} = f_{ax,0,k} / f_{ax,90,k} = 0,83$  angegeben. Gegenwärtige europäische Bewertungsdokumente, wie z.B. ETA-11/0190 (2018) und ETA-12/0373 (2017), erlauben die Applikation von Holzbauschrauben zwischen  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ . Die Ausziehfestigkeit für  $\alpha \neq 90^\circ$  wird über eine bi-lineare Funktion mit  $f_{ax,\alpha,k} = f_{ax,90,k}$  für  $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  und einer Abminderung für  $0^\circ \leq \alpha < 45^\circ$  unter Ansatz von  $1 / k_{90,k} = 0,30$  geregelt. Diese sehr ausgeprägte Reduktion steht im Widerspruch zu Daten aus Kurzzeitversuchen nach EN 1382 (1999) mit Verhältnissen zwischen 0,70 und 0,83 (siehe u.a. Fairchild 1926; Blaß et al. 2006; Pirnbacher et al. 2009; Schneider 1999; Hübner 2013; Ringhofer 2017; Brandner et al. 2019a). Gründe für diesen ausgeprägt konservativen Ansatz sind der bislang gegebene unzureichende Kenntnisstand betreffend das Langzeitverhalten («Duration of Load»; DoL) von axial beanspruchten Holzbauschrauben und generelle Vorbehalte gegen faserparallele Verschraubungen. Um eine wirtschaftliche Ausführung von Hirnholzanschlüssen mit faserparallel applizierten Holzbauschrauben zu ermöglichen, ist daher insbesondere auch eine Vertiefung des Kenntnisstandes betreffend Langzeitverhalten von hoher Priorität. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass gegenwärtige Regelungen für Verschraubungen in Laubholzprodukten auf jenen in Nadelholzprodukten basieren und nicht an das Laubholz entsprechend adaptiert sind. Einschlägige Literaturquellen, wie z.B. jene von Newlin und Gahagan (1938), Eckelmann (1975) und Hübner (2013), beschreiben das Potential von axial-beanspruchten Schrauben in Laubholz als deutlich höher als in Nadelholz.

Der Beitrag gliedert sich demnach in die folgenden Bereiche: (i) Applikation in Hart- und Weichholzprodukten (Eindrehwiderstand und Torsionswiderstand von Holzbauschrauben), (ii) Stahlzugkenngrößen und Ausziehkenngrößen von Holzbauschrauben in Hart- und Weichholz bei Kurz- und Langzeitbeanspruchung, sowie (iii) Bestimmung der Geometriebedingungen, Leistungsfähigkeit und Erkenntnisse betreffend die Ausführung von Hirnholzanschlüssen in Hartlaubholzprodukten.

## 2. Applikation: Torsions- und Eindrehwiderstand

### 2.1. Vorwort und Motivation

Generell ist eine ordnungsgemäße und einfache Applikation von Einzelschrauben und Schraubengruppen sicherzustellen. Dafür notwendig sind u.a. (i) eine entsprechende

Schraubenspitze für ein schnelles und sauberes Eingreifen des nachlaufenden Gewindes in das Holz, (ii) das Verhindern einer Überbeanspruchung der Schraube auf Torsion, (iii) ein möglichst geringer Eindrehwiderstand, um einerseits das Versetzen der Schrauben durch handelsübliche Schraubgeräte zu ermöglichen, sowie andererseits eine zu starke Temperaturentwicklung im umgebenden Holzwerkstoff zu verhindern, sowie (iv) die Minimierung von Querkraften, um eine übermäßige lokale Rissinitiierung und -ausbreitung bis zum Aufspalten der Bauteile zu unterbinden.

In Hinblick auf (ii) ist gemäß EAD 130118-00-0603 (2016) für das Verhältnis zwischen dem charakteristischen Wert des max. Torsionswiderstandes der Schraube und dem Mittelwert des max. Eindrehwiderstandes der Schraube in das Holzprodukt,  $M_{tor,max,k} / M_{max,mean}$ , ein Faktor von  $\geq 1,5$  einzuhalten. Da der Eindrehwiderstand mit zunehmender Rohdichte des Holzproduktes steigt, ist nach EC 5 sowie gängigen europäischen technischen Bewertungsdokumenten, wie z.B. nach ETA-11/0190 (2018), bei Applikation in Laubholz generell vorzubohren bzw. für ausgewählte Produkte eine selbstbohrende Applikation für bestimmte Einschraubtiefen zulässig. Diese Notwendigkeit des Vorbohrens mindert allerdings erheblich die Wirtschaftlichkeit geschraubter Verbindungen in Laubholzprodukten.

Im Rahmen des Forschungsprojektes «hardwood\_SCREWS» (10/2015 bis 06/2018) war es daher ein Ziel, eine Schraube zu entwickeln, welche einerseits zuverlässig eine selbstbohrende Applikation auch in Holzbauprodukte hoher Rohdichte ermöglicht und andererseits eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit auf Stahlzugbruch aufweist. Die daraus hervorgegangene Schraubenentwicklung, seit Ende 2017 gehandelt unter dem Namen RAPID® Hardwood der Fa. Schmid Schrauben Hainfeld GmbH, Hainfeld / AT (ETA-12/0373 2017), im Folgenden ST2 bezeichnet (siehe Abbildung 2; Teilgewinde,  $l = 240$  mm,  $l_g = 100$  mm,  $d = 8,1$  mm), wird im Rahmen der folgend diskutierten Untersuchungen an Einzelschrauben einer handelsüblichen Referenzschraube, der Schraube RAPID® derselben Firma, im Folgenden ST1 bezeichnet (siehe Abbildung 2; Vollgewinde,  $l = 240$  mm,  $d = 8,0$  mm), gegenübergestellt und ihre Performance im Benchmark mit ST1 in Hinblick auf Applikation und axialer Beanspruchung in Nadel- und Laubholzprodukten analysiert. Der wesentlichste Unterschied zwischen diesen beiden Schraubentypen ist der bei ST2 um 17 % stärkere Gewindekerndurchmesser.

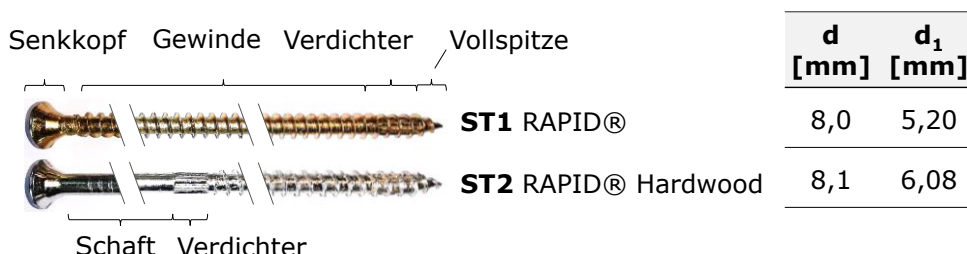


Abbildung 2: Darstellung der beiden Schraubentypen ST1 und ST2 inkl. wesentlicher Bezeichnungen und unter Angabe ihrer Gewindeaußen- (d) und -kerndurchmesser (d<sub>1</sub>).

## 2.2. Material und Methoden

Der max. Torsionswiderstand,  $M_{tor,max}$ , der beiden Schraubentypen ST1 und ST2 wurde nach EN ISO 10666 (1999) durch einseitige Einspannung der Schraube und Verdrehung auf der gegenüberliegenden Seite ermittelt. Der Prüfumfang betrug jeweils 10 Stk.

Der max. Eindrehwiderstand,  $M_{max}$ , beider Schraubentypen ST1 und ST2 wurde nach EN 15737 (2009) und EN 14592 (2012) bestimmt. Die Untersuchungen wurden einerseits an Vollholz der drei holzanatomischen Gruppen Nadelholz (NH), ringporiges (RP) und zerstreutporiges (ZP) Laubholz (LH) sowie am LVL BauBuche (BB) durchgeführt. Nadelholz wurde durch drei signifikant unterschiedliche Rohdichtegruppen der Holzart Fichte (FI; *Picea abies*) vertreten. Die Gruppe LH-RP wurde durch Edelkastanie (EK; *Castanea sativa*), Esche (ES; *Fraxinus excelsior*) und Eiche (EI; *Quercus robur / petraea*) und die Gruppe LH-ZP durch Schwarzpappel (PA; *Populus nigra*), Birke (BI; *Betula pendula*) und Rotbuche (BU; *Fagus sylvatica*) repräsentiert. Das Ziel war es, eine möglichst große und für Europa repräsentative Rohdichtebandbreite unter Verwendung von für den Holzbaubereich relevante bzw. zukunftssträftig erscheinende Holzarten abzudecken.

Für alle untersuchten Holzbauprodukte aus Laubholz wurde der Eindrehwiderstand über eine Länge von  $l_{ef} = 50$  mm (ohne Spitze) und für die Achs-Faserwinkel  $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$  und  $90^\circ$  (radial) bestimmt. In BU und BB wurden zudem Prüfungen bei  $\alpha = 15^\circ$  und  $30^\circ$  durchgeführt. Bei all diesen Prüfungen wurden die Holzproben bis zum vollständigen Austritt von Schraubenspitze und Verdichter durchgeschraubt. Im Allgemeinen erfolgte die Applikation selbstbohrend. In BU und BB erfolgten zudem Prüfungen unter Variation der Vorbohrdurchmesser  $d_{PD} = \{5,5; 6,0; 6,5; 7,0\}$  mm. In BauBuche (BB) und  $\alpha = 0^\circ$  wurden darüber hinaus auch Einschraubprüfungen über eine Länge von 96, 160 und 200 mm bewerkstelligt. In der Auswertung der Ergebnisse wurde die Rohdichtekorrektur  $k_{\rho E} = 480 / \rho$  gemäß EAD 130118-00-0603 (2016) berücksichtigt. Der Prüfumfang betrug jeweils rd. 20 Stk. Nähere Angaben zu den Prüfungen und Hintergründe in der Probenauswahl sowie Geometrien der Probekörper können Pöll (2017), Reichinger (2017), Brandner et al. (2019a) und Brandner (2019) entnommen werden.

## 2.3. Ergebnisse und Diskussion

### 2.3.1. Torsionswiderstände der beiden Schraubentypen

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse aus den Torsionswiderstandsprüfungen an den Schrauben zusammen. ST2 weist demnach im Mittel einen um 52% höheren Torsionswiderstand auf als ST1. Diese Differenz kann auf die gegebenen Geometrieunterschiede, insbesondere die Differenz zwischen den Gewindekerndurchmessern, zurückgeführt werden.

Tabelle 1: Ergebnisse aus den Torsionswiderstandsprüfungen durchgeführt an beiden Schraubentypen ST1 und ST2: Mittelwerte und Variationskoeffizienten (CV).

Schraubentyp [-]	Probenanzahl [-]	$M_{tor,max,mean}$ [Nm]	CV[ $M_{tor,max}$ ] [%]
ST1	10	28,8 (100%)	0,8
ST2	10	43,8 (152%)	0,8

### 2.3.2. Eindrehwiderstände bei Applikation ohne Vorbohren

Tabelle 2 beinhaltet die Mittelwerte von Holzfeuchte und Rohdichte je Schraubentyp und Holzart bzw. Rohdichtegruppe sowie des maximalen Eindrehwiderstandes; Letztere sind zudem nach dem Achs-Faserwinkel unterteilt. Zusammenfassend liegen die mittleren Holzfeuchten aller Holzarten, mit Ausnahme von BU und BB, innerhalb des Zielbereiches von  $12 \pm 2\%$ . Die mittleren Rohdichten zwischen den Holzarten bzw. Rohdichtegruppen innerhalb der holzanatomischen Gruppen zeigen sich signifikant voneinander unterschiedlich wohingegen zwischen den Gruppen eine ähnliche Bandbreite sowie eine geringe Überdeckung zwischen NH und LH gegeben ist. In Summe wird ein Rohdichtebereich von rd. 350 bis 900 kg/m<sup>3</sup> abgebildet.

Während des Einschraubvorganges kam es vereinzelt zu Spaltversagen, i.d.R. kurz bevor bzw. nach Durchschrauben der Probe. Bei der Eiche war das Spaltversagen bei  $\alpha = 0^\circ$  allerdings dominierend: rd. die Hälfte der Proben bei ST1 und bis auf eine Probe bei ST2 versagten bereits während dem Applizieren. Ein Vergleich zwischen den Rohdichten der Gruppen «gespalten» vs. «nicht gespalten» bei ST1 deutet auf eine erhöhte Spaltneigung bei hohen Rohdichten hin. In der Praxis und insbesondere bei faserparallelen Anschlüssen ist nicht von einem Durchschrauben der Konstruktionselemente auszugehen, wodurch die beobachtete Spaltneigung diesbezüglich auch entsprechend zu bewerten ist. Die hohe Spaltneigung der Eiche an sich lässt vermuten, dass hier die sehr ausgeprägten Holzstrahlen einen Einfluss haben.

Allgemein zeigen sich geringfügig höhere Einschraubwiderstände bei höheren Achs-Faserwinkeln. Im Vergleich zu ST1 sind die Einschraubwiderstände bei ST2 durchwegs um rd. 10 bis 15% höher. Dies ist bei LH allgemein und bei NH quer zur Faser beobachtbar. Der Grund hierfür ist der höhere Energieaufwand für die Verdrängung bzw. Verdichtung des Holzes im Schraubkanal von ST2.

Ergänzende Untersuchungen zum Eindrehwiderstand von ST2 bei größeren Durchschraubelängen in BauBuche (BB) ergaben eine Steigerung von  $M_{max,mean}$  von 28 bzw. 33 % bei Veränderung von  $l_{ef} = 50$  mm auf 80 bzw. 96 mm. Das Durchschrauben von 200 mm langen Proben aus BB unter Verwendung von ST2 führte zu einer Steigerung von 53, 68

bzw. 78 % bei Applikation in der Schmalseite (tangential), Seitenfläche (radial) bzw. Hirnholzfläche. Aufgrund der Teilgewinde ist dies bei dieser Einschraublänge auf den zweiten Verdichter nach dem Gewinde mit  $l_g = 100$  mm zurückzuführen.

Neben der für ST1 und ST2 üblichen Vollspitze wurden auch Einschraubprüfungen unter Verwendung von Schrauben mit einer Bohrspitze aber ansonsten vergleichbaren Gewindegeometrieparametern wie ST1 durchgeführt. Dabei konnte statistisch kein Einfluss auf den Eindrehwiderstand festgestellt werden, allerdings war die Applikation von Schrauben mit Bohrspitze in BB deutlich schwieriger als mit der Vollspitze: Der Anpressdruck musste deutlich erhöht werden und das erschwerte Eingreifen des nachfolgenden Gewindes führte zu einem Verlust des effektiv wirksamen Schraubkanals von rd. 1 bis 2 d.

Tabelle 2: Ergebnisse der Eindrehwiderstandsprüfungen an beiden Schraubentypen ST1 und ST2:  $l_{ef} = 50$  mm; Applikation ohne Vorbohren (nPD); Mittelwerte aus jeweils rd. 20 Prüfungen.

Typ [-]	Kennwert [-]	$\alpha$ [°]	NH			LH-RP			LH-ZP			
			FI-A	FI-B	FI-C	EK	ES	EI	PA	BI	BU	BB
ST1	$u_{mean}$ [%]	all	12,8	13,0	13,1	11,8	10,3	10,3	10,8	10,9	8,8	7,3
	$\rho_{12,mean}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	all	365	446	541	535	660	762	485	638	737	836
	$M_{max,mean}$ [Nm]	0°	2,75	3,31	4,85	5,00	8,55	8,48	4,26	6,35	8,48	12,4
		45°	-	-	-	5,27	8,65	9,24	4,43	6,53	10,1	10,4
		90°	2,72	4,01	5,39	5,15	9,25	9,64	4,43	6,91	8,91	12,7
ST2	$u_{mean}$ [%]	all	12,7	13,0	13,1	11,7	10,3	10,3	10,8	10,9	9,4	8,0
	$\rho_{12,mean}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	all	364	445	541	530	658	762	483	638	743	838
	$M_{max,mean}$ [Nm]	0°	2,86	3,43	4,90	5,37	9,82	-	5,02	6,36	9,65	14,1
		45°	-	-	-	5,71	9,90	10,6	5,19	7,02	12,1	11,7
		90°	3,22	4,57	6,21	5,63	10,5	11,0	4,98	7,83	10,2	15,0

### 2.3.3. Eindrehwiderstände bei Applikation mit Vorbohren

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse aus den Prüfungen zur Ermittlung des Einflusses des Vorbohrens auf den Eindrehwiderstand zusammen. Unter Beachtung der Gewindekerndurchmesser für ST1 ( $d_1 = 5,20$  mm) und ST2 ( $d_1 = 6,08$  mm) lässt sich aus diesen Daten schließen, dass bereits eine Vorbohrung entsprechend dem Kerndurchmesser,  $d_{PD} = d_1$ , zu einer Halbierung des Eindrehwiderstandes führt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Eindrehwiderstandsprüfungen an beiden Schraubentypen ST1 und ST2 in BU und BB:  $l_{ef} = 50$  mm; Applikation ohne / mit Vorbohren (nPD / PD); Mittelwerte.

Typ [-]	Kennwert [-]	$\alpha$ [°]	BU   $d_{PD}$ [mm]					BB   $d_{PD}$ [mm]				
			nPD	5,5	6,0	6,5	7,0	nPD	5,5	6,0	6,5	7,0
ST1	$u_{mean}$ [%]	all	8,8	10,0	9,7	9,7	9,8	7,3	8,2	8,1	7,7	8,0
	$\rho_{12,mean}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	all	737	731	729	730	730	836	841	842	842	841
	$M_{max,mean}$ [Nm]	0°	8,48	4,17	3,64	2,48	1,74	12,4	6,13	5,21	3,65	2,53
		90°	8,91	4,40	3,59	2,09	1,39	12,7	6,24	5,15	3,06	2,05
ST2	$u_{mean}$ [%]	all	9,4	9,9	9,8	9,7	9,8	8,0	8,2	8,2	7,9	8,0
	$\rho_{12,mean}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	all	743	725	730	728	729	838	841	840	843	842
	$M_{max,mean}$ [Nm]	0°	9,65	6,55	5,93	4,22	3,16	14,1	9,90	8,56	6,28	4,66
		90°	10,2	6,80	6,19	3,65	1,92	15,0	11,3	9,17	5,10	3,17

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse kann festgehalten werden, dass der Eindrehwiderstand sich weitgehend unbeeinflusst vom Achs-Faserwinkel  $\alpha$  zeigt. Ferner ist festzuhalten, dass das Vorbohren, auch wenn wirtschaftlich nicht immer gewünscht, zu einer deutlichen Reduktion des Eindrehwiderstandes führt. Aus den Ergebnissen lässt sich zudem erkennen, dass der Eindrehwiderstand mit zunehmender Rohdichte ansteigt. Zur näheren Analyse der Beziehung zwischen  $M_{max}$  und  $\rho_{12}$  wurde eine Regressionsanalyse auf Basis eines Potenzansatzes, mit  $M_{max} = a \rho_{12}^b$ , mit  $a$  und  $b$  als Regressionsparameter, gewählt; Näheres dazu in Reichinger (2017) und Brandner et al. (2019a). Mit Fokus auf den Potenzparameter  $b$ , welcher den Gradienten der funktionalen Beziehung zwischen diesen beiden Variablen ausdrückt, lässt sich weitestgehend unabhängig von der holzanatomischen Gruppe und  $\alpha$  ein Wert von rd. 1,60 finden, d.h. ein überproportionaler Anstieg des Eindrehwiderstandes mit zunehmender Rohdichte.

Zurückkommend auf die Anforderung gemäß EAD 130118-00-0603 (2016) mit  $M_{\text{tor,max,k}} / M_{\text{max,mean}} \geq 1,5$  ist für ST2 folgendes festzustellen: Der charakteristische Wert  $M_{\text{tor,max,k}}$  ergibt sich gemäß EN 14358 (2016) und unter Ansatz des Mindest-Variationskoeffizienten CV von 5 % zu 39,4 Nm, das heißt,  $M_{\text{max,mean}}$  muss demnach  $\leq 26,3$  Nm betragen; dies ist für Alle hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse erfüllt.

### 3. Beanspruchung Einzelschraube: Stahlzug- und Ausziehkenngößen von Holzbauschrauben aus Kurzzeitprüfungen

#### 3.1. Vorwort und Motivation

Die Stahlzugtragfähigkeit von Holzbauschrauben ist ein wesentlicher Indikator für deren prinzipielle Leistungsfähigkeit. Dies insbesondere dann, wenn, wie in der Praxis häufig der Fall, Anschlüsse mit vorwiegend axial beanspruchten Schrauben auf den Versagensmodus Stahlbruch bemessen werden.

Der Ausziehtragfähigkeit einer Einzelschraube,  $F_{\text{ax},\alpha}$ , wird im Wesentlichen auf Basis der Ausziehfestigkeit  $f_{\text{ax}}$ , der effektiv wirksamen Gewindelänge im maßgebenden Bauteil  $l_{\text{ef}}$ , dem Gewindeaußendurchmesser  $d$ , der Kreiszahl  $n$  und dem Achs-Faserwinkel  $\alpha$  ermittelt. Gemäß EC 5 sind bei dieser Ermittlung Effekte auf die effektive Länge, dem Nenndurchmesser und der Rohdichte durch entsprechende Potenzmodelle bzw. -faktoren zu berücksichtigen.

Wie den gegenwärtigen europäischen technischen Bewertungsdokumenten für Schrauben zu entnehmen, stehen für jüngere Holzbauprodukte wie Brettspertholz (BSP) und BauBuche (BB) adaptierte, produktspezifische Modellansätze zur Verfügung. Ringhofer et al. (2015a) und Ringhofer (2017) erarbeiteten ein Modell zur Ermittlung der Ausziehfestigkeit von selbstbohrenden Holzbauschrauben mit welchem es möglich ist, auf Basis eines generischen Ansatzes Vollholz bzw. brettbasierte unidirektional sowie orthogonal geschichtete Holzbauprodukte, wie BSH und BSP, aus Nadelholz (primär Fichte) zu beschreiben. Im Rahmen des Forschungsprojektes «hardwood\_SCREWS» war es daher ein Ziel, diesen Ansatz um die Beschreibung der Ausziehfestigkeit von selbstbohrenden Holzbauschrauben appliziert in Holzbauprodukte aus Laubholz zu erweitern. Da u.a. Newlin und Gahagan (1938), Eckelmann (1975) und Hübner (2013) für Laubholz über ein deutlich höheres Ausziehpotential berichten als für Nadelholz galt es, wie unter Kapitel 2, einen möglichen Einfluss der holzanatomischen Gruppe auf die Ausziehkenngößen zu analysieren. Zudem wurde der Einfluss des Achs-Faserwinkels sowie der Applikationsbedingungen (ohne Vorbohren bzw. mit Vorbohren unter Variation von  $d_{\text{PD}}$ ) näher betrachtet. Entsprechende Ergebnisse wurden bereits in Brandner et al. (2019a) und Brandner (2019) berichtet. Diese werden im Folgenden z.T. neu aufbereitet bzw. zusammenfassend dargelegt.

#### 3.2. Material und Methoden

Die Bestimmung der Stahlzugtragfähigkeiten beider Schraubentypen erfolgte durch hydraulische Klemmung dieser auf beiden Enden und Aufbringen einer kontinuierlich gesteigerten Zugkraft bis zum Bruch. Der Probenumfang betrug jeweils 10 Stk.

Für die Ausziehprüfungen, welche nach EN 1382 (1999) durchgeführt wurden, kamen dieselben Proben mit  $l_{\text{ef}} = 50$  mm wie für die Eindrehwiderstandprüfungen unter Kapitel 2 zum Einsatz. Die Prüfanordnung selbst entsprach einer «push-pull» Konfiguration. Die lokalen Verformungen zwischen der Gegenplatte aus Stahl und einem definierten Messpunkt wurden durch ein Paar induktiver Wegaufnehmer, geklemmt auf die Schraube, ermittelt, die Dehnung des freien Schraubenabschnittes zwischen Holzoberfläche und Messpunkt in der Ermittlung des Verschiebemoduls als freie Stahldehnung berücksichtigt; siehe auch Brandner et al. (2019a).



### 3.3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.3.1. Stahlzugwiderstände der beiden Schraubentypen

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse aus den Stahlzugprüfungen an beiden Schraubentypen ST1 und ST2 zusammen. Bei identen Variationskoeffizienten ist der Stahlzugtragfähigkeit von ST2 gegenüber ST1 im Mittel um 36% höher. Dies ist wiederum auf den stärkeren Gewindekerndurchmesser von ST2 zurückzuführen. Für Schraubenanschlüsse, welche in der Praxis häufig auf Stahlzugbruch bemessen werden, bedeutet dies bei gleicher Schraubenanzahl rd. ein Drittel mehr Leistungsfähigkeit im Anschluss bzw. bei gleicher Leistungsfähigkeit rd. ein Drittel weniger Schrauben.

Tabelle 4: Stahlzugwiderstände beider Schraubentypen, ST1 und ST2.

Schraubentyp [-]	Probenanzahl [-]	$F_{tens, mean}$ [Nm]	CV[ $F_{tens}$ ] [%]
ST1	10	26,8 (100%)	0,7
ST2	10	36,5 (136%)	0,7

#### 3.3.2. Ausziehkenngößen bei Applikation ohne Vorbohren

Abbildung 3 stellt die Ergebnisse der Ausziehfestigkeiten beider Schraubentypen, ST1 und ST2, in Abhängigkeit der holzanatomischen Gruppe bzw. Holzart / Rohdichtegruppe und für  $\alpha = 0^\circ$  und  $90^\circ$  dar. Zudem enthalten sind die Mittelwerte der Holzfeuchte und Rohdichte (siehe auch Tabelle 2).

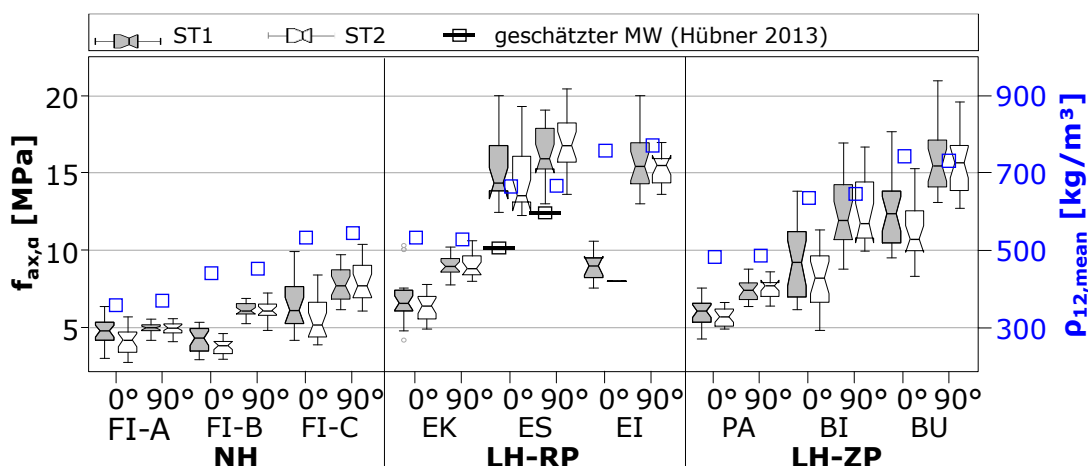


Abbildung 3: Box-Plots der Ausziehfestigkeiten zusammen mit Mittelwerten der Holzfeuchtigkeit und Rohdichte, gruppiert nach holzanatomischer Gruppe und Holzart, zudem unterteilt nach Achs-Faserwinkel und Schraubentyp.

Wie dieser Abbildung zu entnehmen ist, steigt die Ausziehfestigkeit mit zunehmender Rohdichte, wobei dieser Anstieg bei Laubholz deutlich ausgeprägter erscheint als bei der Fichte. Bei der Gruppe LH-RP sind die sehr hohen Ausziehfestigkeiten der Esche augenscheinlich. Eine Erklärung dafür ist gegenwärtig nicht verfügbar. Mit Hilfe des Regressionsmodells von Hübner (2013) wurden die Mittelwerte  $f_{ax,mean}$  auf Basis der in diesen Untersuchungen gegebenen Rohdichten geschätzt und somit die Serien neu bewertet. Zudem zeigen sich in dieser Gruppe bei der Eiche und  $\alpha = 0^\circ$  unerwartet geringe Ausziehfestigkeiten. Wie bereits unter Abschnitt 2.3.2 erläutert, verblieben nur Proben mit geringer Rohdichte für die Ausziehprüfungen intakt, wodurch die Statistiken daraus die Gruppe unterrepräsentieren. Aufgrund der gegebenen Unsicherheiten bei zwei von drei Holzarten in der Gruppe LH-RP werden für die weiteren Betrachtungen auch die Ergebnisse von Hübner (2013), durchgeführt an Esche und Robinie (*Robinia pseudoacacia*), miteinbezogen.

Im Vergleich der Ergebnisse beider Schraubentypen zeigen sich für  $\alpha = 90^\circ$  keine nennenswerten Unterschiede, wohingegen für  $\alpha = 0^\circ$  die Ausziehfestigkeiten bei ST2 im Mittel rd. 10% unter jenen von ST1 zu liegen kommen. Als Grund hierfür wird die deutlich höhere Verdichtung bei nicht vorgebohrter Applikation in Folge des stärkeren Gewindekerndurchmessers gesehen was insbesondere bei faserparalleler Verschraubung zu einer erhöhten Schädigung im Gegengewinde des angrenzenden Holzkörpers führt.

Neben der Ausziehfestigkeit wurde auch der Verschiebemodul aus den Prüfdaten ermittelt. Aufgrund der sehr geringen Verformungen ist diese Kenngröße allerdings mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass der Verschiebemodul  $K_{ser,ax}$  i.d.R. bei faserparallelen Verschraubungen höher ist als quer zur Faser; siehe u.a. Brandner et al. (2017). Bei den Untersuchungen hier zeigt sich für die Nadelholzserien im Mittel ein Verhältnis  $K_{ser,ax,90,mean} / K_{ser,ax,0,mean}$  von 0,70. Für Laubholz ist dieses Verhältnis deutlich höher und im Mittel zwischen 0,80 und 0,85. Dies wird auf geringere Unterschiede zwischen den Kenngrößen in Laubholz, u.a. zwischen dem Längs- und Rollschubmodul, zurückgeführt. Ein Vergleich der  $K_{ser,ax}$ -Werte zwischen den beiden Schraubentypen zeigt eine im Mittel rd. 25% höhere Werte für ST2. Da die hier bestimmten  $K_{ser,ax}$ -Werte sowohl die Dehnung des Schraubengewindes als auch die lokalen Stauchungen des unmittelbar angrenzenden Holzkörpers beinhalten ist diese Differenz auf Unterschiede in den Steifigkeiten der Schrauben selbst im linear-elastischen Bereich zurückzuführen. Weiterführende Informationen und Ergebnisse dazu sind in Reichinger (2017) und Brandner et al. (2019a) zu finden.

Im Folgenden werden, wie unter Abschnitt 2.3, unter Verwendung von Potenzmodellen und mit Fokus auf den Potenzparameter  $b$  der Gradient der funktionalen Beziehung zwischen Kenngrößen paarweise analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Dabei wurden die Daten von ST1 und ST2 gesammelt betrachtet.

Tabelle 5: Potenzfaktoren  $b$  als Gradient der funktionalen Beziehung zwischen ausgewählten Kenngrößenpaaren.

Gruppe [-]	$\alpha$ [°]	$f_{ax}$ vs. $\rho_{12}$	$K_{ser,ax}$ vs. $\rho_{12}$	$f_{ax}$ vs. $M_{max}$
NH	0°; 90°	0,85; 1,20	1,00; 1,40	0,70
LH-RP	0°; 45°; 90°	1,40	rd. 0,80	rd. 1,00
LH-ZP	0°; 45°; 90°	rd. 1,70	rd. 1,50	rd. 1,00

In Übereinstimmung mit früheren Ergebnissen von Ringhofer et al. (2015a) und Ringhofer (2017) zeigt sich für  $f_{ax}$  vs.  $\rho_{12}$  auch in diesen Untersuchungen für die Fichte ein deutlicher Unterschied zwischen den Potenzfaktoren für  $\alpha = 0^\circ$  und  $90^\circ$ . Diese Abhängigkeit des Potenzfaktors vom Achs-Faserwinkel ist für LH nicht darstellbar, allerdings sind die Potenzfaktoren im Vergleich zu Nadelholz deutlich höher; im Mittel 1,40 für RP und 1,70 für ZP. Gesamt betrachtet sind diese Potenzfaktoren in guter Übereinstimmung mit der Literatur (u.a. Newlin und Gahagan 1938; Schneider 1999; Hübner 2013), welche Werte im Bereich von 1,59 bis 1,78 angeben.

Die Ergebnisse für den Potenzfaktor  $b$  betreffend  $K_{ser,ax}$  vs.  $\rho_{12}$  sind nicht zuletzt aufgrund der gegebenen Unsicherheiten in der Bestimmung der  $K_{ser,ax}$  Werte selbst als nicht eindeutig zu beschreiben. Auch entsprechende Vergleiche mit der Literatur, obwohl eingeschränkt auf Prüfungen in Fichte, weisen eine ausgeprägte Bandbreite auf; vgl. Blaß et al. (2006) mit  $b = 0,20$ , Ringhofer et al. (2015a) mit 0,75 und Brandner et al. (2017) mit 1,42. Für  $f_{ax}$  vs.  $M_{max}$  ist hingegen keine Abhängigkeit von  $\alpha$  aber eine unterproportionale bzw. proportionale Steigerung der Ausziehfestigkeit mit ansteigender Rohdichte in NH und LH gegeben.

Im Folgenden werden die Ausziehkenngößen in Abhängigkeit des Achs-Faserwinkels näher betrachtet. In der Literatur gibt es für die Beschreibung von  $f_{ax}$  in Abhängigkeit von  $\alpha$  verschiedene Ansätze: EC 5, aufbauend auf den Arbeiten von Blaß et al. (2006), wählt hierfür einen Hankinson-Ansatz. Dieser wird auch in Blaß und Uibel (2007), Pirnbacher et al. (2009) weiter vorgeschlagen. Hübner (2013), Ringhofer et al. (2015a), Ringhofer (2017) und EAD 130118-00-0603 (2016) verfolgen einen bi-linearen Ansatz, mit einer konstanten Ausziehfestigkeit zwischen  $\alpha = 90^\circ$  und  $45^\circ$  bzw.  $30^\circ$  sowie einer linearen Abnahme dieser bis  $\alpha = 0^\circ$ .

Zur weiteren Abklärung dieser Beziehung wurden die bestehenden Prüfungen in Buche und BauBuche um Serien mit  $\alpha = 15^\circ$  und  $30^\circ$  ergänzt. Die wesentlichen Ergebnisse daraus sind der Abbildung 4 zu entnehmen. Die bisher getätigten Beobachtungen werden bestätigt: Die Ausziehfestigkeit steigt kontinuierlich zwischen  $\alpha = 0^\circ$  und  $45^\circ$  an und fällt danach leicht ab. Die Unterschiede zwischen  $\alpha = 30^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  sind allerdings statistisch nicht signifikant und praktisch vernachlässigbar wodurch die baupraktische Modellbildung der Beziehung  $f_{ax}$  vs.  $\alpha$  auf Grundlage eines bi-linearen Modells mit Wendepunkt bei  $\alpha = 30^\circ$  als gerechtfertigt erscheint. Da die Ausziehfestigkeit  $f_{ax,0,ST2}$  tiefer liegt als  $f_{ax,0,ST1}$  ist der

Gradient der Abnahme für  $\alpha < 30^\circ$  bei Schraubentyp ST2 größer. Zudem zeigt sich im Allgemeinen die Streuung bei  $\alpha = 0^\circ$  höher als bei den weiteren Achs-Faserwinkeln. Unter Berücksichtigung aller geprüften Holzarten, Produkte und beider Schraubentypen kann auf dem charakteristischen (5 %-Quantil) Niveau für  $1 / k_{90} = f_{ax,0,k} / f_{ax,90,k}$  ein Faktor von 0,70 vorgeschlagen werden.

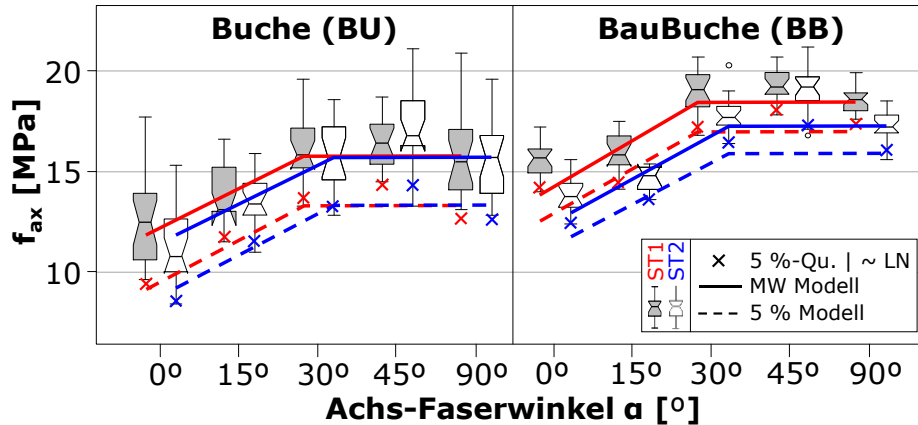


Abbildung 4: Box-Plots der Ausziehfestigkeit vs. Achs-Faserwinkel für BU und BB sowie beide Schraubentypen ST1 und ST2 ergänzt um bi-lineare Modelle für  $k_{ax,mean}$  und  $k_{ax,05}$ .

Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnte das generische Modell von Ringhofer et al. (2015a) bzw. Ringhofer (2017), ursprünglich definiert für Nadelholz (Fichte), um das Laubholz erweitert werden; siehe Brandner et al. (2019a) und Brandner (2019). Demnach ergibt sich der Ausziehtragfähigkeit  $F_{ax,05}$  gemäß Gl. (1) aus der Ausziehfestigkeit  $f_{ax,05}$  multipliziert mit der Mantelfläche des effektiv wirksamen Gewindebereiches im maßgebenden Bauteil. Dabei bleibt die Länge der Spitze unberücksichtigt. Gemäß Gl. (1) errechnet sich die Ausziehfestigkeit selbst durch Multiplikation einer Referenzausziehfestigkeit  $f_{ax,90,05}$  (ermittelt an Vollholz, mit  $\alpha = 90^\circ$ ), welche dem EC 5, europäischen technischen Bewertungen, anderen technischen Dokumenten entnommen oder nach Gl. (2) bestimmt werden kann, mit dem Beiwert  $k_{ax,05}$ , zur Berücksichtigung des Achs-Faserwinkels gemäß Gl. (3), dem Systembeiwert  $k_{sys,05}$ , zur Berücksichtigung des Effektes aus der Anzahl der durchschraubten Schichten  $n$  gemäß Gl. (5) und Ringhofer et al. (2015b), und dem Potenzmodell zur Berücksichtigung des Rohdichteinflusses mit dem Potenzfaktor  $k_p$  gemäß Gl. (6). Der Beiwert  $k_{ax,05}$  gemäß Gl. (3) enthält zudem noch den Beiwert  $k_{gap,05}$ , welcher die Wahrscheinlichkeit einer Applikation von Schrauben in Fugen in der Schmalseite von gegenwärtig zugelassenen BSP-Produkten berücksichtigt; siehe Ringhofer et al. (2015a) und Brandner (2016).

$$F_{ax,05} = f_{ax,05} d \pi l_{ef}, \text{ mit } f_{ax,05} = f_{ax,ref,05} k_{ax,05} k_{sys,05} \left( \frac{\rho_{05}}{\rho_{ref,05}} \right)^{k_p} \quad (1)$$

$$f_{ax,ref,05} = \begin{cases} 0,0130 \rho_{ref,05}^{1,10} d^{-0,33} & \text{für NH} \\ 0,0029 \rho_{ref,05}^{1,40} d^{-0,33} & \text{für LH-RP} \\ 0,0004 \rho_{ref,05}^{1,70} d^{-0,33} & \text{für LH-ZP} \end{cases} \quad (2)$$

$$k_{ax,05} = \begin{cases} 1,0 & \text{für } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 0,70 k_{gap,05} + \alpha \frac{1 - 0,70 k_{gap,05}}{30} & \text{für } 0^\circ \leq \alpha < 30^\circ \end{cases} \quad (3)$$

$$k_{gap,05} = \begin{cases} 0,90 & \text{für BSP Schmalseite} \\ 1,00 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4)$$

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

$$k_p = \begin{cases} 1,10 & \text{für NH \& } 15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 1,25 - 0,05 d & \text{für NH \& } 0^\circ \leq \alpha < 15^\circ \\ 1,40 & \text{für LH-RP \& } 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 1,70 & \text{für LH-ZP \& } 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (6)$$

Dieses generische Modell erlaubt eine konsistente Bestimmung der Ausziehfestigkeit von selbstbohrenden Holzbauschrauben, appliziert in Schmal- und Seitenflächen von Vollholz bzw. brettbasierten, unidirektional sowie orthogonal geschichteten Vollholzprodukten wie BSH und BSP aus Nadel- sowie Laubholz. Die vorgeschlagene Regelung der Potenzfaktoren  $k_p$  zur Berücksichtigung des Rohdichteinflusses für Nadel- und Laubholz ermöglicht zudem die Abbildung der aus Prüfungen feststellbaren deutlich höheren Kapazitäten von Holzbauschrauben appliziert in Holzbauprodukte hoher Rohdichte, wobei dies insbesondere für Hartlaubholzprodukte einen entscheidenden Vorteil bringt. Man beachte, dass gemäß EAD 130118-00-0603 (2016) gegenwärtige europäische technische Bewertungen einen Potenzfaktor  $k_p = 0,8$  für alle zugelassenen Holzarten berücksichtigen und zudem eine Erhöhung der Ausziehfestigkeit gegenüber dem Referenzwert nur bis zu einer Rohdichte von  $\rho_{12,k} = 590 \text{ kg/m}^3$  zulässig ist.

Unter Beachtung der hohen Qualität von europäischen BSP-Produkten, welche nahezu fugenfrei produziert werden, der Unsicherheiten in zwei von drei Holzarten (EI & ES) der Gruppe LH-RP erscheint eine weitere Vereinfachung dieses generischen Ansatzes als möglich, durch  $k_{\text{gap},05} = 1,0$  und einem gemeinsamen Potenzfaktor  $k_p = 1,60$  für LH in Kombination mit einem gemeinsamen Regressionsmodell zur Bestimmung der Referenzausziehfestigkeit in Laubholz mit  $f_{\text{ax,ref,LH},05} = 0,0007 \rho_{12,05}^{1,60} d^{-0,33}$ , welches in guter Übereinstimmung mit Hübner (2013) ist.

### 3.3.3. Ausziehkenngößen bei Applikation mit Vorbohren

Die Festlegung des maximal zulässigen Vorbohrdurchmessers zum Erhalt der Ausziehfestigkeit von Schrauben appliziert ohne Vorbohren wurde bereits vergleichsweise früh untersucht. Fairchild (1926) schlugen  $d_{\text{PD}} \leq 0,7$  bzw.  $0,9 d_1$  für Nadel- bzw. Laubholz vor. Newlin und Gahagan (1938) fanden  $d_{\text{PD}}$  in Abhängigkeit der Rohdichte sowie  $d$ , mit  $0,40$  bzw.  $0,85 d_1$  für  $\rho_{12}$  zwischen  $430$  und  $720 \text{ kg/m}^3$  und  $d$  zwischen rd.  $8$  und rd.  $25 \text{ mm}$ . Gemäß Wilkinson und Laatch (1970) gilt  $d_{\text{PD}} \leq 0,6 d_1$  wohingegen Eckelmann (1988) und Schneider (1999)  $d_{\text{PD}} \leq d_1$  vorschlugen, was im Wesentlichen dem Großteil der heutigen Regelungen entspricht. Ringhofer (2017) schlug für Fichte  $d_{\text{PD}} \leq 1,1 d_1$  vor.

Zur weiteren Klärung dieser Frage wurden ergänzend zu den Ausziehprüfungen an Schrauben appliziert ohne Vorbohren in BU und BB Prüfungen an vorgebohrt applizierten Schrauben unter Variation des Vorbohrdurchmessers  $d_{\text{PD}}$  durchgeführt. Die Ergebnisse daraus sind für die Ausziehfestigkeit in Abbildung 5 dargestellt.

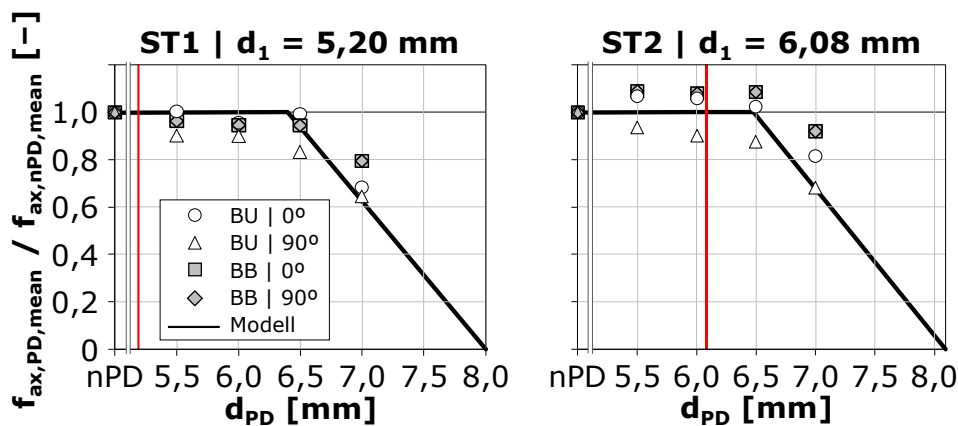


Abbildung 5: Relative Veränderung der Ausziehfestigkeit mit zunehmendem Vorbohrdurchmesser für BU und BB sowie  $\alpha = 0^\circ$  und  $90^\circ$ : ST1 (links), ST2 (rechts).

Dabei ist ersichtlich, dass bis zu einem Vorbohrdurchmesser von  $d_{PD} \leq 6,5$  mm unabhängig vom Schraubentyp, Holzprodukt und Achs-Faserwinkel im Mittel keine Abnahme in der Ausziehfestigkeit ( $f_{ax,PD,mean}$  vs.  $f_{ax,nPD,mean}$ ) feststellbar ist. Selbiges wurde auch für den Verschiebungsmodul  $K_{ser,ax}$  festgestellt (Brandner et al. 2019a). Dieses Ergebnis überrascht insofern als die Gewindekerndurchmesser von ST1 und ST2 deutlich unterschiedlich sind. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass eine Mindestverankerungstiefe der Gewindeflanke im umliegenden Holzkörper von jeweils 0,75 bis 0,80 mm hier maßgebend ist. Ein vergleichbarer Ansatz wurde auch in Nakatani und Komatsu (2005) gewählt. Im Rahmen einer gutachterlichen Stellungnahme (Ringhofer et al. 2018) wurde dies zudem für BauBuche (BB) und unterschiedliche Schraubendurchmesser bestätigt. Vergleichbare Regelungen sind für geringe Schraubendurchmesser auch in der ETA-11/0190 (2018) zu finden. Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse wird daher folgende Regelung vorgeschlagen; siehe auch Brandner (2019):

$$d_{PD} \leq \min\{0,8 d; d - 1,5 \text{ mm}\} \quad (7)$$

Zudem wurde als weiterer Effekt festgestellt, dass bei Applikation mit Vorbohren die Ausziehfestigkeiten für  $\alpha = 0^\circ$  höher sind als bei Applikation ohne Vorbohren. Dies hat zur Folge, dass die  $1/k_{90}$ -Beiwerte ebenfalls ansteigen und der im Mittel festgestellte 10% Unterschied zwischen ST2 und ST1 durch einen höheren Effekt bei ST2 verschwindet.

## 4. Langzeiteffekte auf die Ausziehfestigkeit faserparallel applizierter Holzbauschrauben

### 4.1. Vorwort und Motivation

Wie dem Kapitel 1 zu entnehmen, ist die statisch-konstruktive faserparallele Applikation von Holzbauschrauben nur bedingt zugelassen. Laut EC 5 ist diese nicht erlaubt, laut gegenwärtigen europäischen technischen Bewertungen, basierend auf EAD 130118-00-0603 (2016), möglich, aber auf einem sehr konservativen Niveau. Feuchte- und Langzeiteinflüsse (DoL) auf die Tragfähigkeit von Holzbauprodukten sind im EC5 durch den Modifikationsfaktor  $k_{mod}$  geregelt. Dieser unterscheidet bei Vollholz, BSH, BSP und LVL jedoch nicht in Hinblick auf die Art der Beanspruchung noch zwischen Nutzungsklasse (NK) 1 und 2. Um den vermuteten höheren DoL Effekt bei axial auf Zug beanspruchten Holzbauschrauben und kleinen Achs-Faserwinkeln zu berücksichtigen wurde der  $1/k_{90}$ -Faktor bewusst auf ein konservatives Niveau von 0,30 gesetzt.

Die Erweiterung des Kenntnisstandes betreffend DoL hat daher für faserparallele aber auch generell für Applikationen bei  $\alpha < 45^\circ$  hohe Priorität. In der jüngeren Vergangenheit wurden dahingehend bereits einzelne Forschungsaktivitäten durchgeführt, u.a. von Rosowsky und Reinhold (1999), Pirnbacher und Schickhofer (2012), Uibel und Blaß (2013) sowie Koj und Trautz (2016). Die bisherigen Ergebnisse aus diesen Untersuchungen sind zum einen beschränkt auf Nadelholz und zum anderen oftmals noch nicht verfügbar bzw.

nicht eindeutig in den Aussagen. Aufgrund dessen wurden im Rahmen vom Forschungsprojekt «hardwood\_SCREWS» DoL-Untersuchungen an selbstbohrend, faserparallel in Nadel- und Laubholzprodukten applizierten Holzbauschrauben gestartet, welche aktuell in den zwei weiteren Forschungsvorhaben «SCREWS\_STIFFNESS» und «hardwood joint» weiter betreut und intensiviert werden. Erste Ergebnisse nach 2,25 Jahren Standdauer wurden in Brandner et al. (2019b) publiziert und werden im Folgenden zusammenfassend dargelegt.

## 4.2. Material und Methoden

Die DoL Untersuchungen beschränken sich auf die Holzarten FI und BU, die Produkte Vollholz und LVL (BauBuche; BB), beide Schraubentypen ST1 und ST2 sowie auf ein konstantes Klima entsprechend NK 2 mit 20°C und 85% rel. Luftfeuchte Für die Referenz- und DoL-Prüfungen wurde eine «pull-pull» Konfiguration gewählt. Die Verankerungslänge des Gewindes inkl. der Schraubenspitze, appliziert ohne Vorbohren, beträgt 60 mm. Aufgrund der Empfehlung in Pirnbacher und Schickhofer (2012) bei faserparalleler Verschraubung das Schraubengewinde zur Sicherstellung eines definierten Vorholzbereiches in das Holz einzubinden wurden unterschiedliche Einbindelängen  $l_{emb} = 0, 2$  und  $4 d$  in die Untersuchungen aufgenommen.

Für die DoL Prüfungen selbst wurde ein eigener Prüfrahmen sowie ein Messsystem zur Kontrolle der Last über die Zeit und des Versagenszeitpunktes entwickelt. Als Höhe der konstanten Belastung (Lastniveau; LL) in den DoL Untersuchungen wurden 60, 70 bzw. 80% des Mittelwertes der statischen Kurzzeittragfähigkeit gewählt. Geprüft werden je Konfiguration, definiert über {Holzart, Produkt, Schraubentyp, Einbindelänge, Laststufe}, Ketten von zeitgleich je drei Probekörpern und somit je sechs Schrauben. Insgesamt ist es das Ziel, je Konfiguration Daten von 12 bis 14 Schrauben zu erhalten. Weitere Informationen zu den DoL Untersuchungen sind Mayr (2018) sowie Brandner et al. (2019b) zu entnehmen.

## 4.3. Ergebnisse und Diskussion

Die mittleren Holzfeuchten bei den Proben ergeben sich zu 16% in Fichte und 15% in Buche und BauBuche. Der Unterschied ist auf den höheren Hystereseeffekt bei Buche im Zusammenhang mit der Adsorptionsphase zurückzuführen.

Bei den statischen Kurzzeitprüfungen wurde bei Variation der Einbindelänge des Gewindes im Mittel eine Erhöhung der Ausziehfestigkeit von +13% bei  $l_{emb} = 2 d$  und +17% bei  $l_{emb} = 4 d$  festgestellt.

Nach 2,25 Jahren DoL-Untersuchungszeitraum sind nahezu alle Serien in FI und BB der Laststufe LL = 80% und rd. 50% der Serien bei LL = 70% abgeschlossen. Für die Serien LL = 60% sind vereinzelt Versagensfälle gegeben. Bei Buche ist die Ausfallsrate deutlich geringer. Als Grund dafür wird der im Vergleich zu vorhergehenden Untersuchungen relativ geringe Referenzwert vermutet.

Die Ergebnisse für FI und BB sind in Abbildung 6 dargestellt. Darin wurden alle Daten auf eine schadensäquivalente Zeit entsprechend einer konstanten Last umgerechnet und zudem jedem Wert nach Madsen (1992) ein individuelles Lastniveau zugewiesen wodurch der Informationsgehalt der Daten deutlich gesteigert werden konnte (siehe Brandner et al. 2019b). Der Grund für einzelne Werte bis 10 Jahre liegt am Umstand, dass einzelne Ketten über einen längeren Zeitraum zu hoch belastet wurden was in Folge zu einer höheren Gewichtung der beobachteten Ausfallszeiten führt.

Gemäß der Daten zeigt sich, dass zwischen beiden Schraubentypen ST1 und ST2 sowie der Gewinde-Einbindetiefen  $l_{emb}$  im Wesentlichen kein Unterschied im DoL Verhalten gegeben ist sofern der Referenzwert, wie in den vorliegenden Datenanalysen, der jeweiligen Konfiguration entspricht. Unter Ansatz des Modells von Pearson (1972), welches auch als Grundlage für die gegenwärtigen Regelungen zu DoL im EC 5 dient, wurde der folgende Zusammenhang als repräsentativ für die bisherigen Daten gefunden:

$$LL \cong 85,0 - 4,43 \log_{10}(T_f) \quad (8)$$

mit LL in [%] der mittleren Kurzzeittragfähigkeit und  $T_f$  in [h]. Tabelle 6 stellt die Ergebnisse der damit errechneten  $k_{mod}$ -Beiwerte für NK 2 jenen nach EC 5 und zwei DoL-Modellen der Literatur gegenüber. Im Allgemeinen zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus den bisherigen DoL-Untersuchungen an axial beanspruchten, faserparallel und selbstbohrend applizierten Holzbauschrauben mit den Werten der DoL Modelle aus der Literatur und dem EC 5.

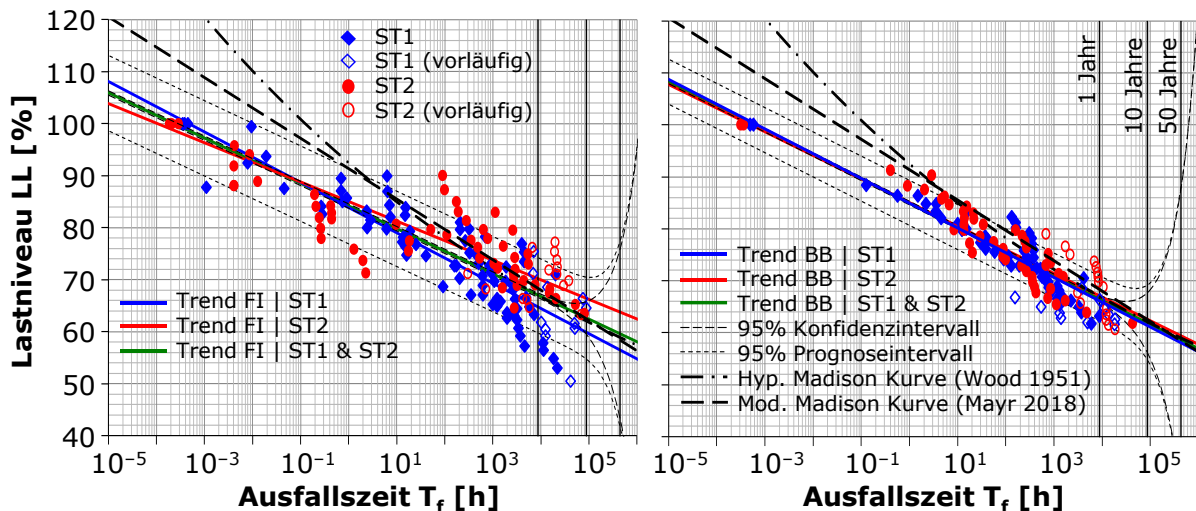


Abbildung 6: Vorläufige Ergebnisse aus den DoL Prüfungen nach 2,25 Jahre Standbetreuung bewertet für eine konstante Beanspruchung: Lastniveau LL vs. Ausfallszeit; FI (links), BB (rechts).

Tabelle 6: Modifikationsfaktoren  $k_{mod}$  für NK 2 und unterschiedliche Klassen der Lasteinwirkungsdauer gemäß EC 5 im Vergleich mit DoL-Modellen der Literatur und dem DoL-Modell gemäß dem gegenwärtigen Ergebnisstand für faserparallel applizierte, axial auf Herausziehen beanspruchte Holzbauschrauben in NH und LH.

Klasse der Lasteinwirkungsdauer (KLED)	EC 5 NK 1 & 2	Wood (1951) <sup>3)</sup>	Pearson (1972) <sup>3)</sup>	ST1 & ST2 FI & BB <sup>2) 3)</sup>
ständig (> 10 a)	0,60	0,62	0,57	0,63
lang (6 m – 10 a)	0,70	0,69	0,66	0,69
mittel (1 w – 6 m)	0,80	0,77	0,76	0,75
kurz (< 1 w)	0,90	0,92 (1 h <sup>1)</sup> )	0,92 (1 h <sup>1)</sup> )	0,85 (1 h <sup>1)</sup> )
sehr kurz (nicht spez.)	1,10	1,08 (1 min <sup>1)</sup> )	1,04 (1 min <sup>1)</sup> )	1,05 (1/10 s <sup>1)</sup> )

<sup>1)</sup> angenommene Lasteinwirkungsdauer; Wert in EC 5 nicht spezifiziert  
<sup>2)</sup> Basis Pearson (1972), jedoch mit  $LL \cong 85,0 - 4,43 \log_{10}(T_f)$   
<sup>3)</sup> Modellvorhersagen beziehen sich auf die untere Grenze der Lasteinwirkungsdauer in der jeweiligen KLED

Zusammenfassend kann zum gegenwärtigen Stand der Untersuchungen festgehalten werden, dass die  $k_{mod}$ -Faktoren, wie sie gegenwärtig im EC 5 verankert sind, auch für axialbeanspruchte, faserparallel applizierte Verschraubungen anwendbar gelten. Weiters wurde kein Unterschied im DoL-Verhalten zwischen Nadel- und Laubholz, beiden Schraubentypen sowie den untersuchten Gewinde-Einbindelängen festgestellt. Untersuchungen zum DoL-Verhalten bei veränderlicher Klimabelastung und von Schraubengruppen sind anvisiert.

## 5. Beanspruchung Schraubengruppe: Bestimmung von Mindestanforderungen an Geometrie & Ausführung

### 5.1. Vorwort und Motivation

Im Sinne der unter Kapitel 1 beschriebenen Motivation eines Hirnholzanschlusses werden nachfolgend Möglichkeiten und Leistungsfähigkeiten dieser diskutiert. Dabei gilt der Fokus einem Hirnholzanschluss mit einer Kopfplatte aus Stahl, wodurch die möglichen Versagensmechanismen um das Kopfdurchziehen reduziert und folglich eingeschränkt werden auf (i) Herausziehen, (ii) Stahlzugbruch der Schrauben, (iii) Herausscheren des Holzblockes, welcher durch die Gruppe eingeschlossen wird, (iv) Aufspalten und (v) Netto-Querschnittversagen des Bauteils. Das Ziel dabei ist es, die spröden Versagensmechanismen des Anschlusses, (iii) bis (v), durch entsprechende geometrische Randbedingungen und

Ausführungsregeln auszugrenzen und die Leistungsfähigkeit der Verbindungsmittelgruppe so zu gestalten, dass die volle Tragfähigkeit jeder einzelnen Schraube in der Gruppe abgerufen werden kann, mit  $n_{ef,mean} = n$ ,  $n$  als vorhandene und  $n_{ef,mean}$  als mittlere, effektiv wirksame Anzahl an Schrauben in der Gruppe.

## 5.2. Material und Methoden

Mit Fokus auf einen hochleistungsfähigen Hirnholzanschluss wird ausschließlich der Schraubentyp ST2 appliziert in BU und BB betrachtet. Die Prüfungen wurden abermals bei einem Referenzklima von 20°C und 65 % rel. Luftfeuchte durchgeführt.

Zur Ermittlung der minimalen Rand- und Zwischenabstände wurde ein mehrstufiges Verfahren angewandt: Zuerst wurden Einschraubprüfungen mit Einzelschrauben in Probekörper mit quadratischem Querschnitt vorgenommen, um den Mindest-Randabstand  $a_{2,C}$  zum Applizieren von Schrauben ohne Spalten der Probe zu bestimmen. Dabei wurde der Querschnitt so lange stufenweise um 0,5 d erhöht bis nacheinander ein Einschrauben ohne Spalten in fünf Proben möglich war. Dabei wurden die Applikationsbedingungen (mit Vorbohren ( $d_{PD} \cong d_1$ ) vs. ohne Vorbohren; neue Schraube mit intakter Gleitbeschichtung vs. bereits benutzte Schrauben) variiert. Anschließend wurden in BauBuche Gruppen von  $n = 3 \times 3$  Schrauben mit  $a_2 = 2 d$ ,  $a_{2,C} = 1,5$  bzw.  $2 d$  und  $l_{ef} = 120$  mm mit demselben Ziel analysiert.

Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend «pull-pull» Ausziehprüfungen an  $n = 1 \times 3$  Schrauben durchgeführt. Dabei wurde zuerst  $a_{2,C} = 4,4 d$  gewählt und  $a_2$  solange variiert bis  $n_{ef,mean} = n$  erzielt wurde. Danach wurde  $a_{2,C}$  in Kombination mit dem auf Basis der Ausziehprüfungen bestimmten  $a_2$  überprüft, wiederum mit dem Ziel,  $n_{ef,mean} = n$  zu erreichen. Aufgrund der bevorzugten Spaltrichtung der BauBuche in radialer Richtung (quer zu den Lagen) wurden für  $a_2$  beide Richtungen getestet. Zudem wurde der Einfluss der Einbindelänge des Gewindes,  $l_{emb}$ , auf die Abstände betrachtet.

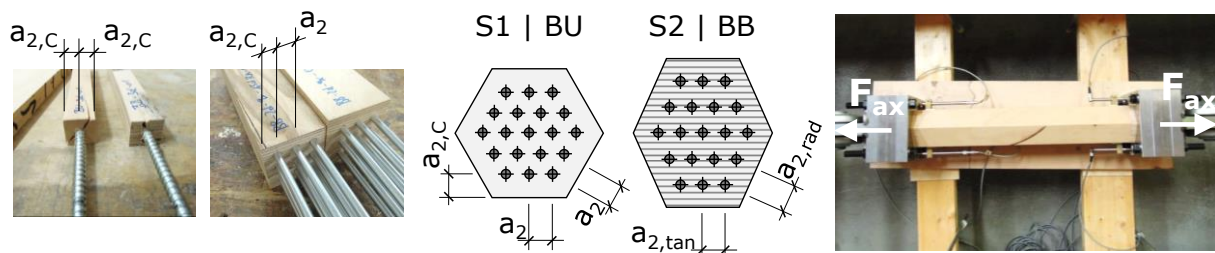


Abbildung 7: Einschraubprüfungen: Einzelschrauben und Schraubengruppen (links); Querschnitte und Abstände geprüfter Hirnholzanschlüsse (mittig); Prüfkörper mit beidseitigem Hirnholzanschluss im Prüfgerüst (rechts).

Nach Ermittlung der geometrischen Mindestbedingungen wurden Versuche an Hirnholzanschlüssen, ebenfalls unter Verwendung einer «pull-pull» Konfiguration und beidseits 19 Schrauben gleicher Konfiguration, durchgeführt. Um eine weitgehend reine axiale Beanspruchung ohne Zusatzmomente aus Zwängungen zu erzielen, wies diese Konfiguration eine Gelenkkette auf. Um die Mindestabstände bestmöglich zu überprüfen, wurde für die Hirnholzanschlüsse ein sechseckiger Querschnitt gewählt. Weitere Details können Koppauer (2017), Eckerstorfer (2017) und Brandner (2019) entnommen werden. Aus dem umfangreichen Prüfprogramm werden in Folge vier Serien mit je sechs Proben näher betrachtet.

## 5.3. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 7 fasst die Ergebnisse für die Mindestrand- ( $a_{2,C}$ ) und -zwischenabstände quer zur Faser ( $a_2$ ) aus den Einschraub- und Ausziehprüfungen für die Applikationsbedingungen mit (PD) / ohne Vorbohren (nPD) zusammen. Nicht in dieser Tabelle enthalten ist der Vergleich «neue» vs. «alte» Schrauben. In diesem wurde festgestellt, dass bei erneuter Benutzung von Schrauben für ein spaltfreies Applizieren  $a_{2,C}$  um 0,5 d zu erhöhen ist. Gemäß Tabelle 7 halbieren sich die Mindestabstände weitgehend bei Applikation mit Vorbohren und reduziert sich  $a_2$  um 1 d bereits bei einer Gewinde-Einbindelänge von  $l_{emb} = 2 d$ . Für die BauBuche ergeben sich höhere Zwischenabstände in radialer als in tangentialer Richtung ( $a_{2,rad} = a_{2,tan} + 2 d$ ). Zudem ist festzuhalten, dass auf Basis von Einschraubprüfungen



bereits gute Erkenntnisse betreffend die Mindestanforderungen an Rand- und -zwischenabstände gewonnen werden konnten, diese aber auf Basis von Ausziehprüfungen noch nach oben zu korrigieren sind.

Tabelle 7: Mindestrand- und -zwischenabstände quer zur Faser für Hirnholzanschlüsse: Ergebnisse aus Einschraub- und Ausziehprüfungen mit «neuen» Schrauben in BU und BB für ST2.

Produkt	$l_{emb}$ [d]	Einschraubprüfungen			«pull-pull» Ausziehprüfungen		
		nPD	PD		nPD	PD	
		$a_{2,C}$ [d]	$a_2$ [d]	$a_{2,C}$ [d]	$a_2$ [d]	$a_2$ [d]	$a_{2,C}$ [d]
BU	0 d	2,5 d	-	1,25 d	>> 5 d	3 d	>> 1,5 d
	2 d	-	-	-	-	2 d	>> 1,5 d
BB (rad.)	0 d	3,75 d	2 d	2 d	-	5 d	3 d
	2 d	-	-	-	-	4 d	3 d
BB (tang.)	0 d	3,75 d	2 d	2 d	-	3 d	3 d

Gemäß der Zielsetzung wurden die Schrauben in den Hirnholzanschlüssen vorgebohrt appliziert. In beiden Produkten, BU Vollholz und BU LVL, wurden die Hirnholzanschlüsse mit 19 Schrauben ident an beiden Enden der Probekörper ausgeführt und für  $l_{emb} = 2$  d bzw. 8,4 d, für  $a_{2,C} = 3$  d und für  $a_{2,BU}$  und  $a_{2,BB,tan} = 3$  d sowie für  $a_{2,BB,rad} = 4$  d gewählt. Die Ergebnisse aus diesen Prüfungen in Form von Traglasten sind als Box-Plots in Abbildung 8 zusammengefasst.

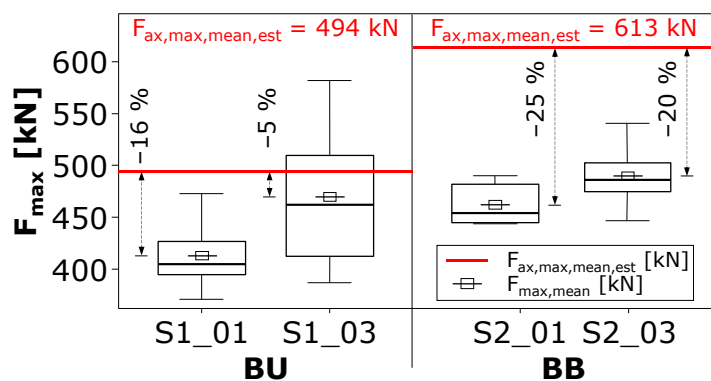


Abbildung 8: Box-Plots der Traglasten aus den «pull-pull» Zugprüfungen an Hirnholzanschlüssen in BU und BB im Vergleich mit den Ziel-Traglasten.

Bei den Serien S1\_01 und S2\_01, beide mit  $l_{emb} = 2$  d, kam es bei allen Proben zu einem vorzeitigen Versagen durch Aufspalten, d.h. der Zielversagensmechanismus und in Folge auch die Zieltragfähigkeit wurden nicht erreicht. Nach Änderung der Gewinde-Einbindelänge von  $l_{emb} = 2$  d auf 8,4 d wurde bei allen Proben der Serie S1\_03 in Buche ein Ausziehversagen beobachtet. Im Vergleich mit der Zieltragfähigkeit zeigt sich im Mittel eine Differenz von nur 5% welche allerdings durch den Umstand erklärbar ist, dass hier ein serielles System geprüft wurde, d.h., dass von den beiden Hirnholzanschlüssen jener mit der geringeren Tragfähigkeit die Traglast der Probe bestimmt. In BauBuche hatte die Erhöhung der Einbindelänge allerdings nur einen geringen Einfluss: Obwohl bereits 50% der Proben auf Herausziehen versagten, ist die Differenz zur Zieltragfähigkeit mit im Mittel 20% noch immer sehr ausgeprägt. Eine weitere Serie mit einer größeren Einbindelänge ist anvisiert.

Die Notwendigkeit von großen Gewinde-Einbindelängen bei Hirnholzverschraubungen in Hartlaubholz wurde bereits in Grabner und Ringhofer (2014) berichtet. Sie untersuchten Hirnholzanschlüsse in Birke (*Betula pendula*) mit einer identen Prüfkfiguration,  $a_{2,C} = 2,8$  d,  $a_2 = 2,1$  bis 3,0 d und  $l_{emb} = 5$  d. Obwohl ausgelegt auf Stahlbruch kam es in 2 / 13 Proben zum Aufspalten. Die Ergebnisse ergaben  $n_{ef,mean} = 0,92$  n; der mittlere Ausnutzungsgrad des Brutto-Querschnitts wurde zu  $\eta_{mean} = 0,54$  abgeschätzt. Westermayr und van de Kuilen (2019) untersuchten Hirnholzanschlüsse in Buche (*Fagus sylvatica*). Für die Konfiguration  $a_{2,C} = 1,5$  d,  $a_2 = 2$  d und  $l_{emb} = 4,5$  d, ausgelegt auf den Versagensmechanismus Herausziehen, wurde im Mittel  $n_{ef,mean} = 0,7$  n erzielt. Man beachte: Aufgrund der gewählten Prüfkfiguration mit beidseitiger Einspannung sind zusätzliche Momentenbeanspruchungen aus Zwängungen nicht auszuschließen.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Laubholz wird in seiner Bedeutung für den konstruktiven Ingenieurholzbau zunehmen. Mit Bezug auf die Anschluss Technologie und mit Fokus auf axial beanspruchte Verschraubungen ergeben sich unterschiedliche Herausforderungen, wie das Applizieren ohne Vorbohren auch in Holzbauprodukten mit hoher Rohdichte sowie über größere Einschraubblängen, die auf Basis von Modellen realitätsnähere Erfassung der Ausziehkräftegrößen spezifisch für Laubholz zur Quantifizierung des Potentials, gegenwärtig das Fehlen zuverlässiger Kenntnisse zum DoL-Verhalten von Schrauben allgemein und von Verschraubungen bei kleinen Achs-Faserwinkeln im Besonderen, sowie die Notwendigkeit kompakter Anschlüsse mit maximaler Leistungsfähigkeit und die damit einhergehende fehlende Kenntnis betreffend geometrischer Randbedingungen und Ausführung. Die im Rahmen dieses Beitrages diskutierten Themen und Ergebnisse sollen einen Beitrag zur Lösung dieser Herausforderungen leisten und entsprechende Anschlusskapazitäten in hochleistungsfähigen Bauprodukten aus Hartlaubholz unter Verwendung von axial-beanspruchten Holzbauschrauben zuverlässig zu realisieren und ihre Wirtschaftlichkeit zu steigern. Dahingehende wesentliche Erkenntnisse werden im Folgenden nochmals zusammenfassend dargelegt:

- Im Rahmen des Forschungsvorhaben «hardwood\_SCREWS» wurde eine Hartlaubholzschraube (ST2) entwickelt. Diese Schraube, welche unter dem Namen RAPID® hardwood seitens der Fa. Schmid Schrauben Hainfeld GmbH / AT produziert und vertrieben wird (ETA-12/0373 2017), erlaubt die Applikation ohne Vorbohren in Holzbauprodukten hoher Rohdichte auch bei großen Einschraubblängen und weist zudem eine um 36% höhere Zugtragfähigkeit als herkömmliche Schrauben mit gleichem Nenndurchmesser auf.
- Die Erkenntnisse aus eigenen umfangreichen Ausziehversuchen, durchgeführt an Einzelschrauben in Nadel-, zerstreut- und ringporigen Laubholzarten mit einer Rohdichtebandbreite von rd. 350 bis 900 kg/m<sup>3</sup>, ergänzt um Daten aus der Literatur ermöglichen die Erweiterung eines generischen Modellansatzes zur Bestimmung der Ausziehfestigkeit von Nadelholz nun auch für Laubholz. Dieses Modell erlaubt eine konsistente Bestimmung der Ausziehfestigkeit von Holzbauschrauben appliziert in Vollholz sowie Brettbasierten unidirektional sowie orthogonal geschichteten Produkten wie BSH und BSP.
- Der gegenwärtige Stand der Ergebnisse aus den Langzeituntersuchungen an faserparallel selbstbohrend applizierten und axial auf Zug beanspruchten Holzbauschrauben in Nadel- und Laubholz bei konstanten NK 2 Klimabedingungen deutet auf ein mit anderen Beanspruchungsarten von Holz vergleichbares Verhalten hin. Die Gegenüberstellung von  $k_{mod}$ -Werten aus diesen Untersuchungen und jenen des EC 5 für NK 2 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Zusätzliche DoL Untersuchungen an Achs-Faserwinkeln von  $\alpha = 15^\circ, 30^\circ$  und  $45^\circ$  sind gegenwärtig laufend und weitere Untersuchungen bei veränderlichen Klimabedingungen und an Kleingruppen anberaumt.
- Die Applikation von Holzbauschrauben mit Vorbohren, obwohl auf den ersten Blick hinsichtlich wirtschaftlicher Gesichtspunkte fraglich, weist in einigen Bereichen durchaus erhebliche Vorteile auf: (i) Bereits bei  $d_{PD} \cong d_1$  halbiert sich der Eindrehwiderstand; (ii) zumindest für Hirnholzanschlüsse wurde festgestellt, dass sich die Mindestrand- und -zwischenabstände bei Applikation mit Vorbohren ( $d_{PD} \cong d_1$ ) nahezu halbieren. Zudem ergeben sich etwas höhere Ausziehfestigkeiten bei faserparalleler Verschraubung, was zu einem Ausgleich der 10% Differenz zwischen ST1 und ST2 bei  $\alpha = 0^\circ$  führte.
- Das Ziel, die volle Leistungsfähigkeit jeder Schraube ( $n_{ef,mean} = n$ ) in Hirnholzanschlüssen abzurufen, gilt für die Buche als erreicht. Bei sehr kompakten Gruppen mit  $a_2$  und  $a_{2,c} = 3 d$  wird empfohlen, das Gewinde um  $l_{emb} = 10 d$  zu versenken um ausreichend Vorholz zur Aufnahme der Querkraftkräfte zur Verfügung zu stellen. Für die BauBuche sind noch weitere Untersuchungen notwendig.

## 7. Danksagung

Die Grundlage für den vorliegenden Beitrag wurden primär im Rahmen des Forschungsprojektes FFG BRIDGE 1 «hardwood\_SCREWS» (No. 850748), sowie darüber hinaus im Forschungsprojekt FFG BRIDGE 1 «SCREW\_STIFFNESS» (No. 861554) erarbeitet. Beide Projekte erhielten öffentliche Fördermittel von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). Diese sowie jene Unterstützung durch die Wirtschaftspartner, Schmid Schrauben Hainfeld GmbH, Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Landeskammer für Land und Forstwirtschaft Steiermark (ARGE Holzwerbebeitrag) und WIEHAG GmbH, werden dankend erwähnt. Hervorzuheben sind zudem die Motivation und Anstrengungen welche von Hrn. Matthias Pöll, Hrn. Tobias Reichinger, Hrn. Lothar Koppauer und Hrn. Peter Mayr im Rahmen ihrer Masterarbeiten sowie von Fr. Birgit Eckerstorfer im Zuge ihres Masterprojektes dargelegt wurden. Zudem ist die Unterstützung durch das Forschungsprojekt «hardwood\_joint», welches unter dem Schirm von ERA-NET über ForestValue kofinanziert wird durch BMLFUW (AT), ADEME (FR), FNR (DE) und Vinnova (SE), dankend zu nennen. ForestValue erhält unter N° 773324 Förderungen aus dem Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union.

## 8. Quellenverzeichnis

- Blaß HJ, Bejtka I, Uibel T (2006) Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Karlsruhe, Germany, Volume 4, ISBN 3-86644-034-0 (in German).
- Blaß HJ, Uibel T (2007) Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Karlsruhe, Germany, Vol. 8, ISBN 978-3-86644-129-3 (in German).
- Brandner R, Ringhofer A, Grabner M (2017) Probabilistic Models for the Withdrawal Behaviour of Single Self-Tapping Screws in the Narrow Face of Cross Laminated Timber (CLT). *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1):13–30.
- Brandner R (2016) Group Action of Axially-Loaded Screws in the Narrow Face of Cross Laminated Timber (CLT). *World Conference on Timber Engineering (WCTE)*, Vienna, Austria.
- Brandner R (2019) Properties of axially loaded self-tapping screws with focus on application in hardwood. *Wood Material Science & Engineering*, 14(5):254–268.
- Brandner R, Ringhofer A, Reichinger T (2019a) Performance of axially-loaded self-tapping screws in hardwood: Properties and design. *Engineering Structures*, 188, 677–699.
- Brandner R, Ringhofer A, Sieder R (2019b) Duration of Load Effect on Axially-Loaded Self-Tapping Screws Inserted Parallel to Grain in Soft- and Hardwood. *Conference paper 52-9-1, INTER-Meeting 6*, Tacoma, WA, USA.
- EAD 130118-00-0603 (2016) Screws for use in timber constructions. *European Assessment Document*, EOTA.
- Eckelman CA (1988) The withdrawal strength of screws from a commercially available medium density fiberboard. *Forest Products Journal*, 38(5), 21–24.
- Eckerstorfer B (2017) Gruppenversuche in Hartlaubholz (Buche). Master project, Graz University of Technology, Graz, Austria (in German).
- EN ISO 10666 (1999) Drilling Screws with Tapping Screw Thread – Mechanical and Functional Properties. *European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 1382 (1999) Timber Structures – Test Methods – Withdrawal Capacity of Timber Fasteners. *European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 14080 (2013) Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements. *European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 14358 (2016) Timber structures – Calculation and verification of characteristic values. *European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 14374 (2016) Timber structures – Laminated veneer lumber (LVL) – Requirements. *Draft Version*. *European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 14592 (2012) Timber structures – Dowel-type fasteners – Requirements. *European Committee for Standardization (CEN)*.
- EN 15737 (2009) Timber Structures – Test methods – Torsional resistance of driving in screws. *European Committee for Standardization (CEN)*.

- EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008 + A2:2014 (2014) Eurocode 5: Design of Timber Structures – Part 1-1: General – Common Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization (CEN).
- Ehrhart T, Steiger R, Palma P, Frangi A (2018) Mechanical properties of European beech glued laminated timber. Conference paper 51-12-4, INTER-Meeting 5, Tallinn, Estonia.
- ETA-11/0190 (2018) Self-Tapping Screws for Use in Timber Constructions: Würth Self-Tapping Screws. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt).
- ETA-12/0373 (2017) Self-Tapping Screws for Use in Timber Constructions: Schmid Schrauben RAPID®, STARDRIVE and SP (Schmid Schrauben Hainfeld GmbH). Austrian Institute of Construction Engineering (OIB), Vienna, Austria.
- ETA-14/0354 (2018) Glued Laminated Timber Made of Hardwood – Structural Laminated Veneer Lumber Made of Beech (Pollmeier BauBuche GL75). Austrian Institute of Construction Engineering (OIB), Vienna, Austria.
- Fairchild IJ (1926) Holding Power of Wood Screws. Department of Commerce, Technologic Papers of the Bureau of Standards, No. 319, Washington, United States of America.
- Grabner M, Ringhofer A (2014) Investigations Concerning the Loadbearing Behaviour of End-Grain Joints in Hardwood. Internationales Holzbau-Forum, Prolog IV, Garmisch-Partenkirchen, Germany (in German).
- Hübner U (2013) Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile. Dissertation, Graz University of Technology, Graz, Austria (in German).
- Koj C, Trautz M (2016) Long-term behaviour of timber connections with self-tapping screws in outdoor climate. WCTE, Vienna, Austria.
- Koppauer L (2017) Optimierung von axial beanspruchten Hirnholz-Schraubverbindungen in Hartlaubholz. Master thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria (in German).
- Madsen B (1992) Structural behaviour of timber. Timber Engineering Ltd., Vancouver, Canada, ISBN 0-9696162-0-1.
- Mayr P (2018) Einfluss konstanter Langzeitbeanspruchung (DoL) auf die Tragfähigkeit selbstbohrender Holzschrauben appliziert in Faserrichtung in Fichte, Buche und BauBuche. Master thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria (in German).
- McLain TE (1997) Design axial withdrawal strength from wood: I. Wood screws and lag screws. Forest Products Journal, 47(5), 77–84.
- Mombächer R (1988) Holz-Lexikon: Nachschlagewerk für die Holz- und Forstwirtschaft. Stuttgart, Germany (in German).
- Nakatani M, Komatsu K (2005) Mechanism of pull-out performance in lagscrewbolted timber joints I. Effects of lead hole diameter, embedment depth, embedment direction and edge distance on pull-out performance. Mokuzaï Gakkashi 51(2), 125–130.
- Newlin JA, Gahagan JM (1938) Lag-Screw Joints: Their Behavior and Design. United States Department of Agriculture, Technical bulletin No. 597.
- Pearson RG (1972) The effect of duration of load on bending strength of wood. Holzforschung, 26(4):153–158.
- Pirnbacher G, Brandner R, Schickhofer G (2009) Base Parameters of Self-Tapping Screws. International Council for Research and Innovation in Building and Construction – Working Commission W18 – Timber Structures, CIB-W18:42-7-1. Dübendorf, Switzerland.
- Pirnbacher G, Schickhofer G (2012) Zeitabhängige Entwicklung der Traglast und des Kriechverhaltens von axial beanspruchten, selbstbohrenden Holzschrauben. Research Report, Competence Centre Holz.Bau Forschungs GmbH, Graz University of Technology, Graz, Austria (in German).
- Pöll M (2017) Entwicklung einer Hartlaubholzschraube: Optimierung der Gewindegeometrie für die Beanspruchung auf Herausziehen. Master thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria (in German).
- Reichinger T (2017) Ausgewählte Untersuchungen zum Tragverhalten einer für Hartlaubholz optimierten Holzbauschraube. Master thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria (in German).
- Ringhofer A, Brandner R, Schickhofer G (2015a) A Universal Approach for Withdrawal Properties of Self-Tapping Screws in Solid Timber and Laminated Timber Products. International Network on Timber Engineering Research (INTER), 2nd Meeting, INTER/48-7-1, Sibenik, Croatia.
- Ringhofer A, Brandner R, Schickhofer G (2015b) Withdrawal resistance of self-tapping screws in unidirectional and orthogonal layered timber products. Materials and Structures, 48, 1435–1447.
- Ringhofer A (2017) Axially Loaded Self-Tapping Screws in Solid Timber and Laminated Timber Products. Dissertation, Graz University of Technology, Graz, Austria.

Ringhofer A, Brandner R, Schickhofer G (2018) Beurteilung des Einflusses des Vorbohrdurchmessers auf die Tragfähigkeit und Steifigkeit ausgewählter, axial beanspruchter Holzbauschrauben. Gutachterliche Stellungnahme GU18-470-1-01, Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Lignum Test Centre (LTC), Graz University of Technology, Graz, Austria (in German).

Schneider P (1999) Auszugsfestigkeit von EJOT-Rahmenschrauben. ETH Zürich, Zürich, Switzerland (in German).

Rosowsky DV, Reinhold TA (1999) Rate-of-load and duration-of-load effects for wood fasteners. *Journal of Structural Engineering*, 125(7):719–724.

Uibel T, Blaß HJ (2013) Joints with Dowel Type Fasteners in CLT Structures. Focus Solid Timber Solutions: European Conference on Cross Laminated Timber (CLT): The State-of-the-Art in CLT Research. COST Action FP1004, Graz, Austria.

Westermayr M, Stapel P, Van de Kuilen JW (2018) Tensile and compression strength of small cross section beech (*Fagus s.*) glulam members. Conference paper 51-12-2, INTER-Meeting 5, Tallinn, Estonia.

Westermayr M, Van de Kuilen JW (2019) Withdrawal strength of screws and screw groups in European beech (*Fagus s.*) parallel to the grain. Conference paper 52-07-2, INTER-Meeting 6, Tacoma, WA, USA.

Wilkinson TE, Laatch TR (1970) Lateral and withdrawal resistance of tapping screws in three densities of wood. *Forest Products Journal*, 20(7), 34–41.

Wood LW (1951) Relation of strength of wood to duration of load. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, Report No. 1916.